Aktuální stav a budoucí trendy využití FACTS v přenosových a distribučních soustavách

Pracoviště: KEE

Číslo dokumentu: 22190-012-2025

Typ zprávy: Výzkumná zpráva

Řešitelé: doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D., David Fictum, Ing. et Ing. Martin Vinš

Vedoucí projektu: Ing. et. Ing. Martin Vinš

Počet stran: 103

Datum vydání: 2. 11. 2025

Oborové zařazení: 2.2 Electrical engineering, Electronic engineering, Information engineering - Electrical and electronic engineering

Zadavatel / zákazník:

ČEPS, a. s.
Elektrárenská 774/2
101 52 Praha 10
Česká republika

Zpracovatel / dodavatel:

Západočeská univerzita v Plzni
Research and Innovation Centre
for Electrical Engineering
Univerzitní 8
306 14 Plzeň

Kontaktní osoba:

Ing. et Ing. Martin Vinš
tel. 377634195
mvins@fel.zcu.cz

Tato zpráva vznikla s podporou projektu TAČR NCK TN 02000025 NCE II.

Anotace

Tato výkumná zpráva se věnuje komplexnímu přehledu technologií FACTS (Flexible AC Transmission Systems), které představují moderní nástroje pro řízení výkonových toků, napětí a stability v elektrizačních soustavách. Dokument rozebírá jednotlivé typy zařízení FACTS – paralelní (SVC, STATCOM), sériové (TCSC, SSSC) i kombinované (UPFC, IPFC) – včetně jejich principů fungování, provozních vlastností, výhod a nevýhod, technologické připravenosti (TRL) a příkladů reálných aplikací. Pozornost je věnována modulárním zařízením M-FACTS, jejichž modularita a flexibilita umožňují efektivní nasazení v přenosových i distribučních sítích. V závěru jsou shrnuty směry výzkumu a technologického rozvoje technologie FACTS.

Klíčová slova

Přenosová soustava, řízení výkonových toků, stabilita elektrizační soustavy, paralelní kompenzace, sériová kompenzace, FACTS, M-FACTS, D-FACTS.

Report title

Current State and Future Trends in the Application of FACTS in Transmission and Distribution Systems

Abstract

This research report provides a comprehensive overview of Flexible AC Transmission Systems (FACTS) technologies, which represent modern tools for controlling power flow, voltage, and system stability in electric power grids. The document discusses various types of FACTS devices — shunt (SVC, STATCOM), series (TCSC, SSSC), and combined (UPFC, IPFC) — including their operating principles, performance characteristics, advantages and disadvantages, technology readiness levels (TRL), and examples of real-world applications. Particular attention is given to modular FACTS (M-FACTS) devices, whose modularity and flexibility enable efficient deployment in both transmission and distribution networks. Finally, the report summarizes current research directions and technological development trends in FACTS technology.

Keywords

Transmission Grid, Power Flow Control, Power System Stability, Shunt Compensation, Series Compensation, FACTS, M-FACTS, D-FACTS.

Seznam symbolů a zkratek

FACTS	Flexible AC transmission system
OZE	Obnovitelné zdroje energie
STATCOM	Static Synchronous Compensator (statický synchronní kompenzátor)
SVC	Static Var Compensator (statický kompenzátor jalového výkonu)
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor (tyristorově řízený sériový kondenzátor)
TCSR	Thyristor Controlled Series Reactor (tyristorově řízený sériový reaktor)
TSSC	Thyristor Switched Series Capacitor (tyristorově spínaný sériový kondenzátor)
GCSC	Gate Controlled Series Capacitor (gatem řízený sériový kondenzátor)
SSSC	Static Synchronous Series Compensator (statický synchronní sériový kompenzátor)
UPFC	Unified Power Flow Controller (unifikovaný regulátor výkonových toků)
IPFC	Interline Power Flow Controller (mezilinkový regulátor výkonových toků)
DG	Distributed Generation (decentralizovaná/distribuovaná výroba)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
VSC	Voltage Source Converter (měnič napěťového zdroje)
TRL	Technology Readiness Level (úroveň technologické připravenosti)
GFC	Grid Forming Converter (síťotvorný měnič)
MOV	Metal-Oxide Varistor (varistor na bázi oxidů kovů)
NYPA	New York Power Authority
NYISO	New York Independent System Operator
OC	Overcurrent (nadproudová ochrana, v části o ochranách)
CSC	Convertible Static Compensator
D-FACTS	Distributed FACTS (distribuovaná FACTS zařízení)
PV	Photovoltaic (fotovoltaika, v souvislosti s PV-STATCOM)
WT	Wind Turbine (větrná turbína)
THD	Total harmonic distorsion (celkové harmonické zkreslení)

Obsah

1 ÚVOD 7

2 FACTS (FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEM) 8

2.1 Řízení výkonových toků 8

2.2 Rozdělení zařízení FACTS 10

2.3 Hlavní přínosy a nevýhody FACTS 12

2.4 Trh se zařízeními FACTS 14

3 PARALELNÍ ZAŘÍZENÍ FACTS 16

3.1 Statický kompenzátor jalového výkonu (SVC) 16

3.1.1 Popis funkce a provozní vlastnosti 16

3.1.2 Aplikace v PS a DS 19

3.1.2.1 Cape Cod, Massachusetts, USA 19

3.1.2.2 Brazílie 19

3.1.3 Náklady a úroveň připravenosti technologie 20

3.2 Statický synchronní kompenzátor (STATCOM) 21

3.2.1 Popis funkce a provozní vlastnosti 21

3.2.2 E-STATCOM – 2. generace STATCOMů 23

3.2.3 Aplikace v PS a DS 24

3.2.3.1 Velká Británie 24

3.2.3.2 Itálie 27

3.2.3.3 Německo 28

3.2.3.4 Aplikace mimo Evropu 30

3.2.3.4.1 Punta Lima, Portoriko 30

3.2.3.4.2 USA 30

3.2.3.4.3 Čína 31

3.2.4 Náklady a úroveň připravenosti technologie 31

3.3 Porovnání zařízení SVC a STATCOM 32

4 SÉRIOVÁ ZAŘÍZENÍ FACTS 35

4.1 Tyristorově řízený sériový reaktor (TCSR) 35

4.1.1 Popis funkce a provozní vlastnosti 35

4.1.2 Aplikace v PS a DS 36

4.1.3 Náklady a úroveň připravenosti technologie 36

4.2 Tyristorově spínaný sériový kondenzátor (TSSC) 36

4.2.1 Popis funkce a provozní vlastnosti 37

4.2.2 Úroveň připravenosti technologie 37

4.3 Tyristorově řízený sériový kondenzátor (TCSC) 38

4.3.1 Popis funkce a provozní vlastnosti 38

4.3.2 Aplikace v PS a DS 39

4.3.2.1 Kayenta, Arizona, USA 39

4.3.2.2 Slatt, Oregon, USA ... 40
4.3.2.3 Stöde, Švédsko ... 40
4.3.2.4 Purnea–Gorakhpur, Indie ... 41
4.3.2.5 Sinjangjin a Samyangjin, Jižní Korea ... 41
4.3.2.6 Distribuční síť ... 41
4.3.3 Náklady a úroveň připravenosti technologie ... 42
4.4 STATICKÝ SYNCHRONNÍ SÉRIOVÝ KOMPENZÁTOR (SSSC) ... 43
4.4.1 Popis funkce a provozní vlastnosti ... 43
4.4.2 M-SSSC - 2. generace zařízení SSSC ... 45
4.4.3 Aplikace v PS a DS ... 45
4.4.3.1 National grid, Velká Británie ... 45
4.4.3.2 UK Power Networks, Velká Británie ... 46
4.4.3.3 Torres del Segre, Španělsko ... 48
4.4.3.4 Medellín, Kolumbie ... 48
4.4.3.5 Další aplikace m-SSSC ... 48
4.4.4 Náklady a úroveň připravenosti technologie ... 49
4.5 POROVNÁNÍ ZAŘÍZENÍ PRO SÉRIOVOU KOMPENZACI ... 50
5 KOMBINOVANÁ ZAŘÍZENÍ FACTS ... 52
5.1 UNIFIKOVANÝ REGULÁTOR VÝKONOVÝCH TOKŮ (UPFC) ... 52
5.1.1 Popis funkce a provozní vlastnosti ... 52
5.1.2 Modifikované typy UPFC ... 53
5.1.3 Aplikace v PS a DS ... 55
5.1.3.1 USA ... 56
5.1.3.2 Čína ... 56
5.1.3.3 Kangjin Substation, Korea ... 59
5.1.4 Náklady a úroveň připravenosti technologie ... 59
5.2 MEZILINKOVÝ REGULÁTOR VÝKONOVÝCH TOKŮ (IPFC) ... 60
5.2.1 Popis funkce a provozní vlastnosti ... 60
5.2.2 Aplikace v PS a DS ... 61
6 INOVATIVNÍ TYPY REGULÁTORŮ FACTS ... 63
6.1 GATEM ŘÍZENÝ SÉRIOVÝ KONDENZÁTOR (GCSC) ... 63
6.1.1 Popis funkce a provozní vlastnosti ... 63
6.1.2 Úroveň připravenosti technologie ... 64
6.2 HYBRIDNÍ REGULÁTOR VÝKONOVÝCH TOKŮ HPFC ... 65
6.3 ŘIDITELNÝ SÍŤOVÝ TRANSFORMÁTOR CNT S ODDĚLENÝM REGULÁTOREM S UZAVŘENOU REGULAČNÍ SMYČKOU ... 66
6.4 VÍCEVINUŤOVÝ TRANSFORMÁTOR MWT ... 67
6.5 DALŠÍ ALTERNATIVNÍ REGULÁTORY ... 68
7 D-FACTS A M-FACTS ZAŘÍZENÍ ... 70
7.1 MODULÁRNÍ FACTS ... 71

7.2 DFACTS 72
7.2.1 Distribuovaná sériová kompenzace DSSC 73
7.2.2 Dynamický regulátor napětí DVR 74
7.2.3 Distribuované řízení výkonových toků DPFC 75
7.2.4 Unifikovaný regulátor kvality elektrické energie UPQC 75
8 OPTIMALIZACE PROVOZU ZAŘÍZENÍ FACTS 78
8.1 OPTIMALIZACE UMÍSTĚNÍ A NASTAVENÍ ZAŘÍZENÍ FACTS 78
8.1.1 Optimalizační metody 78
8.1.2 Simulační nástroje 80
8.2 ŘÍDICÍ ALGORITMY PRO ZAŘÍZENÍ D-FACTS 84
8.2.1 Algoritmy ve frekvenční oblasti (Frequency-Domain Algorithms) 85
8.2.2 Algoritmy v časové oblasti (Time-Domain Algorithms) 85
9 MANAŽERSKÉ SHRNUTÍ 88
9.1 PŘÍNOSY TECHNOLOGIE FACTS 88
9.2 AKTUÁLNÍ STAV VÝVOJE A VYUŽITÍ TECHNOLOGIE FACTS V EVROPĚ A VE SVĚTĚ 89
9.3 SMĚRY VÝZKUMU A TECHNICKÉHO ROZVOJE 90

1 Úvod

Rostoucí požadavky na stabilitu, spolehlivost a hospodárnost provozu elektrizačních soustav vedou k nutnosti implementace moderních technologií pro řízení výkonových toků a napěťových poměrů. Tradiční zařízení, založená na mechanickém spínání nebo pevných úpravách parametrů sítě, často nedokáží dostatečně rychle a přesně reagovat na dynamické změny zatížení a poruchové stavy. S rozvojem výkonové elektroniky v 80. a 90. letech 20. století se objevila nová generace zařízení, známá pod souhrnným označením **FACTS – Flexible AC Transmission Systems**, která umožňuje pružné a rychlé řízení parametrů střídavých přenosových sítí.

Jak již název zařízení napovídá, tato zařízení přispívají k flexibilitě ES. Flexibilita může být zajištěna na straně výroby (Generation Flexibility) a na straně spotřeby (Demand Flexibility). K flexibilitě ES může ale přispívávat i samotná přenosová síť (Transmission Flexibility).

Flexibilita přenosové soustavy je schopnost sítě rekonfigurovat se v reakci na očekávané nebo neočekávané změny v různých časových horizontech za účelem dosažení maximální přenosové kapacity mezi výrobou a spotřebou.

Mezi hlavní technologie a postupy, které umožňují flexibilitu přenosové soustavy, tedy schopnost sítě adaptovat se na změny v zatížení, výrobě a provozních podmínkách, patří:

- FACTS
- Změny v topologii sítě (Topology Control) – preventivní nebo korekční
- PST (Phase Shifting Transformers) – řízení fázového posunu napětí mezi uzly/oblastmi sítě
- HVDC (High Voltage Direct Current)
- DLR (Dynamic Line Rating) - dynamická ampacita vedení na základě aktuálních podmínek (teplota, vítr).

FACTS zařízení využívají polovodičové součástky k regulaci veličin, jako jsou činný a jalový výkon, napětí, impedance vedení nebo fázový úhel napětí mezi uzly soustavy. Díky tomu tak mohou zvyšovat přenosovou kapacitu vedení, optimalizovat tok výkonu mezi jednotlivými částmi sítě, zlepšovat stabilitu a snižovat provozní ztráty.

Zavádění FACTS zařízení tak může přinést provozovatelům soustav řadu výhod, včetně zvýšení využitelnosti stávající infrastruktury bez nutnosti výstavby nových vedení, zlepšení dynamické a přechodové stability, tlumení výkonových oscilací a snadnější integrace obnovitelných zdrojů energie. Jejich větší rozšíření však bývá limitováno vysokými investičními náklady, složitostí řízení a nutností pečlivé integrace do stávajících ochran a řídicích systémů.

Vzhledem k narůstající komplexnosti a variabilitě moderních elektrických sítí se tak FACTS zařízení postupně stávají důležitým nástrojem pro efektivní a spolehlivé řízení přenosových i distribučních soustav.

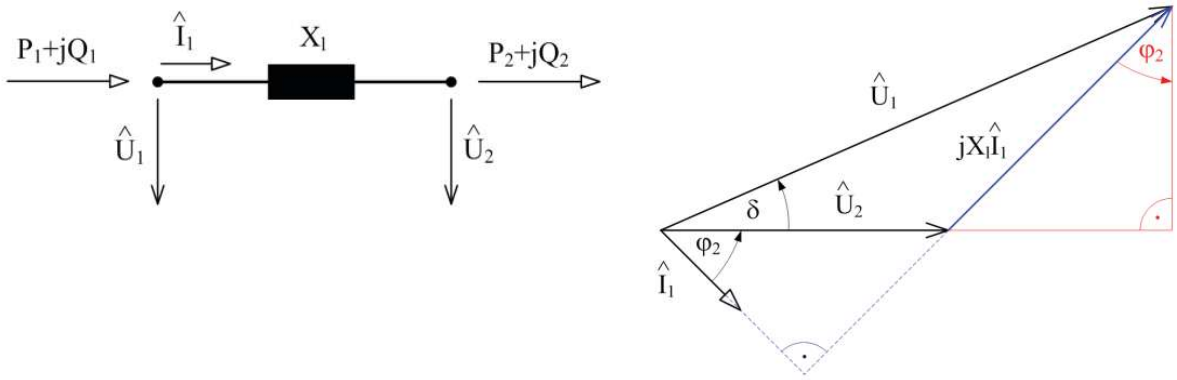
Technologie HVDC je obsahem samostatné výzkumné zprávy.

2 FACTS (Flexible AC Transmission System)

Zařízení FACTS (Flexible AC Transmission Systems) využívají výkonové polovodičové prvky a měniče k aktivnímu řízení parametrů střídavých přenosových a distribučních soustav. Lze je rozdělit na pasivní prvky, kondenzátory nebo reaktory, spínané tyristory, a na aktivní prvky, které se chovají jako řízené zdroje napětí nebo proudu realizované pomocí měničů, které dokáží generovat řízené napětí nebo proud s požadovanou amplitudou a fází vůči síti. Díky velmi krátké reakční době v řádu milisekund mohou zasahovat do dynamických přechodových dějů po různých poruchách či omezovat nízkofrekvenční oscilace synchronních generátorů. Nedávno vyvinuté distribuované FACTS (D-FACTS) nebo modulární FACTS (M-FACTS) poskytují stejnou funkcionalitu s výhodou modularity, s nižšími náklady a vyšší flexibilitou.

2.1 Řízení výkonových toků

Problematika řízení výkonových toků je diskutována ve volně přístupné literatuře [76], kde je uvedena teorie, možnosti řízení, princip základních FACTS regulátorů a popis prvků a měničů výkonové elektroniky, které se v těchto zařízeních využívají. Zde uvádíme pouze základní vztahy pro pochopení problematiky.



Obr. 2.1 Napěťové a výkonové poměry na přenosové lince [76]

Činný a jalový výkon přenášený přes vedení je reprezentován těmito rovnicemi:

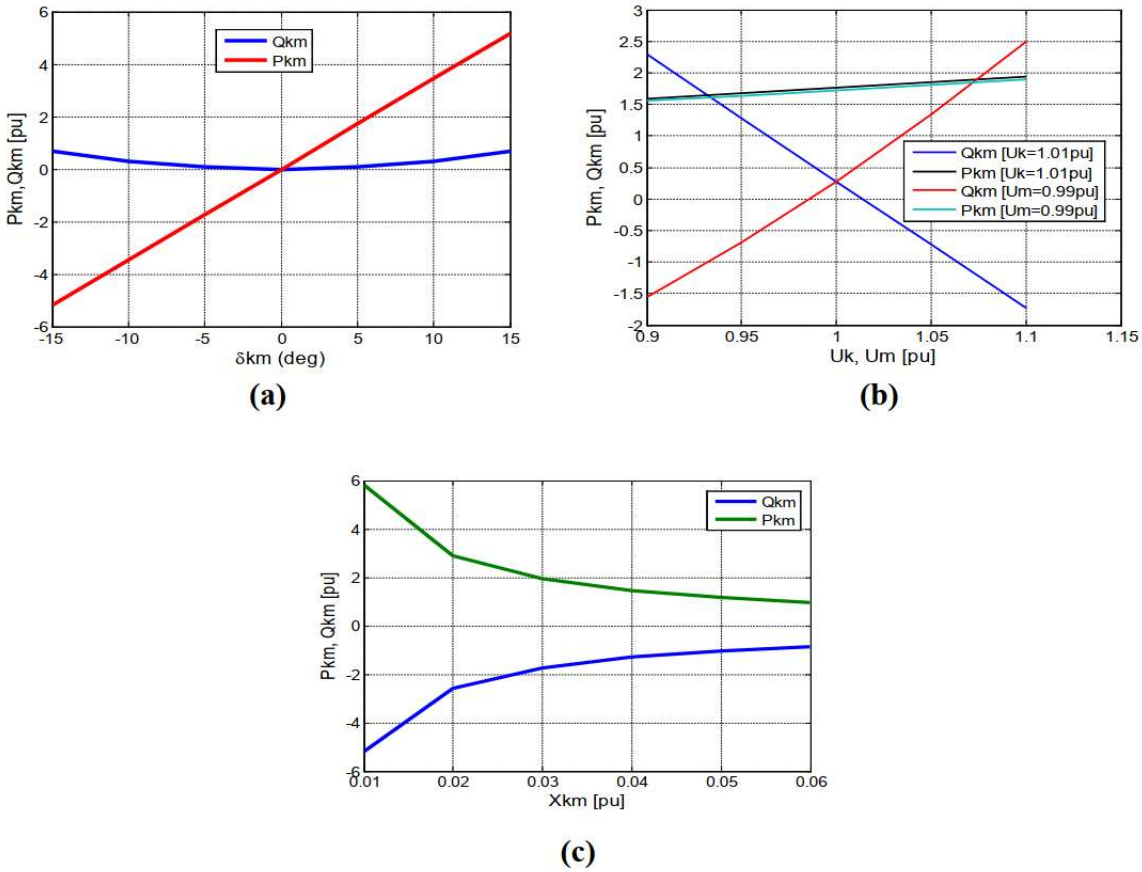
$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{X} \sin\delta \quad \text{a} \quad Q = \frac{U_1^2}{X} - \frac{U_1 \cdot U_2}{X} \cdot cos\,\delta \cong \frac{U_1}{X} \cdot (U_1 - U_2) \qquad (1)$$

Podle těchto rovnic je možné výkonové toky řídit pomocí:

- Zátěžného úhlu δ
- Reaktancí vedení X
- Napětími U_1 a U_2 na koncích vedení, jejich velikostí a rozdílem.

Následující grafy znázorňují vliv změn každého ze tří parametrů na přenášený činný a jalový výkon.

- Úprava fázového posunu má hlavní vliv na přenášený činný výkon.
- Regulace napětí v uzlech ovlivňuje především tok jalového výkonu.
- Změna reaktance vedení působí současně na činný i jalový výkon.

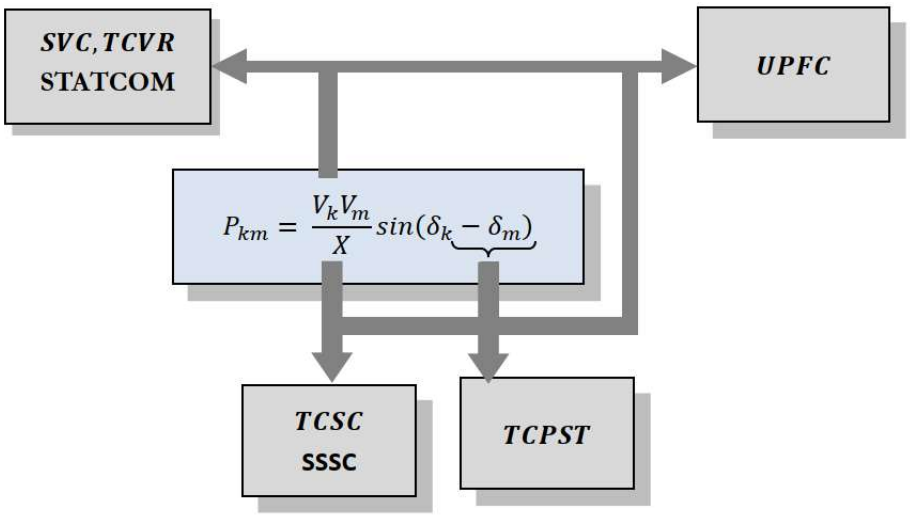


Obr. 2.2 Vliv různých parametrů na přenášený činný a jalový výkon, a) zátěžný úhel, b) napětí na koncích vedení, c) reaktance vedení [56]

Z teoretického pohledu je možné za účelem řízení toku činného a jalového výkonu ovlivňovat jeden nebo více parametrů ve vztazích pro přenášený P a Q pomocí různých výkonových prvků a zařízení. Základními možnostmi jsou instalace některého z uvedených systémů [76]:

- paralelní pasivní prvek, např. SVC
- sériový pasivní prvek, např. TCSC
- paralelní vstřikování proudu, např. STATCOM
- sériové vstřikování napětí, např. SSSC
- kombinace více prostředků, např. UPFC.

V závislosti na konkrétních cílech řízení se používají různé typy regulátorů FACTS. Výběr konkrétního regulátoru FACTS závisí na požadovaných řídicích akcích a funkcionalitách. Následující obrázek znázorňuje možné strategie řízení pro regulaci přenášeného činného výkonu na přenosové lince.



Obr. 2.3 Strategie řízení různých zařízení FACTS pro navýšení přenášeného výkonu [56]

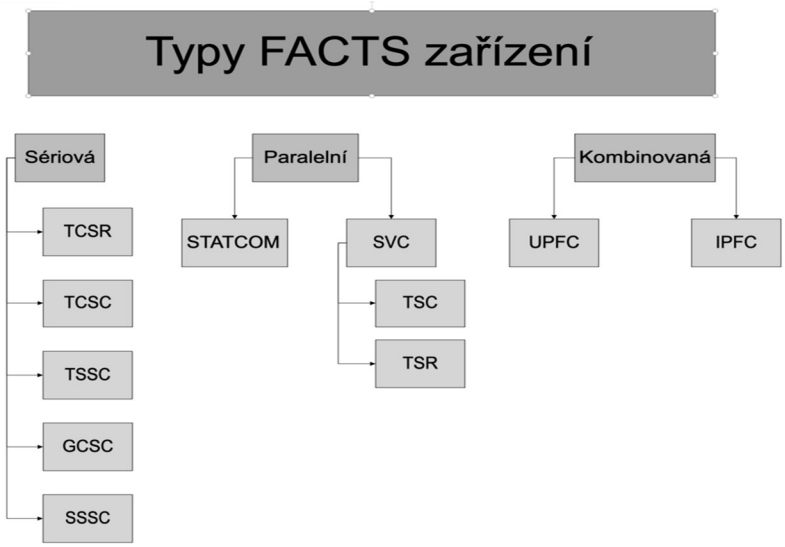
Více o principech řízení výkonových toků a možnostech regulačních prostředků uvádí [76] a [56].

2.2 Rozdělení zařízení FACTS

Podle zapojení do sítě lze FACTS dělit na paralelní, sériové a kombinované (Obr. 2.4).

- **Paralelně připojená zařízení** – zařízení připojená paralelně k vedení určená zejména pro regulaci velikosti napětí a jalového výkonu.
    - Statický kompenzátor jalového výkonu (SVC)
        - Tyristorově spínaný/řízený kondenzátor (TSC, TCC)
        - Tyristorově spínaný/řízený reaktor (TSR. TCR)
    - Statický synchronní kompenzátor (STATCOM) aj.
- **Sériově připojená zařízení** – zařízení připojená sériově na vedení, umožňující řízení reaktance vedení a toků především činného výkonu.
    - Tyristorově spínaný sériový kondenzátor (TSSC)
    - Tyristorově řízený sériový kondenzátor (TCSC)
    - Gatem řízený sériový kondenzátor (GCSC)
    - Tyristorově řízený sériový reaktor (TCSR)
    - Statický synchronní sériový kompenzátor (SSSC)
- **Kombinovaně připojená zařízení** – propojující vlastnosti obou předchozích skupin, schopná současně ovlivňovat více parametrů (reaktanci, napětí a fázový posun), a tudíž toky činných i jalových výkonů, a optimalizovat provoz celé soustavy.
    - Unifikovaný regulátor výkonových toků (UPFC)
    - Mezilinkový regulátor výkonových toků (IPFC)

V literatuře se můžeme setkat i s dalšími zařízeními FACTS, např. TCPS (Thyristor-Controlled Phase Shifter), DVR (Dynamic Voltage Restorer), UPQC (Unified Power Quality Conditioner), IPC (Interphase Power Controller) aj. Jedná se o modifikace základních zařízení určené pro specifické účely, např. korekci kvality napětí.

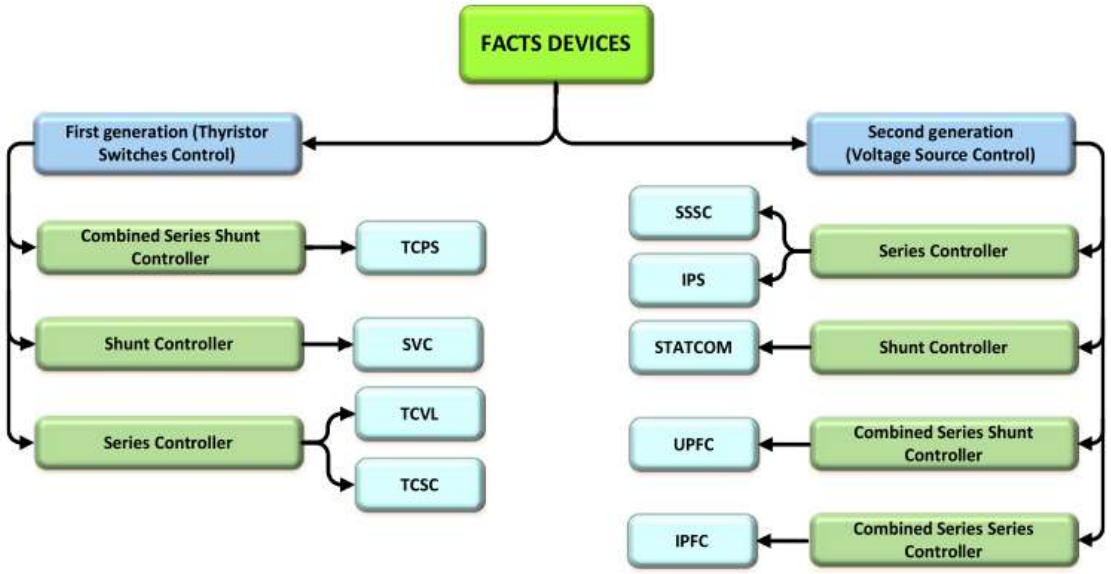


Obr. 2.4 Dělení FACTS podle zapojení do sítě [3]

Technologicky se FACTS dělí na dvě generace:

- **Pasivní zařízení**, využívající tyristorově spínané kondenzátory a reaktory.
    - TCSC (Thyristor-Controlled Series Compensator)
    - SVC (Static VAR Compensator)
- **Aktivní zařízení**, založené na měničích typu VSC (Voltage Source Converter), které se chovají jako řízené zdroje napětí nebo proudu.
    - SSSC (Static Synchronous Series Compensator)
    - STATCOM (Static Synchronous Compensator)
    - UPFC (Unified Power Flow Controller)
    - IPFC (Interline Power Flow Controller)

Obě generace FACTS se výrazně liší svými provozními a výkonnostními charakteristikami. Druhá generace nabízí lepší provozní vlastnosti ve srovnání s první generací. FACTS první generace představují pasivní síťové prvky spínané tyristory. FACTS druhé generace jsou tvořeny VSC (voltage source converter) a chovají se jako zdroje, tedy představují aktivní sítové prvky. Měniče VSC používají samokomutující výkonové polovodičové součástky, např. tyristory GTO (Gate Turn-off Thyristor), tranzistory IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) a tyristory IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor). VSC se vyznačují se flexibilitou a rychlou odezvou, což je činí vhodnými pro dynamické aplikace. Mezi jejich nevýhody patří vznik harmonických (zhoršení kvality napětí), ztráty při spínání (nižší účinnost a zvýšené tepelné namáhání komponent) a složité řídicí algoritmy. Nejnovější koncepce FACTS pak využívají modulární víceúrovňové měniče (Modular Multilevel Converters – MMC), které umožňují generovat napětí s velmi nízkým obsahem harmonických a současně nezávisle řídit činný i jalový výkon [21], [47], [48], [15]. Informace o používaných výkonových polovodičových součástkách, o tyristorových měničích, tyristorovém spínání a řízení, měničích typu VSC jejich řízení a o víceúrovňových měničích jsou uvedeny v [76].



Obr. 2.5 Dělení FACTS podle použitých prvků výkonové elektroniky [1]

2.3 Hlavní přínosy a nevýhody FACTS

Technologie FACTS vznikla po problémech, které se objevily v 80. letech 20. století s výstavbou přenosových vedení, jako vhodná alternativa k tradičním metodám. Tab. 1 analyzuje problémy, které vedly ke vzniku zařízení FACTS a jejich vliv na řešení těchto problémů [1].

Tab. 1 Problémy, které vedly ke vzniku FACTS

Problém	**Popis**	**Řešení nabízené zařízeními FACTS**	**Současný stav a výzvy**
Přetížení	Vysoká poptávka po energii vede k přetížení vedení a snížení účinnosti	Tato technologie zlepšuje tok výkonu a snižuje přetížení vyvažováním zátěží	Řízení rostoucí poptávky bez nové infrastruktury zůstává náročné
Nestabilita napětí	Pokles napětí (sag voltage)	Tato technologie zvyšuje stabilitu napětí dynamickým řízením výkonu	Složitost integrace s obnovitelnými zdroji
Ztráty přenosové kapacity	Nedostatečná kapacita vede k neefektivnímu přenosu	Tato technologie zlepšuje využití a kapacitu vedení bez nutnosti stavby nových linek	Omezená kapacita v hustě zastavěných městských oblastech
Dlouhá přenosová vzdálenost	Velká vzdálenost přenosu vede ke zvýšeným ztrátám	Tato technologie snižuje přenosové ztráty a umožňuje realizovat přenos na velké vzdálenosti	Zajištění spolehlivosti při ultra dlouhých přenosech
Environmentální omezení	Výstavba nových vedení je komplikována ekologickými omezeními	Tato technologie snižuje potřebu budovat nová vedení	Omezená škálovatelnost představuje zásadní problém v citlivých oblastech

Hlavní přínosy technologie FACTS jsou:

- **Zvýšení přenosové kapacity** – FACTS umožňují efektivnější využití stávající přenosové a distribuční infrastruktury bez nutnosti budování nových a potenciální oddálení nákladných rozšiřování sítě.
- **Zlepšení stability systému** – tlumení oscilací výkonu, zvýšení dynamické i přechodové stability, zejména při integraci intermitentní výroby z obnovitelných zdrojů.
- **Řízení toku výkonu** – možnost směrovat tok energie podle potřeby, čímž se snižuje přetížení vedení a zvyšuje odolnost sítě
- **Řízení jalového výkonu** – zajišťuje stabilní napěťový profil a snižuje ztráty.

- **Rychlá regulace napětí** – reakce v řádu milisekund, což je zásadní při poruchách nebo výkyvech zatížení.
- **Zlepšení parametrů kvality elektrické energie** – snížení napěťových výkyvů, kolísání napětí a harmonického zkreslení, vyšší spolehlivost dodávky
- **Podpora integrace OZE** – umožňuje navýšit připojitelný výkon, stability systému a kvalitu napětí.
- **Celkové zvýšení bezpečnosti a ekonomické efektivity provozu.**

V následujících tabulkách jsou uvedeny základní typy zařízení FACTS, jejich princip, účel, ke kterému se využívají a výhody [65], [37].

Tab. 2 Základní typy zařízení FACTS, jejich princip, účel, ke kterému se využívají a výhody (1)

Zařízení	**Technické vlastnosti**	**Princip činnosti**	**Výhoda**
1. U.P.F.C (Unified Power Flow Controller)	Optimalizace toku výkonu	Řídí vložené napětí, proud a impedanci vedení	Optimalizuje tok výkonu v systému
2. S.V.C (Static Var Compensator)	Kompenzace jalového výkonu	Mění paralelní kapacitanci	Jednoduché a levné řešení
3. S.S.S.C (Static Synchronous Series Compensator)	Regulace činného výkonu	Řídí ekvivalentní impedanci vedení	Nevznikají problémy s rezonancí
4. S.T.A.T.C.O.M (Static Synchronous Compensator)	Dynamická regulace napětí	Řídí vložený jalový proud	Rychlá odezva systému

Tab. 3 Základní typy zařízení FACTS, jejich princip, účel, ke kterému se využívají a výhody (2)

Funkce / Přínos	**SSSC** ***(Static Synchronous Series Compensator)***	**STATCOM** ***(Static Synchronous Compensator)***	**TCSC** ***(Thyristor Controlled Series Capacitor)***	**UPFC** ***(Unified Power Flow Controller)***	**IPFC** ***(Interline Power Flow Controller)***
Řízení toku výkonu	✓		✓	✓	✓
Regulace napětí	✓	✓	✓	✓	✓
Použití VSC (napěťově zdrojového měniče)	✓	✓		✓	✓
Řízení impedance systému	✓	✓	✓	✓	✓
Kompenzace jalového výkonu	✓	✓		✓	✓
Zlepšení přechodové stability	✓	✓	✓	✓	✓

Další tabulky shrnují možné využití zařízení FACTS pro řešení různých problémů v ES v ustáleném stavu [65] a v sítích s OZE [1].

Nevýhody technologie FACTS

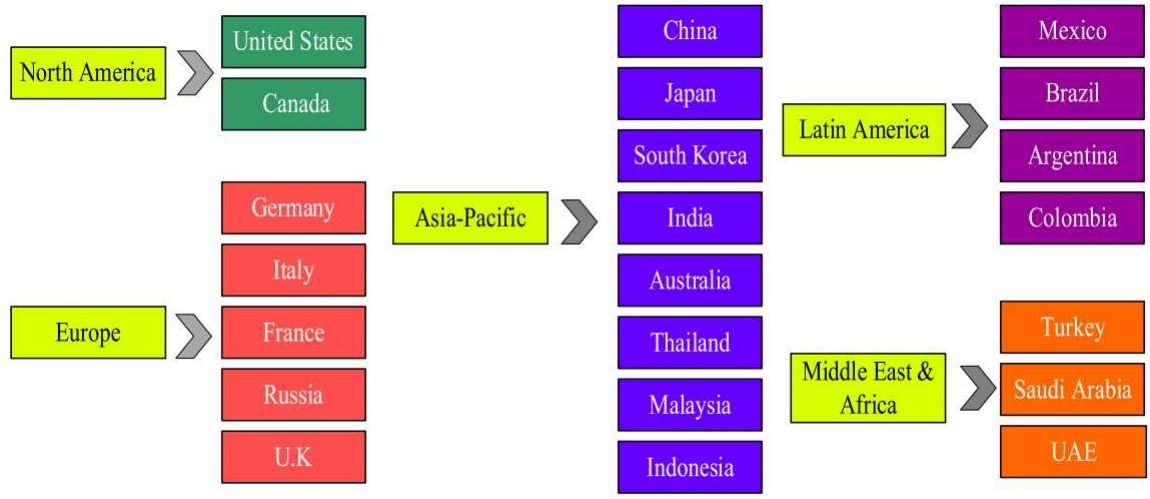
- **Vysoké pořizovací náklady** – zejména u pokročilých zařízení jako UPFC nebo MMC,
- **Složitost zařízení** – vyšší nároky na zajištění provozu, kvalifikovaný personál, náročnější údržba,
- **Citlivost na poruchy** – některé typy zařízení mohou být náchylné na přepětí nebo rušení,
- **Složitější řízení** – vyžaduje pokročilé algoritmy a koordinaci s ostatními prvky sítě, nutnost pečlivé integrace do stávajících ochranných a řídicích systémů,

- **Optimalizace umístění** – výběr správného typu a místa instalace je složitý a často vyžaduje pokročilé výpočty.

2.4 Trh se zařízeními FACTS

V období let 2024 až 2032 se očekává stabilní a pozitivní růst celosvětového trhu s těmito zařízeními. Velikost trhu v roce 2023 měla hodnotu 1350,5 milionu USD a do roku 2032 se předpokládá, že trh dosáhne 2688,49 milionu USD [2].

Region Asie a Tichomoří v současnosti dominuje globálnímu trhu s FACTS zařízeními. Tento trend je poháněn rychlou industrializací, urbanizací a rozsáhlým rozvojem infrastruktury. Země jako Čína, Indie, Japonsko a Jižní Korea patří mezi lídry v zavádění těchto technologií. Investice do modernizace elektrických sítí a rozvoj chytré infrastruktury je v tomto regionu podporována vládami. Ačkoliv Severní Amerika a Evropa mají významný podíl na trhu, hlavním tahounem globálního rozvoje FACTS je Asie a Pacifiku.



