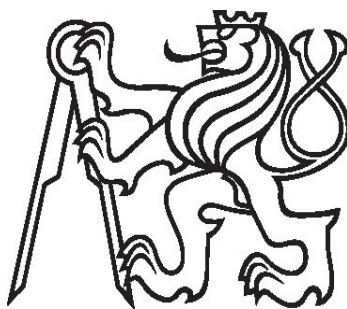


Diplomová práce



České
vysoké
učení
technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická

VYBRANÉ PROBLÉMY A DOPADY NA ŘÍZENÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY V OBDOBÍ DEKARBONIZACE ENERGETIKY

Bc. Daniel Harazim

Vedoucí práce: Ing. Martin Čerňan, Ph.D.
2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Harazim** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **510856**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vybrané problémy a dopady na řízení přenosové soustavy v období dekarbonizace energetiky.

Název diplomové práce anglicky:

Selected problems and impacts in the control of the transmission system during the period of energy sector decarbonization.

Pokyny pro vypracování:

1. Zpracujte přehled současných přístupů k řízení přenosové soustavy v ČR.
2. Zpracujte přehled nejzásadnějších problémů a dopadů procesu dekarbonizace energetiky na řízení přenosové soustavy a vytipujte nejzásadnější.
3. Zanalyzujte vliv vytipovaných problémů pro různé dekarbonizační scénáře.
4. Proveďte studii zaměřenou na využití dostupných technologií pro řešení vytipovaných problémů.
5. Na základě zjištěných výsledků navrhněte soubor opatření včetně jejich případného časového harmonogramu.

Seznam doporučené literatury:

1. Andersen, Bjørne & Nilsson, Stig. (2020). Flexible AC Transmission Systems FACTS: FACTS. 10.1007/978-3-319-71926-9.
2. MÁŠLO, Karel. Řízení a stabilita elektrizační soustavy. [Praha]: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN isbn978-80-260-4461-1.
3. TLUSTÝ, Josef. Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04940-2.
4. TLUSTÝ, Josef; KYNCL, Jan; MUSIL, Ladislav; ŠPETLÍK, Jan; ŠVEC, Jan; HAMOUZ, Petr; MÜLLER, Miroslav; MÜLLER, Zdeněk. Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04939-6.
5. ČEPS, a.s. Kodex přenosové soustavy. Praha, 2023, <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Martin Čerňan, Ph.D. katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **26.01.2024** Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **21.09.2025**

Ing. Martin Čerňan, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis otkarova(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce, Ing. Martinu Čerňanovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady, které byly klíčové pro úspěšné dokončení této práce.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze 24.5.2024

.....

Daniel Harazim

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou a dopady dekarbonizace energetiky na řízení přenosové soustavy v České republice. V kontextu rostoucího podílu obnovitelných zdrojů energie a postupného útlumu tradičních zdrojů se práce soustředí na identifikaci klíčových výzev, jako jsou proměnlivost a nepředvídatelnost obnovitelných zdrojů, úbytek setrvačné hmoty, zkratový proud, napěťová stabilita a další technické aspekty. Práce analyzuje možné scénáře vývoje energetického mixu až do roku 2040 a navrhuje technologická řešení, která by mohla tyto výzvy řešit. Výsledky práce ukazují, že integrace nových technologií a strategické plánování jsou klíčové pro zajištění stability a bezpečnosti přenosové soustavy v budoucnosti.

Klíčová slova

dekarbonizace, obnovitelné zdroje, přenosová soustava, setrvačnost, jalový výkon, napěťová stabilita, FACTS, synchronní kompenzátory, setrvačnick

Abstract

This thesis addresses the problems and impacts of the decarbonization of the energy sector on the control of the transmission system in the Czech Republic. With an increasing share of renewable energy sources and the gradual phasing out of traditional sources, the study focuses on identifying key challenges such as the variability and unpredictability of renewable sources, loss of inertia, short-circuit current, voltage stability, and other technical aspects. The thesis analyzes potential development scenarios of the energy mix until 2040 and proposes technological solutions that could address these challenges. The results demonstrate that the integration of new technologies and strategic planning are crucial for ensuring the stability and security of the future transmission system.

Key words

decarbonization, renewable sources, transmission system, inertia, reactive power, voltage stability, FACTS, synchronous generator, flywheel

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	14
1 ÚVOD	15
2 BUDOUCNOST ENERGETIKY	17
2.1 Vnitrostátní plán České republiky v oblasti energetiky a klimatu	17
2.2 Green Deal	18
2.3 Sector coupling	18
3 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA.....	20
3.1 Výroba elektrické energie	20
3.1.1 Neobnovitelné zdroje	21
3.1.2 Obnovitelné zdroje.....	21
3.1.3 Podíl elektráren na výrobě v ČR	22
3.1.4 Denní diagram zatížení soustavy	23
3.2 Přenosová soustava	24
3.3 Distribuční soustava	25
4 ŘÍZENÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY	26
4.1 ČEPS a jeho význam v řízení přenosové soustavy	26
4.2 Systémové služby	26
4.2.1 Udržování výkonové rovnováhy v reálném čase	27
4.2.2 Udržování kvality elektřiny	27
4.2.3 Obnovení provozu	28
4.2.4 Dispečerské řízení	29
4.2.4.1 Operativní řízení.....	29
4.2.4.2 Příprava provozu.....	29
4.2.4.3 Hodnocení provozu	30
4.3 Podpůrné služby	30
4.3.1 Služby výkonové rovnováhy	31
4.3.1.1 Platformy a nákup SVR.....	33
4.3.2 Ostatní podpůrné služby	34
4.4 Operátor trhu	34
4.5 Energetický regulační úřad	35
5 STABILITA ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY	36
5.1 Úhlová stabilita	37
5.1.1 Stabilita malých kyvů (statická).....	37
5.1.2 Přečodná stabilita (dynamická).....	37
5.2 Napěťová stabilita	38
5.2.1 Pracovní oblast alternátoru (P-Q diagram).....	38
5.3 Frekvenční stabilita	39

5.3.1	Setrvačnost a kinetická energie	39
6	PROBLÉMY A DOPADY DEKARBONIZACE NA PŘENOSOVOU SOUSTAVU	42
6.1	Proměnlivost, nepředvídatelnost a decentralizace	42
6.2	Frekvenční stabilita a setrvačnost	43
6.3	Zkratový proud	44
6.4	Napěťová stabilita a regulace jalového výkonu	45
6.5	Potřeba záložních zdrojů a uložišť	45
6.6	Integrace a řízení sítě	46
6.7	Omezení přenosové kapacity	46
6.8	Regulační a tržní výzvy	47
6.9	Kvalita elektrické energie	47
7	VYBRANÉ PROBLÉMY DEKARBONIZACE A JEJICH VLIV NA PŘENOSOVOU SOUSTAVU	49
7.1	Vstupní data	49
7.1.1	Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR (MAF)	50
7.2	Úbytek setrvačnosti v PS	51
7.2.1	Konzervativní scénář	52
7.2.2	Progresivní scénář	53
7.2.3	Dekarbonizační scénář	53
7.3	Úbytek jalového výkonu v PS	54
7.3.1	Konzervativní scénář	55
7.3.2	Progresivní scénář	56
7.3.3	Dekarbonizační scénář	57
8	TECHNOLOGIE PRO ŘEŠENÍ VYBRANÝCH PROBLÉMŮ DEKARBONIZACE	59
8.1	FACTS	59
8.1.1	SVC	59
8.1.2	STATCOM	60
8.1.3	Hybridní STATCOM	62
8.1.4	SSSC	63
8.1.5	TCSC	64
8.1.6	UPFC	65
8.1.7	PST, PAR	66
8.1.8	MSC, MSR	67
8.2	Uložiště elektrické energie	67
8.2.1	Superkondenzátory (EDLC)	67
8.2.2	Lithium-iontové uložišť	68
8.2.3	Přečerpávací vodní elektrárny	69
8.3	Rotační kompenzátory	70
8.3.1	Synchronní kompenzátory	70

8.3.2	Setrvačníky.....	71
8.4	Výsledek analýzy	71
9	NÁVRH ŘEŠENÍ VYBRANÝCH PROBLÉMŮ DEKARBONIZACE	73
9.1	Výběr zařízení	73
9.1.1	Hybridní STATCOM s externím zdrojem energie	74
9.1.2	Synchronní kompenzátor s integrovaným setrvačником	75
9.2	Umístění zařízení.....	76
9.3	Návrh instalace zařízení v čase	77
9.3.1	Konzervativní scénář	77
9.3.2	Progresivní scénář.....	78
9.3.3	Dekarbonizační scénář	78
10	ZÁVĚR	80
	Seznam literatury	82
	Seznam obrázků.....	87
	Seznam tabulek	88
	Seznam příloh.....	88

Seznam symbolů a zkratek

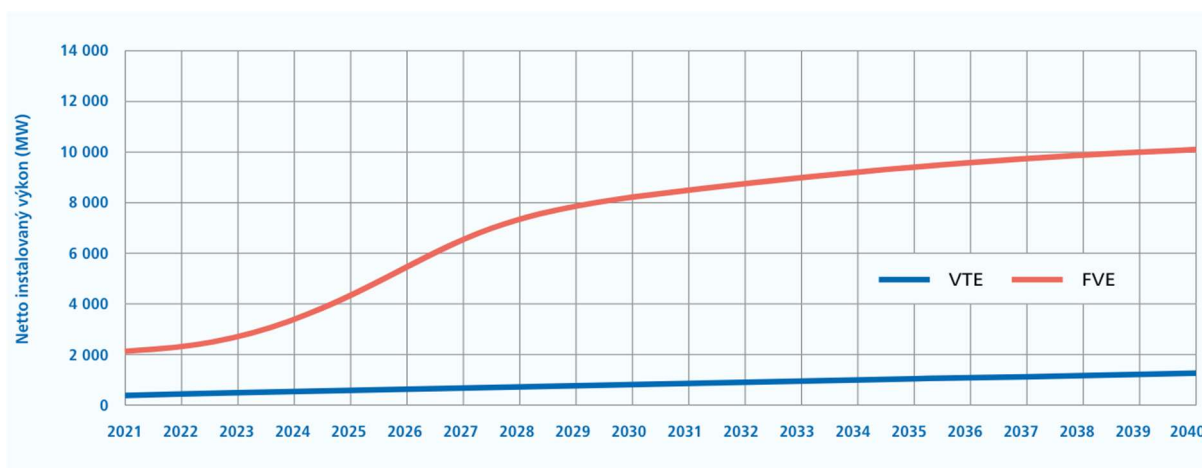
aFRR	Automatic Frequency Restoration Reserve (Automatická záloha pro obnovu frekvence)
ACE	Area Control Error (Odchylka oblasti)
CO ₂	Oxid uhličitý
DS	Distribuční soustava
EDLC	Electrostatic Double-Layer Capacitor (Superkondenzátor)
EE	Elektrická energie
ES	Elektrizační soustava
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
MSC	Mechanically Switched Capacitor (Spínaný kondenzátor)
MSR	Mechanically Switched Reactor (Spínaná tlumivka)
mFRR	Manual Frequency Restoration Reserve (Manuální záloha pro obnovu frekvence)
OZE	Obnovitelné zdroje elektrické energie
PAR	Phase-Angle Regulator (Regulátor fázového úhlu)
PPS	Provozovatel přenosové soustavy
PS	Přenosová soustava
PST	Phase-Shifting Transformer (Transformátor s fázovým posunem)
PVE	Přečerpávací vodní elektrárna
RR	Replacement Reserve (Náhradní záloha)
SC	Synchronní kompenzátor
STATCOM	Static Synchronous Compensator (Statický synchronní kompenzátor)
SSSC	Static Synchronous Series Compensator (Statický synchronní sériový kompenzátor)
TCSC	Thyristor-Controlled Series Capacitor (Tyristorově řízený sériový kondenzátor)
THD	Total Harmonic Distortion (Celkové harmonické zkreslení)
UPFC	Unified Power Flow Controller (Univerzální regulátor výkonových toků)
VSC	Voltage-Sourced Converter (Měnič na bázi napěťového zdroje)
KS	Konzervativní scénář
PS	Progresivní scénář
DS	Dekarbonizační scénář

1 ÚVOD

Energetický sektor v České republice a celosvětově prochází významnou transformací. Rostoucí podíl obnovitelných zdrojů energie (OZE) v přenosové soustavě přináší nejen ekologické výhody, ale i nové výzvy. Zatímco se společnost těší na čistší ovzduší a snížení emisí CO₂ a dalších škodlivých látek, na druhou stranu energetika čelí výzvám spojeným s poklesem počtu synchronních generátorů v síti, což může ohrozit stabilitu soustavy. Výroba elektrické energie se bude měnit dle podle počasí, oblačnosti či síly větru, což znamená odklon od dosavadního modelu několika desítek dominantních systémových elektráren, které pokrývaly spotřebu celé České republiky a přebytky prodávaly do okolních států.

Nastává doba, kdy budou klasické zdroje elektrické energie, zejména uhelné elektrárny, postupně odstavovány. Výroba energie se bude stále více přesouvat do distribučních soustav a stane se decentralizovanou. Přesto však bude nutné tuto výrobu efektivně řídit a zajišťovat rovnováhu mezi spotřebou a výrobou. Energetický sektor tak čelí řadě výzev a příležitostí, které budou formovat jeho budoucnost. S důrazem na ochranu životního prostředí, snižování emisí skleníkových plynů a udržitelnost se energetika stává klíčovým hráčem v globálním úsilí o boj proti změnám klimatu.

Zásoby fosilních paliv, jako jsou zemní plyn, černé uhlí, hnědé uhlí a ropa, nejsou nekonečné a jednoho dne dojdou. Fosilní paliva, která vznikla v prvohorách před přibližně 360-300 miliony let, mají uhlík jako hlavní stavební prvek. Podle predikčních modelů, jako je Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR 2022 [1], je očekáván enormní nárůst instalovaného výkonu OZE, především fotovoltaických systémů, které mají do roku 2040 dosáhnout 10 000 MW.

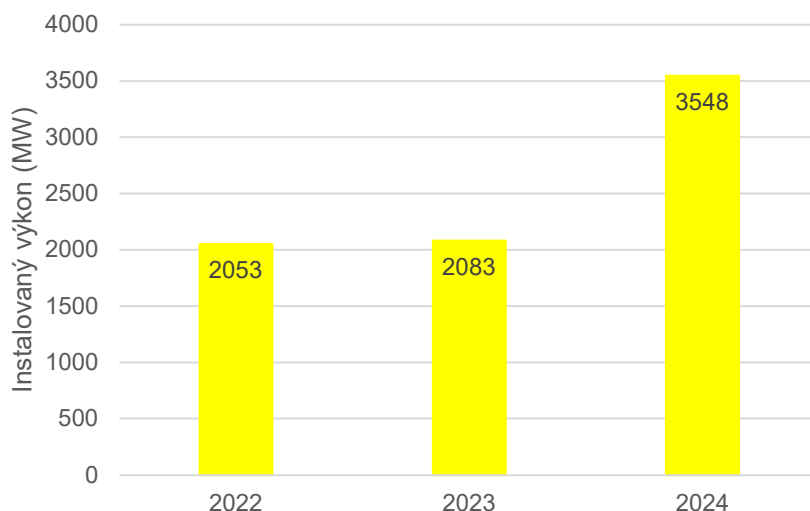


Obr. 1 Výhled vývoje netto instalovaného výkonu fotovoltaických a větrných elektráren
Dekarbonizační predikce [46]

Historicky zajišťovala přenosová soustava propojení zdrojů v přenosové soustavě s distribučními soustavami. Trendem příštích let však bude významný nárůst intermitentních, tedy proměnlivých, distribuovaných zdrojů. Současná přenosová soustava nebude pro nové podmínky dostatečná a bude vyžadovat masivní rozvoj. Dalším faktorem ohrožujícím spolehlivost a bezpečnost přenosové soustavy je její stárnutí, což vyžaduje jak prostou, tak rozšířenou obnovu v nejbližších letech. Nárůst intermitentních zdrojů bude mít také zásadní

dopady na schopnost řídit energetický systém, což si vyžádá vývoj nových technologií a přepracování opatření, pracovních postupů a provozních instrukcí.

Poslední rok ukázal výrazný nárůst instalovaného výkonu fotovoltaických elektráren, s nárůstem o necelých 1 500 MW instalovaného výkonu, jak je patrné z Obr. 2. To znamená, že každý měsíc průměrně přibylo minimálně 120 MW instalovaného výkonu nových fotovoltaických systémů v České republice. Pokud tento trend bude pokračovat stejnou rychlostí, přinese nové výzvy nejen pro přenosovou soustavu, ale pro celý elektrizační systém. Tato diplomová práce se zaměřuje na analýzu dopadů tohoto vývoje na řízení přenosové soustavy, s cílem odpovědět na klíčové otázky spojené s tímto trendem.



Obr. 2 Nárůst instalovaného výkonu v jednotlivých letech v ČR [16]

Diplomová práce je rozdělena do několika kapitol, které systematicky řeší jednotlivé aspekty dekarbonizace a jejího dopadu na přenosovou soustavu. První kapitola představuje úvod do problematiky, následuje kapitola zaměřená na klíčové aspekty určující budoucnost energetického sektoru, včetně vnitrostátního plánu České republiky v oblasti energetiky a klimatu, Green Dealu a sector coupling. Třetí kapitola popisuje přenosovou a distribuční soustavu, jejich funkce a význam v rámci elektrizačního systému, včetně výroby elektrické energie, denního diagramu zatížení soustavy a trendů ve výrobě elektrické energie. Další kapitola se věnuje řízení přenosové soustavy, včetně systémových a podpůrných služeb nezbytných pro stabilní provoz. Pátá kapitola analyzuje problémy a dopady dekarbonizace na přenosovou soustavu, včetně proměnlivosti výroby, frekvenční stability, zkratového proudu a napěťové stability. Šestá kapitola se zaměřuje na různé aspekty stability elektrizační soustavy, jako je úhlová, napěťová a frekvenční stabilita. Sedmá kapitola řeší již konkrétní problémy, jako je úbytek setrvačnosti a jalového výkonu, a navrhuje scénáře jejich řešení. Osmá kapitola představuje studii technologií, jako jsou FACTS, různé uložště energie, synchronní kompenzátory a setrvačníky, které mohou pomoci řešit problémy způsobené dekarbonizací v přenosové soustavě. V kapitole věnované návrhu řešení jsou navržena konkrétní opatření pro budoucí vývoj přenosové soustavy, včetně časových harmonogramů a jejich implementace. Závěrečná kapitola shrnuje hlavní zjištění práce, navržená řešení a jejich význam pro stabilní a bezpečnou budoucnost přenosové soustavy v České republice, a doporučení pro další výzkum.

2 BUDOUCNOST ENERGETIKY

Tato kapitola se zaměřuje na několik klíčových aspektů, které určují budoucnost energetického sektoru. Dnešní doba rychlé transformace energetického sektoru je poháněna klíčovými vývojovými trendy a inovacemi. Tyto trendy mají zásadní vliv na budoucnost energetiky a formují nový energetický paradigma. S narůstajícím důrazem na ochranu životního prostředí, snižování emisí skleníkových plynů a udržitelnost, se energetika stává jedním z klíčových hráčů v globálním úsilí o boj proti změně klimatu. [2]

2.1 Vnitrostátní plán České republiky v oblasti energetiky a klimatu

Vnitrostátní plán České republiky v oblasti energetiky a klimatu, také známý jako "Národní energetický a klimatický plán" (NEKP), je strategický dokument, který definuje cíle, opatření a strategie České republiky pro dosažení energetických a klimatických cílů. Tyto cíle jsou stanoveny na základě závazků České republiky v rámci Evropské unie a mezinárodních dohod, zejména v souvislosti s bojem proti změně klimatu a snižováním emisí skleníkových plynů. [2] [3]

Hlavní aspekty Vnitrostátního plánu České republiky v oblasti energetiky a klimatu jsou:

- **Snižování emisí skleníkových plynů:** Plán obsahuje cíle snižování emisí skleníkových plynů nařízením č. 2021/1119, kterým se stanoví rámec pro dosažení klimatické neutrality, stanoven celoevropský cíl na úrovni alespoň 55 % snížení emisí skleníkových plynů do roku 2030 v porovnání s rokem 1990 a dosažení klimatické neutrality do roku 2050. [2]
- **Podpora obnovitelných zdrojů energií:** Plán zdůrazňuje potřebu podpory a rozvoje obnovitelných zdrojů energie, jako jsou solární energie, větrná energie, biomasa a další. To zahrnuje cíle pro zvýšení podílu obnovitelných zdrojů v energetickém mixu. Pro celkový národní cíl ukazuje scénář WAM3 dosažitelnost podílu OZE na konečné spotřebě ve výši 30 % do roku 2030 jako příspěvku k celoevropskému cíli (nárůst ze 17,7 % v roce 2021). [2]
- **Energetická účinnost:** Plán obsahuje opatření pro zvýšení energetické účinnosti v průmyslu, dopravě a budovách. Cílem je snižovat energetickou náročnost a zvyšovat úspory energie. Pro Česko znamená vyčíslení celkového cíle úspor energie na konečné spotřebě její pokles z 1064 PJ (poslední údaje z roku 2021) na 846 PJ v roce 2030. Toto je cíl, který si Česko stanovuje, nicméně modelované scénáře ukazují problematičnost jeho dosažení. [2]
- **Transformace elektrizační soustavy:** Plán se zabývá transformací elektrického systému s důrazem na decentralizaci, digitalizaci a zvýšení flexibility. Toto je důležité pro integraci obnovitelných zdrojů energie a zajištění spolehlivého provozu sítě.

-
- **Závazky EU:** Plán zohledňuje závazky České republiky v rámci evropských energetických a klimatických politik, včetně "FIT for 55". [3]
 - **Finanční zdroje a investice:** Plán zahrnuje opatření k zajištění finančních zdrojů pro realizaci plánu a podporu projektů souvisejících s energetikou a klimatem.

2.2 Green Deal

V prosinci 2019 byla Evropskou Komisí představena nová klimatická politika tzv Green Deal. („Zelená dohoda“). Jedná se o opatření na ochranu klimatu a životního prostředí, které mají za cíl dosažení klimatické neutrality EU do roku 2050. Z hlediska dopadů do sektoru energetiky se navrhovaly cíle pro snižování skleníkových plynů ideálně až o 55 % do roku 2030 (oproti 40 %). Navrhovaná opatření se týkají celého evropského hospodářství napříč všemi odvětvími. Evropská rada tento 55 % redukční cíl přijala a schválila jako závazný cíl. Green Deal zařazuje mnoho iniciativ včetně legislativních balíčků Fit for 55 nebo EU Climate Law, aj. [4]

Fit for 55 je legislativní balíček Evropské unie (EU), který má za cíl zásadním způsobem snížit emise skleníkových plynů (právě o těch 55 %) a podpořit využití obnovitelných zdrojů energie. Tento balíček obsahuje několik klíčových aspektů a opatření, které mají velký dopad na energetický sektor, životní prostředí a hospodářství EU. Jeho hlavním účelem je transformovat Green Deal do zákonů. [4]

Strategickým cílem ČR je snížit podíl fosilních paliv na spotřebě primární energie na 50 % do roku 2030 a 0 % do roku 2050 a zcela utlumit využití uhlí pro výrobu elektřiny a tepla do roku 2033. [2]

2.3 Sector coupling

Sector coupling neboli propojení sektorů, je strategie, která hraje klíčovou roli v procesu transformace energetického systému, zejména ve světle snah o dekarbonizaci a zvyšování podílu obnovitelných zdrojů energie. Tato strategie zahrnuje integraci různých energetických sektorů elektrického, tepelného, plynárenského, dopravního a průmyslového s cílem zvýšit efektivitu a flexibilitu celého systému a snížit emise skleníkových plynů. Jeho hlavní prvky jsou: [5]

- **Integrace Energetických Sektorů:**

Integrace znamená, že energie vyrobená z obnovitelných zdrojů se využívá nejen pro výrobu elektrické energie, ale také pro ohřev vody, vytápění, chlazení, pohon vozidel a průmyslové procesy. Toto široké využití pomáhá snižovat závislost na fosilních palivech a zvyšuje celkovou udržitelnost. [6]

- **Využití Elektrické Energie z OZE:**

Elektrická energie z obnovitelných zdrojů, jako jsou solární panely a větrné turbíny, je využívána k pohonu elektromobilů, což je klíčový prvek pro snižování emisí v dopravním

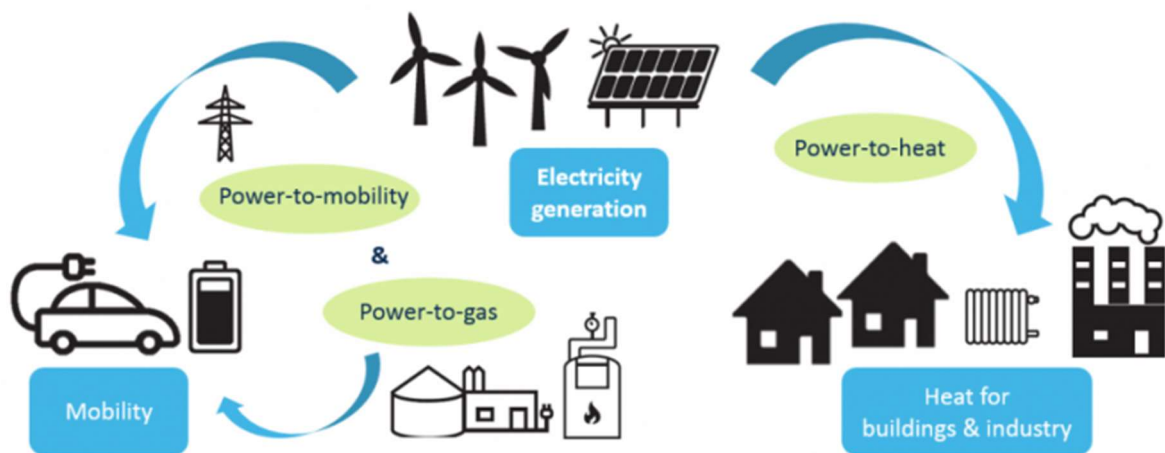
sektoru. Tento přístup nejenže snižuje emise, ale také zvyšuje poptávku po čisté elektrice a podporuje další rozvoj obnovitelných zdrojů energie. [5]

- **Inteligentní Sítě:**

Efektivní správa, přenos a distribuce energie vyžaduje pokročilé technologie a inteligentní řídicí systémy. Ty umožňují optimalizaci spotřeby energie v reálném čase, zvyšují energetickou efektivitu a minimalizují ztráty energie. Inteligentní sítě také umožňují lepší integraci různorodých zdrojů energie a zvyšují spolehlivost. [5]

- **Redukce Emisí Skleníkových Plynů:**

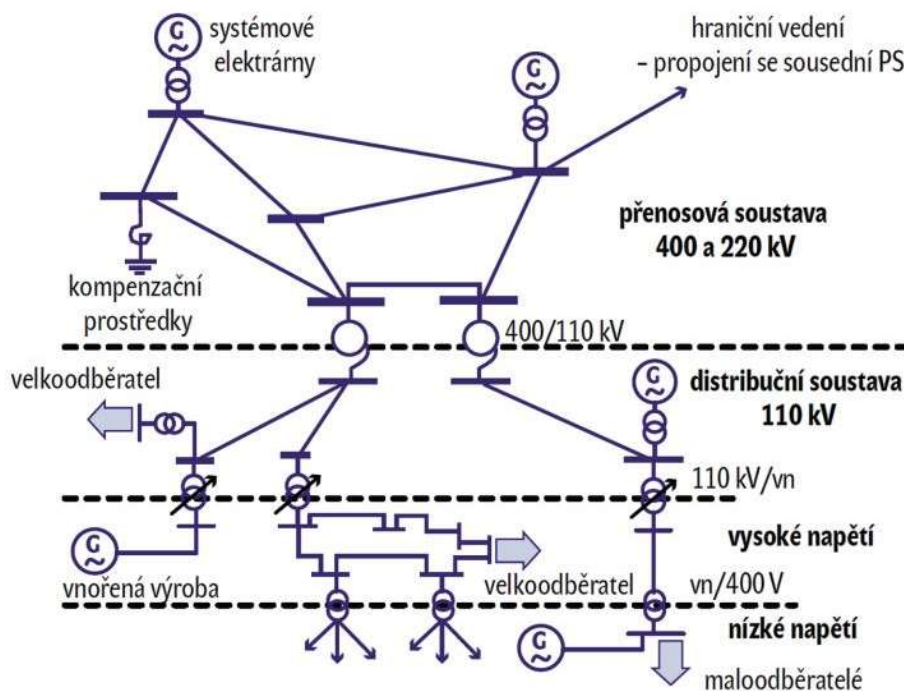
Propojení sektorů má za cíl výrazné snížení emisí skleníkových plynů prostřednictvím efektivnějšího využívání čisté energie. Přechod na obnovitelné zdroje a snížení závislosti na fosilních palivech je klíčové pro dosažení klimatických cílů stanovených v Pařížské dohodě (dohoda o udržení globálního oteplování na bezpečné úrovni). [7]



Obr. 3 Sector coupling – integrace elektrické energie z OZE [8]

3 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA

Elektrizační soustava (ES) je vzájemně propojený systém zařízení pro výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektrické energie. Včetně elektrických přípojek, vedení, měřící, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky. Představení stručného přehledu elektrizační soustavy je na Obr. 4. [9]



Obr. 4 Uspořádání elektrizační soustavy [9]

Distribuční soustava (DS) a přenosová soustava (PS) jsou dvě klíčové části elektrické infrastruktury, které společně umožňují efektivní distribuci a přenos elektřiny od výrobních zdrojů ke koncovým spotřebitelům. Každá z těchto sítí, spolu s výrobními bloky plní specifické úkoly, které jsou klíčové pro stabilní a spolehlivý provoz celé soustavy.

PS a DS jsou propojeny a na sobě vzájemně závislé. Přenosová síť přenáší elektrickou energii od velkých výrobců na velké vzdálenosti mezi různými regiony a zeměmi, zatímco distribuční síť ji distribuuje do konkrétních oblastí pro místní spotřebu odběrných míst ke koncovým odběratelům. Provozovatele těchto sítí a výrobci musí spolu spolupracovat, aby zajistily, že elektrická energie je efektivně přenesena od výroby ke konečným zákazníkům.

