

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

ÚSTAV ŘÍZENÍ A EKONOMIKY PODNIKU



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Moderní koncepty pro eliminaci výkyvů v energetické síti**

**Modern concepts of elimination of fluctuations in the power  
grid**

AUTOR: Jan Zaoral

VEDOUCÍ: Ing. Miroslav Žilka, Ph.D.

PRAHA 2019

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zaoral** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **465504**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav řízení a ekonomiky podniku**  
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Moderní koncepty pro eliminaci výkyvů v energetické síti**

Název bakalářské práce anglicky:

**Modern concepts for elimination of fluctuations in the power grid**

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod - cíle, úkoly, motivace pro volbu tématu práce
2. Charakteristika problému výkyvů v energetické síti - příčiny, výhled do budoucna
3. Charakteristika konvenčních metod pro řešení problému výkyvů a jejich ekonomické posouzení
4. Charakteristika progresivních metod pro řešení problému výkyvů - definice výhod, nevýhod, bariér rozvoje, ekon. přínosů
5. Nástin budoucího vývoje
6. Závěry a doporučení

Seznam doporučené literatury:

WU, Qiuwei. Grid Integration of Electric Vehicles in Open Electricity Markets [online]. 1. New York: John Wiley & Sons, Incorporated, 2013 [cit. 2019-03-26]. ISBN 978-1-118-44607-2.  
SHUKLA, Amritanshu a Atul SHARMA, 2018. Sustainability through energy-efficient buildings. 1. Boca Raton: CRC Press. ISBN 978-1-1380-6675-5.  
LU, Junwei a Jahangir HOSSAIN, 2015. Vehicle-to-grid: linking electric vehicles to the smart grid [online]. London: Institution of Engineering and Technology [cit. 2019-03-25]. IET power and energy series, 79. ISBN 9781849198554.  
BUSH, Stephen F., [2014]. Smart grid - communication-enabled intelligence for the electric power grid [online]. 1. Chichester, West Sussex, [England]: John Wiley & Sons, Incorporated [cit. 2019-03-25]. ISBN 978-111-8820-230.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Miroslav Žilka, Ph.D., ústav řízení a ekonomiky podniku FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **07.10.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **03.01.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **28.02.2020**

  
Ing. Miroslav Žilka, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
prof. Ing. František Freiberg, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

31.10.2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Miroslava Žilky, Ph.D a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne: .....

.....

Podpis

## Poděkování

Děkuji svému vedoucímu Ing. Miroslavu Žilkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a ochotu při konzultování této práce. Děkuji také své rodině za velkou podporu při studiu.

# Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o problematice stabilizace elektrizační soustavy a o metodách, které udržování stability podporují. Jsou vysvětleny některé základní principy stabilizace elektrické sítě. Cílem práce bylo charakterizovat zejména problém výkyvů v elektrické síti a popsat možnosti jejich eliminace pomocí konvenčních a moderních metod. V závěru je nastíněn předpokládaný budoucí vývoj stability a je vysvětleno, že zlomovým rokem pro stabilitu sítě v České republice může být rok 2022.

# Klíčová slova

Akumulace energie, stabilita elektrické sítě, chytrá síť, energetický mix, obnovitelné zdroje, decentralizovaná energetika, elektromobilita

# Abstract

This bachelor thesis discusses the issue of power system stability and the methods that support power system stability. Some basic principles of stabilising the power system are explained. The aim of this work was to characterise the problem of fluctuations in the electricity grid and to describe the possibilities for their elimination using conventional and modern methods. The conclusion outlines the probable future development of power system stability and explains that 2022 may be the turning year for network stability in the Czech Republic.

# Keywords

Energy accumulation, power system stability, smart grid, energy mix, renewable sources, distributed energy system, electromobility

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Elektrizační soustava ČR .....</b>	<b>11</b>
2.1	Přenosová soustava .....	12
2.2	Distribuční soustava.....	13
2.3	Výroba elektrické energie .....	14
2.3.1	Neobnovitelné zdroje.....	14
2.3.2	Obnovitelné zdroje.....	15
2.4	Provoz elektrizační soustavy .....	15
2.4.1	Dispečerské řízení.....	16
2.4.2	Systémové a podpůrné služby.....	16
<b>3</b>	<b>Stabilita elektrizační soustavy .....</b>	<b>18</b>
3.1	Výpadek napájení .....	18
3.2	Diagram zatížení .....	19
3.3	Kritéria stability .....	19
3.3.1	Vyrovnaná roční bilance.....	20
3.3.2	Vyrovnaná bilance denní, týdenní a měsíční .....	20
3.3.3	Rezerva pro regulaci .....	21
3.3.4	Mezinárodní vyrovnavání výkyvů obnovitelných zdrojů.....	21
3.3.5	Rezerva pro destrukující výpadek zdroje .....	22
3.4	Rozdělení stability .....	22
3.4.1	Úhlová stabilita .....	23
3.4.2	Frekvenční stabilita.....	24
3.4.3	Napěťová stabilita.....	24
3.5	Historie vyrovnavání elektrizační soustavy .....	25
3.6	Energetický mix.....	26
3.7	Výhled do budoucna .....	27
<b>4</b>	<b>Konvenční metody stabilizace.....</b>	<b>29</b>
4.1	Přecherčpávací vodní elektrárny .....	29
4.2	Záloha v parních a paroplynových elektrárnách.....	30
4.3	Hromadné dálkové ovládání .....	30
<b>5</b>	<b>Nové progresivní metody stabilizace.....</b>	<b>32</b>

5.1	Vehicle-to-grid.....	32
5.2	Efektivní budovy s inteligentním systémem řízení.....	34
5.3	Využití opotřebovaných baterií z elektromobilů .....	36
5.4	Nové způsoby akumulace energie .....	37
5.4.1	Elektrárna využívající gravitační sílu .....	37
5.4.2	Akumulace pomocí stlačeného vzduchu.....	38
<b>6</b>	<b>Budoucí vývoj.....</b>	<b>40</b>
6.1	Směrnice EU .....	40
6.2	Odklon od jaderné energie.....	40
6.3	Nárůst elektromobilů .....	41
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>42</b>



# 1 Úvod

Téma své bakalářské práce jsem si vybral na základě mé předešlé zkušenosti, kdy jsem měl možnost se v rámci svých studií zúčastnit dvou projektů, které měly s energetikou spojitost. První zmíněný projekt se týkal budoucího propojení elektrických aut s domácnostmi jako součást chytré sítě (vehicle-to-grid). V druhém se jednalo o průzkum bateriových úložišť energie. Díky práci na těchto projektech jsem se k tématu stabilizace elektrické soustavy přiblížil a natolik mě zaujalo, že vyústilo v tuto práci.

Cíl této práce je seznámit s problematikou stabilizace elektrizační sítě a popsat, proč je nutné se stabilizováním elektrizační soustavy zabývat. Uvést metody, kterými se dají výkyvy v síti eliminovat a zjistit, jak se stabilizace sítě bude vyvíjet a co ji bude ovlivňovat v blízké budoucnosti.

Je třeba podotknout, že stabilita elektrické soustavy je aktuální a klíčové téma pro budoucí ekonomiku každého státu. Bez elektrické energie by se současný svět vrátil o několik desítek let nazpět. Proto důležité, aby se s rozvojem obnovitelných zdrojů vyvíjela také technologie stabilizace elektrizační soustavy.

V 21. století a zejména v druhém desetiletí zažíváme obrovský nárůst zařízení, která pro svůj provoz potřebují elektrický proud. Zvyšuje se jak množství spotřební elektroniky, tak také množství elektrických automobilů a telekomunikačních zařízení. Úměrně k tomu roste také poptávka po elektrické energii. Elektrizační soustavy, které mají za úkol energii dodávat, se provozují stále blíže ke svým provozním mezím.

Zároveň pozorujeme tlak na navýšení podílů obnovitelných zdrojů energie v energetickém mixu. Elekřina z obnovitelných zdrojů je však mnohem méně předvídatelná než standardní výroba za pomoci spalování fosilních paliv či štěpení uranu. To s sebou přináší nové výzvy pro udržení stability elektrické soustavy.

Formálně jsem svou práci rozčlenil do dvou částí. V první, teoretické části, jsem uvedl popis elektrizační soustavy. Na to navazuje charakterizace samotné stabilizace a vysvětlení, proč je třeba se jí zabývat. Také je vysvětlen energetický mix a jak se stabilitou sítě souvisí. Je popsána historie vývoje stabilizování sítě a současné metody, které se pro stabilizaci sítí používají.

V druhé části jsou charakterizovány nejdříve metody konvenční a dále nové, progresivní metody, které řeší problematiku výkyvů. Popsal jsem, co na stabilitu elektrizační soustavy

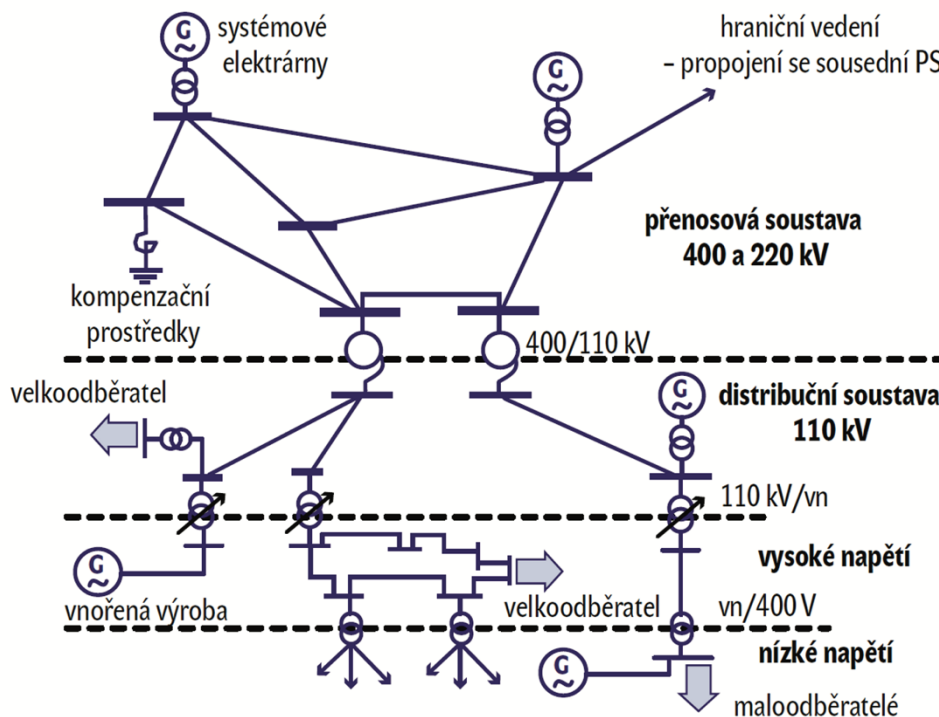
bude mít v budoucnu vliv na základě známých dat a jaká opatření budou muset být přijata. Na závěr jsem se věnoval nástinu budoucího vývoje v oblasti stability a uvedl největší rizika pro blízkou budoucnost. V práci jsem se všeobecně zabýval zejména situací v ČR.