Obr. 2.6 Přední regiony na trhu se zařízeními FACTS [2]

Mezi hlavní společnosti, které formují trh s technologiemi FACTS patří **Hitachi ABB**, **Siemens**, **GE Grid Solutions**, **Mitsubishi Electric Corporation**.[1]

Tab. 4 Hlavní společnosti realizující FACTS

Firma	Země	Poznámka
Hitachi ABB Power Grids	Švýcarsko	Silný hráč v oblasti výkonové elektroniky a síťových řešení, nabízí např. STATCOM, SVC, TCSC, fixní sériovou kompenzaci
Siemens	Německo	Globální lídr v automatizaci a energetických systémech, nabízí např. STATCOM, E-STATCOM, SVC, fixní sériovou kompenzaci, UPFC
Mitsubishi Electric	Japonsko	Významný výrobce elektroniky a energetických zařízení, nabízí např. STATCOM, SVC
GE (General Electric)	USA	Dlouhodobý inovátor v oblasti energetiky a přenosových systémů, nabízí např. systémy sériové kompenzace, SVC, STATCOM

[1] https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/facts-devices-market-112443

Sieyuan Electric	Čína	Zaměřuje se na inteligentní přenos a distribuci elektrické energie, nabízí STATCOM, E-STATCOM
NR Electric	Čína	Dodavatel pokročilých řešení pro řízení elektrických sítí, nabízí STATCOM, SVC, sériovou kompenzaci, UPFC
Liaoning Rongxin Xingye Power Technology	Čína	Rychle rostoucí čínský výrobce FACTS technologií, nabízí SVC, fixní sériovou kompenzaci
Hyosung Heavy Industries	Jižní Korea	Aktivní v oblasti energetiky a průmyslových řešení, nabízí STATCOM
AMSC (American Superconductor)	USA	Zaměřuje se na pokročilé síťové technologie a výkonové měniče, nabízí STATCOM
Smart Wires	USA	Zaměřuje se na pokročilé síťové technologie, nabízí m-SSSC

V energetickém průmyslu se především prosadila zařízení SVC a STATCOM díky jejich vynikajícímu dynamickému výkonu a menším nárokům na prostor. Jsou široce využívány provozovateli přenosových soustav pro různé funkce, zejména kompenzaci jalového výkonu a stabilizaci napětí. V průběhu času došlo ke snížení investičních nákladů spojených s těmito technologiemi, což tyto technologie ještě více zatraktivnilo.

Naproti tomu sériová zařízení FACTS, která umožňují úpravu reaktance vedení, jsou zatím nasazována jen omezeně. Sériová kompenzace TCSC, navzdory své jednoduché technologii a rozumným investičním nákladům, se není tak žádaná kvůli omezenému rozsahu aplikací ve srovnání se zařízeními SVC a STATCOM a technickým problémům (nutnost bypassového ochranného systému).

Kombinovaná zařízení UPFC, která jsou v rozsahu aplikací a výkonu špičkovou technologií FACTS, byla nasazena pouze v několika případech kvůli vysokým investičním a provozním nákladům vyplývajícím z jejich složité konstrukce [75].

3 Paralelní zařízení FACTS

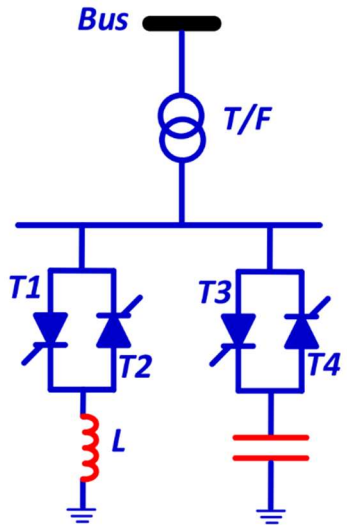
Tato zařízení patří mezi nejrozšířenější zařízení ze skupiny FACTS. Statický kompenzátor jalového výkonu SVR a statický synchronní kompenzátor STATCOM nachází uplatnění nejen v přenosových a distribučních sítích, ale i v průmyslu, např. těžkém průmyslu. Představují alternativu k synchronním kompenzátorům a mechanicky spínaným kondenzátorům a reaktancím.

3.1 Statický kompenzátor jalového výkonu (SVC)

SVC (Static Var Compensators) je sofistikované výkonové elektronické zařízení, které umožňuje přesnou a dynamickou regulaci/kompenzaci jalového výkonu. Často se využívají v průmyslových provozech nebo v sítích s OZE, kde dochází k rychlým změnám zatížení. V přenosových sítích se mohou používat k udržování velikosti napětí uprostřed dlouhého vedení, což zvyšuje jeho přenosovou kapacitu.

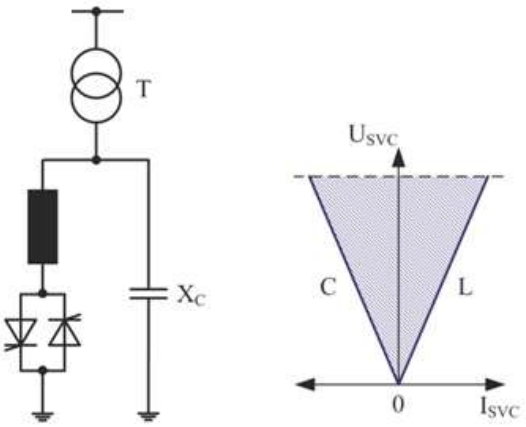
3.1.1 Popis funkce a provozní vlastnosti

SVC se sestává z kondenzátorů a reaktorů, které jsou spínané anebo fázově řízené tyristory (Obr. 3.1). Paralelní prvky mohou být tedy buď stupňovitě připínány, nebo plynule řízeny polovodičovým spínačem dle potřeby. V reálných aplikacích se jednotlivé prvky SVC využívají společně, čímž lze docílit plynulé regulace v celém rozsahu potřebného jalového výkonu.



Obr. 3.1 Schéma zapojení SVC [1]

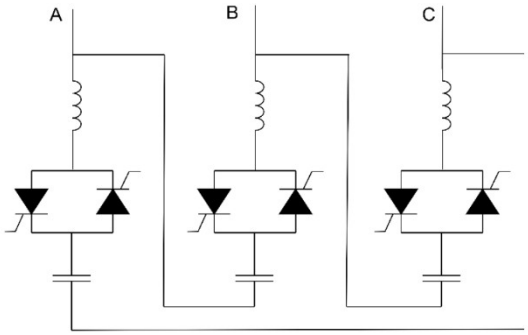
Pracovní rozsah SVC je určen reaktancemi tlumivek, kondenzátorů a případných zvyšovacích transformátorů. Nejjednodušší vnitřní zapojení SVC obsahuje fixně připojený kondenzátor a k němu paralelně připojený tyristorově řízený reaktor (TCR), Obr. 3.2. Voltampérová pracovní oblast paralelně připojeného zařízení obsahuje jednu polaritu napětí, ke kterému je zařízení připojeno a díky možnému dvojímu charakteru impedance obsahuje obě polarity kompenzačního jalového proudu. Maximální kompenzační proud je přímo úměrný napětí sítě a dodávaný, resp. absorbovaný jalový výkon je úměrný kvadrátu napětí. Pracovní oblast je ve vyšrafované oblasti V-A charakteristiky. Variabilním připínáním a odpínáním kapacitních sekcí lze dosáhnout rozšíření charakteristiky. Kapacity mohou být připínány mechanicky nebo tyristorově (TSC).



Obr. 3.2 SVC a jeho V-A pracovní oblast [76]

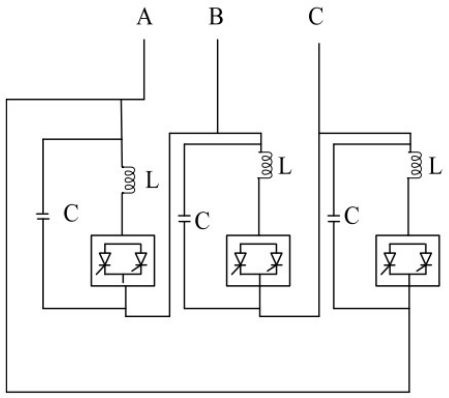
Hlavní funkcí tyristorově řízeného reaktor TCR je dodávat induktivní jalový výkon do systému při výskytu nadpětí. Řízením spínacího úhlu tyristorů lze efektivně regulovat proud reaktorem a tím i velikost induktivního jalového výkonu. Prakticky se používá rozsah 90°–120°, protože vyšší úhly způsobují nespojitý proud a tím i zvýšené harmonické zkreslení. Pro vlastní potlačení harmonických se pak využívají pokročilé topologie, jako je dvojité trojúhelníkové zapojení, kde se výkon dělí mezi dva vzájemně fázově posunuté trojúhelníky. Tím tak dochází k potlačení dominantních lichých harmonických a snížení celkového harmonického zkreslení THD bez potřeby externích filtrů. U tyristorově spínaného reaktoru TSR (Thyristor Switched Reactor) tyristory fungují pouze jako spínače, které celý reaktor připojují nebo odpojují od sítě. Regulace je tedy skoková, což znamená, že nelze plynule nastavovat hodnotu jalového výkonu jako u tyristorově řízeného reaktoru TCR. Hlavní výhodou TSR je však jeho jednoduchost a absence generování harmonických, díky čemuž není nutné použití dodatečných filtrů. Využívá se především v kombinaci s dalšími prvky SVC, kde poskytuje hrubé kroky kompenzace, zatímco jemné dolaďování obstarává TCR nebo jiné prvky [69], [70].

Hlavní funkcí tyristorově spínaného nebo řízeného kondenzátoru TSC/TCC je dodávat kapacitní jalový výkon do systému při výskytu podpětí. Řízením spínacího úhlu tyristorů TCC lze efektivně měnit kapacitu, a tím i množství dodávaného jalového výkonu. Při výskytu nadpětí jsou kondenzátory obvykle odpojeny, aby se zabránilo další dodávce jalového výkonu. Typický TSC bývá zapojen do trojúhelníku, aby se v něm uzavřely proudy třetí harmonické a nepronikaly dále do sítě a nedeformovaly křivku napětí. Kromě toho bývá do série s tyristorovými spínači zapojena tlumivka, která omezuje nárazové proudy a chrání zařízení při nestandardních provozních stavech [71].



Obr. 3.3 Zapojení TSC s ochrannou tlumivkou

Požadavky na zajištění vyšší úrovně kvality napětí se promítají do konstrukce zařízení FACTS. Vnitřní zapojení pokročilého SVC (advanded SVC) je na následujícím obrázku. Paralelně ke kondenzátoru je zapojený tyristorově řízený rektor TCR. Kondenzátory jsou zapojeny do trojúhelníku, což potlačuje třetí harmonickou a její liché násobky. Z důvodu ekonomických a technických omezení je napětí TCR omezeno na 50 kV či nižší. A-SVS omezuje harmonické zkreslení napětí a přechodové jevy [2].



Obr. 3.4 Vnitřní zapojení A-SVC [2]

Výhody instalace zařízení SVC

- Potlačení výkonových oscilací – SVC pomáhá stabilizovat kolísání výkonu v síti
- Zvýšení stability elektrické soustavy – přispívá ke spolehlivějšímu provozu přenosové soustavy
- Dynamické řízení jalového výkonu – umožňuje rychlou reakci na změny zatížení
- Zlepšení napěťových poměrů – navýšení připojitelného výkonu OZE

Nevýhody zařízení SVC

- Náročná instalace – finanční a prostorová náročnost
- Nižší rychlost odezvy než STATCOM
- Možnost vzniku harmonického rušení nebo jeho zesílení, což vyžaduje použití filtrů.

3.1.2 Aplikace v PS a DS

V přenosové soustavě se SVC využívá zejména pro dynamickou stabilizaci napětí a zlepšení napěťové stability systému. Uplatňuje se zejména v sítích s vysokou koncentrací obnovitelných zdrojů (větrné a fotovoltaické elektrárny).

V distribučních sítích se SVC využívají především k regulaci napětí a omezení jalových ztrát, které vznikají zejména v dlouhých radiálních vedeních a při kolísavém zatížení. Díky rychlé reakci dokážou stabilizovat napěťový profil i v koncových částech sítí a přizpůsobit se proměnlivým podmínkám provozu. Jejich význam roste také s integrací obnovitelných zdrojů energie, jejichž proměnlivý výkon může vyvolávat časté výkyvy napětí. Správně umístěné a dimenzované SVC tak přispívají k vyšší stabilitě a spolehlivosti distribuční sítě a zároveň snižují potřebu investic do posílení infrastruktury [1], [2].

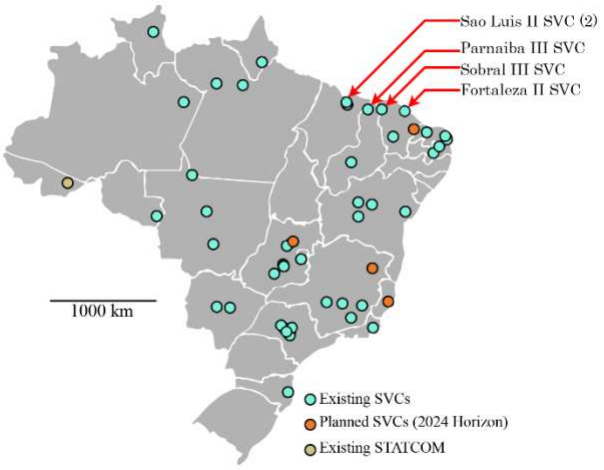
3.1.2.1 Cape Cod, Massachusetts, USA

Od roku 2009 provozuje společnost NSTAR Electric & Gas Corporation statický kompenzátor jalového výkonu (SVC) dodaný společností Hitachi Energy v přenosové soustavě 115 kV v jihovýchodní části státu Massachusetts, která zásobuje oblast Cape Cod. SVC s jmenovitým napětím 115 kV, kapacitou 0–225 Mvar po dobu 2 sekund a kapacitou 0–112,5 Mvar pro dlouhodobější napájení je umístěn v rozvodně poblíž Hyannis v Massachusetts. Jeho účelem je poskytovat rychlou podporu napětí přenosové soustavě na Cape Cod v případě, že by došlo k neočekávanému výpadku dvou hlavních zdrojů v této oblasti. Pokud by k této události došlo bez dalších dostupných zdrojů výroby, předpokládalo se, že dojde k poklesu napětí, který by postihl Cape Cod a případně i další části přenosové soustavy. SVC tak detekuje pokles napětí a rychle dodá až 225 Mvar jalového výkonu po dobu 2 sekund, následovaný dlouhodobějšími až 112,5 Mvar, aby stabilizoval napětí přenosové soustavy. Systém je plně automatizován tak, aby aktivoval a dodal jalový výkon, když napětí přenosové soustavy klesne pod stanovenou hodnotu, aby udržel stanovený rozsah napětí, a poté se automaticky vrátil do pohotovostního režimu [4].

Obr. 3.5 SVC v Cape Cod Massachusetts [4]

3.1.2.2 Brazílie

Přenosová síť 500 kV je rozsáhlá, výkonu vodních elektráren se přenáší na velké vzdálenosti. Pro podporu stability napětí a kvality energie byly v několika oblastech brazilské sítě, včetně jižního a severovýchodního regionu, instalovány SVC (statické kompenzátory jalového výkonu). K roku 2024 bylo nainstalováno 42 SVC a 1 STATCOM. Instalace dalších se plánuje. Toto uspořádání se ukázalo jako zvláště přínosné v oblastech s vysokým průmyslovým zatížením, kde zlepšilo spolehlivost a snížilo počet výpadků [77].



Obr. 3.6 Instalace zařízení SVC a STATCOM v brazilské přenosové soustavě [77]

V roce 2016 se prvně vyskytnul tzv. **jev „hunting“** (kmitání nebo kolísání řízení). Může vzniknout v případě dvou nebo více zařízení SVC instalovaných elektricky blízko sebe, kdy dojde k nekoordinovanému provozu nebo nestabilitě mezi regulátory, případně mezi regulátory a přenosovou soustavou. Tento jev, by měl být zkoumán již ve fázi konceptu návrhu kompenzace jalového výkonu a jejího základního návrhu, protože právě v této fázi je třeba řešit inženýrské problémy. Ve fázi integračních studií již není dostatek času na navrhování a implementaci technických řešení, a proto lze uplatnit pouze provozní omezení [77].

3.1.3 Náklady a úroveň připravenosti technologie

Technologie SVC je považována za plně technicky zvládnutou a dosahuje tak úrovně **TRL 9** – Technology Readiness Level (úroveň připravenosti technologie), neboť je od 90. let nasazována v reálných provozech přenosových soustav. I po několika desetiletích zůstává standardně využívaným řešením.

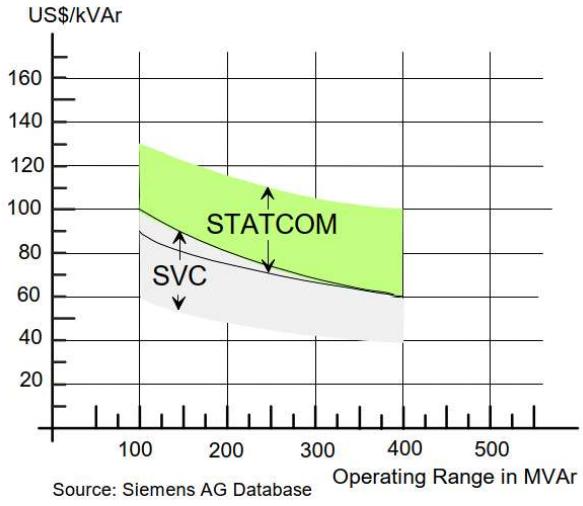
Náklady na instalaci SVC se pohybují do 100 USD/kvar instalovaného výkonu [66].[2] Literatura [2] uvádí náklady 40-60 USD/kvar.

Náklady na instalaci zahrnují součet všech nákladů na instalaci zařízení a lze je vypočítat pomocí nákladové funkce dané rovnicí [14]:

$$C_{SVC} = 0{,}0003\,S^2 - 0{,}305S + 127{,}38 \qquad \text{USD/kvar} \tag{2}$$

kde S je provozní rozsah (kompenzační výkon) v Mvar. Jedná se ale o 20 let staré údaje, stejně tak jako v [66].

[2] https://thundersaidenergy.com/downloads/facts-costs-of-statcoms-and-svcs/



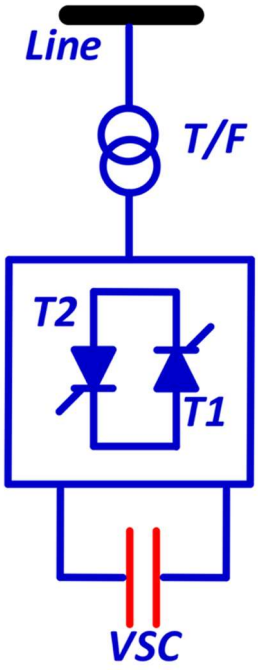
Obr. 3.7 Typické investiční náklady, zdroj Siemens [66]

3.2 Statický synchronní kompenzátor (STATCOM)

STATCOM je statický kompenzátor jalového výkonu připojený paralelně, který injektuje jalový proud/výkon induktivního či kapacitního charakteru nezávisle na napětí uzlu, do něhož je připojen. Jedná se o aktivní síťový prvek, napěťový střídač připojený paralelně k síti. Představuje pokročilejší alternativu k SVC. Umožňuje rychlou kompenzaci jalových výkonů, snižuje kolísání napětí a napomáhá ke zlepšení napěťové stability.

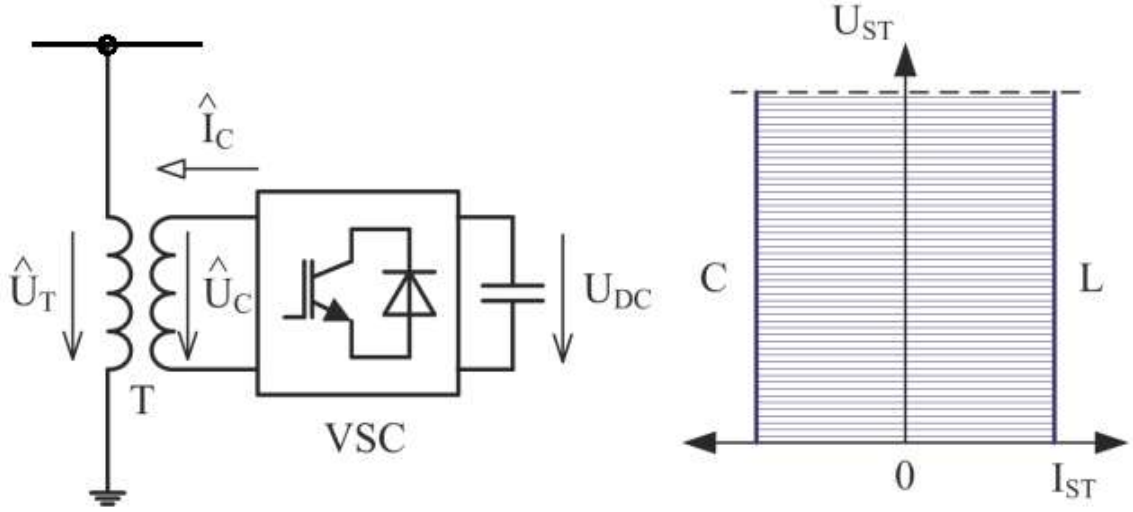
3.2.1 Popis funkce a provozní vlastnosti

STATCOM využívá měnič VSC, vazební transformátor a stejnosměrnou větev. Pracuje podobně jako SVC, ale má lepší provozní charakteristiky. Ve srovnání s SVC nevyžaduje velké induktivní nebo kapacitní prvky pro dodávku jalového výkonu, takže má menší nároky na prostor. Jalový výkon je dodáván nebo absorbován pomocí vlastního měniče díky jeho spínacím režimům a kondenzátor ve stejnosměrném obvodu slouží pouze k akumulaci energie při spínání, ke stabilizaci nebo řízení napětí ve stejnosměrném obvodu [1].



Obr. 3.8 Schéma zapojení Statkům [1]

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 STATCOM je jeho jalový proud. V-A pracovní oblast je tak omezena pouze maximálním dovoleným proudem a napětím zařízení, viz následující obrázek.



Obr. 3.9 STATCOM a jeho V-A pracovní oblast [76]

Podle velikosti a fázového úhlu napětí uzlu, do něhož je připojen, řídí výstupní úhel napětí svého měniče a tím velikost a charakter injektovaného jalového proudu, čímž udržuje napětí v daném uzlu, případně i sousedních uzlech. Pokud je ve stejnosměrném obvodu k dispozici systém pro ukládání energie, může docházet i k výměně činného výkonu.

Výhody instalace zařízení STATCOM

- Řízení napětí
- Zlepšení přechodové stability sítě

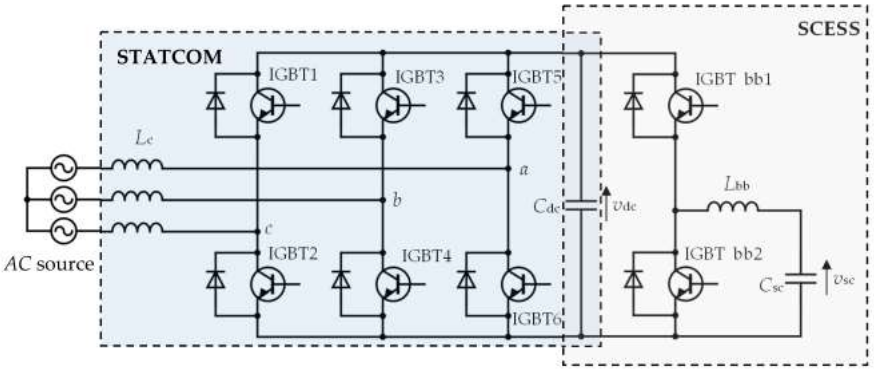
- Dynamická kompenzace účiníku – omezení kolísání napětí, použití i v průmyslu např. u obloukových pecí
- Řešení třífázové nesymetrie
- Možnost dodávat jalový i činný výkon – zlepšení napěťového profilu a tlumení oscilací v systému
- Rychlejší regulace než SVC

Nevýhody zařízení STATCOM

- Vyšší ztráty a náklady než u SVC
- Při náhlém poklesu napětí reaguje STATCOM pomaleji než synchronní kompenzátor [78]
- Je pomalejší než BESS (systém bateriového ukládání energie).

3.2.2 E-STATCOM – 2. generace STATCOMů

U klasického STATCOMU kapacita ve stejnosměrném obvodu slouží ke stabilizaci napětí, které je negativně ovlivněno komutací spínacích prvků měniče. Do DC obvodu může být připojeno i akumulační zařízení, např. se superkondenzátory SCESS (Supercapacitor Energy Storage System). Toto zařízení se pak označuje jako E-STATCOM, popř. ES-STATCOM (Energy Storage Enhanced STATCOM) a umožnuje kromě regulace jalového výkonu i regulaci činného výkonu, např. pro zlepšení setrvačnosti soustavy. Kombinace STATCOMU a SCESS umožňuje provoz ve všech čtyřech kvadrantech PQ diagramu, tj. obousměrný tok činného i jalového výkonu.



Obr. 3.10 Schéma E-STATCOMu [78]

Superkondenzátory jsou přímo připojeny k DC meziobvodu STATCOMu. Jejich přítomnost modifikuje napětí meziobvodu, aby bylo možné vstřikovat činný výkon do sítě. Když STATCOM začne dodávat činný výkon, superkondenzátory vybíjejí energii snížením napětí meziobvodu a vyměňují energii se sítí. Pro propojení superkondenzátorů s DC meziobvodem STATCOMu se používá obousměrný DC-DC měnič, který udržuje napětí co nejstabilnější během výměny energie. Superkondenzátory jsou připojeny přes tlumivky, které tlumí proudové špičky. Využití superkondenzátorů má oproti bateriím následující výhody. Baterie mají sice vysokou energetickou kapacitu při dlouhodobém vybíjení (desítky minut), ale při krátkodobém vybíjení (do 1 minuty) dodají až 10× méně energie než superkondenzátory. Naopak superkondenzátory mají při stejném čase vybíjení 2× vyšší energetický obsah**.** Li-ion baterie jsou 3-5x dražší [78]. E-STATCOMy jsou již komerčně nabízeny:

- Siemens Energy: SVC Plus FS®
- Hitachi Energy: SVC Light Enhanced®

V poslední době se E-STATCOM ukázal jako slibné alternativní řešení pro kompenzaci větrných elektráren, které mimo jiné nabízí možnost startu z tmy a splňuje požadavky ostrovního provozu [88]. Více o E-STATCOMech a stavu jejich začlenění do sítí uvádí [85].

3.2.3 Aplikace v PS a DS

Přínosy zařízení STATCOM:

- dynamická stabilizace napětí (zvýšení přenosové schopnosti, omezení kolísání napětí)
- zlepšení stability systému (zvýšení dynamické stability, zlepšené tlumení při kývání)
- vyrovnávání dynamického zatížení
- podpora napětí v ustáleném stavu
- zlepšení kvality elektrické energie.

V přenosové soustavě má STATCOM zásadní význam při zajišťování napěťové stability a efektivního přenosu elektrické energie. Díky schopnosti dynamicky regulovat jalový výkon pomáhá STATCOM udržovat stabilní napěťové profily na různých místech sítě, zejména při kolísání zatížení nebo při poruchových stavech. To přispívá ke zvýšení propustnosti vedení, zlepšení stability soustavy a k omezení přetížení tradičních kompenzačních prvků. STATCOM také omezuje výskyt jevů, jako je Ferrantiho efekt nebo přechodné poklesy napětí, a tím zvyšuje kvalitu přenášené energie. Ale jeho nasazení zároveň nese riziko změn lokálních poměrů impedance a proudových toků a ovlivnění chování elektrických ch ochran, proto je nutné tyto ochrany vhodně nastavit, aby správně vyhodnocovaly poruchové stavy a nedocházelo k jejich chybným reakcím [29], [30].

V distribučních sítích se tradičně se ke kompenzaci jalových výkonů používají paralelně připojené kondenzátory, jež snižují proudy ve vedeních a zlepšují napěťový profil. Jejich účinnost je však omezená, protože nedokáží pružně reagovat na proměnlivé zatížení a mohou vyvolávat rezonanční jevy, což dále zvyšuje tepelnou degradaci zařízení a riziko jejich poruchy. STATCOM oproti kondenzátorům umožňuje rychlou a plynulou regulaci jalového výkonu, korekci účiníku a potlačení harmonických. Přispívá tak ke stabilizaci napětí a snížení ztrát v síti. Významnou výhodou je jeho schopnost spolupracovat s fotovoltaickými systémy, což je zásadní vzhledem k rostoucímu podílu obnovitelných zdrojů v DS. Efektivita STATCOMu však závisí na optimálním umístění a dimenzování. Instalace na každé sběrnici by byla technicky i ekonomicky nevhodná, proto se hledá kompromisní rozmístění, které zajistí minimální ztráty, lepší vyváženost zatížení a vyšší stabilitu celé distribuční soustavy [19], [20].

3.2.3.1 Velká Británie

Útlum uhelných elektráren a masivnímu rozvoj OZE vede k nedostatku podpory jalového výkonu, kterou provozovatelé sítí potřebují k řešení výkyvů napětí. Na úrovni přenosové soustavy bylo nejvíce STATCOMů v Evropě instalováno ve Velké Británii (zejména v Anglii a Skotsku), často ve spojení s pevninskými a zejména s offshore větrnými elektrárnami pro stabilizaci napětí v síti.

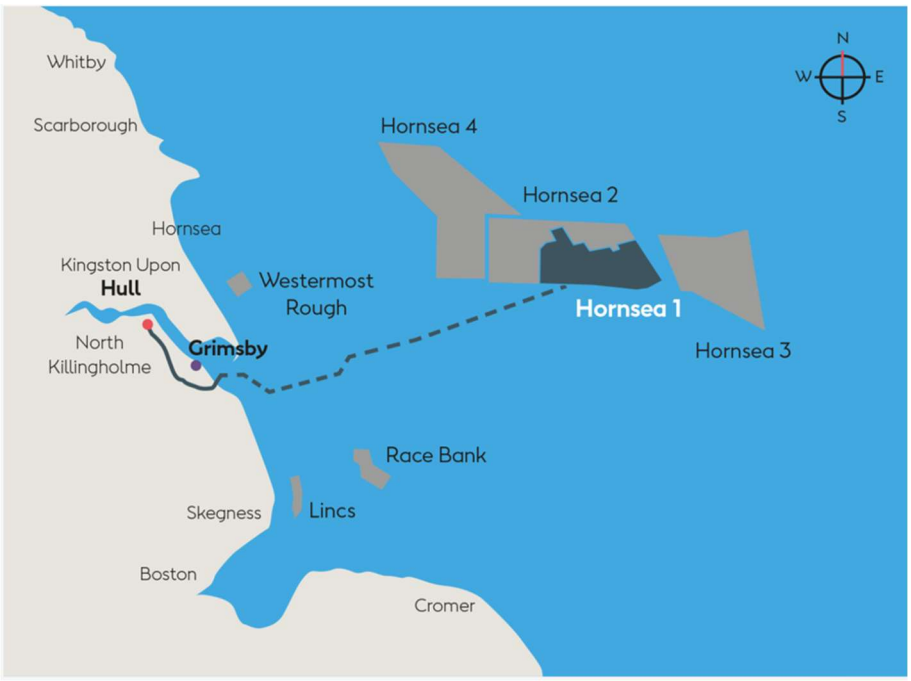
Mezi klíčové instalace STATCOMů ve Velké Británii v minulých letech patřily projekty Thanet (2× ±35 Mvar paralelně pro offshore větrnou farmu 300 MW), Greater Gabbard (3× ±50 Mvar paralelně pro offshore větrnou farmu 500 MW) a London Array (4× ±50 Mvar paralelně pro offshore větrnou farmu 630 MW). Novější instalace zahrnuje větrnou farmu Hornsea ONE v Severním moři s výkonem 1,2 GW, dokončenou v roce 2020, která obsahuje tři STATCOMy o výkonu ±200 Mvar.

Další probíhající projekty offshore větrných elektráren ve Velké Británii a v oblasti Severního moře pravděpodobně budou vyžadovat instalaci STATCOMů pro podporu pevninské sítě a stabilizaci napětí. Instalovány byly rovněž hybridní kombinace STATCOMů, paralelně s mechanickými nebo tyristorově spínanými zařízeními (kondenzátory, reaktory). V roce 2020 byl uveden do provozu rozsáhlý hybridní STATCOMový systém ve třech stanicích (Bolney, Ninfield a Richborough), který podporuje HVDC propojení s Evropou. Tento systém poskytuje síti HVAC rychlou odezvu a zvyšuje regionální stabilitu napětí pro HVDC propojení mezi Británií a Belgií, s dynamickým rozsahem jalového výkonu −300 až +675 Mvar [79].

Větrná farma Hornsea ONE

Větrná farma Hornsea One spuštěná v roce 2019, se nachází v Severním moři přibližně 120 km od východního pobřeží Anglie a představuje jednu z největších offshore větrných elektráren na světě. Celkový instalovaný výkon činí 1,2 GW, což je zajištěno pomocí 174 větrných turbín, každá o výkonu přibližně 7–8 MW. Farma pokrývá plochu přibližně 407 km. Vzhledem k vysokému podílu proměnlivého výkonu z obnovitelných zdrojů bylo nezbytné zajistit kvalitní napěťovou stabilitu v místě připojení do přenosové soustavy. Proto byly na pevnině v uzlové stanici instalovány tři STATCOMy, každý o výkonu 200 Mvar, doplněné o filtry harmonických a paralelně připojené reaktory. Tyto výkonové prvky zajišťují spolehlivou kompenzaci jalového výkonu, rychlou regulaci napětí a splnění požadavků na chování zařízení při poruchových stavech. Přesný typ STATCOMu není veřejně uveden [5].

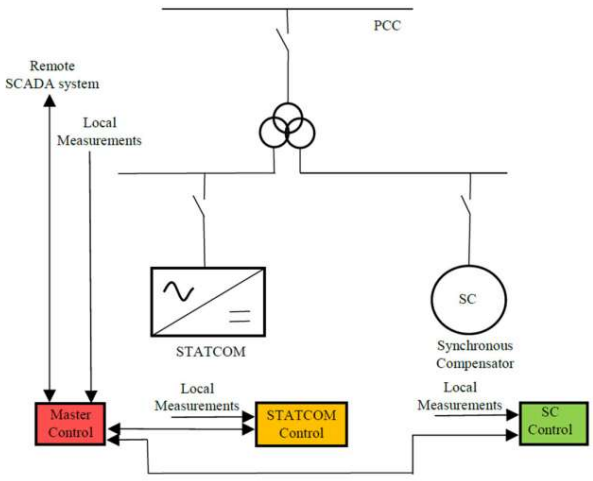
Obr. 3.11 Turbíny na větrné farmě Hornsea ONE ve Velké Británii [5]



Obr. 3.12 Mapa větrných farem na pobřeží Velké Británie v Severním moři

Projekt Phoenix – hybridní synchronní kompenzátor

Projekt Phoenix, vedený společností SP Energy Networks, byl zahájen byl v roce 2018 jako pilotní projekt s cílem ověřit účinnost technologie hybridního synchronního kompenzátoru (H-SC) v reálném provozu. H-SC byl instalován na rozvodně Neilston 275 kV poblíž Glasgow ve Skotsku, strategickém uzlu přenosové sítě SP Energy Networks. H-SC představuje kombinaci dvou technologií, synchronního kompenzátoru (SC) 140 MVA a STATCOMu a umožňuje využít výhody obou zařízení: SC poskytuje setrvačnost a zkratový výkon, zatímco STATCOM nabízí rychlou regulaci napětí a jalového výkonu. Každá technologie má vlastní řídicí systém, a proto je nutná jejich koordinace. K tomu slouží Master Control, který monitoruje a synchronizuje činnost obou zařízení, optimalizuje jejich společný provoz a zabraňuje tzv. „huntingu“ mezi řídicími systémy. Projekt prokázal, že kombinace SC a STATCOMu výrazně zvyšuje stabilitu sítě, zejména v prostředí s vysokým podílem obnovitelných zdrojů [83].

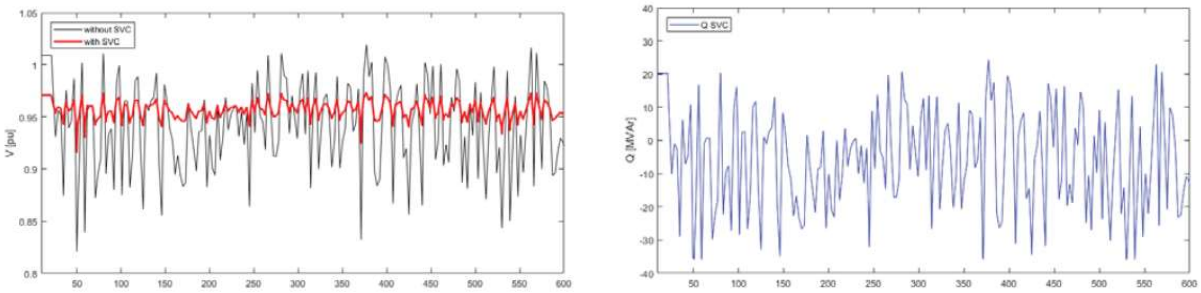


Obr. 3.13 Zjednodušené schéma hybridního synchronního kompenzátoru [83]

Distribuční síť London Underground

Praktické nasazení STATCOMu v DS lze doložit na příkladu distribuční sítě 22 kV London Underground, která zajišťuje napájení metra. Zatížení napájecí sítě je díky rozjezdům a brzděním souprav velmi dynamické a způsobuje kolísání napětí. Pro potlačení kolísání napětí bylo do sítě nainstalováno pět SVC. Tato zařízení zajišťují stabilizaci napětí a spolehlivost provozu v prostředí s omezenými možnostmi výstavby nových rozvoden. V budoucnu se předpokládá významné navýšení počtu souprav a vyšší nároky na kvalitu napětí. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k instalaci STACOMU.

Jedná se o zařízení Siemens s obchodním názvem SVC PLUS®, o výkonu ±37 Mvar, využívající technologii modulárních víceúrovňových měničů MMC (modular multilevel converter), potlačující harmonické zkreslení napájecího napětí bez instalace přídavných filtrů. Na následujícím obrázku je patrné, že instalací STATCOMu došlo k výraznému potlačení kolísání napětí a jeho výkon zařízení byl v některých okamžicích zcela využit [72].



Obr. 3.14 Průběh napětí bez (černě) a s (červeně) nainstalovaným STATCOMem a průběh injektovaného jalového výkomu [72]

Tento příklad ukazuje, že SVC a STATCOMy nejsou určeny pouze pro přenosové soustavy, ale mají zásadní význam také v distribučních sítích, kde umožňují udržení kvality dodávky energie i při vysoké variabilitě zatížení.

3.2.3.2 Itálie

V posledních letech se v italské přenosové soustavě objevila potřeba posílit stabilitu napětí a dodávky jalového výkonu v kritických uzlech. V reakci na to provozovatel přenosové soustavy Terna zahájil instalaci zařízení STATCOM. První tři STATCOMy byly naplánovány a uvedeny do provozu v letech 2021–2022 v lokalitách Villanova (Abruzzo), Latina (Lazio) a Galatina (Apulie), přičemž každý má výkon ±125 Mvar. Tyto uzly byly vybrány kvůli jejich propojení s HVDC stanicemi: MONITA (Itálie–Černá Hora), SAPEI (Itálie–Sardinie) a GRITA (Itálie–Řecko).

V roce 2023 byly instalovány další dva STATCOMy v uzlech Aurelia a Montalto (Lazio), čímž se celkový počet zařízení zvýšil na pět. Všechna zařízení jsou připojena na hladinu 380 kV. STATCOMy byly zvoleny pro svou schopnost dynamicky regulovat napětí a dodávat jalový výkon podle aktuálních potřeb sítě. Vzhledem k většímu prostorovému nároku oproti synchronním kompenzátorům jsou STATCOMy často instalovány jako kompaktní kontejnerová řešení.

Obr. 3.15 Instalace STATATCOMů a synchronníci kompenzátorů v Itáli [78]

Do budoucna se plánuje další rozšíření těchto zařízení, a to nejen v přenosové síti, ale i na distribuční úrovni. Například v Miláně má být do roku 2025 uvedeno do provozu tři D-STATCOMy o výkonu ±50 Mvar v transformačních stanicích 220/23 kV přes vyčleněný transformátor 63 MVA [79]. Kromě toho se STATCOMy začínají uplatňovat i v průmyslovém sektoru, zejména v ocelářství, kde pomáhají stabilizovat napětí.

3.2.3.3 Německo

Další STATCOMy byly a jsou instalovány také v Německu. Jedna z prvních aplikací byla dokončena v Borkenu v roce 2020, kde byl uveden do provozu první německý hybridní STATCOM pro dynamickou podporu napětí a zlepšení kvality elektrické energie na úrovni 380 kV, s rozsahem −250 až +400 Mvar.