3.1 Výroba elektrické energie

Již víme ze zákona o zachování energie a jak již Albert Einstein řekl: „*Energii nejde vytvořit ani zničit, lze ji pouze přeměnit z jedné do druhé.*“ [10]

Výroba elektrické energie je klíčovým procesem, který zahrnuje přeměnu různých forem energie na elektrickou energii. Tento proces je základní pro moderní společnost, protože

umožňuje přenos, distribuci a využití elektrické energie pro různé účely. Elektrárny, které se podílejí na výrobě elektrické energie, lze rozdělit do dvou hlavních kategorií, ty jsou neobnovitelné a obnovitelné zdroje energie. [11]

3.1.1 Neobnovitelné zdroje

Neobnovitelné zdroje energie jsou ty, které se v přírodním měřítku neobnovují nebo se obnovují velmi pomalu, a jejich zásoby jsou omezené. Tyto zdroje se vyznačují vysokou energetickou hustotou a dlouhou životností, ale jejich využívání má značné environmentální dopady. Řadíme zde především zemní plyn, černé uhlí, hnědé uhlí a ropu. [12]

Základní typy neobnovitelných zdrojů jsou:

- **Uhlí** – je fosilní palivo, které vzniklo ze zbytků rostlin v průběhu milionů let. Spalováním uhlí (jak hnědého, tak černého) v tepelných elektrárnách se uvolňuje teplo, které se používá k výrobě páry. Pára pak pohání turbíny, které pohánějí generátory generující elektrickou energii. Uhlí je široce dostupné a levné, ale jeho spalování uvolňuje velké množství CO₂ a dalších škodlivých látek, které přispívají ke globálnímu oteplování a znečištění ovzduší.
- **Zemní plyn** – je další fosilní palivo, které se používá k výrobě elektrické energie. Spalování zemního plynu v plynových elektrárnách je efektivnější a čistší než spalování uhlí. Zemní plyn uvolňuje méně CO₂ a dalších znečišťujících látek, ale stále přispívá k emisím skleníkových plynů. Plynové elektrárny jsou flexibilní a mohou rychle reagovat na změny v poptávce po elektřině, což je výhodné pro stabilitu energetické soustavy.
- **Jaderná energie** – využívá štěpení jader těžkých prvků, jako je uran nebo plutonium, k výrobě tepla. Toto teplo se používá k výrobě páry, která pohání turbíny, které pohání generátory vyrábějící elektrickou energii. Jaderné elektrárny jsou schopny vyrábět velké množství elektrické energie po dlouhou dobu a jsou velice ekologické. Avšak produkce jaderné energie je spojena s rizikem jaderných havárií a problémem s ukládáním radioaktivního odpadu. [13]

3.1.2 Obnovitelné zdroje

Obnovitelné zdroje energie jsou ty, které se v přírodním měřítku rychle obnovují a jsou považovány za udržitelné. Tyto zdroje mají nízký environmentální dopad a jsou klíčové pro přechod k udržitelné energetice. To jsou vybrané zdroje, získané především z jaderných přeměň v nitru země, slunce, tepla zemského jádra či vzájemné působení soustavy Země-Měsíc. Lidstvo je čerpá ve formě např. slunečního záření, větru, vody, přílivu, geotermální energie, biomasy a dalších. [12]

„Definice podle zákona č. 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů: Obnovitelnými zdroji obnovitelné nefosilní zdroje energie, jimiž jsou energie větru, energie slunečního záření (termální a fotovoltaická), geotermální energie, energie okolního

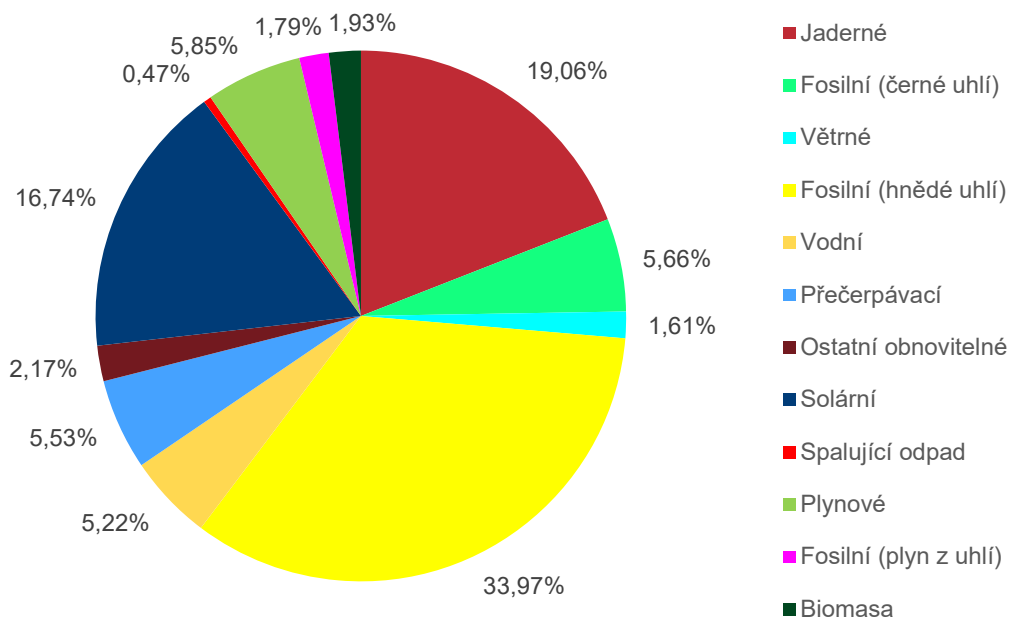
prostředí, energie z přílivu nebo vln a jiná energie z oceánů, energie vody, energie biomasy a paliv z ní vyráběných, energie skládkového plynu, energie kalového plynu z čistíren odpadních vod a energie bioplynu.“ [14]

Základní typy obnovitelných zdrojů jsou:

- **Sluneční energie** – je využívána prostřednictvím fotovoltaických panelů, které přeměňují sluneční záření na elektrickou energii. Fotovoltaické systémy mohou být instalovány na střeách budov, v solárních parcích nebo v odlehlých oblastech bez přístupu ke společné elektrické síti. Solární energie je obnovitelná a dostupná téměř všude na světě. Hlavní výzvou je však variabilita slunečního svitu, která závisí na denní době a počasí.
- **Větrná energie** – je přeměňována větrnými turbínami na elektrickou energii. Větrné elektrárny mohou být instalovány na pevnině (onshore) nebo na moři (offshore). Větrná energie je čistá a obnovitelná, ale také variabilní, protože závisí na rychlosti a směru větru. Větrné turbíny mohou mít negativní dopady na krajinu a místní ekosystémy, ale tyto dopady jsou obvykle menší než u neobnovitelných zdrojů.
- **Vodní energie** – využívá energii tekoucí nebo padající vody k výrobě elektrické energie. Vodní elektrárny mohou být malé nebo velké přehrady a přečerpávací vodní elektrárny. Vodní energie je stabilní a spolehlivá, ale vyžaduje specifické geografické podmínky, jako jsou řeky nebo přehrady. Velké vodní elektrárny mohou mít významné ekologické dopady, včetně změn ekosystémů a přesídlování obyvatel.
- **Biomasa** – zahrnuje organický materiál, jako je dřevo, odpadní produkty z lesnictví a zemědělství, který může být spálen k výrobě tepla a následně elektrické energie. Biomasa může být také přeměněna na bioplyn prostřednictvím anaerobní digesce. [15]
- **Geotermální energie** – využívá teplo z nitra Země k výrobě elektrické energie. Geotermální elektrárny mohou poskytovat konstantní dodávku elektřiny a jsou velmi účinné. Tento zdroj energie je však omezen na oblasti s vhodnými geologickými podmínkami.

3.1.3 Podíl elektráren na výrobě v ČR

V České republice pořád převládají elektrárny spalující fosilní paliva, tyto typy elektráren, se ale budou brzy odstavovat z mnoha důvodů (viz kapitola 2) a bude potřeba jejich nahrazení. Celkový aktuální instalovaný výkon energetického mixu v ČR je na Obr. 5.



Obr. 5 Podíl instalovaného výkonu elektráren v ČR, rok 2024 [16]

Pokud se bavíme o obnovitelných zdrojích elektrické energie, kterých podíl bude naopak s největší pravděpodobností stoupat, tak většinou na našem území mluvíme o FVE, jasně totiž převládají oproti ostatním typům OZE. Instalovaný výkon je v současné době u FVE 3 548 MW jak taky můžeme vidět v Tab. 1. Oproti třeba větrným elektrárnám, v jejichž případě v současné chvíli máme na území ČR nainstalováno pouhých 342 MW.

Tab. 1 Instalovaný výkon různých typů elektráren v ČR, rok 2024 [16]

typ elektrárny	výkon (MW)
Jaderné	4 040
Fosilní (černé uhlí)	1 200
Větrné	342
Fosilní (hnědé uhlí)	7 200
Vodní	1 106
Přečerpávací	1 172
Ostatní obnovitelné	460
Solární	3 548
Spalující odpad	100
Plynové	1 240
Fosilní (plyn z uhlí)	380
Biomasa	410

3.1.4 Denní diagram zatížení soustavy

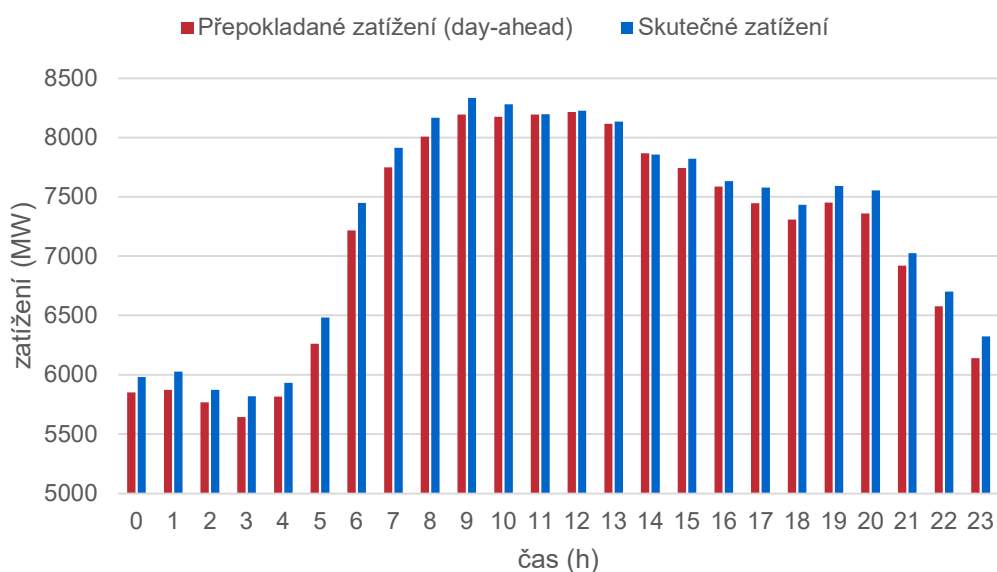
Denní diagram zatížení je klíčovým nástrojem v energetice. Je základním nástrojem pro analýzu a plánování, graficky znázorňuje závislost odebíraného výkonu v čase. Tento diagram je nezbytný pro optimalizaci provozu, a rozhodování o nasazení výrobních zdrojů. Jeho tvar se mění jak v závislosti na dnech (víkendy, svátky, pracovní dny) tak i v závislosti na roční

obdobích, kdy například v zimních měsících může být vyšší kvůli větší potřebě vytápění a většímu využití osvětlení. Obecně ale můžeme diagram rozdělit na tři typické oblasti: [17]

- Základní zatížení (se v průběhu uvažovaného období prakticky nemění)
- Pološpičkové zatížení (je třeba zvýšit výrobu aktuálně pracujících elektráren do sítě)
- Špičkové zatížení (je pokryt maximální odběr v kritické hodiny dne, to znamená připojení nových elektráren, většinou vodních či plynových)

Na Obr. 6 můžeme vidět příklad denního digramu zatížení z 4.4.2024. Červenou je označeno předpokládané zatížení, které bylo odhadováno den předem a modrou skutečná spotřeba ČR, jedná se o spotřebu po odečtení vlastní spotřeby elektráren a bez započítání spotřeby (čerpání) přečerpávacích elektráren.

Význam denního diagramu zatížení je důležitý, protože provozovatelé elektráren plánují svou výrobu tak, aby odpovídala očekávanému zatížení. Diagram zatížení umožňuje předvídat očekávané špičkové hodiny a optimalizovat nasazení různých typů zdrojů. Informace z diagramu zatížení pomáhají rozhodovat o nejefektivnějším a ekonomicky nejvýhodnějším nasazení výrobních zdrojů.



Obr. 6 Denní diagram zatížení ČR 4.4.2024 [16]

3.2 Přenosová soustava

Přenosová soustava zaujímá klíčovou pozici v rámci širší elektrizační soustavy, přičemž její význam nespočívá pouze ve vzájemném propojení s distribuční soustavou, ale také v integraci velkých zdrojů elektrického výkonu, známých jako systémové elektrárny. Tato infrastruktura tvoří robustní spojení mezi zdroji elektrického výkonu a distribuční soustavou, což ji činí nesporným páteřním prvkem celé elektrizační sítě.

Přenosová soustava ČR je typická svou centrální polohou a mezinárodním propojením s pěti partnerskými zahraničními PS. Díky tomuto propojení je PS namáhána tranzitními toky

způsobenými jak obchodními výměnami elektrické energie daným trhem s elektrickou energií, tak polohou zdrojů a míst spotřeby v propojené soustavě. Tyto toky jsou velmi proměnlivé co do směru i velikosti přenášeného výkonu.

V České republice využívá pro přenos elektrické energie nejvyšší přenosová napětí, a to 400 kV, pokrývající délku vedení 4035 km. Dále zahrnuje i síť s napětíovou hladinou 220 kV, na níž se nachází vedení o délce 1832 km. Součástí této rozsáhlé sítě jsou také linky napětíové úrovně 110 kV s celkovou délkou 84 km. K efektivnímu řízení a manipulaci v této komplexní struktuře se využívá 45 elektrických stanic, které jsou plně integrovány do dálkového ovládání dispečinku PPS. [18]

3.3 Distribuční soustava

Tato soustava je souborem propojených vedení a transformátorů, které přenášejí elektrickou energii na nižší napětíové úrovně (110 kV, 35 kV, 22 kV, 400 V apod.), přizpůsobené pro bezpečnou spotřebu v domácnostech, podnicích a průmyslových zařízeních. Distribuční sítě zajišťují připojení k celkové síti prakticky všem spotřebitelům.

Distribuční sítě můžeme dále dělit na regionální a lokální. Rozdíl mezi nimi je takový, že lokální poskytovatelé nejsou přímo připojeni k přenosové soustavě, ale regionální jsou. Regionální provozovatelé distribučních soustav v ČR jsou: [19]

- **ČEZ Distribuce, a.s.** – Severní Morava a Čechy a západní část
- **EG.D, a.s.** – Jižní Morava a Čechy
- **PREdistribuce, a.s.** – oblast hl. m. Prahy
- **UCED Chomutov, s.r.o.** – okolí Chomutova

 ENERGETICKÝ
REGULAČNÍ
ÚŘAD



Obr. 7 Působení distributorů na území ČR [73]

4 ŘÍZENÍ PŘENOSOVÉ SOUSTAVY

Řízení přenosové soustavy je klíčové pro zajištění spolehlivé a bezpečné dodávky elektrické energie. Tato kapitola se zaměřuje na hlavní aspekty řízení přenosové soustavy, včetně podpůrných služeb, systémových služeb, dispečerského řízení, specifického postavení společnosti ČEPS, Operátora trhu s elektřinou (OTE) a v neposlední řadě Energetického regulačního úřadu (ERÚ) v české přenosové soustavě.

4.1 ČEPS a jeho význam v řízení přenosové soustavy

ČEPS, a.s. je provozovatelem přenosové soustavy (PPS) v České republice, plně vlastněným Ministerstvem průmyslu a obchodu České republiky. V souladu s Energetickým zákonem dispečersky řídí provoz zařízení přenosové soustavy a systémových zdrojů na území České republiky nepřetržitě 24 hodin denně, 7 dní v týdnu, včetně svátků. ČEPS také zajišťuje mezinárodní propojení prostřednictvím přeshraničních vedení s elektrizačními soustavami sousedních zemí a provádí údržbu, plánování a realizaci investic do infrastruktury. [18]

ČEPS je dále zodpovědný za zahraniční spolupráci, přenosové služby, systémové služby a podpůrné služby, které jsou nezbytné pro zajištění systémových služeb. Vzhledem k tomu, že na provozování přenosové soustavy je v České republice vydána jediná licence pro celé území státu, je přenosová soustava právním a tzv. přirozeným monopolem, který podléhá regulaci Energetického regulačního úřadu a přísným pravidlům soutěžního práva. [20]

Zásady své působnosti jako provozovatele přenosové soustavy zakotvila ČEPS, v souladu s platnou právní úpravou, v dokumentu „*Pravidla provozování přenosové soustavy*“, známějšího spíše pod názvem Kodex PS (*dále jen Kodex*). Kodex obsahuje detailní pravidla a pokyny pro provozování přenosové soustavy, včetně technických a provozních standardů, které musí být dodržovány, aby byla zajištěna bezpečnost, spolehlivost a efektivita přenosu elektrické energie. Má několik částí a je pravidelně aktualizován ČEPS a poté schvalován Energetickým regulačním úřadem. [21]

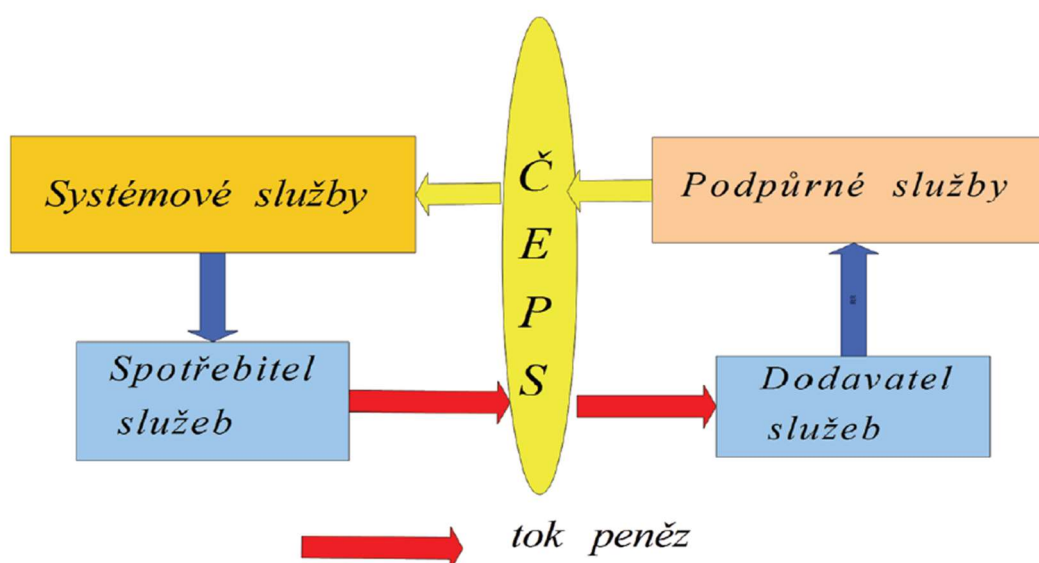
4.2 Systémové služby

Systémové služby (SyS) jsou zajišťovány společností ČEPS, která zajišťuje jejich plnění nákupem podpůrných služeb, které slouží k jejich udržení. Tedy např. v případě poklesu frekvence v síti, zdroje zareagují pomocí placené SVR FCR (viz kapitola 4.3.1), která dodá potřebný výkon k udržení frekvence.

Za systémové služby platí všichni spotřebitelé jako součást ceny za elektrickou energii. Na Obr. 8 můžeme vidět graficky znázorněný vztah mezi všemi účastníky, kteří se podílejí na systémových službách. SyS je souhrnný název pro: [22] [23]

- Udržování výkonové rovnováhy v reálném čase
- Udržování kvality elektřiny

- Obnovení provozu
- Dispečerské řízení



Obr. 8 Vazby mezi systémovými službami, podpůrnými službami a ČEPS [22]

4.2.1 Udržování výkonové rovnováhy v reálném čase

V každém okamžiku musí být v elektrizační soustavě vyvážená spotřeba a výroba elektrické energie. Na základě poptávky po elektrické energii jsou uzavírány smlouvy o dodávce elektrické energie v MWh. Nicméně, v důsledku neočekávaných událostí, jako je třeba nadvýroba z obnovitelných zdrojů energie (OZE), výpadek bloku, nebo nečekaně vysoká či nízká spotřeba, mohou nastat odchylky, které je nutné vyrovnat. [23]

Tuto úlohu zajišťuje provozovatel přenosové soustavy pomocí regulátoru v řídicím systému, vyhodnocuje odchylky frekvence a regulační odchylky oblasti (Area Control Error = ACE). Výkonová nerovnováha se projevuje změnou frekvence – při přebytku výroby nad spotřebou dochází ke zvýšení frekvence, zatímco při přebytku zátěže nad výrobou dochází ke snížení frekvence. Oba stavy jsou nepřijatelné a je nutné je regulovat.

Regulátor v řídicím systému také analyzuje součet činných výkonů dodávaných regulátory, odečítá od nich vlastní spotřebu elektráren, ztráty v síti a aktuální zatížení. V případě, že nastane odchylka, ať už kladná nebo záporná, regulátor v řídicím systému dává pokyn k aktivaci služeb výkonové rovnováhy v opačném směru oproti odchylce, aby ji vyrovnal. Tímto způsobem je zajištěna stabilní a spolehlivá dodávka elektrické energie v reálném čase. [23]

4.2.2 Udržování kvality elektřiny

Kvalitu elektrické energie definuje *Kodex PPS část V* [24]. Je nutné dodržovat několik technických parametrů, Kodex je popisuje dopodrobna všechny, z nichž některé jsou zmíněny dále:

- Kmitočet sítě – jmenovitý kmitočet je 50 Hz, ohledně tolerancí Kodex říká: „Za normálního provozního stavu a při synchronním provozu se synchronní zónou Kontinentální Evropa musí být střední hodnota kmitočtu základní harmonické měřena v intervalu 10 s v mezích 50 Hz \pm 1 % (tj. 49,5 – 50,5 Hz) během 99,5 % roku a v mezích 50 Hz +4 % / -6 % (tj. 47–52 Hz) během 100 % času.“ [24]
- Velikost a odchylky napájecího napětí – v síti spravované PPS, jsou tři napěťové hladiny, za normálního stavu je nutné 99 % času dodržet, vyhodnocovaný v desetiminutových intervalech. Hodnoty napětí jsou v efektivních hodnotách napětí – viz Obr. 9, včetně jejich možných odchylek. Zároveň je nutné omezit taky rychlé změny tohoto napětí. Všechny transformátory jsou vybaveny přepínači odboček, a kompenzačními tlumivka v terciérech transformátorů. K řízení napětí dochází v pilotních uzlech přenosové soustavy, tedy místech, kde se nachází prvek schopný výrazně ovlivnit jalový výkon, tedy napětí. Tyto pilotní uzly jsou dále vybaveny automatickou sekundární regulací napětí, která dokáže ovládat buzení příslušných

110 kV	110 kV +11,8/-10 %
220 kV	220 kV +11,8/-10 %
400 kV	400 kV +5/-10 %

Obr. 9 Povoleno rozsah napětí pro jednotlivé napěťové hladiny [24]

generátorů a tím udržovat napětí v předepsaných mezích. [17]

- Minimální zkratový výkon – kvůli bezpečnosti a nastavení ochran je nutné udržovat minimální zkratový výkon.
- Harmonické zkreslení a fázový posun – je nutné udržovat sinusové harmonické napětí a symetrickou trojfázovou síť, bez přebytečných přetoků jalového výkonu.

Udržování kvality elektrické energie v rámci řízení přenosové soustavy vyžaduje neustálé monitorování a rychlé reakce na změny v síti. Při nedodržení kvalitní dodávky se zvyšují ztráty a neefektivnost systému případně nefungují správně některá zařízení aj.

4.2.3 Obnovení provozu

Obnovení provozu po výpadku v přenosové soustavě je další činností v rámci řízení elektrické sítě a systémových služeb. Tento proces zahrnuje koordinaci a provádění kroků nezbytných k obnovení dodávky elektrické energie po rozsáhlém výpadku nebo poruše. Obnovení provozu zahrnuje technické postupy (provozní instrukce a plány), které jsou nastaveny a testovány tak aby byly provedeny v případě nutnosti rychle a efektivně, a aby se minimalizovaly dopady na spotřebitele a zajistil se normální provozní stav.

Dispečerů musí vyhodnotit, které části sítě jsou schopny bezpečného obnovení provozu. Zatížení musí být obnovováno postupně, aby nedošlo k přetížení sítě a následným výpadkům.

Musí pečlivě sledovat parametry sítě na zvyšující se zatížení a podle potřeby upravovat svá rozhodnutí. Obnovení provozu vyžaduje úzkou koordinaci s provozovateli zdrojů. PPS musí mít zajištěné potřebné výrobní zdroje (tzv. black-startové elektrárny), které jsou schopny po přivedení napětí, například z vodních elektráren, případně i samy schopny dodávat potřebný výkon, a pomáhat k obnově soustavy (viz kapitola 4.3.3). [23]

4.2.4 Dispečerské řízení

Dispečerské řízení je poslední klíčovou složkou provozu přenosové soustavy, která zajišťuje bezpečný, spolehlivý a efektivní provoz elektrizační soustavy. Dispečeré hrají zásadní roli při monitorování a řízení výroby a spotřeby elektrické energie v reálném čase, čímž zajišťují stabilitu soustavy. Dispečerské řízení můžeme rozdělit do tří oblastí blíže popsanych níže. [20]

4.2.5 Operativní řízení

Dispečeré neustále sledují stav přenosové soustavy pomocí řídicích a monitorovacích systémů SCADA. Tyto systémy poskytují aktuální data o výrobě, spotřebě, frekvenci, napětí a dalších klíčových parametrech sítě. V případě detekce odchylek od plánovaných hodnot nebo neočekávaných událostí dispečeré mohou rychle zasáhnout a přijmout opatření k obnově rovnováhy.

Dispečeré také zajišťují, aby napětí v přenosové soustavě zůstalo v předepsaných mezích. To zahrnuje řízení transformátorů, kompenzačních zařízení a dalších prvků sítě. Správná regulace napětí je klíčová pro minimalizaci ztrát a zajištění spolehlivého provozu spotřebičů.

V případě vážných poruch nebo havárií je dispečerské řízení zodpovědné za koordinaci obnovy provozu ES ČR. To zahrnuje identifikaci postižených oblastí, spolupráci s provozovateli výrobních zdrojů a distribučních soustav, a postupné obnovení dodávky elektřiny tak, aby nedošlo k přetížení sítě.

4.2.6 Příprava provozu

Příprava provozu zahrnuje plánování a přípravu činností potřebných pro zajištění spolehlivého a efektivního provozu přenosové soustavy. Tento proces zahrnuje: [23]

- Zabezpečení provozu – Analýza historických dat a používání sofistikovaných predikčních modelů pro předpověď budoucí toků, které by mohly způsobit přetížení či neplnění N-1 kritéria. N-1 kritérium, je podmínka, která musí být splněna v každém čase a znamená, že při výpadku jakéhokoliv jednoho zařízení v PS nesmí dojít k přetížení žádného dalšího. Zohlednění faktorů, které ovlivňují poptávku, jako jsou počasí, ekonomické podmínky, změny v průmyslové výrobě a chování spotřebitelů.
- Příprava provozu sítí – Harmonogram pravidelné údržby a oprav zařízení v přenosové soustavě, koordinace vypínání zařízení, aby se minimalizovaly dopady na provoz a zajistila se spolehlivost sítě. Tvorba harmonogramu údržby, komunikace s partnery.

-
- Příprava provozu podpůrných služeb: Koordinace s poskytovateli PpS pro zajištění dostatečných kapacit, které budou odpovídat předpokládané poptávce.

Příprava provozu přenosové soustavy je komplexní a mnohostranný proces, který zahrnuje prognózování poptávky, plánování údržby, koordinaci kapacit, analýzu provozních podmínek a efektivní komunikaci. Důkladná příprava a plánování jsou nezbytné pro zajištění spolehlivého a ekonomického provozu přenosové soustavy, což je klíčové pro stabilní dodávky elektrické energie a bezpečnost celé energetické infrastruktury.

4.2.7 Hodnocení provozu

Hodnocení provozu zahrnuje sledování a analýzu celkového dispečerského řízení jako takového s cílem identifikovat slabá místa a navrhnout opatření k jejich nápravě.

Zprávy a zpětná vazba jsou nezbytnou součástí procesu hodnocení provozu. Vytváření pravidelných zpráv o provozu přenosové soustavy poskytuje důležité informace pro zlepšení plánování a řízení. Tyto zprávy obsahují podrobné analýzy výkonu jednotlivých prvků sítě, identifikované odchylky a přijatá opatření. Zpětná vazba na základě těchto zpráv je klíčová pro kontinuální zlepšování provozu přenosové soustavy a umožňuje provozovatelům optimalizovat své strategie a postupy.

Identifikace a analýza incidentů tvoří další důležitý prvek hodnocení provozu. Tento proces zahrnuje záznam a podrobnou analýzu všech významných incidentů, jako jsou výpadky, poruchy nebo jiné mimořádné události. Cílem je zjistit příčiny těchto incidentů a vypracovat doporučení pro prevenci budoucích problémů. Analýza incidentů umožňuje provozovatelům přijmout opatření ke zlepšení dispečerského řízení jako takového.

4.3 Podpůrné služby

Podpůrné služby zajišťované společností ČEPS představují nezbytný prvek pro zajištění systémových služeb. Tyto služby umožňují ČEPS efektivně reagovat na dynamické změny v bilanci výroby a spotřeby elektrické energie, a tím udržovat frekvenci a napětí v rámci předepsaných limitů. Kodex přenosové soustavy – Část II podrobně specifikuje pravidla pro provozování podpůrných služeb (PpS), jejich obstarávání, poskytování a vypořádání. [25]

Kodex, (viz kapitola 4) tak také detailně popisuje procesy pro zavedení nových poskytovatelů podpůrných služeb, včetně přípravy a schválení studií, certifikace a zkoušek nezbytných pro ověření schopnosti poskytování služeb. Dále specifikuje pravidla pro vytvoření a provoz agregačních bloků, které umožňují efektivnější koordinaci a řízení skupin energetických zařízení jako jednoho celku pro poskytování podpůrných služeb. [26]

Agregační bloky umožňují poskytovatelům podpůrných služeb sdružovat různá energetická zařízení do jednotných skupin, což usnadňuje jejich řízení a zvyšuje efektivitu poskytování služeb. Kodex stanovuje pravidla pro vytvoření, změnu a provoz těchto bloků, včetně procesů certifikace a zkoušek potřebných pro ověření jejich schopnosti poskytovat specifikované

služby. Změny ve složení agregačních bloků, jako je přidání nebo odstranění zařízení, musí být schváleny ČEPS a zaznamenány v registru energetických zařízení. [25]

Podpůrné služby se dělí na služby výkonové rovnováhy (SVR) a ostatní podpůrné služby. Každá služba musí splňovat specifické obecné požadavky, jako jsou měřitelnost, garantovaná dostupnost, verifikovatelnost a možnost průběžné kontroly poskytování PpS. Základními předpoklady pro poskytování těchto služeb jsou především jasně stanovené kvantitativní parametry, periodické testy a inspekce zajišťující kontinuální schopnost dodávky služeb. [25]

Poskytovatelé podpůrných služeb mohou být různí účastníci trhu s elektřinou, kteří disponují energetickými zařízeními splňujícími podmínky pro danou službu. Pro zahájení poskytování služeb musí subjekty splnit několik klíčových kroků, včetně získání platného certifikátu, uzavření dohody o poskytování služeb a zajištění přístupu do elektronického systému pro komunikaci s dispečinkem ČEPS. [25]

Obecně můžeme říct, že všechny podpůrné služby musí splňovat tyto tři obecné požadavky:

- říditelnost
- měřitelnost v reálném čase
- garantovaná dostupnost

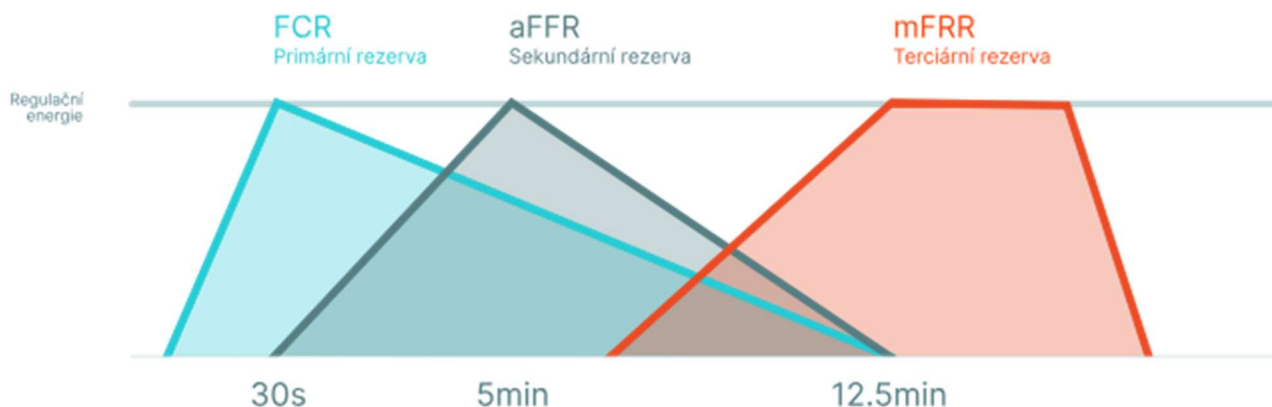
Podpůrné služby jsou zúčtovány a finančně vypořádány na základě platných smluv, uzavřené mezi provozovatelem přenosové soustavy a poskytovateli přenosových služeb. Tyto kontrakty mohou být jak dlouhodobého charakteru (v rámci roku) tak taky kratšího (v rámci hodin průběhu dne). Taky mohou být kontrakty mezinárodní, poskytovatelé těchto služeb nemusí být nutně v České republice, což podporuje konkurenci větší rozmanitost a nižší ceny těchto služeb.