## 2 Elektrizační soustava ČR

Elektrina byla v České republice poprvé použita v 19. století. Tehdy elektrizační soustava ještě neexistovala a ani nebyla zapotřebí, protože se vyrobený elektrický proud spotřeboval na místě, kde byl vyroben. Díky narůstajícímu počtu elektrifikovaných podniků však lokální výroba elektriny nebyla nadále možná, a tak v průběhu prvního desetiletí minulého století vznikly první veřejné elektrárny a s nimi rozvodné sítě, které vyrobenou elektrinu distribuovaly do potřebných míst.

Elektrizační soustava, jak ji známe dnes, začala vznikat po roce 1919, kdy vstoupil v platnost Zákon o soustavné elektrizaci státu. Páteřní přenosová soustava byla dokončena v 80. letech 20. století.

Elektrizační soustava je dynamický, vzájemně propojený systém energetických zařízení pro výrobu, přenos, akumulaci a spotřebu elektrické energie. Skládá se z několika dalších soustav, a to z elektrárenských, přenosových, distribučních a spotřebitelských. [1]

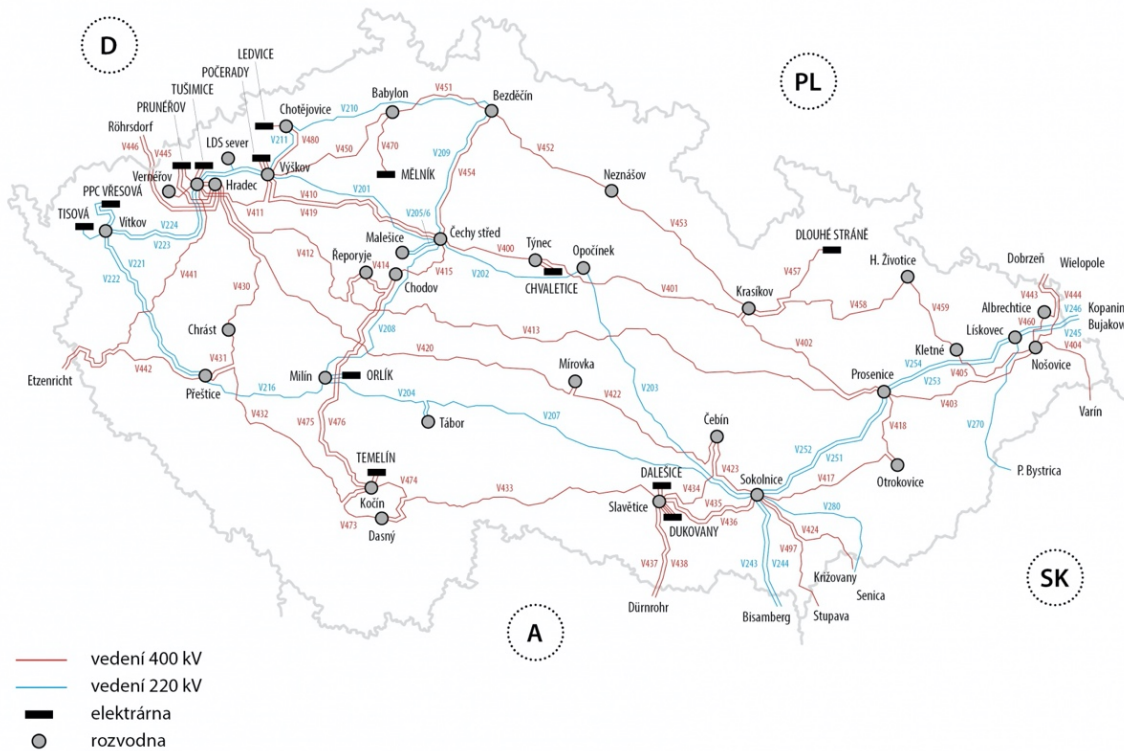


Obr. 1 Uspořádání elektrizační soustavy [2]

## 2.1 Přenosová soustava

Přenosová soustava je propojení uzlů, do kterých je přiváděna elektrická energie ze zdrojů elektrické energie. V České republice přenosovou soustavu provozuje firma ČEPS, a.s. Vede elektřinu nejvyššího napětí 400, 220 a 110 kV, kterou rozvádí do celého území ČR. Zároveň je součástí mezinárodního propojení Evropy. Přesto, že společnost elektřinu nevyrábí, ani ji nedistribuuje ke spotřebitelům, elektrizační soustava by bez ní nefungovala. „Napájí elektřinou distribuční soustavy, které ji dále rozvádějí až ke konečným spotřebitelům. Přeshraničními vedeními je přenosová soustava ČR napojena na soustavy všech sousedních států, a tím synchronně spolupracuje s celou elektroenergetickou soustavou kontinentální Evropy.“ [1]

Na obrázku níže můžeme vidět, že většina elektrického vedení přenosové soustavy je na napěťových hladinách 400kV (celkem 3 735 km). Menší část je pokryta vedením 220 kV (celkem 1909 km) a dále jen 84 km dlouhé je vedení na napěťové hladině 110 kV, které slouží zejména jako rezervní. Z obrázku lze také zjistit, že s okolními státy je česká přenosová soustava propojena 11 vedeními 400 kV a 6 vedeními 220 kV. Rozvodny, jichž je celkem 43 a jsou vyznačeny šedě, jsou součástí přenosové soustavy.



Obr. 2 Schéma přenosové soustavy ČR [3]

Důležitým faktem přenosové soustavy je velikost napětí. Alternátory v elektrárnách pracují na napětí v řádu nižších desítek kV (Dětmárovice – 15,75 kV, Temelín – 24 kV) a z toho důvodu je generovaný proud velmi vysoký (Temelín – 26 726 A). To je však

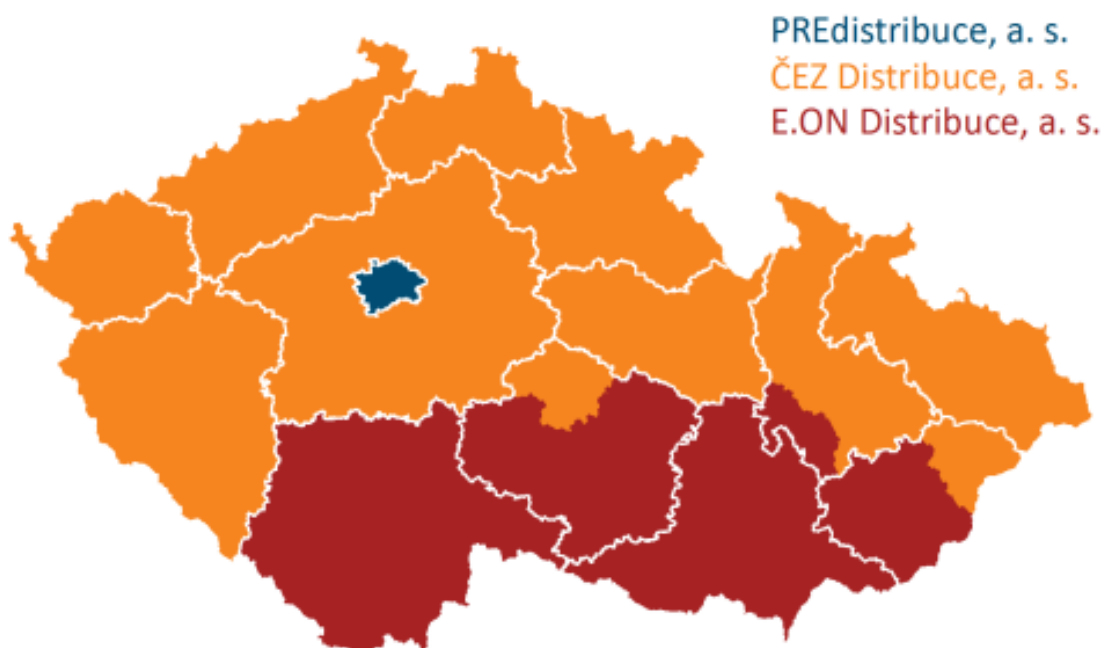
nevhodné pro přenos na delší vzdálenosti. Velké proudy by měly neblahý vliv na elektrické vedení. Jednak by se celkový přenášený výkon snížil kvůli vysokým ztrátám (ztráty na vedení jsou rovny druhé mocnině proudu), a v druhé řadě by elektrické vedení bylo mechanicky namáháno značnými magnetickými silami. Z toho důvodu se napětí z elektráren zvyšuje pomocí transformátorů přímo v areálu elektrárny na vyšší napěťovou hladinu. Z Ohmova zákona pak můžeme odvodit, že zvyšováním napětí se snižuje protékající proud. [4], [5]

## 2.2 Distribuční soustava

Distribuční soustava navazuje na přenosovou soustavu a zajišťuje rozvod elektřiny ke koncovému spotřebiteli. „Je to vzájemně propojený soubor vedení a zařízení 110 kV (s výjimkou vybraných vedení a zařízení 110 kV, která jsou součástí přenosové soustavy) a vedení a zařízení o napětí 0,4/0,23 kV, 1,5 kV, 3 kV, 6 kV, 10 kV, 22 kV, 25 kV a 35 kV, sloužící k zajištění distribuce elektřiny na vymezeném území ČR, včetně systémů měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky.“ [6]

Do této soustavy patří také elektrické zdroje o malých výkonech jako například malé vodní elektrárny a průmyslové elektrárny. Dále se k ní připojují obnovitelné zdroje energie, zejména fotovoltaické a větrné elektrárny.