V Německu, s cílem zajistit stabilitu napětí a podpořit dodávku jalového výkonu v rámci velmi ambiciózních cílů pro OZE (80 % pokrytí spotřeby z OZE do roku 2050), odhadli čtyři provozovatelé přenosových soustav, Amprion, 50Hertz, TenneT a TransnetBW, že k zajištění stability sítě během energetické transformace bude Německo potřebovat 70 zařízení STATCOM [93]. V roce 2020 byla stanovena potřeba dodatečné řízené kompenzace jalového výkonu v rozsahu 23 až 28 Gvar, kterou je třeba pokrýt převážně pomocí STATCOMů. Aby se minimalizoval počet instalovaných zařízení a optimalizovalo jejich využití, němečtí provozovatelé PS odhadli, že bude nutné instalovat STATCOMy s výkonem v rozsahu 250 až 600 Mvar. Do roku 2030 plánují instalaci celkem deseti STATCOMů [81].

V rámci sítě provozovatele Amprion byly v roce 2023 instalovány tři STATCOMy s kapacitou ±600 Mvar v uzlech Mannheim-Rheinau, Polsum a Lampertheim, a jeden ±300 Mvar STATCOM v uzlu Wehrendorf. V síti provozovatele 50Hertz budou v letech 2025–2027 instalovány dva ±300 Mvar hybridní STATCOMy v uzlu Bad Lauchstädt, který je klíčový pro přenos rostoucího podílu elektřiny z OZE [78].

Němečtí TSO rovněž zdůraznili potřebu vybavit výkonové elektronické měniče pro připojení OZE schopností grid-forming (pomocí injekce napětí), aby se předešlo problémům se stabilitou. Stabilní provoz systému je totiž možný pouze do určitého poměru dnešních měničů typu grid-following nebo grid-supporting (injekce proudu). V tomto ohledu němečtí provozovatelů PS důrazně doporučují, aby všechny nové měniče (pro STATCOMy, VSC-HVDC i připojení OZE) byly vybaveny výhradně funkcí grid-forming. První grid-forming STATCOM v Německu byl nedávno (2024) instalován v uzlu Opladen na úrovni 380 kV s výkonem

±300 Mvar (v síti Amprion) [82]. Kromě schopnosti formování sítě se pro budoucí vývoj STATCOMů doporučuje rozšířit omezené energetické rezervy v kondenzátorech měničových modulů, aby mohly poskytovat určitou míru setrvačnosti a přispět k pokrytí budoucích potřeb systému, například spojením s akumulačními zařízeními jako jsou superkondenzátory pro vytvoření E-STATCOMů. V následujících letech plánuje Amprion instalaci dalších pěti až devíti grid-forming jednotek [82].

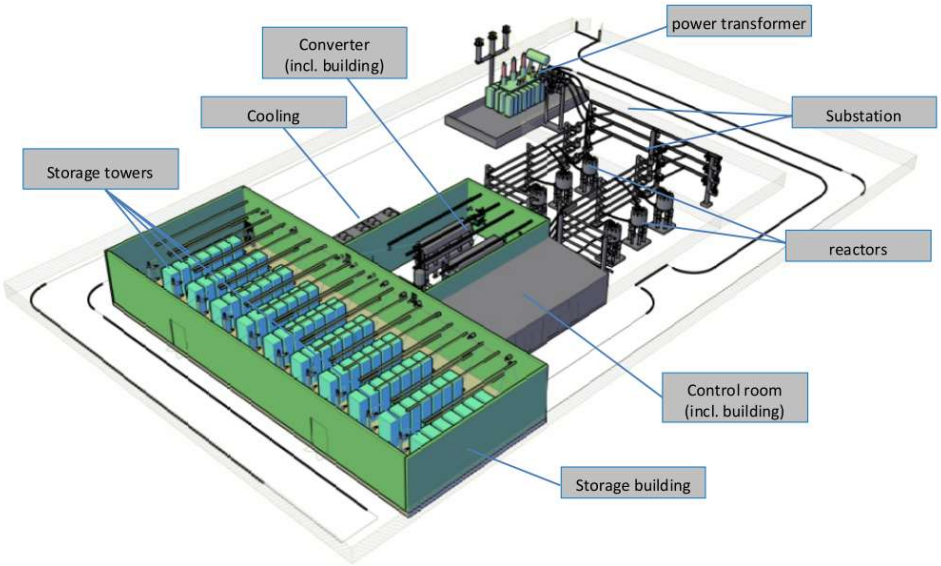
Instalace E-STATCOM

Německo-nizozemský provozovatel přenosové soustavy TenneT zadal společnosti Siemens Energy zakázku na instalaci prvního zařízení E-STATCOM na světě, které bude napájeno pomocí superkondenzátorů. Výkon zařízení má být 200 MW. Projekt má být uveden do provozu v roce 2025.

V roce 2024 byl zahájen projekt instalace E-STATCOMu ve stanici Malchow (provozovatel 50Hertz) poblíž Berlína. Dodavatelem technologie je firma Nidec Conversion. Zařízení by mělo být schopné výměny až 150 MW za 1,25 sekundy, mělo by mít funkci grid-forming. Uvedení do provozu je plánováno na rok 2028 [86].

V roce 2025 se zahájí instalace dvou E-STATCOMů (SVC Light Enhanced) ve stanicích Wendlingen a Oberjettingen s funkcí grid-forming. Technologii dodá Hitachi Energy, uvedení do provozu plánováno na rok 2028 [87].

Požadavky na E-STATCOMy instalované do německých přenosových sítích jsou uvedeny v [84].



Obr. 3.16 Uspořádání zařízení E-STATCOM o výkonu 50 MVW (SVC PLUS FC. Siemens) [78]

Poptávka po STATCOMech v Evropě neustále roste, nejen na úrovni přenosové a distribuční soustavy ze strany provozovatelů sítí a subjektů v oblasti OZE, ale také v ocelářském sektoru, a to v důsledku různých národních a regionálních plánů na podporu rozvoje infrastruktury.

3.2.3.4 Aplikace mimo Evropu

3.2.3.4.1 Punta Lima, Portoriko

Větrná elektrárna Punta Lima, umístěná na východním pobřeží Portorika, využívá technologii STATCOM pro zajištění stability a kvality připojení k místní elektrické síti. Zařízení typu ABB STATCOM (VArPro) o výkonu 12 Mvar bylo instalováno v kontejnerovém provedení a připojeno na napěťovou hladinu 115 kV. Jeho hlavní funkcí je dynamická kompenzace jalového výkonu, stabilizace napětí a splnění požadavků na chování při poruchových stavech v souladu s místními technickými podmínkami připojení. Technické řešení zahrnuje i spínaný kondenzátor a induktor, systém řízení a transformátory. Díky tomu zařízení významně přispívá ke zvýšení provozní spolehlivosti větrné farmy a minimalizaci dopadů kolísání výkonu způsobeného proměnlivými větrnými podmínkami. Instalovaný výkon elektrárny činí 23,4 MW a tvoří ji 13 větrných turbín [6], [7], [8].

Obr. 3.18 Kontejnerové řešení STATCOMu firmy ABB [7]

Obr. 3.17 Struktura ABB STATCOMu [8]

3.2.3.4.2 USA

AI datacentra – USA

SVC PLUS FS (E-STATCOM) s výkonem ±75 MW / ±75 MVAr je využíváno ke stabilizace napětí a kompenzace rychlých změn zátěže v datacentrech, určených pro trénování AI modelů. ESIG Energy.

South Fork Wind – New York, USA

V roce 2024 byl uveden do provozu E-STATCOM s funkcí grid-forming (GFM), navázaný na offshore větrnou farmu se 12 turbínami o celkovém výkonu 132 MW u Long Islandu ve státě New York. STATCOM je součástí rozvodny 138 kV/69 kV. Projekt byl plně uveden do provozu v roce 2024. STATCOM slouží pro stabilizaci napětí a frekvence při připojení offshore větrné farmy do sítě.

3.2.3.4.3 Čína

V roce 2024 byly provozovatelem sítě SGCC (State Grid Corporation of China) uvedeny do provozu dvě instalace E-STATCOMU s funkcí grid-forming, obě od firmy NR Electric [88]. První instalace byla v provincii Liaoning v rámci projektu Liaoning Zhangbei Wind GFM STATCOM Project a jednalo se o jednotku s výkonem 50 MW. Účelem byla Stabilizace sítě v oblasti s vysokým podílem větrné energie.

Druhá aplikace byla v provincii Sichuan v rámci projektu Sichuan Chengdu GFM STATCOM Project a jednalo se o jednotku s výkonem 300 MW. Účelem byla podpora stability přenosové soustavy v oblasti s vysokým zatížením a OZE.

3.2.4 Náklady a úroveň připravenosti technologie

Na základě oficiální klasifikace úrovně technologické připravenosti (Technology Readiness Level, TRL) dle evropských směrnic pro provozovatele přenosových soustav (TSO) dosahuje konvenční STATCOM určený pro vysoké a velmi vysoké napětí nejvyšší možné úrovně **TRL 9**. To znamená, že se jedná o technologii plně ověřenou a provozovanou v reálném prostředí, která je technicky vyspělá a komerčně dostupná. Kromě toho se začíná prosazovat technologie E-STATCOM s integrací akumulace energie (např. baterií nebo superkapacitorů). Technologie STATCOM s funkcí grid-forming a s integrací akumulace energie jsou ve fázi vývoje s nižšími TRL – konkrétně **TRL 6 a TRL 5**. Tyto verze reprezentují pokročilé prototypy nebo demonstrace v relevantním prostředí a nejsou dosud běžně zavedeny v provozu [22], což se ale v blízkých letech může změnit.

TRL 9 konvenční STATCOM pro HV a EHV

TRL 6 grid-forming STATCOM pro HV a EHV

TRL 5 grid-forming E-STATCOM pro HV a EHV

Následující výzkumné a vývojové aktivity mohou přispět k dalšímu zlepšení technologie STATCOM:

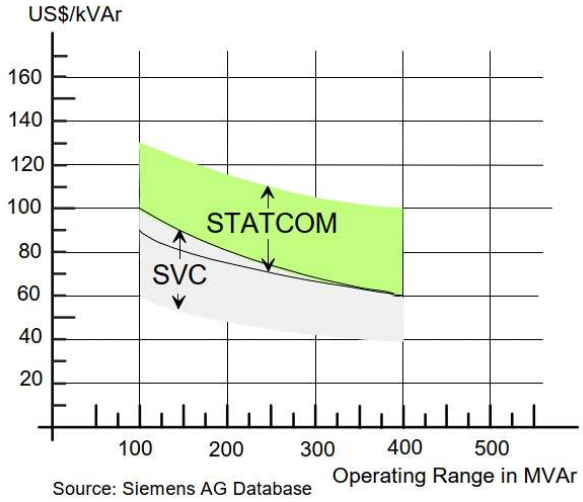
- Vývoj zařízení STATCOM s GFC řízením – za účelem poskytování širšího spektra podpůrných služeb, např. okamžitá proudová odezva na změny napětí.
- Vývoj zařízení STATCOM a úložištěm energie (baterie, superkondenzátory) – pro podporu setrvačnosti sítě.
- Zkoumání interakcí mezi HVDC systémy, sousedními STATCOMy a konvenčními AC zařízeními s cílem lepší koordinace zařízení a regulace napětí, včetně detekce nestabilit [91].
- Zlepšení dynamického chování a provozních parametrů (dodávaný jalový výkon, snížení nákladů, menší prostorová náročnost a nižší hlučnost).
- Demonstrace mobilních a škálovatelných STATCOMů, která lze podle potřeby přesouvat mezi lokalitami.

Náklady na instalaci zařízení STATCOM se pohybují pod 150 USD/kvar instalovaného výkonu [66].[3] Literatura [2] uvádí náklady na STATCOM pouze 55-70 USD/kvar. U technologie E-STATCOM se náklady odhadují na 200-300 USD/kvar[4].

Náklady na instalaci zahrnují součet všech nákladů na instalaci zařízení a lze je vypočítat pomocí nákladové funkce dané rovnicí [28]:

$$C_{STATCOM} = 0{,}0003\,S^2 - 0{,}2691S + 188{,}22 \qquad \text{USD/kvar} \tag{3}$$

kde S je provozní rozsah (kompenzační výkon) v Mvar. Jedná se ale o 20 let staré údaje, stejně tak jako [66].



Obr. 3.19 Typické investiční náklady, zdroj Siemens [66]

3.3 Porovnání zařízení SVC a STATCOM

V porovnání provozních vlastností a parametrů vychází lépe STATCOM. Zařízení STATCOM podporuje plný rozsah jalového výkonu ±100 % jeho jmenovité kapacity, SVC poskytuje omezenější rozsah, typicky kolem ±60–70 % jmenovitého výkonu. STATCOM nabízí větší provozní flexibilitu, doba odezvy STATCOMu je o 30 ms rychlejší než u SVC. STATCOM dosahuje lepší přesnosti v regulaci jalového výkonu, negeneruje tolik harmonických, je méně prostorově náročný. Přesné řízení toku jalového výkonu STATCOMu je dáno rozdílnou strategii řízení. STATCOM využívá k řízení toku jalového výkonu regulační smyčku proudu, zatímco SVC obvykle používá regulační smyčku napětí v místě připojení. Ztráty ve STATCOMu se typicky pohybují okolo 3–4 %, zatímco v SVC kolem 1–2 %. Podrobnější porovnání je v následující tabulce.

[3] https://thundersaidenergy.com/downloads/facts-costs-of-statcoms-and-svcs/

[4] Zdroj M365 Copilot

Tab. 5 Porovnání provozních vlastností SVC a STATCOM [2]

Hodnocený parametr	**SVC (Static Var Compensator)**	**STATCOM (Static Synchronous Compensator)**
Hlavní součást	Tyristor	IGBT tranzistory
Princip činnosti	Řízení shuntovací impedance	Řízení jako zdroje napětí
Ztráty	Nižší, přibližně 1–2 %	Vyšší, přibližně 3–4 %
Účinnost	97 %	98 %
Doba odezvy	1–2 ms	Rychlejší než SVC, asi 30 ms
Rozsah jalového výkonu	Omezený, typicky 60–70 % jmenovité kapacity	±100 % jmenovité kapacity
Korekce účiníku	Schopný, ale méně efektivní při nízkém napětí	Udržuje téměř jednotkový účiník
Flexibilita řízení	Nižší flexibilita	Vysoká flexibilita díky dynamické regulaci napětí
Prostorová náročnost (footprint)	Vysoká	20–50 % půdorysu SVC
Konstrukční provedení	Otevřené	Uzavřené (containerové)
Potřebná plocha	cca 60 × 85 m²	cca 59 × 45 m²
Harmonické zkreslení	Velmi vysoké	Nízké
Cena za 1 kVAr	40–60 USD	55–70 USD
Závislost jalového výkonu na napětí	Kvadratická	Lineární
Přesnost kompenzace	Dobrá	Vynikající
Množství jalového výkonu při zkratu 3 f	Malé	Malé
Náročnost údržby	Velmi vysoká	Nízká
Dynamická stabilita	Normální	Normální

E-STATCOM se jeví jako nejvýkonnější a nejflexibilnější technologie, zejména díky schopnosti kombinovat regulaci napětí, přispívání k setrvačnosti a modulární konstrukci. Další srovnání SVC a STATCOMů se synchronním kompenzátorem bez/se setrvačníkem (SC/SCF) uvádí následující tabulka.

Tab. 6 Srovnání technologií pro regulaci U a Q [78]

Služba stabilizace sítě	**SVC**	**STATCOM**	**SC** ***(Synchronous Condenser)***	**SCF** ***(Synchronous Condenser with Flywheel)***	**E-STATCOM** ***(Enhanced STATCOM)***
Regulace napětí	Ano (++)	Ano (+++)	Ano (++)	Ano (+++)	Ano (+++)
Setrvačnost (Inertia)	Ne	Zanedbatelná	Ano (+++)	Ano (+++)	Ano (+++)
H (s) *(ekvivalentní setrvačnostní konstanta)*	–	~0.01–0.02 (při použití CMI)	~1.25–2	7	8
Příspěvek ke zkratu (Short circuit contribution)	Ne	Ne	Ano (+++)	Ano (+++)	Ano (++)
Modularita	Ne	Ano (++)	Ne	Ne	Ano (++)
Řiditelnost	Nízká	Střední	Nízká	Nízká	Vysoká
Provozní oblasti	Asymetrické	Symetrické	Asymetrické	Asymetrické	Symetrické
Přetížitelnost	Omezená časem a velikostí	Omezená časem a velikostí	Velmi dobrá kapacitní přetížitelnost	Velmi dobrá kapacitní přetížitelnost	Omezená časem a velikostí

Rotační kompenzátory mají vyšší ztráty, jejich výhodou je i přetížitelnost a životnost. SC/SCF mají životnost až 40 let; E-STATCOM vyžaduje výměnu úložiště po 10–20 letech. SC/SCF jsou kompaktnější; E-STATCOM může mít větší nároky kvůli superkondenzátorům. SC/SCF vyžadují

častější servis kvůli rotujícím částem; E-STATCOM má vyšší dostupnost a možnost redundance. E-STATCOM může fungovat i při částečném výpadku, odpojit úložiště a pracovat jako běžný STATCOM. Přestože SC/SCF mají výhodu v přetížitelnosti a životnosti, E-STATCOM nabízí lepší celkovou efektivitu a dostupnost. Výběr technologie závisí na konkrétních potřebách provozovatele sítě, technických podmínkách a ekonomických faktorech [78].

Z analýzy provozních dat vyplývá, že zařízení SVC a STATCOM dosahují vysoké disponibility. Průměrná nucená nedostupnost (FOU) těchto zařízení míra je obvykle <1 %. Většina výpadků je způsobena pomocnými systémy (nikoli spínacími zařízeními nebo řízením). Výpadky způsobené spínacím zařízením (např. TCR nebo TSC) a řídicími systémy jsou málo časté. Slabými místy technologie jsou pomocné systémy, AC zařízení, filtry, řídicí a ochranné systémy. Výrobci běžně nabízejí částečnou nebo úplnou redundanci kritických komponent. Teoretická dostupnost STATCOMu byla vypočtena na 99,75 %, což odpovídá empirickým datům [78], [90].

4 Sériová zařízení FACTS

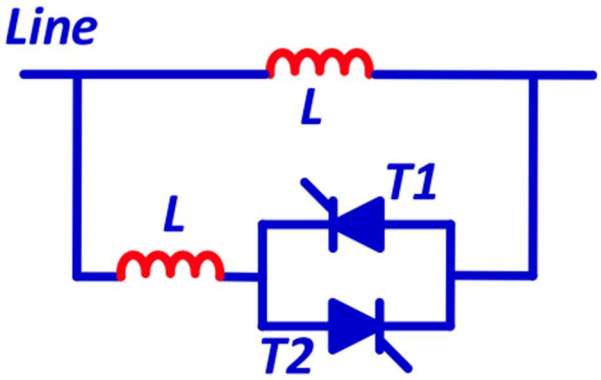
Tato zařízení jsou připojená přímo do vedení (sériově), která aktivně ovlivňují impedanci vedení jako tyristorově řízení či spínané kondenzátory či reaktory, nebo představují sériový napěťový zdroj, např. statický sériový synchronní kompenzátor SSSC, který „virtuálně“ snižuje nebo zvyšuje impedanci vedení pomocí řízené injekce napětí. Tato zařízení zvyšují přenosovou kapacitu vedení, potlačují oscilace výkonu, a obecně zlepšují stabilitu systému. Nejsou tak často používaná jako paralelní zařízení SVC a STATCOM.

4.1 Tyristorově řízený sériový reaktor (TCSR)

TCSR je zařízení, které se používá v elektrických přenosových soustavách ke zvýšení reaktance vedení. To znamená, že snižuje proud, který vedením protéká, a tím pomáhá zlepšit stabilitu soustavy a řídit výkonové toky v síti.

4.1.1 Popis funkce a provozní vlastnosti

TCSR představuje proměnný sériovou induktivní reaktanci. Skládá se ze sériového reaktoru a dvou zapojených antiparalelně tyristorů. Tyristory pomocí změny tzv. spínacího úhlu řídí proud protékající reaktorem, a tím mění efektivní hodnotu reaktance. V případě kombinace s reaktorem zapojeným sériově do vedení (viz následující obrázek), při úhlu spínání nižším než 180° se celková reaktance snižuje, při spínacím úhlu 180° je tyristor vypnut a TCSR se chová jako omezovač poruchového proudu.



Obr. 4.1 Schéma zapojení TCSR[1]

Výhody instalace zařízení TCSR

- Zvyšuje stabilitu elektrické soustavy.
- Umožňuje plynulou změnu induktivní reaktance.
- Zajišťuje řízení napětí.

Nevýhody zařízení TCSR

- Vysoké náklady na instalaci a údržbu.
- Možné zavlečení DC složky napětí.

4.1.2 Aplikace v PS a DS

Informace o konkrétních instalacích TCSR ve světě jsou omezené, protože se jedná o méně obvyklý typ zařízení FACTS v porovnání s jinými.

V přenosových soustavách se TCSR může použít především k snižování zkratových proudů při poruchách a k omezování přetížení vedení. Díky rychlé a plynulé regulaci impedance zvyšuje přechodovou i dynamickou stabilitu sítě. Podle studií může TCSR na 400 kV vedení snížit velikost zkratového proudu o více než 20 %, což významně chrání generátory, transformátory i spínací prvky před přetížením a poškozením.

TCSR navíc umožňuje flexibilní řízení výkonových toků mezi paralelními trasami, což zlepšuje využití přenosové kapacity. Důležitou funkcí je také tlumení výkonových oscilací, které vznikají při poruchách, změnách zatížení nebo spínacích operacích. V porovnání s klasickými sériovými reaktory poskytuje TCSR díky tyristorovému řízení možnost adaptivního chování v reálném čase, a tedy lepší reakci na dynamické změny sítě [61], [23].

TCSR má potenciální využití i **v distribučních sítích**, např. při omezování zkratových proudů způsobených vysokým podílem obnovitelných zdrojů (fotovoltaika, větrné turbíny) a při stabilizaci napětí v uzlech se silně proměnlivým zatížením. Jeho využití je ale spíše teoretické, protože instalace je ekonomicky i technicky náročná a většina distribučních sítí využívá levnější způsoby sériové kompenzace [63].

4.1.3 Náklady a úroveň připravenosti technologie

Na rozdíl od běžněji nasazovaných FACTS zařízení, jako jsou STATCOM, SSSC nebo UPFC, není v literatuře dostupný dostatek údajů pro přesný odhad nákladů na instalaci TCSR. Některé studie srovnávají náklady například u SVC, TCSC a UPFC, ale TCSR zde není uveden, což indikuje jeho nízké pokrytí v ekonomických analýzách. Odborné studie pouze uvádějí, že TCSR je jednodušší a levnější varianta TCSC, protože obsahuje pouze sériový reaktor řízený tyristory a postrádá kapacitní složku. Přesné empirické nákladové křivky, nejsou publikovány [64], [65].

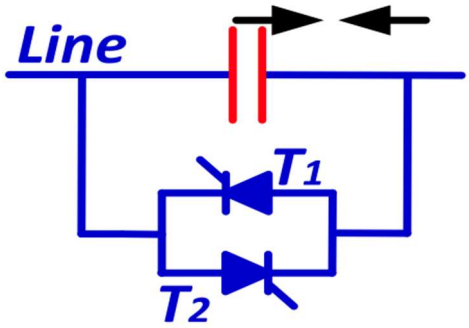
Z hlediska technologické připravenosti lze TCSR hodnotit na úrovni **TRL 8–9**. Technologicky jde o zařízení ověřené a provozované v reálných podmínkách (TRL 9), nicméně v porovnání s jinými sériovými FACTS prvky (např. TCSC) není tak široce rozšířené. Jeho omezené nasazení souvisí zejména s tím, že TCSC nabízí širší funkce (induktivní i kapacitní účinek), a TCSR je proto využíváno především v projektech, kde je hlavním cílem omezení zkratových proudů, a nikoliv celkové řízení výkonových toků.

4.2 Tyristorově spínaný sériový kondenzátor (TSSC)

Technologie TSSC představuje přechodové řešení mezi fixní sériovou kompenzací FSC (Fixed Series Capacitors) a modernějšími koncepčně pokročilými zařízeními, jako jsou TCSC nebo SSSC.

4.2.1 Popis funkce a provozní vlastnosti

TSSC se sestává ze sériově zapojeného kondenzátoru, který je spínán pomocí tyristorů. Tyristor lze pouze zapnout nebo vypnout, tedy kondenzátor je buď odpojen nebo připojen k vedení. Kompenzace přenosové linky je tedy řízena skokově, připínáním či odpínáním sekcí sériových kondenzátorů. Jednoduchost technologie se promítá do nižší ceny řídicí elektroniky a samotných tyristorů [1], [22].



Obr. 4.2 Schéma zapojení TSSC [1]

Výhody instalace zařízení TSSC

- Kombinací kapacitní reaktance s reaktancí vedení může TSSC snížit reaktanci vedení během ustáleného stavu.
- Efektivní řízení výkonových toků na vedení a zlepšení dynamického chování ES.
- Minimalizace kolapsu napětí, snížení subsynchronních oscilací a tlumení dynamických oscilací pro zvýšení spolehlivosti systému.
- Prakticky neomezený počet spínacích cyklů – díky použití polovodičových spínačů, což zvyšuje životnost zařízení.
- Nevytváří harmonické zkreslení, na rozdíl od některých jiných typů sériové kompenzace (např. GCSC), protože tyristory pracují pouze ve stavech plného sepnutí nebo blokace.
- Rychlá schopnost reakce na SSR oscilace (subsynchronní rezonanci) – moduly TSSC mohou být téměř okamžitě vloženy nebo vyřazeny ze zapojení při detekci těchto jevů, čímž se účinně řídí frekvenční rozsah systému mimo kritické oblasti rezonancí generátorů a turbín.

Použití v PS a DS

- TSSC se často používá tam, kde není potřeba plynulé řízení (jako u TCSC), ale postačí rychlé připojení/odpojení kondenzátoru.
    - řízení toků výkonu
    - zlepšení stability systému
    - potlačení oscilací.

4.2.2 Úroveň připravenosti technologie

Technologie TSSC (Thyristor-Switched Series Capacitor) představuje přechodové řešení mezi fixní sériovou kompenzací FSC (Fixed Series Capacitors) a modernějšími koncepčně pokročilými zařízeními, jako jsou TCSC nebo SSSC (viz níže). Přestože využívá polovodičové prvky pro rychlejší spínání, nenabízí plynulé řízení reaktance ani širší regulační schopnosti.

V přenosových nebo distribučních sítích se TSSC využívá zřídka. To je mimo jiné způsobeno omezenou flexibilitou a díky nástupu novějších technologií, které kombinují přesnější řízení, vyšší odolnost a jednodušší integraci s ochranou.

Z těchto důvodů není TSSC považována za perspektivní technologii pro budoucí aplikace a není v této práci dále podrobněji analyzována v kontextu reálných aplikací, cenové dostupnosti ani TRL [23].

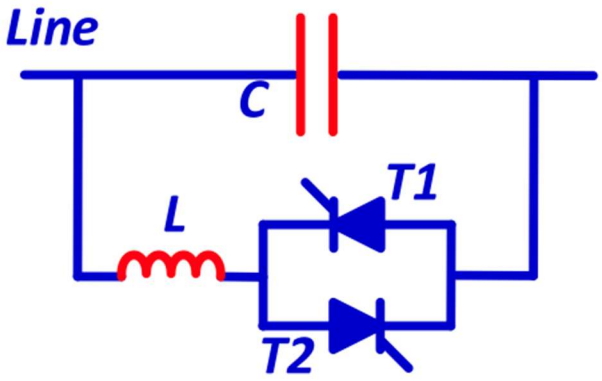
4.3 Tyristorově řízený sériový kondenzátor (TCSC)

Tyristorově řízené kondenzátory představují pokročilejší variantu k tyristorově spínaným kondenzátorům. Technologie TCSC má více reálných instalací než TSSC. První nasazení TCSC pro stabilizaci vedení a potlačení oscilací se začaly objevovat na přelomu 20. a 21. století.

4.3.1 Popis funkce a provozní vlastnosti

TCSC je sériové kompenzační zařízení, které mění celkovou impedanci přenosového vedení prostřednictvím sériového zapojení kondenzátoru a k měnu paralelně připojeného tyristorově řízeného reaktoru. Řídicí úhel při spínání tyristorů se pohybuje mezi 90° a 180° (s výjimkou pásma, kdy dochází k paralelní rezonanci kondenzátory a reaktoru). V případě, že reaktance reaktoru je menší než reaktance kondenzátoru, může mít výsledná reaktance induktivní, nebo kapacitní charakter. Na základě toho má TCSC dva provozní režimy, které závisí na řídicím úhlu tyristoru [1], [23].

Kapacitní režim nastává při nižších hodnotách řídicího úhlu. Výsledná reaktance je kapacitní, to se využívá ke zvýšení přenosové kapacity vedením a pro zlepšení napěťového profilu. Induktivní režim nastává při vyšších hodnotách spínacího úhlu (blíže 180°). Výsledná reaktance je induktivní a tím se omezuje tok výkonu vedením. Využívá se pro tlumení oscilací a zvýšení stability.



Obr. 4.3 Schéma zapojení TCSC [1]

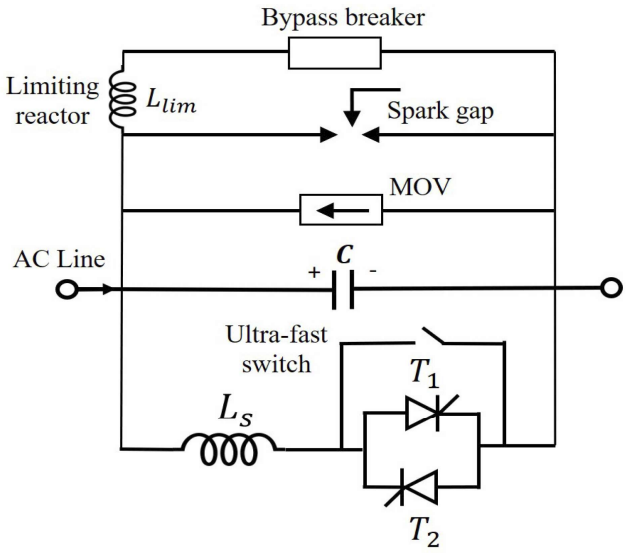
Výhody instalace zařízení TCSC

- Rychlé a plynulé řízení úrovně sériové kompenzace – umožňuje optimalizaci výkonových toků
- Tlumení výkonových výkyvů – efektivně potlačuje lokální i meziregionální oscilace v síti.
- Potlačení subsynchronních rezonancí (SSR)
- Zlepšení napěťové a úhlové stability a kapacity přenosu výkonu v elektrizační soustavě, včetně zlepšení napěťového profilu v ustáleném i dynamickém stavu.

- Omezení zkratových proudů – přepnutím z kapacitního do induktivního režimu může TCSC omezit velikost zkratového proudu.

Nevýhody zařízení TCSC

- větší rozměry než zařízení SSSC (Statický sériový kompenzátor).
- riziko zavedení poruchových proudů při porušení izolace zařízení od země
- potřeba bypassového ochranného systému.



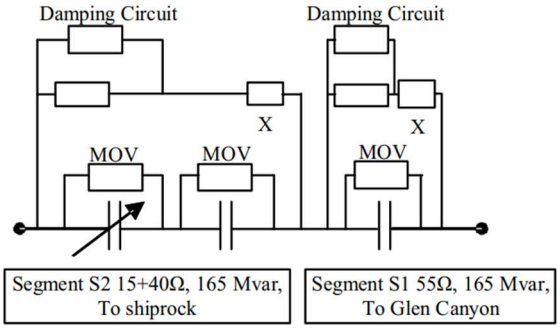
Obr. 4.4 TCSC s ochrannými prvky [23]

4.3.2 Aplikace v PS a DS

Systém TCSC, navzdory své jednoduché technologii a rozumným investičním nákladům, se dočkal jen omezené pozornosti kvůli omezenému rozsahu aplikací ve srovnání s SVC a STATCOM a souvisejícím technickým problémům, včetně rizika zavedení poruchových proudů a potřeby bypassového ochranného systému.

4.3.2.1 Kayenta, Arizona, USA

První instalace TCSC na světě (výrobcem označená jako Advanced Series Capacitor) byla realizována v 90. letech 20. století ve stanici Kayenta mezi Glen Canyon a Shiprockem v Arizoně (USA). Projekt zahrnoval dvě sériově zapojené kapacity každá o výkonu 165 Mvar připojené přenosovou linku 230 kV mezi Shiprock a Glen Canyon, o délce 320 km a s impedancí 153 Ω. Hlavním účelem instalace TCSC mezi Glen Canyon a Shiprock bylo zvýšit přenosovou kapacitu vedení až na jeho tepelný limit. Původní přenosové schopnosti vedení byly 300 MW, po instalaci sériového kompenzátoru došlo k jejich navýšení na 400 MW. Byla provedena i studie tlumení subsynchronní rezonance (SSR), která potvrdila, že TCSC se v oblasti frekvencí SSR chová jako indukční zátěž, a tedy pomáhá tyto jevy potlačovat. Řídicí systém byl navržen na základě detailního modelování v EMTP, což umožnilo optimalizaci odezvy systému [31].

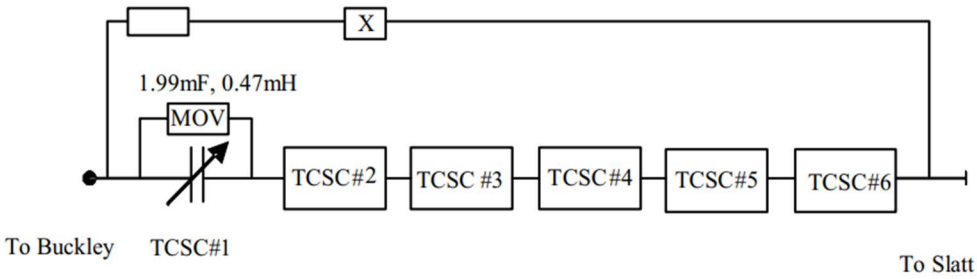


Obr. 4.5 Modelové schéma zapojení TCSC v Kayentě [31]

Projekt poskytl cenné zkušenosti s řízením TCSC v reálném provozu. Stal se vzorem pro další instalace TCSC po celém světě a potvrdil, že tyristorem řízená kompenzace může výrazně zlepšit výkon a stabilitu přenosových sítí**.**

4.3.2.2 Slatt, Oregon, USA

Tato instalace byla realizována na přenosové trase mezi Slatt a Buckley v americkém státě Oregon. Zařízení bylo připojeno k vedení o napětí 500 kV. Systém ve Slatt tvoří šest sériových modulů, z nichž každý umožňuje řízenou změnu reaktance až do 4 Ω. Díky tyristorovému řízení lze celkovou reaktanci dynamicky nastavovat v rozsahu od 1,2 Ω indukční po 24 Ω kapacitní. Kromě základních režimů blokace a by-passu systém umožňuje i jemné řízení (tzv. vernier režim), ve kterém se změnou spínacího úhlu tyristorů plynule mění efektivní reaktance každého modulu. Po úspěšném provedení terénních zkoušek zaměřených na harmonické složky, stabilitu a tlumení oscilací byl systém v roce 1995 uveden do komerčního provozu [31].

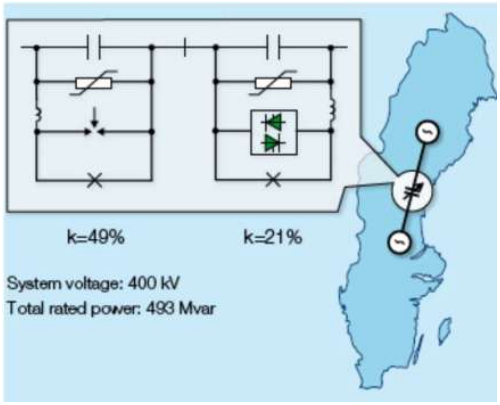


Obr. 4.6 Modelové schéma zapojení projektu Slatt [31]

4.3.2.3 Stöde, Švédsko

Do roku 1997 byla převážná část energie ve Švédsku vyráběna severními vodními elektrárnami a jižními jadernými elektrárnami. Elektrická energie byla přenášena do velkého odběrového centra na jihu po osmi přenosových vedeních o napětí 400 kV a délce přibližně 500 km. Všechna vedení byla sériově kompenzována až do 70 %. Dvě z těchto osmi vedení, na kterých byly instalovány pevné sériové kondenzátory (FSC) na stanicích Vittersjö a Stöde, byla připojena k jaderné elektrárně Forsmark o výkonu 1300 MW a opakovaně čelila riziku subsynchrónní rezonance (SSR). Vysoká míra sériové kompenzace (70 %) pomocí FSC zvyšovala riziko SSR, což mohlo vést k poškození hřídelí turbín. Aby se snížilo rizika sub-synchronních rezonancí, byl ve stanici Stöde instalován řízený sériový kondenzátor (TCSC). Stávající 70% kompenzace byla přerozdělena na FSC (49 %, 51,1 Ω) a TCSC (21 %, 21,9 Ω). Po uvedení TCSC do provozu bylo riziko SSR zcela eliminováno za všech provozních podmínek systému. Projekt,

který byl realizován firmou ABB, ukázal, že TCSC je efektivním řešením pro potlačení SSR, zejména v sítích s vysokou mírou sériové kompenzace [31].



Obr. 4.7 Projekt TCSC ve Stöde [31]

4.3.2.4 Purnea–Gorakhpur, Indie

V té době největší světový projekt FACTS s řadou kompenzací (TCSC/FSC) se nachází v indických městech Purnea a Gorakhpur s celkovým výkonem 1,7 GVAr, jehož cílem bylo zvýšit přenosovou kapacitu mezi východem a západem země z 9 500 MW na 30 000 MW. V roce 2004 získala společnost Siemens zakázku na dodávku čtyř sériových kondenzátorových jednotek (každá obsahuje jeden FSC a jeden TCSC), které byly uvedeny do komerčního provozu začátkem roku 2006. Dvě jednotky byly připojeny v rozvodně Gorakhpur na 433 km dlouhém vedení Gorakhpur–Muzaffarpur, další dvě byly umístěny v rozvodně Purnea na 242 km dlouhém vedení Purnea–Muzaffarpur. Pro snížení přenosových ztrát a udržení stabilního a dynamického provozu byla použita 40% pevná sériová kompenzace. Rozsah impedance TCSC se může pohybovat od 5 % do 15 %. Komerční provoz zahájen začátkem roku 2006 [31].