4.3.1 Služby výkonové rovnováhy

Služby výkonové rovnováhy zahrnují několik služeb. Tyto služby jsou nezbytné pro zajištění výkonové rovnováhy v reálném čase a pro reakci na odchylky od plánované bilance výroby a spotřeby nebo přeshraniční bilance (salda). Představují tedy klíčový nástroj pro zajištění stabilního a bezpečného provozu elektrizační soustavy, který umožňuje operátorovi přenosové soustavy reagovat na náhlé změny v bilanci výroby a spotřeby elektrické energie. SVR zahrnují několik typů služeb, které se liší podle doby aktivace a specifických charakteristik, dobu plně aktive SVR můžeme vidět na Obr. 10, kde taky vidíme, jak se služby navzájem prolínají.

SVR využívají dvou základních principů, a to solidarity a neintervence. Princip solidarity vyjadřuje vzájemnou podporu mezi provozovateli přenosových soustav při zajištění bezpečnosti. V praxi to znamená, že v případě významného výpadku dodávek energie v jedné oblasti se všechny bloky, nacházející se v synchronní zóně poskytnou potřebnou regulační energii (FCR). Toto zastaví klesání frekvence, kterou je ale pak potřeba zpátky dostat na jmenovitou hodnotu. V tento moment nastupuje princip neintervence, který říká, že každá regulační oblast si musí svou odchylku poté vyrovnat sama pomocí svých možností (aFFR, mFFR či RR).

V rámci poskytování systémových služeb hraje kritickou roli správné rampování, které zahrnuje kontrolu nad rychlostí, s jakou energetické zdroje zvyšují nebo snižují svůj výkon. Proces rampování typicky sleduje lineární trajektorii a je předmětem striktních pravidel, jeho nesplnění může vést k neuznání dané služby jako poskytnuté, což má za následek nezaplacení případnou pokutu poskytovateli těchto služeb. Dodržování těchto rampovacích křivek je nezbytné nejen pro udržení stability sítě, ale také pro prevenci potenciálních technických problémů spojených s přetížením nebo nedodržení dalších systémových parametrů. [25]



Obr. 10 Doba plné aktivace různých SVR [69]

Základní rozdělení služeb výkonové rovnováhy:

- **Zálohy pro automatickou regulaci frekvence (FCR)**

(Frequency Containment Reserve): Zálohy pro automatickou regulaci frekvence, v minulosti taky nazývané primární regulace, jsou určeny k okamžité reakci na změny frekvence v systému, typicky vyvolané výpadky velkých výrobních jednotek. Tyto zálohy jsou aktivovány automaticky a bez zásahu dispečera (poskytovatelé si hlídají sami frekvenci sítě a při vybočení automaticky regulují), aby byla frekvence udržena v předepsaných mezích. Tato záloha funguje na tzv principu solidarity. Poskytovatel musí reagovat na změnu frekvence do 2 vteřin, minimální vykupované množství je 1 MW a maximální 25 MW. [25]

- **Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s automatickou aktivací (aFRR)**

(automatic Frequency Restoration Reserve): Zálohy pro automatickou obnovu frekvence jsou určeny k návratu frekvence na nominální hodnotu po jejím vybočení, povolená mez je maximálně ± 200 mHz. Tyto služby jsou aktivovány automaticky na základě pokynů řídicího systému a slouží k nahrazení FCR v delším časovém horizontu. Doba do plné aktivace může být až 7,5 minut a doba deaktivace taky 7,5 min, z toho plyne že doba aktivace aFRR může být maximálně 15 minut. Minimální vykupované množství je 1 MW. [25]

- **Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací (mFRR)**

(manual Frequency Restoration Reserve): Zálohy pro manuální obnovu frekvence jsou aktivovány dispečerem v případě, že automatické systémy nejsou schopné plně obnovit rovnováhu v systému. Tato služba poskytuje další flexibilitu pro zvládnání nerovnováhy v systému. Doba do plné aktivace je 12,5 minut a doba deaktivace taky 12,5 minut. Maximální doba trvání může být 4 h. Minimální množství je taky 1 MW. [25]

- **Zálohy pro náhradu (RR)**

(Replacement Reserve): Zálohy pro náhradu jsou určeny k zajištění dodatečné kapacity pro obnovu frekvence a výkonové rovnováhy v delším časovém horizontu, typicky v řádu hodin. Využívají se jako rezerva pro nahrazení „krátkodobých“ záloh aFRR a mFRR. Doba do její plné aktivace je až 30 min a doba deaktivace taky tak. Minimální množství je opět 1 MW a maximální 99 MW. Doba platnosti je 1 hodina. Minimální doba dodávky je 15 minut a maximální 60 minut. [25]

4.3.2 Platformy a nákup SVR

Nákup těchto služeb probíhá buď dlouhodobě nebo krátkodobě na denním trhu. V rámci efektivního fungování a obchodování podpůrných služeb, které jsou zásadní pro stabilitu a bezpečnost energetického systému, společnost ČEPS využívá řadu mezinárodních platformy, které umožňují větší konkurenci a taky nabídku těchto služeb napříč různými provozovateli a trhy.

- **Imbalance Netting (IN)**

Platforma Imbalance Netting je využívána pro operativní řízení nerovnováh v síti, což zahrnuje vzájemné vyrovnávání deficitů a přebytků energie mezi jednotlivými PPS. Tato platforma přináší výhody v podobě snížení potřeby aktivace národních rezerv, což vede k efektivnějšímu využívání zdrojů a nižším nákladům pro systém. [27]

- **PICASSO, MARI a TERRE**

PICASSO a MARI jsou platformy speciálně určené pro řízení automatických a manuálních záloh pro regulaci výkonové rovnováhy (aFRR a mFRR). Tyto platformy zajišťují, že je k dispozici dostatek regulační energie pro udržení frekvence v síti v případě náhlých změn v zátěži nebo výpadku výroby. Platforma TERRE je zaměřena na obchodování se zálohami pro náhradu (RR), což je důležité v případě velkých výpadků, aby mohly být obnoveny zálohy, které již byly spuštěny předtím. [27]

Integrace do mezinárodních obchodních mechanismů navíc přináší výhody v podobě lepšího přístupu k technologiím a lepším konkurenčním cenám, které pomáhají udržovat stabilitu a bezpečnost celého energetického systému. Toto je zásadní nejen pro Českou republiku, ale i pro propojenost a spolehlivost evropské energetické sítě.

4.3.3 Ostatní podpůrné služby

Ostatní podpůrné služby nebo někdy taky nazývané nefrekvenčními službami, řeší se totiž jiné systémové veličiny, které přímo nesouvisí s frekvencí. Dělí se na následující tři:

- **Sekundární regulace U/Q (SRUQ)**

Sekundární regulace U/Q je automatická funkce, která využívá celý certifikovaný regulační rozsah jalového výkonu jednotky pro udržení zadané velikosti napětí v pilotních uzlech a současně rozděluje vyráběný jalový výkon mezi jednotlivé stroje. Tento regulační proces by měl být aperiodický nebo maximálně s jedním překmitem a ukončený do dvou minut. Sekundární regulace musí být schopna spolupracovat s prostředky terciární regulace napětí a jalových výkonů. Do systému ASRU (automatická sekundární regulace U/Q) jsou zařazeny výrobní moduly a nevýrobní kompenzační zařízení v pilotních uzlech přenosové soustavy. [25]

- **Schopnost ostrovního provozu (OP)**

Je schopnost určitého bloku elektrárny udržet stabilní a samostatný provoz v případě, že dojde k odpojení od synchronní soustavy. Tato schopnost je klíčová pro zajištění bezpečnosti a spolehlivosti dodávek elektrické energie v mimořádných situacích, jako jsou rozsáhlé poruchy nebo blackout. Ostrovní provoz vyžaduje specifické nastavení a odolnost zdroje a další technické vybavení či kontrolní systémy schopné udržet frekvenci a napětí v přijatelných mezích bez podpory z vnější sítě. [25]

- **Schopnost startu ze tmy (BS)**

Start ze tmy (Black Start) je schopnost elektrárny nebo souboru zařízení spustit svůj provoz bez potřeby externího zdroje elektrické energie, což je zásadní pro obnovu systému po rozsáhlém výpadku, blackout. Tato schopnost je klíčová pro rychlou a efektivní obnovu elektrizační soustavy, neboť umožňuje postupné opětovné spuštění ostatních částí systému a zajišťuje dodávku elektrické energie do kritické infrastruktury. Zařízení schopná startu ze tmy jsou obvykle vybavena vlastními generátory, které jsou schopny zajistit napájení vlastní spotřeby (tedy umožňují jejich spuštění a následné připojení k soustavě). [25]

4.4 Operátor trhu

Operátor trhu hraje klíčovou roli v zajištění spravedlivého, transparentního a efektivního fungování trhu s elektrickou energií. V České republice tuto roli plní Operátor trhu s elektřinou (OTE). OTE je zodpovědný za organizaci a koordinaci trhu s elektřinou, což zahrnuje obchodování s elektřinou, vyrovnávací trh a správu podpůrných služeb. Níže jsou popsány hlavní funkce a odpovědnosti operátora trhu s elektřinou. [28]

- OTE zajišťuje organizaci trhu s elektřinou, což zahrnuje denní a vnitrodenní obchodování. Denní trh umožňuje účastníkům trhu plánovat a obchodovat s elektřinou na den dopředu, zatímco vnitrodenní trh poskytuje flexibilitu pro úpravy plánů

v reálném čase. Tímto způsobem OTE zajišťuje, že nabídka a poptávka po elektřině jsou vyrovnány a trh funguje efektivně. [28]

- Vyrovnávací trh je nezbytný pro udržení rovnováhy mezi výrobou a spotřebou elektřiny v reálném čase. OTE koordinuje vyrovnávací trh, aby zde byl balanc mezi nabídkou a poptávkou. Včetně pravidelného vyhodnocování odchylek. [28]
- OTE taky spravuje systémy certifikátů původu zelené elektřiny, které jsou důležité pro podporu obnovitelných zdrojů energie. Kromě toho OTE zajišťuje zúčtování a finanční vyrovnání mezi účastníky trhu, což zahrnuje fakturaci a platby za obchodované množství elektřiny. [28]
- Operátor trhu poskytuje účastníkům trhu a široké veřejnosti informace o aktuálních podmínkách na trhu s elektřinou, cenách, objemech obchodů a dalších relevantních údajích. Transparentnost trhu je klíčová pro zajištění důvěry účastníků trhu a pro podporu efektivního rozhodování. [28]

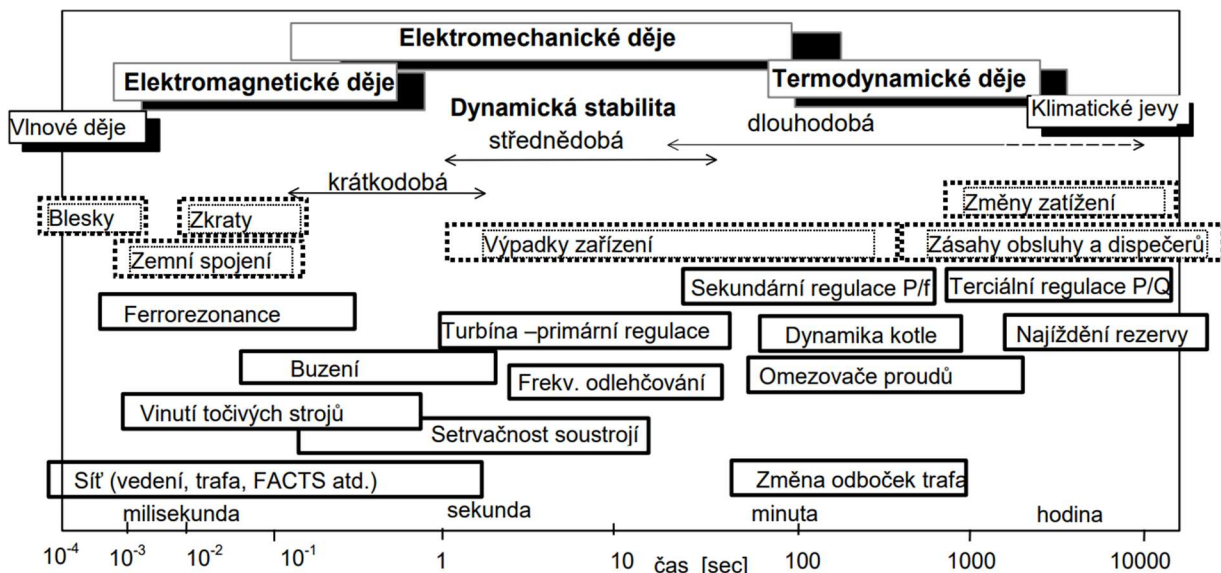
4.5 Energetický regulační úřad

Regulátor je nezávislý orgán, který dohlíží na provoz a fungování přenosové soustavy. V České republice tuto roli plní Energetický regulační úřad (ERÚ). Hlavní úkoly regulátora zahrnují:

- Regulace cen s elektřinou a plynem – ERÚ stanovuje pravidla a podmínky pro provoz a obchodování na trzích s elektřinou a plynem. To zahrnuje regulaci cen za přenos, distribuci a dodávku energií, stejně jako stanovení tarifů a poplatků. ERÚ také monitoruje dodržování těchto pravidel a podmínek všemi účastníky trhu. [29]
- Ochrana spotřebitelů – jednou z klíčových funkcí ERÚ je ochrana práv spotřebitelů energií. ERÚ poskytuje informace a poradenství spotřebitelům, řeší stížnosti a spory mezi spotřebiteli a dodavateli energií a zajišťuje, aby spotřebitelé měli přístup k spravedlivým a transparentním podmínkám na energetických trzích. [29]
- Podpora konkurence a licencování – ERÚ podporuje rozvoj konkurence na trzích s elektřinou a plynem. To zahrnuje zajištění nediskriminačního přístupu ke kapacitám přenosových a distribučních soustav, podporu vstupu nových účastníků na trh a monitorování tržních podmínek, aby byla zajištěna spravedlivá soutěž. Taky licencuje výrobce energií, obchodníky a další účastníky trhu. [29]

5 STABILITA ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY

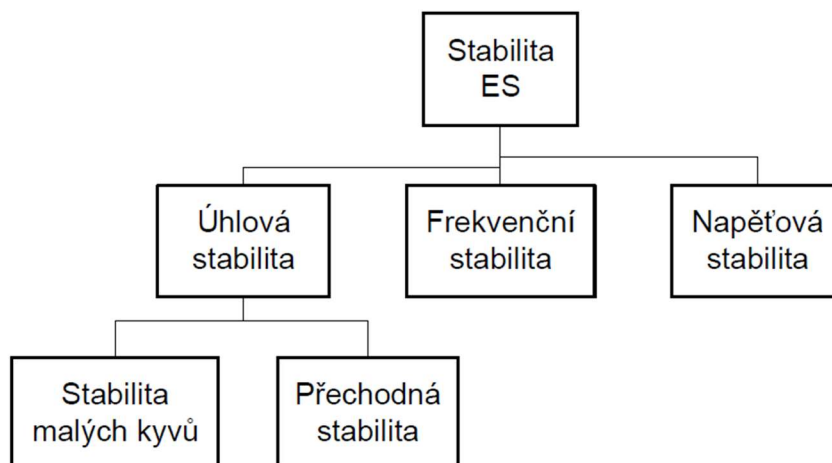
Stabilita elektrizační soustavy je klíčovým faktorem pro zajištění jejího bezpečného a spolehlivého provozu. Elektrizační soustavu lze z hlediska stability hodnotit podle její schopnosti udržet rovnováhu a stabilní provoz i při výskytu poruch nebo náhlých změn v zatížení či výrobě. Stabilita je zásadní nejen pro předcházení výpadkům a zajištění kontinuity dodávek elektrické energie.



Obr. 11 Časový rozsah přechodných dějů v ES [30]

Přechodné děje, jejichž časový rámec je popsán na obrázku výše, mají přímou souvislost se stabilitou. Tyto děje zahrnují rychlé změny v elektrické síti, které mohou být způsobeny náhlým výpadkem výrobního zdroje nebo náhlou změnou zatížení. Z toho plyne, že největším rizikem pro stabilitu ES jsou nahodilé a časté změny, např. při velké změně ve výkonu fotovoltaických nebo větrných elektráren.

Stabilita ES se dělí do několika podkategorií, které odrážejí specifické aspekty dynamického chování soustavy. Obrázek níže ukazuje základní členění stability ES.



Obr. 12 Rozdělení pojmu stability ES [31]

5.1 Úhlová stabilita

Uhlová stabilita je úzce spjata s elektromechanickými přechodovými jevy. Souvisí totiž s pohybem rotorů synchronních strojů (tedy generátorů elektrické energie). Tato schopnost tedy popisuje rovnováhu mezi elektrickým momentem generátoru a mechanickým momentem poháněcího stroje, kterým bývá nejčastěji turbína. Jinými slovy by se dalo taky říct, že popisuje schopnost synchronních strojů zůstat ve vzájemném synchronismu. [31] [30]

Dále dělíme úhlovou stabilitu na stabilitu malých kyvů (pro pomalé změny) a přechodnou stabilitu (pro rychlé změny). Pro rozlišení typů je důležité, jaké prostředky jsou použity k její analýze. V obou případech se ale jedná o velmi krátké děje, které nepřesáhnou víc než 10 sekund. (jedná se tedy o krátkodobou dynamiku). V tak krátký čas se třeba může rozdělit propojená soustava Evropy na několik částí s různou frekvencí a může dojít k vytvoření malých ostrovů. [31] [30]

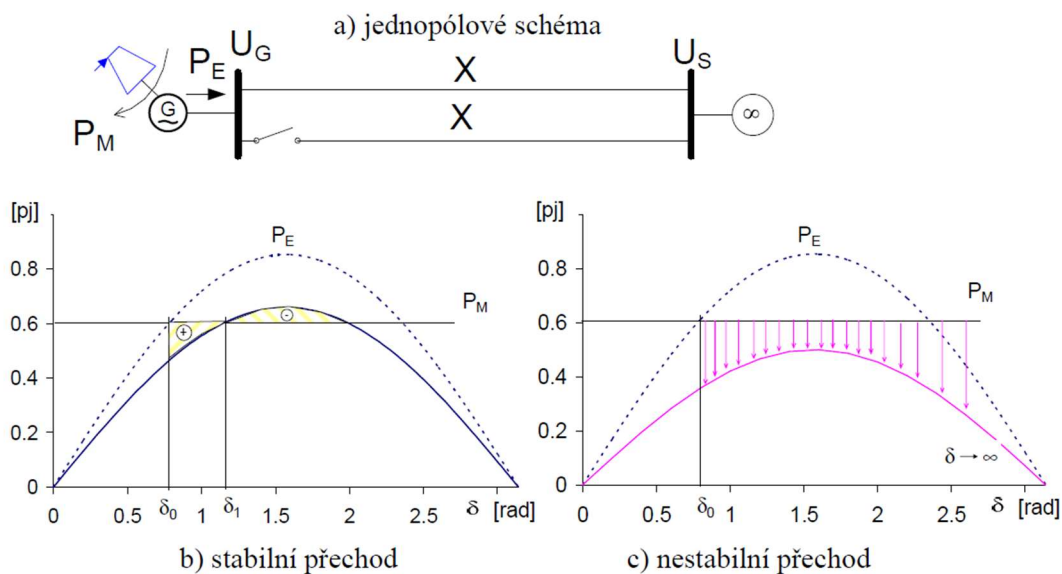
5.1.1 Stabilita malých kyvů (statická)

Stabilitu malých kyvů lze taky nazvat stabilitou statickou. Je to vlastnost samotné soustavy a není inicializována žádným rozruchem v soustavě (např. zkrat výpadek vedení či transformátoru atp.) Obecně lze tedy říct, že soustava je stabilní, pokud po skončení přechodných dějů nastane ustálený stav. Podmínka takto staticky stabilní soustavy je, že zátěžná úhel δ musí být menší než $\pi/2$ (úhel δ svírá fázory elektromotorického napětí a napětí sítě). [30]

5.1.2 Přechodná stabilita (dynamická)

Přechodná úhlová stabilita nebo taky dynamická stabilita se zabývá schopností soustavy udržet synchronní provoz generátorů po velkých poruchách, jako jsou například odpojení vedení nebo zkraty. Je zásadní pro zajištění, že i po náhlých změnách zůstanou generátory synchronizovány a systém se rychle vrátí do stabilního stavu. Využívá se pro její řešení pravidlo ploch, které si lze vysvětlit pomocí Obr. 13. [31]

Jsou zde dvě paralelní vedení s reaktancí X . Generátor dodává přes tyto vedení elektrický výkon P_E do sítě s teoreticky nekonečným zkratovým výkonem U_S . V ustáleném stavu se elektrický výkon P_E rovná mechanickému výkonu turbíny P_m (nepočítají se ztráty). Pokud dojde k odpojení jednoho z vedení (například působení ochrany) nastane přechodový děj. Brzdící plocha (nad přímkou mechanického výkonu P_m) musí být vždy větší nebo rovna akcelerační (pod přímkou mechanického výkonu P_m). Velikost akcelerační plochy je dána rozdílem výkonu turbíny P_m a generátoru P_E a taky dobou trvání zkratu. [30]



Obr. 13 Model výpadku vedení [30]

5.2 Napěťová stabilita

Je schopnost systému udržet přijatelné úrovně napětí na všech uzlech sítě během normálního provozu i v případě poruch. Určuje, jak dobře elektrická síť může čelit různým náročným provozním podmínkám, jako jsou rychlé změny v zátěži (proto se taky někdy napěťové stabilitě říká stabilita zátěžová). [30]

Napěťová stabilita spolu s frekvenční souvisí se schopností soustavy udržet rovnováhu mezi činným a jalovými výkony (mezi výrobou a spotřebou) a tedy i stabilní napětí či v případě frekvenční stability stabilní frekvenci, a to i v případě rozruchu v soustavě. [31]

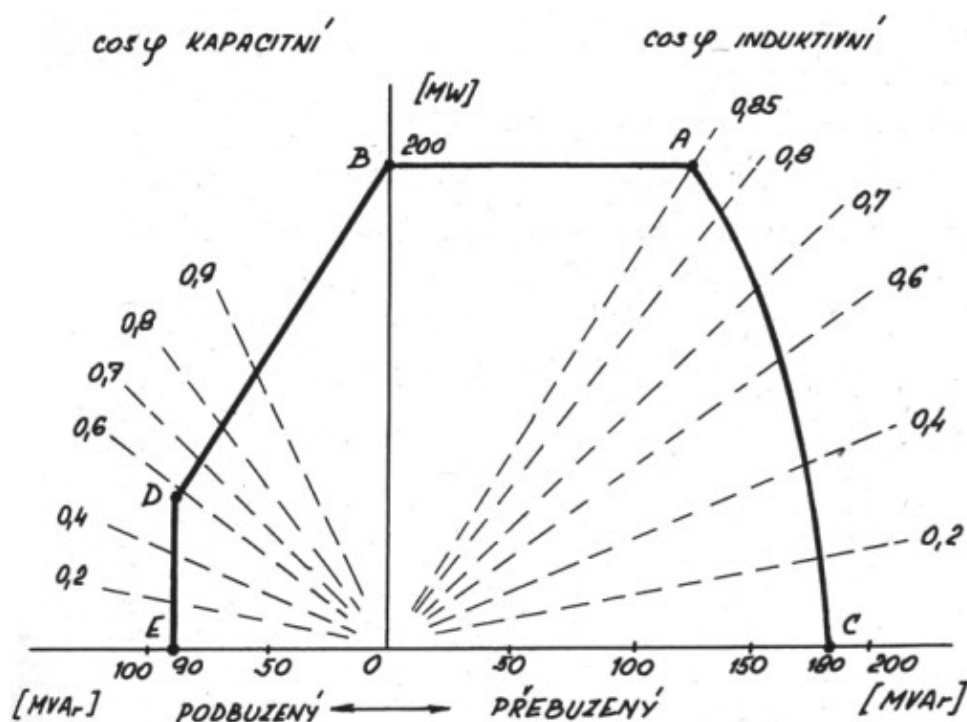
5.2.1 Pracovní oblast alternátoru (P-Q diagram)

Diagram mezních zatížení synchronního generátoru je grafické zobrazení, které ilustruje mez statorového a rotorového oteplení a mez ustáleného chodu generátoru při různých úrovních výkonu. Diagram popisuje oblasti přípustných a nepřípustných stavů synchronního generátoru. Obvykle je znám jako P-Q diagram, protože, základní osy diagramu vyjadřují vztah mezi činným a jalovým výkonem. Tyto diagramy umožňují náhled, jaký výkon je možné z generátoru získat bez překročení omezujících limitů danými konstrukcí stroje. Grafický příklad P-Q diagramu můžeme vidět na Obr. 14.

Je omezen následujícími parametry: [32] [33]

- AB – je omezení výkonem turbíny (maximální činný výkon)
- A – je určen maximální teplotou statorového vinutí
- AC – omezení dané maximální teplotou rotorového vinutí (budícím proudem)

- BD – omezení dané oteplením čelních částí statoru
- DE – omezení dané statickou stabilitou stroje (mez podbuzení)



Obr. 14 Diagram mezních zatížení alternátoru elektrárenského bloku 235 MVA. [32]

5.3 Frekvenční stabilita

Frekvenční stabilita souvisí se schopností soustavy udržet rovnováhu mezi zdroje činného výkonu (obvykle turbín) a spotřebiči. K nerovnováze dochází při změně výkonu (výpadek zdroje) či změně zátěže. Při přebytku výkonu a nedostatečné spotřebě dochází k nadfrekvenci sítě a při zase nadměrné zátěži oproti výrobě k podfrekvenci. V případě výpadku taky dochází k rázu činného výkonu, ostatní zdroje se tedy snaží vyrovnat chybějící činný výkon (platí, že výkon zdrojů pokrývá odběry zatížení a ztráty v síti). Na tyto změny reagují ze své podstaty synchronními generátory, přesněji jejich energie setrvačných hmot, provozovatelé přenosových soustav mají toto zajištěné prostřednictvím tzv primární regulace neboli FCR. [34] [30]

5.3.1 Setrvačnost a kinetická energie

Setrvačnost je vlastnost každého stroje připojeného do sítě a vychází z druhého Newtonova pohybového zákona (zákonu síly), z kterého dojdeme ke vztahu setrvačnosti a kinetické energie. Druhý Newtonův pohybový zákon: [35] [36]

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} = m \frac{dv}{dt} \quad (5.1)$$

kde F je síla [N], působící na hmotu m [kg], volávající zrychlení a [m/s²].

$$T_m = 2 * H \quad (5.2)$$

Dále je nutné si definovat mechanickou časovou konstantu T_m [s] nazývá se také rozběhovou, říká, jak rychle dokáže generátor reagovat na změny v soustavě. Má úzkou spojitost na konstantu setrvačnosti H [s], neboli také „Stored energy constant“, která vyjadřuje, jak je schopen generátor odolávat změnám neboli jak dlouho by generátor mohl teoreticky pracovat na svém jmenovitém výkonu pouze s využitím kinetické energie uchované v rotujících hmotách. [37] [35]

$$E_{kin} = \frac{1}{2} * J * \Omega^2 \quad (5.3)$$

a taky kinetickou energii E_{kin} [MWs], kde J je celkový moment setrvačnosti systému [kgm²] a Ω úhlová rychlost [rad/s],

$$H = \frac{E_{kin}}{S} = \frac{J * \Omega^2}{2 * S} \quad (5.4)$$

dále následuje konstanta setrvačnosti H [s], kde je patrná spojitost mezi kinetickou energií E_{kin} a zdánlivým výkonem generátorů S_G [MVA].

$$E_{kin} = H * S_G \quad (5.5)$$

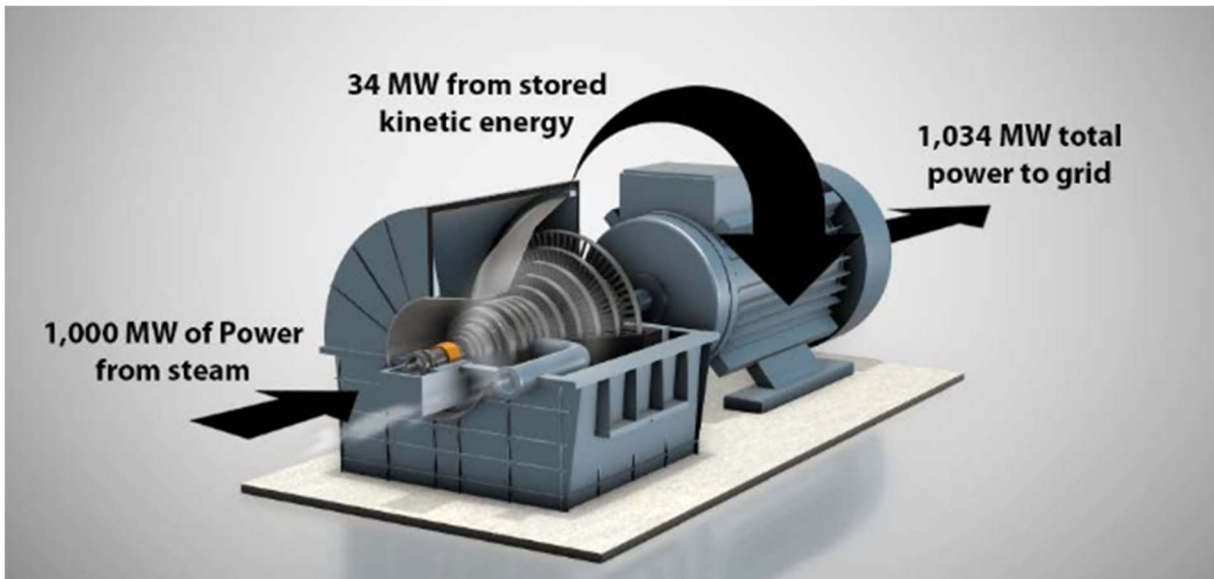
Tedy platí, že celkovou kinetickou energii, E_{kin} , kterou je schopen jednotlivý generátor dodat závisí na konstantě setrvačnosti H a zdánlivém výkonu stroje S . Pokud se jedná o celkovou dostupnou kinetickou energii KE_t [MWs] tak v soustavě platí:

$$KE_t = \sum_i^N H_i * S_{G,i} \quad (5.6)$$

kde N je počet synchronních generátorů v soustavě. [35]

Pro lepší pochopení si lze představit síť se zatížením 30 000 MW, pracující v ní 30 identických generátorů, každý s výkonem 1,000 MW. Když jeden z těchto generátorů selže, zbylých 29 generátorů už bude poskytovat pouze 29 000 MW (bez změny nastavení turbíny), což znamená, že 1 000 MW musí být nahrazeno využitím setrvačnosti zbylých generátorů, dokud není situace stabilizována a frekvence obnovena pomocí dalších zdrojů. (viz kapitola 4.2.1) [37]

V tomto případě, když dojde ke kontingenci, každý z 29 zbývajících generátorů uvolní energii setrvačných hmot, která je použita na dočasné dodání dodatečného výkonu 34 MW na generátor (vidíme na Obr. 15), a vyrovnání přechodového jevu, nad rámec energie dodávané běžným provozem generátorů. To pomáhá soustavě zvládnout první výkyv, při ztrátě zdroje v PS a dává PPS čas na aktivaci podpůrných služeb jako jsou zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy (FRR). [37]



Obr. 15 Znáznornění rozdělení energie dodané do sítě při výpadku zdroje [37]

Na závěr tedy lze říci, že setrvačnost je vlastnost rotačních mas v generátorech, která zpomaluje reakci systému na změny v bilanci výkonu, čímž poskytuje cenný časový prostor pro aktivaci regulačních mechanismů a zabraňuje prudkým výkyvům frekvence po náhlých změnách v zátěži nebo výrobě elektrické energie. Zatímco kinetická energie je přímo spojena s množstvím energie uchovávané v rotačních hmotách a je závislá na hmotnosti a rychlosti otáčení těchto hmot. Je klíčové vědět, že kinetická energie uchovaná v systému představuje hlavní zdroj setrvačnosti, která umožňuje systému se vyrovnávat s náhlými změnami.