V České republice vlastní a spravují distribuční soustavu tři provozovatelé. Největší část spravuje společnost ČEZ Distribuce, a.s., dále E.ON Distribuce, a.s. a nejmenší distributor je PREdistribuce, a.s.



Obr. 3 Rozdělení distribučních sítí podle provozovatelů [7]

## 2.3 Výroba elektrické energie

Nedílnou součástí elektrizační soustavy jsou elektrárny, v nichž se elektrická energie získává přeměnou z jiné formy energie. Nejčastější způsob je přeměna na energii mechanickou, která následně pohání elektrický generátor, v němž se rotační mechanická energie přemění na elektrické napětí. Podle primární formy energie, kterou přeměňujeme, rozlišujeme tyto typy elektráren:

- **jaderná elektrárna** (energie se získává štěpnými reakcemi, které produkují velké množství tepla),
- **parní elektrárna** (pára se ohřívá spalováním fosilních paliv),
- **paroplynová elektrárna** (zdrojem přeměny energie je v první fázi spalování zemního plynu nebo bioplynu a v druhé fázi vodní pára vzniklá použitím odpadního tepla),
- **plynová a spalovací elektrárna** (i tady je zdroj přeměny plyn, avšak nedochází k použití odpadního tepla)
- **vodní elektrárna** (elektrická energie se přeměňuje z potenciální a kinetické energie vody),
- **větrná elektrárna** (přeměňují kinetickou energii vzduchu proudícího mezi oblastmi s různým atmosférickým tlakem)
- **fotovoltaická elektrárna** (energie je získávána ze slunečního záření pomocí fotoelektrického jevu). [8]

### 2.3.1 Neobnovitelné zdroje

Za neobnovitelné zdroje energie považujeme všechny zdroje, jejichž světové zásoby jsou vyčerpávány mnohonásobně větší rychlostí, než jakou se dokáží obnovovat. Těchto zdrojů je omezené množství. Mezi nejpoužívanější patří:

- ropa,
- zemní plyn,
- uhlí,
- uran.

V kontextu stability elektrizační soustavy jsou elektrárny poháněné některým z neobnovitelných zdrojů v čase stabilním producentem elektřiny. Jakmile uvedeme generátor do provozu, víme, jaký výkon bude do sítě dodávat.

### 2.3.2 Obnovitelné zdroje

Obnovitelné zdroje jsou opakem neobnovitelných. Jejich množství je z pohledu průměrné délky jednoho lidského života nevyčerpatelné. Důvod proč se objevuje čím dál tím větší množství elektráren, které jsou poháněny právě obnovitelnými zdroji je zejména nižší ekologická stopa. Mezi obnovitelné zdroje řadíme:

- větrnou energii,
- vodní energii,
- geotermální energii,
- biomasu,
- bioplyn,
- energii ze slunečního záření.

Přeměna elektrické energie z obnovitelných zdrojů má také své nevýhody. Co se týče naší schopnosti predikovat produkci budoucího dodávaného výkonu do sítě, jsme dost omezeni. V případě větrných a fotovoltaických elektráren jsme závislí na předpovědi počasí. Další nevýhoda je, že se objevují skokové změny v produkci energie. Z minuty na minutu se může změnit výkon dodávaný do elektrizační soustavy například kvůli oblačnosti, která způsobí zastínění slunce, a tím sníží intenzitu světla dopadajícího na panely fotovoltaické elektrárny. Obdobně to je v případě větru, kdy díky poryvům zaznamenáváme v malém časovém úseku velké změny ve vyprodukované energii. [8]

## 2.4 Provoz elektrizační soustavy

Jak již víme z kapitoly 1.1, provoz přenosové soustavy v České republice má na starost firma ČEPS, a.s. Jako nejvýše postavený subjekt elektrizační soustavy, má na starosti její bezpečný chod a spolehlivý provoz, ale stará se také o prevenci havarijních stavů. Kvalita se určuje podle parametrů uváděných v kapitole 2.2. Spolehlivost je dána jako nepřerušenosť dodávky elektrického proudu definovaná počtem a trváním dílčích výpadků dodávky v jednotlivých předacích místech. Z informací na webových stránkách společnosti lze zjistit, že k tomu používá tyto nástroje:

- **dispečerské pokyny** (provozní instrukce a pokyny dispečera),
- **technické prostředky** (dispečerský řídicí systém, telekomunikační propojení se všemi řízenými a spolupracujícími objekty, řídicí systém rozvodu, systémy chránění až po vlastní přenosovou soustavu, tj. rozvodny a vedení zvláště vysokého napětí),

- **obchodní postupy** (zejména aktivace podpůrných služeb na základě uzavřených smluv, nákupy regulační energie prostřednictvím vyrovnávacího trhu a ze zahraničí, přerozdělení výkonu mezi elektrárnami). [9]

#### 2.4.1 Dispečerské řízení

„Úkolem dispečerů je udržovat rovnováhu mezi výrobou a spotřebou v reálném čase, udržovat přenosovou schopnost přenosové soustavy v normálních i nestandardních situacích a řešit případné poruchové stavy.“ [9]

Reálný provoz elektrické sítě má i přes určité předvídatelné faktory spoustu neznámých, na které dispečink musí včas reagovat, aby nedošlo k nestabilitě v síti nebo k havárii. Dispečer zná dopředu předpověď počasí a předpokládanou spotřebu a výrobu elektřiny. Tyto předpoklady však nejsou naprosto přesné, a pro zajištění stability provozu je třeba je neustále aktualizovat a vyhodnocovat.

Operativní řízení přenosové soustavy v rámci dispečinku disponuje automatizovanými řídicími systémy, které jsou schopny vyrovnávat odchylku mezi vyrobenou a poptávanou elektřinou při dodržení plánu jejího importu a exportu. Také dispečerovi napomáhá při řízení toků elektřiny a napětí, kdy před zásahem (např. vypnutím vedení) je schopen si danou situaci nejdříve nasimulovat pomocí modelu a zjistit tak dopad na ostatní prvky v síti. [9]

#### 2.4.2 Systémové a podpůrné služby

„Systémové služby jsou činnosti ČEPS, kterými zajišťuje kvalitu a spolehlivost dodávky elektřiny na úrovni přenosové soustavy a plnění mezinárodních závazků a podmínek propojení elektrizační soustavy ČR.“ [10]

Aby ČEPS mohl udržovat stabilitu sítě, potřebuje disponovat rezervním výkonem, a jelikož ze zákona nesmí vlastnit žádné zdroje elektrické energie, musí si potřebný výkon rezervovat na základě smluv s jednotlivými výrobci. Tyto smluvní služby se nazývají podpůrné služby. Výrobci jsou smluvně vázání udržovat smluvený výkon v dané kvalitě a v případě potřeby jej poskytnout. Mezi podpůrné služby patří:

- primární regulace frekvence bloku,
- sekundární regulace výkonu bloku,
- minutová záloha,
- snížení výkonu,



- sekundární regulace napětí a jalových výkonů,
- schopnost startu ze tmy,
- schopnost ostrovního provozu. [10]

## 3 Stabilita elektrizační soustavy

Termín stabilita je obecný a používá se napříč různými oblastmi a disciplínami. Zatímco ve většině technických oborů se stabilita systému řeší již při jeho samotném návrhu, v energetice to neplatí. V energetice se snažíme předvídat, jak bude soustava náchylná k poruchám na základě odhadů poptávky po energii (jalovém výkonu) a předpovědi počasí. Obecně se dá říct, že stabilita elektrizační soustavy závisí na rovnováze mezi výrobou a spotřebou elektrické energie.

„Stabilita elektrické soustavy je schopnost soustavy udržet rovnovážný stav během normálního provozu i po přechodných dějích způsobených vnějšími vlivy, dispečerským řízením i poruchovými výpadky zařízení a jinými rozruchy.“ [2] To se může stát například výpadkem velkého energetického zdroje nebo zřetěžením několika poruch (tzv. kaskádovité poruchy), které mohou mít za následek výpadek napájení.

### 3.1 Výpadek napájení

Výpadky napájení jsou velmi nákladnou záležitostí pro ekonomiku celé společnosti. Jejich zabránění je hlavní důvod, proč se stabilitou elektrizační soustavy vůbec zabýváme. Výpadek mohou způsobit různé extrémní situace jako vysoký vítr nebo sněhové bouře. Existuje také možnost, že se zpočátku malá porucha kaskádovitě rozšíří a vytvoří řetězec dalších na sebe navazujících poruch, které mohou způsobit rozsáhlý výpadek proudu (black-out). [11]

Ze znalostí kontextů úplného výpadku napájení v historii, se můžeme poučit při vyhodnocování bezpečnosti chodu dnešní elektroenergetické soustavy. Jeden z nejznámějších výpadků se stal v roce 2003 ve státě New York. Díky součtu mnoha nepříznivých okolností zůstalo bez elektřiny 50 milionů obyvatel žijících na území Kanady a USA. Nejdříve nastal výpadek elektrárny o výkonu 597 MW, kdy se soustava dostala do výstražného stavu. Díky vysoké teplotě, která způsobila prodloužení vodičů, nastal kontakt elektrického vedení 345 kV se stromy, který způsobil zkrat. Přetížení sítě zapříčinilo kaskádovité šíření poruchy, aktivaci ochran, které způsobily vypnutí přenosových vedení a následný vznik ostrovního provozu. [12]

Přestože náklady, které jsou s výpadkem napájení přímo spjaty jsou obrovské, vznikají také sekundární, nepřímé náklady, které nejsou ihned zřejmé. Obnova dodávek elektrické energie může trvat dlouho a ovlivnit tak ostatní služby jako dodávku vody, komunikaci

nebo dopravu. Kupříkladu záložní baterie vysílačů mobilních operátorů, které mají výdrž pouze několik hodin nebo palivová čerpadla na čerpacích stanicích, které bez elektřiny nedokáží pracovat. Velkoplošný výpadek napájení může zapříčinit i zvýšenou kriminalitu. Jsou případy, kdy se značně zvýšil počet vyrabovaných nemovitostí.