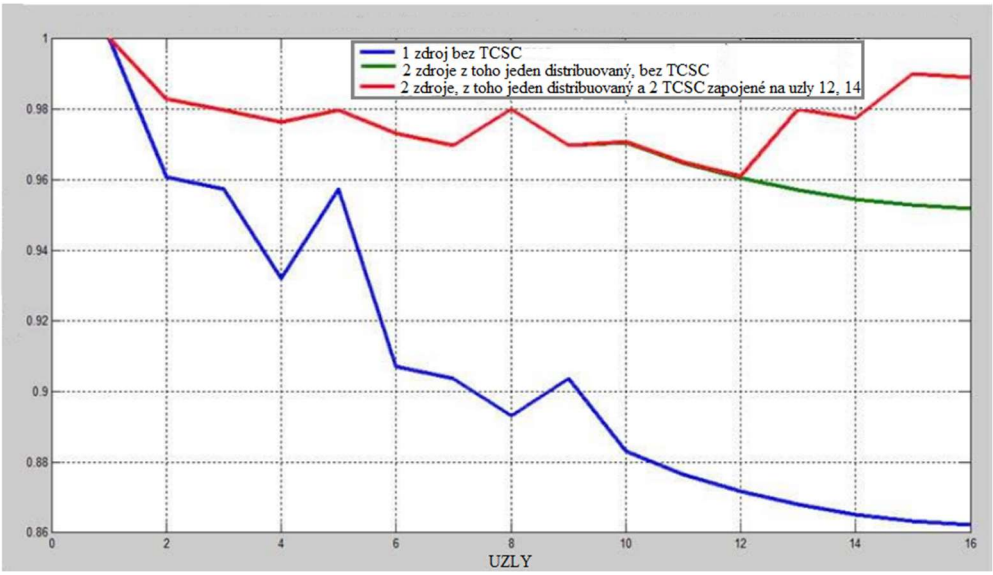
4.3.2.5 Sinjangjin a Samyangjin, Jižní Korea

V Jižní Koreji byly TCSC instalovány v rámci několika projektů s cílem zvýšit stabilitu přenosové soustavy a snížit přenosová omezení, zejména v oblastech s vysokou koncentrací výroby a spotřeby elektřiny. Příkladem je instalace technologie TCSC na rozvodnách 345 kV Sinjecheon a Sinyoungju společnosti KEPCO (Korea Electric Power Corporation). Cílem je maximalizovat využití přenosových vedení z oblasti východního pobřeží, kde jsou velké elektrárny Uljin, Samcheok a Donghae, do metropolitní oblasti bez nutnosti rozšiřování stávajících zařízení. Pomocí zařízení TCSC lze zvýšit povolený proud na dvou přenosových vedeních 345 kV až o 50 % oproti běžnému zatížení. Použité SVR (Synchronous Voltage Reversal) řízení umožňuje potlačení subsynchronních rezonancí SSR. Technologii dodala firma ABBB, do zkušebního provozu byla dána v roce 2019. Tato instalace představovala první použití technologie TCSC v Jižní Koreji [92].

4.3.2.6 Distribuční síť

Ačkoliv je TCSC tradičně nasazováno v přenosových soustavách za účelem řízení sériové impedance a optimalizace toků výkonu, současné výzkumy potvrzují jeho přínos také v distribučních sítích, zejména v podmínkách vysokého zatížení, dlouhých vedení a přítomnosti distribuovaných zdrojů (DG). Zařízení TCSC umožňuje plynulou regulaci napětí a omezení ztrát přímo v úseku vedení pomocí dynamického řízení reaktance. Díky své schopnosti rychle měnit sériovou impedanci dokáže účinně zvyšovat napětí na koncových uzlech, potlačovat přepětí a

tlumit oscilace. V rámci simulací provedených metodou LFB (Line Flow Based – analýza toku výkonů) bylo prokázáno, že správné dimenzování a rozmístění TCSC v distribuční síti vede ke znatelnému zlepšení napěťového profilu a stabilitě sítě. Studie dále ukazují, že začlenění TCSC do distribučního systému je výhodné také z ekonomického hlediska zvyšuje provozní spolehlivost a zároveň snižuje potřebu investic do nové infrastruktury. V distribučním prostředí lze navíc TCSC efektivně kombinovat s dalšími zařízeními FACTS, jako jsou STATCOM nebo SVC, za účelem dosažení vyšší kvality napájení a zajištění požadované flexibility sítě [24], [25].



Obr. 4.8 Porovnání napětí s jedním nebo dvěma zdroji bez TCSC a dvěma zdroji s dvěma TCSC [25]

4.3.3 Náklady a úroveň připravenosti technologie

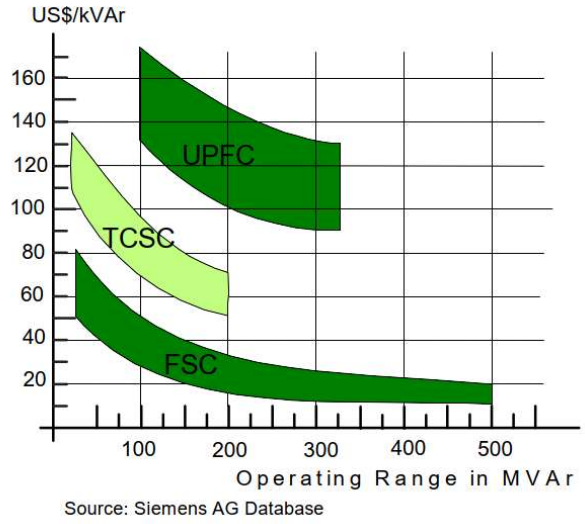
Technologii lze klasifikovat jako dosahující **TRL 9**, což odpovídá plné provozní vyspělosti technologie dlouhodobě využívané v sériové kompenzaci přenosových sítí [50]. Toto hodnocení vyplývá z faktu, že TCSC zařízení jsou rutinně instalována v reálných přenosových soustavách, jsou ověřena v širokém spektru provozních scénářů a splňují přísné technické standardy.

Náklady na instalaci zařízení TCSC se pohybují v rozmezí 50-150 USD/kvar [66].

Náklady na instalaci zahrnují součet všech nákladů na instalaci zařízení a lze je vypočítat pomocí nákladové funkce dané rovnicí [14]:

$$C_{TCSC} = 0{,}0015\,S^2 - 0{,}7130S + 153{,}75 \qquad \text{USD/kvar} \tag{4}$$

kde S je provozní rozsah (kompenzační výkon) v Mvar. Jedná se ale o 20 let staré údaje, stejně tak jako [65].



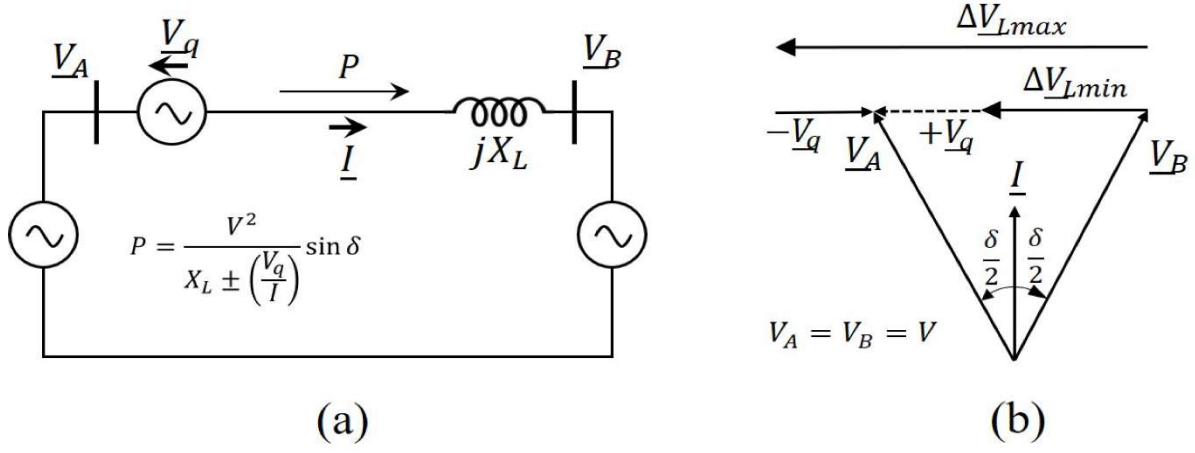
Obr. 4.9 Typické investiční náklady, zdroj Siemens [66]

4.4 Statický synchronní sériový kompenzátor (SSSC)

Rozvoj technologie SSSC započal v druhém desetiletí 21. století s využitím výkonových měničů VSC (Voltage Source Converter). SSSC představuje pokročilejší technologii sériové kompenzace.

4.4.1 Popis funkce a provozní vlastnosti

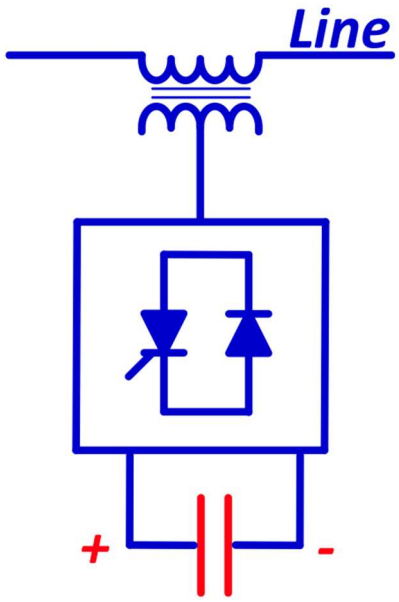
SSSC je zařízení nové generace, které využívá moderní výkonové elektronické měniče a principy zdroje napětí (Voltage Source Converter). Pracuje jako synchronní napěťový zdroj, který injektuje napětí, fázově posunuté o 90° vůči proudovému toku, v sérii do přenosového vedení. Tím simuluje řiditelnou induktivní nebo kapacitní reaktanci, čímž ovlivňuje impedanci vedení a tok výkonu.



Obr. 4.10 Kompenzace přenosového vedení pomocí SSSC. (a) náhradní obvod. (b) fázorový diagram [23]

Zařízení je obvykle připojeno k vedení prostřednictvím sériového transformátoru a je napájeno z DC meziobvodu (DC link) s kondenzátorem. Kondenzátor v DC meziobvodu slouží jako zásobník energie, který umožňuje měniči vstřikovat nebo odebírat jalový výkon do/z přenosového vedení, a dále udržuje konstantní napětí na DC straně měniče, což je nezbytné pro stabilní provoz zařízení. V případě vybavení meziobvodu externím zdrojem energie,

například bateriovým úložištěm, je SSSC schopno také dodávat nebo odebírat činný výkon z přenosového vedení. SSSC umožňuje plynulou a současnou regulaci amplitudy a fázového úhlu dodávaného napětí, a tím i impedance vedení [37].



Obr. 4.11 Schéma zapojení SSSC [1]

SSSC přináší řadu výhod, které zvyšují efektivitu, bezpečnost a flexibilitu přenosové soustavy [1], [17].

Výhody instalace SSSC

- Řízení toku výkonu – umožňuje zvyšovat nebo snižovat ekvivalentní impedanci vedení, čímž upravuje tok výkonu v síti. Tím je možné optimalizovat zatížení vedení, snižovat přenosové ztráty a zvyšovat kapacitu sítě.
- Možnost řízení jalového výkonu a zajištění bezpečnosti systému pomocí regulátorů.
- Vyšší flexibilita.
- Vysoká míra řízení – nabízí pokročilé funkce jako je:
    - Tlumení oscilací zatížení,
    - Vyvažování fázových proudů,
    - Prevence přetížení,
    - Kompenzace poklesů napětí (symetrických i nesymetrických).
- Stabilita při poruchách – na rozdíl od jiných technologií sériové kompenzace (např. TCSC nebo PST) se SSSC chová jako zdroj napětí s velmi nízkou impedancí během zkratu, což přispívá ke stabilitě sítě.
- Snížení nákladů na rozvoj sítě.

Nevýhody zařízení SSSC

- Kvůli četným spínacím operacím hrozí riziko přepětí v síti.
- Vyšší cena ve srovnání s TCSC.
- Vysoké náklady na instalaci a údržbu, což může omezit ekonomickou efektivitu.
- Riziko poruchy kvůli závislosti na polovodičových součástkách (např. IGBT, tyristory), které se mohou přehřát nebo selhat při vysokém napětí či proudu.

4.4.2 M-SSSC - 2. generace zařízení SSSC

První generace SSSC používala velké měniče napájené přes jeden transformátor a napětí vstřikovala do vedení přes druhý transformátor. Byla nákladná a přizpůsobená konkrétním lokalitám, což omezilo její širší využití.

Víceúrovňové měniče umožnily vývoj druhé generace, tzv. **beztransformátorové SSSC (transformer-less SSSC),** které jsou přímo připojené do vedení bez transformátoru bez vazebního transformátoru. Jejich výhodou je vyšší účinnost, rychlejší reakce na poruchy a lepší řízení a stabilita systému.

m-SSSC je specifický typ, který skládá se z více standardizovaných modulů. Modularita umožňuje škálovatelnost a snadnou instalaci, snadné rozšiřování, přestavbu nebo přemístění podle potřeb sítě. Vyznačuje se i nižší nároky na prostor v rozvodnách. Většina moderních m-SSSC představuje technologii transformer-less SSSC.

4.4.3 Aplikace v PS a DS

Sériová kompenzace na přenosových vedeních se nejčastěji provádí pomocí technologie SSSC. Nasazení SSSC **v přenosové síti** představuje účinný nástroj pro zvyšování provozní spolehlivosti a hospodárnosti přenosu elektrické energie. Díky schopnosti aktivně řídit výkonové toky lze lépe využít stávající vedení a vyhnout se investičně i časově náročné výstavbě nových tras. Stabilizace napěťových profilů a rychlá reakce na změny provozních podmínek přispívají k ochraně soustavy před přetížením a poruchami. SSSC dokáže minimalizovat přenosové ztráty, omezit negativní vliv subsynchronních rezonancí a udržet provozní parametry v přijatelných mezích, což má přímý dopad na kvalitu a bezpečnost dodávky energie. Možnost dodávky či odběru činného výkonu zvyšuje flexibilitu řízení a umožňuje operátorům lépe reagovat na mimořádné situace, například při náhlých změnách zatížení nebo výpadku části sítě [1], [37], [38].

SSSC se **v distribuční sítích** má omezené použití, neboť její účinnost je dána převládající reaktancí vedení nad rezistivitou, což nejen díky postupné kabelizaci v DS neplatí. Nicméně může pomoci regulovat napětí na konci radiálního vedení v slabých sítích (s nízkou zkratovou schopností) tím, že upravuje míru sériové kompenzace podle změn zatížení a účiníku. Díky schopnosti dynamicky měnit sériovou reaktanci umožňuje SSSC zvýšit přenosovou kapacitu vedení, zlepšit napěťový profil a zajistit lepší vyrovnání toků mezi větvemi distribuční sítě. Optimalizace umístění a výkonu SSSC může významně snížit celkové ztráty a stabilizovat napětí podél vedení. Některé simulační studie (například využití SSSC zavedeného do distribučního systému s optimalizací polohy a velikosti) potvrzují jeho technické a ekonomické přínosy jako je nižší ztráty a vylepšený napěťový profil [57]. SSSC může stabilizovat a řídit tok výkonu, čímž snižuje omezení v síti způsobená vysokým podílem OZE. Efektivní řízení energie tak usnadňuje integraci obnovitelných zdrojů.

4.4.3.1 National grid, Velká Británie

Společnost National Grid implementovala technologii modulárního SSSC ve třech rozvodnách na severu Anglie s cílem vyvážit toky výkonu mezi pěti vedeními. Toto řešení odblokovalo 1,5 GW přenosové kapacity pro OZE a zároveň nabídlo flexibilitu a rychlou nasaditelnost. V roce 2021 bylo nainstalováno 48 modulárních SSSC (SmartValves) v sítích 275 kV a 400 kV. Technologii m-SSSC dodala firma Smart Wires, pod obchodním názvem SmartValves.

Obr. 4.12 SSSC v projektu National Grid ve Velké Británii [50]

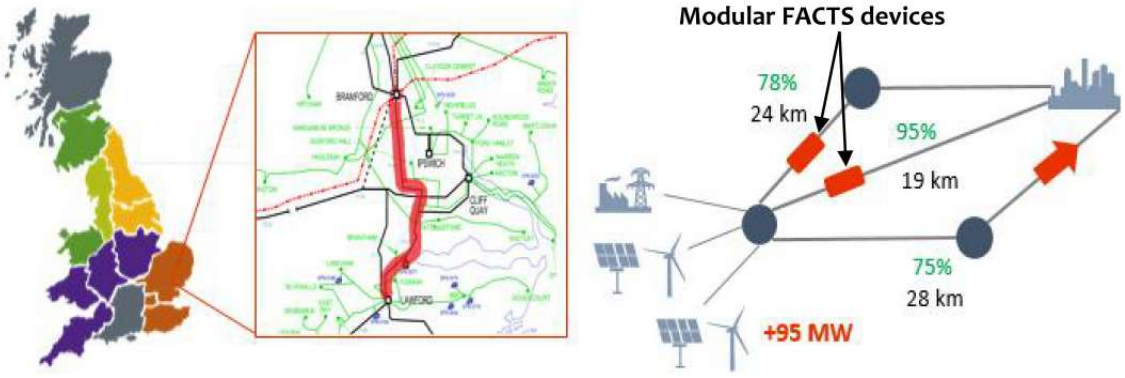
Technologie umožňuje snížit výkon na přetížených vedeních nebo ho transportovat na méně vytížené linky změnou sériové reaktance. Na základě dosaženého úspěchu byla tato technologie zařazena do strategického plánování přenosové sítě jako preferovaný nástroj pro modernizaci a adaptaci sítě v reálném čase.

V roce 2023 byla část systému rozšířena o další moduly, čímž se získalo dalších 500 MW kapacity. To může být interpretováno jako 5% navýšení celkové přenosové kapacity [17], [50], [33].

4.4.3.2 UK Power Networks, Velká Británie

Projekt **Loadshare** byl realizován provozovatelem distribuční sítě v oblasti Londýna, východní a jihovýchodní Anglie v roce 2019 [73]. Cílem projektu bylo:

- Odstranit přetížení na části sítě 132 kV mezi stanicemi Lawford a Bramford.
- Uvolnit kapacitu pro připojení nových decentralizovaných zdrojů.
- Zvýšit flexibilitu sítě bez nutnosti nákladných stavebních zásahů (např. výměna vodičů, výstavba nových vedení).



Obr. 4.13 Konfigurace sítě zobrazující umístění modulárních regulátorů toku výkonu na dvou ze tří paralelních linek 132 kV mezi Lawfordem a Bramfordem a vpravo znázornění, jak bude zátěž vyvážena mezi třemi linkami, aby se uvolnilo dalších 95 MW instalovaného výkonu

Na dvou ze tří paralelních linek byly nasazeny modulárních FACTS. Zařízení byla instalována přímo na fázové vodiče vedení (102 zařízení) a v rozvodnách (27 zařízení). Zařízení jsou schopna upravit reaktanci o 20 mΩ, resp. 450 mΩ. Zařízení upravují reaktanci linek (o 1,65 Ω a 1,45 Ω), čímž mění tok výkonu mezi paralelními linkami. Zařízení jsou napájena z vedení, kde jsou nainstalovaná, a nevyžadují externí napájení. Váha jednoho zařízení je cca 95 kg, na vedení je instalováno pomocí plošiny a instalace je provedena do 15 minut.

Obr. 4.14 Zařízení MFACTS instalovaná v projektu Loadshare. Vlevo – zařízení MFACTS pro instalaci na vedení. Vpravo – zařízení MFACTS pro instalaci v rozvodně [73]

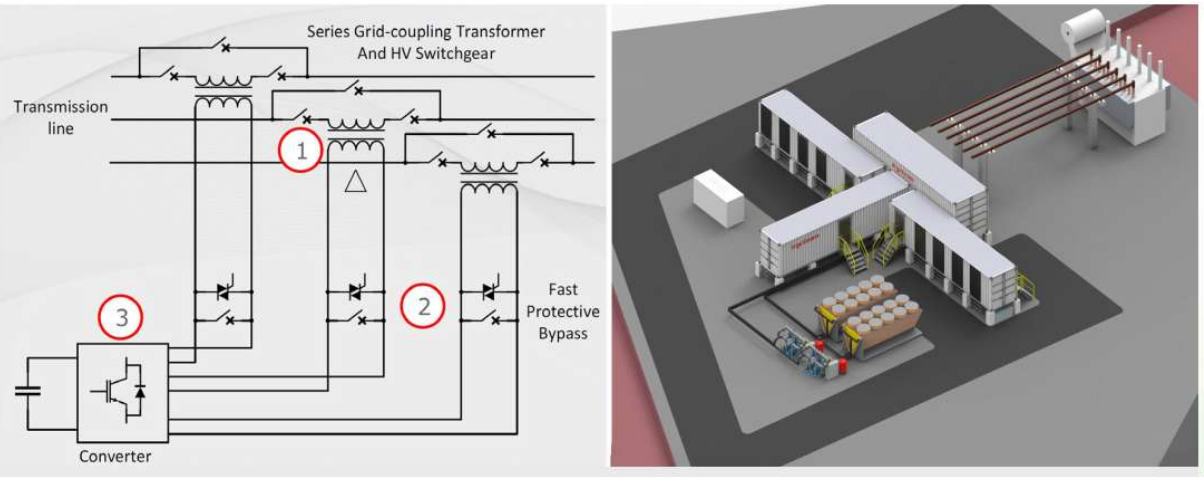
Vyvažování zatížení mezi třemi linkami zajišťuje real-time řídicí algoritmus. Komunikace probíhá bezdrátově (4G + ISM pásmo), bez nutnosti optických kabelů. Projekt byl úspěšně zprovozněn ve dvou fázích v roce 2019, nejprve manuální ovládání a testování injekce reaktance, po té automatizované řízení pomocí algoritmu**.** Reakční doba zařízení na změny zatížení se pohybovala mezi 10 a 30 s. V síti se uvolnilo 95 MW kapacity pro nové zdroje. Projekt ušetřil 8 milionů liber ve srovnání s tradičními modernizačními opatřeními.

Projekt ukázal, že M-FACTS jsou rychlé, flexibilní a ekonomické řešení pro moderní distribuční sítě. Technologii m-SSSC dodala firma Smart Wires.

Obr. 4.15 Instalace zařízení MFACTS v provedení pro rozvodny [73]

4.4.3.3 Torres del Segre, Španělsko

V roce 2015 ve stanici na 220 kV Torres del Segre ve Španělsku byl instalován SSSC s vazebním transformátorem od firmy INGETEAM. Cílem bylo odstranit přetížení způsobené vysokou produkcí větrné a vodní energie. Byla využita modulární architektura, výkonové bloky po 10 MVA, kombinovatelné až na výkon 100 Mvar, připojené na sekundární stranu vazebního transformátoru o napětí 6,6 kV [62].



Obr. 4.16 Schéma SSSC (1) vazební transformátor, (2) spínače a bypass, (3) měniče VSC, zdroj: INGETEAM

4.4.3.4 Medellín, Kolumbie

Tento projekt představuje úspěšné využití digitálního řízení toku výkonu pro připojení více než 400 MW obnovitelných zdrojů do sítě. Instalace pomohla pokrýt rostoucí poptávku po elektřině v oblasti Medellín a regionu Antioquia, a současně přispěla ke snížení koncových cen elektřiny. Technologie je škálovatelná a flexibilní, což usnadňuje její rozšiřování. Kolumbijský projekt patří mezi průkopnické příklady využití SSSC na distribuční úrovni pro efektivní integraci velkého objemu obnovitelných zdrojů. Technologii m-SSSC dodala firma Smart Wires jako pilotní projekt, který byl první instalací této technologie v latinské Americe [17].

4.4.3.5 Další aplikace m-SSSC

Modulární SSSC jsou instalovány např. v USA, Irsku, Řecku, Velké Británii, Austrálii [62].

- **Pacific Gas and Electric (PG&E), USA**

Cílem pilotního projektu bylo získat provozní zkušenosti a ověřit bezpečný a efektivní provoz technologie v přenosové síti PG&E. Výsledky ukázaly, že zařízení dokáže snížit tok výkonu a fázovou nevyváženost, přičemž si zachovává vysokou dostupnost a spolehlivost s minimálním dopadem na primární ochranné systémy.

- **EirGrid, Irsko**

Na vedení 110 kV byly v rámci pilotního projektu nainstalovány tři jednotky SmartValve. Během jednoho roku EirGrid testoval dostupnost, spolehlivost, schopnost řízení toku výkonu, komunikaci, chování při poruchách a mechanickou odolnost zařízení v náročných povětrnostních podmínkách.

- **Stát New York, USA:**

Pilotní fáze**:** Společnost Central Hudson Gas & Electric nainstalovala tři zařízení na vedení 115 kV. Organizace EPRI sledovala projekt za účelem vyhodnocení technologie, identifikace zlepšení a doporučení další analýzy.

Plošné nasazení: Projekt Leeds–Hurley Avenue rozšířil pilotní fázi na 15 jednotek na vedení 345 kV, čímž se uvolnilo přes 185 MW kapacity ve stávající síti.

- **Řecko**

Ve spolupráci provozovatelem přenosové soustavy (IPTO) nainstalovala společnost Smart Wires šest modulárních zařízení pro řízení toku výkonu v mobilní kontejnerové jednotce. Projekt prokázal schopnost přesměrování toků výkonu, zvýšení přenosové kapacity a ochranu proti nečekaným výpadkům vedení. Jednotka byla později přemístěna do Bulharska, čímž se ukázala mobilita a znovupoužitelnost technologie.

- **Austrálie**

V roce 2022 společnost Transgrid nasadila 15 jednotek SmartValve na dvě více než 100 km vedení 330 kV v rozvodnách Stockdill a Yass. Tím se zvýšila kapacita sítě o 170 MW na propojení Victoria–NSW, provozovatel sítě se vyhnul nutnosti modernizace linek přes pohoří Snowy Mountains, což přineslo úsporu přibližně 268 milionů australských dolarů.

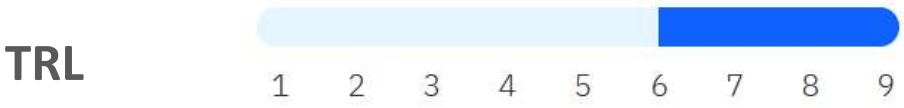
4.4.4 Náklady a úroveň připravenosti technologie

Na základě oficiální klasifikace úrovně technologické připravenosti TRL dle evropských směrnic pro provozovatele přenosových soustav (TSO) dosahuje technologie SSSC úrovně až **TRL 9**, neboť je plně ověřena v reálném provozním prostředí a byla implementována v několika přenosových soustavách. SSSC je průmyslově dostupná a nachází praktické uplatnění při řízení přenosových výkonů a stabilitě elektrizačních soustav. Připravenost technologie se liší podle toho, zda se jedná o konvenční nebo beztransformátorovou technologii [17], [32], [50], [62].

TRL 7 konvenční SSSC

TRL 9 beztransformátorové SSSC do 110 kV

TRL 6-7 beztransformátorové SSSC nad 110 kV



Následující výzkumné a vývojové aktivity mohou přispět k dalšímu zlepšení technologie SSSC [17]:

- Definování kritérií pro hodnocení požadovaného (pasivního) chování SSSC.
- Modelování SSSC.
- Začlenění SSSC do elektrických sítí za účelem zvýšení bezpečnosti.
- Detekce sub-synchronních oscilací způsobených interakcemi mezi SSSC a dalšími komponentami sítě.
- Určení optimálního rozmístění SSSC v elektrických sítích s ohledem na připojení OZE
- Identifikaci role SSSC ve strategiích řízení automatického řízení výroby v elektrických sítích s novými zdroji energie.
- Definování role beztransformátorových SSSC v řízení přetížení v reálném čase, řízení kvality elektrické energie a podpůrných službách (např. tlumení elektromagnetických přechodových jevů).

- Provedení komplexní analýzy nákladů životního cyklu a srovnání s jinými technologiemi pro různé aplikace.

Náklady na instalaci zařízení SSSC se pohybují 18-40 EUR/kvar (20-50 USD/kvar), průměrná investice je 30 EUR/kvar [58] .

4.5 Porovnání zařízení pro sériovou kompenzaci

FSC: Jednoduché, levné, bez aktivního řízení – vhodné pro základní zvýšení přenosové kapacity.

TSSC: Vylepšená verze FSC – umožňuje zapínat/vypínat kompenzaci podle potřeby.

TCSC: Umožňuje plynulé řízení impedance, vhodné pro tlumení oscilací a zlepšení stability.

SSSC: Nejmodernější technologie – využívá měnič napětí (VSC), umožňuje řízení toku výkonu, stabilizaci napětí, tlumení oscilací a podporu OZE.

PST: Vhodný pro směrování výkonu mezi oblastmi, ale není flexibilní v dynamickém řízení a má vyšší náklady.

Tab. 7 Porovnání technologií sériové kompenzace [5]

Technologie	Typ řízení	Způsob kompenzace	Reakce na poruchy	Možnost řízení výkonu	Stabilita při zkratu	Modularita	Náklady	Poznámka
FSC	Pasivní	Pevná kapacitní kompenzace	Nízká	Omezená	Nízká	Ne	Nízké	Jednoduché a levné řešení, vhodné pro základní zvýšení přenosové kapacity.
TSSC	Spínaná (dvoustavová)	Kapacitní, zapínaná/vypínaná tyristory	Střední	Omezená	Střední	Ne	Střední	Vylepšená verze FSC, umožňuje dynamické zapínání/vypínání kompenzace.
TCSC	Plynule řízená	Kapacitní/indukční, řízená tyristory	Dobrá	Dobrá	Střední	Ne	Vyšší	Umožňuje plynulé řízení impedance, vhodné pro tlumení oscilací a zlepšení stability.
SSSC	Plně řízená	Injektované napětí (VSC), kapacitní/indukční	Velmi dobrá	Výborná	Vysoká	Částečně (m-SSSC = modulární)	Vysoké	Nejmodernější technologie, vhodná pro pokročilé řízení výkonu, stabilizaci napětí a integraci OZE.
PST	Mechanická	Fázový posun napětí	Pomalejší	Dobrá pro směrování výkonu	Nízká	Ne	Vysoké	Vhodný pro směrování výkonu mezi oblastmi, ale méně flexibilní v dynamickém řízení.

[5] Copilot

Tab. 8 Porovnání technologií pro sériovou kompenzaci a hlediska aplikačních možností [50]

Typ zařízení	**FSC *(Fixed Series Capacitor)***	**TCSC *(Thyristor Controlled Series Capacitor)***	**m-SSSC *(Modular Static Synchronous Series Compensator)***	**QB *(Quadrature Booster)***
Zvýšení přenosové kapacity	Ano	Ano	Ano	Ano
Proměnlivá úroveň řízení toku výkonu	Ne	Ano	Ano	Ano
Rychlá odezva na dynamické události v síti	Ne	Ano	Ano	Ne
Zastavěná plocha (footprint)	Střední	Velká	Střední	Velká
Environmentální vlivy	Krajinný zásah	Krajinný zásah, hluk	Krajinný zásah	Krajinný zásah, hluk, únik oleje
Technologická vyspělost (Technology Readiness Level)	9	9	7–9 (pro >110 kV)	9

FSC – pevné kondenzátory

QB (Quadrature Booster) - typ phase shifting transformátoru

5 Kombinovaná zařízení FACTS

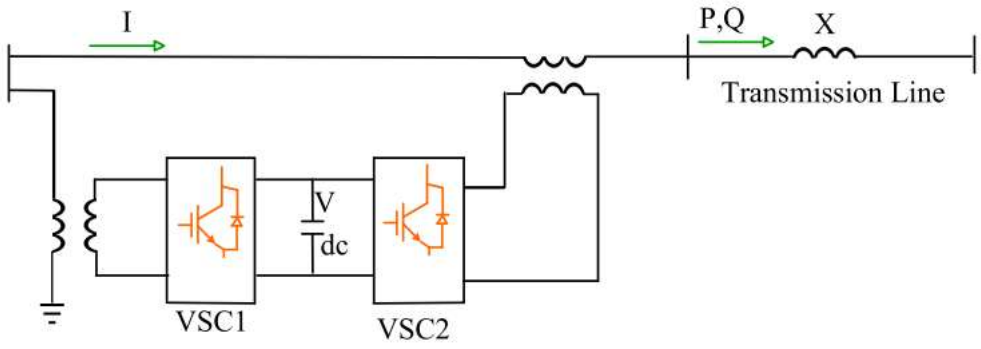
Tato zařízení propojující vlastnosti obou předchozích skupin jsou schopná současně ovlivňovat více parametrů (reaktanci, napětí a fázový posun), a tudíž toky činných i jalových výkonů, a optimalizovat provoz celé soustavy.

5.1 Unifikovaný regulátor výkonových toků (UPFC)

Jedná se jedno z nejkomplexnějších zařízení FACTS. Je využíváno především pro nezávislé řízení činného a jalového výkonu v přenosových linkách pro účely možného flexibilního, spolehlivého a ekonomického provozu a zatěžování elektrizační soustavy.

5.1.1 Popis funkce a provozní vlastnosti

UPFC je kombinací dvou typů FACTS zařízení – sériového a paralelního. UPFC se skládá z paralelního (budicího) a sériového (přídavného) transformátoru. Oba transformátory jsou spojeny dvěma měniči VSC se společným stejnosměrným meziobvodem realizovaným pomocí kondenzátoru (back-to-back spojení). Topologicky se jedná o spojení STATCOM a SSSC, funkčně se však oproti těmto systémům objevují nové možnosti. Umožňuje souběžné a nezávislé řízení velikosti a fázového posunu napětí a impedance vedení, tudíž nezávislé řízení činného a jalového výkonu [9], [76].



Obr. 5.1 Schéma zapojení UPFC [2]

Jalový výkon je generován nebo absorbován lokálně každým měničem zvlášť a nezávisle. Činný výkon vstřikovaný do systému sériovou větví musí být odebrán ze systému pomocí paralelní větve a přenášen do sériové větve přes stejnosměrný meziobvod. Jalový výkon paralelní větvě může být navíc řízen stejně jako u STATCOM, tj. nezávisle na poměrech v uzlu připojení. Paralelní měnič může generovat jalový proud tak, aby napětí uzlu bylo drženo na požadované hodnotě. Pak měnič pracuje v režimu řízení napětí. Paralelní jalový proud může rovněž odpovídat požadovanému induktivnímu nebo kapacitnímu jalovému výkonu, pak měnič pracuje v režimu řízení jalového výkonu [76].

UPFC je v podstatě schopen vykonávat funkce jiných FACTS systému popsaných výše, zejména regulaci napětí, řízení výkonových toků a zlepšení stability.

Výhody instalace zařízení UPFC

- řízení činného a jalového výkonu v elektrických sítích.
- zlepšení přechodové stability.
- zlepšení tlumení sub-synchronních rezonancí.
- využití pro dynamické i ustálené chování systému.

- udržování napěťové stability.

Nevýhody zařízení UPFC

- kvůli složité konfiguraci poměrně drahé zařízení.
- složitý princip fungování, potřeba řídit dva měniče pracující současně.

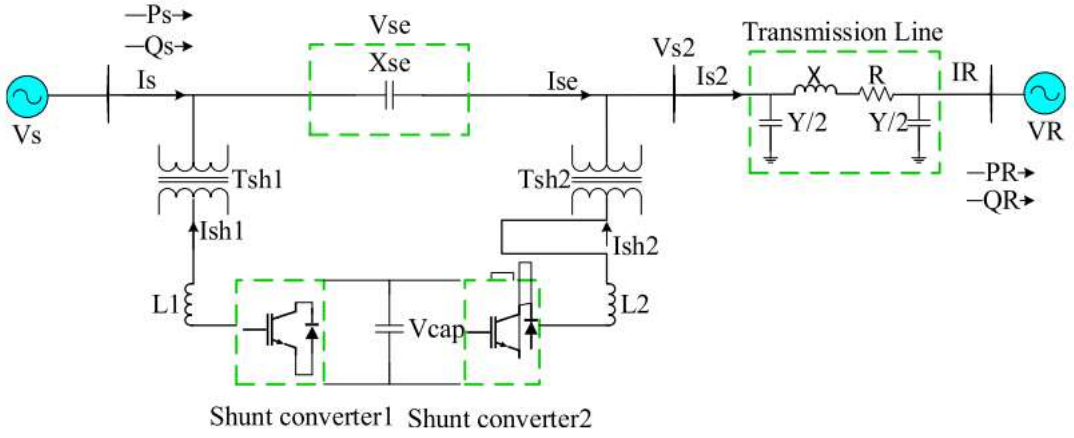
5.1.2 Modifikované typy UPFC

Tradiční konstrukce UPFC má určitá technické a ekonomická omezení, jako jsou vysoké náklady, velké rozměry a složitá údržba. Výzkum se zaměřil na vývoj upravených modelů UPFC, které zvyšují efektivitu, spolehlivost a flexibilitu zařízení [2].

Prvním inovativním přístupem je **UPFC bez transformátoru**, který využívá kaskádové víceúrovňové měniče (CMI). Tato konstrukce eliminuje potřebu objemných transformátorů, čímž se výrazně snižuje hmotnost, cena a ztráty zařízení. Díky modulárnímu uspořádání lze snadno přizpůsobit na požadovanou napěťovou hladinu. Zařízení vykazuje velmi nízké harmonické zkreslení (THD < 1 %).

Další variantou je **UPFC bez velkých elektrolytických kondenzátorů**, které jsou běžně používány v DC spojení mezi měniči. Tyto kondenzátory mají omezenou životnost a mohou snižovat spolehlivost systému. Alternativou je použití AC-AC konvertorů, konkrétně obvodu PPCD (Partial Power Conversion Device), který je založen na push-pull topologii. Tento obvod umožňuje kompenzaci napětí a redukci harmonických složek bez nutnosti velkých energetických zásobníků, což přináší vyšší účinnost a nižší náklady.

Třetí modifikací je **UPFC se dvěma paralelními měniči a velkým sériovým kondenzátorem**. Tato konfigurace umožňuje řízení aktivního a jalového výkonu podobně jako klasický UPFC, ale s výhodou velmi nízkého harmonického zkreslení při napěťové injekci.

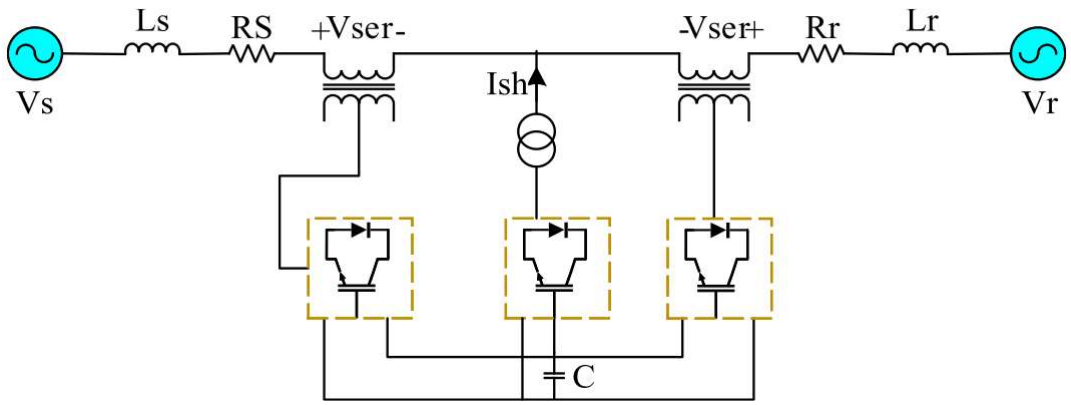


Obr. 5.2 Principiální schéma [2]

Měnič číslo 1 dodává nebo odebírá potřebný činný výkon. Zajišťuje také regulaci napětí na kondenzátoru v DC obvodu a výměnu jalového výkonu na straně prvního měniče. Měnič číslo 2, řízený referenčním proudem, dokáže řídit proud v sériovém kondenzátoru a vstřikovat požadované sériové napětí. V důsledku toho je proud v sériovém kondenzátoru proměnlivý a je řízen právě měničem číslo 2. Tím pádem je tok výkonu v sériovém kondenzátoru rovněž proměnlivý. Oba měniče mají identickou konstrukci, což zjednodušuje návrh a výrobu zařízení.