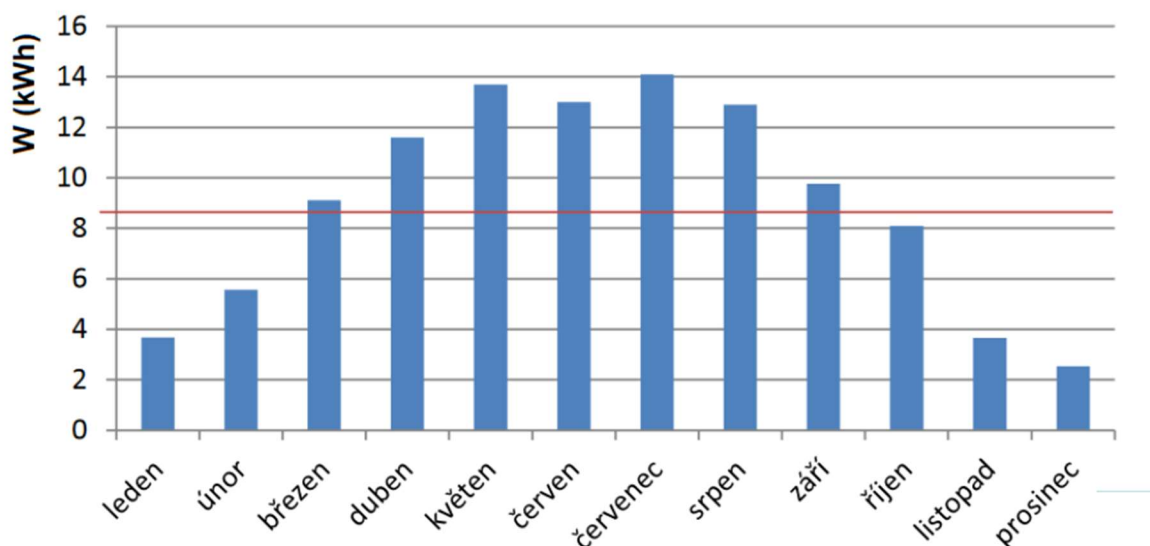
6 PROBLÉMY A DOPADY DEKARBONIZACE NA PŘENOSOVOU SOUSTAVU

Nárůst intermitentních zdrojů do elektrizační soustavy přináší řadu problémů a dopadů. Tyto dopady vychází ze specifických vlastností těchto zdrojů, jako je jejich proměnlivost, distribuovaný charakter a způsob připojení do sítě. Tato kapitole se věnuje různým problémům spojených s dekarbonizací energetiky.

6.1 Proměnlivost, nepředvídatelnost a decentralizace

Jedním z klíčových problémů spojených s rostoucím využíváním obnovitelných zdrojů energie je jejich proměnlivost a nepředvídatelnost. Tato charakteristika OZE má značný dopad na dispečerské řízení, plánování nutných prací a celkový provoz přenosových soustav. Jsou totiž kladeny vyšší nároky na flexibilitu a rychlost reakce dispečerského řízení. S rostoucím počtem malých decentralizovaných zdrojů se zvyšuje komplexita řízení sítě. Dispečerské řízení musí zahrnovat mechanismy pro monitorování a řízení těchto zdrojů, které často nejsou přímo pod dispečerskou kontrolou.

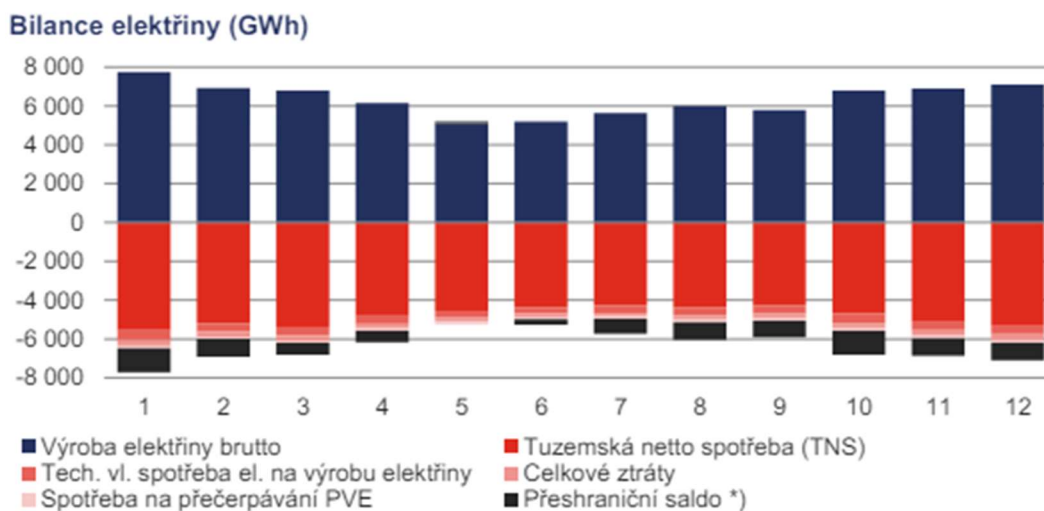
OZE jsou vysoce závislé na počasí, jako jsou sluneční svit a rychlost větru, které se během dne a ročních období výrazně mění. Tato proměnlivost způsobuje výkyvy ve výrobě energie, což může vést k obtížím v udržení rovnováhy mezi výrobou a spotřebou v elektrické soustavě. Ačkoli moderní meteorologické modely a prediktivní technologie umožňují určitou míru předpovědi, přesná predikce výstupu je stále náročná. Rychlé změny počasí mohou způsobit neočekávané špičky nebo propady ve výrobě elektrické energie, což komplikuje plánování a jsou nutné zásahy v reálném čase.



Obr. 16 Příklad měsíční produkce 10 kWp modulu [70]

Z Obr. 16 je patrné, že nejvyšší výroba elektrické energie u FVE nastává v letních měsících (květen až srpen), zatímco nejnižší výroba je v zimních měsících (listopad až únor).

Problém, který nastává je sezónní nesoulad mezi výrobou energie z FVE a spotřebou elektrické energie. V zimě, kdy je spotřeba na svém vrcholu, fotovoltaiky produkují nejméně energie. Tato imbalance vede k otázkám, jak se tento problém bude řešit. Řešení může třeba zahrnovat diverzifikaci více druhů OZE, zlepšení možnosti ukládání elektrické energie nebo zvýšení energetické účinnosti FVE během zimních měsíců.



Obr. 17 Bilance elektřiny ČR 2024 [71]

Tento trend odpovídá obecnému vzoru, kdy v zimě lidé vyžadují více energie pro vytápění a osvětlení vzhledem ke kratším dnům a nižším teplotám a v létě naopak nikoliv, můžeme ho pozorovat na Obr. 17.

6.2 Frekvenční stabilita a setrvačnost

Frekvenční stabilita a setrvačnost jsou základními pilíři pro zajištění spolehlivosti a bezpečnosti elektrické sítě. V kontextu rostoucího podílu OZE, které nedodávají tradiční setrvačné vlastnosti jako synchronní generátory, se tyto aspekty stávají stále významnějšími. Frekvenci je nutné udržet na $50 \text{ Hz} \pm 0,20 \text{ Hz}$, v případě nedodržení vznikají problémy z hlediska zpoždění času, nemusí fungovat správně některé stroje aj. [24]

Setrvačnost poskytovaná rotačními hmotami konvenčních generátorů pomáhá udržet stabilitu systému tím, že absorbuje a vyrovnává náhlé změny v zatížení nebo výrobě energie. Setrvačnost zpomaluje jakékoliv rychlé změny ve frekvenci, což dává systému více času na reakci a stabilizaci. Udržení stabilní frekvence je klíčové pro fungování všech aspektů elektrické sítě, od průmyslových procesů po běžné domácí spotřebiče. [35]

Většina OZE je připojena do sítě prostřednictvím střídačů, které většinou nemají takovou možnost dodávat setrvačnost rotujících hmot jako tradiční synchronní generátory. To má vliv na schopnosti systému reagovat na rychlé změny při výkonové nerovnováze. Z toho plyne, že soustavách systémech s vysokým podílem OZE je tedy potřeba přesnějšího a rychlejšího řízení frekvence, aby se kompenzovala absence tradiční setrvačnosti. [31]

Jedním z moderních řešení těchto výzev jsou grid-forming střídače. Tyto pokročilé střídače jsou navrženy tak, aby přispívaly k setrvačnosti a frekvenční stabilitě sítě podobně jako synchronní generátory. Vytvářejí vlastní referenci a jsou schopné řídit frekvenci a napětí. Tento přístup umožňuje střídačům reagovat na změny zatížení a výpadky zdrojů velmi rychle, čímž poskytují dodatečnou stabilitu a podporu. Je však pořád brát v potaz, že jejich poskytované energie a setrvačnost, není fyzická a rotující, ale je virtuální. To je dosaženo pomocí pokročilých řídicích algoritmů, které simulují chování rotačních hmot synchronních generátorů. Je to však relativně nová technologie, a není jisté, jakým směrem se bude vyvíjet. [38]

Více je tento problém rozebrán v kapitole 7 .

6.3 Zkratový proud

Synchronní generátory, které byly dosud běžně používány, mají schopnost v případě zkratu poskytovat velké množství zkratového proudu, což umožňuje snadnou detekci a odpojení problémové části sítě. Naproti tomu fotovoltaické systémy a větrné turbíny jsou připojeny k síti prostřednictvím střídačů, které nemají schopnost přispívat ke zkratovému proudu. To znamená, že při nahrazení synchronních generátorů fotovoltaickými systémy se celkový zkratový proud v síti sníží, což má vliv na účinnost instalovaných ochranných zařízení. [35] [39]

Zkratový proud v elektrické síti je nejvyšší možný proud, který může projít systémem v případě zkratu (kdy dojde k přímému spojení mezi dvěma či třemi fázemi nebo mezi fází a zemí). Velikost zkratového proudu je důležitý ukazatel pro návrh a ochranu elektrického zařízení, protože ukazuje, jaký nejvyšší proud může v extrémní situaci systémem projít.

Synchronní generátory přispívají ke zkratovému proudu v síti několika způsoby:

- V případě zkratu jejich setrvačnost pomáhá udržet rotaci rotoru, což umožňuje generátoru dodávat vysoký zkratový proud po krátkou dobu, dokud ochranné prvky neodpojí zkratovanou část sítě. [40]
- Mají vlastnosti známé jako subtransientní a transientní reakce. Tyto reakce popisují, jak generátor produkuje velmi vysoké proudy ihned po vzniku zkratu (subtransientní reakce) a jak se tyto proudy postupně snižují (transientní reakce). [40]
- Mohou dodávat (nebo spotřebovávat) jalový výkon, což je důležité pro udržení napětí v síti během zkratů. [40]

Příspěvek ke zkratovému proudu ze strany generátorů v síti má také svůj význam, a to z několika důvodů. Vysoký zkratový proud umožňuje rychlejší a spolehlivější detekci zkratu ochrannými zařízeními. Ochrany jsou navrženy tak, aby reagovaly na vysoké zkratové proudy, a jejich správné fungování závisí na tom, že tyto proudy dosáhnou určité úrovně. Kdyby zkratové proudy byly příliš nízké, mohlo by to vést k zpoždění nebo dokonce selhání v odpovědi ochranných systémů. [35]

Integrace nových technologií a přístupů k ochranám v elektrizační soustavě vyžaduje nejen technické, ale i regulační změny, aby byly zajištěny bezpečnost a spolehlivost sítě při

zvyšujícím se podílu OZE. Bude nutné provést změny v normách a pravidlech pro provoz sítí, a možná i vytvoření nových standardů pro chránění. [34]

6.4 Napěťová stabilita a regulace jalového výkonu

Napěťová stabilita popisuje schopnost soustavy udržet ve všech uzlech PS za normálních provozních podmínek nebo při vzniku poruchy stabilní napětí a v přijatelných mezích (viz kapitola 4.2.2). Při přepětí dochází k nadměrnému zatěžování zařízení v ES a může dojít až k přeskoku nebo účinku přepět'ových ochran. Naopak v případě podpětí se stává síť nestabilní.

Integrace velkého množství OZE má vliv na napěťovou stabilitu. Protože jejich dodávka elektrické energie je proměnlivá vede tedy k rychlým změnám napětí v síti, které je nutné efektivně regulovat. K zamezení napěťové nestability se používají zařízení, které jsou schopny udržet velikost napětí v přijatelných mezích. Ty však ubudou. Jsou to zařízení jako třeba synchronní generátory, které mohou jalový výkon dodávat či spotřebovávat v závislosti na buzení synchronních strojů. V pilotních uzlech tedy zmizí tyto prvky a ASRU (viz kapitola 4.2.2) nebude mít nutné prostředky na udržení napětí. Bude tedy potřeba tyto zařízení nějakým způsobem nahradit jak už pasivními či aktivními prvky. Více je tento problém rozebrán v kapitole 7 . [24] [31] [30]

6.5 Potřeba záložních zdrojů a úložišť

Jedním z nejzásadnějších problémů, které vyvstávají v důsledku dekarbonizace energetického sektoru, je zvýšená potřeba záložních zdrojů a úložišť energie. Tento problém je přímo spojen s proměnlivostí a nepředvídatelností obnovitelných zdrojů energie, které nemohou garantovat stálý výkon kvůli závislosti na meteorologických podmínkách. [41]

Kvůli proměnlivosti OZE je potřeba zajištění dostatečných záložních elektráren, které dokážou kompenzovat výkyvy při výrobě (např. plynové elektrárny nebo přečerpávací elektrárny) a vznik úložišť el. energie pro vyrovnávání a skladování. Tyto zdroje mohou být rychle spuštěny, aby pokryly výpadky nebo špičky ve výrobě, což je nezbytné pro udržení stability elektrické sítě a prevenci případných blackoutů.

Úložiště energie, jako jsou baterie, nebo nově vyvíjené technologie, jako jsou úložiště na bázi vodíku, hrají klíčovou roli v systému s vysokým podílem obnovitelných zdrojů. Úložiště umožňují akumulaci energie vyrobené v obdobích nadbytečné produkce a její využití v době, kdy je produkce OZE nedostatečná. Tato flexibilita je zásadní pro minimalizaci závislosti na tradičních fosilních zdrojích a pro zvýšení podílu energie získávané z obnovitelných zdrojů. [42]

Potřeba záložních zdrojů a úložišť však přináší řadu technických a ekonomických výzev. Na technické úrovni je třeba řešit otázky efektivity, životnosti a integrační kapacity těchto systémů do stávající infrastruktury. Z ekonomického hlediska je nezbytné zajistit, že náklady na tyto systémy jsou přijatelné pro širokou veřejnost.

Vzhledem k těmto výzvám je jasné, že záložní zdroje a úložiště jsou nezbytnými komponentami pro úspěšnou transformaci energetického sektoru směrem k dekarbonizaci.

6.6 Integrace a řízení sítě

Vysoký podíl OZE v energetickém mixu vyžaduje pokročilé řídicí a monitorovací systémy pro efektivní integraci do elektrizační sítě. Tyto systémy musí být schopny v reálném čase poskytovat informace o výrobě z OZE a v případě nutnosti rychle řídit či omezovat výkon při výkonové nerovnováze. Energetický zákon č. 458/2000 Sb. [43] stanovuje, že dispečerské řízení je povinné pouze pro instalace s výkonem 100 kW a více. V případě rychlého rozšiřování instalace malých FVE s instalovaným výkonem pod 100 kW, především na rezidenčních domech, bude znamenat, že mnoho malých zdrojů elektrické energie bude fungovat mimo tuto regulaci. Tento trend může mít zásadní dopad na stabilitu a řízení elektrizační sítě.

Malé FVE bez dispečerského řízení produkují elektřinu, která je přímo závislá na intenzitě slunečního záření. Tato variabilita může vést k nečekaným špičkám nebo poklesům ve výrobě, což ztěžuje udržení stability elektrické sítě. Přetížení nebo nedostatečná výroba může vyvolat potřebu rychlých zásahů, jako jsou odstavení části výroby nebo naopak její zvýšení z jiných zdrojů, což zvyšuje náklady a komplikuje provoz sítě.

Bez přístupu k datům z měřicích a regulačních zařízení, které jsou typické pro elektrárny s dispečerským řízením, se výrazně snižuje přesnost predikce výroby z malých FVE. To komplikuje plánování a zajišťování dostatečné rezervy, zejména v obdobích nízké poptávky. V případě stavů nouze může, u těchto zdrojů, absence dispečerského řízení znamenat, že velký počet malých FVE pokračuje ve výrobě a dodává elektrickou energii do sítě, aniž by byly schopny reagovat na pokyny pro odstavení nebo regulaci výkonu. To může vést až k riziku blackoutu.

Úbytek klasických elektráren také způsobí, že v případě rozsáhlých výpadků či ostrovních provozů nebude provozovatel přenosové soustavy mít mnoho možností, jak znovu obnovit napájení. Tradiční uhelné elektrárny poskytují tuto podpůrnou službu a bude nutné je nějak nahradit. FVE a VTE, se svojí fluktuací, jsou velmi nevhodné pro obnovení soustavy v případě úplné ztráty napětí.

Fluktuace výroby z obnovitelných zdrojů, jako jsou právě FVE a VTE, představuje významnou výzvu pro řízení sítě. Tyto zdroje nejsou schopny poskytnout stabilní a predikovatelný výkon, což je nezbytné pro bezpečné a efektivní obnovení napájení po výpadku. V případě blackoutu by jejich neřiditelnost a neschopnost rychle a efektivně reagovat na potřeby sítě mohly výrazně prodloužit dobu nutnou k obnovení dodávek elektrické energie.

6.7 Omezení přenosové kapacity

Omezení přenosové kapacity je závažným problémem, který vzniká, když existující elektrizační síť není schopna zvládnout maximální možný přenos energie mezi zdroji výroby a místy spotřeby. Vzhledem k přesunu zdrojů do distribuční soustavy budou vznikat problém

kdy mohou být zdroje elektrické energie, často daleko od velkých míst spotřeby, jako jsou velká města.

Geografická dislokace, zejména FVE a VTE, vyžaduje robustní přenosovou infrastrukturu, která je schopna zvládnout přenášet velké množství energie na velké vzdálenosti. Aby například v propojené Evropě bylo možné elektrickou energii dostat z jedné strany synchronní zóny na druhou.

Investice do výstavby nových vnitrostátních a přeshraničních linek a modernizace stávajících zařízení jsou klíčové pro zvýšení kapacity elektrické soustavy.

6.8 Regulační a tržní výzvy

Integrace obnovitelných zdrojů energie do stávajícího energetického mixu přináší řadu regulačních a tržních výzev, které vyžadují inovativní přístupy a interakci jak s politiky, tak i rozvíjení tržních mechanismů. V místech, kde se přesahují národní hranice, je důležitá mezinárodní koordinace pro efektivnost regulací.

Mnohé stávající regulační rámce byly navrženy pro centralizované, předvídatelné a stabilní zdroje energie. Integrace proměnlivých a distribuovaných zdrojů jako jsou OZE vyžaduje přehodnocení a úpravy těchto pravidel, aby bylo možné efektivně začlenit nové technologie a modely výroby energie.

Aktualizace zákonů, které zrychlí investice do elektrizační infrastruktury a energetiky celkově, je nezbytné pro překonání problémů spojených se stávající infrastrukturou. To zahrnuje třeba stavební zákon, který by mohl umožnit rychlejší schvalovací procesy pro důležité projekty. Nebo vytváření podmínek pro rozvoj možnosti sdílení elektrické energie, jak efektivně kompenzovat případné omezení výroby a další.

Trhy s elektřinou musí být dostatečně flexibilní, aby mohly efektivně reagovat na proměnlivou a nepředvídatelnou povahu OZE. To zahrnuje vytváření postupů a mechanismů pro rychlou adaptaci nabídky a poptávky, jako jsou flexibilnější trhy a platformy s podpůrnými službami, které pomáhají udržovat stabilitu sítě.

EDC – neboli Energetické datové centrum by snad mohlo částečně tento problém řešit. Úkolem této nové společnosti je soustředit veškeré informace o výrobě a spotřebě elektrické energie jak na úrovni domácností, tak i velkých firem. Bude pravděpodobně i umožňovat sdílení mezi různými subjekty. [44]

6.9 Kvalita elektrické energie

Kvalita elektrické energie je klíčovým faktorem, který ovlivňuje jak efektivitu elektrických zařízení, tak i tedy ekonomické aspekty přenosu. V kontextu rostoucího podílu obnovitelných zdrojů energie na energetickém mixu jsou výzvy spojené s udržením požadované velikosti napětí a kvality energie stále významnější. OZE z důvodů použití výkonové elektroniky

přinášející problémy spojené s napětovými změnami, harmonickými zkresleními a deformacemi sinusového průběhu základní harmonické.

Zařízení obsahující výkonovou elektroniku, tedy nelineární spotřebiče (časté spínání, střídače) sice odebírají periodický proud, ale nikoliv sinusový, tak pak vzniká harmonické zkreslení, tedy deformace výsledného sinusového signálu. Harmonické proudy tečou od nelineárních spotřebičů do sítě a vyvolávají napětové úbytky. Parametr, který charakterizuje nelinearitu se nazývá činitel harmonického zkreslení THD (total harmonic distortion). Určuje se podle následujícího vztahu: [45] [24]

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (u_h)^2} [\%] \quad (6.1)$$

Kde u_h je poměr amplitudy příslušné harmonické (U_h) k amplitudě základní harmonické U_1 .

Výkon dodávaný z OZE bývá často nestálý a následně dochází ke kolísání napětí, zejména tedy u větrných elektráren. Jejich důsledek pak bývá flickr. Je to jev, který můžeme pozorovat převážně u osvětlení, kdy pozorovatel zaznamenává nestálost v intenzitě osvětlení, tedy blikání světla. [45]

7 VYBRANÉ PROBLÉMY DEKARBONIZACE A JEJICH VLIV NA PŘENOSOVOU SOUSTAVU

Tato diplomová práce se zaměřuje na dva konkrétní problémy spojené s dekarbonizací, které mají zásadní vliv na jejich stabilitu a spolehlivost ES. Úbytek jalového výkonu, respektive jeho možnosti řízení (dodávky a odběru), a úbytek setrvačnosti (tedy kinetické energie rotujících hmot), které konvenční elektrárny a jejich synchronní generátory poskytují.

První problém, úbytek možnosti řízení jalového výkonu, je zásadní pro udržení napěťové stability v elektrizační soustavě. S přechodem od tradičních zdrojů energie, jako jsou uhelné a jaderné elektrárny, k obnovitelným zdrojům, jako jsou fotovoltaické a větrné elektrárny, dochází ke ztrátě schopnosti efektivní regulace napětí. Tento jev je způsoben především tím, že OZE jsou obvykle připojována do elektrizační soustavy prostřednictvím střídačů, které nemají tak velkou schopnost dodávat nebo absorbovat jalový výkon, jako to dokážou synchronní generátory. Tato změna může vést k významným problémům s napětím, což může mít za následek přepětí, nestabilitu v elektrizační soustavě, zvýšenou pravděpodobnost výpadků a poškození zařízení.

Druhý problém, úbytek synchronních generátorů, má přímý dopad na setrvačnost systému, a tedy na jeho schopnost reagovat na rychlé změny v zatížení a výrobě elektrické energie. Synchronní generátory, které jsou tradiční součástí elektrizační soustavy, přirozeně poskytují kinetickou energii, která je zásadní pro udržení frekvence v síti. Tato setrvačnost pomáhá elektrizační soustavě absorbovat a vyrovnávat náhlé změny, aniž by došlo k výrazným kolísáním frekvence. S poklesem počtu synchronních generátorů v důsledku dekarbonizace a nahrazování těchto zdrojů systémy založenými na obnovitelných zdrojích, které tuto setrvačnost přirozeně nenabízí, roste riziko frekvenční nestability.

Výběr těchto dvou problémů pro hlubší analýzu v této studii je motivován jejich kritickým významem pro celkovou operativnost a bezpečnost přenosové soustavy v nadcházejícím období dekarbonizace. Zvládnutí těchto výzev je klíčové pro úspěšný přechod k udržitelnějším zdrojům energie a pro zajištění bezpečné a stabilní dodávky elektrické energie v blízké budoucnosti.

7.1 Vstupní data

V rámci zajištění anonymity provozovatelů a specifik jednotlivých elektráren bylo nutné převést absolutní hodnoty (tedy vlačnosti) generátorů na relativní čísla. Tyto údaje byly následně klasifikovány podle typů elektráren, což umožnilo provést komparativní analýzu různých druhů elektráren bez rizika odhalení citlivých informací. V této studii jsou zahrnuta data z elektrárenských bloků připojených k přenosové soustavě k datu 1. května 2024, jejichž shrnutí a kategorizace podle typu paliva jsou prezentována v Tab. 2.

Tab. 2 Seznam elektráren v PS

typ	název	blok
jaderné	EDUK	G11
		G12
		G21
		G22
		G31
		G32
		G41
		G42
	ETEM	G1
		G2
uhelné	EPOC	G2
		G3
		G4
		G5
		G6
	EPR2	G23
		G24
		G25
	ELED	G6
	ECHV	G1
		G2
		G3
		G4
	ETU2	G21
		G22
		G23
		G24
	ETI2	G6

typ	název	blok
plynové	EPC2	G20
		G21
		G22
	EPVR	G11
		G12
		G21
		G22
vodní	EDST	G1
		G2
	EDAL	G1
		G2
		G3
		G4
	EORK	G1
		G2
		G3
		G4

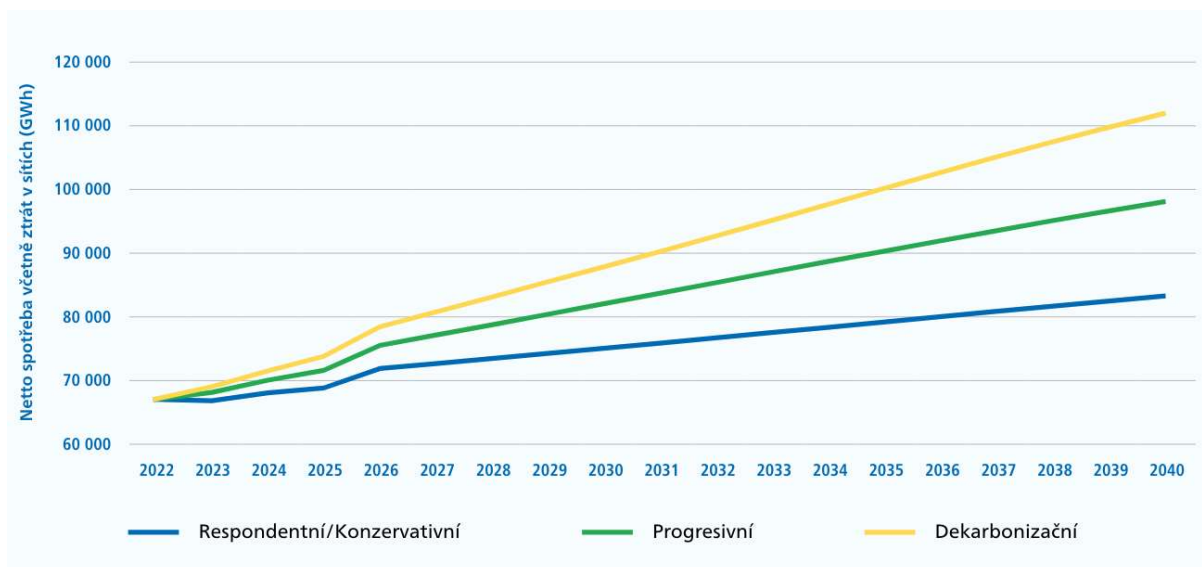
Pro vývoj a predikci odstávky výrobních bloků se vycházelo z Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR 2022 (MAF), viz kapitola níže. Pro analýzu byl však použit pouze Konzervativní, Progresivní a Dekarbonizační scénář. Scénář Respondentní byl z analýzy vynechán, aby výsledky nebyly ovlivněny subjektivními názory poskytovatelů. Analýza je zpracována do roku 2040 a počítá mimo jiné s úbytkem uhelných zdrojů, nového jaderného zdroje v roce 2036 a nárůstem plynových zdrojů vše podle předpokládaného vývoje scénářů v MAF 2022.

7.1.1 Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR (MAF)

Společnost ČEPS každoročně vypracovává národní hodnocení zdrojové přiměřenosti, které v několika scénářích zobrazuje možné trajektorie vývoje českého elektroenergetického sektoru. Je to takový pohled „do budoucnosti“, který nám podhaluje možné scénáře. A tedy taky jak

se bude energetika v budoucnu rozvíjet. Analýza vzniká v souladu s Nařízením Evropského parlamentu a Rady (EU) 2019/943 o vnitřním trhu s elektřinou. [1]

Vydání roku 2022 obsahuje čtyři scénáře – Respondentní, Konzervativní, Progresivní a Dekarbonizační. Jednotlivé scénáře predikují, zda bude elektrizační soustava v horizontu do roku 2040 zdrojově přiměřená či nikoliv. Hodnocení zohledňuje faktory, jako je předpokládaná podoba energetického mixu, importní a exportní kapacita, výše spotřeby a socioekonomický vývoj. [1]

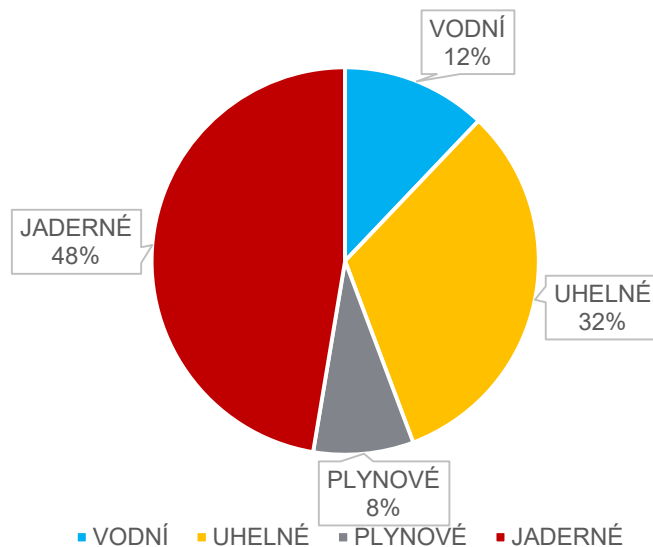


Obr. 18 Vývoj spotřeby dle MAF 2022 [46]

7.2 Úbytek setrvačnosti v PS

Tato kapitola je zaměřena na analýzu poklesu setrvačných hmot a s tím související setrvačnost a stability elektrizační soustavy. Specificky jsou zkoumány, jak různé typy elektráren přispívají k dodávkám setrvačných hmot. Cílem studie je odhalit, jakým způsobem jednotlivé zdroje energie podporují setrvačnost v síti. Vzhledem k tomu, že setrvačnost je základní vlastností každého synchronního generátoru v synchronní zóně, bylo by potřeba získat data od všech zdrojů v celé synchronní zóně, které je prakticky nemožné získat. Proto je prováděno srovnání na základě dostupných údajů o zdrojích v přenosové soustavě a jejich možnosti dodávat kinetickou energii do přenosové soustavy. Výsledky práce ukazují rozdílný přínos jednotlivých zdrojů k setrvačnosti v přenosové soustavě.