Podle literatury [11] může být nebezpečí výpadku napětí definováno jako součin pravděpodobnosti výskytu výpadku a vzniklých nákladů. Předpoklad je, že vzniklé náklady jsou zhruba přímo úměrné rozsahu výpadku. Až při rozsáhlých výpadech se náklady (zejména nepřímé) zvětšují rychleji než lineárně.

Obecně se dá říct, že velké výpadky napětí jsou málo pravděpodobné. Nicméně právě kvůli obrovským dopadům na ekonomiku a celkové fungování společnosti, je třeba jim předcházet a důkladně sledovat a kontrolovat stav elektrizační soustavy.

## 3.2 Diagram zatížení

Kvůli omezeným možnostem akumulace vyrobené energie, je potřeba udržovat výrobu a spotřebu energie v rovnováze. Když uvažuje o výrobě, myslí se tím množství elektřiny vyrobené v určitém časovém horizontu všemi energetickými zdroji v elektrizační soustavě. Grafické znázornění výroby v čase nazýváme diagram zatížení. Pomocí něj zaznamenáváme spotřebu energie v historii a pomáhá nám také k budoucím odhadům poptávky po elektřině. Rozlišujeme:

- **brutto výroba elektřiny** (celková výroba elektrické energie na svorkách všech generátorů v elektrizační soustavě),
- **netto výroba elektřiny** (rozdíl mezi celkovou výrobou elektřiny brutto a vlastní spotřebou na její výrobu) [13]

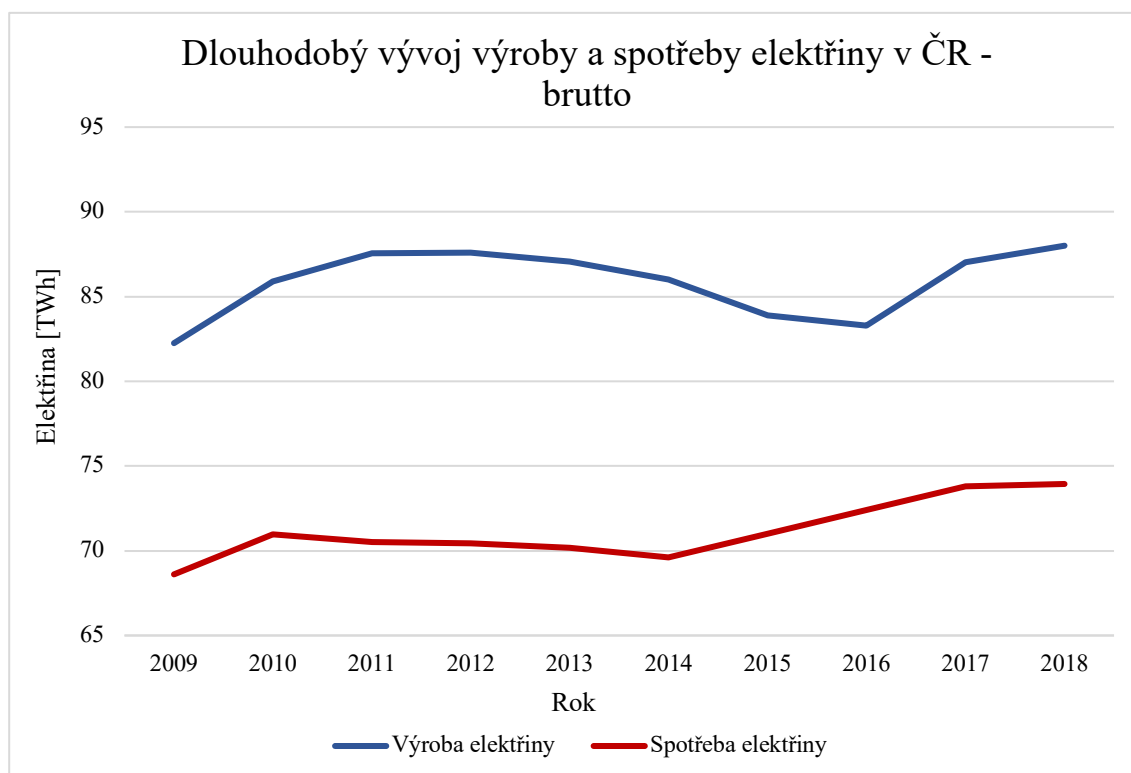
## 3.3 Kritéria stability

Elektrická energie je typická tím, že v každém okamžiku musí být vyrovnaná výroba a spotřeba. Podle literatury [14] je z hlediska dlouhodobé bezproblémové funkce elektroenergetické soustavy definováno pět kritérií. Pokud jsou splněna, můžeme soustavu považovat za stabilní. Pokud alespoň jedno kritérium splněno není, je nutno přijmout další opatření.

### 3.3.1 Vyrovnaná roční bilance

Energetická bilance se stabilitou sítě úzce souvisí. Jedná se o souhrn energetických statistik, který sleduje množství paliv a energií, která jsou k dispozici, co se s nimi děje a kde a jak dochází k jejich spotřebě. Kromě elektřiny se skládá také z dalších primárních energetických zdrojů jako z ropy, plynu, pevných fosilních paliv a biomasy. Pro naše kritérium postačí uvažovat pouze bilanci elektřiny.

Česká republika pravidelně vyrobí víc elektřiny, než spotřebuje, což ji činí v tomto ohledu energeticky soběstačnou (v roce 2018 vyrobila 88,0 TWh a spotřebovala 73,9 TWh). Na druhou stranu i to může v určitých situacích způsobit problém, protože se může stát, že vyrobíme nadbytek energie v době, kdy po ní není poptávka. V takovém případě se musí vyřešit, jak naložit s přebytkem.

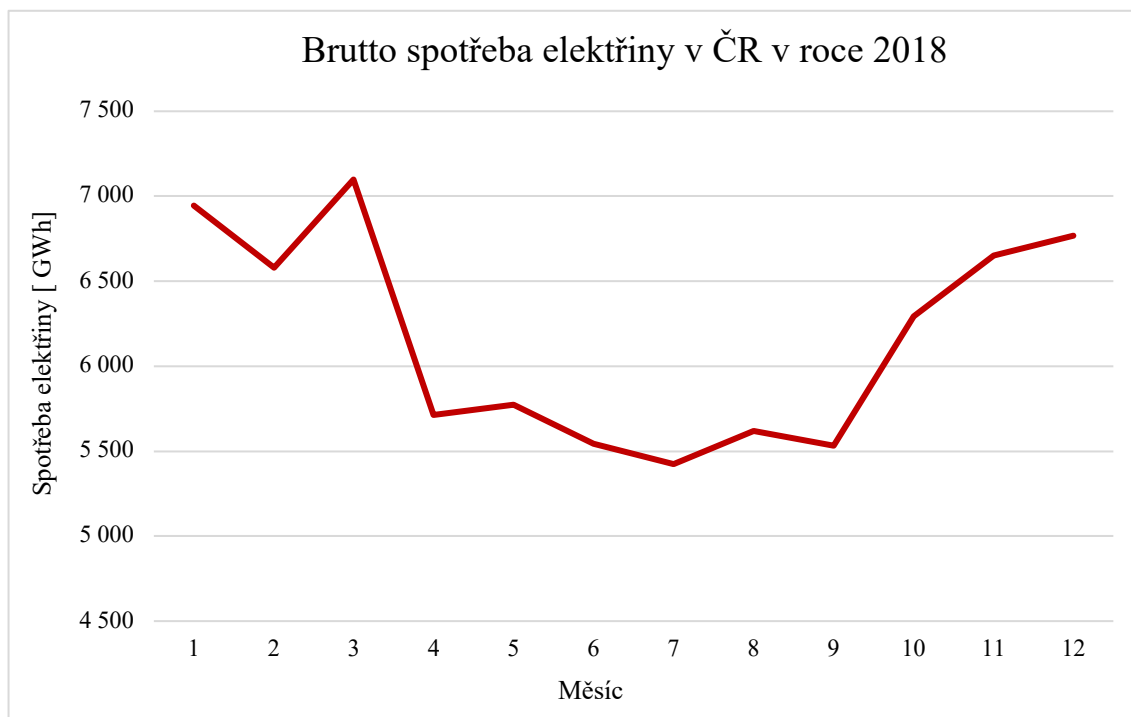


*Graf 1 Vývoj výroby a spotřeby elektřiny v ČR od roku 2009 - brutto [15]*

### 3.3.2 Vyrovnaná bilance denní, týdenní a měsíční

Poptávka po elektrické energii je proměnlivá. Zpravidla je jiná poptávka po energii v denních a nočních hodinách, v pracovních dnech a o víkendech a rozdílná je i v různých ročních obdobích. Například v roce 2018 tvořil rozdíl mezi nejvyšší spotřebou v březnu a nejnižší spotřebou v červenci 1674,5 GWh. Z toho vyplývá, že instalovaný výkon v soustavě (plus schopnost bezpodmínečně importovat chybějící výkon) by měl být dostatečně velký, aby dokázal pokrýt odběrové špičky. Také to ale znamená, že soustava

musí být schopna odpojit určitý výkon tak, aby jej v době nízké poptávky nebylo v síti nadbytek.