Poslední inovací je **UPFC s centrálním uzlem (C-UPFC)**, který kombinuje tři měniče – dva sériové na koncích vedení a jeden paralelní uprostřed. Tato konfigurace umožňuje nezávislé

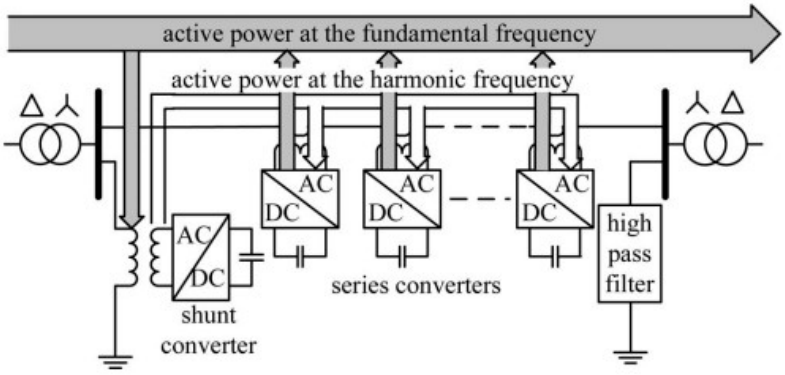
řízení napětí ve středu vedení a aktivního i jalového výkonu na obou koncích. Díky propojení přes stejnosměrný (DC) spoj dokáží dva sériové měniče upravit skutečný střídavý výkon tak, že výkon usměrněný jedním měničem se jeví jako opačný výkon. Navrhované zařízení umožňuje regulaci jalového a aktivního výkonu na jedné i druhé straně, stejně jako napětí ve středovém bodě vedení a napětí v DC spoji. Jalový a činný výkon na obou stranách lze řídit úpravou velikosti a fázového úhlu proudu ve vedení. Vstřikováním sériových napětí lze proud ve vedení efektivně řídit. Paralelní měnič funguje podobně jako zařízení STATCOM. Paralelní měnič musí pokrýt ztráty všech tří měničů a dodávat aktivní výkon sériovým měničům.



Obr. 5.3 Principiální schéma C-UPFC [2]

Tyto upravené modely UPFC představují významný krok vpřed v oblasti řízení výkonu v elektrických sítích. Nabízejí vyšší efektivitu, nižší náklady, lepší dynamickou odezvu a větší flexibilitu, což je klíčové pro moderní energetické systémy s vysokým podílem obnovitelných zdrojů.

DPFC (Distributed Power Flow Controllers) přináší zásadní konstrukční a provozní vylepšení. Hlavní inovací DPFC je eliminace společného stejnosměrného (DC) propojení mezi paralelním a sériovým měničem, který je u UPFC nezbytný pro výměnu aktivního výkonu. DPFC se skládá z jednoho paralelního měniče (podobného STATCOMu) a několika sériových jednofázových měničů, které jsou rozmístěny podél vedení. Každý měnič je nezávislý, má vlastní DC kondenzátor a je řízen samostatně. Výměna aktivního výkonu mezi paralelním a sériovými měniči probíhá prostřednictvím třetí harmonické složky proudu. Paralelní měnič odebírá aktivní výkon ze sítě na základní frekvenci (50 Hz) a zpětně jej vstřikuje do sítě jako proud na třetí harmonické frekvenci (150 Hz). Tento proud prochází přenosovou linkou, kde jej sériové měniče využívají k získání potřebného výkonu pro řízení napětí na základní frekvenci. Použití třetí harmonické je výhodné, protože v třífázovém systému představuje nulovou složku proudu, identickou ve všech fázích. Díky tomu lze harmonický proud snadno směrovat pomocí uzemnění transformátorů typu Y–Δ, které zároveň zabraňují úniku harmonických složek do zbytku sítě [9].



Obr. 5.4 Výměna činného výkonu mezi měniči tvořícími DUPFC [8]

Tab. 9 Porovnání technických parametrů mezi UPFC a DPFC [2]

Specifikace	**UPFC (Unified Power Flow Controller)**	**DPFC (Distributed Power Flow Controller)**
Odolnost vůči poruchám (Fault tolerance)	50 %	65 %
Účinnost (Efficiency)	Nižší (90–95 %)	Vyšší (95–98 %)
Přenosové ztráty (Transmission losses)	20 %	25 %
Úspora nákladů při realizaci (Cost reduction in implementation)	15 %	30 % *(ekonomicky výhodnější)*
Zlepšení stability systému (System stability improvement)	75 %	70 %
Harmonické zkreslení (Harmonic problem)	Snížené	Účinně potlačené
Stejnosměrné propojení (DC link)	K dispozici	Není k dispozici
Spolehlivost (Reliability)	Nižší než u DPFC	Velmi vysoká
Typ měniče (Converter configuration)	✓ Dvoufázový ✓ Třífázový	✓ Jeden společný paralelní měnič ✓ Více nezávislých sériových měničů
Hluk (Noise)	Vysoký	Nízký

5.1.3 Aplikace v PS a DS

Využití UPFC jsou následující [10]:

- Řízení napětí.
- Zlepšení napěťové stability.
- Kompenzace jalových výkonů.
- Tlumení oscilací.
- Zlepšení dynamické stability.
- Navýšení zatížitelnosti vedení.

UPFC nabízí **v přenosové síti** široké možnosti řízení toků výkonu. Sériový měnič vstřikuje do vedení střídavé napětí, které může mít libovolnou fázi 0 až 360° vzhledem ke vstupnímu napětí a libovolnou amplitudu, která odpovídá dimenzování UPFC. Sériový měnič tedy může pracovat ve všech čtyřech kvadrantech a řídit nezávisle činný a jalový výkon linky. Řídicími parametry UPFC jsou amplituda a fáze vstřikovaného napětí a amplituda jalového proudu paralelní větve. UPFC může pracovat v několika základních provozních režimech daných sériovým vstřikováním napětí:

- Regulace napětí – vstřikované napětí je ve fázi nebo protifázi s původním napětím.
- Sériová kompenzace – vstřikované napětí je kolmé na protékající proud.

- Fázové řízení – vstřikované napětí vyvolá změnu úhlu napětí, ale nezmění jeho velikost.
- Řízení výkonových toků – souběžné řízení uzlového napětí, sériové impedance i fázového natočení.

Tyto režimy zajišťují vysokou přesnost regulace a přizpůsobení provozu UPFC aktuálním stavům přenosové soustavy. UPFC dokáže pružně reagovat na poruchové stavy či změny topologie sítě.

V **distribuční síti** UPFC umožňuje plynulou regulaci napětí, řízení toků výkonu a zlepšení kvality napájení. Díky schopnosti rychle měnit velikost a fázi injektovaného napětí dokáže DUPFC reagovat na dynamické změny zatížení, integraci obnovitelných zdrojů a poruchové stavy, čímž zvyšuje spolehlivost a flexibilitu sítě. V uzavřených smyčkových sítích, umožňuje UPFC zvýšit napětí na koncových uzlech, potlačit přepětí a tlumit napěťové i výkonové oscilace při přítomnosti distribuovaných zdrojů.

Kvůli vysokým investičním nákladům došlo pouze k malému počtu realizací UPFC.

5.1.3.1 USA

Inez Substation, Kentucky, USA

Tento projekt představuje první reálně nasazený a komerčně provozovaný systém UPFC na světě. Byl realizován společností American Electric Power (AEP) ve spolupráci s Westinghouse a EPRI v letech 1997-98. Zařízení o výkonu ±160 MVA bylo instalováno na vedení 138 kV v rozvodně Inez ve státě Kentucky (USA). Hlavním cílem projektu bylo zvýšení přenosové kapacity o 100 MW, odložení výstavby nové linky 345 kV a zajištění dynamické podpory napětí při náhlých poruchách [40].

Marcy Substation – New York, USA

Ve státě New York byl v rozvodně 345 kV Marcy nainstalován nový regulátor CSC (Convertible Static Compensator). Jsou zde instalovány dva měniče o výkonu 100 MVA. Pomocí jednoho paralelního transformátoru o výkonu 200 MVA a dvou sériových transformátorů o výkonu 100 MVA lze měniče propojit mezi sebou i se sítí v 11 různých konfiguracích. Tato variabilní konfigurace umožňuje nasazení technologií STATCOM, SSSC, UPFC nebo IPFC na sběrnici a na dvou vývodových vedeních z rozvodny – konkrétně na vedeních Marcy–Coopers Corners a Marcy–New Scotland, obě s napětím 345 kV [43].

5.1.3.2 Čína

Sunan, Suzhou southern power grid, Čína

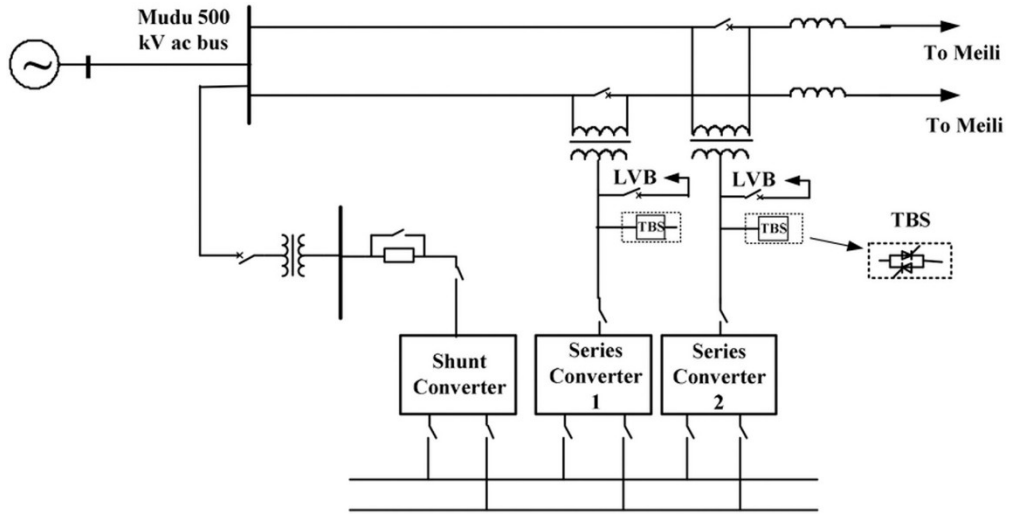
Tento projekt, realizovaný společností State Grid Jiangsu Electric Power Company, byl dokončen na konci roku 2017 a stal se největším a nejvýkonnějším UPFC na světě. Zařízení UPFC bylo instalováno na dvojitém vedení mezi stanicemi Mudu a Meili v provincii Jiangsu.

Soustava čelila několika zásadním problémům:

- Nedostatek jalového výkonu, protože hlavní zdroj – Jinsu DC přenosová linka – jalový výkon neposkytuje.
- Omezená přenosová kapacita, zejména v zimě, kdy výkon DC systému klesá a zatížení AC linek (zejména Meili–Mudu) překračuje limity.
- Riziko rozsáhlého odpojení zátěže při poruše DC systému, kdy by bylo nutné odpojit až 2000 MW.

- Obtížnost budování nových přenosových koridorů kvůli husté urbanizaci a ekologickým omezením.

Tradiční řešení, jako je posílení vodičů nebo výstavba nových vedení, se ukázala jako technicky nebo ekonomicky nevhodná. Stanice UPFC byla postavena severně od rozvodny Mudu na ploše 3,9 ha. Projekt zahrnuje instalaci dvou sériových měničů a jednoho paralelního měniče Série měniče připojené přes transformátory k vedení Meili–Mudu, paralelní měnič připojený k sběrnici 500 kV. Kapacita každého měniče je 250 MVA. Napětí v DC obvodu je ±90 kV. Projekt obsahuje adaptivní restartovací logiku UPFC integrovanou s ochranou AC sítě, která umožňuje zařízení automaticky přejít do provozního režimu po poruše. Celková investice činila přibližně 930 milionů jüanů [41], [44].

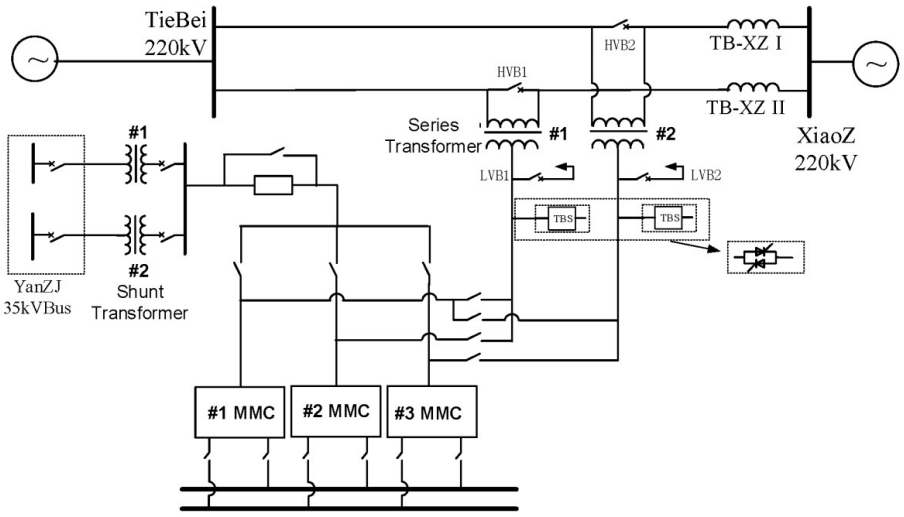


Obr. 5.5 Schéma UPFC ve stanici Mudu [41]

Technologii dodala firma NR Electric Co. pod označením PCS-8200 UPFC. Uvádí se, že jde o první zařízení, které využívá technologii MMC (modulární víceúrovňový měnič) [62].

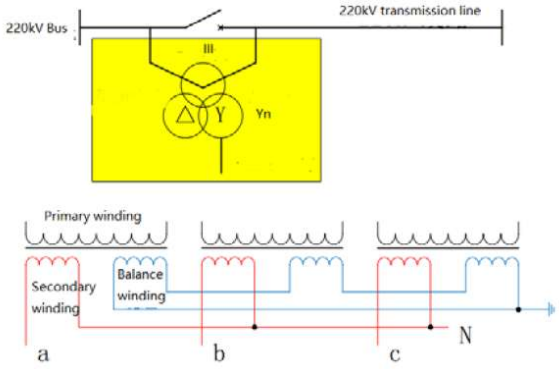
Nanjing Western Power Grid, Čína

Projekt UPFC v západním okruhu sítě Nanjing představuje první projekt UPFC v Číně, který byl nezávisle vyvinut, navržen a realizován. V rámci projektu byla instalována kompletní sada zařízení UPFC na dvojitém vedení 220 kV mezi stanicemi Tiebei a Xiaozhuang, přičemž samotná instalace proběhla v rozvodně Tiebei 220 kV. Projekt řeší nerovnováhu mezi výrobou a spotřebou elektrické energie v západní části sítě Nanjing, kde dochází k přetížení severního přenosového koridoru a nevyužití kapacity jižního koridoru. Tento UPFC realizovala společnost Jiangsu Electric Power Company (JSEPC) v Číně. Jde o první demonstrační projekt UPFC založený na technologii modulárního víceúrovňového měniče (MMC). Je v provozu od prosince 2015.



Obr. 5.6 Schéma UPFC ve stanici Tiebei [45]

Pro řízení výkonu ve dvou vedeních 220 kV mezi stanicemi Tiebei a XiaoZhg byla zvolena víceportová topologie se třemi měniči VSC (Voltage Source Converter). Všechny tři VSC jsou propojeny přes společnou DC sběrnici pomocí spínacích prvků. Dva VSC jsou připojeny sériově k jednotlivým vedením přes sériové transformátory, zatímco třetí VSC tvoří společnou paralelní část. Paralelní VSC je připojen ke dvěma přípojnicím 35 kV stanice Yan ZJ pomocí dvou záložních transformátorů. Víceúrovňový měnič MMC 60 MVA se skládá ze tří paralelně připojených fázových jednotek na stejnosměrné straně (DC). Každá fázová jednotka obsahuje 2x28 sériově spojených submodulů, z toho 2 záložní. Každý submodul obsahuje 2 IGBT tranzistory (3300 V / 1500 A), diodové spínače a kondenzátor pro ukládání energie. V projektu byla použita speciální konstrukce sériového transformátoru se zapojením vinutí III/ Y/yn0d11 uzemněný přes odporník 500 Ohmů.



Obr. 5.7 Speciální konstrukce sériového transformátoru se zapojením vinutí III/ Y/yn0d11 [45]

Statické testy prokázaly přesnou regulaci výkonů s odchylkou <0,3 % (P) a <0,8 % (Q), dynamické testy pak rychlou odezvu na změnu výkonu (cca 12,3 ms), přetížení <11 % [45].

Shanghai, Čína

Projekt řeší tři klíčové problémy provozu městské přenosové sítě:

- Nerovnoměrné rozdělení výkonu na rozhraní Zhabei–Yunzaobang.
- Nestabilita napětí způsobená vysokým dovozem výkonu z jihozápadní Číny.
- Nerovnováha jalového výkonu.

UPFC byl v roce 2017 instalován na vedení 220 kV Zha–Yun2258 mezi stanicemi Zhabei a Yunzaobang, kde docházelo k přetížení kvůli nižší impedanci oproti ostatním dvěma vedením na stejném rozhraní. Použité MMC měniče mají výkon 50 MVA, DC napětí 20,8 kV, AC napětí 19,2 kV, 28 submodulů (26 + 2 záložní) s IGBT (3300 V / 1500 A). Sériový transformátor 50 MVA je v zapojení III/yn0d11, impedance 12 %, chlazení olejem; paralelní transformátor 100 MVA, zapojení Y/yn0d11, impedance 10 %, uzemnění přes odpor. UPFC může pracovat v režimu UPFC, SSSC nebo jako jednoduchý nebo dvojitý STATCOM.

Po instalaci vzrostla přenosová kapacita koridoru Zhabei–Yunzaobang z 570 MW na 620 MW. Došlo ke zlepšení statické stability napětí o 500 MW, což odpovídá 1,6 % špičkového zatížení sítě. Kompenzace nedostatku induktivního výkonu dosahuje až 100 Mvar [42], [46].

5.1.3.3 Kangjin Substation, Korea

V roce 2003 byla dokončena nainstalace zařízení UPFC o výkonu 40 MVA ve stanici 154 kV Kang-Jin v provincii Jeonnam, provozovanou společností KEPCO (Korea Electric Power Corporation). Projekt byl zaměřený na zlepšení stability a řízení výkonu. Zařízení dodal firma Siemens. Jednalo se o sériový měnič 40 MVA a paralelní měnič 40 MVA. UPFC může pracovat v režimu STATCOM, SSSC, UPFC (běžně provozován v režimu UPFC). UPFC, SSSC nebo jako jednoduchý nebo dvojitý STATCOM. Projekt sloužil jako pilotní instalace pro ověření technologie UPFC v korejské přenosové síti [46].

5.1.4 Náklady a úroveň připravenosti technologie

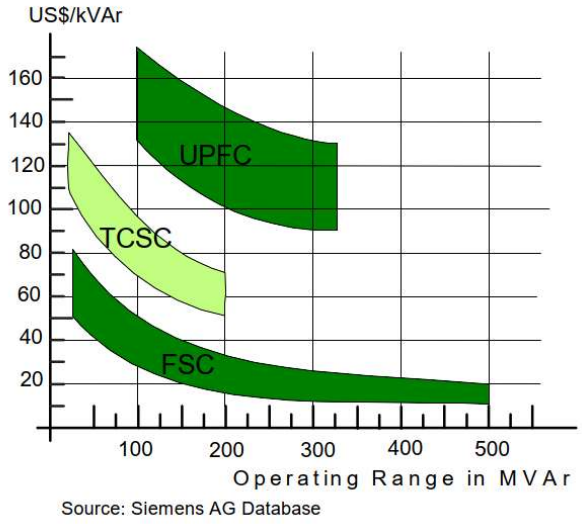
Technologii UPFC můžeme zařadit na úroveň **TRL 9**, protože je ověřena v reálných aplikací po celém světě. Jedny z prvních instalací jsou už před rokem 2000 a dnes je tradičně komerčně využívána. UPFC je tedy součástí standardů a inženýrských specifikací pro FACTS v přenosových sítích.

Náklady na instalaci zařízení UPFC se pohybují v rozmezí 140-170 USD/kvar [66].

Náklady na instalaci zahrnují součet všech nákladů na instalaci zařízení a lze je vypočítat pomocí nákladové funkce dané rovnicí [14]:

$$C_{UPFC} = 0{,}0003\,S^2 - 0{,}2691S + 188{,}22 \qquad \text{USD/kvar} \tag{6}$$

kde S je provozní rozsah (kompenzační výkon) v Mvar. Jedná se ale o 20 let staré údaje, stejně tak jako [66].



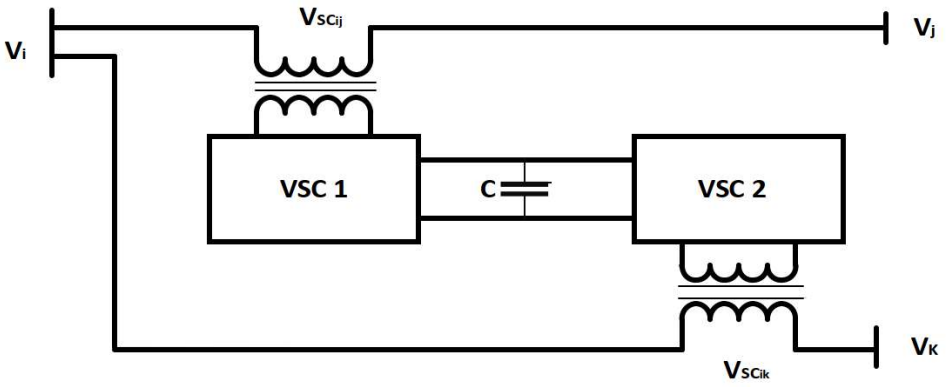
Obr. 5.8 Typické investiční náklady, zdroj Siemens [66]

5.2 Mezilinkový regulátor výkonových toků (IPFC)

IPCF (Interline Power Flow Controller) je pokročilé zařízení typu, které umožňuje současné řízení toků výkonu ve více přenosových linkách v rámci jedné oblasti. Funguje na principu sériového vstřikování napětí pomocí napěťových měničů (VSC).

5.2.1 Popis funkce a provozní vlastnosti

IPFC je kombinací dvou sériových FACTS zařízení. Skládá ze dvou SSSC (statický synchronní sériový kompenzátor) a kondenzátoru. Dva měniče VSC zapojené do tzv. back-to-back zapojení jsou sériově připojeny ke dvěma přenosovým vedením. Činný výkon je mezi sériovými měniči vyměňován prostřednictvím DC meziobvodu. IPFC zvyšuje využití přenosových vedení, umožňuje nezávislou sériovou kompenzaci pomocí měničů DC–AC a usnadňuje efektivní přenos výkonu [11], [12].



Obr. 5.9 Schéma zapojení IPFC [12]

IPFC může pracovat v kapacitním režimu, kdy vstřikované napětí je ve stejném směru jako uzlové V1. Výsledkem je zvýšení efektivního napětí a zlepšení proudovou propustnost. Tento režim se používá pro zvýšení přenosové kapacity. Induktivní režim se používá v případě poruchy na vedení. V tomto režimu je napětí vstřikováno v opačném směru než V1, což sníží napětí na vedení, zvýší zdánlivou impedanci vedení a sníží poruchový proud [11].

Výhody instalace zařízení IPFC

- současné řízení více vedení – na rozdíl od UPFC, který působí na jedno vedení.
- rychlá odezva na změny zatížení nebo poruchy.
- zvýšení efektivity využití infrastruktury.
- možnost přechodu mezi kapacitním a induktivním režimem podle provozních podmínek.
- zlepšení rozložení výkonu v síti bez nutnosti fyzických změn topologie.

Nevýhody zařízení IPFC

- kvůli složité konfiguraci poměrně drahé zařízení.
- složitý princip fungování, potřeba řídit dva měniče pracující současně.
- citlivost na poruchy – nutnost robustní ochrany a záložních režimů.

5.2.2 Aplikace v PS a DS

Využití IPFC jsou následující:

- Optimalizace toků výkonu mezi více vedeními.
- Redukce přetížení a zvýšení přenosové kapacity.
- Dynamická kompenzace činného a jalového výkonu.
- Zlepšení stability při poruchách (např. třífázových).
- Podpora při řízení napětí a zlepšení kvality dodávky.

IPFC je **v přenosové síti** určen k řízení toků výkonu v několika přenosových vedeních připojených k jedné rozvodně, kde může vznikat problém s nepoměrem jalového a činného výkonu, tzn. nedostatek reaktanční složky ve vedení. U nízkého poměru X/R může vést k nárůstu ztrát a jalového výkonu. IPFC tento problém odstraňuje přímým přenosem činného výkonu mezi linkami, vyrovnáváním zátěže, kompenzací napěťových úbytků a tlumením výkonových oscilací.

IPFC má také významný dopad na ochranné systémy. Jeho nasazení mění zdánlivou impedanci vedení, což ovlivňuje nastavení zón distanční ochrany [11]. Správná koordinace ochrany je klíčová zejména v blízkosti zdrojů, kde je instalace prostorově i provozně náročná.

V oblasti stability IPFC účinně potlačuje lokální i mezioblastní kmity. Díky rychlé reakci a možnosti dynamického přerozdělování výkonu mezi vedeními je výhodným řešením pro stabilizaci přenosových sítí [12], [51], [52], [54].

Ačkoliv je IPFC primárně určeno pro přenosové soustavy, jeho principy by bylo možné hypoteticky využít i **v distribučních sítích**, zejména v případech s více paralelními napájecími větvemi z jedné rozvodny. IPFC by mohl dynamicky vyrovnávat tok činného a jalového výkonu mezi větvemi, zlepšovat napěťový profil na koncích vedení, integrovat vyšší podíl obnovitelných zdrojů energie bez rizika přetížení jednotlivých linek a potlačovat výkonové oscilace při rychlých změnách zátěže nebo ostrovním provozu. Tím by přispěl k lepšímu využití stávající infrastruktury a zvýšení provozní stability distribuční soustavy.

Nasazení IPFC v distribuční síti by však bylo spojeno s řadou problémů, které by bylo nutno vyřešit. Mezi hlavní patří vysoké investiční a provozní náklady, které jsou díky nižším výkonovým tokům v distribučních sítích hůře ekonomicky obhajitelné. Instalace IPFC by vyžadovala dostatečný prostor a úpravy stávající infrastruktury, přičemž by bylo nutné řešit i ztráty způsobené výkonovou elektronikou. Z hlediska řízení je distribuční síť často radiální a

jednodušší než přenosová, což by vyžadovalo koordinaci řízení a ochranných schémat. IPFC také mění zdánlivou impedanci vedení, což by mohlo ovlivnit činnost ochran a tím pádem nutnost předimenzování.

Oproti UPFC má IPFC zatím málo reálných instalací.

Marcy, New York, USA

Tato instalace byla realizována v rozvodně Marcy (NYPA) ve státě New York. Zařízení typu Convertible Static Compensator (CSC) pracuje na napěťové úrovni 345 kV a tvoří jej dva 100 MVA napěťové měniče VSC. Pomocí paralelního (shunt) zapojeného transformátor 200 MVA a dvojice sériových transformátorů 100 MVA lze měniče konfigurovat do režimů STATCOM/SSSC/UPFC/IPFC. V režimu IPFC jsou měniče sériově připojeny do dvou vedení 345 kV Marcy–New Scotland a Marcy–Coopers Corners a propojeny společným DC meziobvodem, což umožňuje obousměrný přenos činného výkonu mezi linkami a nezávislou sériovou jalovou kompenzaci (hlavní princip IPFC). Provozní studie potvrdily pozitivní tlumení kmitů při testovaných kontingencích a doporučily IPFC režim ke schválení. Po úspěšných zkouškách byl první IPFC na světě v říjnu 2003 v Marcy uveden do provozu [43], [53].

Náklady a úroveň připravenosti technologie

S ohledem na reálné uvedení do provozu v konfiguraci CSC na rozvodně Marcy (NYPA) lze IPFC hodnotit jako technologii na úrovni **TRL 8–9** (hraničně) dle definice TRL — prokázání v operačním prostředí je zdokumentováno, avšak s omezenou replikací. Z hlediska komerčního užití však technologie zůstává pozadu což ukazuje, že přetrvávají integrační a ekonomické bariéry (vliv na ochrany, nutnost přesného ladění regulace, špatná integrace na vícelinková spojení).

Náklady na instalaci zařízení IPFC lze odvodit od nákladů na UPFC, cena bude patrně obdobná, v rozmezí 140-170 USD/kvar [66].

6 Inovativní typy regulátorů FACTS

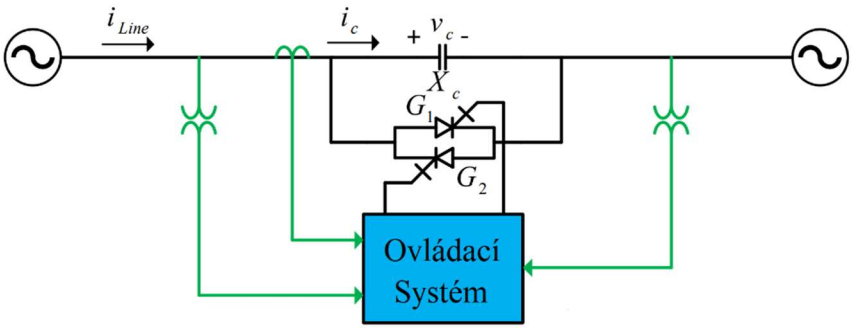
S rostoucími nároky na přenosovou kapacitu a integraci obnovitelných zdrojů energie se vyvíjejí nové typy regulátorů FACTS, které nabízejí vyšší efektivitu, flexibilitu a nižší náklady. Inovativní typy regulátorů FACTS představují pokročilé verze tradičních zařízení, nebo zařízení využívající netradiční topologie a technologie.

6.1 Gatem řízený sériový kondenzátor (GCSC)

Jedním z nových sériových zařízení FACTS je GCSC, jeho vývoj započal na počátku 21. století. GCSC je považována za slibnou alternativu k tyristorově řízenému sériovému kondenzátoru TCSC.

6.1.1 Popis funkce a provozní vlastnosti

GCSC je zařízení zapojené sériově do vedení. Sestává se z kondenzátoru, ke kterému jsou paralelně připojeny dva antiparalelně zapojené spínače s možností vypnutí pomocí řídicí elektrody (gate turn-off), např. tyristory GTO (Gate Turn-Off Thyristor) nebo tranzistory IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Tyto spínací prvky umožňují aktivní řízení zapnutí i vypnutí pomocí řídicí elektrody (gate). Oproti tomu klasický tyristor spíná bez možnosti vypnutí řídicím signálem (vypne se přirozeně při průchodu proudu nulou). Pomocí řídicího signálu lze přesně ovládat, kdy je kondenzátor aktivní, a tím dynamicky měnit impedance vedení [33].



Obr. 6.1 Schéma zapojení GCSC připojené na síť [33]

GCSC pracuje na principu Zero-Voltage Switching – spínání probíhá v okamžiku, kdy je napětí na spínači nulové. Díky tomu dochází k výraznému snížení spínacích ztrát. Řízení se provádí pomocí změny vypínacího úhlu γ (gama), který se měří od průchodu průběhu proudu vedení nulou. Pokud jsou spínače trvale sepnuté, kondenzátor je neustále připojen a nedochází ke kompenzaci. Aby se dosáhlo kompenzačního účinku, musí se spínače (G1 a G2) vypnout jednou za každou periodu střídavého proudu, a to při definovaném vypínacím úhlu γ. Tímto způsobem vzniká střídavé nabíjení a vybíjení kondenzátoru, což generuje napětí v sérii s vedením. Toto řiditelné napětí je fázově posunuté o 90° za proudem vedení. Díky tomu se GCSC chová jako proměnný kapacitní prvek, jehož reaktance závisí právě na zvoleném úhlu vypnutí γ. Čím je tento úhel větší, tím menší je výsledná kapacitní reaktance. Tato schopnost plynulého řízení reaktance je jednou z hlavních výhod GCSC oproti TCSC, které má omezený rozsah řízení. GCSC navíc nevyžaduje paralelní tlumivku, což snižuje náklady a zjednodušuje konstrukci [33].

Výhody zařízení GCSC

- Jednoduchost, není potřeba tlumivky jako u TCSC.
- Vyšší rychlost odezvy.

- Plynulé řízení.
- Široký kompenzační rozsah oproti TCSC.
- Nižší ztráty.
- Účinné tlumení oscilací.
- Nižšímu výskyt rezonancí.

Nevýhody zařízení GCSC

- Méně rozšířená technologie.
- Složitější řízení.
- Vyšší nároky na ochranu oproti TCSC.
- Vyšší cena oproti SSSC.

Výhodné funkce pro PS a DS

- Zvyšuje přenosovou kapacitu a umožňuje efektivnější využití vedení, zejména při dálkovém přenosu výkonu.
- Umožňuje plynulé řízení sériové kapacitní kompenzace pomocí řízení blokovacího úhlu GTO prvků.
- účinné potlačení inter-area oscilací, zvláště v těžkých provozních podmínkách přenosových tras.
- Účinnější tlumení oscilací oproti TCSC, a to jak z hlediska rychlosti odezvy (0,4 s oproti 1,5 s), tak celkového útlumu sub-synchronních rezonančních jevů.
- Zlepšuje stabilitu napětí a výkonovou rovnováhu během poruch, včetně modelovaných třífázových poruch (SSCI).
- Jednoduchá implementace a nízká výpočetní náročnost umožňuje použití i v menších decentralizovaných aplikacích [33], [34], [35], [36].

6.1.2 Úroveň připravenosti technologie

Přestože technologie GCSC nabízí z technického hlediska řadu výhod, její reálná uplatnitelnost v současnosti je velmi omezená. Z odborných zdrojů [34] [35] [36] lze říct, že GCSC byl zatím využíván výhradně v simulačních a laboratorních modelech, kde prokázal vysokou účinnost pro využití v přenosových soustavách, především při účinném potlačení sub-synchronní rezonance v souvislosti s provozem větrných parků, tlumení výkonových oscilací. Autorům není známo praktické nasazení této technologie ani v podobě pilotního prototypu. Důvody absence reálného testování GCSC mohou být následující:

- Složitost řízení GTO prvků a jejich ochrany v reálných vysokonapěťových systémech,
- Nedostatečně prozkoumané chování při poruchových stavech a interakcí s ochranami,
- Konkurence déle zavedených technologií, jako je TCSC, SSSC nebo DSSC, které mají doložené provozní nasazení a vyšší (TRL).

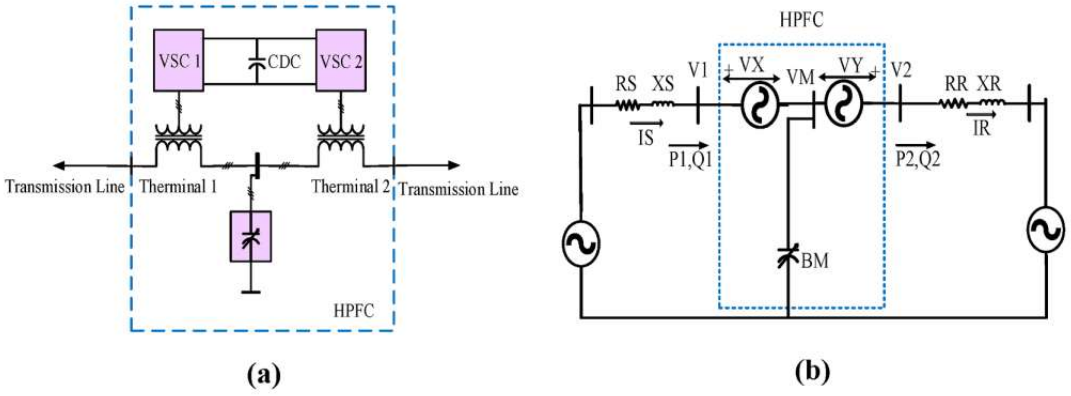
Technologie GCSC je v rámci FACTS zařízení stále považována za relativně novou, a její úroveň technologické připravenosti se pohybuje přibližně na úrovni **TRL 4–5.** Očekává se další vývoj směrem k TRL 6–7, pokud budou realizovány pilotní projekty v reálných sítích.

Přesto je GCSC považováno za perspektivní řešení pro moderní elektrické sítě s vysokým podílem obnovitelných zdrojů.

6.2 Hybridní regulátor výkonových toků HPFC

Hybridní regulátor toků výkonu HPFC (Hybrid Power Flow Controller) představuje cenově dostupnou alternativu k tradičnímu UPFC, která je založena na měniči VSC a kombinaci aktivních a pasivních prvků. Jeho hlavní výhodou je schopnost nezávisle řídit různé systémové veličiny, přičemž si zachovává nižší pořizovací náklady.

Zařízení, které kombinuje vlastnosti sériových a paralelních kompenzátorů, např. TCSC a SVC, se skládá z měničů, pasivních prvků (např. kondenzátororů) a společného stejnosměrného (DC) meziobvodu, přes který si měniče vyměňují činný výkon. Pokud se nezohlední vnitřní ztráty zařízení, je čistá výměna činného výkonu se sítí nulová. Výstupy měničů spolu s paralelním prvkem ovlivňují rozložení výkonu v přenosové soustavě.



Obr. 6.2 Schéma HPFC a jeho náhradní obvod [2]

HPFC pracuje v několika režimech řízení, které se přepínají podle provozních podmínek:

- **PVV režim:** Regulátor se snaží udržet hodnoty proudů IS a IR, napětí VX a VY v povoleném rozsahu pomocí úpravy parametrů P, V1 a V2.
- **PQQ režim:** Pokud některá veličina překročí limit a nelze ji upravit v režimu PVV, přechází regulátor do režimu PQQ, kde se nastavují parametry P, Q1 a Q2.
- **V režim:** Pokud ani režim PQQ nedokáže obnovit požadované hodnoty, regulátor se chová jako paralelní regulátor napětí, obchází sériové zdroje napětí a upravuje napětí pomocí změny susceptance paralelního prvku.
- **Z režim:** V případě, že susceptance dosáhne svého maxima, regulátor se chová jako konstantní admitance, čímž se jeho funkce stabilizuje.

Výhody

- Nižší náklady než u UPFC, protože **používá** méně výkonových měničů a částečně pasivní prvky.
- Vyšší účinnost, protože omezuje počet energetických konverzí.
- Schopnost nezávislého řízení napětí a výkonu podobně jako UPFC.
- Flexibilní konfigurace – lze kombinovat různé úrovně kompenzace podle potřeby.

Nevýhody

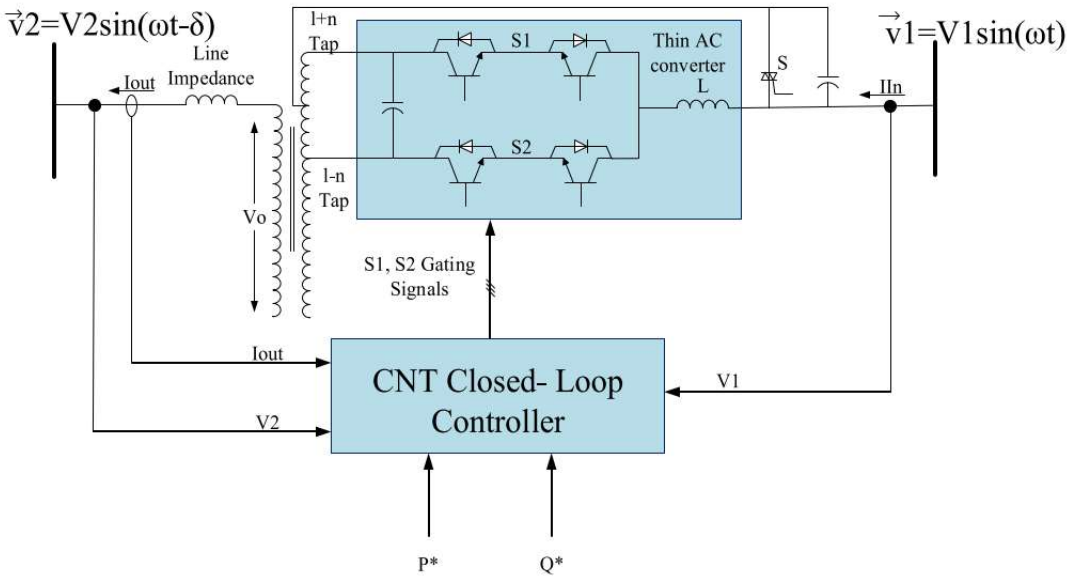
- Menší rozsah řízení než u UPFC – nedokáže regulovat všechny parametry současně v plném rozsahu.
- Složitější řízení (nutnost koordinace několika měničů a pasivních prvků).