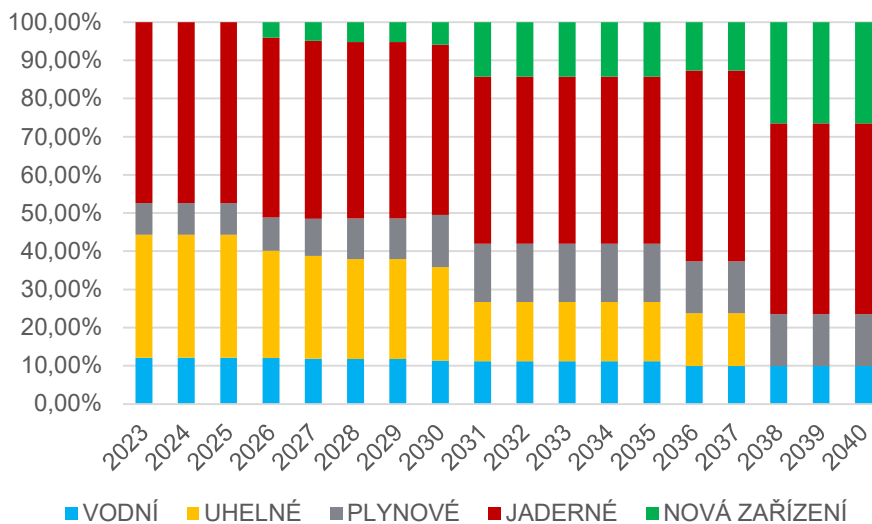
Na Obr. 19 je vidět aktuální podíl výrobních bloků elektráren v PS, každý typ elektrárny se jinak podílí na setrvačnosti soustavy. Jaderné elektrárny mají největší podíl a to 48 % následují uhelné s 32 %, dále vodní se 12 % a neposlední radě plynové elektrárny se 8 %. V následujících kapitolách budu simulovat jejich úbytek a nahrazení „novými zařízeními“.



Obr. 19 Podíl výrobních bloků na energii setrvačných hmot – rok 2024

7.2.1 Konzervativní scénář

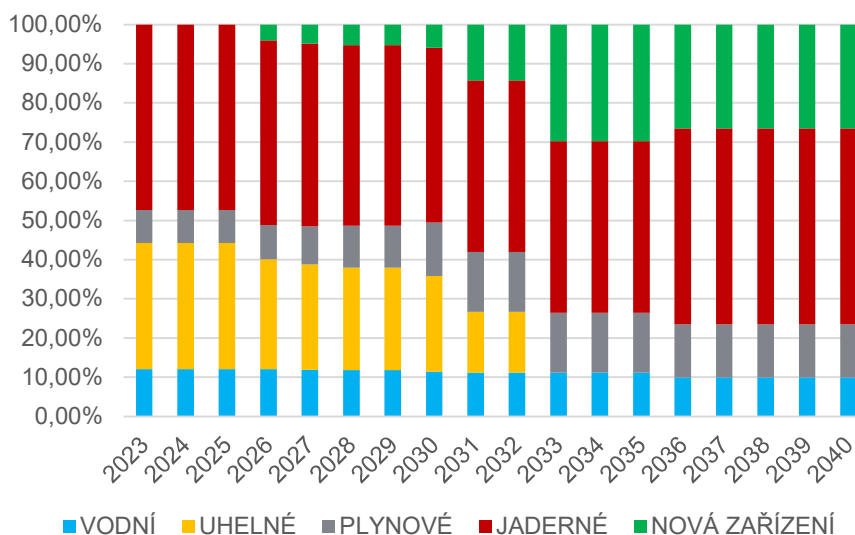
Konzervativní scénář popisuje stav, kdy bude probíhat odstávka posledních uhelných zdrojů až v roce 2038. To poskytuje dostatek času, aby tyto zdroje mohly být nahrazeny. Z Obr. 20 lze vidět, že první velký skok nastává v roce 2031 po uzavření některých uhelných elektráren, následkem toho bude potřeba nahradit necelých 15 % energie setrvačných hmot v síti. V roce 2038 to pak bude necelých 27 %.



Obr. 20 Podíl výrobních bloků na energii setrvačných hmot při KS

7.2.2 Progresivní scénář

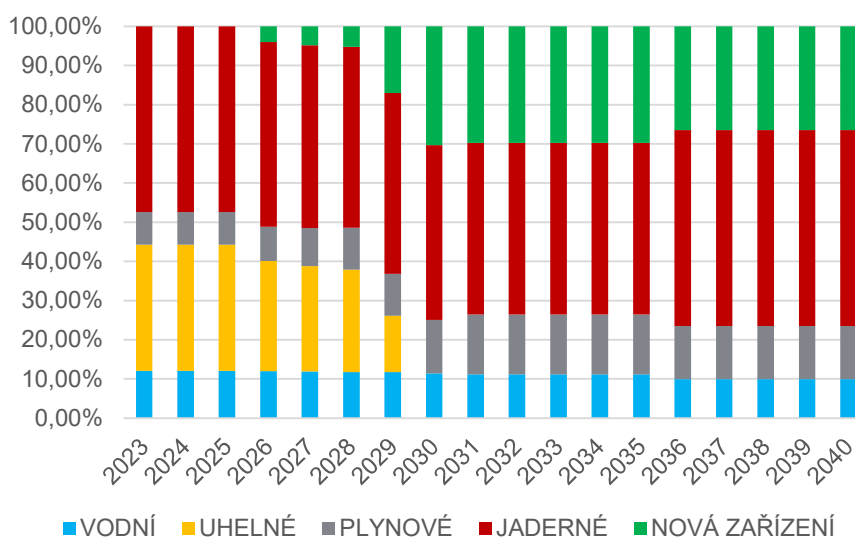
Progresivní scénář ukazuje, že první velký nedostatek energie setrvačných hmot nastane podobně jako v Konzervativním scénáři v roce 2031 a to zase necelých 15 %. Tento scénář, ale počítá s uzavřením všech uhelných zdrojů již v roce 2033, kde nastane taky největší nedostatek setrvačných hmot a to necelých 30 %. Předpokládané spuštění provozu nového jaderného bloku v roce 2036 toto číslo dostane na necelých 27 %.



Obr. 21 Podíl výrobních bloků na energii setrvačných hmot při PS

7.2.3 Dekarbonizační scénář

Nejvíce pesimistický Dekarbonizační scénář počítá s uzavřením všech uhelných elektráren již v roce 2030. V tomto případě velký úbytek setrvačných hmot nastane již v roce 2029 a bude je potřeba nahradit 17 %. Následně o rok později bude již potřebovat nahradit necelých 31 % původní energie setrvačných hmot, která je dostupná nyní. Opět předpokládané spuštění nového jaderného bloku v roce 2036 tuto potřebu trochu zredukuje na necelých 17 %.



Obr. 22 Podíl výrobních bloků na energii setrvačných hmot při DS

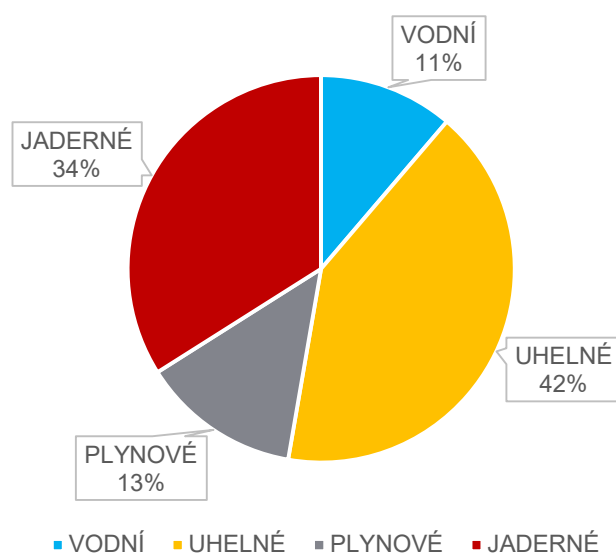
7.3 Úbytek jalového výkonu v PS

V rámci analýzy zaměřené na napěťovou stabilitu byl zkoumán vliv různých druhů elektráren na řízení jalového výkonu. Cílem bylo odhalit, jakým způsobem jednotlivé typy zdrojů přispívají k regulaci této nezbytné složky elektrizační soustavy a znázornit predikovaný vývoj v několika scénářích. Výsledky dávají náhled, jak rozdílně se tyto zdroje, podílejí na udržení napětí.

Při analýze hodnot jalového výkonu se vycházelo z maximálních technických možností jednotlivých generátorů. Je důležité poznamenat, že vzhledem ke specifickému tvaru PQ diagramu (viz kapitola 5.2.1) by příspěvky hodnot jalového výkonu byly vyšší, pokud by došlo ke snížení dodávky činného výkonu do sítě. Analýza se však soustředila na scénář, kdy elektrárny pracují na maximální činný výkon, níže je vysvětleno proč.

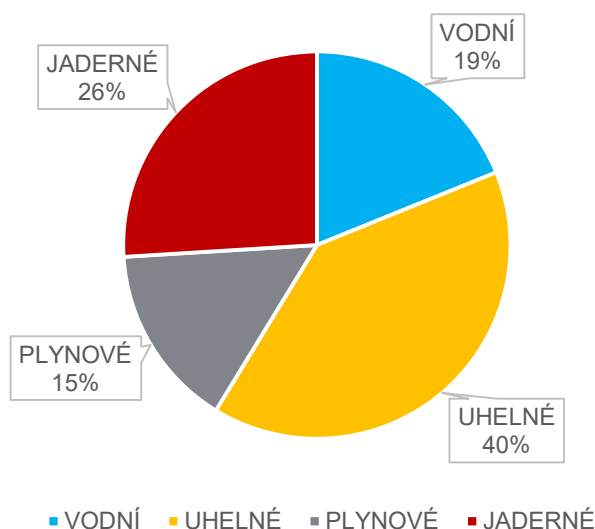
Analyzování jiných scénářů, kde by elektrárny pracovaly na nižší výkon, by nemuselo odrážet skutečné provozní podmínky a praktické výzvy, kterým čelí elektrizační soustava. Práce elektráren na maximální činný výkon je ekonomicky nejvýhodnější, protože se tím minimalizují fixní náklady na jednotku vyrobené energie. Tento scénář proto reflektuje snahu o dosažení nejvyšší možné ekonomické efektivity, která je klíčová pro provozovatele elektráren. [27]

Analyzování hodnot při maximálních technických možnostech generátorů zajišťuje, že jsou zohledněny všechny potenciální přínosy a omezení současných technologií. To zahrnuje i situace, kdy jsou elektrárny vystaveny největšímu zatížení, což je kritické pro identifikaci a řešení možných problémů s napěťovou a frekvenční stabilitou. Při maximálním činném výkonu je možnost pro řízení jalového výkonu omezenější. Tento scénář je tedy konzervativní a zajišťuje, že analýza nevede k nerealisticky optimistickým závěrům o dostupnosti jalového výkonu.



Obr. 23 Podíl výrobních bloků na jalovém výkonu (přebuzení) – rok 2024

Z Obr. 23 a Obr. 24 je zřejmé, že uhelné elektrárny mají největší podíl na možnosti regulaci jalového výkonu s 42 % (kapacitního) a 40 % (induktivního) při svých nominálních výkonech. Což je klíčový ukazatel jejich aktuální dominantní role v energetickém mixu. Jaderné elektrárny jsou na druhém místě s 34 % respektive 26 % a vodní elektrárny následují s 11 % respektive 19 %. Plynové elektrárny se podílí na řízení nejmenší částí, pouze 13 % respektive 15 %. Tato čísla jen potvrzují, jak jsou jednotlivé zdroje elektrické energie schopny přispívat ke stabilizaci napětí prostřednictvím dodávky nebo spotřeby jalového výkonu.

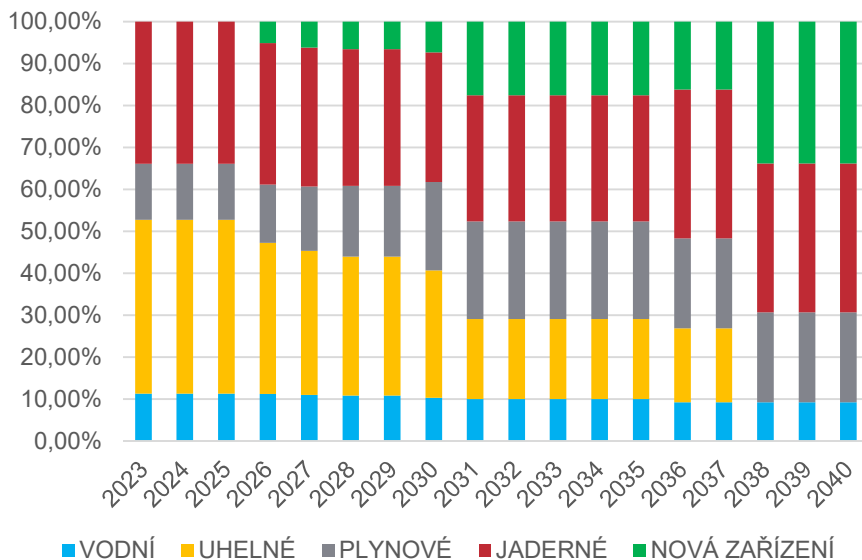


Obr. 24 Podíl výrobních bloků na jalovém výkonu (podbuzení) – rok 2024

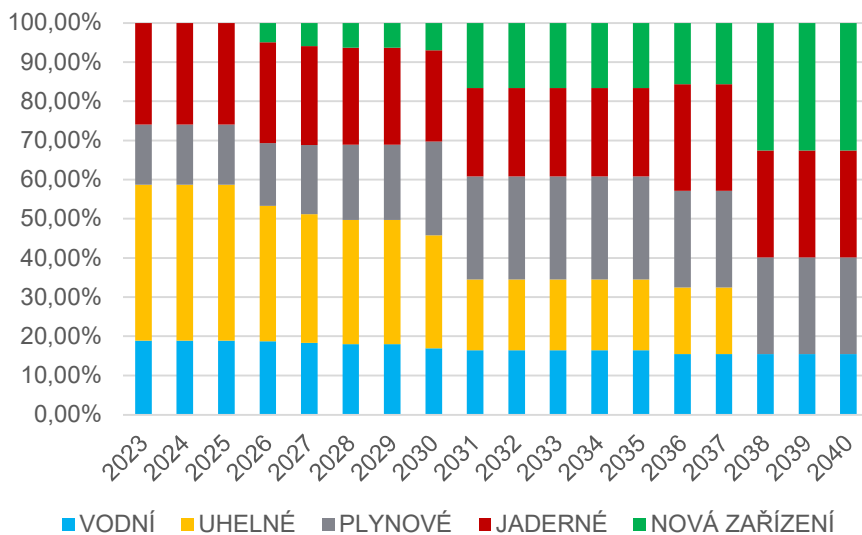
Důležitý aspekt je význam uhelných elektráren pro udržení napětí v síti, jejichž odstavení by mělo za následek významnou změnu v možnosti řízení jalového výkonu. Tato změna bude vyžadovat značné úpravy v infrastruktuře a možná i vývoj nových technologií pro kompenzaci tohoto dále nedostupného výkonu. Z tohoto důvodu je důležité, aby byl proces odstavování uhelných elektráren prováděn postupně a s důkladným plánováním, aby se minimalizovaly negativní dopady na napěťovou stabilitu elektrizační soustavy.

7.3.1 Konzervativní scénář

Konzervativní scénář je nejvíc optimistický ze všech scénářů. Z Obr 25. a Obr. 26 je patrné, že potřeba „nových zařízení“ nastává až v roce 2031 a výrazná další potřeba nastává až po předpokládaném uzavření všech uhelných elektráren v roce 2038, kde bude potřeba nahradit necelých 34 % chybějícího jalového výkonu do kladného (kapacitního směru) a necelých 33 % do záporného (induktivního směru) jak také lze vidět. Úbytek nastane v obou směrech prakticky totožný, je tedy nutné nahrazení nejlépe symetrickými zařízeními, které jsou schopny, jak dodávat, tak spotřebovávat jalový výkon.



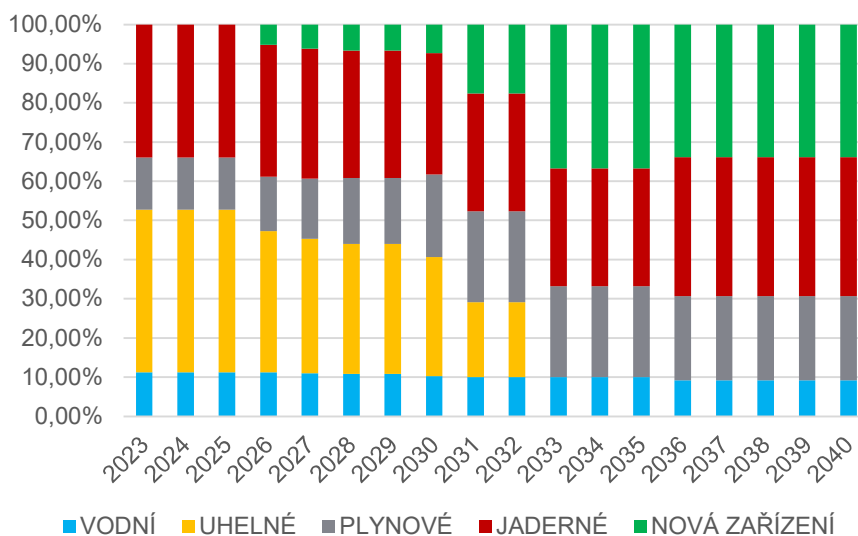
Obr. 25 Podíl výrobních bloků na jalovém výkonu (přebuzení) při KS



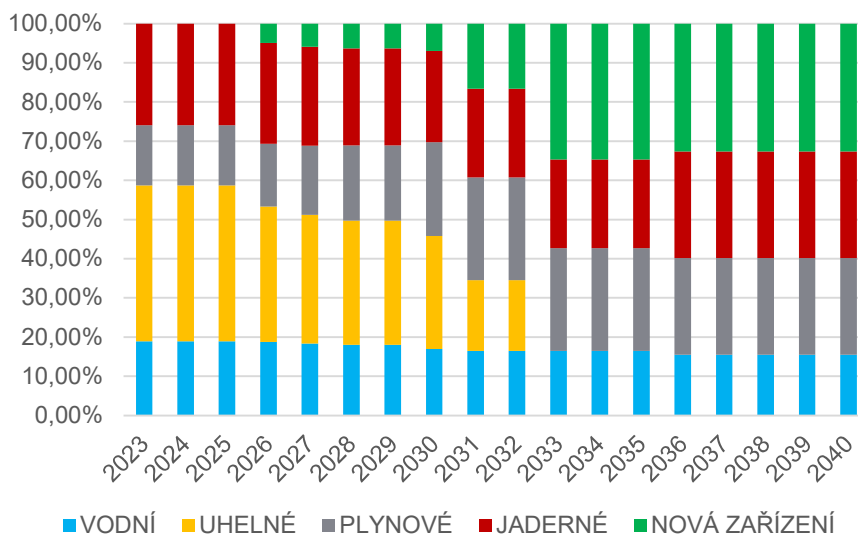
Obr. 26 Podíl výrobních bloků na jalovém výkonu (podbuzení) při KS

7.3.2 Progresivní scénář

V progresivním scénáři se předpokládá, že energetický sektor projde rychlým přechodem k vyššímu podílu obnovitelných zdrojů energie, což odráží agresivnější přístup k dekarbonizaci. Tady už nastává podstatnější problém, jak je patrné na Obr. 27 a Obr. 28, a to o pět let dříve. V roce 2033 po předpokládaném uzavření všech uhelných elektráren bude potřeba nahradit necelých 37 % kapacitního a necelých 35 % induktivního jalového výkonu v přenosové soustavě. Při předpokládaném zprovoznění nového jaderného zdroje v roce 2036 se tento nedostatek zlepší jen částečně, a to o necelé 4 % respektive 2 %.



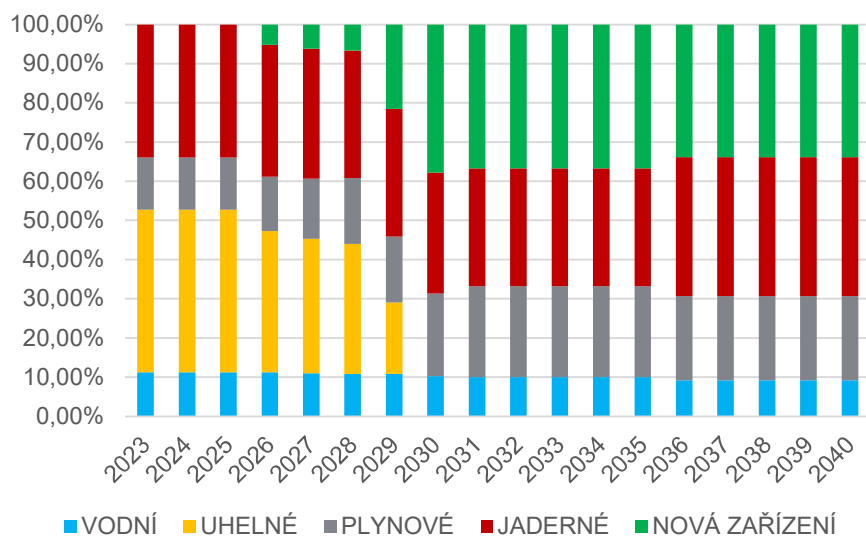
Obr. 27 Podíl výrobních bloků na jalovém výkonu (přebuzení) při PS



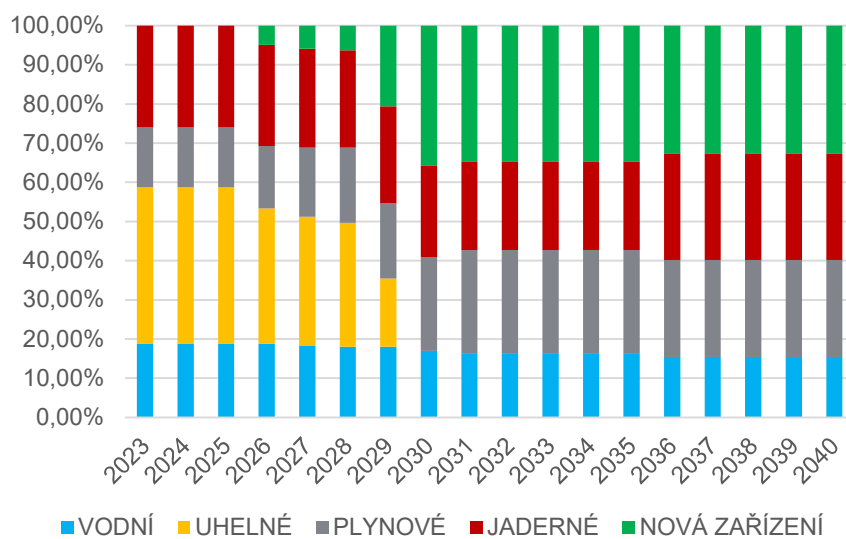
Obr. 28 Podíl výrobních bloků na jalovém výkonu (podbuzení) při PS

7.3.3 Dekarbonizační scénář

V neposlední řadě nejvíc pesimistický je dekarbonizační scénář. Důraz je kladen na rapidní transformaci energetického sektoru směrem k nízkoemisnímu modelu založenému na maximálním využití obnovitelných zdrojů energie a úplným vyzářením uhelných elektráren již v roce 2030. V tomto roce je taky potřeba „nových technologií“ největší. Což částečně kompenzuje v roce 2031 předpokládaný nárůst plynových elektráren. To nemění ale nic na tom, že rok 2030 je podstatně pro nás nejbliž, ze všech tří scénářů, kdy bude potřeba nahradit necelých 38 % kapacitního a necelých 36 % induktivního jalového výkonu (viz Obr. 29 a Obr. 30).



Obr. 29 Podíl výrobních bloků na jalovém výkonu (přebuzení) při DS



Obr. 30 Podíl výrobních bloků na jalovém výkonu (podbuzení) při DS

8 TECHNOLOGIE PRO ŘEŠENÍ VYBRANÝCH PROBLÉMŮ

DEKARBONIZACE

V této kapitole jsou shrnuty různé zařízení, které mají schopnost nahradit buď energii setrvačných hmot poskytovanou běžnými elektrárnami či technologie, kterou jsou schopny dodávat či odebírat jalový výkon. Na závěr kapitoly je pak jejich srovnání.

8.1 FACTS

Flexible Alternating Current Transmission Systems neboli technologie pro řízení činného či jalového výkonu využívané v přenosových sítích zvyšují spolehlivost, přenosové schopnosti, řízení a v neposlední řadě také snižují cenu přenosu elektrické energie v důsledku omezení ztrát. Tyto systémy využívají výkonovou elektroniku, která pak řídí pasivní prvky jako jsou kondenzátory a cívky. [47]

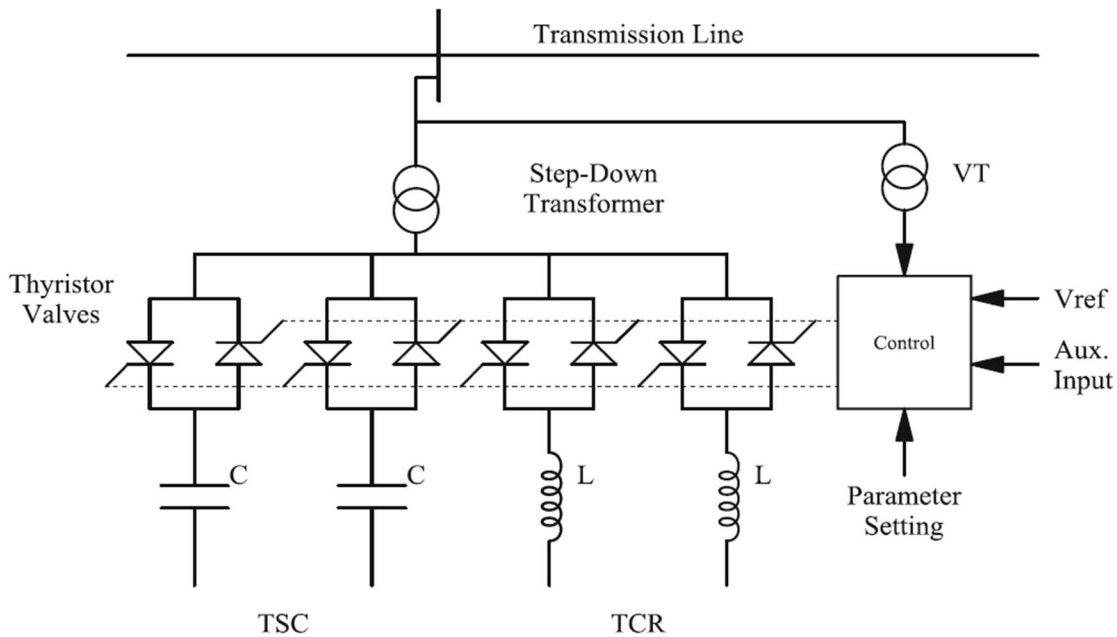
FACTS systémy jsou klíčové pro moderní přenosové sítě, zvláště v kontextu rostoucí integrace obnovitelných zdrojů energie, jelikož pomáhají řešit problémy s kvalitou, napětíovou stabilitou, kapacitou přenosu a řízením toku energie. Díky své schopnosti rychle reagovat na změny v síti a zlepšit celkovou efektivitu přenosu jsou nepostradatelné pro udržení stability a spolehlivosti elektrických sítí. Jejich výhoda spočívá v rychlosti a možnosti častého spínání a taky tedy plynulosti. Zvyšují tedy dynamickou stabilitu a spolehlivost soustavy.