Graf 2 Brutto spotřeba elektřiny v ČR v roce 2018 [15]

### 3.3.3 Rezerva pro regulaci

Pro případy nenadálého výpadku elektrárny, pokrytí průmyslové špičky nebo náhlé změny počasí musí mít soustava k dispozici rezervu, která potřebný výkon rychle pokryje. Tato rezerva bývá často řešena pomocí přečerpávacích vodních elektráren (PVE), které dokáží produkovat energii během špiček a spotřebovávat energii během nadbytku výkonu v síti. Této rezervy je zhruba 10 %. V České republice tvoří PVE pouze 2 % celkového instalovaného výkonu, takže je zbylá rezerva v roztočených parních elektrárnách (uhelných). Část rezervy je také možné mít ve flexibilitě soustavy. Kromě rezervního výkonu, může být rezerva i na straně poptávky. Existuje možnost snížit poptávané množství výkonu v případě jeho nedostatku. Tak například funguje hromadné dálkové ovládání (HDO), díky kterému jsou provozovatelé distribučních sítí schopní na dálku regulovat odběr elektrické energie pomocí vypínání určitých spotřebičů.

### 3.3.4 Mezinárodní vyrovnávání výkyvů obnovitelných zdrojů

V současné době je česká elektrizační soustava propojena s evropskou nazývanou Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny (ENTSO-E). V tomto společném systému všechny národní soustavy spolupracují v rámci Grid Control Cooperation (GCC) mechanismu, aby udržovaly celkovou stabilitu. „Národní systémy už

nejsou nuceny vyrovnávat své energetické bilance na nulu, ale spolupracují a umožňují přetoky energie tak, aby došlo k vyrovnávání nestability obnovitelných zdrojů a dalších nestálých prvků.“ [14]

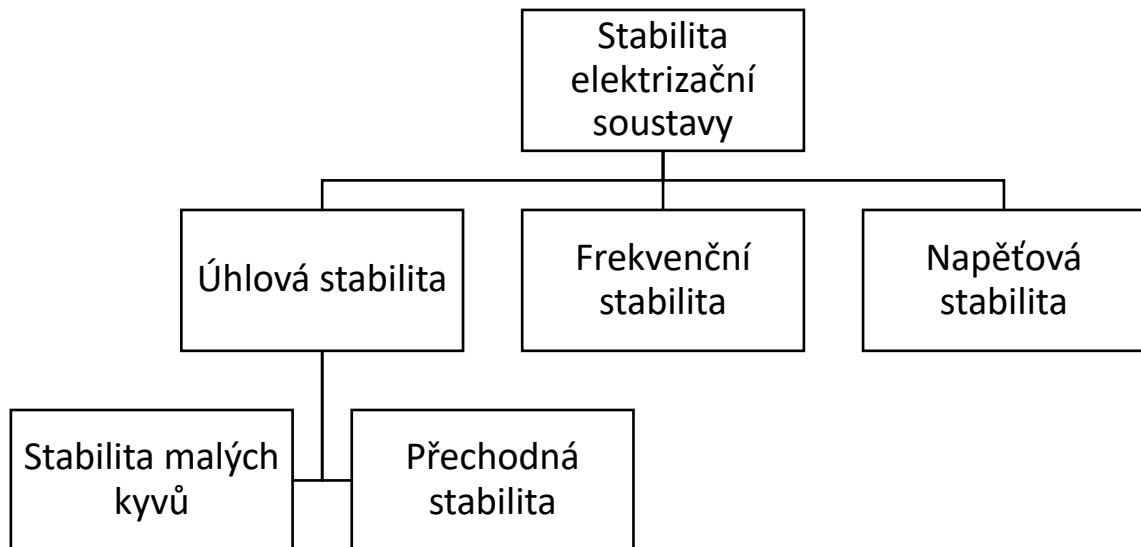
### 3.3.5 Rezerva pro déletrvající výpadek zdroje

Reálně se stává, že zdroj elektrické energie je vyřazen z provozu kvůli poruchy, technické odstávky nebo proto, že jeho provoz se definitivně ukončí. V takovém případě je potřeba chybějící výkon v síti nějak nahradit. Existuje více možností:

- Můžeme využít jiný zdroj, pokud jím disponujeme. V ČR se takto využívá paroplynových elektráren kvůli jejich schopnosti rychlého spuštění. Naproti výhodě spočívající v rychlém spuštění a nízkých emisích stojí nicméně fakt, že k provozu potřebují ušlechtilé zdroje (zemní plyn), které jsou dražší než fosilní paliva (uhlí).
- Další možnost je dovést energii ze zahraničních soustav. Propojenost s evropskou soustavou ENTSO-E nám umožňuje takto importovat až třetinu naší spotřeby. Tady ale může nastat problém jednak v nízké kapacitě propojení a jednak v dostupnosti elektřiny v zahraničí. Pokud by například v ČR nastal výpadek jaderných elektráren, tak by i přes dostatek elektřiny v okolních soustavách mohl nastat problém s dovozem dostatečného výkonu.
- Omezit poptávané množství. V soustavě se nalézá určité množství spotřebičů, které se dají vypnout, aniž by to mělo zásadní vliv na komfort společnosti. Příkladem jsou reklamy, polovina zářivek na chodbách, výklady. Při vážnějších situacích se mohou vypnout průmyslové podniky, supermarkety nebo obydlí. To však s sebou nese značný zásah do běžného života obyvatel, a proto je toto opatření až jedna z posledních možností.
- Revitalizovat odstavený zdroj nebo, pokud se jedná o plánovanou odstávku, s předstihem vybudovat nový zdroj elektrické energie. [14]

## 3.4 Rozdělení stability

Elektrizační soustava je nelineární systém, který pracuje při neustále se měnících podmínkách. Při poruše v soustavě záleží, o jaký typ poruchy se jedná (zkrat, výpadek ve výrobě, změna poptávky) „Jelikož elektrizační soustava představuje složitý systém, který je vystaven neustálým změnám zvenčí i zevnitř, je při zkoumání odolnosti soustavy proti rozruchům užitečné rozdělit stabilitu na několik dílčích problémů.“ [2]



Obr. 4 Rozdělení stability elektrizační soustavy [2]

### 3.4.1 Úhlová stabilita

Pro výrobu elektrické energie se nejčastěji používají synchronní stroje. Tyto stroje jsou elektrizační soustavou v rámci evropské sítě ENTSO-E navzájem propojeny. Úhlová stabilita souvisí se schopností synchronních strojů udržet synchronní stav jak za normálních provozních podmínek, tak i v případě výkyvů v síti. Jinými slovy popisuje rovnováhu mezi elektromagnetickým točivým momentem generátorů a mechanickým točivým momentem pohonného ústrojí. Výsledek nerovnováhy těchto dvou momentů se projevuje ve formě rostoucích úhlových výkyvů některých generátorů vedoucích ke ztrátě synchronního stavu. Nicméně elektrizační soustava má do určitého kritického bodu vlastní mechanismus, jak se úhlové nestabilitě bránit. Díky propojenosti všech synchronních strojů v soustavě, si navzájem dopomáhají udržet úhlovou stabilitu. Pokud se jeden nebo více synchronních strojů zrychlí nebo se naopak opožďuje, v elektrizační soustavě začnou působit rovnovážné síly, které působí proti tomuto účinku a navracejí rovnovážný stav. Je důležité zmínit, že úhlová nestabilita může nastat mezi jedním synchronním strojem a zbytkem elektrizační soustavy nebo mezi různými skupinami synchronních strojů. Nalezení ustáleného stavu po poruše ovlivňuje buzení generátorů a regulace turbíny.

Úhlová stabilita se dále dělí na **stabilitu malých kyvů** a **přechodnou stabilitu**. Liší se prostředky, jaké je třeba použít pro jejich analýzu. U stability malých kyvů můžeme považovat soustavu za lineární a pro řešení použít sestavu diferenciálních rovnic. U přechodné stability toto zjednodušení aplikovat nelze. Pro analýzu přechodné stability se používají tzv. síťové simulátory, které řeší problém v časové oblasti (spočítají časové

průběhy fyzikálních veličin). V obou případech úhlové stability se jedná o krátkodobé děje, které za normálních podmínek stačí vyšetřovat do 10 sekund.