- Nižší přesnost a dynamická odezva.
- Vyšší nároky na synchronizaci mezi částmi systému (DC meziobvod, měniče).

HPFC se hodí pro aplikace, kde je prioritou ekonomická efektivita. HPFC prošel testováním a byl ověřen jako účinný regulátor výkonu v elektrických sítích [2], [94].

6.3 Řiditelný síťový transformátor CNT s odděleným regulátorem s uzavřenou regulační smyčkou

CNT (Controllable Network Transformer) je zařízení pro řízení výkonu v elektrických sítích, které kombinuje klasický transformátor s AC měničem (thin AC converter) umístěným mezi odbočkami transformátoru. Tento měnič má pouze zlomkový výkonový a napěťový rozsah oproti hlavnímu transformátoru, což výrazně snižuje náklady. CNT využívá metodu Dual Virtual Quadrature Source (DVQS), která umožňuje měnit jak amplitudu, tak fázový posun výstupního napětí. Tím lze řídit činný i jalový výkon v přenosové soustavě. Pro přesné řízení je doplněn regulátorem s uzavřenou smyčkou (decoupled closed-loop controller), který eliminuje vzájemné ovlivňování mezi řízením P a Q [95].



Obr. 6.3 Schéma CNT s regulační obvod se zpětnou vazbou [2]

Výhody

- Nižší náklady než u UPFC díky použití zlomkově dimenzovaného měniče a pasivních prvků.
- Vyšší účinnost, protože omezuje počet energetických konverzí.
- Nezávislé řízení činného a jalového výkonu (P a Q) pomocí uzavřené regulační smyčky s PI regulátory.
- Rychlá dynamická odezva, vhodná pro řízení výkonu v reálném čase.
- Nízké harmonické zkreslení, třetí harmonická může být efektivně filtrována.
- Flexibilní konfigurace: možnost kombinace různých úrovní kompenzace podle potřeby.
- Vhodné pro jednofázové i třífázové aplikace – třífázové systémy využívají tři samostatné CNT.

Nevýhody

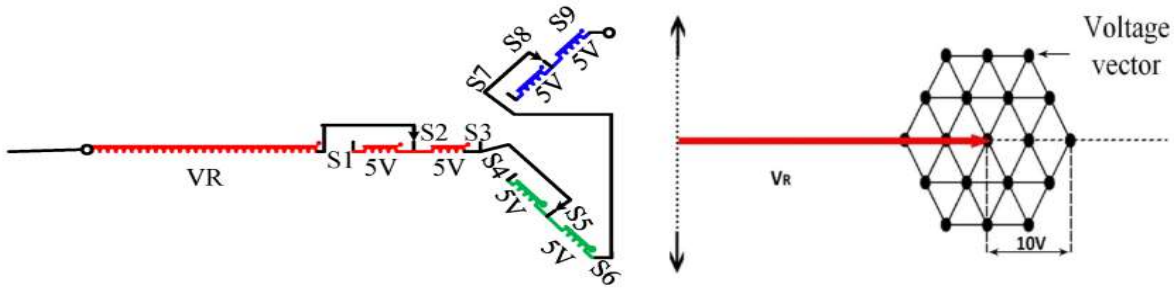
- Omezená schopnost dodávat nebo odebírat jalový výkon bez přídavného úložiště energie.

- Technologické výzvy při výrobě speciálního AC měniče (thin AC converter) a jeho integraci do stávajících transformátorů.
- Dlouhodobá spolehlivost: zatím neexistuje dostatek provozních dat z rozsáhlých aplikací.

Jedná se o ověřený prototyp 10 kVA. Není známo praktické nasazení tohoto zařízení.

6.4 Vícevinuťový transformátor MWT

MWT (Multi-Winding Transformer) je alternativní zařízení pro řízení výkonových toků, které využívá více vinutí transformátoru s asymetrickým napěťovým poměrem a logiku přepínání pro řízení výkonu pomocí napěťových vektorů. Pomocí změny napěťového poměru mezi vinutími prostřednictvím přepínače odboček se vytváří kompenzační napětí, které se přičítá k napětí hlavního vinutí. Tím se mění velikost a fáze napětí na začátku vedení, což umožňuje řídit tok činného i jalového výkonu. MWT je navržen tak, aby poskytoval velké množství kompenzačních bodů (např. až 319 napěťových vektorů), což zvyšuje rozlišení řízení výkonu. Kompenzace probíhá ve dvou krocích pomocí algoritmu asymetrické hexagonální dekompozice, který vybírá nejbližší napěťový vektor k požadované hodnotě [96].



Obr. 6.4 Jednocestné zapojení transformátoru s přepínačem odboček a 19 napěťových vektorů [96]

Výhody

- Nezávislé řízení činného a jalového výkonu, obdobně jako u UPFC, avšak s nižšími náklady.
- Nižší ztráty než u UPFC – není zde nutná konverze AC/DC/AC, což zvyšuje účinnost systému.
- Vyšší flexibilita – výrazně více kompenzačních bodů než u klasických transformátorových regulátorů toku výkonu .
- Možnost přesného řízení výkonu díky sofistikované spínací logice a algoritmickému výběru napěťového vektoru.
- Možnost integrace do stávajících transformátorů jako doplňkový modul.

Nevýhody

- Složitější konstrukce – více vinutí, větší počet spínačů a náročnější řízení.
- Pomalejší dynamická odezva než u plně výkonově elektronických zařízení (např. UPFC).
- Nižší přesnost řízení v porovnání s pokročilými měniči VSC, zejména při velmi rychlých změnách zatížení.
- Diskrétní regulace na rozdíl od UPFC nelze nastavit přesnou hodnotu, pouze nejbližší dostupný bod.
- Mechanické přepínače omezují rychlost změny a vyžadují údržbu.

Není známo praktické nasazení tohoto zařízení.

6.5 Další alternativní regulátory

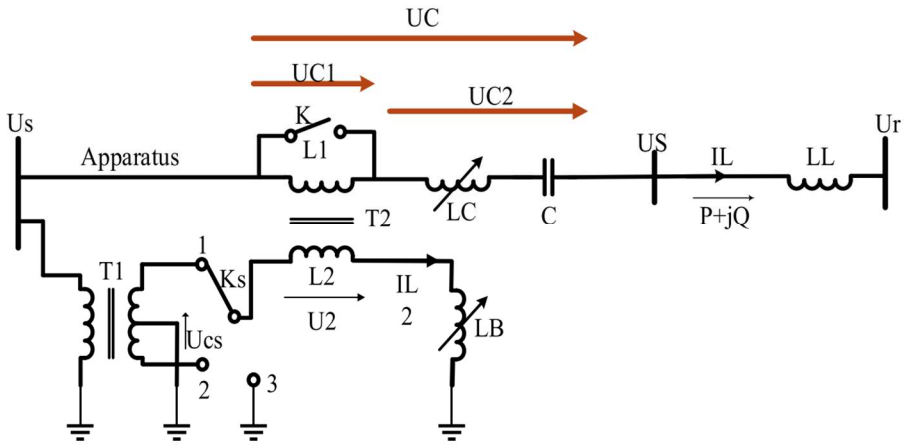
Existují i další alternativní regulátory výkonových toků, avšak není známo, že by byly využity v praxi.

Regulační zařízení s proměnnými indukčnostmi

Další varianta regulátoru [97], která nevyužívá měniče, slouží k řízení vstřikovaného kompenzačního napětí. Napětí je regulováno pomocí proměnných indukčností, nikoli měniče. Na rozdíl od UPFC, které převádí střídavé napětí na stejnosměrné a zpět, toto zařízení provádí přímou konverzi střídavého napětí na požadované střídavé napětí. Tím se může dosáhnout vyšší účinnosti.

Zařízení se skládá ze sériového a paralelního transformátor (T2, T1), přepínače odboček, proměnných induktorů (LB, LC) a kondenzátoru (C). Vstřikované napětí má složku rovnoběžnou s proudem vedení (IL), která ovlivňuje činný výkon, a složku kolmou k proudu vedení, ta ovlivňuje jalový výkon. Složky je možné řídit nezávisle. Pomocí řízení indukčností lze nezávisle upravovat fázi i amplitudu napětí, což umožňuje tyto režimy provozu:

- DVR (Direct Voltage Regulation) – přímá regulace napětí,
- PAR (Phase Angle Regulation) – regulace fázového posunu,
- Řízení toku činného a jalového výkonu.



Obr. 6.5 Schéma zařízení s proměnnými indukčnostmi [2]

Výhody

- Vyšší účinnost díky přímé AC–AC konverzi (bez DC mezistupně).
- Nezávislé řízení fáze a amplitudy vstřikovaného napětí.
- Jednodušší konstrukce než UPFC nebo PST (Phase Shifting Transformer).
- Ekonomičnost a spolehlivost – využívá běžně dostupné komponenty.
- Flexibilní řízení výkonu – umožňuje přesné nastavení požadovaného toku výkonu.

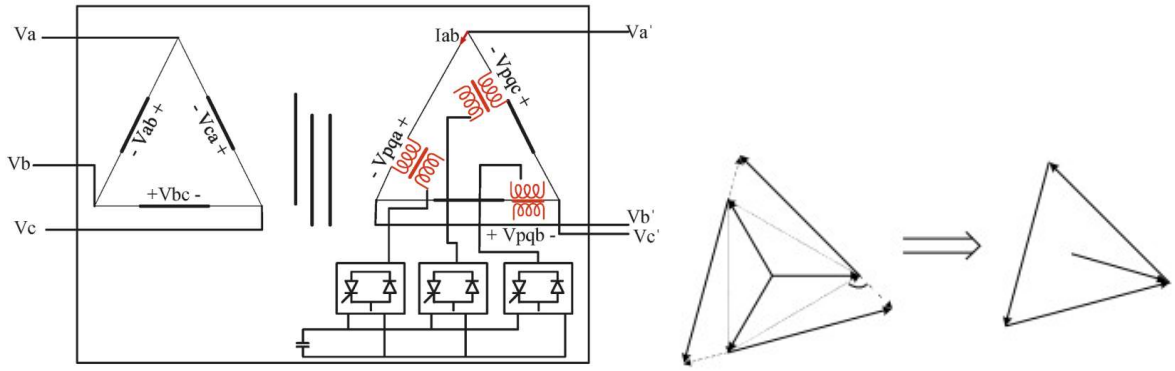
Nevýhody

- Mechanické přepínače odboček mají pomalou odezvu – pro rychlé řízení je nutné použít polovodičové spínače.
- Složitější řízení indukčností, potřeba přesné synchronizace.

Funkce zařízení byla experimentálně ověřena, avšak vyžaduje další vývoj a testování v reálných podmínkách.

Line-to-Line Compensator (LLC)

LLC je nový typ zařízení FACTS, které se neřadí mezi klasické sériové či paralelní kompenzátory. Vstřikuje kompenzační napětí mezi dvě fáze třífázového transformátoru pomocí jednofázových měničů. Funguje podobně jako sériový kompenzátor SSSC, umožňuje řízení činného výkonu, ale s vyšší odolností vůči poruchám [98].



Obr. 6.6 Topologie zařízení LLC a ukázka vlivu na fázorový diagram napětí [2], [98]

Výhody

- Nezávislé řízení výkonu – umožňuje přesné nastavení přenášeného činného výkonu.
- Odolnost vůči poruchám – při výpadku jednoho měniče nebo transformátoru může zařízení dál fungovat.
- Nízké harmonické zkreslení – díky delta vinutí se potlačuje 3. harmonická složka.
- Možnost využití aktivního zdroje – lze připojit baterii nebo palivový článek pro výměnu činného výkonu.
- Může být instalováno samostatně nebo integrováno do existujícího transformátoru.

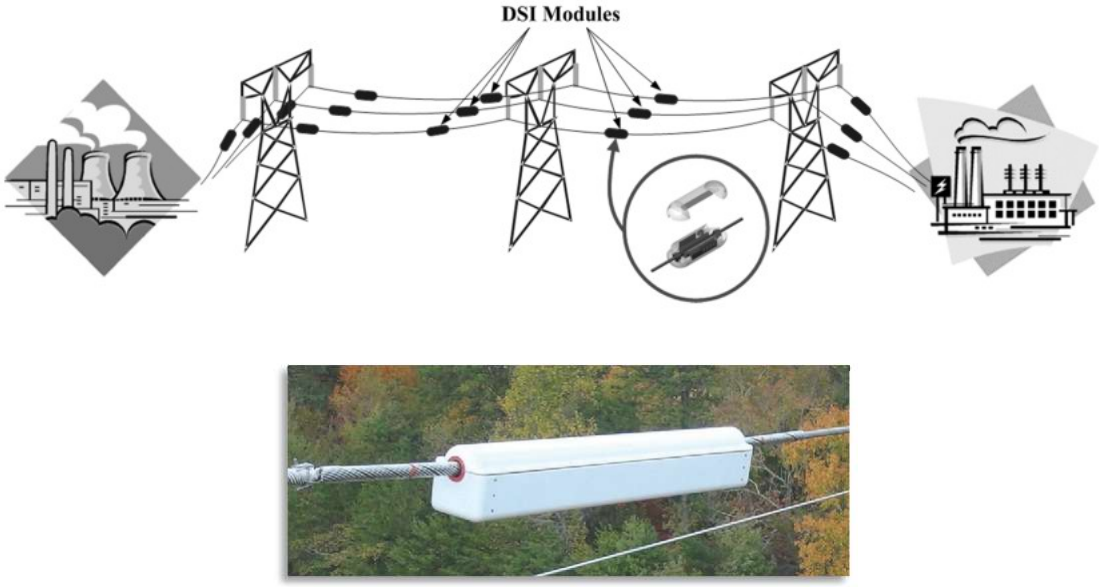
Nevýhody

- Nutnost vinutí delta (trojúhelník).
- Složité řízení – vyžaduje přesné výpočty fázového posunu a napětí.
- Omezené možnosti řízení ve srovnání s UPFC.

Zařízení je vhodné pro distribuční sítě, zejména tam, kde je potřeba kompenzace mezi fázemi. Technologie je nová, zatím v experimentální fázi a není běžně nasazena v provozu.

7 D-FACTS a M-FACTS zařízení

Klasická FACTS zařízení jsou většinou robustní a investičně náročné instalace, které se využívají zejména v přenosových soustavách. Koncepce distribuovaných FACTS byla představena na počátku 21. století jako cenově výhodnější alternativa zařízení pro řízený výkonových toků [27]. D-FACTS poskytují funkcionalitu klasických FACTS prostřednictvím řady modulárních regulátorů instalovaných napříč přenosovou soustavou, ve stanicích, ale i podél přenosových linek.



Obr. 7.1 Instalace modulů pro sériovou kompenzaci podél přenosové linky [27] a ukázka instalace na přenosové lince

D-FACTS zařízení mají menší rozměry, jednodušší konstrukci, snadno a rychle se dají naistalovat, lze je snadno škálovat, pokud potřeby rostou, nebo je lze přenasadit na jiné napětí, pokud se potřeby změní. Ve srovnání s konvenčními FACTS i tradičními investičními možnostmi nabízejí levnější alternativu, která zároveň nabízí větší flexibilitu, což je obzvláště cenné vzhledem k budoucí nejistotě systému. Díky své modularitě mohou být tato zařízení nasazována ve větším počtu, což dovoluje rovnoměrnější regulaci a možnost postupného rozšiřování podle potřeby sítě. Vzhledem ke své modularitě mohou spadat do skupiny modulárních FACTS (M-FACTS).

Distribuované FACTS (D-FACTS)

- **Decentralizovaná** nebo **distribuovaná** FACTS zařízení, která jsou instalována přímo na vedení (např. na stožárech, na vedení nebo v blízkosti vedení).
- Konstrukčně i výkonově **malá** zařízení
- Výhodou je **škálovatelnost**, **nižší náklady** a **snadná instalace** bez nutnosti velkých stavebních úprav.

Modulární FACTS (M-FACTS)

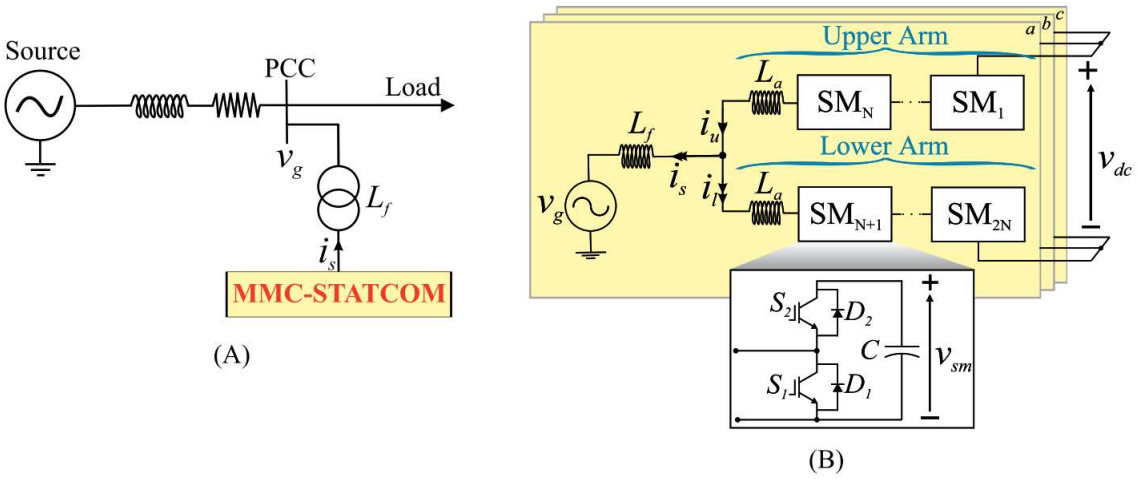
- **Modulární konstrukce** FACTS zařízení, která umožňuje **snadné rozšíření** nebo **přizpůsobení** podle potřeb systému.
- Mohou být použité jak v **distribuovaných**, tak v **centralizovaných** aplikacích.
- Modulární design se zaměřuje na **flexibilitu při výrobě, údržbě a nasazení**, ale nemusí nutně znamenat, že zařízení jsou distribuovaná po síti.

D-FACTS se zaměřují na **rozmístění** zařízení v síti pro lokální řízení výkonu. Některá D-FACTS zařízení mohou být zároveň modulární. **M-FACTS** se zaměřuje na **konstrukční filozofii** – tedy jak jsou zařízení navržena a sestavena.

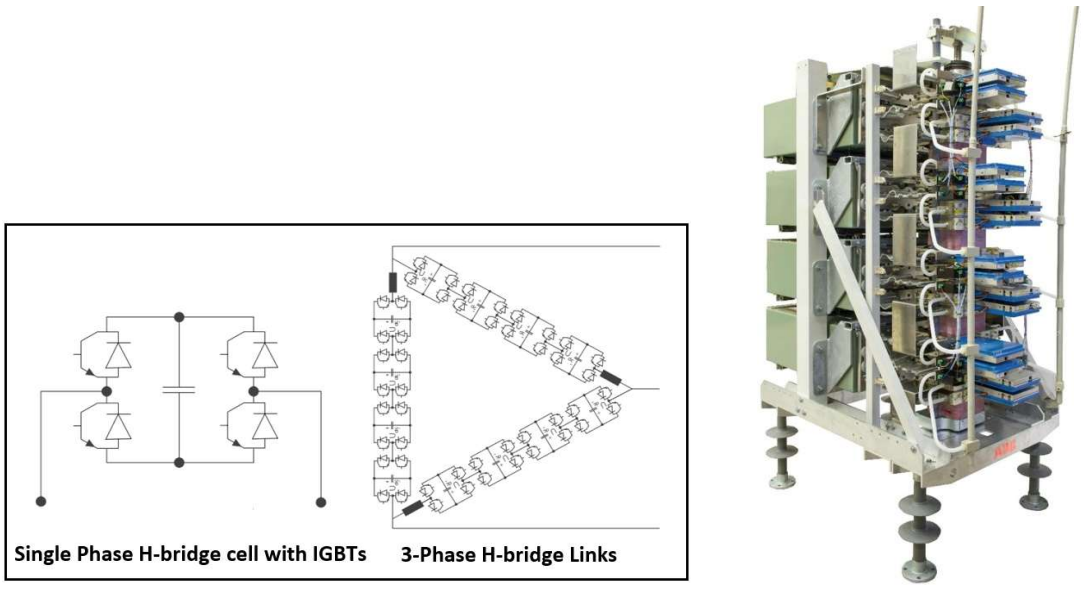
Zkratka DFACT se někdy v literatuře rozepisuje jako Distribution FACTS, tj. zařízení FACTS určená pro instalaci v distribučních sítích a mikrosítích, např. [18], [19], [26], [56]. Jiní autoři i pro zařízení FACTS využívaná v distribučních sítích používají termín Distributed FACTS. Obě tato pojmenování D-FACTS jsou užita pro zařízení menších výkonů a rozměrů. Oproti zařízením FACTS používaným v přenosových sítích, D-FACTS mohou řešit i problémy s kvalitou elektrické energie, především harmonického rušení. Proto také nachází využití i v průmyslových sítích.

7.1 Modulární FACTS

M-FACT využívají technologii modulárních víceúrovňových měničů MMC (Modular Multilevel Converter) [21], [47], [48] . Koncept MMC je založen na kaskádovém zapojení nízkonapěťových jednotek (označovaných jako submoduly nebo články), které společně vytvářejí vysokonapěťový měnič.

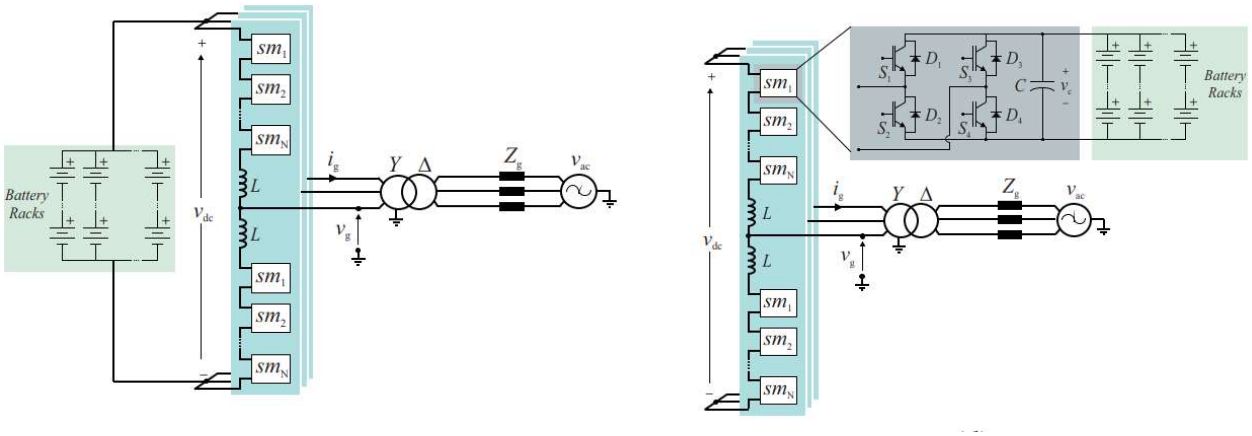


Obr. 7.2 Schéma modulárního STACOMU založeného na technologii MMC měničů



Obr. 7.3 Modulární MMC (H-bridge) jednotka, sestávající se ze čtyř modulů, zdroj: Hitashi

Vývoj moderních FACTS vychází z využití technologie MMC. Modulární FACTS jsou komerčně nabízeny a instalovány, viz předchozí kapitoly, např. m-STATCOM, m-SSC, m-UPFC. Vývoj topologií zařízení FACTS využívajících MMC stále probíhá. Například [49] uvádí možné topologie modulárního E-STATCOM nevyužívajícího centrální úložiště energie, nýbrž distribuovaná připojená k jednotlivých submodulům, z nichž se měnič skládá.

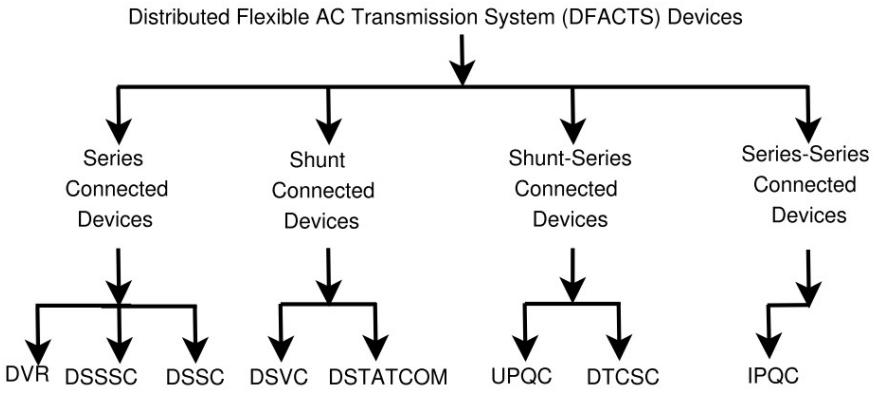


Obr. 7.4 Modulární E-STATCOM s centrálním úložištěm energie a distribuovanýmu úložisti energie [49]

7.2 DFACTS

Koncept DFACTS našel také uplatnění v distribučních sítích a mikrosítích. DFACTS zlepšují řiditelnost a spolehlivost distribučních sítí, a to zejména v těch s vysokým podílem OZE a decentralizované výroby, kde často vznikají problémy s kvalitou napětí, přetížením vedení a lokální nestabilitou [59],[18]. Významnou výhodou DFACTS je také jejich potenciál pro chytré sítě (smart grids) a mikrosítě (microgrids), kde napomáhají efektivnímu řízení napětí, tlumení výpadků, stabilizaci výkonových toků a zajištění vysoké kvality dodávky elektřiny pro koncové uživatele [59]. Využití nachází také v průmyslových sítích, kde řeší problémy s kvalitou napětí.

Do skupiny DFACTS patří například DSTATCOM, DSVC, DSSC, DTCSC, DPFC nebo DVR (Dynamic Voltage Restorer), UPQC (Unified Power Quality Conditioner) a IPQC (Interline Power Quality Compensator).



Obr. 7.5 Klasifikace zařízení DFACT [59]

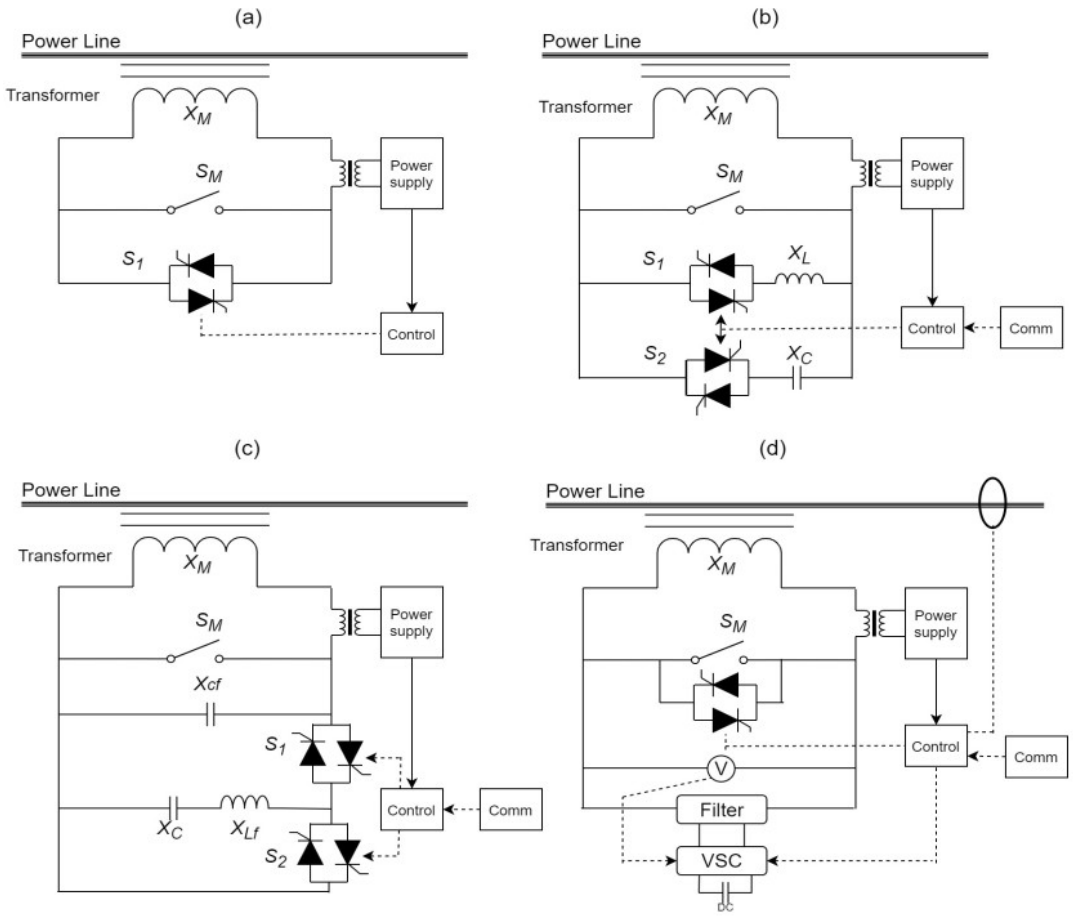
Přehled zařízení DFACTS s jejich funkčními schopnostmi uvádí následující tabulka.

Tab. 10 Zařízení DFACTS a možnosti využití při řízení sítí [74]

Regulátor D-FACTS	Řízené veličiny / funkce	Typ zapojení
DSSC (Distributed Static Series Compensator)	Efektivní impedance přenosové linky, řízení toku jalového výkonu a vstřikování napětí	Sériové
DVR (Dynamic Voltage Restorer)	Pokles napětí (voltage sag), přepětí (swell), harmonické, rušení, zkreslení způsobené nelineárními proudy zátěže	Sériové
DSVC (Distributed Static VAR Compensator)	Stabilita napětí a její řízení, tlumení oscilací, kompenzace jalového výkonu	Paralelní *(Shunt)*
DSTATCOM (Distributed Static Compensator)	Přechodová a dynamická stabilita, poruchové proudy, řízení činného i jalového výkonu, tlumení oscilací	Paralelní *(Shunt)*
UPQC (Unified Power Quality Conditioner)	Poklesy a přepětí, harmonické, výkyvy napětí, řízení činného a jalového výkonu	Paralelní–sériové *(Shunt–Series)*
DTCSC (Distributed Thyristor Controlled Series Compensation)	Řízení proudu, přechodové a dynamické napětí, proudy při poruchách, tlumení oscilací	Paralelní–sériové *(Shunt–Series)*
IPFC (Interline Power Flow Controller)	Řízení činného a jalového výkonu, vyrovnávání napětí mezi vedeními, omezení poruchových proudů	Sériové–sériové *(Series–Series)*

7.2.1 Distribuovaná sériová kompenzace DSSC

Zařízení DSSC (Distributed Series Compensation) mají různé topologie: DSR (Distributed Series Reactor), DSI (Distributed Series Impedance), DSSC s VSC měničem a bezinvertorový DSSC. Prvním komerčně dostupným zařízením D-FACTS byl tzv. distribuovaný sériový reaktor DSR (Distributed Series Reactor), který umožňuje řízení toku činného výkonu přenosovým vedením [27].



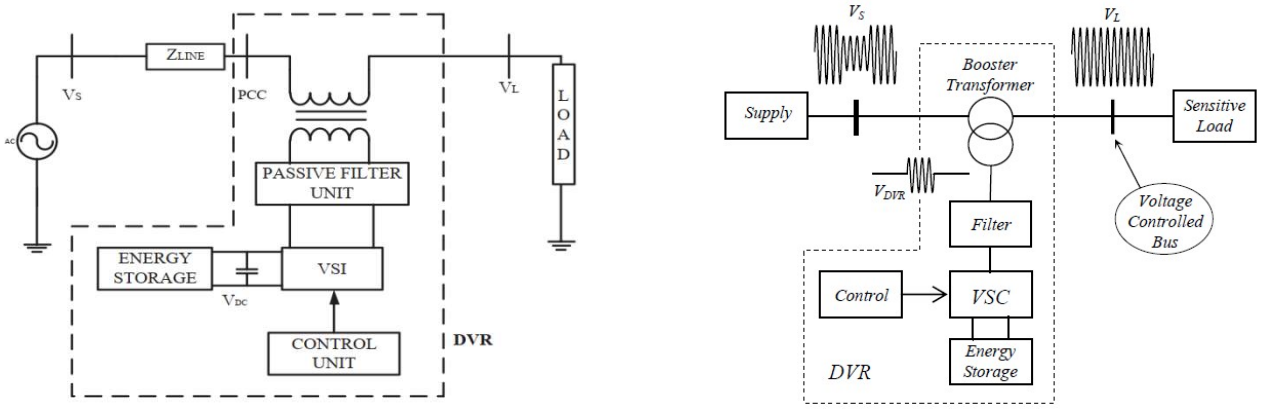
Obr. 7.6 Různé topologie DSSC: a) DSR (Distributed Series Reactor), b) DSI (Distributed Series Impedance), c) Inverter-less DSSC a d) DSSC s VSC měničem [23]

První komerční instalace DSSC proběhla v USA v roce 2012. Dnes je komerčně dostupné i řešení bez transformátoru, modulární SSSC (m-SSSC).

DSSC představuje moderní, flexibilní a efektivní řešení pro řízení výkonových toků v elektrických sítích. Výzkum se zaměřuje na optimalizaci umístění DSSC a koordinaci velkého počtu modulů DSSC v síti [23].

7.2.2 Dynamický regulátor napětí DVR

Princip DVR (Dynamic voltage restorer) je založen na sériovém vstřikování napětí mezi distribuční sítí a citlivou zátěží. Jde o řízený napěťový zdroj, připojený sériově. Při detekci podpětí vstřikuje kompenzační napětí, které obnoví napěťový profil na straně zátěže. Fázový posun a velikost poklesu napětí způsobují změny ve činném a jalovém výkonu. DVR může dodávat činný i jalový výkon podle potřeby kompenzace.

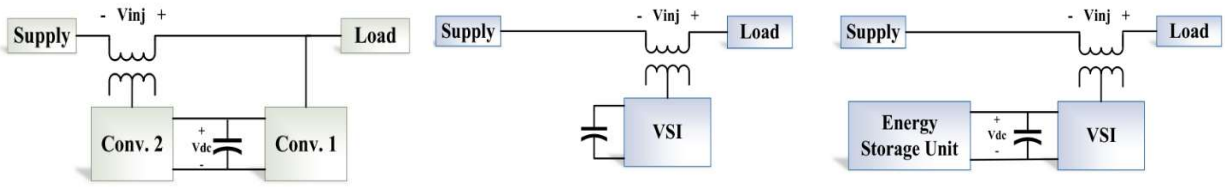


Obr. 7.7 Topologie DVR a její využití pro kompenzaci poklesů napětí

DVR poskytuje tři typy kompenzace [55]:

- Pre-sag kompenzace – obnovuje napětí na úroveň před poklesem.
- Kompenzace ve fázi (in-phase) – dodává významné množství činného výkonu pro kompenzaci poklesu napětí. Využívá zejména při integraci FVE do sítě, kde dochází k výrazným poklesům napětí.
- Kompenzace s fázovým předstihem (phase advance) – upravuje fázový posun pro zlepšení kvality napětí.

Z hlediska vnitřní topologie se DVR dělí na DVR s energetickým úložištěm (využívá DC-link nebo externí zdroje: baterie, ultrakapacitory, SMES) a bez energetického úložiště (využívá energii ze sítě pomocí AC/AC měničů nebo kombinovaných měničů.



Obr. 7.8 DVR a) bez úložiště energie, b) s úložištěm – kondenzátor, c) s externím úložištěm [55]

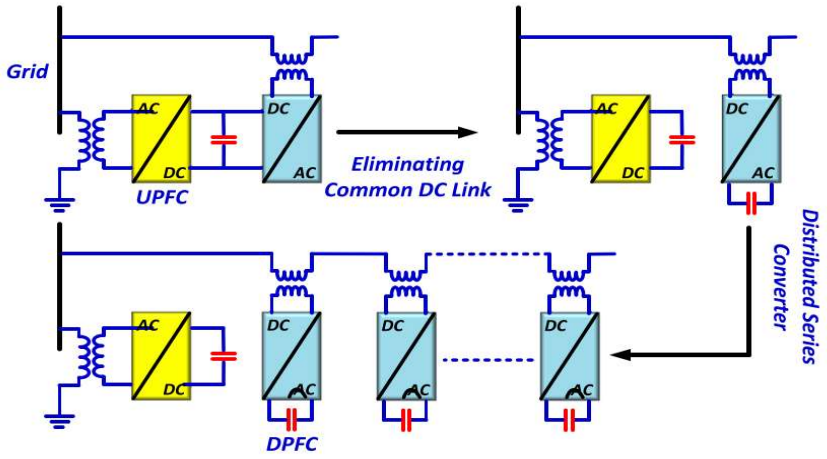
DVR bez úložiště jsou levnější, kompaktní, ale mají omezenou kompenzaci hlubokých poklesů napětí. DVR s úložištěm mají stabilní výkon, jsou vhodné pro slabé sítě (nemusí využívat energie se sítě) a potřeba řízení napětí.

I to těchto zařízení se setkáváme s využitím víceúrovňových měničů, DVR se pak vyznačují nízkým harmonickým rušením, ale konstrukce je složitá a vyžaduje více komponent. Dále za začínají využívat AC/AC měniče, kdy se eliminuje DC meziobvod. Alternativní typy jsou i bez vazebního sériového transformátoru (TDVR – transformer-less DVR).

S DVR se lze setkat v distribučních sítích vn a nn pro zajištění napájení kritických/citlivých zákazníků. DVT najdou uplatnění i integraci OZE [74].

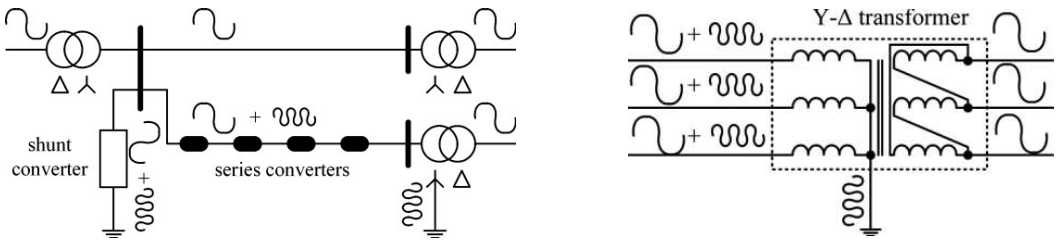
7.2.3 Distribuované řízení výkonových toků DPFC

Na rozdíl od UPFC je u DPFC (Distributed Power Flow Controllers) třífázový sériový měnič rozdělen na mnoho jednofázových sériových distribuovaných měničů, které jsou rozmístěny podél vedení, a tradiční rozhraní mezi sériovým a paralelním měničem je odstraněno.



Obr. 7.9 Přechod od UPFC k DPFC [1]

Výměna aktivního výkonu mezi paralelním a sériovými měniči probíhá prostřednictvím třetí harmonické složky proudu. Paralelní měnič odebírá aktivní výkon ze sítě na základní frekvenci (50 Hz) a zpětně jej vstřikuje do sítě jako proud na třetí harmonické frekvenci (150 Hz). Tento proud prochází přenosovou linkou, kde jej sériové měniče využívají k získání potřebného výkonu pro řízení napětí na základní frekvenci. Proud 3. harmonické lze snadno směrovat pomocí uzemnění transformátorů typu Y–Δ, které zároveň zabraňují úniku harmonických složek do zbytku sítě.