Zařízení FACTS můžeme třídit do tří základních kategorií dle zapojení a to: sériové (TCSC, SSSC), paralelní (SVC, STATCOM) a kombinované (PST, UPFC). [48] [47]

8.1.1 SVC

Statický VAr kompenzátor (Static VAr Compensator) je typ FACTS zařízení, které se skládá z tyristorově spínaných kondenzátorů (TSC = thyristor-switched capacitors), tyristorově řízených tlumivek (TCR = thyristor-controlled reactors) anebo tyristorově spínaných tlumivek (TSR = thyristor-switched reactors). Jalový výkon je dodáváný nebo odebíráný právě přes tyto pasivní prvky. K soustavě je připojen paralelně přes transformátor, jak můžeme vidět na Obr. 25, kde je taky znázorněno nejpoužívanější s TSC a TCR. [49]

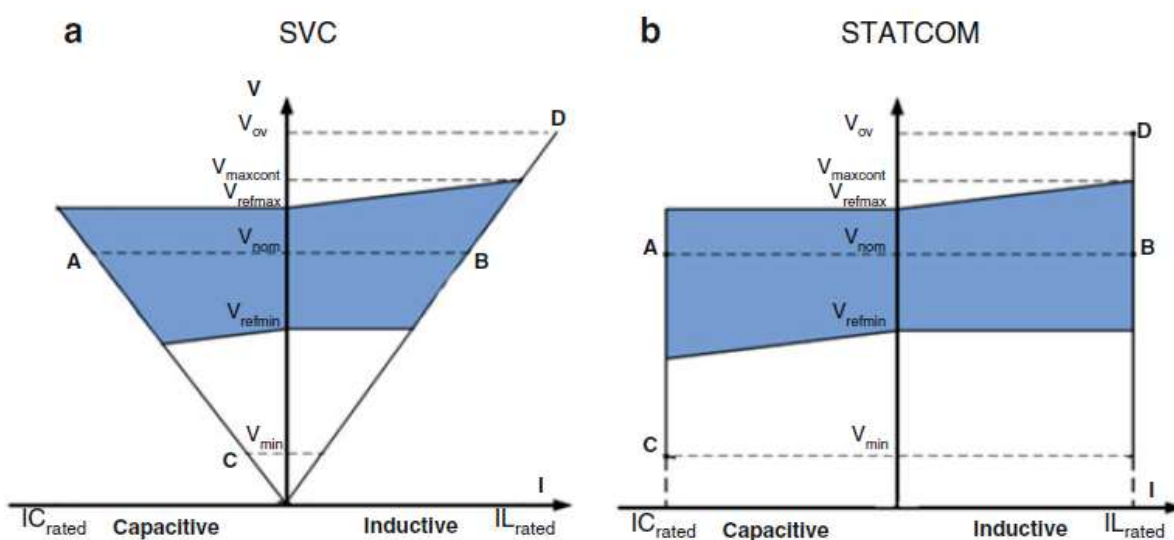
Konstrukce TSR a TSC je podobná TCR, ale rozdíl je takový, že „switched typy“ nejsou regulovány plynule, nýbrž připínají a odepínají tlumivku, respektive kondenzátor po celých násobcích půl period napětí. Nejsou tedy řízeny fázově, ale připínáme jejich celé jmenovité hodnoty. Výhodou na druhou stranu takto řízených prvků je, že TSR a TSC neprodukují žádné vyšší harmonické oproti TCR. [47]



Obr. 25 Obecné schéma SVC [49]

8.1.2 STATCOM

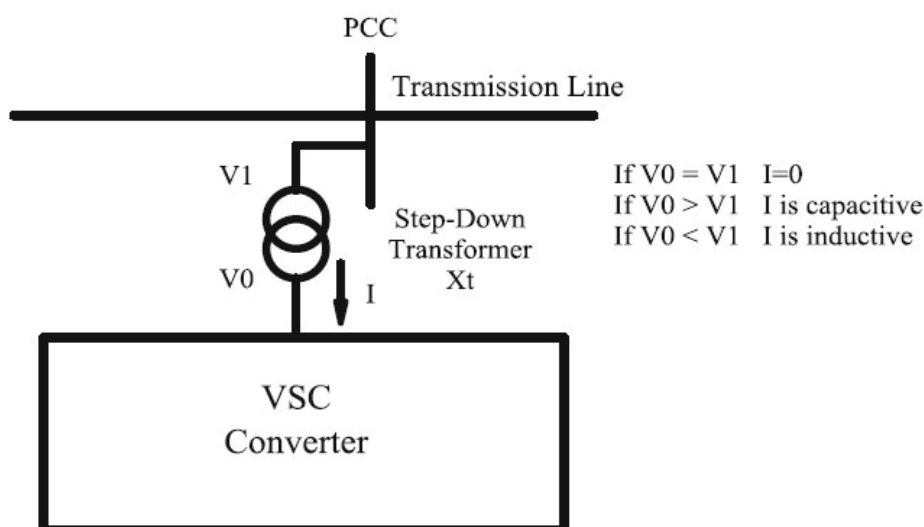
Statické synchronní kompenzátory (static synchronous compensator) jsou nedílnou součástí FACTS, které poskytují možnost řízení jalového výkonu v elektrizačních soustavách a zlepšení kvality elektrické energie. Funguje na principu trojfázového měniče VSC (voltage-sourced converter), který je schopen dodávat nebo odebírat konstantní jalový proud téměř v celém regulačním rozsahu nezávisle na napětí 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 Obr. 26. [49]



Obr. 26 Porovnání STATCOM a SVC, V-A charakteristika [49]

STATCOM reaguje na změny v elektrické soustavě rychleji než jiná zařízení pro řízení jalové výkonu, funguje sice podobně jako SVC, ale využívá pulzně šířkovou modulaci (PWM) k řízení, spolu s IGBT (insulated-gate bipolar tranzistor) tranzistory, které jsou součástí VSC měničů. Pulzně šířková modulace umožňuje STATCOMu rychle a přesně regulovat výstupní napětí, to ale přináší na druhou stranu relativně vysoké ztráty způsobené spínáním. Pro jeho provoz, je ale nutný transformátor pro snížení napětí na úroveň napětí měniče VSC. [49]

Dodávka či odběr jalového výkonu funguje následovně. Pokud je amplituda napětí měniče větší než systému $V_0 > V_1$, tak STACOM dodává do systému jalový výkon (kapacitní charakter). V opačném případě tento výkon absorbuje (induktivní charakter) Při rovnosti napětí $V_0 = V_1$, nedochází k dodávce ani odběru. [49] [47]



Obr. 27 STATCOM [49]

Vztah mezi napětím, proudem a jalovým výkonem se vyjádří následovně: [49]

$$Q = \sqrt{3} * V_1 * I = \sqrt{3} * V_1 * \frac{(V_0 - V_1)}{X_t} \quad (8.1)$$

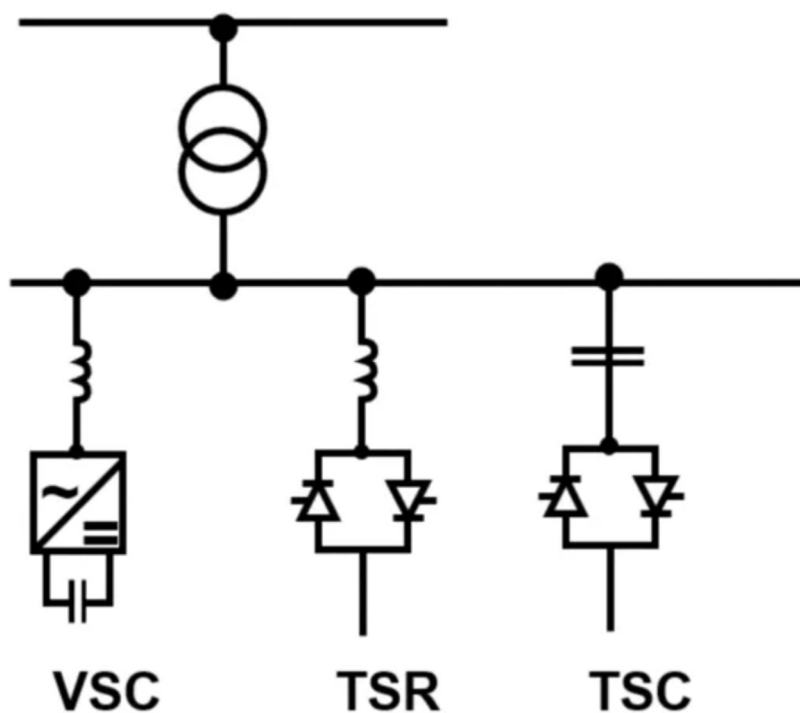
V zapojení na Obr. 27 se STATCOM chová buď jako kondenzátor nebo cívka, není schopen dodat žádnou energii setrvačných hmot do sítě. Je důležité ale zmínit, že v případě připojení energetického zdroje k VSC, je VSC poté schopen absorbovat energii z tohoto zdroje (baterie, kondenzátoru) a dodat jí do elektrizační soustavy. [49]

Ve zjednodušeném zapojení, jak je znázorněno na Obr. 27, se STATCOM chová buď jako kondenzátor nebo jako cívka. Tato obousměrná vlastnost mu umožňuje buď dodávat nebo odebírat jalový výkon z elektrizační soustavy, čímž efektivně reguluje napětí a pomáhá udržovat stabilitu sítě. Důležité je ale zdůraznit, že ve své základní konfiguraci STATCOM není schopen dodávat činný výkon do sítě, jelikož neobsahuje žádný zdroj elektrické energie. [49] [47]

Pokud je k systému připojen zdroj elektrické energie (super kapacitor, baterie), celková funkčnost zařízení se významně zvětší. Zdroj umožňuje STATCOMu absorbovat a akumulovat energii, což následně umožňuje nejen regulovat jalový, ale také činný výkon. STATCOM je poté schopen dodávat akumulovanou energii zpět do střídavé sítě, což je zvláště užitečné v případech, kdy je potřeba rychle reagovat na výpadky výkonu nebo při náhlém špičkovém zatížení. [47] [49]

8.1.3 Hybridní STATCOM

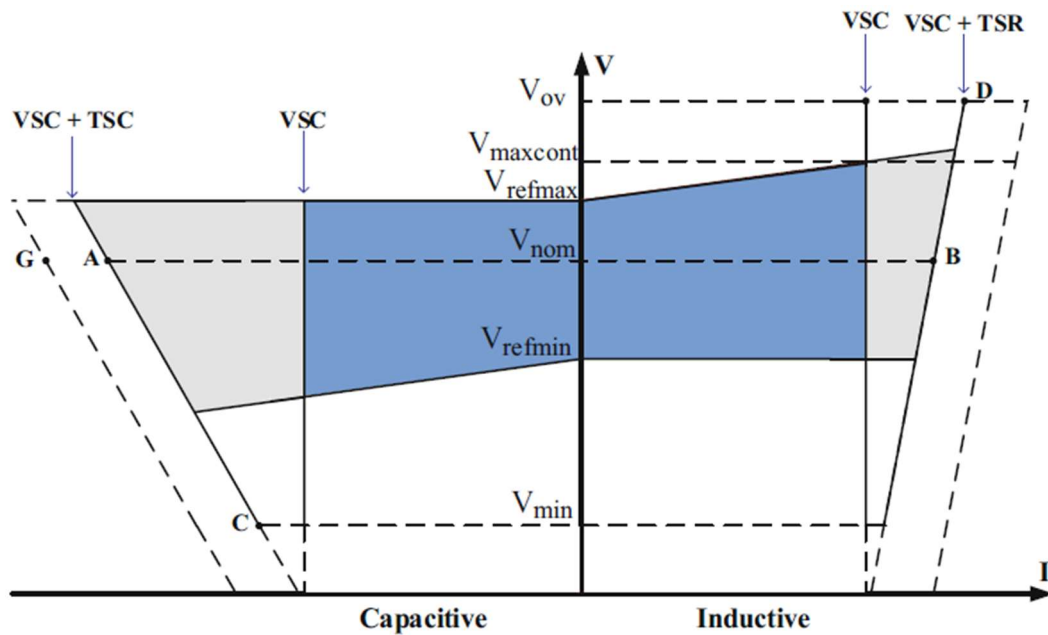
Hybridní STATCOM funguje na principu kombinace rychlého řízení jalového výkonu pomocí kombinace VSC a SVC technologií. VSC umožňuje velmi rychlou odezvu na změny v systému, což je klíčové pro aplikace, kde je požadována rychlá reakce na kolísání napětí. Integrace TSC a TSR rozšiřuje kapacitní a induktivní rozsah zařízení, což umožňuje lepší přizpůsobení různým provozním požadavkům. [50]



Obr. 28 Jednopolový digram hybridního STATCOM s rozšířením TSR a TSC [50]

V praxi to znamená, že TSR zvyšuje induktivní rozsah zařízení a umožňuje rozšíření jeho operačního rozsahu při potlačování přepětí. TSC naopak zvyšuje kapacitní rozsah zařízení. Díky tomu mohou hybridní STATCOMy dosáhnout širokého provozního rozsahu a vysoké dynamické stability zároveň. [50]

Hybridní STATCOMy jsou složitější než klasické STATCOMy nebo SVC, což může zvýšit náklady na návrh, instalaci a údržbu. Složitost vyplývá z kombinace aktivních a pasivních komponentů a jejich koordinace, což na druhou stranu balancuje jeho použitelnost v různých aplikacích. [47]

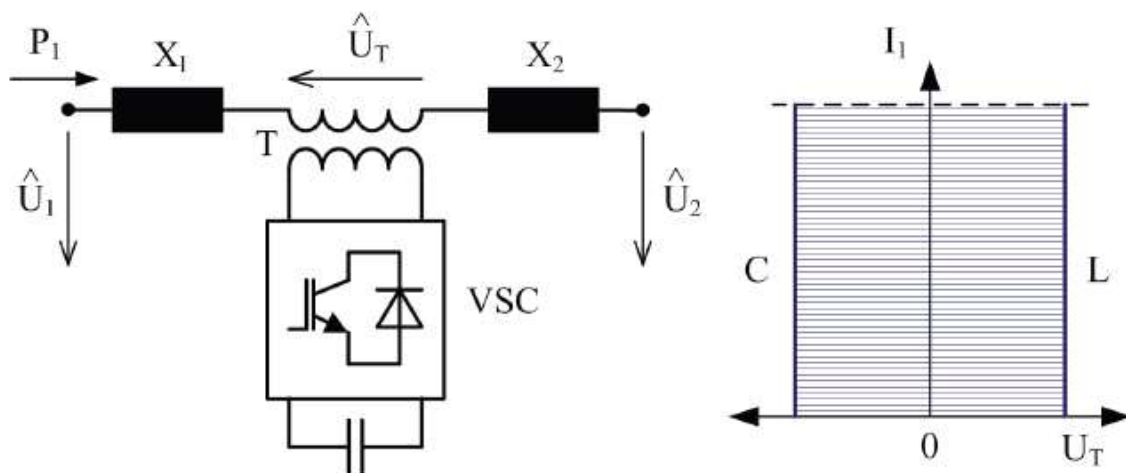


Obr. 29 Pracovní oblast hybridního zařízení STATCOM [50]

8.1.4 SSSC

Statický synchronní sériový kompenzátor (static synchronous series compensator = SSSC) je zařízení používané v elektrických přenosových systémech k regulaci toku elektrické energie přes přenosové linky, tím že mění jejich reaktanci. [47]

SSSC funguje na bázi napěťového zdroje podobně jako STATCOM, ale na rozdíl od STATCOMu, který je zapojen paralelně, je SSSC zapojen sériově s přenosovou linkou. SSSC využívá také můstkový měnič – VSC. Řídicím parametrem je sériově vstříkované napětí \hat{U}_T , které je do systému dodáno pomocí přídavného transformátoru, základní konfigurace je na Obr. 30. [49]



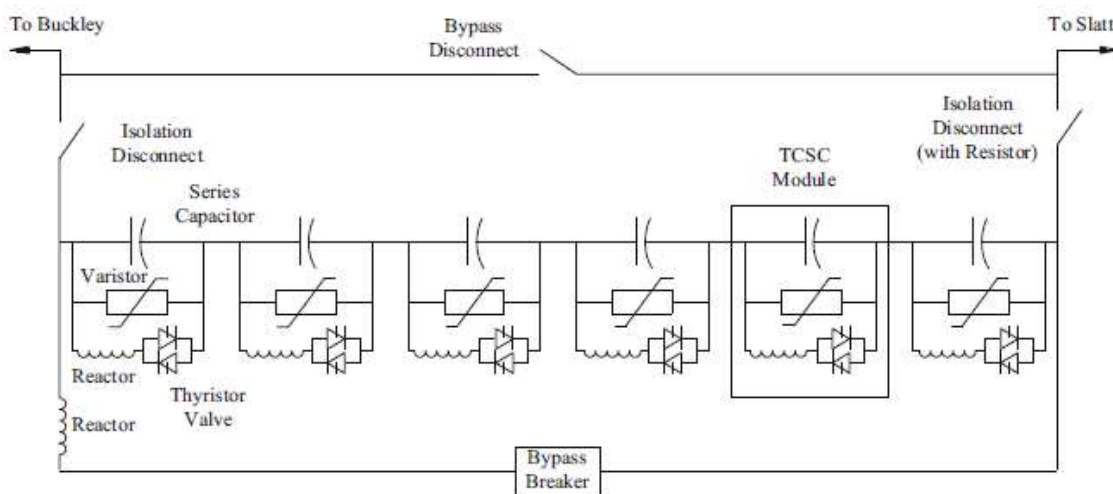
Obr. 30 SSSC a jeho pracovní oblast [47]

Jakmile stejnosměrná větev obsahuje i zdroj elektrické energie, tak je SSSC schopen vyměňovat podobně jako STATCOM činný i jalový výkon. Pomocí vstříkovaného napětí \hat{U}_T se řídí jak amplituda, tak i fáze. [47]

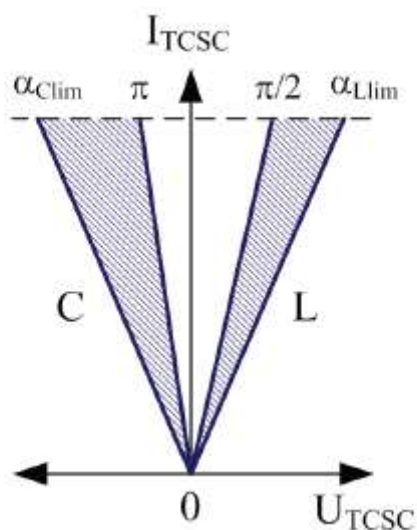
8.1.5 TCSC

Tyristorově řízený sériový kondenzátor (thyristor-controlled series capacitor = TCSC) je další zařízení v rodině FACTS. Poskytuje kontrolu nad reaktancí přenosové linky. K tomuto účelu využívá, jak už název napovídá, tyristorové obvody přes sériově zapojené kondenzátory k řízení napětí. Je to sériově připojená paralelní kombinace pevného kondenzátoru a tyristorově řízené tlumivky. Tato kombinace umožňuje plynulou regulaci indukční a kapacitní reaktance pro základní harmonickou v určitém rozsahu. V-A charakteristika bývá totiž omezena maximálním dovoleným proudem a rozsahy řídicího úhlu tyristorů viz Obr. 32. [47] [49]

Kombinace tyristorově řízených tlumivek a kondenzátorů umožňuje plynule zvyšovat nebo snižovat průtok výkonu na určité přenosové lince podle potřeb sítě, což zlepšuje využití stávající přenosové infrastruktury a zvyšuje spolehlivost sítě. Dynamické řízení pomáhá stabilizovat síť proti krátkodobým kolísáním a oscilacím, čímž se zvyšuje celková stabilita systému. Tímto způsobem mohou snížit reaktanci vedení, a tím taky ovlivnit tok elektrického výkonu. [49]



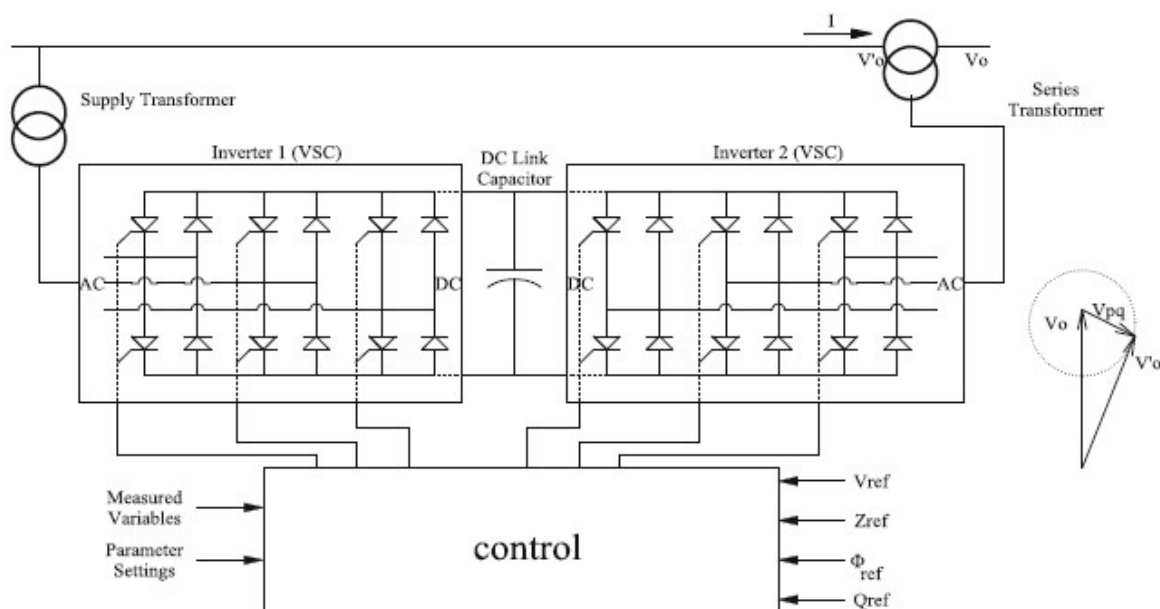
Obr. 31 Zapojení TCSC modulů s možností bypassu v USA [49]



Obr. 32 Pracovní oblast TCSC [47]

8.1.6 UPFC

Univerzální regulátor výkonových toků (unified power flow controller = UPFC) je jedno z nejkompaktnějších FACTS zařízení využíváno především pro nezávislé řízení činného a jalového výkonu v přenosových linkách. Umožňuje souběžné a nezávislé řízení napětí, reaktance a fázového úhlu. UPFC dokáže tedy vykonávat funkce jiných FACTS souběžně, zejména tedy regulaci napětí, řízení výkonových toků což má za následek zlepšení stability. [47]



Obr. 33 UPFC [49]

UPFC řídí protékající výkon vedením injektáží napětí a proudu na linku prostřednictvím dvou měničů (VSC) a dvou transformátorů (sériový a paralelní), které jsou spojeny přes společný

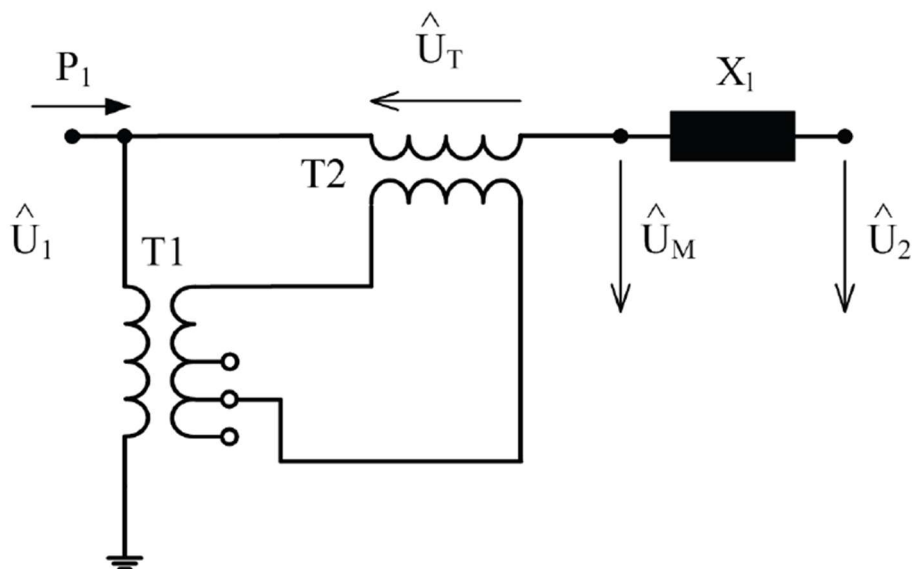
směrný stejnosměrný meziobvod, realizovaný pomocí kondenzátoru (back-to-back spojení), kterým nemůže protékat jalový výkon. Sériový převodník řídí tok výkonu změnou velikosti amplitudy a fáze napětí. Zároveň paralelní převodník reguluje velikost napětí v bodě připojení a dodává nebo absorbuje reaktivní výkon. Tato dvojí schopnost umožňuje UPFC řídit tok činného a reaktivního výkonu ve všech čtyřech kvadrantech a nezávisle na sobě. [47] [49]

8.1.7 PST, PAR

Transformátory s regulací napětí a fáze (Phase-shifting transformers = PST; Phase-angle regulators = PAR) jsou speciální druhy transformátorů využívaných pro řízení toku energie v přenosových sítích. Tyto transformátory umožňují modifikaci fázového úhlu napětí na výstupu ve srovnání se vstupním napětím. Každý transformátor se skládá z paralelního regulačního transformátoru a sériového přídavného, jsou na Obr. 34. [47]

Jak již bylo zmíněno PST fungují na principu dvou vinutí, kde sériovým vinutí se řídí fázový posun a pomocí paralelního vinutí lze činný a jalový výkon odebírat a přesměrovávat do sériového. Tímto způsobem lze přesně kontrolovat, jaký výkon bude linkou protékat, a to jsou schopny řídit toky relativně velkých výkonů i přes jejich malý jmenovitý výkon. [47]

Pomocí různé konstrukce, lze dosáhnout dvou základních režimů. Vstříkovat přídavné sériové napětí \hat{U}_T s konstantním fázovým posuvem vůči napětí \hat{U}_1 , ale s různou amplitudou, regulovanou přepínačem odboček. Potom dochází ke změně fázového posunu a amplitudy. Řídicím parametrem je tedy amplituda \hat{U}_T . [47]



Obr. 34 Transformátor s regulací napětí a fáze [47]

Složitější je pak druhá možnost. Měnit amplitudu a fázi \hat{U}_T , tak že amplitudy vstupního a výstupního napětí zůstanou stejné, ale bude se měnit úhel mezi nimi. Pak se jedná o fázový regulátor (PAR). Realizuje se změnou magnetického obvodu nebo pomocí tyristorově řízené jednotky (TCPAR). [47]

8.1.8 MSC, MSR

Spínaný kondenzátor (mechanically switched capacitor = MSC) a spínaná tlumivka (mechanically switched reactor = MSR) bývají většinou připojeny paralelně k síti. Tato zařízení jsou většinou připojena do sítě tak, že dle potřeby je možné měnit počet odboček, a tedy celkovou připojenou reaktanci, jejich přepínání ale obvykle bývá skokové. Připojený kondenzátor dodává jalový výkon a používají se ke zvýšení napětí v uzlu ES a pomáhá tedy ke stabilizaci napětí. Příklad jejich instalace je na Obr. 35. [47]

Naopak tlumivky jsou schopny odebírat jalový výkon. Bývají již v současnosti nezbytnou součástí přenosových a distribučních vedení, zejména tedy jako kompenzace vysokonapěťových kabelů, které způsobují vzhledem ke své délce velkou kapacitanci. Hrají klíčovou roli v tom, že dokážou spotřebovávat jalový výkon, a tím udržovat napětí v bezpečných mezích. [51] [47]



Obr. 35 Zobrazení instalace MSC v rozvodně v Malajsii [75]

8.2 Uložiště elektrické energie

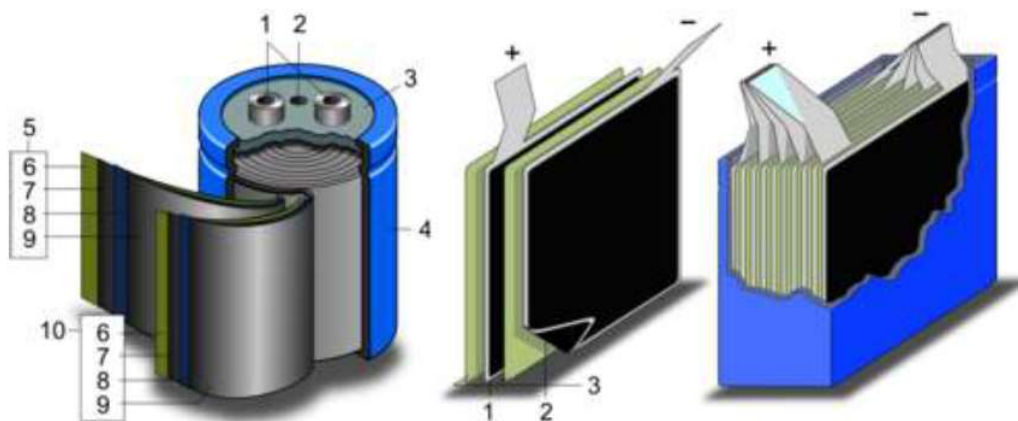
Tato kapitola shrnuje různé dostupné technologie schopné akumulace elektrické energie. Takových zařízení existuje nepřehledné množství. Zde jsou však vyjmenována, zařízení, která jsou pravděpodobně nejvhodnější pro řešení vybraných problémů.

8.2.1 Superkondenzátory (EDLC)

Superkondenzátory (Electrostatic Double-Layer Capacitor = EDLC) jsou zařízení schopná rychle ukládat a uvolňovat velké množství energie. Pracují na principu ukládání elektrické energie v elektrických polích mezi dvěma elektrodami oddělenými elektrolytem. Ionty obsažené v elektrolytu se během nabíjení přesouvají k elektrodám, záporné ionty se deponují na povrch kladné elektrody a kladné ionty se deponují na povrch záporné elektrody. Při vybíjení je tento jev opačný a deponované ionty z obou elektrod se uvolňují zpátky do elektrolytu.

Svou konstrukcí a princip je EDLC více podobný bateriím než klasickým elektrolytickým kondenzátorům, liší se totiž tím, že ukládají energii elektrostaticky bez zapojení chemických reakcí

Svou konstrukcí a princip je EDLC více podobný bateriím než klasickým elektrolytickým kondenzátorům, liší se totiž tím, že ukládají energii elektrostaticky bez zapojení chemických reakcí. Nejpomalejší děj v superkondenzátorech je difuze v elektrolytu, tím se liší oproti třeba lithium-iontových bateriím. Jejich energetická hustota je nižší než u baterií, což omezuje jejich použití na systémy vyžadující rychlou dodávku energie, nehodí se k dlouhodobému ukládání energie. Vyznačují se taky dlouhou živností, dokáží totiž provést až 1 000 000 cyklů. [52] [53]



Obr. 36 Dva typy konstrukce superkondenzátorů. [53]

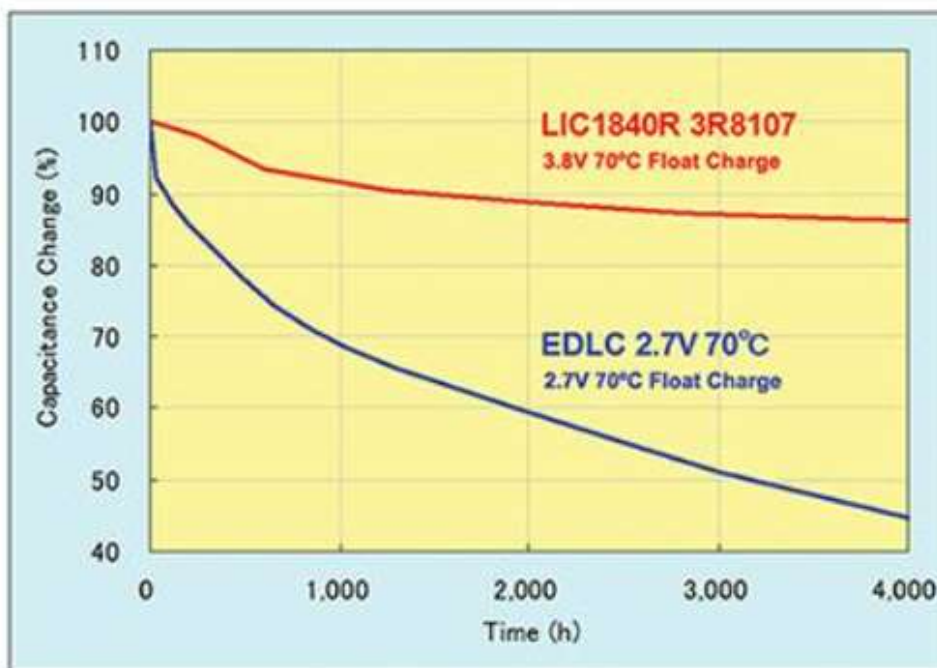
Válcový kondenzátoru (vlevo): 1: svorka, 2: bezpečnostní ventil, 3: svorkovnice, 4: kontejner, 5: kladný pól, 6: separátor, 7: polarizovatelná svorka, 8: kolektor, 9: polarizační elektroda, 10: záporná svorka; Deskový kondenzátoru (vpravo): 1: polarizovatelná svorka s polarizovatelnou elektrodou (kladná), 2: polarizovatelná svorka s polarizovatelnou elektrodou (záporná), 3: separátor

8.2.2 Lithium-iontové uložení

Lithium-iontové baterie jsou jednou z nejrozšířenějších technologií pro ukládání energie díky jejich vysoké energetické hustotě (dokáží dlouhodobě uložit tuto energii) a účinnosti. Pracují na principu pohybu lithných iontů (jejich vnikání do materiálu) mezi kladnou a zápornou elektrodou (u EDLC docházelo k deponaci na povrch u baterií do objemu). Tento proces se nazývá difuzí do pevné fáze a je relativně pomalý, u EDLC dochází k deponaci daleko rychleji. Při nabíjení se uvolňují lithné ionty z kladné elektrody a před elektrolyt se dostávají k elektrodě záporné tvořené grafitem. Čím více iontů se do grafitu dostane tím je větší kapacita baterie. Při vybíjení dochází k opačnému procesu, kdy se lithné ionty dostávají skrz elektrolyt do kladné elektrody, kde se vracení zpět do její struktury. [52]

Podstatný rozdíl mezi lithium-iontových uložení a superkondenzátorech EDLC je takový, že při vybíjení baterií je jejich vybíjecí křivka prakticky konstantní do úplného vybití na rozdíl

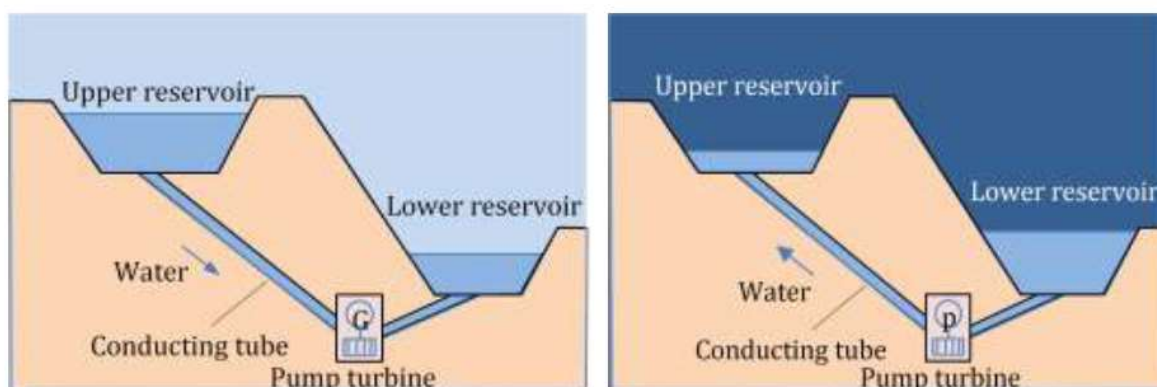
u super kondenzátorů je tato křivka prakticky lineární, a v poslední třetině energie tak zanedbatelná, tak že nemá ani velký význam jej úplně vybit, viz Obr. 37. [52]



Obr. 37 Samovybíjecí křivka EDLC a lithium-iontové baterie [77]

8.2.3 Přečerpávací vodní elektrárny

Přečerpávací vodná elektrárny jsou jednou z nestarších technologií pro ukládání energie. Fungují na principu přečerpávání vody z nižší nádrže do vyšší nádrže pomocí přebytečné elektrické energie a následného využití gravitace a kinetické energie při průtoku vody zpět dolů přes turbíny, které pomocí generátorů vyrábějí elektřinu. Jejich živnost je daleko vyšší než u běžných bateriových a kondenzátorových uložišť, vyžadují však vhodné místo na provoz. Pomáhají vyrovnávat síť jak při přebytku elektrické energie, tak jejím nadbytku v síti, jsou tedy velice důležitým prvkem při narůstající složce OZE v energetickém mixu.