### 3.4.2 Frekvenční stabilita

Frekvenční stabilita souvisí se schopností elektrizačního systému udržet frekvenci (otáčky synchronního stroje) v daných mezích i po poruše v elektrizační soustavě. „Jedná se o schopnost udržet rovnováhu mezi výkony zdrojů a spotřebičů. K této nerovnováze dojde při změně spotřeby nebo při změně dodávaného výkonu (např. výpadkem zdroje). Porucha se projeví na generátorech rozdělení rázu činného výkonu. Po ustálení regulačního děje si turbosoustrojí přerozdělí výkonový deficit vzniklý výpadkem výkonu v poměru svých výkonových čísel.“ [16]

Frekvenční stabilita je ovlivněna regulačním rozsahem stroje a parametry soustrojí (setrvačností). Nalezení ustáleného bodu po poruše ovlivňuje regulace turbíny a odezva zátěže na odchylky frekvence. [17]

„V běžném provozu elektrizační soustavy (charakterizovaném odchylkami frekvence v pásmu  $\pm 200$  mHz) je frekvence udržována pomocí primární regulace frekvence a sekundární regulace. Při vybočení frekvence z těchto mezí určuje opatření frekvenční plán viz tabulka 1.“ [16]

Tabulka 1 Vymezené frekvence v Hz pro jednotlivé zdroje energie [16]

Typ elektrárny	Uhelné	JE		VE	PVE		PPE	OZE
		EDU	ETE		Turbína	Čerpání		
Normální bez omezení	48,5–50,5	48,5–50,5		48,5–50,5	48,5–50,5	49,5-50,5	48,5–51,5	49 - 51
Časově omezen	46–48,5 50,5-53	47,5 -48,5 50,5-52,5	47,9-48,5 50,5-51,5	46-48,5 50,5-53	46-48,5 50,5-53	49-49,5 50,5-52	48-48,5 51,5-52	47.5-49 51-51,5
Nepřípustný	f > 53 f < 46	f > 52,5 f < 47,5	f > 51,5 f < 47,9	f > 53 f < 46	f > 53 f < 46	f > 52 f < 49	f > 52 f < 48	f > 51,5 f < 47,5
Automatické odpojení od ES	f > 53 f < 47,5	f > 52,5 f < 47,9	f > 51,5 f < 47,9	f > 50.2 f < 47,5	f > 50.2 f < 47,5	f > 52 f < 49.2	f > 52 f < 48	f > 51.5 f < 47,5

### 3.4.3 Napěťová stabilita

Napěťová stabilita je stejně jako frekvenční, schopnost nebo také vlastnost sítě. Definujeme ji jako schopnost sítě držet stálou hladinu napětí v rámci daných mezí za normálních operačních podmínek a schopnost vrátit soustavu do rovnovážného stavu vyhovujícímu podmínkám provozu sítě. Také popisuje schopnost sítě spolehlivě přenášet výkon v dané napěťové hladině. V případě, že napětí je nestabilní a nekontrolovatelně klesá, nastává v systému nestabilita. Nestabilita může vést až k totálnímu kolapsu napětí



v dané síti, tedy k částečnému nebo úplnému odstavení. V případě příliš vysokého napětí hrozí ztráta integrity celé elektrizační soustavy.

„Napětí sítě je provázáno se zapojenými zátěžemi. Odběrové charakteristiky zátěží jsou totiž závislé na napětí, takže se změnou napětí se změní odběry jednotlivých zátěží, které zapříčiní rozdílný úbytek napětí na síti oproti předchozímu stavu. V případě zapojení většiny spotřebičů s konstantním výkonem na výstupu, může podobná situace vést až ke zhroucení napětí v systému.“ [19]

Napěťová stabilita se dá dále rozdělit na dva případy. **Statická stabilita** řeší stabilitu systému po odeznění přechodových dějů a ustálení systému. **Dynamická stabilita** systému řeší stabilitu sítě při změně parametrů v reálném čase. [11]

### 3.5 Historie vyrovnávání elektrizační soustavy

S historickým vývojem elektrizačních soustav ve světě se postupně začaly objevovat různé formy jejich nestability. Způsoby, jak na problémy se stabilitou přijít a řešit je, se postupně lišily na základě tehdejších technických možností. Znalost historických souvislostí má význam pro lepší porozumění problematice stability dnešní elektrizační soustavy.

Vyrovňávání elektrizační soustavy se začalo řešit ve 20. letech minulého století. První problémy vznikaly díky tomu, že elektrárny byly vzdálené od místa spotřeby a vyrobená energie proto musela být přepravována na velké vzdálenosti. Schopnost elektrického vedení vést proud byla značně limitována úhlovou stabilitou díky nedostatečnému točivému momentu generátorů. Stabilita se analyzovala pomocí ručních výpočtů a grafů.

S rostoucí komplexností a přibývajícím počtem vzájemných propojení v elektrické síti se začal komplikovat i problém stabilizace sítě a elektrizační soustava už nemohla být řešena jako systém, kde jsou zapojeny pouze dva stroje (generátor a spotřebič). Vyvinuly se tedy nové metody, které se snažily zjednodušit a zefektivnit analýzu stability. Velký krok dopředu přinesla až 50. léta 20. století, kdy se ke stabilizaci začal používat digitální počítač.

Od 60. let minulého století nastalo různě po světě propojování elektrizačních soustav jednotlivých států (například Kanada a USA). V České republice se elektrizační soustava propojila se západní částí Evropy až v 90. letech. Výhoda propojení byla zejména ekonomická, kdy výsledek znamenal větší spolehlivost díky vzájemné pomoci dílčích

propojených soustav. Na druhou stranu to také zapříčinilo větší složitost celé soustavy a zhoršilo dopady v případě ztráty stability.

Donedávna se snahy a zájem všech podniků ubíraly k řešení přechodné úhlové stability. Vznikly tak nové simulační programy (tzv. síťové simulátory), které jsou schopny detailně modelovat velké komplexní dynamické systémy a tím stabilizaci soustavy značně usnadnit. V 70. a 80. letech se vyskytovaly problémy s frekvenční stabilitou, které způsobovaly značné výkyvy s elektrizační soustavě. Jako reakce na tento problém byly zavedeny postupy pro zlepšení a zrychlení reakce elektráren organizací Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

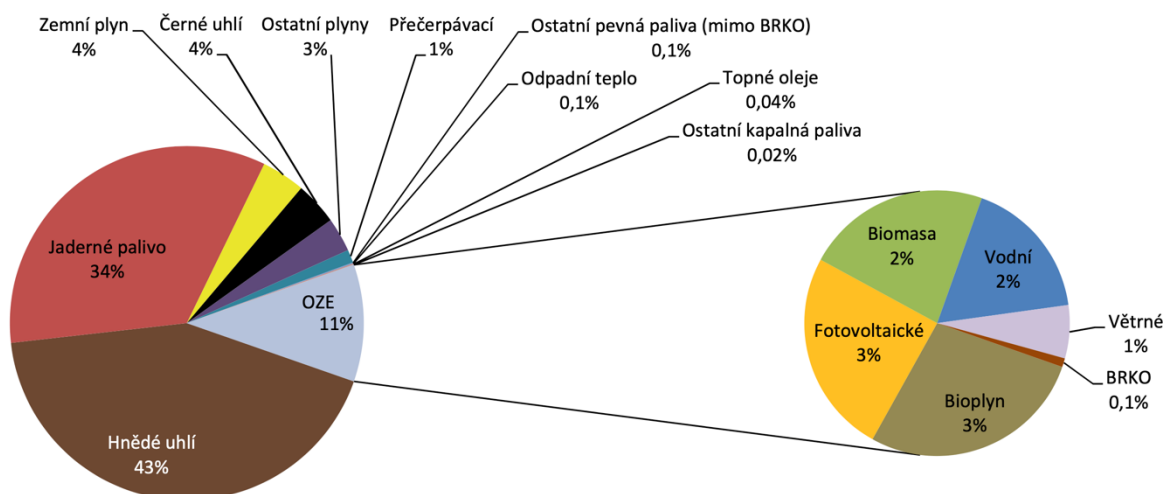
V současné době je největším problémem napět'ová stabilita, zejména kvůli zvětšujícímu se zatížení sítí a přenosu energie na velké vzdálenosti. S tím souvisí i zvětšující se podíl obnovitelných zdrojů v energetickém mixu. [11]

Současné elektrizační systémy jsou provozovány stále blíže svým limitům při neustále se měnících dynamických stavech. Vliv obnovitelných zdrojů, nových technologií a zákonných omezení pro výrobu pomocí fosilních paliv ovlivňují řízení elektrizační stability a předkládají nové výzvy pro eliminaci výkyvů v energetické síti do budoucna.

### 3.6 Energetický mix

Energetický mix nám říká, jak se které zdroje energie podílejí na celkové výrobě elektřiny v dané oblasti. Národní energetický mix tak stanovuje tento přehled na území státu. V České republice slouží národní energetický mix nejen jako důležitý zdroj informací pro budoucí snahy o bezemisní (nebo alespoň nízkoemisní) výrobu elektrické energie, ale také jej potřebují znát dodavatelé elektřiny pro stanovení podílů jednotlivých zdrojů energie na své celkové směsi paliv a uvedení těchto podílů na dokladu pro koncového odběratele. Odběrateli je poté navýšena cena energie o příspěvek na podporované zdroje. [20]

Znalost zastoupení zdrojů energie v energetickém mixu, zejména pak podílu obnovitelných zdrojů, je důležitá pro budoucí řešení stability elektrizační soustavy. Obecně platí, že výroba energie z obnovitelných zdrojů není v čase stálá (hlavně z větrné a sluneční energie), což stabilizaci značně stěžuje a prodražuje, jelikož musí být v záloze paroplynové elektrárny, které jsou schopny velmi rychle vykrýt chybějící výkon v síti.