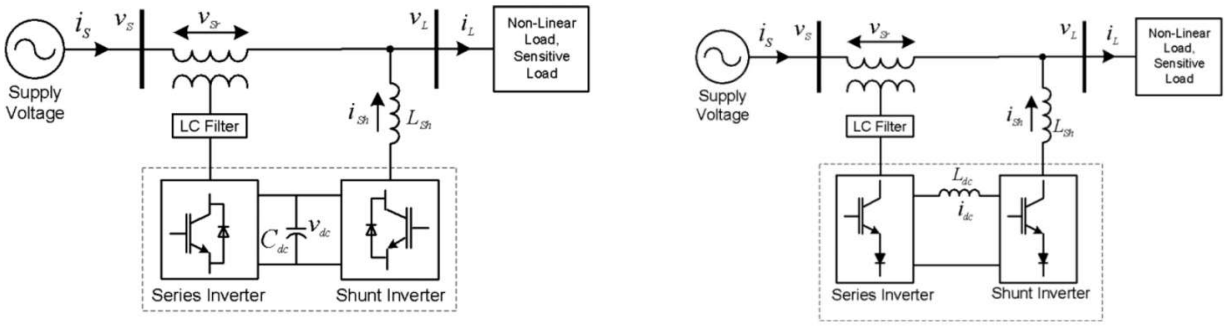
Obr. 7.10 Cesta proudu 3. harmonické a využití transformátoru Ynd [9]

Porovnání technických parametrů UPFC a DPFC je uvedeno v 5.1.2.

7.2.4 Unifikovaný regulátor kvality elektrické energie UPQC

UPQC (Unified Power Quality Conditioner) vychází z koncepce UPFC a rozšiřuje jeho použití na distribuční sítě ke korekci parametrů kvality dodávané elektrické energie (napětí i proudu).

Konstrukčně je UPQC podobný UPFC. Používá sériový a paralelní napěťové měniče VSC (aktivní filtry), které propojeny stejnosměrným meziobvodem (DC link) s akumulačním prvkem. Kombinuje funkce D-STATCOM (paralelní kompenzátor) a DVR (sériový kompenzátor). Sériový měnič kompenzuje napěťové problémy (poklesy a zvýšené napětí, harmonické, nesymetrie), paralelní měnič kompenzuje proudové problémy (harmonické, jalový výkon, nesymetrie, proud tekoucí v nulovém vodiči). Společný DC meziobvod zajišťuje energetickou rovnováhu mezi oběma měniči. Variantní topologie UPQC může využívat proudové měniče CSC.



Obr. 7.11 Schéma UPQC založeného na napěťových měničích VSC a proudových měničích CSC [16]

Zatímco hlavním úkolem UPFC je řízení toků výkonu v přenosových sítích, UPQC se využívá pro zlepšení kvality elektrické energie v distribučních a průmyslových sítích (kompenzace flikru, harmonických, nesymetrie, poklesů a zvýšení napětí), v mikrosítích nebo pro integraci obnovitelných zdrojů.

Vyvinuta byla celá řada topologií UPQC, např. pro 1f, 3f třívodičový a 3f čtyřvodičový systém (kompenzace nulového proudu). Dále podle vnitřní konfigurace UPQC-R / UPQC-L (pravé nebo levé umístění paralelního měniče), UPQC-I (Interline – mezi dvěma napájecími větvemi), MC-UPQC (multikonvertorová verze s třetím měničem), UPQC-DG (integrace s obnovitelnými zdroji), UPQC-O (otevřená verze bez společného DC meziobvodu) aj. [16], [2], [26].

UPQC může pracovat v různých režimech kompenzace:

- UPQC-P: Aktivní výkonová kompenzace (běžná metoda).
- UPQC-Q: Jalová výkonová kompenzace (méně efektivní při přepětích).
- UPQC-S: Současná kompenzace aktivního i jalového výkonu.
- UPQC-VAmin: Optimalizace VA zatížení pro minimální výkonovou náročnost.

Tab. 11 Porovnání UPQC s různými režimy kompenzace [26]

Typ UPQC	**Popis funkce**
UPQC-P	Činný výkon je injektován nebo odebírán pomocí sériového aktivního filtru (APF) zařízení UPQC za účelem kompenzace poklesu nebo nárůstu napětí. UPQC-P pracuje při fázovém posunu δ = 0. Paralelní měnič kompenzuje pouze jalový výkon.
UPQC-Q	Injektování jalového výkonu se provádí sériovým aktivním filtrem (APF) zařízení UPQC, který kompenzuje pokles napětí. UPQC-Q pracuje při fázovém posunu ϕsr = 90°. Paralelní i sériový měnič zajišťují kompenzaci jalového výkonu.
UPQC-S	Činný i jalový výkon jsou injektovány nebo odebírány prostřednictvím sériového aktivního filtru UPQC pro kompenzaci poklesu či nárůstu napětí. UPQC-S pracuje při fázovém posunu 0 < δ < 90°. Paralelní měnič spolupracuje se sériovým měničem pro kompenzaci jalového výkonu.

Výhody oproti jiným FACTS

- Zajišťuje komplexní kompenzaci kvality energie (napětí i proud).
- Dokáže eliminovat harmonické, vyrovnat účiník a zabránit kolísání napětí současně.
- Velmi rychlá dynamická odezva díky výkonovým měničům VSC.
- Vhodný pro citlivé zátěže (elektronika, přesné stroje, datová centra).

Nevýhody

- Vysoké pořizovací náklady (nutnost dvou výkonných měničů a transformátorů).
- Složitý řídicí systém s vysokými požadavky na výpočetní výkon.
- Omezená použitelnost ve vysokonapěťových přenosových soustavách – typicky se používá jen v distribučních sítích.

Použití

- Distribuční sítě nízkého a vysokého napětí.
- Průmyslové provozy citlivé na poklesy napětí (např. farmaceutický, polovodičový, chemický průmysl).
- Chytrá města (Smart Grids) – zajištění stabilního napájení a omezení harmonických složek.
- Oblasti s vysokým podílem obnovitelných zdrojů – stabilizace napětí.

Tab. 12 Porovnání zařízeních DFACTS z hlediska korekce kvality elektrické energie [59]

Vlastnost / Parametr	**IPQC** ***(Interline Power Quality Conditioner)***	**DSSSC** ***(Distributed Static Series Synchronous Compensator)***	**DSTATCOM** ***(Distributed Static Compensator)***	**UPQC** ***(Unified Power Quality Conditioner)***
Kompenzace jalového výkonu	Dobrá	Slabá	Nejlepší	Nejlepší
Potlačení harmonických složek	Nastavitelná	Nastavitelná	Nastavitelná	Nastavitelná
Rezonance	Ne	Může se objevit	Ne	Ne
Vyvážení zátěže (Load balancing)	Dobré	Dobré	Nejlepší	Dobré
Přechodová stabilita	Dobrá	Dobrá	Lepší	Nejlepší
Stabilita v ustáleném stavu	Dobrá	Dobrá	Lepší	Nejlepší
Regulace napětí	Dobrá	Dobrá	Nejlepší	Nejlepší
Jmenovitý výkon měniče	Malý	Vysoký	Vysoký	Malý
Počet spínačů	9–12	6	6	12
Celkové náklady	Střední	Nízké	Nízké	Střední
Úroveň konstrukční kvality (hardware)	Dobrá	Dobrá	Lepší	Nejlepší

8 Optimalizace provozu zařízení FACTS

Technologie D-FACTS umožňuje četnější umístění zařízení o menším výkonu. Efekt nasazení zařízení D-FACTS závisí na jejich rozmístění a velikosti. Díky modulární konfiguraci lze M-FACTS, resp. D-FACTS zařízení rychle přemístit nebo upravit, pokud to situace vyžaduje, a tak docílit optimálního provozního nasazení a nastavení. Nastavení a nasazení D-FACTS by mělo být dynamicky aktualizováno, aby bylo možné reagovat na změny v síti a dosáhnou maximálního přínosu této technologie.

Téma optimálního provozu FACTS je celosvětově častým tématem vědeckých prací. Účelem této studie nebylo se primárně tímto tématem zabývat, nicméně i jsme narazili na řadu článků s touto problematikou.

8.1 Optimalizace umístění a nastavení zařízení FACTS

V posledních letech se výrazně rozšířilo využívání pokročilých optimalizačních metod pro efektivní umístění a dimenzování zařízení FACTS v elektrických sítích. Tyto metody umožňují zohlednit více technických i ekonomických kritérií současně. Úkolem optimalizace je:

- Určení optimálního umístění a velikosti zařízení.
- Ladění parametrů zařízení pro maximální efektivitu.

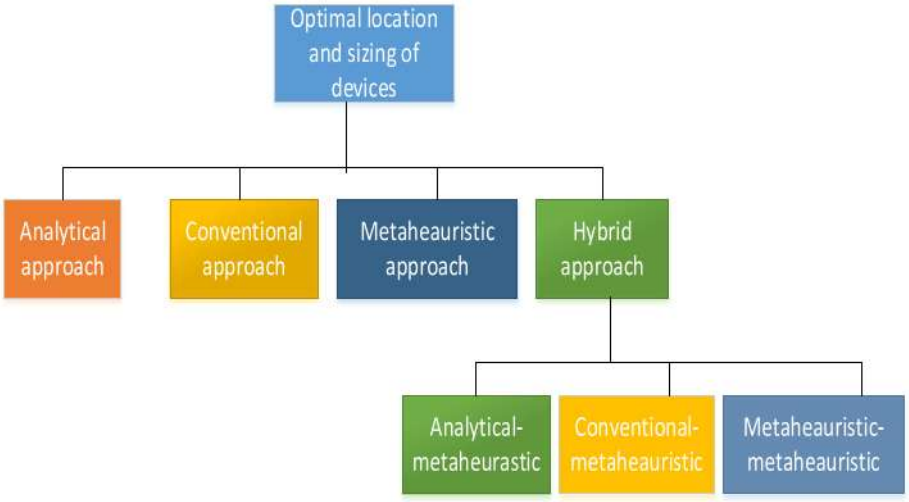
8.1.1 Optimalizační metody

Mezi **hlavní optimalizační cíle** patří zajištění napěťové stability, zlepšení dynamické stability, zvýšení přenosové kapacity, snížení ztrát, zajištění provozní bezpečnosti soustavy při poruchách, tlumení výkonových oscilací, zajištění kvality elektrické energie, integrace s distribuovanou výrobou a akumulací energie, minimalizace nákladů na výrobu a instalaci a maximalizace přínosu – spolehlivý, efektivní a ekonomický provoz [1], [13].

Nazelení optimálního umístění a nastavení zařízení FACTS e nelineární, vícekriteriální, multimodální problém a nalezení globálního řešení je velmi obtížné [13]. K jeho řešení se využívá řada přístupů a metod.

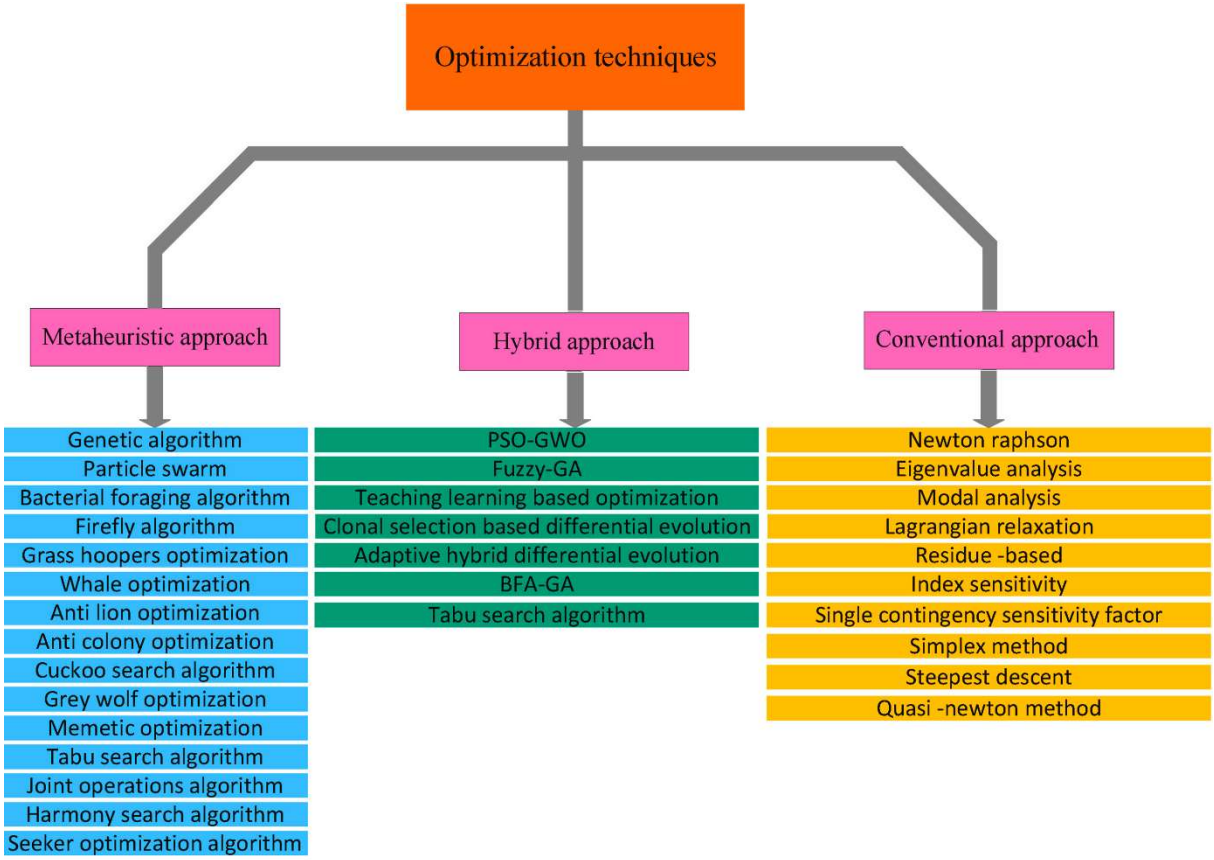
Metody použité k řešení lze rozdělit na:

- **Analytické metody**: založené na číselných výpočtech a citlivostní analýze.
- **Konvenční optimalizační metody**: např. Newton-Raphson, lineární a nelineární programování, dynamické programování.
- **Metaheuristické algoritmy**: inspirované přírodou (biologie, fyzika, chemie), schopné najít globální optimum.
- **Hybridní přístupy**: kombinace analytických, tradičních a metaheuristických metod pro snížení výpočetní náročnosti.



Obr. 8.1 Základní přístupy k řešení úlohy optimalizace umístění zařízení FACTS [65]

Metaheuristické algoritmy představují výkonný a efektivní přístup k umisťování zařízení FACTS. Použití konvenčních metod je omezeno na jednodušší problémy a může vyžadovat efektivnější a praktičtější řešení složitých nelineárních omezení. Hybridní přístupy těží ze silných stránek metaheuristik a konvenčních technik.



Obr. 8.2 Příklady optimalizačních metod pro optimalizaci umístění zařízení FACTS [2], [65]

Moderní metaheuristické algoritmy jsou uvedeny a diskutovány v [1]. Jen pro ilustraci rozmanitosti různých metod uvádíme příklady optimalizace provozu různých zařízeních FACTS pomocí různých **vícekriteriálních a metaheuristických algoritmů**.

Článek [14] využívá genetické algoritmy pro optimalizaci umístění zařízení UPFC, TCSC a SVC, s cílem zlepšit stabilitu a efektivitu přenosové soustavy.

Článek [19] se věnuje různým metaheuristickým metodám pro optimalizaci umístění a velikosti STATCOM v distribučních sítích. V článku [17] je využit modifikovaný algoritmus M-PSO pro optimalizaci D-FACTS ve víceoblastní distribuční sítě s vysokým podílem fotovoltaiky a nabíjecích stanic pro elektromobily.

V oblasti obnovitelných zdrojů se článek [28] zabývá optimalizací umístění STATCOMu v rámci vícekriteriálního problému ORPD (Optimal Reactive Power Dispatch), zahrnujícího tepelnou, větrnou, solární a vodní výrobu. Použit byl Driving Training Based Optimization algoritmus.

Článek [52] představuje pravděpodobnostní vícekriteriální optimalizační metodu pro alokaci zařízení IPFC. Pomocí algoritmu MOPSO (Multiobjective Particle Swarm Optimization) se řeší snížení činných ztrát a zlepšení indexu výkonového toku (PFI), přičemž se zohledňují i náklady na zařízení.

Článek [68] se zaměřuje na vícekriteriální optimalizaci umístění zařízení SSSC a STATCOM pomocí fuzzy logiky v kombinaci s algoritmem Harmony Search. Cílem bylo najít kompromis mezi technickými parametry a provozními náklady.

V článku [64] byl použit algoritmus Black Widow pro optimální umístění a velikost FACTS zařízení v distribučních sítích, s důrazem na zlepšení napěťového profilu a minimalizaci ztrát. Podobně článek [57] využívá Particle Swarm Optimization (PSO) pro optimalizaci umístění DSSSC v radiální distribuční síti za účelem zlepšení napěťového profilu.

Další inovativní přístup představuje článek [20], která využívá Hunter-Prey algoritmus pro optimalizaci rozmístění zařízení PV-STATCOM v distribučních sítích, pro minimalizaci ztrát a zlepšení napěťového profilu. PV-STATCOM je střídač fotovoltaické elektrárny, který vykonává funkce regulátoru STATCOM, včetně regulace napětí, zlepšení účiníku, potlačení harmonických složek proudu a kompenzace jalového výkonu. Algoritmus HPO byla porovnán s algoritmem ARA (Artifical Rabbits Algorithm), který již pro podobnou úlohu prokázal výbornou výkonnost.

Článek [13] se komplexně zabývá problematikou alokace zařízení FACTS v elektrizačních soustavách. Zaměřuje se na přínosy a cíle optimálního rozmístění těchto zařízení z pohledu, cílových funkcí (objective functions), rozhodovacích proměnných (decision variables), omezení (constraints) a moderních optimalizačních algoritmů. Dává odkazy na další specifické studie.

Tyto studie ukazují, že kombinace pokročilých algoritmů s technickými modely elektrických sítí umožňuje efektivní návrh a integraci FACTS zařízení, a to jak v přenosových, tak distribučních systémech.

8.1.2 Simulační nástroje

Rozsáhlý článek [56] se zaměřuje na různé simulační nástroje, které se používají k modelování, analýze a optimalizaci zařízení FACTS v elektrických sítích. Tyto nástroje umožňují testovat různé strategie řízení, umístění a dimenzování zařízení FACTS bez nutnosti fyzické instalace.

Přehled využívaných softwarů[6]:

MATLAB/Simulink

- **Popis:** Univerzální a nejrozšířenější nástroj pro modelování, simulaci a optimalizaci dynamických systémů.
- **Použití:** Optimalizace řízení a umístění FACTS pomocí algoritmů jako GA, PSO; modelování výkonových toků; výukové účely.
- **Výhody:** Vysoká přesnost, široká komunita, možnost rozšíření pomocí knihoven (např. Simscape Power Systems).

ETAP

- **Popis:** Komerční software pro analýzu elektrických sítí s důrazem na provozní bezpečnost.
- **Použití:** Analýza výkonu, stabilita napětí, návrh řídicích systémů, testování vlivu FACTS na síť.
- **Výhody:** Vhodný pro průmyslové aplikace, intuitivní rozhraní.

EMTP-RV

- **Popis:** Nástroj pro simulaci elektromagnetických přechodových jevů v elektrických sítích.
- **Použití:** Transientní analýzy, testování dynamiky FACTS zařízení (např. SSSC, STATCOM).
- **Výhody:** Vysoká přesnost při simulaci poruch a přechodových stavů.

MATPOWER

- **Popis:** Open-source balíček pro analýzu výkonových toků a optimalizaci v prostředí MATLAB.
- **Použití:** Optimalizace OPF, testování vlivu FACTS na náklady a ztráty, akademické výzkumy.
- **Výhody:** Volně dostupný, flexibilní, vhodný pro vývoj vlastních algoritmů.

NETOMAC

- **Popis:** Nástroj zaměřený na stabilitu systému a potlačení oscilací pomocí LMI optimalizace.
- **Použití:** Koordinace FACTS zařízení (např. TCSC, SVC), analýza dynamického chování.
- **Výhody:** Vhodný pro pokročilé stabilitní studie.

PSB (Power System Blockset)

- **Popis:** Blokové modelování elektrických systémů v prostředí MATLAB/Simulink.
- **Použití:** Rychlé testování konfigurací FACTS, modelování VSC, simulace přechodových jevů.
- **Výhody:** Intuitivní vizuální rozhraní, snadná integrace s dalšími nástroji MATLABu.

[6] Zpracováno z [55] s využitím MS Copilot

PSAT

- **Popis:** Open-source nástroj pro analýzu výkonových toků, stability a optimalizaci.
- **Použití:** Umístění FACTS, simulace poruch, testování různých řídicích strategií.
- **Výhody:** Uživatelsky přívětivý, vhodný pro výuku i výzkum.

PSCAD-EMTDC

- **Popis:** Pokročilý nástroj pro simulaci elektromagnetických transiencí a dynamiky systému.
- **Použití:** Detailní modelování FACTS (např. UPFC, STATCOM), testování stability a řízení.
- **Výhody:** Vysoká přesnost, vhodný pro simulace v reálném čase i offline.

PSIM

- **Popis:** Nástroj pro simulaci výkonové elektroniky a řízení.
- **Použití:** Modelování obvodů FACTS, návrh řídicích algoritmů, testování výkonových komponent.
- **Výhody:** Rychlá simulace, vhodný pro návrh měničů a regulátorů.

PSPICE

- **Popis:** Software pro simulaci elektronických obvodů.
- **Použití:** Modelování FACTS jako elektronických prvků, testování obvodových vlastností.
- **Výhody:** Vysoká přesnost pro obvodové simulace, široké využití v elektronice.

RTDS (Real-Time Digital Simulator)

- **Popis:** Hardware-in-the-loop simulátor pro reálný čas.
- **Použití:** Testování řídicích systémů FACTS v provozních podmínkách, validace algoritmů.
- **Výhody:** Vysoká přesnost, ideální pro průmyslové testování a vývoj.

SIMFACTS

- **Popis:** Specializovaný software zaměřený na simulaci zařízení FACTS.
- **Použití:** Modelování výkonových toků, analýza vlivu FACTS na přenosové soustavy.
- **Poznámka:** Méně známý, omezené informace v literatuře.

SABER

- **Popis:** Komplexní nástroj pro simulaci výkonové elektroniky na úrovni obvodů.
- **Použití:** Vhodný pro simulaci FACTS zařízení v kombinaci s obnovitelnými zdroji.
- **Poznámka:** Používán hlavně pro obvodové simulace, ne přímo pro výkonové toky.

MIPOWER

- **Popis:** Software pro analýzu výkonových toků, stability a ochrany.
- **Použití:** Transientní stabilita, vliv FACTS na ochranu vedení.

- **Poznámka:** Vhodný pro studium chování systému při poruchách.

SIMSEN

- **Popis:** Simulační nástroj od Siemens pro modelování elektrických sítí.
- **Použití:** Stabilita napětí, interakce s větrnými farmami a obnovitelnými zdroji.
- **Poznámka:** Používán pro pokročilé dynamické simulace.

EUROSTAG

- **Popis:** Nástroj pro dynamickou simulaci a analýzu stability.
- **Použití:** Hodnocení vlivu FACTS na stabilitu systému, zejména při integraci obnovitelných zdrojů.

- **Poznámka:** Vhodný pro rozsáhlé systémy a dlouhodobé simulace.

UWPFLOW

- **Popis:** Nástroj vyvinutý na University of Wisconsin pro analýzu UPFC.
- **Použití:** Regulace výkonu, stabilita napětí, testování UPFC v různých scénářích.
- **Poznámka:** Specializovaný na Unified Power Flow Controller.

PFAC (Power Flow Analysis and Control)

- **Popis:** Obecné označení pro softwary zaměřené na analýzu výkonových toků.
- **Použití:** Optimalizace výkonových toků, řízení přenosové kapacity s FACTS.
- **Poznámka:** Není konkrétní název softwaru, spíše kategorie nástrojů.

PSASP

- **Popis:** Výkonný nástroj pro simulaci výkonových systémů.
- **Použití:** Zvyšování přenosové kapacity, stabilita systému s FACTS.
- **Poznámka:** Používán v akademickém i průmyslovém prostředí.

NEPLAN

- **Popis:** Komplexní software pro plánování a analýzu elektrických sítí.
- **Použití:** Integrace FACTS do plánování provozu, analýza stability a výkonu.
- **Poznámka:** Vhodný pro distribuční i přenosové systémy.

TOPSIS

- **Popis:** Metoda vícekriteriálního rozhodování (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution).
- **Použití:** Výběr optimálního umístění FACTS zařízení na základě více kritérií (např. náklady, výkon, stabilita).
- **Poznámka:** Nejde o simulační software, ale o rozhodovací algoritmus.

DIgSILENT PowerFactory

- **Popis:** Pokročilý nástroj pro simulaci a analýzu elektrických sítí.
- **Použití:** Modelování D-FACTS (FACTS v distribučních sítích), integrace obnovitelných zdrojů.
- **Poznámka:** Vhodný pro detailní analýzu distribučních systémů.

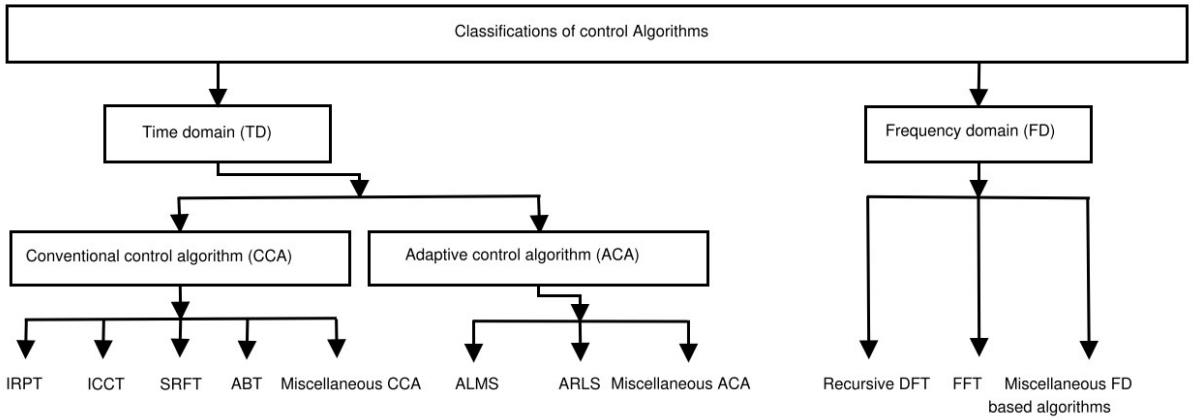
Tab. 13 Přehled silných a slabých stránek SW nástrojů v kontextu aplikací zařízení FACTS [56]

Nástroj	Podporovaná FACTS zařízení	Snadnost použití	Simulační schopnosti	Přesnost	Účinnost	Komentář
MATLAB/Simulink	SVC, STATCOM, UPFC	Vysoká	Pokročilé	Velmi vysoká	Velmi efektivní	Dobrá integrace s dalšími nástroji a knihovnami.
ETAP	SVC, TCSC	Střední	Dobré	Vysoká	Efektivní	Primárně používaný pro analýzu toků výkonu.
EMTP-RV	SVC, STATCOM, UPFC	Střední	Velmi pokročilé	Velmi vysoká	Efektivní	Výborný pro simulace přechodových dějů.
MATPOWER	SVC, STATCOM	Vysoká	Dobré	Vysoká	Efektivní	Ideální pro optimalizaci a analýzu toků výkonu.
NETOMAC	SVC, STATCOM	Nízká	Dobré	Střední	Průměrná	Méně rozšířený, ale vhodný pro studie stability.
PSB (Power System Blockset)	SVC, STATCOM	Vysoká	Dobré	Vysoká	Efektivní	Uživatelsky přívětivý, vhodný pro malé simulace.
PSAT	SVC, STATCOM	Vysoká	Dobré	Vysoká	Efektivní	Open-source nástroj s dobrými optimalizačními možnostmi.
PSCAD/EMTDC	SVC, STATCOM, UPFC	Střední	Velmi pokročilé	Velmi vysoká	Velmi efektivní	Výborný pro EMT simulace (Electromagnetic Transients).
PSIM	SVC, STATCOM	Vysoká	Dobré	Vysoká	Efektivní	Používá se pro simulace obvodů a analýzu výkonu.
PSPICE	SVC, STATCOM	Vysoká	Dobré	Vysoká	Efektivní	Určen hlavně pro simulace elektronických obvodů.
RTDS (Real-Time Digital Simulator)	SVC, STATCOM, UPFC	Střední	Velmi pokročilé	Velmi vysoká	Velmi efektivní	Používá se pro **reálné časové simulace**, ideální pro testování systémů.

8.2 Řídicí algoritmy pro zařízení D-FACTS

Provozní vlastnosti zařízení D-FACTS závisí do znační míry na použitém řídicím algoritmu, který ovládá spínací prvky měniče.

Řídicí algoritmy se dělí do dvou základních skupin: algoritmy v časové a ve frekvenční oblasti.



Obr. 8.3 Základní klasifikace řídicích algoritmů [59]

8.2.1 Algoritmy ve frekvenční oblasti (Frequency-Domain Algorithms)

Mezi algoritmy FD (Frequency-Domain) patří rekurzivní diskrétní Fourierova transformace (DFT), rychlá Fourierova transformace (FFT) aj. Vyznačují se vyšší nepřesností a nejsou vhodné pro účely zlepšování kvality elektrické energie.

8.2.2 Algoritmy v časové oblasti (Time-Domain Algorithms)

Algoritmy TD (Time-Domain) jsou dále rozděleny na konvenční řídicí algoritmy (CCA) a adaptivní řídicí algoritmy (ACA).

- **Konvenční řídicí algoritmy** (Conventional Control Algorithms – CCA).

Tyto řídicí algoritmy využívají Clarkovu transformaci napěťových a proudových signálů a reverzní Clarkovu transformaci složek napětí a proudu, případně fázový závěs (PLL - phase-locked loop) pro estimaci signálů pro spínání výkonových elektronických součástek. Mezi CCA se řadí:

- SRFT (Synchronous Reference Frame Theory) – teorie synchronního referenčního rámce.
- IRPT (Instantaneous Reactive Power Theory) – teorie okamžitého jalového výkonu
- PBT (power balance theory) – teorie rovnováhy výkonu.
- ISCT (Instantaneous Symmetrical Component Theory) – teorie okamžitých symetrických složek.
- ICCT (Indirect Current Control Theory) - teorie nepřímého proudového řízení.
- ABT (Admittance Based Control Theory) - teorie řízení založeného na admitanci.

Další konvenční řídicí algoritmy jsou uvedeny v [59].

Tab. 14 Funkční charakteristiky konvenčních řídicích algoritmů [74]

Parametr	**ISCT** ***(Instantaneous Symmetrical Component Theory)***	**IRPT** ***(Instantaneous Reactive Power Theory)***	**PBT** ***(Power Balance Theory)***	**SRFT** ***(Synchronous Reference Frame Theory)***
Vyvážení zátěže (Load balancing)	Dobré	Dobré	Dobré	Dobré
Robustnost (Robustness)	Slabá	Slabá	Slabá	Dobrá
Výkon se SPV systémem (Performance with SPV)	Průměrný	Průměrný	Průměrný	Dobrý
Výpočetní složitost (Computational complexity)	Vyšší	Vyšší	Průměrná	Nižší
Potlačení harmonických složek (Harmonic mitigation)	Průměrné	Průměrné	Dobré	Dobré
Kompenzace jalového výkonu (Reactive power compensation)	Dobrá	Průměrná	Průměrná	Dobrá
PLL nutný (Phase-Locked Loop required)	Ano	Ne	Ne	Ano

Mezi jejich nevýhody patří: vysoká výpočetní náročnost, nízká adaptabilita, pomalá dynamická odezva, horší stabilita a výrazné oscilace parametrů.

- **Adaptivní Řídicí Algoritmy** (Adaptive Control Algorithms – ACA).

ACA pracují na principu neustálé aktualizace váhové složky (weight component) proudových a napěťových signálů na základě minimalizace chyby. Jsou robustní, poskytují rychlejší odezvu a adaptují se na změny systému, což je zásadní např. sítích s OZE. Mezi ACA se řadí algoritmy založené na metodách:

- LMS (Least Mean Square) – metoda nejmenších čtverců, nejjednodušší algoritmus pro implementaci, založený na minimalizaci střední kvadratické chyby.
- LMF (Least Mean Fourth) - algoritmus korekce chyby čtvrtého řádu, vyšší přesnost a konvergenční rychlost.
- ADALINE (Adaptive Linear Element) – využití neuronovou síť.
- ARLS (Adaptive Recursive Least Square) - využití Kalmanova zesílení (Kalman gain) a zapomínacího faktoru, lepší konvergence a sledování změn než LMS, vyšší výpočetní složitost.

Používají se pro aktualizaci vah podle vstupních signálů. Výhodou je schopnost přizpůsobení se změnám v síti v reálném čase.

Tab. 14 Funkční charakteristiky adaptivních řídicích algoritmů [74]

Parametr	LMS (Least Mean Square)	LMF (Least Mean Fourth)
Typ vstupního signálu	Stochastický	Stochastický
Typ filtru	Adaptivní	Adaptivní
Výpočetní složitost	Nízká	Nízká
Dynamická odezva	Střední	Rychlá
Řád optimalizace	Druhý řád	Čtvrtý řád
Střední kvadratická chyba (MSE)	Vyšší	Nižší
Vzorkovací doba	Krátká	Krátká
Rychlost konvergence	Nízká	Vysoká
Kmitání (Oscillations)	Vysoké	Nízké
Přesnost	Střední	Vysoká
Statická chyba	Větší	Menší
Stabilita	Dobrá	Lepší

Vylepšené adaptivní algoritmy byly vyvinuty jako modifikace ACA pro řešení problémů s rychlostí konvergence a stabilitou, např.:

- NLMS (Normalized LMS) - zlepšuje dynamickou odezvu a konvergenci.
- VSS-LMS (Variable Step Size LMS) - zlepšuje dynamickou odezvu a přesnost.
- NLMF (Normalized LMF).

Další adaptivní řídicí algoritmy jsou uvedeny v [59].

Adaptivní signály algoritmy (ACA) jsou obecně považovány za **výkonnější** než konvenční algoritmy (CCA). Jsou výpočetně méně složité, jsou robustní a mají rychlejší odezvu.

Tab. 15 Porovnání řídicích signálů podle typu

	Konvenční (CCA)	Adaptivní (ACA)	Založené na AI
Dynamická odezva	Pomalá	Rychlá / Rychlejší	Rychlejší než CCA
Výpočetní složitost	Vysoká (kvůli PLL a transformacím)	Nízká / Menší	Nízká, ale složitější implementace HW/SW
Robustnost	Slabší (závislost na PLL)	Vyšší	Velmi dobrá
Potřeba PLL	Ano (např. SRFT, IRPT)	Ne (pracuje na aktualizaci váhy)	Ne
Výkon v sítích s OZE	Nízký / Průměrný	**Vynikající** (díky adaptivitě)	Dobrý (přizpůsobuje se změnám)

Základní bloková schémata jednotlivých řídicích algoritmů a detailní porovnání a příklady využití lze naleznout v [59] a [74].

9 Manažerské shrnutí

S rozvojem výkonové elektroniky v 80. a 90. letech 20. století se objevila nová generace zařízení, známá pod souhrnným označením **FACTS – Flexible AC Transmission Systems**. Zařízení FACTS představují pokročilé výkonově elektronické systémy určené pro aktivní řízení parametrů střídavých elektrických sítí. Jejich hlavním cílem je zlepšení provozních vlastností elektrizační soustavy bez nutnosti výstavby nových vedení. FACTS zařízení umožňují řízení činného a jalového výkonu, stabilizaci napětí, tlumení oscilací, zvýšení přenosové kapacity a podporu integrace obnovitelných zdrojů energie.

Podle zapojení do sítě se FACTS rozlišují na:

- **Paralelně připojená zařízení** – zařízení připojená paralelně k vedení určená zejména pro regulaci velikosti napětí a jalového výkonu.
    - Statický kompenzátor jalového výkonu (SVC).
    - Statický synchronní kompenzátor (STATCOM) aj.
- **Sériově připojená zařízení** – zařízení připojená sériově na vedení, umožňující řízení reaktance vedení a toků činného výkonu.
    - Tyristorově spínaný/řízený sériový kondenzátor (TSSC/TCSC).
    - Tyristorově řízený sériový reaktor (TCSR).
    - Statický synchronní sériový kompenzátor (SSSC).
- **Kombinovaně připojená zařízení** – schopná současně ovlivňovat toky činných i jalových výkonů.
    - Unifikovaný regulátor výkonových toků (UPFC).

Technologicky se FACTS dělí na dvě generace:

- **Pasivní zařízení,** využívající tyristorově spínané kondenzátory a reaktory, např. SVC, TCSC.
- **Aktivní zařízení,** založené na měničích typu VSC (Voltage Source Converter), které se chovají jako řízené zdroje napětí nebo proudu, např. STATCOM, SSSC, UPFC.

Druhá generace nabízí výrazně lepší provozní vlastnosti ve srovnání s první generací.

9.1 Přínosy technologie FACTS

Hlavní přínosy technologie FACTS jsou:

- **Zvýšení přenosové kapacity** – FACTS umožňují efektivnější využití stávající přenosové a distribuční infrastruktury bez nutnosti budování nových a potenciální oddálení nákladných rozšiřování sítě.
- **Zlepšení stability systému** – tlumení oscilací výkonu, zvýšení dynamické i přechodové stability, zejména při integraci intermitentní výroby z obnovitelných zdrojů.
- **Řízení toku výkonu** – možnost směrovat tok energie podle potřeby, čímž se snižuje přetížení vedení a zvyšuje odolnost sítě.
- **Řízení jalového výkonu** – zajišťuje stabilní napěťový profil a snižuje ztráty.
- **Rychlá regulace napětí** – reakce v řádu milisekund, což je zásadní při poruchách nebo výkyvech zatížení.
- **Zlepšení parametrů kvality elektrické energie** – snížení napěťových výkyvů, kolísání napětí a harmonického zkreslení, vyšší spolehlivost dodávky.

- **Podpora integrace OZE** – umožňuje navýšit připojitelný výkon, stability systému a kvalitu napětí.
- **Celkové zvýšení bezpečnosti a ekonomické efektivity provozu.**

Nevýhody technologie FACTS jsou:

- **Vysoké pořizovací náklady** – zejména u pokročilých zařízení jako UPFC nebo MMC.
- **Složitost zařízení** – vyšší nároky na zajištění provozu, kvalifikovaný personál, náročnější údržba.
- **Citlivost na poruchy** – některé typy zařízení mohou být náchylné na přepětí nebo rušení.
- **Složitější řízení** – vyžaduje pokročilé algoritmy a koordinaci s ostatními prvky sítě, nutnost pečlivé integrace do stávajících ochranných a řídicích systémů.
- **Optimalizace umístění** – výběr správného typu a místa instalace je složitý a často vyžaduje pokročilé výpočty.

9.2 Aktuální stav vývoje a využití technologie FACTS v Evropě a ve světě

Technologie FACTS se staly klíčovým prvkem modernizace elektrických sítí, zejména v souvislosti s rostoucím podílem obnovitelných zdrojů energie (OZE) a požadavky na vyšší stabilitu a flexibilitu přenosových i distribučních soustav.

Trh s těmito technologiemi formují přední společnosti jako **Hitachi ABB**, **Siemens**, **GE Grid Solutions**, **Mitsubishi Electric Corporation**. Ačkoliv Severní Amerika a Evropa mají významný podíl na trhu, hlavním tahounem globálního rozvoje FACTS je Asie. Mezi lídry v zavádění těchto technologií patří Čína, Indie, Japonsko a Jižní Korea.