Obr. 38 Princip PVE [52]

8.3 Rotační kompenzátory

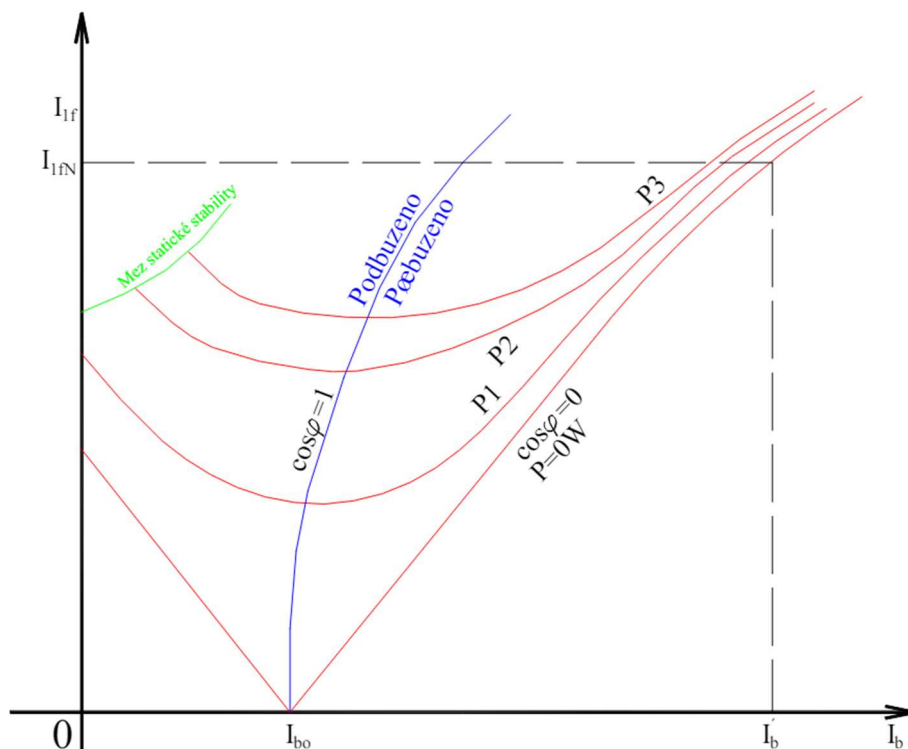
Rotační typy kompenzačních prvků jsou shrnuty v následující kapitole.

8.3.1 Synchronní kompenzátory

Tato zařízení jsou v podstatě synchronní motory bez mechanického zatížení, které mohou buď dodávat nebo odebírat jalový výkon od sítě. Protože nejsou mechanicky zatíženy, mají odlehčenou konstrukci. Synchronní kompenzátory se využívají ke zlepšování účinníku, k regulaci napětí v sítích a ke zlepšení stability přenosu.

Při přebuzení se synchronní kompenzátor chová podobně jako kondenzátor a dodává do sítě jalový výkon, který potřebují ke své činnosti transformátory a asynchronní motory. Současně taky zvyšuje napětí v místě kompenzátoru, protože se zmenšují úbytky způsobené jalovým proudem v přenosovém vedení. Při malých zatížení, kdy se uplatňují kapacity přenosového vedení, pracuje kompenzátor v podbuzeném stavu, chová se tedy jako tlumivka a kompenzuje vliv kapacitní sítě. [40]

Charakteristické vlastnosti kompenzátoru plynou z jeho V-křivek (vyjadřují závislost statorového proudu na budícím proudu při konstantním činném výkonu, viz Obr. 39), protože kompenzátor pracuje při nulovém (konstantním) činném výkonu. Maximální proud podbuzeného kompenzátoru je při $I_b = 0$. [40] [54]

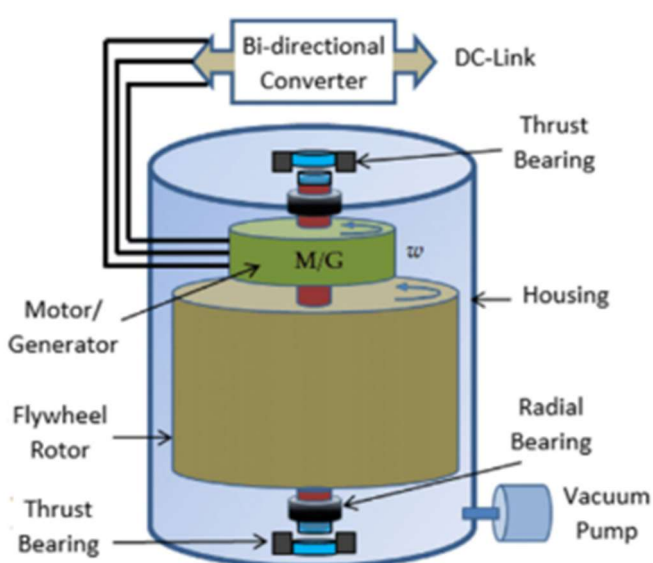


Obr. 39 V-křivky synchronního stroje [74]

8.3.2 Setrvačníky

Jednoduchá zařízení, které umožňuje akumulaci energie v jeho rotačním pohybu, tedy uchovává elektrickou energii v energii kinetické. Během nabíjení dosahuje rychlost otáčení 30 000 – 40 000 otáček za minutu. Při vybíjení se rychlost snižuje a setrvačnick pak působí jako generátor, kdy jeho kinetická energie je přeměněna zpět na elektrickou energii.

Vyznačují se vysokou účinností (až 90 %) a minimálními požadavky na údržbu. Setrvačnick jsou zvláště užitečné pro aplikace, kde je potřeba rychlého vyrovnávání energetických výkyvů. Jejich vysoká výkonová hustota a dlouhá životnost (až 20 let) je činí atraktivními pro integraci do sítí s velkým obsahem OZE. Lze je taky kombinovat se synchronními kompenzátory, kdy dokážou až zdvojnásobit jejich setrvačnost. [55] [53] [56]



Obr. 40 Setrvačnick pro akumulaci elektrické energie [72]

8.4 Výsledek analýzy

V této kapitole jsou prezentovány výsledky srovnání různých technologických řešení, která byla zvažována pro kompenzaci úbytku tradičních konvenčních zdrojů energie.

V Tab. 3 jsou prezentovány výsledky srovnání různých technologických řešení, která byla zvažována pro kompenzaci úbytku tradičních konvenčních zdrojů energie. Jsou zde shrnuty rozdílnosti týkající se konkrétních technologií, jejich odhadované ceny, vlastnosti, výhody a nevýhody. K analýze bylo použito několik druhů rozdílných zdrojů [53] [49] [57] [58] [59] [60] [61].

Tab. 3 Porovnání technologií

Technologie	Řízení Q	Řízení P	Zdroj setrvačnosti	Cena (USD)*	Výhody	Nevýhody	
FACTS	STATCOM	Ano	Ne	Ano**	55 - 142 €/kVAr	Rychlá odezva, zlepšuje stabilitu napětí, redukuje harmonické zkreslení a tlumí oscilace napětí (flickr), široká VA charakteristika, řízení účinníku	Dražší než SVC a TCSC, pouze symetrický rozsah
	hybridní STATCOM	Ano	Ne	Ano**	55 - 142 €/kVAr	Rychlá odezva, zlepšuje stabilitu napětí, tlumí oscilace napětí (flickr), širší VA charakteristika než klasický STATCOM, možnost rozšíření VA, řízení účinníku	Zdroj vyšších harmonických (záleží na typu SVC zařízení)
	SVC	Ano	Ne	Ne	40 - 116 €/kVAr	Stabilizace napětí, tlumí oscilace napětí (flickr), odzkoušené řešení ve světě	Nižší rychlost odezvy než STATCOM, limitující VA charakteristika, zdroj vyšších harmonických
	SSSC	Ano	Ano	Ano**	55-163 €/kVAr	Rychlá odezva, zlepšuje stabilitu napětí, přenosovou kapacitu a tlumí výkonové oscilace	Vyšší ztráty než jiné sériové regulátory
	TCSC	Ano	Ano	Ne	30 - 110 €/kVAr	Zlepšuje přenosovou kapacitu, stabilizace napětí	úzká VA charakteristika, omezení kvůli tyristorům
	UPFC	Ano	Ano	Ne	280-568 €/kVAr	nejvšestranější, řízení P a Q v jeden moment	Vysoké pořizovací náklady, složitost systému
	PST/PAR	Ano	Ano	Ne	200-400 €/kVAr	zlepšuje stabilitu napětí, řízení fázového úhlu	Vyšší pořizovací náklady, složitost
OSTATNÍ	Synchronní kompenzátory	Ano	Ne	Ano	25-100 €/KVAR	Zlepšuje stabilitu napětí, zdroj přirozené setrvačnosti a zkratového proudu	Vyšší hlučnost, vyšší náklady na údržbu a provoz
	Setrvačníky	Ne	Ne	Ano	25 - 100 €/kW	Rychlá reakce, vysoká účinnost, zdroj přirozené setrvačnosti, dlouhá životnost	Omezená doba použití, vyšší hlučnost
	Synchronní kompenzátory se setrvačníkem	Ano	Ne	Ano	50 - 150 €/kVAr	Kombinace výhod SC a setrvačníku zdroj setrvačnosti, řízení napětí, zdroj zkratového výkonu, efektivnější než SC, kompenzace účinníku	Vyšší hlučnost, vyšší ztráty než synchronní kompenzátory
	MSC / MSR	Ano	Ne	Ne	<30 €/kVAr	Nízké pořizovací náklady, jednoduchost, zvýšení stability napětí	Pomalejší rychlost
	Lithium-iontové baterie	Ano	Ne	Ano***	100 - 500 €/kW	Stabilizace napětí, uložení el. energie	Vysoké náklady na zařízení
	EDLC	Ano	Ne	Ano***	400 - 1260 €/kW	Stabilizace napětí, dlouhá životnost, velká kapacita	Vysoké náklady na zařízení, nemožnost dlouhodobě skladovat el. energii, zabírají 3x více místa než LI-ION baterie
PVE	Ano	Ano	Ano	> 2700 €/kW	zdroj přirozené setrvačnosti, zlepšení kvality sítě, dlouhodobé uložení el. energie	Vysoké náklady na stavbu a řízení, velikost zařízení	

* Ceny jsou pouze orientační a vychází jako průměrné hodnoty z více zdrojů, podstatné je, že reflektují, že je jeden typ dražší/levnější než druhý typ a případně koliknásobně.

** Za předpokladu externího zdroje elektrické energie.

*** Za předpokladu, že budou například součástí některého FACTS systému.

9 NÁVRH ŘEŠENÍ VYBRANÝCH PROBLÉMŮ

DEKARBONIZACE

Tato kapitola se zabývá návrhem instalace zařízení potřebných pro řešení vybraných dvou problémů, a to chybějící možností řídit jalový výkon a setrvačnosti. Na základě provedené analýzy dostupných zařízení (viz kapitola 8 a Tab. 3), které mohou nahradit vlastnosti chybějících konvenčních zdrojů, se tato kapitola soustředí na konkrétní návrh řešení a jejich časový harmonogram v rámci různých scénářů budoucího rozvoje přenosové soustavy.

V současné přenosové soustavě bývá problém s přebytkem kapacitního jalového výkonu spíše než s jeho nedostatkem. Tento problém je způsoben přebytkem výroby velkých elektráren oproti spotřebě a také provozování linek pod jejich přirozeným výkonem. Tento přebytek jalového výkonu způsobuje přepětí a ztráty v přenosové soustavě a je nutná jeho kompenzace. To může evokovat, že navrhované řešení nahrazovat i kapacitní dodávku jalového výkonu není potřeba, ale opak může být pravdou. S úbytkem konvenčních zdrojů a nárůstem spotřeby, který je například predikován v MAF 2022 (viz kapitola 7.1.1) se může situace obrátit a objeví se problém s nedostatkem kapacitního jalového výkonu, což bude vést k podpětí a nestabilitě celé sítě. Proto je nezbytné myslet na obě strany kompenzačního výkonu, jak kapacitního, tak induktivního, a zajistit jejich nahrazení.

9.1 Výběr zařízení

Na základě důkladné analýzy a porovnání různých technologií, které mohou kompenzovat vlastnosti tradičních konvenčních zdrojů energie a přispět ke stabilitě přenosové soustavy, byly zvoleny konkrétní zařízení, která nejlépe odpovídají požadavkům na řešení vybraných problémů. Po zvážení všech aspektů, jako jsou rychlost dodávky a odezvy, stabilizace napětí, náklady, životnost a v neposlední řadě taky schopnost poskytovat setrvačnost a zkratový proud, je doporučena instalace hybridních STATCOM zařízení s externím zdrojem energie a synchronních kompenzátorů se setrvačником.

První vybrané zařízení je hybridní STATCOM s externím zdrojem energie. Toto zařízení je klíčové pro udržení stability napětí v přenosové soustavě díky své rychlé odezvě na změny zatížení. Hybridní STATCOM je schopen rychle reagovat na náhlé výpadky nebo neočekávané změny zatížení, což je zásadní pro stabilitu sítě, zejména v době, kdy se zvyšuje podíl obnovitelných zdrojů energie, které jsou inherentně proměnlivé. Kromě toho hybridní STATCOM zlepšuje celkovou kvalitu elektrické energie a jeho široká V-A charakteristika umožňuje efektivní poskytování jalového výkonu v různých napěťových podmínkách. Ačkoli je hybridní STATCOM dražší než některé alternativní technologie, jako jsou SVC a TCSC, jeho přínosy v oblasti stabilizace napětí, zdroje setrvačnosti a možnost rozšíření rozsahu než u klasických STATCOMů ospravedlňují vyšší pořizovací náklady.

Druhým zařízením je synchronní kompenzátor se setrvačником. Toto zařízení kombinuje výhody synchronního kompenzátoru a setrvačnicku, čímž poskytuje jak setrvačnost, tak stabilizaci napětí ve velmi dobrém rozsahu. Synchronní kompenzátor se setrvačником je

schopen dodat potřebný zkratový proud, což je kritické pro ochranu a bezpečnost sítě a zároveň přispívá k udržení frekvence a celkové stability sítě. Tato technologie je zvláště vhodná pro instalaci v oblastech s vysokou proměnlivostí zatížení a tam, kde je nezbytné zajištění setrvačnosti sítě a zkratového proudu. I když synchronní kompenzátory mohou být zdrojem hluku a vyžadují pravidelnou údržbu, jejich dlouhá životnost a schopnost poskytovat kritické síťové vlastnosti z nich činí nezbytnou součást stabilizace přenosové soustavy.

Celkově kombinace těchto dvou technologií přináší každá své specifické výhody, které jsou klíčové pro řešení různých aspektů stability přenosové soustavy, a nejenom vybraných problémů. Tato kombinace zařízení zajistí, že přenosová soustava bude schopna efektivně reagovat na výzvy spojené s dekarbonizací a s rostoucí integrací obnovitelných zdrojů energie, což povede ke stabilní a kvalitní dodávce elektrické energie.

Veškeré specifikace a detaily jednotlivých technologií byly vybrány z již existujících instalací ve světě a jsou uvedeny v Tab. 3. Odkazy na studie a analýzy, které podporují výběr těchto technologií, lze nalézt v referencích. [62] [63] [64] [65] [66] [67]

9.1.1 Hybridní STATCOM s externím zdrojem energie

Hybridní STATCOM kombinuje výhody klasického zařízení STATCOM s dalšími FACTS, což umožňuje rozšíření provozního rozsahu poskytovaného jalového výkonu. Jako alternativa se nabízí klasický STATCOM a chybějící požadovaný rozsah doplnit o MSC nebo MSR zařízení, ale vzhledem k tomu, že každé zařízení zabírá nějaké místo a rozšiřování a stavění nových rozvodů je problematický a zdoluhavý proces, je vhodné využít rozšíření samotného STATCOMu, který dokáže s externím zdrojem poskytovat i setrvačnost a s dalšími FACTS zařízeními také rozšířenou regulaci jalového výkonu.

Na základě zjištěných informací je reálné očekávat, že zprovoznění zařízení STATCOM trvá minimálně 3,5 roku [49], což zahrnuje všechny fáze od návrhu přes výrobu až po instalaci a testování. Není zde započítán legislativní prvek, tedy stavební povolení a další nutné požadavky, je tedy nutné počítat, že tento čas bude pravděpodobně delší. Realistický scénář instalace bude přibližně 5 let. Návrh řešení už předpokládá s funkčními zařízeními v uvedených letech. Proto je důležité začít s přípravami a plánováním co nejdříve, aby byla zařízení funkční již v letech uvedených v harmonogramech jednotlivých scénářů. [49]

Použité předpokládané řešení, má následující parametry:

- Kapacitní výkon: 300 MVar
- Induktivní výkon: 150 MVar
- Příspěvek k setrvačnosti: 3 GWs

9.1.2 Synchronní kompenzátor s integrovaným setrvačником

Synchronní kompenzátory se setrvačником jsou rotační stroje schopné dodávat a absorbovat jalový výkon a zároveň poskytovat významnou setrvačnost, jedná se o kombinaci samostatných kompenzátorů a setrvačníků (viz kapitola 8.3.1 a 8.3.2). Toto řešení je vybráno z několika důvodů, které budou popsány níže.

Tato zařízení představují optimální řešení pro zajištění stability přenosové soustavy díky své schopnosti poskytovat výrazně vyšší setrvačnost než standardní synchronní kompenzátory bez setrvačniku, což je klíčové pro stabilizaci frekvence a snížení rychlosti změny frekvence v síti. [66]

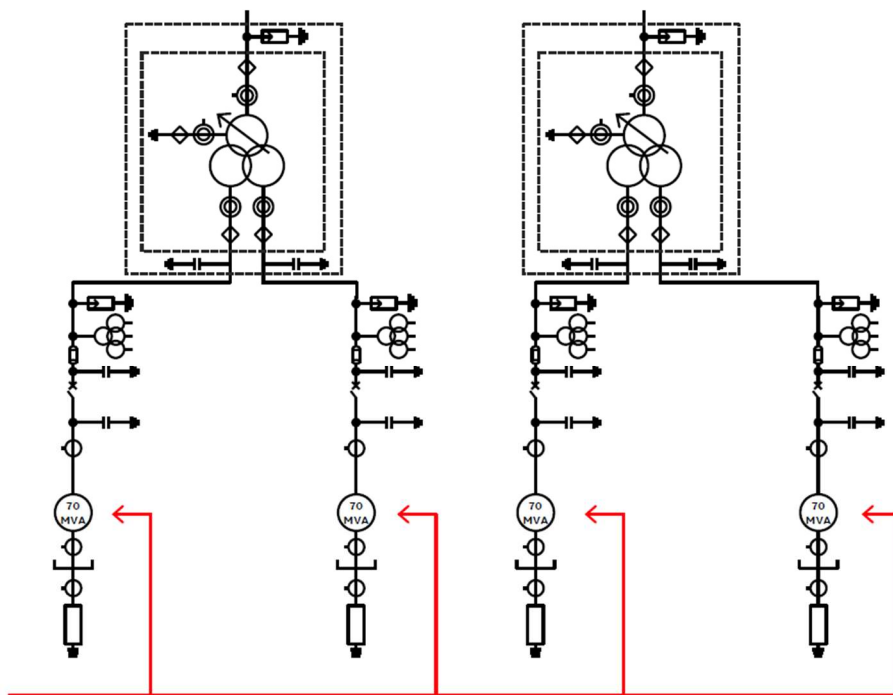
Použití více menších synchronních kompenzátorů namísto jednoho velkého zařízení přináší významné výhody modulárnosti. Menší jednotky mohou být strategicky rozmístěny po síti, což umožňuje lepší přizpůsobení specifickým potřebám jednotlivých oblastí. Tento přístup také zvyšuje celkovou spolehlivost sítě, protože selhání jedné jednotky nebude mít tak výrazný dopad na stabilitu sítě jako selhání jediné velké jednotky. [66]

Další výhodou synchronních kompenzátorů se setrvačником jsou nižší ztráty. Podle studie od ABB [66] mají velké synchronní kompenzátory až 3,5krát vyšší ztráty ve srovnání s menšími jednotkami. Tento faktor činí menší synchronní kompenzátory se setrvačником ekonomicky výhodnějšími z dlouhodobého hlediska, protože nižší ztráty přispívají k celkové efektivitě systému a snižují provozní náklady.

Synchronní kompenzátory mohou být dodány a uvedeny do provozu již od 12 měsíců, [68] což je ideální pro splnění první potřeby nahrazení vlastností uhelných elektráren, v roce 2026. Rychlá instalace a uvedení do provozu jsou klíčové pro zajištění stability sítě v krátkodobém horizontu. Toto řešení umožňuje rychlé a efektivní pokrytí potřebné setrvačnosti a řízení reaktance, což je nezbytné pro stabilizaci přenosové soustavy a zajištění spolehlivé dodávky elektrické energie. [66]

Nabízené použité řešení, od společnosti ABB [66], má následující parametry:

- Kapacitní výkon: 70 MVar
- Induktivní výkon: 35 MVar
- Příspěvek k setrvačnosti: 0,45 GWs na jednotku



Obr. 41 Řešení ABB, 4 SC s integrovanými setrvačníky [66]

9.2 Umístění zařízení

Je nezbytné, aby byla tato kompenzační zařízení umístěna v pilotních uzlových oblastech sítě, kde jsou nyní situovány uhelné elektrárny nebo jiné kompenzační zařízení. Případně kde se v blízké budoucnosti předpokládají, resp. již vznikají problémy s napětím. Optimalizace jejich rozmístění po celé přenosové soustavě je klíčová, protože instalace v rozvodnách, kde je dostatek kompenzačních prostředků by nemusela přinést očekávané výsledky.

Je taky důležité počítat s umístěním kompenzačních zařízení z hlediska možnosti výstavby a místa. Nejvhodnější místa na umístění zařízení by měly být aktuální rozvodny, respektive jejich rozšíření (pokud je možnost je rozšířit), případně pole napětí 220 kV, které na některých místech bude postupně zanikat a mělo by se postupně používat pouze napětí 400 kV, tyto pole tedy už nebudou potřeba. Může se, ale stát, že některé rozvodny prostě nebudou dostatečné a bude potřeba je rozšířit, tedy vykoupit okolní pozemky, toto může celý proces hodně prodloužit.

Vzhledem k existenci velkých zdrojů elektrické energie, jako jsou jaderné elektrárny Dukovany a Temelín, a případnému novému jadernému bloku není nutné instalovat kompenzační zařízení na jihu Čech a Moravy. Jaderné elektrárny budou totiž nadále poskytovat potřebnou kompenzaci.



Obr. 42 Příklad instalace synchronní kompenzátoru v Jižním Walesu (Austrálie) [68]

9.3 Návrh instalace zařízení v čase

V této kapitole je časový harmonogram pro všechny uvažované scénáře.

9.3.1 Konzervativní scénář

Konzervativní scénář předpokládá pomalejší přechod od fosilních paliv k obnovitelným zdrojům, což minimalizuje rizika spojená s rychlou integrací nových technologií a poskytuje dostatek času na instalaci potřebných zařízení. Potřebná opatření a nutnost instalace zařízení jsou shrnuty v Tab. 4, kde je uveden minimální počet zařízení potřebných k zachování současné schopnosti přispívat k setrvačnosti a možnosti dodávat či odebírat jalový výkon v přenosové soustavě.

V roce 2026 je plánována instalace čtyř zařízení SC se setrvačником pro kompenzaci prvního poklesu možnosti řízení napětí a setrvačnosti po prvním útlumu uhelných elektráren. SC se setrvačником jsou vybrány pro svou schopnost dodávky setrvačnosti a efektivní stabilizaci napětí. V roce 2027 je nutné instalovat další SC se setrvačником pro dodání potřebné setrvačnosti a zkratového proudu, což je zásadní pro bezpečnost přenosové soustavy.

V roce 2028 je plánována instalace jednoho SC se setrvačником po dalších útlumech uhelných elektráren, který zajistí další dodatečnou stabilitu. V roce 2031 se doporučuje instalace dvou hybridních zařízení STATCOM s externím zdrojem, protože v tento rok dojde k předpokládanému velkému odstavení uhelných zdrojů. Do roku 2038 je třeba do rozveden přidat další tři hybridní zařízení STATCOM s externím zdrojem, čímž se zcela nahradí

chybějící vlastnosti uhelných zdrojů. Bude tedy nahrazena jejich možnost řízení napětí a setrvačnosti v síti.

Tab. 4 Návrh opatření pro KS

druh technologie	2026	2027	2028	2031	2038
Hybridní STATCOM				2	3
SC se setrvačником	4	1	1		

9.3.2 Progresivní scénář

Progresivní scénář zahrnuje rychlejší a ambicióznější přechod k obnovitelným zdrojům, což vyžaduje rychlejší iniciativu a investice do nových technologií a nasazení kompenzačních zařízení, aby byla zajištěna stabilita, a tedy bezpečnosti přenosové soustavy. Potřebná opatření a nutnost instalace zařízení jsou shrnuty v Tab. 5, kde je uveden minimální počet zařízení potřebných k zachování současné schopnosti přispívat k setrvačnosti a možnosti dodávat či odebírat jalový výkon v přenosové soustavě.

V roce 2026 je zase plánována instalace čtyř zařízení SC se setrvačником pro kompenzaci řízení napětí a setrvačnosti po prvním útlumu uhelných elektráren. V roce 2027 je nutné instalovat další SC se setrvačником pro dodání potřebné setrvačnosti a zkratového proudu, což je zásadní pro bezpečnost přenosové soustavy.

V roce 2028 je plánována instalace jednoho SC se setrvačником po dalších útlumech uhelných elektráren, který zajistí další dodatečnou stabilitu. V roce 2031 se doporučuje instalace dvou hybridních zařízení STATCOM s externím zdrojem, protože v tento rok dojde k předpokládanému velkému odstavení uhelných zdrojů. Do roku 2033 je třeba do rozvoden přidat další tři hybridní zařízení STATCOM s externím zdrojem, čímž se zcela nahradí chybějící vlastnosti uhelných zdrojů a bude nahrazena jejich možnost řízení napětí a setrvačnosti v síti.

Tab. 5 Návrh opatření pro PS

druh technologie	2026	2027	2028	2031	2033
Hybridní STATCOM				2	3
SC se setrvačником	4	1	1		

9.3.3 Dekarbonizační scénář

Dekarbonizační scénář je nejambicióznější a klade důraz na rychlou a intenzivní transformaci energetického sektoru směrem k nízkoemisnímu modelu. Tento scénář zahrnuje nasazení kompenzačních zařízení v co nejkratším čase, aby byla zajištěna stabilita přenosové soustavy při vysokém podílu obnovitelných zdrojů. Potřebná opatření a nutnost instalace zařízení jsou shrnuty v Tab. 6, kde je uveden minimální počet zařízení potřebných k zachování současné schopnosti přispívat k setrvačnosti a možnosti dodávat či odebírat jalový výkon v přenosové soustavě.

V roce 2026 je plánována instalace čtyř zařízení SC se setrvačником pro kompenzaci prvního poklesu možnosti řízení napětí a setrvačnosti po prvním útlumu uhelných elektráren. V roce 2027 je nutné instalovat další SC se setrvačником pro dodání potřebné setrvačnosti a zkratového proudu, což je zásadní pro bezpečnost přenosové soustavy. V roce 2028 je plánována instalace jednoho SC se setrvačником po dalších útlumech uhelných elektráren, který zajistí další dodatečnou stabilitu. V následujících dvou letech je doporučena instalace pěti hybridních zařízení STATCOM s externím zdrojem, protože v těchto letech dojde k předpokládanému úplnému odstavení uhelných zdrojů. Těmito zařízeními se zcela nahradí chybějící vlastnosti uhelných zdrojů a bude nahrazena jejich možnost řízení napětí a setrvačnosti v síti.

Tab. 6 Návrh opatření pro DS

druh technologie	2026	2027	2028	2029	2030
Hybridní STATCOM				2	3
SC se setrvačником	4	1	1		

10 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala analýzou dopadů dekarbonizace energetiky na řízení přenosové soustavy v České republice a na návrh klíčových opatření k řešení výzev spojených s přechodem k obnovitelným zdrojům energie. Hlavním cílem bylo identifikovat výzvy, které tento přechod přináší, a navrhnout vhodná technologická řešení k zajištění bezpečného přechodu v tomto období v přenosové soustavě.

Na začátku práce byl zpracován přehled současných přístupů k řízení přenosové soustavy v České republice. Byly identifikovány klíčové problémy a vliv dekarbonizačního procesu na přenosovou soustavu, dále byly vybrány dva identifikované problémy – úbytek možnosti řízení jalového výkonu a setrvačnosti v síti. Tento úbytek je způsoben přechodem od konvenčních zdrojů energie, jako jsou uhelné elektrárny, k obnovitelným zdrojům, které často neposkytují dostatečnou potřebnou stabilitu a setrvačnost.

V průběhu práce byly prozkoumány různé scénáře dle MAF 2022 – Konzervativní, Progresivní a Dekarbonizační – které reprezentují různé předpokládané cesty transformace energetického sektoru a jejich postupný vliv na přenosovou soustavu. Každý scénář zahrnuje odlišné tempo a vyžaduje technologické zásahy k udržení stability sítě.

Navržená opatření jsou klíčová pro úspěšnou transformaci energetického sektoru a zachování současné schopnosti řídit přenosovou síť. Navrhnutá byla instalace zařízení jako je hybridní STATCOM a synchronní kompenzátory se setrvačником. Výběr byl zvolen na základě jejich vlastností, ale velkou roli taky hrála rychlost dodávky.

Při implementaci zařízení se však mohou objevit rizika, se kterými je taky nutné počítat. Jedná se o rizika legislativní, ale hlavně uzemní, tzn. že současné pozemky, na kterých rozvodny stojí nebudou svou velikostí dostatečné pro umístění zařízení. Může se taky stát, že jakmile tyto stejné problémy (s úbytkem konvenčních zdrojů) začnou řešit i okolní státy tak dříve nebo později může dojít u dodavatelských firem k vyčerpání výrobních kapacit a ke zpoždění dodávek nutných technologií. Největší riziku je to u Dekarbonizačního scénáře, protože ten počítá s nejrazantnější odstávkou uhelných elektráren, následuje Progresivní a nejméně by tato rizika měla ovlivnit instalace podle Konzervativního scénáře.