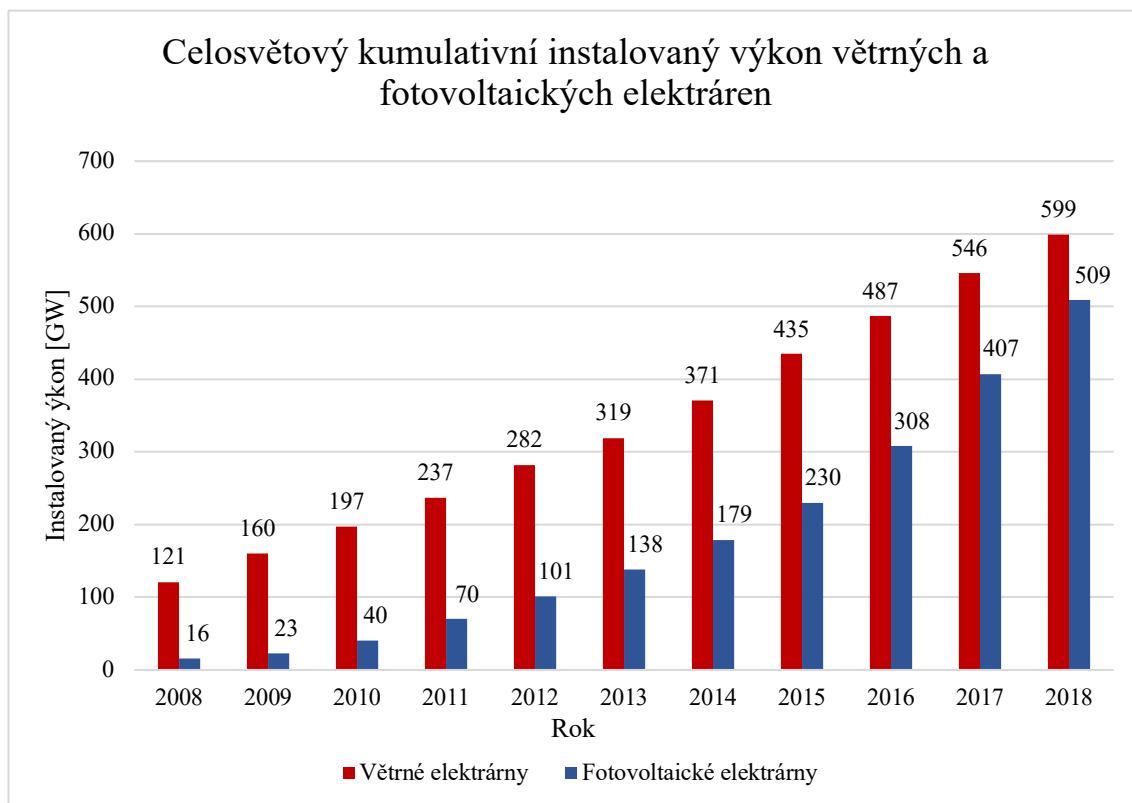
Obr. 5 Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto v ČR – 2018 [15]

Na obrázku 5 lze vidět energetický mix ČR za rok 2018. Je zřejmé, že největší část elektrické energie je vyráběna z hnědého uhlí v parních elektrárnách, zhruba třetina pochází z jaderného paliva a pouze 11 % pochází z obnovitelných zdrojů energie (OZE). Těchto 11 % instalovaného výkonu bylo zodpovědných za celkové množství 9 202 GWh energie vyrobené z OZE, což tvořilo 12,72 % z celkové brutto výroby. Zkratka BRKO znamená biologicky rozložitelná část komunálního odpadu.

### 3.7 Výhled do budoucna

V dnešní době má na stabilitu elektrizační soustavy vliv zvětšující se podíl obnovitelných zdrojů v energetickém mixu. Největší podíl na tom nese produkce pomocí větrných elektráren, které jsou implementovány v mnoha elektrizačních soustavách díky své ekonomické udržitelnosti a nízkým emisím. Přestože výroba elektrické energie pomocí větru je zatím celosvětově zodpovědná jen za relativně malou část celkové vyráběné elektřiny, z grafu 3 můžeme vyčíst, že instalovaný výkon celosvětově roste. Co se týká výroby elektřiny ze solární energie, i přes nižší instalovaný výkon v minulosti, tempo růstu instalovaného výkonu je větší a předpokládá se, že v roce 2020 instalovaný výkon fotovoltaických elektráren přesáhne instalovaný výkon větrných elektráren. Díky inkonzistentnímu dodávání energie zmíněných zdrojů, bude třeba mít v budoucnu k dispozici záložní zdroje, které dokáží poptávku v případě potřeby pokrýt.

Za celkový meziroční nárůst 52,5 GW instalovaného výkonu větrných elektráren a 102 GW instalovaného výkonu fotovoltaických elektráren, byla nejvíce zodpovědná Čína, která přispěla instalovaným výkonem 21 GW a 44 GW. Stala se tak zemí s největším instalovaným výkonem větrných a fotovoltaických elektráren na světě. [21]



*Graf 3 Celosvětový kumulativní instalovaný výkon větrných a solárních elektráren v jednotlivých letech [21]*

## 4 Konvenční metody stabilizace

Jak je uvedeno v kapitole 2.2, pro elektrickou energii je charakteristické, že její vyrobené množství se musí v každém okamžiku rovnat množství spotřebované energie. Nejsme schopni ji ve velké míře akumulovat. V dnešní době existuje řada metod, které se pro eliminaci výkyvů v síti běžně používají

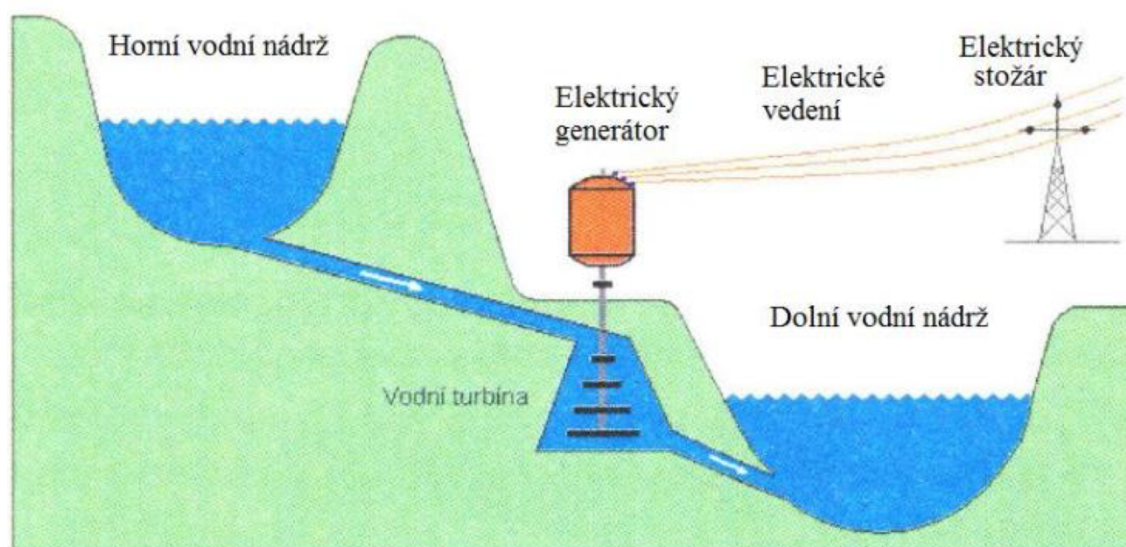
V kapitole 2.6 je nastíněno, kam se výroba energie bude s největší pravděpodobností ubírat. Ve větší míře se budou prosazovat obnovitelné zdroje a decentralizovaná energetika.

### 4.1 Přecherčovací vodní elektrárny

Přecherčovací vodní elektrárna je typ vodní elektrárny, která dokáže elektrickou energii uložit jak krátkodobě, tak dlouhodobě, v podobě hydroenergetického potenciálu vody. Co se týká množství energie, kterou je přecherčovací vodní elektrárna schopná uložit, nemá konkurenci v žádné jiné technologii. Jako příklad uvedu největší přecherčovací vodní elektrárnu na světě s názvem Bath County Pumped Storage Station v USA ve státě Virginie s instalovaným výkonem 3030 MW.

Abych popsal princip fungování přecherčovací vodní elektrárny, rozdělím ji do čtyř částí: horní nádrž, přivaděč, elektrárna a spodní nádrž. Vrchní nádrž se nachází ve větší nadmořské výšce a se spodní je spojena přivaděčem. Spád, vzniklý různou nadmořskou výškou nádrží, je důležitý parametr pro hydroenergetický potenciál. V elektrárně je uloženo turbosoustrojí, které je schopno generovat elektrický proud.

Přecherčovací vodní elektrárna se spíná, když během dne dochází ke změnám ve spotřebě elektrické energie a dochází buď k přebytku nebo nedostatku energie v síti. V době přebytku, když nabídka převyšuje poptávku, klesá cena elektřiny a vyplatí se ji využít na spuštění čerpadla, které vodu vyčerpá do horní nádrže, a tak akumuluje energii. Naopak v období nedostatku elektřiny, když je poptávka větší než nabídka, její cena roste. V tomto okamžiku se voda z horní nádrže vypouští, díky spádu se její potenciální energie mění na kinetickou a ta při průchodu turbosoustrojím vytváří elektrický proud. Rozdíl ceny energie v době přebytku a v době nedostatku tvoří zisk. [22]



Obr. 6 Princip přečerpávací vodní elektrárny [23]

## 4.2 Záloha v parních a paroplynových elektrárnách

Vzhledem k tomu, že v ČR máme pouze 2 % instalovaného výkonu v přečerpávacích vodních elektrárnách, je potřeba mít rezervní výkon v jiných zdrojích. Soustava je u nás nejčastěji regulována parními elektrárnami, které spalují uhlí, nebo paroplynovými elektrárnami poháněnými nejčastěji zemním plynem. Je to z toho důvodu, že tyto elektrárny jsou schopny rychle roztočit své generátory, a tak v řádu minut dodat do sítě chybějící výkon. Příkladem uhelné elektrárny, která poskytuje tuto službu firmě ČEPS a podporuje tak stabilitu sítě, je například parní elektrárna Dětmarovice nebo paroplynová elektrárna Počerady. [24]

## 4.3 Hromadné dálkové ovládání

Hromadné dálkové ovládání (HDO) je způsob, jakým se dá regulovat odběr elektrické energie na dálku, aby se zajistilo optimální využití sítě. Může být využíváno i při stavech nouze a pro řízení výroby obnovitelných zdrojů energie. Přenos informace o sepnutí stykače zajišťuje elektrické vedení. Signál HDO je vysílán do sítě 110 kV a hromadně se šíří do všech částí distribuční sítě, pomocí transformátorů i do vedení o nižších napěťových hladinách, až ke koncovému odběrnému místu. Aby toto ovládání bylo funkční, je třeba, aby měl spotřebitel nainstalovaný přijímač HDO podle kritérií daného provozovatele distribuční soustavy a zároveň souhlasil s řízením určitých spotřebičů ze strany provozovatele distribuční soustavy. Jakmile je vyslán signál o dané frekvenci, hromadně reagují všechny přijímače, které jsou na tuto frekvenci nastaveny. Distributoři mají frekvence rozděleny, aby nedocházelo vzájemnému rušení.