Nejrozšířenějšími zařízeními FACTS jsou **SVC** (Static Var Compensator) a **STATCOM** (Static Synchronous Compensator), které díky svému dynamickému výkonu, kompaktnosti a postupnému snižování investičních nákladů nacházejí široké uplatnění v přenosových i distribučních sítích pro kompenzaci jalového výkonu, stabilizaci napětí a tlumení oscilací. Tato zařízení našla uplatnění i v distribučních sítích, nebo v průmyslovém sektoru. Vyvíjí se nové generace STATCOMů. Technologie **E-STATCOM**, kombinující regulaci jalového výkonu s akumulací energie (např. v superkondenzátorech) umožňuje dodávku a odběr činného výkonu. Technologie **STATCOM** s funkcí **grid-forming** (GFM STATCOM) umožňují aktivní formování napětí a zajištění setrvačnosti systému. Zatímco konvenční STATCOMů dosahuje technologické připravenosti TRL 9, technologie GFM STATCOM je zatím ve fázi TRL 5-6, s očekáváním rychlého vývoje.

V Evropě roste poptávka po STATCOMech napříč sektory - provozovatelé přenosových a distribučních sítí, provozovatelé OZE, průmyslové podniky. Intenzivním nasazování STATCOMů probíhá zejména v Německu, Velké Británii a Itálii. Například v německí provozovatelé přenosových soustav, Amprion, 50Hertz, TenneT a TransnetBW, plánují v příštím desetiletí rozsáhlé instalace zařízení STATCOM s výkony 250-600 Mvar, přičemž preferují E-STATCOMy s grid-forming schopnostmi. První tato zařízení již byla instalována nebo se počítá s jejich brzkým uvedením do provozu.

Sériová zařízení FACTS jsou nasazována omezeně kvůli technickým omezením a užšímu rozsahu aplikací. Nejčastěji se uplatňují při zvyšování přenosové kapacity vedení a při tlumení oscilací. Tyristorově řízené sériové kondenzátory TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor), i přes svou technologickou jednoduchost a přijatelnou výši investic, nedosahují takové obliby

jako zařízení typu SVC a STATCOM. Důvodem jsou omezené možnosti použití a technické komplikace, například nutnost ochranného bypass systému. V oblasti sériové kompenzace se proto více prosazují statické synchronní sériové kompenzátory **SSSC** (Static Synchronous Series Compensator) a jejich modulární varianty **m-SSSC**, které nabízejí vysokou flexibilitu a škálovatelnost. V Evropě byly tyto technologie instalovány například ve Velké Británii, Irsku a Řecku, přičemž jejich širší využití je patrné zejména v zámoří. Stupeň technologické připravenosti SSSC se pohybuje mezi TRL 7 až 9 v závislosti na konkrétní implementaci, přičemž beztransformátorové varianty jsou stále ve fázi vývoje.

Zařízení **UPFC** (Unified Power Flow Controller), kombinující funkci STATCOMu a SSSC a umožňující nezávislou regulaci činného a jalového výkonu, představuje špičkovou technologii FACTS. Avšak kvůli vysokým investičním a provozním nákladům, vyplývajícím ze složité konstrukce zařízení, došlo k realizaci pouze několika aplikací, především v Číně a USA. Technologická připravenost UPFC je na stupni TRL 9. Technologie **IPFC** (Interline Power Flow Controller), umožňující současné řízení toků výkonu ve více přenosových linkách, je zatím ve fázi demonstračních projektů (TRL 6–8).

Vzhledem k nákladnosti a složitosti tradičních FACTS zařízení se vývoj zaměřuje na alternativní koncepty s vyšší provozní účinností a nižšími náklady. Jedná se například o beztransformátorová zařízení FACTS (transformer-less FACTS), která eliminují potřebu vazebních transformátorů. Lze vysledovat jasný posunu od tradičních, robustních a investičně náročných FACTS zařízení, k moderním, flexibilním a škálovatelným řešením.

Nejnovější koncepce FACTS využívají technologii modulárních víceúrovňových měničů MMC (Modular Multilevel Converter). Koncept MMC je založen na kaskádovém zapojení nízkonapěťových submodulů, což umožňuje vysokonapěťové aplikace a zároveň nabízí modularitu. **Modulární FACTS** (M-FACTS) jako m-STATCOM, m-SSSC a m-UPFC nabízejí vyšší flexibilitu, nižší náklady a lepší provozní vlastnosti, s možností snadné a rychlé instalace, přemístění a škálování podle aktuálních potřeb sítě. Komerčně dostupné varianty potvrzují praktickou využitelnost těchto moderních topologií. Vývoj zařízení FACTS využívajících MMC stále pokračuje.

Distribuované FACTS (D-FACTS) představují konstrukčně i výkonově malá zařízení, která jsou instalována přímo na vedeních nebo v jejich blízkosti. Obdobně jako modulární FACTS umožňují snadnou a rychlou instalaci a škálovatelnost. Jednotky malých výkonů mohou být nasazovány ve větším počtu, což dovoluje rovnoměrnější regulaci a možnost postupného rozšiřování podle potřeb sítě. Uplatnění mohou nalézt v distribučních sítích, například při řešení problémů s kvalitou elektrické energie.

Vývoj FACTS technologií směřuje k modulárním, škálovatelným a nákladově efektivním řešením, která lépe odpovídají dynamickým požadavkům moderních elektrických sítí.

9.3 Směry výzkumu a technického rozvoje

Na základě provedené rešerše je možné shrnout směry výzkumu a technického rozvoje zařízení FACTS:

- **Pokročilé konfigurace FACTS**: Vývoj pokročilejších konfigurací zařízení FACTS, které jsou přizpůsobeny specifickým scénářům, např. chytré sítě, sítě s vysokým podílem obnovitelných zdrojů energie.

- **Řídicí strategie**: Výzkum inovativních řídicích strategií pro zařízení FACTS se zaměřením na zlepšení reakčních časů, přizpůsobivosti a schopnosti zvládat složitou dynamiku elektrické sítě.
- **Integrace s akumulací energie**: Studium integrace systémů pro ukládání energie se zařízeními FACTS za účelem zvýšení stability sítě, efektivního řízení energie a odolnosti vůči poruchám.
- **Využití strojového učení a AI**: Výzkum využití technik strojového učení pro rozhodování v reálném čase u zařízení FACTS, což umožní autonomní provoz a adaptivní reakce.
- **Kybernetická bezpečnost**: Identifikovat a řešit potenciální kybernetické zranitelnosti zařízení FACTS, zejména v kontextu rostoucí digitalizace a konektivity.
- **Standardizace a interoperabilita**: Vývoj standardizovaných protokolů a rozhraní pro zařízení FACTS, které zajistí bezproblémovou integraci a interoperabilitu, výzkum způsobů, jak zlepšit interoperabilitu FACTS zařízení s ostatními komponentami sítě, jako jsou komunikační sítě a senzory.
- **Dopad na dlouhodobé plánování sítě**: Provedení komplexních studií, které posoudí dlouhodobý dopad zařízení FACTS na plánování a návrh elektrických sítí s ohledem na měnící se požadavky.
- **Ekonomické a environmentální hodnocení**: Provedení ekonomických a environmentálních hodnocení za účelem určení nákladové efektivity a udržitelnosti FACTS řešení v různých provozních scénářích.
- **Optimální dimenzování a umístění**: Výzkum zaměřený na určení optimální velikosti a umístění zařízení FACTS v různých konfiguracích sítě pro maximalizaci jejich přínosů.
- **Odolnost sítě (Grid Resilience)**: Studium role zařízení FACTS při zvyšování odolnosti elektrické sítě vůči extrémním povětrnostním jevům a dalším poruchám.

Literatura

[1] Alajrash, B. H., Salem, M., Swadi, M., Senjyu, T., Kamarol, M., & Motahhir, S. (2024). A comprehensive review of FACTS devices in modern power systems: Addressing power quality, optimal placement, and stability with renewable energy penetration. In *Energy Reports* (Vol. 11, pp. 5350–5371). Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.05.011

[2] Tarafdar Hagh, M., Jabbary Borhany, M. A., Taghizad-Tavana, K., & Zare Oskouei, M. (2025). A comprehensive review of flexible alternating current transmission system (FACTS): Topologies, applications, optimal placement, and innovative models. *Heliyon*, *11*(1). https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)17032-6

[3] Kharayat, P. S., Sharma, S., Gupta, S., & Ahuja, H. (2024). Role of FACTS Devices Incorporating Renewable Energy Sources in Distribution and Transmission Systems. *2024 2nd International Conference on Advancements and Key Challenges in Green Energy and Computing, AKGEC 2024*. https://doi.org/10.1109/AKGEC62572.2024.10868681

[4] Hitachi. (n.d.). *Barnstable*. Retrieved July 4, 2025, from https://www.hitachienergy.com/news-and-events/customer-stories/reference-barnstable

[5] Ørsted, L. T. (n.d.). *Hornsea 1 Wind Farm*. Retrieved July 8, 2025, from https://orsted.co.uk/energy-solutions/offshore-wind/our-wind-farms/hornsea1

[6] Polaris Renewable Energy Inc. (2024). *Punta Lima Wind Farm*. Https://Polarisrei.Com/Es/Portfolio/Punta-Lima-Wind-Farm/

[7] STATCOM case study Punta Lima wind farm Dynamic VAr compensation for grid code compliance. (2015). www.abb.com/converters-inverters

[8] Neutz, M. (2013). Power quality–voltage stabilisation for industrial grids and wind farms with STATCOM. MV Power Converters, ABB Technical Journal, 2013, https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/chile-documentos/jornadas-tecnicas-2013---presentaciones/7-michael-neutz---power-quality.pdf

[9] Yuan, Z., De Haan, S. W., Ferreira, J. B., & Cvoric, D. (2010). A FACTS device: Distributed power-flow controller (DPFC). *IEEE transactions on power electronics*, *25*(10), 2564-2572. 10.1109/TPEL.2010.2050494

[10] Joshi, A., Jangid, S., Joshi, N., More, M., & Jadhav, B. (2024). An Overview of UPFC Applications in Stability Analysis of Power System. *Proceedings of the 9th International Conference on Communication and Electronics Systems, ICCES 2024*, 143–146. https://doi.org/10.1109/ICCES63552.2024.10859739

[11] Thakre, M. P., & Ahmad, A. (2022). Interline Power Flow Controller (IPFC) Deployment in Long Transmission Lines and its Effects on Distance Relay. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, *103*(2), 491–505. https://doi.org/10.1007/s40031-021-00637-y

[12] Sahu, P. C., Routray, A., Jena, S., Panda, S., Prusty, R. C., & Sahu, B. K. (2023). Role of IPFC and SMES for Stability improvement of a Power system with type-2 fuzzy controller. *2023 International Conference in Advances in Power, Signal, and Information Technology, APSIT 2023*, 307–312. https://doi.org/10.1109/APSIT58554.2023.10201717

[13] Hussain, A., Amin, M., Khan, R. D., & Chaudhry, F. A. (2018). Optimal allocation of flexible AC transmission system controllers in electric power networks. Inae Letters, 3(1), 41-64. https://doi.org/10.1007/s41403-018-0035-2

[14] Cai, L. J., Erlich, I., & Stamtsis, G. (2004, October). Optimal choice and allocation of FACTS devices in deregulated electricity market using genetic algorithms. In IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004. (pp. 201-207), 10.1109/PSCE.2004.1397562

[15] Kehl, Z., Glasberger, T. (2024). *Řízení nových topologií vysokonapěťových výkonových měničů*. ZČU v Plzni, https://partnerstvi.fel.zcu.cz/PDF/2024/22190-011-2024.pdf

[16] Khadkikar, V. (2011). Enhancing electric power quality using UPQC: A comprehensive overview. IEEE transactions on Power Electronics, 27(5), 2284-2297, *10.1109/TPEL.2011.2172001*

[17] ENTSO-E. *Static Static Synchronous Series Compensators (SSSC)* [online]. Brussels: ENTSO-E, 2024 [cit. 15. 7. 2025]. https://www.entsoe.eu//technopedia/techsheets/static-synchronous-series-compensator-sssc/

[18] Zanganeh, M., Moghaddam, M. S., Azarfar, A., Vahedi, M., & Salehi, N. (2023). Multi-area distribution grids optimization using D-FACTS devices by M-PSO algorithm. *Energy Reports*, *9*, 133–147. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.180

[19] Mumtahina, U., Alahakoon, S., & Wolfs, P. (2023). A Literature Review on the Optimal Placement of Static Synchronous Compensator (STATCOM) in Distribution Networks. In *Energies* (Vol. 16, Issue 17). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/en16176122

[20] Shaheen, A. M., El-Sehiemy, R. A., Ginidi, A., Elsayed, A. M., & Al-Gahtani, S. F. (2023). Optimal Allocation of PV-STATCOM Devices in Distribution Systems for Energy Losses Minimization and Voltage Profile Improvement via Hunter-Prey-Based Algorithm. *Energies*, *16*(6). https://doi.org/10.3390/en16062790

[21] Knaak, H. J. (2011). Modular multilevel converters and HVDC/FACTS: A success story. In Proceedings of the 2011 14th European conference on power electronics and applications (pp. 1-6). https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6020674/

[22] ENTSO-E. (2025, March 25). *Static Synchronous Compensator (STATCOM)*. https://www.entsoe.eu/technopedia/techsheets/static-synchronous-compensator-statcom

[23] Ordóñez, C. A., Gómez-Expósito, A., & Maza-Ortega, J. M. (2021). Series compensation of transmission systems: A literature survey. In *Energies* (Vol. 14, Issue 6). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/en14061717

[24] Guo, Y., Wang, S., & Chen, D. (2024). A Wide-Range TCSC Based ADN in Mountainous Areas Considering Hydropower-Photovoltaic-ESS Complementarity. *Sensors*, *24*(18). https://doi.org/10.3390/s24186028

[25] Văn Du, H. (2025.). Research on LFB method for radiating distribution network with TCSC device for voltage adjustment, In Thu Dau Mot University Journal of Science, Vol. 7, Issue 2, pp. 350-361, June 2025, https://tdmujournal.vn/uploads/paper/files/13-Ha-Van-Du.pdf

[26] Qasim, A. Y., Tahir, F. R., & Alsammak, A. N. B. (2024). Improving Power Quality in Distribution Systems Using UPQC: An Overview. Journal Européen des Systèmes Automatisés, 57(2). https://doi.org/10.18280/jesa.570201

[27] Divan, D., & Johal, H. (2007). Distributed FACTS-A new concept for realizing grid power flow control. IEEE Transactions on Power Electronics (Volume: 22, Issue: 6, November 2007) IEEE. 10.1109/TPEL.2007.909252

[28] Sarkar, T., Gupta, S., Paul, C., Dutta, S., Roy, P. K., Bhattacharya, A., Tejani, G. G., & Mousavirad, S. J. (2025). Optimal allocation of STATCOM for multi-objective ORPD problem on thermal wind solar hydro scheduling using driving training based optimization. *Scientific Reports*, *15*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-025-02636-1

[29] NarayanaGadupudi, L. (2021). Recent Advances of STATCOM in Power Transmission Lines-A Review. In *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education* (Vol. 12, Issue 3). https://www.proquest.com/openview/a6d141a443ae89c4417f8d65f6b538e8/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2045096

[30] Biswas, S., Nayak, P., & Pradhan, G. (2022). A Dual-Time Transform Assisted Intelligent Relaying Scheme for the STATCOM-Compensated Transmission Line Connecting Wind Farm. *IEEE Systems Journal*, *16*(2), 2160–2171. https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3070448

[31] Meikandasivam, S., Nema, R. K., & Jain, S. K. (2011, January). Performance of installed TCSC projects. In *India International Conference on Power Electronics 2010 (IICPE2010)* (pp. 1-8). IEEE. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5728103

[32] CurrENT, Compass LexEcon, Prospects for innovative power grid technologies. 2024, https://www.currenteurope.eu/technologies/, https://www.currenteurope.eu/wp-content/uploads/2024/06/CL-CurrENT-BE-Prospects-for-Innovative-Grid-Technologies-final-report-20240617-2.pdf

[33] Akbar Emarloo, A., Mahmouditabar, F., & Shulaei, A. (2021). Examination and Comparison of Thyristor and Gate-Controlled Series Capacitors Performance for the Voltage Stabilization of Sensitive Loads. *2021 12th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference, PEDSTC 2021*. https://doi.org/10.1109/PEDSTC52094.2021.9405938

[34] Abdeen, M., El-Dabah, M. A., Domínguez-García, J. L., & Kamel, S. (2023). Gate-controlled series capacitor: A new methodology for mitigating sub-synchronous resonance in a series-compensated DFIG-based wind farm. *IET Renewable Power Generation*, *17*(10), 2638–2647. https://doi.org/10.1049/rpg2.12776

[35] Safari, A., & Rezaei, N. (2014). Towards an extended power system stability: An optimized GCSC-based inter-area damping controller proposal. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, *56*, 316–324. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.11.028

[36] Sadiq, R., Wang, Z., & Chung, C. Y. (2023). A multi-model multi-objective robust damping control of GCSC for hybrid power system with offshore/onshore wind farm. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, *147*. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108879

[37] Sadiq, E. H., Mohammed, L. A., & Taha, H. M. (2024). Enhancing Power Transmission Efficiency Using Static Synchronous Series Compensators: A Comprehensive

Review. *Journal of Intelligent Systems and Control*, *3*(2), 71–83. https://doi.org/10.56578/jisc030201

[38] Bhande, S. A., & Chandrakar, V. K. (2022). Static Synchronous Series Compensator (SSSC) to Improve Power System Security. *Proceedings of the International Conference on Electronics and Renewable Systems, ICEARS 2022*, 266–270. DOI: 10.1109/ICEARS53579.2022.9752146

[39] Lu, W., Wu, X., Duan, L., Liu, Z., Tong, W., & Liu, Y. (2024). Control and Protection of Medium Voltage Distribution Network Based on Unified Power Flow Controller. *Electric Power Components and Systems*. https://doi.org/10.1080/15325008.2024.2356720

[40] Schauder, C., Stacey, E., Lund, M., Gyugyi, L., Kovalsky, L., Keri, A., ... & Edris, A. (2002). AEP UPFC project: installation, commissioning and operation of the 160 MVA STATCOM (phase I). IEEE Transactions on Power Delivery, 13(4), 1530-1535. DOI**:** 10.1109/61.714855

[41] Wang, X., Wang, H., Yang, J., Xu, Z., Sun, W., Wu, C., & Li, C. (2019). Application of 500 kV UPFC in Suzhou southern power grid. The Journal of Engineering, 2019(16), 2580-2584. https://doi.org/10.1049/joe.2018.8556

[42] Cui, Y., Yu, Y., Bao, W., Feng, Y., Guo, Q., Xie, W., & Jin, M. (2019). Analysis of application effect of 220 kV UPFC demonstration project in Shanghai grid. *The Journal of Engineering*, *2019*(16), 758-762. https://doi.org/10.1049/joe.2018.8364

[43] Arabi, S., Hamadanizadeh, H., & Fardanesh, B. B. (2002). Convertible static compensator performance studies on the NY state transmission system. IEEE Transactions on Power Systems, 17(3), 701-706, 10.1109/TPWRS.2002.800916

[44] Li, P., Wang, Y., Feng, C., & Lin, J. (2017). Application of MMC-UPFC in the 500 kV power grid of Suzhou. The Journal of Engineering, 2017(13), 2514-2518. https://doi.org/10.1049/joe.2017.0780

[45] Peng, L., Jinjiao, L., Xiangping, K., & Yuting, W. (2016, October). Application of MMC-UPFC and its performance analysis in Nanjing Western Grid. In 2016 IEEE PES Asia-Pacific power and energy engineering conference (APPEEC) (pp. 2601-2605). IEEE 10.1109/APPEEC.2016.7779960

[46] Kim, S. Y., Yoon, J. S., Chang, B. H., & Baek, D. H. (2005, September). The operation experience of KEPCO UPFC. In 2005 International Conference on Electrical Machines and Systems (Vol. 3, pp. 2502-2505). IEEE. 10.1109/ICEMS.2005.203026

[47] Hasan, N. S., Rosmin, N., Osman, D. A. A., & Musta'amal, A. H. (2017). Reviews on multilevel converter and modulation techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 80, 163-174. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.163

[48] Perez, M. A., Ceballos, S., Konstantinou, G., Pou, J., & Aguilera, R. P. (2021). Modular multilevel converters: Recent achievements and challenges. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2, 224-239. 10.1109/OJIES.2021.3060791

[49] Chaudhary, S. K., Cupertino, A. F., Teodorescu, R., & Svensson, J. R. (2020). Benchmarking of modular multilevel converter topologies for ES-STATCOM realization. Energies, 13(13), 3384. doi: 10.3390/en13133384

[50] Mott MacDonald (2025). A Comparison of Electricity Transmission Technologies: Costs and Characteristics. An Independent Report by Mott MacDonald in Conjunction with the IET,

https://www.theiet.org/media/axwkktkb/100110238_001-rev-j-electricity-transmission-costs-and-characteristics_final-full.pdf

[51] Mankar, H. R., & Chandrakar, V. (2025). ANN Based Interline Power Flow Controller (IPFC) for Power System Security Enhancement. *2025 International Conference in Advances in Power, Signal, and Information Technology (APSIT)*, 1–5. https://doi.org/10.1109/APSIT63993.2025.11086323

[52] Rezaeian-Marjani, S., Ebrahimi, H., & Tousi, B. (2022). Probabilistic multi-objective optimization method for interline power flow controller (IPFC) allocation in power systems. *IET Generation, Transmission and Distribution*, *16*(24), 4951–4962. https://doi.org/10.1049/gtd2.12645

[53] Fardanesh, B., Schuff, A., "Dynamic studies of the NYS transmission system with the Marcy CSC in the UPFC and IPFC configurations," IEEE PES T&D Conference and Exposition, 2003. 10.1109/TDC.2003.1335108

[54] Zhang, J., Yokoyama, A., Ide, T., "Application of Interline Power Flow Controller (IPFC) to Power Oscillation Damping," IEEJ Transactions on Power and Energy, vol. 128, no. 10, pp. 1252–1258, 2008. DOI: 10.1541/ieejpes.128.1252

[55] Moghassemi, A., & Padmanaban, S. (2020). Dynamic voltage restorer (DVR): a comprehensive review of topologies, power converters, control methods, and modified configurations. Energies, 13(16), 4152, doi: 10.3390/en13164152

[56] Alturki, M., & Marouani, I. (2024). Simulation tools for FACTS devices optimization problems in electrical power systems. *AIMS Energy*, *12*(6), 1113–1172. https://doi.org/10.3934/energy.2024053

[57] Devi, S., & Geethanjali, M. (2014). Optimal location and sizing of distribution static synchronous series compensator using particle swarm optimization. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 62, 646-653. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.05.021

[58] ACER, Unit investment costs indicators for energy infrastructure categories, 2023. https://www.acer.europa.eu/sites/default/files/documents/Publications/ACER_UIC_indicators_table.pdf

[59] Chawda, G. S., Shaik, A. G., Mahela, O. P., Padmanaban, S., & Holm-Nielsen, J. B. (2020). Comprehensive Review of Distributed FACTS Control Algorithms for Power Quality Enhancement in Utility Grid With Renewable Energy Penetration. Ieee Access, 8, 107614-107634. https://vbn.aau.dk/files/405963832/09110836.pdf

[60] Shahgholian, G. (2023). A brief overview of microgrid performance improvements using distributed FACTS devices. Journal of Renewable Energy and Environment, 10(1), 43-58. 10.30501/jree.2022.321435.1305

[61] Kang, B. il, & Park, J. do. (2014). Application of thyristor-controlled series reactor for fault current limitation and power system stability enhancement. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, *63*, 236–245. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.05.059

[62] EPRI, Advanced Power Flow Controllers Status, Applications, and Opportunities: A GET SET White Paper, 2025, https://www.epri.com/research/sectors/technology/results/3002031443

[63] Baviskar, A., Hansen, A. D., Das, K., & Koivisto, M. (2020). Challenges of future distribution systems with a large share of variable renewable energy sources–review. In 19th wind integration workshop. Energynautics [Online]. https://orbit.dtu.dk/files/246315675/7B_1_WIW20_056_paper_Baviskar_Aeishwarya.pdf

[64] Santamaria-Henao, N., Montoya, O. D., & Trujillo-Rodríguez, C. L. (2023). *Optimal Siting and Sizing of FACTS in Distribution Networks Using the Black Widow Algorithm*. Algorithms, 16(5), 225. https://doi.org/10.3390/a16050225

[65] Chethan, M., Kuppan, R., "A review of FACTS device implementation in power systems using optimization techniques," Journal of Electrical Systems and Applied Sciences, 71, 18 (2024). https://doi.org/10.1186/s44147-023-00312-7

[66] Siemens AG, Flexible AC Transmission Systems for Cost-Effective and Reliable Transmission of Electrical Energy, Siemens Technical Paper, 2010. [Online]. Available: https://www.rds.oeb.ca/CMWebDrawer/Record/176620/File/document

[67] Y. V. B. K. Rao, "Optimal Location of FACTS Devices Considering Installation Cost, Transmission Loss And System Loadability Using Abc Algorithm" International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology, vol. 20, no. 1, pp. 39.1–39.7, 2019. [Online]. Available: https://ijssst.info/Vol-20/No-1/paper39.pdf

[68] Dahej, A. E., Esmaeili, S., & Goroohi, A. (2013). Multi-objective optimal location of SSSC and STATCOM achieved by fuzzy optimization strategy and harmony search algorithm. In *Scientia Iranica D* (Issue 6). www.scientiairanica.com

[69] Gelen, A., & Yalcinoz, T. (2008, December). The behaviour of TSR-based SVC and TCR-based SVC installed in an infinite bus system. In *2008 IEEE 25th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel* (pp. 120-124). IEEE, https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4736670

[70] Alves, J. E. R., Pilotto, L. A. S., & Watanabe, E. H. (2008). Thyristor-controlled reactors nonlinear and linear dynamic analytical models. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *23*(1), 338–346. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.911131

[71] Ghorbani, A., Khederzadeh, M., & Mozafari, B. (2012). Impact of SVC on the protection of transmission lines. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, *42*(1), 702–709. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.04.029

[72] Schneider, S., Platz, H. G., Henschel, S., Pallett, A., & Marshall, S. (2019). Compensation of the Voltage Fluctuations in the Distribution Network of London Underground using the SVC PLUS ®. In *15th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2019)* (pp. 1-8). https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8690267/

[73] Winning, C., Faridi, M., Kelly, B. - Using advanced modular FACTS to increase flexibility of distribution networks and enable the connection of more distributed energy resources, CIGRE session, Paris 2020, C6-115

[74] Jha, K., & Shaik, A. G. (2023). A comprehensive review of power quality mitigation in the scenario of solar PV integration into utility grid. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, *3*, 100103, https://doi.org/10.1016/j.prime.2022.100103

[75] Mirzapour, O., Rui, X., & Sahraei-Ardakani, M. (2024). Grid-enhancing technologies: Progress, challenges, and future research directions. *Electric Power Systems Research*, Volume 230, 2024, 110304, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110304

[76] Tlustý, J., Kyncl, J., Musil, L., Špetlík, J., Švec, J., Hamouz, P., & Müller, M. Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav. *Praha: České vysoké učení technické v Praze*, 2011, https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/cvut-5-monitorovani.pdf

[77] Tenório, Filho, Praxedes, Sobrinho: Hunting Issues in the Brazilian Interconnected Power System – A Case Study of Multiple SVCs, CIGRE Session, Paris, 2024, paper B4-10777, pp. 1-12

[78] Carbonara, A., Dambone Sessa, S., L'Abbate, A., Sanniti, F., & Chiumeo, R. (2024). Comparison of advanced flexible alternating current transmission system (FACTS) devices with conventional technologies for power system stability enhancement: an updated review. *Electronics*, *13*(21), 4262. https://doi.org/10.3390/electronics13214262

[79] GE Energizes the Largest and First-of-Its-Kind STATCOM Scheme in Europe for UK's National Grid. Press Release. 2020. https://www.ge.com/news/press-releases/ge-energizes-the-largest-and-first-of-its-kind-statcom-scheme-in-europe-for-uks

[80] Sandrini, L., Bosisio, A., Cirocco, A., Turrisi, M., Pasetti, C., Morotti, A., & Cavalletto, L. (2023, October). A comparative analysis of reactive power compensation using reactors and STATCOMs in primary substations: A case study in Milan, Italy. In *2023 AEIT International Annual Conference (AEIT)* (pp. 1-6). 10.23919/AEIT60520.2023.10330381

[81] German TSOs. Need to Develop Grid-Forming STATCOM Systems. Position Study, 2020. https://www.netztransparenz.de/en/About-us/Studies-and-position-papers/Position-paper-Demand-for-the-development-of-grid-forming-STATCOM-systems-08122020

[82] Mittelstaedt, M. First Grid-Forming 300 MVAr STATCOM in Germany. ESIG News, 2024. ESIG. Available online: https://www.esig.energy/first-grid-forming-300-mvar-statcom-in-germany/ (accessed on 18 October 2024).

[83] Stiger, A.; Rivas, A.; Halonen, M. Synchronous Condensers Contribution to Inertia and Short Circuit Current in Cooperation with STATCOM. In Proceedings of the IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia) 2019, Bangkok, Thailand, 19–23 March 2019; pp. 955–959. https://ieeexplore.ieee.org/document/8715893

[84] Standardized design of E-STATCOM, https://www.netztransparenz.de/en/Ancillary-Services/Voltage-stability/Standardized-design-of-E-STATCOM

[85] Engelbrecht, T., Isaacs, A., Kynev, S., Matevosyan, J., Niemann, B., Owens, A. J., ... & Grondona, A. (2023). Statcom technology evolution for tomorrow's grid: E-statcom, statcom with supercapacitor-based active power capability. *IEEE Power and Energy Magazine*, *21*(2), 30-39. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10045621/

[86] Grid Stability: Nidec Conversion and 50Hertz lead with Second-Generation STATCOM project near Berlin, 2024, https://www.nidec-conversion.com/nidec-50hertz-second-generation-statcom/

[87] TransnetBW to use Hitachi Energy's technology, 2024 https://transformers-magazine.com/tm-news/transnetbw-to-use-hitachi-energys-technology/

[88] Zhao, F.; Wang, X.; Zhou, Z.; Meng, L.; Hasler, J.P.; Svensson, J.R.; Kocewiak, L.; Bai, H.; Zhang, H. Energy-Storage Enhanced STATCOMs for Wind Power Plants. IEEE Power Electron. Mag. 2023, 10, 34–39, https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10167609/

[89] ESIG – Installed and Planned Grid-Forming Projects, https://www.esig.energy/working-users-groups/reliability/grid-forming/gfm-landscape/projects/

[90] CIGRE AG B4-04. Static Var Compensator/STATCOM performance Survey Results–2017 and 2019. In CIGRE Technical Brochure n. 872; CIGRE: Paris, France, 2022

[91] CIGRE AG B4-04. Interaction between nearby VSC-HVDC converters, FACTs devices, HV power electronic devices and conventional AC equipment. In CIGRE Technical Brochure n. 934; CIGRE: Paris, France, 2024

[92] Tran, M.-Q., Dinh, M.-C., Lee, S.-J., Lee, J.-I., Park, M., Lee, C. H., & Yoon, J. (2019). Analysis and Mitigation of Subsynchronous Resonance in a Korean Power Network with the First TCSC Installation. Energies, 12(15), 2847. https://doi.org/10.3390/en12152847

[93] PTR Inc. - Energy Transition to Rely on STATCOMs in Germany, 2023, https://ptr.inc/energy-transition-to-rely-on-statcoms-in-germany/

[94] Bebic, J. Z., Lehn, P. W., & Iravani, M. R. (2006, June). The hybrid power flow controller-a new concept for flexible AC transmission. In *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting* (pp. 1-pp). IEEE, 10.1109/PES.2006.1708944

[95] Chen, H., Iyer, A. R., Harley, R. G., & Divan, D. (2014). Dynamic grid power routing using controllable network transformers (CNTs) with decoupled closed-loop controller. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *51*(3), 2361-2372. 10.1109/TIA.2014.2379917

[96] Kumari, D., Chattopadhyay, S. K., & Verma, A. (2020). Improvement of power flow capability by using an alternative power flow controller. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *35*(5), 2353-2362. 10.1109/TPWRD.2020.2966579

[97] Jiang, Y., Liu, H., Zheng, Q., & Zheng, L. (2011). A novel apparatus for adjusting the insertion voltage of transmission line based on variable inductors. *IEEE transactions on power delivery*, *27*(1), 23-31. 10.1109/TPWRD.2010.2080324

[98] Hooshi, Z., Hagh, M. T., & Sabahi, M. (2011, May). Line to line compensator (LLC), a new generation of facts controllers. In *2011 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)* (pp. 000723-000726). IEEE. 10.1109/CCECE.2011.6030549

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Napěťové a výkonové poměry na přenosové lince [76] 8
Obr. 2.2 Vliv různých parametrů na přenášený činný a jalový výkon, a) zátěžný úhel, b) napětí na koncích vedení, c) reaktance vedení [56] 9
Obr. 2.3 Strategie řízení různých zařízení FACTS pro navýšení přenášeného výkonu [56] 10
Obr. 2.4 Dělení FACTS podle zapojení do sítě [3] 11
Obr. 2.5 Dělení FACTS podle použitých prvků výkonové elektroniky [1] 12
Obr. 2.6 Přední regiony na trhu se zařízeními FACTS [2] 14
Obr. 3.1 Schéma zapojení SVC [1] 16
Obr. 3.2 SVC a jeho V-A pracovní oblast [76] 17
Obr. 3.3 Zapojení TSC s ochrannou tlumivkou 18
Obr. 3.4 Vnitřní zapojení A-SVC [2] 18
Obr. 3.5 SVC v Cape Cod Massachusetts [4] 19
Obr. 3.6 Instalace zařízení SVC a STATCOM v brazilské přenosové soustavě [77] 20
Obr. 3.7 Typické investiční náklady, zdroj Siemens [66] 21
Obr. 3.8 Schéma zapojení Statkům [1] 22
Obr. 3.9 STATCOM a jeho V-A pracovní oblast [76] 22
Obr. 3.10 Schéma E-STATCOMu [78] 23
Obr. 3.11 Turbíny na větrné farmě Hornsea ONE ve Velké Británii [5] 25
Obr. 3.12 Mapa větrných farem na pobřeží Velké Británie v Severním moři 26
Obr. 3.13 Zjednodušené schéma hybridního synchronního kompenzátoru [83] 26
Obr. 3.14 Průběh napětí bez (černě) a s (červeně) nainstalovaným STATCOMem a průběh injektovaného jalového výkomu [72] 27
Obr. 3.15 Instalace STATATCOMů a synchronníci kompenzátorů v Itáli [78] 28
Obr. 3.16 Uspořádání zařízení E-STATCOM o výkonu 50 MVW (SVC PLUS FC. Siemens) [78] 29
Obr. 3.18 Struktura ABB STATCOMu [8] 30
Obr. 3.17 Kontejnerové řešení STATCOMu firmy ABB [7] 30
Obr. 3.19 Typické investiční náklady, zdroj Siemens [66] 32
Obr. 4.1 Schéma zapojení TCSR[1] 35
Obr. 4.2 Schéma zapojení TSSC [1] 37
Obr. 4.3 Schéma zapojení TCSC [1] 38
Obr. 4.4 TCSC s ochrannými prvky [23] 39
Obr. 4.5 Modelové schéma zapojení TCSC v Kayentě [31] 40
Obr. 4.6 Modelové schéma zapojení projektu Slatt [31] 40
Obr. 4.7 Projekt TCSC ve Stöde [31] 41
Obr. 4.8 Porovnání napětí s jedním nebo dvěma zdroji bez TCSC a dvěma zdroji s dvěma TCSC [25] 42
Obr. 4.9 Typické investiční náklady, zdroj Siemens [66] 43
Obr. 4.10 Kompenzace přenosového vedení pomocí SSSC. (a) náhradní obvod. (b) fázorový diagram [23] 43
Obr. 4.11 Schéma zapojení SSSC [1] 44
Obr. 4.12 SSSC v projektu National Grid ve Velké Británii [50] 46
Obr. 4.13 Konfigurace sítě zobrazující umístění modulárních regulátorů toku výkonu na dvou ze tří paralelních linek 132 kV mezi Lawfordem a Bramfordem a vpravo znázornění, jak bude zátěž vyvážena mezi třemi linkami, aby se uvolnilo dalších 95 MW instalovaného výkonu 46

Obr. 4.14 Zařízení MFACTS instalovaná v projektu Loadshare. Vlevo – zařízení MFACTS pro instalaci na vedení. Vpravo – zařízení MFACTS pro instalaci v rozvodně [73] 47
Obr. 4.15 Instalace zařízení MFACTS v provedení pro rozvodny [73] 47
Obr. 4.16 Schéma SSSC (1) vazební transformátor, (2) spínače a bypass, (3) měniče VSC, zdroj: INGETEAM 48
Obr. 5.1 Schéma zapojení UPFC [2] 52
Obr. 5.2 Principiální schéma [2] 53
Obr. 5.3 Principiální schéma C-UPFC [2] 54
Obr. 5.4 Výměna činného výkonu mezi měniči tvořícími DUPFC [8] 55
57
Obr. 5.5 Schéma UPFC ve stanici Mudu [41] 57
Obr. 5.6 Schéma UPFC ve stanici Tiebei [45] 58
Obr. 5.7 Speciální konstrukce sériového transformátoru se zapojením vinutí III/ Y/yn0d11 [45] 58
Obr. 5.8 Typické investiční náklady, zdroj Siemens [66] 60
Obr. 5.9 Schéma zapojení IPFC [12] 60
Obr. 6.1 Schéma zapojení GCSC připojené na síť [33] 63
Obr. 6.2 Schéma HPFC a jeho náhradní obvod [2] 65
Obr. 6.3 Schéma CNT s regulační obvod se zpětnou vazbou [2] 66
Obr. 6.4 Jednocestné zapojení transformátoru s přepínačem odboček a 19 napěťových vektorů [96] 67
Obr. 6.5 Schéma zařízení s proměnnými indukčnostmi [2] 68
Obr. 6.6 Topologie zařízení LLC a ukázka vlivu na fázorový diagram napětí [2], [98] 69
Obr. 7.1 Instalace modulů pro sériovou kompenzaci podél přenosové linky [27] a ukázka instalace na přenosové lince 70
Obr. 7.2 Schéma modulárního STACOMU založeného na technologii MMC měničů 71
Obr. 7.3 Modulární MMC (H-bridge) jednotka, sestávající se ze čtyř modulů, zdroj: Hitashi . 71
Obr. 7.4 Modulární E-STATCOM s centrálním úložištěm energie a distribuovanýmu úložisti energie [49] 72
Obr. 7.5 Klasifikace zařízení DFACT [59] 72
Obr. 7.6 Různé topologie DSSC: a) DSR (Distributed Series Reactor), b) DSI (Distributed Series Impedance), c) Inverter-less DSSC a d) DSSC s VSC měničem [23] 73
Obr. 7.7 Topologie DVR a její využití pro kompenzaci poklesů napětí 74
Obr. 7.8 DVR a) bez úložiště energie, b) s úložištěm – kondenzátor, c) s externím úložištěm [55] 74
Obr. 7.9 Přechod od UPFC k DPFC [1] 75
Obr. 7.10 Cesta proudu 3. harmonické a využití transformátoru Ynd [9] 75
Obr. 7.11 Schéma UPQC založeného na napěťových měničích VSC a proudových měničích CSC [16] 76
Obr. 8.1 Základní přístupy k řešení úlohy optimalizace umístění zařízení FACTS [65] 79
Obr. 8.2 Příklady optimalizačních metod pro optimalizaci umístění zařízení FACTS [2], [65] . 79
Obr. 8.3 Základní klasifikace řídicích algoritmů [59] 85

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
0	Všechny	Publikování dokumentu	2.11.2025	M. Vinš