Závěrem této diplomové práce je nutné zdůraznit, že dekarbonizace energetiky představuje komplexní výzvu, která vyžaduje integraci nových technologií a inovativních řešení pro zajištění stability a bezpečnosti přenosové soustavy. Práce poskytuje náhled na potenciální problémy a navrhla soubor technologických opatření pro jejich řešení v různých vývojových scénářích. Implementace těchto opatření zajistí, že přenosová soustava bude schopna efektivně reagovat na výzvy spojené s dekarbonizací a rostoucí integrací obnovitelných zdrojů energie jak v distribuci, tak případně v přenosové síti, což zajistí, že dodávka elektrické energie bude stále stabilní a kvalitní. Důkladné plánování a optimalizace rozmístění kompenzačních zařízení spolu s použitím moderních technologií tvoří pevný základ pro stabilní a udržitelnou energetickou budoucnost České republiky.

Do budoucna by se další výzkum měl zaměřit na analýzu potřebné minimální setrvačnosti pro bezpečný provoz přenosové soustavy a řešení dalších identifikovaných problémů.

Seznam literatury

- [1] mpo.cz, Únor 2023. [Online]. Available: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/elektroenergetika/2023/5/Hodnoceni-zdrojove-primerenosti-elektrizacni-soustavy-CR-2022.pdf>. [Přístup získán 3 Březen 2024].
- [2] www.mpo.cz, říjen 2023. [Online]. Available: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/2023/10/Aktualizace_NKEP_10_2023_final.pdf. [Přístup získán 9 12 2023].
- [3] T. Smejkal, „Vnitrostátní plán ČR v oblasti energetiky a klimatu,“ Ministerstvo průmyslu a obchodu, 18 Květen 2023. [Online]. Available: https://www.mzp.cz/konference_cista_mobilita_2023/1_den/OPSZP-2_5_Tomas_Smejkal_MPO-20230518.pdf.
- [4] European Council, 20 Prosinec 2023. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/>. [Přístup získán 4 Březen 2024].
- [5] „STUDY - Sector coupling: how can it be enhanced in the EU to foster grid stability and decarbonise?,“ European Union, 2018. [Online]. Available: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/626091/IPOL_STU\(2018\)626091_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/626091/IPOL_STU(2018)626091_EN.pdf). [Přístup získán 26 Duben 2024].
- [6] „What exactly is meant by “sector coupling”?,“ Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action DE, 2016. [Online]. Available: <https://www.bmwk-energie.wende.de/EWD/Redaktion/EN/Newsletter/2016/13/Meldung/direkt-answers.html>. [Přístup získán 26 Duben 2024].
- [7] „Pařížská dohoda o změně klimatu,“ Evropská rada, 2024. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/cs/policies/climate-change/paris-agreement/>.
- [8] K. Appunn, „Sector coupling - Shaping an integrated renewable energy system,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/sector-coupling-shaping-integrated-renewable-power-system>.
- [9] TOMAN, Petr. Provoz distribučních soustav. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [10] Energy Education, [Online]. Available: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Law_of_conservation_of_energy. [Přístup získán 18 11 2023].
- [11] Jaderné a klasické elektrárny ISBN 978-80-01-04936-5, Praha: ČVUT, 2011.
- [12] MASTNÝ, Petr. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [13] „ Společně pro životní prostředí,“ ČEZ a.s., Květen 2024. [Online]. Available: <https://www.cez.cz/cs/nove-jaderne-zdroje/spolecne-pro-zivotni-prostredi>.
- [14] [Online]. Available: ČESKO. § 2 odst. 1 písm. a) zákona č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů - znění od 24. 1. 2023. In: Zákony pro lidi.cz [online]. © AION CS 2010–2023 [cit. 18. 11. 2023]. Available: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2>.
- [15] T. Molek, „Bioplyn a bioplynové stanice v ČR,“ oenergetice.cz, 31 Srpen 2015. [Online]. Available: <https://oenergetice.cz/plyn/bioplyn-a-bioplynove-stance-v-cr>.
- [16] „ ENTSO-E Transparency Platform,“ [Online]. Available: <https://transparency.entsoe.eu/dashboard/show>. [Přístup získán 2024].
- [17] A. Mudruňková, „Elektroenergetika 3 - výroba elektrické energie,“ Portál inovace vyššího odborného vzdělávání, Prosinec 18. [Online]. Available: <https://www.vovcr.cz/odz/tech/284/page02.html>.
- [18] „ČEPS a.s.,“ Duben 2024. [Online]. Available: <https://www.ceps.cz/cs/>.

-
- [19] „ČESKO. § 2 písm. v) vyhlášky č. 408/2015 Sb., o Pravidlech trhu s elektřinou - znění od 1. 7. 2023. In: <i>Zákony pro lidi.cz</i> [online]. © AION CS 2010–2023 [cit. 5. 12. 2023]. Available: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2015-408#p2-1-v>,” [Online].
- [20] J. Budín, „ČEPS, a.s. - profil společnosti a činnosti,” *oenergetice.cz*, 1 Březen 2015. [Online]. Available: <https://oenergetice.cz/spolecnosti-cr/ceps-s-profil-spolecnosti-cinnosti>.
- [21] „ČEPS a.s., Kodex PS,” [Online]. Available: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>. [Přístup získán Leden 2024].
- [22] Josef Tlustý a kol., *Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí* ISBN 978-80-01-04939-6, PRAHA: ČVUT, 2011.
- [23] A. Mudruňková, „Elektroenergetika 2 – elektrizační soustava, sítě a vedení,” VOŠ informačních studií a SŠ elektrotechniky, multimédií a informatiky, 18 Prosinec 2018. [Online]. Available: <https://www.vovcr.cz/odz/tech/283/page06.html>.
- [24] „ČEPS a.s., Kodex PS - Část V,” 5 Prosinec 2023. [Online].
- [25] „ČEPS a.s., Kodex PS - Část II,” 1 Leden 2024. [Online]. Available: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>.
- [26] „ČEPS a.s., Kodex PS - Část I,” 5 Prosinec 2022. [Online]. Available: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>.
- [27] „entsoe.eu - Electricity Balancing,” [Online]. Available: https://www.entsoe.eu/network_codes/eb/. [Přístup získán Duben 2024].
- [28] „OTE - O společnosti,” [Online]. Available: <https://www.ote-cr.cz/cs/o-spolecnosti/zakladni-udaje>. [Přístup získán 2024].
- [29] „ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD - O ERÚ,” 8 Srpen 2023. [Online]. Available: <https://eru.gov.cz/o-eru>.
- [30] *MÁSLO, Karel. Stabilita elektrizační soustavy. Brno: Vysoké učení technické, 2021. ISBN 978-80-214-5941-0.*
- [31] *Kolektiv autorů - Řízení a stabilita elektrizační soustavy. 2013. [Praha]: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN ISBN978-80-260-4461-1.*
- [32] K. Noháč, „Pracovní oblast a provozní diagram alternátoru,” Západočeská univerzita v Plzni, [Online]. Available: <https://home.zcu.cz/~nohac/E2/Elektřarny2-cast09-v3.pdf>. [Přístup získán 4 Duben 2024].
- [33] J. Špetlík, „Elektrárny,” Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky ČVUT, Technická 2, 166 27 Praha 6, [Online]. Available: https://www.powerwiki.cz/attach/ENY/A1M15ENY_PR6.pdf.
- [34] „System Needs Study,” ENTSO-E, Květen 2023. [Online]. Available: <https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/tyndp-documents/TYNDP2022/public/syst-dynamic-operational-challenges.pdf>.
- [35] „Inertia and Rate of Change of Frequency (RoCoF),” ENTSO-E, 16 12 2020. [Online]. Available: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/SOC%20documents/Inertia%20and%20RoCoF_v17_clean.pdf. [Přístup získán 10 12 2023].
- [36] „K. Máslo: Dynamická stabilita a setrvačnost soustavy, *Energetika* 1/2020, str. 317-322“.
- [37] „Inertia and the Power Grid - Paul Denholm, Trieu Mai, Rick Wallace Kenyon, Ben Kroposki, and Mark O'Malley, Contract No. DE-AC36-08GO28308,” National laboratory of the U.S. Department of Energy, Květen 2020. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/73856.pdf>.
- [38] „GRID-FORMING CONVERTERS – INEVITABILITY, CONTROL STRATEGIES AND CHALLENGES IN FUTURE GRIDS APPLICATION,” *CIREC Workshop - Ljubljana*, Červen 2018.
-

-
- [39] P. Denholm a B. Kroposki, „Understanding Power Systems,“ national laboratory of the U.S. Department of Energy, Květen 2022. [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/82269.pdf>.
- [40] J. MĚŘIČKA, V. HAMATA a P. VOŽENÍLEK, Elektrické stroje, ISBN 80-01-01020-1, 1993.
- [41] „nationalgrid.com,“ 26 Červen 2023. [Online]. Available: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/what-is-renewable-energy-storage>. [Přístup získán 2024].
- [42] Matthew Hutson, „The Renewable-Energy Revolution Will Need Renewable Storage,“ The NEW YORKER, 18 Duben 2022. [Online]. Available: <https://www.newyorker.com/magazine/2022/04/25/the-renewable-energy-revolution-will-need-renewable-storage>.
- [43] „ČESKO. § 23 odst. 3 písm. p) zákona č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon) - znění od 1. 4. 2024. In: Zákony pro lidi.cz [online]. © AION CS 2010–2024 [cit.],“ [Online].
- [44] „ČSRES,“ CO JE TO ENERGETICKÉ DATOVÉ CENTRUM?, [Online]. Available: <https://www.csres.cz/cz/aktuality/tiskove-zpravy/co-je-energeticke-datove-centrum.html>. [Přístup získán Květen 2024].
- [45] Prof. Ing. Pavel Santarius, CSc., Ing. Josef Gavlas, Ing. Miloslav Kužela - Kvalita dodávané elektrické energie v sítích nízkého napětí, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2001.
- [46] „www.mpo.cz,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/elektroenergetika/2023/5/Hodnoceni-zdrojove-primerenosti-elektrizacni-soustavy-CR-2022.pdf>.
- [47] J. Tlustý a kol., Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav, ISBN 978-80-01-04940-2, Praha: ČVUT, 2011.
- [48] E. Majling, „oenergetice.cz,“ 13 Červen 2015. [Online]. Available: <https://oenergetice.cz/elektrina/zpusoby-rizeni-vykonovych-toku-v-prenosovych-soustavach>. [Přístup získán 3 Březen 2024].
- [49] Andersen, Bjarne & Nilsson, Stig. (2020). Flexible AC Transmission Systems FACTS: FACTS. 10.1007/978-3-319-71926-9.
- [50] „STATCOM - Hybrid,“ Hitachi Energy, [Online]. Available: <https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/facts/statcom/statcom-hybrid>. [Přístup získán Květen 2024].
- [51] „Dekompenzační tlumivky,“ [Online]. Available: <http://www.rapenergo.cz/kompenzace-uciniku/dekompenzacni-tlumivky>. [Přístup získán Květen 2024].
- [52] J. Libich, „Superkondenzátor vs. baterie: parametry a použití,“ Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, Ústav elektrotechnologie ODB, 18 Listopad 2020. [Online]. Available: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/21462-superkondenzator-vs-baterie-parametry-a-pouziti>.
- [53] „Prospects for Large-Scale Energy Storage in Decarbonised Power Grids,“ *International Energy Agency, France*, 2009.
- [54] I. Petricek, „Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola, Liberec, příspěvková organizace,“ Synchronní stroje II - Alternátor, 1 Červenec 2023. [Online]. Available: https://www.pslib.cz/ivo.petricek/prezentace/vyuka_ESP/4_rocnik/06_alternator.ppsx.
- [55] „Akumulace elektřiny, Petr Dvořák, Petr Bača, David Pléha,“ Vysoké učení technické v Brně, 2011. [Online]. Available: <https://oze.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektriny>.
- [56] „Eselec,“ 8 Únor 2023. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/specification-design-synchronous-condenser-system-renewable-/>.
-

-
- [57] „Automatic voltage control & digital developments - ABB Grids and Power Quality solutions,“ Bucharest, 2019.
- [58] „The development of a techno-economic model for the assessment of the cost of flywheel energy storage systems for utility-scale stationary applications, Md Mustafizur Rahman, Eskinder Gemechu, Abayomi Olufemi Oni, Amit Kumar,“ *Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 10-203 Donadeo Innovation Centre for Engineering, 9211 116 Street NW, Edmonton, Alberta T6G 1H9, Canada*, 2021.
- [59] M. Gomez, O. Abarategui a I. Zamora, „FACTS devices in Distributed Generation - University of the Basque Country“.
- [60] H. Asper, „Enhancing Loadability of Transmission Lines Using Static Synchronous Series Compensator Devices: A Case Study of the Syrian Network,“ 12 Leden 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/2/390>.
- [61] „Comprehensive Comparison of FACTS Devices for Exclusive Loadability Enhancement - Arthit Sode-Yome, Nadarajah Mithulananthan, Kwang Y. Lee,“ 2011. [Online]. Available: https://web.ecs.baylor.edu/faculty/lee/papers/journal/2013/2013IEEJ_Sode-Yome.pdf.
- [62] „Synchronous Condenser,“ [Online]. Available: <https://www.entsoe.eu/Technopedia/techsheets/synchronous-condenser>. [Přístup získán 2024].
- [63] „ENTSO-E Technology Factsheets,“ 23 Březen 2021. [Online]. Available: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/RDC%20documents/2021_Technology%20Factsheet.pdf.
- [64] „Modern Power Systems - Synchronous condensers restore grid inertia in two major European projects,“ 14 Prosinec 2022. [Online]. Available: <https://www.modernpowersystems.com/features/featuresynchronous-condensers-restore-grid-inertia-in-two-major-european-projects-10437049/>.
- [65] „STANDARD DESIGN OF E-STATCOM OF THE GERMAN,“ Netztransparenz, [Online]. Available: <https://www.netztransparenz.de/en/Ancillary-Services/Voltage-stability/Reactive-power/Standardized-design-of-E-STATCOM>. [Přístup získán 2024].
- [66] C. PAYERL, „Introduction to ABB Synchronous Condenser offering - A solution to improve grid strength,“ ABB, 16 Prosinec 2020. [Online]. Available: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107991A6324&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>. [Přístup získán 2024].
- [67] A. J. Cohen, „GE Energizes the Largest and First-of-its-Kind STATCOM Scheme in Europe for UK’s National Grid,“ 7 Květen 2020. [Online]. Available: <https://www.ge.com/news/press-releases/ge-energizes-the-largest-and-first-of-its-kind-statcom-scheme-in-europe-for-uks>. [Přístup získán Květen 2024].
- [68] „ABB synchronous condenser packages Boosting power grid stability and resilience,“ 2 Březen 2021. [Online]. Available: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK108197&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- [69] „nanoenergies.cz,“ [Online]. Available: <https://nanoenergies.cz/slovník/zaloha-pro-automatickou-regulaci-frekvence-fcr>. [Přístup získán 7 Duben 2024].
- [70] C. prof. Ing. Vítězslav Benda, „Applikace solárních systémů,“ [Online]. Available: <https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=1938>.
- [71] „ČTVRTLETNÍ ZPRÁVA O PROVOZU ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY ČR ZA IV. ČTVRTLETÍ 2023,“ eru.gov.cz, [Online]. Available: <https://eru.gov.cz/ctvrtletni-zprava-o-provozu-elektrizacni-soustavy-cr-za-iv-ctvrtleti-2023>.
- [72] Department of EEE, Siksha ‘O’ Anusandhan Deemed To Be University, Bhubaneswar, India, „Flywheel energy storage systems: A critical review on technologies, applications,
-

-
- and future prospects," 2011. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2050-7038.13024>.
- [73] „Energetický regulační úřad," [Online]. Available: https://eru.gov.cz/sites/default/files/obsah/obrazky/mapa_distributori_elektrina.png. [Přístup získán 2024].
- [74] „ELEKTRICKÉ STROJE II - TUO VŠB FEI," [Online]. Available: https://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/stroje/mereni_SYfaz+buzr.pdf. [Přístup získán Květen 2024].
- [75] „Siemens - energy, Mechanically switched capacitors (MSC/MSCDN)," [Online]. Available: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product/msc-mscdn.html>. [Přístup získán 2024].
- [76] Elizabeth Morse, „NATIONAL GEOGRAPHIC," [Online]. Available: <https://education.nationalgeographic.org/resource/non-renewable-energy/>. [Přístup získán 18 11 2023].
- [77] A. Sato, „Lithium Ion Capacitors: An Effective EDLC Replacement," DigiKey, 7 Leden 2015. [Online]. Available: <https://www.digikey.com.br/pt/articles/lithium-ion-capacitors-an-effective-edlc-replacement>.

Seznam obrázků

Obr. 1 Výhled vývoje netto instalovaného výkonu fotovoltaických a větrných elektráren Dekarbonizační predikce [46].....	15
Obr. 2 Nárůst instalovaného výkonu v jednotlivých letech v ČR [16].....	16
Obr. 3 Sector coupling – integrace elektrické energie z OZE [8].....	19
Obr. 4 Uspořádání elektrizační soustavy [9].....	20
Obr. 5 Podíl instalovaného výkonu elektráren v ČR, rok 2024 [16].....	23
Obr. 6 Denní diagram zatížení ČR 4.4.2024 [16].....	24
Obr. 7 Působení distributorů na území ČR [73].....	25
Obr. 8 Vazby mezi systémovými službami, podpůrnými službami a ČEPS [22].....	27
Obr. 9 Povolený rozsah napětí pro jednotlivé napěťové hladiny [24].....	28
Obr. 10 Doba plné aktivace různých SVR [69].....	32
Obr. 11 Časový rozsah přechodných dějů v ES [30].....	36
Obr. 12 Rozdělení pojmu stability ES [31].....	36
Obr. 13 Model výpadku vedení [30].....	38
Obr. 14 Diagram mezních zatížení alternátoru elektrárenského bloku 235 MVA. [32].....	39
Obr. 15 Znázornění rozdělení energie dodané do sítě při výpadku zdroje [37].....	41
Obr. 16 Příklad měsíční produkce 10 kWp modulu [70].....	42
Obr. 17 Bilance elektřiny ČR 2024 [71].....	43
Obr. 18 Vývoj spotřeby dle MAF 2022 [46].....	51
Obr. 19 Podíl výrobních bloků na energii setrvačných hmot – rok 2024.....	52
Obr. 20 Podíl výrobních bloků na energii setrvačných hmot při KS.....	52
Obr. 21 Podíl výrobních bloků na energii setrvačných hmot při PS.....	53
Obr. 22 Podíl výrobních bloků na energii setrvačných hmot při DS.....	53
Obr. 23 Podíl výrobních bloků na jalovém výkonu (přebuzení) – rok 2024.....	54
Obr. 24 Podíl výrobních bloků na jalovém výkonu (podbuzení) – rok 2024.....	55
Obr. 25 Podíl výrobních bloků na jalovém výkonu (přebuzení) při KS.....	56
Obr. 26 Podíl výrobních bloků na jalovém výkonu (podbuzení) při KS.....	56
Obr. 27 Podíl výrobních bloků na jalovém výkonu (přebuzení) při PS.....	57
Obr. 28 Podíl výrobních bloků na jalovém výkonu (podbuzení) při PS.....	57
Obr. 29 Podíl výrobních bloků na jalovém výkonu (přebuzení) při DS.....	58
Obr. 30 Podíl výrobních bloků na jalovém výkonu (podbuzení) při DS.....	58
Obr. 31 Obecné schéma SVC [49].....	60
Obr. 32 Porovnání STATCOM a SVC, V-A charakteristika [49].....	60
Obr. 33 STATCOM [49].....	61
Obr. 34 Jednopolový digram hybridního STATCOM s rozšířením TSR a TSC [50].....	62
Obr. 35 Pracovní oblast hybridního zařízení STATCOM [50].....	63
Obr. 36 SSSC a jeho pracovní oblast [47].....	63
Obr. 37 Zapojení TCSC modulů s možností bypassu v USA [49].....	64
Obr. 38 Pracovní oblast TCSC [47].....	65
Obr. 39 UPFC [49].....	65
Obr. 40 Transformátor s regulací napětí a fáze [47].....	66
Obr. 41 Zobrazení instalace MSC v rozvodně v Malajsii [75].....	67
Obr. 42 Dva typy konstrukce superkondenzátorů. [53].....	68
Obr. 43 Samovybíjecí křivka EDLC a lithium-iontové baterie [77].....	69
Obr. 44 Princip PVE [52].....	69
Obr. 45 V-křivky synchronního stroje [74].....	70
Obr. 46 Setrvačnick pro akumulaci elektrické energie [72].....	71
Obr. 47 Řešení ABB, 4 SC s integrovanými setrvačníky [66].....	76
Obr. 48 Příklad instalace synchronní kompenzátoru v Jižním Walesu (Austrálie) [68].....	77

Seznam tabulek

Tab. 1 Instalovaný výkon různých typů elektráren v ČR, rok 2024 [16]	23
Tab. 2 Seznam elektráren v PS	50
Tab. 3 Porovnání technologií	72
Tab. 4 Návrh opatření pro KS	78
Tab. 5 Návrh opatření pro PS	78
Tab. 6 Návrh opatření pro DS	79

Seznam příloh

Příloha 1 Vývoj jalového výkonu při PS	89
Příloha 2 Vývoj jalového výkonu při DS	89
Příloha 3 Vývoj jalového výkonu při KS	90
Příloha 4 Vývoj setrvačnosti při PS	90
Příloha 5 Vývoj setrvačnosti při DS	90
Příloha 6 Vývoj setrvačnosti při KS	91

TYP	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Q-																		
VODNÍ	18,88%	18,88%	18,88%	18,73%	18,36%	18,01%	18,01%	16,96%	16,43%	16,43%	16,43%	16,43%	16,43%	15,45%	15,45%	15,45%	15,45%	15,45%
UHELNÉ	39,85%	39,85%	39,85%	34,59%	32,83%	31,67%	17,42%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
PLYNOVÉ	15,31%	15,31%	15,31%	15,98%	17,63%	19,21%	19,21%	23,89%	26,29%	26,29%	26,29%	26,29%	26,29%	24,72%	24,72%	24,72%	24,72%	24,72%
JADERNÉ	25,97%	25,97%	25,97%	25,76%	25,26%	24,77%	24,77%	23,34%	22,60%	22,60%	22,60%	22,60%	22,60%	27,23%	27,23%	27,23%	27,23%	27,23%
NOVÁ ZAŘÍZENÍ	0,00%	0,00%	0,00%	4,94%	5,92%	6,33%	20,59%	35,81%	34,68%	34,68%	34,68%	34,68%	34,68%	32,60%	32,60%	32,60%	32,60%	32,60%
Q+																		
VODNÍ	11,26%	11,26%	11,26%	11,18%	10,99%	10,80%	10,80%	10,25%	9,97%	9,97%	9,97%	9,97%	9,97%	9,19%	9,19%	9,19%	9,19%	9,19%
UHELNÉ	41,47%	41,47%	41,47%	36,04%	34,29%	33,17%	18,24%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
PLYNOVÉ	13,32%	13,32%	13,32%	13,92%	15,39%	16,81%	16,81%	21,06%	23,27%	23,27%	23,27%	23,27%	23,27%	21,45%	21,45%	21,45%	21,45%	21,45%
JADERNÉ	33,95%	33,95%	33,95%	33,72%	33,14%	32,58%	32,58%	30,92%	30,06%	30,06%	30,06%	30,06%	30,06%	35,52%	35,52%	35,52%	35,52%	35,52%
NOVÁ ZAŘÍZENÍ	0,00%	0,00%	0,00%	5,15%	6,18%	6,63%	21,56%	37,77%	36,71%	36,71%	36,71%	36,71%	36,71%	33,85%	33,85%	33,85%	33,85%	33,85%

Příloha 2 Vývoj jalového výkonu při DS

TYP	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Q-																		
VODNÍ	18,88%	18,88%	18,88%	18,73%	18,36%	18,01%	18,01%	16,96%	16,43%	16,43%	16,43%	16,43%	16,43%	15,45%	15,45%	15,45%	15,45%	15,45%
UHELNÉ	39,85%	39,85%	39,85%	34,59%	32,83%	31,67%	31,67%	28,85%	18,06%	18,06%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
PLYNOVÉ	15,31%	15,31%	15,31%	15,98%	17,63%	19,21%	19,21%	23,89%	26,29%	26,29%	26,29%	26,29%	26,29%	24,72%	24,72%	24,72%	24,72%	24,72%
JADERNÉ	25,97%	25,97%	25,97%	25,76%	25,26%	24,77%	24,77%	23,34%	22,60%	22,60%	22,60%	22,60%	22,60%	27,23%	27,23%	27,23%	27,23%	27,23%
NOVÁ ZAŘÍZENÍ	0,00%	0,00%	0,00%	4,94%	5,92%	6,33%	6,33%	6,96%	16,62%	16,62%	34,68%	34,68%	34,68%	32,60%	32,60%	32,60%	32,60%	32,60%
Q+																		
VODNÍ	11,26%	11,26%	11,26%	11,18%	10,99%	10,80%	10,80%	10,25%	9,97%	9,97%	9,97%	9,97%	9,97%	9,19%	9,19%	9,19%	9,19%	9,19%
UHELNÉ	41,47%	41,47%	41,47%	36,04%	34,29%	33,17%	33,17%	30,42%	19,12%	19,12%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
PLYNOVÉ	13,32%	13,32%	13,32%	13,92%	15,39%	16,81%	16,81%	21,06%	23,27%	23,27%	23,27%	23,27%	23,27%	21,45%	21,45%	21,45%	21,45%	21,45%
JADERNÉ	33,95%	33,95%	33,95%	33,72%	33,14%	32,58%	32,58%	30,92%	30,06%	30,06%	30,06%	30,06%	30,06%	35,52%	35,52%	35,52%	35,52%	35,52%
NOVÁ ZAŘÍZENÍ	0,00%	0,00%	0,00%	5,15%	6,18%	6,63%	6,63%	7,34%	17,59%	17,59%	36,71%	36,71%	36,71%	33,85%	33,85%	33,85%	33,85%	33,85%

Příloha 1 Vývoj jalového výkonu při PS

TYP	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Kinetická energie																		
VODNÍ	12,08%	12,08%	12,08%	12,03%	11,90%	11,77%	11,77%	11,38%	11,17%	11,17%	11,17%	11,17%	11,17%	9,95%	9,95%	9,95%	9,95%	9,95%
UHELNÉ	32,21%	32,21%	32,21%	28,06%	26,87%	26,15%	14,38%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
PLYNOVÉ	8,35%	8,35%	8,35%	8,75%	9,74%	10,70%	10,70%	13,66%	15,24%	15,24%	15,24%	15,24%	15,24%	13,57%	13,57%	13,57%	13,57%	13,57%
JADERNÉ	47,36%	47,36%	47,36%	47,15%	46,64%	46,14%	46,14%	44,62%	43,80%	43,80%	43,80%	43,80%	43,80%	49,97%	49,97%	49,97%	49,97%	49,97%
NOVÁ ZAŘÍZENÍ	0,00%	0,00%	0,00%	4,01%	4,85%	5,23%	17,00%	30,34%	29,78%	29,78%	29,78%	29,78%	29,78%	26,51%	26,51%	26,51%	26,51%	26,51%

Příloha 5 Vývoj setrvačnosti při DS

TYP	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Kinetická energie																		
VODNÍ	12,08%	12,08%	12,08%	12,03%	11,90%	11,77%	11,77%	11,38%	11,17%	11,17%	11,17%	11,17%	11,17%	9,95%	9,95%	9,95%	9,95%	9,95%
UHELNÉ	32,21%	32,21%	32,21%	28,06%	26,87%	26,15%	26,15%	24,44%	15,51%	15,51%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
PLYNOVÉ	8,35%	8,35%	8,35%	8,75%	9,74%	10,70%	10,70%	13,66%	15,24%	15,24%	15,24%	15,24%	15,24%	13,57%	13,57%	13,57%	13,57%	13,57%
JADERNÉ	47,36%	47,36%	47,36%	47,15%	46,64%	46,14%	46,14%	44,62%	43,80%	43,80%	43,80%	43,80%	43,80%	49,97%	49,97%	49,97%	49,97%	49,97%
NOVÁ ZAŘÍZENÍ	0,00%	0,00%	0,00%	4,01%	4,85%	5,23%	5,23%	5,90%	14,27%	14,27%	29,78%	29,78%	29,78%	26,51%	26,51%	26,51%	26,51%	26,51%

Příloha 4 Vývoj setrvačnosti při PS

TYP	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Q-																		
VODNÍ	18,88%	18,88%	18,88%	18,73%	18,36%	18,01%	18,01%	16,96%	16,43%	16,43%	16,43%	16,43%	16,43%	15,45%	15,45%	15,45%	15,45%	15,45%
UHELNÉ	39,85%	39,85%	39,85%	34,59%	32,83%	31,67%	31,67%	28,85%	18,06%	18,06%	18,06%	18,06%	18,06%	16,98%	16,98%	0,00%	0,00%	0,00%
PLYNOVÉ	15,31%	15,31%	15,31%	15,98%	17,63%	19,21%	19,21%	23,89%	26,29%	26,29%	26,29%	26,29%	26,29%	24,72%	24,72%	24,72%	24,72%	24,72%
JADERNÉ	25,97%	25,97%	25,97%	25,76%	25,26%	24,77%	24,77%	23,34%	22,60%	22,60%	22,60%	22,60%	22,60%	27,23%	27,23%	27,23%	27,23%	27,23%
NOVÁ ZAŘÍZENÍ	0,00%	0,00%	0,00%	4,94%	5,92%	6,33%	6,33%	6,96%	16,62%	16,62%	16,62%	16,62%	16,62%	15,62%	15,62%	32,60%	32,60%	32,60%
Q+																		
VODNÍ	11,26%	11,26%	11,26%	11,18%	10,99%	10,80%	10,80%	10,25%	9,97%	9,97%	9,97%	9,97%	9,97%	9,19%	9,19%	9,19%	9,19%	9,19%
UHELNÉ	41,47%	41,47%	41,47%	36,04%	34,29%	33,17%	33,17%	30,42%	19,12%	19,12%	19,12%	19,12%	19,12%	17,63%	17,63%	0,00%	0,00%	0,00%
PLYNOVÉ	13,32%	13,32%	13,32%	13,92%	15,39%	16,81%	16,81%	21,06%	23,27%	23,27%	23,27%	23,27%	23,27%	21,45%	21,45%	21,45%	21,45%	21,45%
JADERNÉ	33,95%	33,95%	33,95%	33,72%	33,14%	32,58%	32,58%	30,92%	30,06%	30,06%	30,06%	30,06%	30,06%	35,52%	35,52%	35,52%	35,52%	35,52%
NOVÁ ZAŘÍZENÍ	0,00%	0,00%	0,00%	5,15%	6,18%	6,63%	6,63%	7,34%	17,59%	17,59%	17,59%	17,59%	17,59%	16,22%	16,22%	33,85%	33,85%	33,85%

Příloha 3 Vývoj jalového výkonu při KS

TYP	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Kinetická energie	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
VODNÍ	12,08%	12,08%	12,08%	12,03%	11,90%	11,77%	11,77%	11,38%	11,17%	11,17%	11,17%	11,17%	11,17%	9,95%	9,95%	9,95%	9,95%	9,95%
UHELNÉ	32,21%	32,21%	32,21%	28,06%	26,87%	26,15%	26,15%	24,44%	15,51%	15,51%	15,51%	15,51%	15,51%	13,81%	13,81%	0,00%	0,00%	0,00%
PLYNOVÉ	8,35%	8,35%	8,35%	8,75%	9,74%	10,70%	10,70%	13,66%	15,24%	15,24%	15,24%	15,24%	15,24%	13,57%	13,57%	13,57%	13,57%	13,57%
JADERNÉ	47,36%	47,36%	47,36%	47,15%	46,64%	46,14%	46,14%	44,62%	43,80%	43,80%	43,80%	43,80%	43,80%	49,97%	49,97%	49,97%	49,97%	49,97%
NOVÁ ZAŘÍZENÍ	0,00%	0,00%	0,00%	4,01%	4,85%	5,23%	5,23%	5,90%	14,27%	14,27%	14,27%	14,27%	14,27%	12,70%	12,70%	26,51%	26,51%	26,51%

Příloha 6 Vývoj setrvačnosti při KS