Pro domácnosti, které mají vyšší odběr elektrické energie, protože ji používají například k vytápění nebo ohřevu vody, existuje možnost dvoutarifní sazby. V případě, že spotřebitel souhlasí, aby distributor ovládal určité spotřebiče, distributor zákazníka odmění nižší účtovanou cenou v období nízkého tarifu. V nízkém tarifu jsou však zařízení s velkou spotřebou vypnuta.

Povely pro HDO určuje provozovatel distribuční soustavy a zákazník je povinen tyto povely respektovat. Informace o režimu spínání zákazník dostává vědět s dostatečným předstihem, aby se podle toho mohl zařídit. Pro normální provozní podmínky distribuční sítě platí časy vysílání povelů HDO. Pokud se z nějakého důvodu provozní podmínky změní, může dojít k lokálním úpravám časů vysílání v rámci pravidel pro vysílání a v souladu s cenovým rozhodnutím Energetického regulačního úřadu (ERÚ).

HDO se objevuje i u malých elektráren, aby byla možnost dálkového snížení výroby, nebo její úplné odstavení. V případě větrných a fotovoltaických elektráren HDO umožňuje regulaci výroby 100 %, 60 %, 30 % a 0 %. [25], [26]

Provozovatel distribuční soustavy využívá HDO:

- při normálním provozu:
  - k rozložení spotřeby, aby zajistil uspokojení co největšího počtu zákazníků, optimální využití sítě a nízké ztráty,
  - k případnému spínání v sítích pro účely provozu,
  - k optimalizaci nákupu elektřiny pro krytí ztrát,
- při nouzovém stavu:
  - pro předcházení těmto stavům,
  - pro likvidaci nouzových stavů,
  - pro odstranění následků,
- pro zajišťování systémových a podpůrných služeb v distribuční soustavě. [6]

## 5 Nové progresivní metody stabilizace

V době, kdy se vyspělé státy snaží postupně eliminovat zastoupení fosilních paliv v energetických mixech a nahrazovat je čistými zdroji, je třeba přicházet s novými způsoby, jak řešit nevyváženost nabídky a poptávky po energii. Obecně elektrárny, které pro výrobu elektřiny používají neobnovitelné zdroje, generují po uvedení do činnosti v čase stálé množství energie. I některé elektrárny produkující energii z obnovitelných zdrojů energie mají tuto charakteristiku, např. průtočné vodní elektrárny nebo plynové a spalovací elektrárny spalující bioplyn. Nicméně hlavní a na trhu nejrychleji rostoucí elektrárny vyrábějící energii z OZE jsou větrné a solární. Tyto elektrárny jsou prakticky bezemisní (pokud v úvahu nebereme jejich výrobu a následnou dopravu), ale představují velkou výzvu pro budoucí vyrovnávání elektrizační sítě. Momentální řešení nebudou dostačující a pokud za každou větrnou elektrárnou nebo solární farmou bude muset být záloha ve formě parní elektrárny, nebudou ani ekologická. Navíc se celkový provoz elektrizační soustavy notně prodraží, díky zvýšení ceny regulační energie.

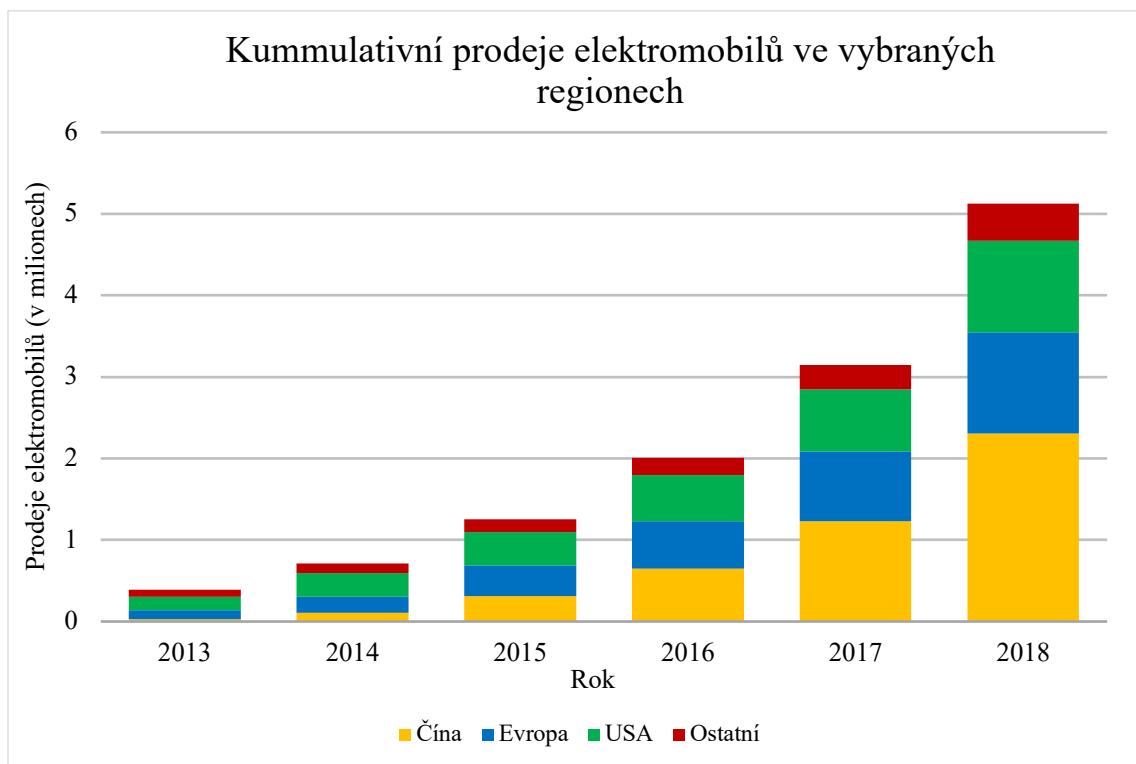
Je potřeba zavést nová řešení, která budou umět automaticky reagovat na nedostatek nebo přebytek energie v systému. S tím souvisí budování nových úložišť, která budou schopna akumulovat elektřinu v době, kdy je jí přebytek. Ve velkém se začíná mluvit o tzv. chytré síti (smart grid), která zahrnuje decentralizovaný systém výroby a přenosu elektrické energie. Decentralizovaný systém v praxi znamená, že energetiku už netvoří pouze mohutné zdroje elektrické energie, kterou je následně zapotřebí přenést na velké vzdálenosti, ale objevují se lokální výrobci elektřiny. Součástí trhu se stávají sami zákazníci, kteří si dokáží zajistit část své spotřeby z vlastních zdrojů, zpravidla pomocí přeměny větrné, či solární energie. Zdroje o výkonu několik set megawattů tak nahrazuje větší počet lokálních zdrojů o stovkách nebo jednotkách kilowattů.

### 5.1 Vehicle-to-grid

Při řešení problematiky stabilizace sítě se počítá s tím, že bude třeba navýšit objem regulačních výkonů. Jedna z možných cest, jak toho docílit, je využít kapacitu baterie elektromobilů. Prodeje elektromobilů se až do poloviny roku 2019 neustále zvyšovaly a studie Jelikož prodeje elektromobilů se až do poloviny roku 2019 neustále zvyšovaly, dá se soudit, že tento trend bude pokračovat i nadále a elektromobily budou hrát v budoucnosti klíčovou roli.



Z grafu 4 lze vyčíst, že celkový počet elektromobilů v provozu také roste. Nutno podotknout, že v tomto sektoru jsme svědky největšího meziročního nárůstu prodeje elektromobilů v Číně, kde byly prodeje oproti roku 2017 vyšší o 1,08 milionu automobilů (54,6 % celkového meziročního růstu). Na druhém místě se umístila Evropa s meziročním nárůstem o 0,38 milionu kusů (19,5 % celkového meziročního růstu). Celkový nárůst prodeje elektromobilů oproti roku 2017 se navýšil o 61,4 % a studie odhadují, že růst bude pokračovat i v budoucnu. To teorii využití elektromobilů jako možných úložišť energie nahrává. [27]



*Graf 4 Kumulativní prodeje elektromobilů ve vybraných regionech [28]*

V principu tento systém funguje tak, že auto, které je připojeno k elektrizační soustavě, má dvojí charakteristiku. Když je potřeba elektromobil nabít, působí jako zátěž. V případě potřeby energie je ale schopno akumulovanou energii poskytnout zpět do sítě a pomáhat tak vyrovnávat stabilitu sítě. Elektromobil tak slouží jako pojízdné úložiště energie se značnou kapacitou (u elektromobilu Tesla Model 3 až 74kWh), které po zaparkování může danou oblast zásobovat elektrickou energií.

Tento systém má však v praxi i své nevýhody. Pokud energetické společnosti budou brát elektřinu ze stojících automobilů, povede to k degradaci baterií, které jsou nejdražší částí elektromobilů. To představuje značný ekonomický problém. Bateriím se snižuje kapacita i během běžného používání díky neustálému nabíjení a vybíjení. Baterie se musí vyměnit, jakmile její kapacita klesne pod 80 %, což u průměrné baterie v elektromobilu trvá asi

8 let. Hlavní důvod výměny není jen zkrácený dojezd, ale také klesající schopnost baterie dodávat potřebný výkon. Auto jako podpůrný systém (Vehicle-to-grid, V2G) by přineslo větší využití baterií a zkrácení doby životnosti baterie, což je nežádoucí.

Další nevýhodou je nepřipravenost technické struktury. Mnoho nabíjecích stanic umožňuje pouze jednocestné proudění elektrické energie směrem do baterií, ale nikoliv nazpět. Také není vyřešen systém komunikace a řízení nabíjení a vybíjení jednotlivých elektromobilů v síti. Pokud by nebylo správně řízeno, V2G by mohlo stabilitu sítě spíše ohrozit.

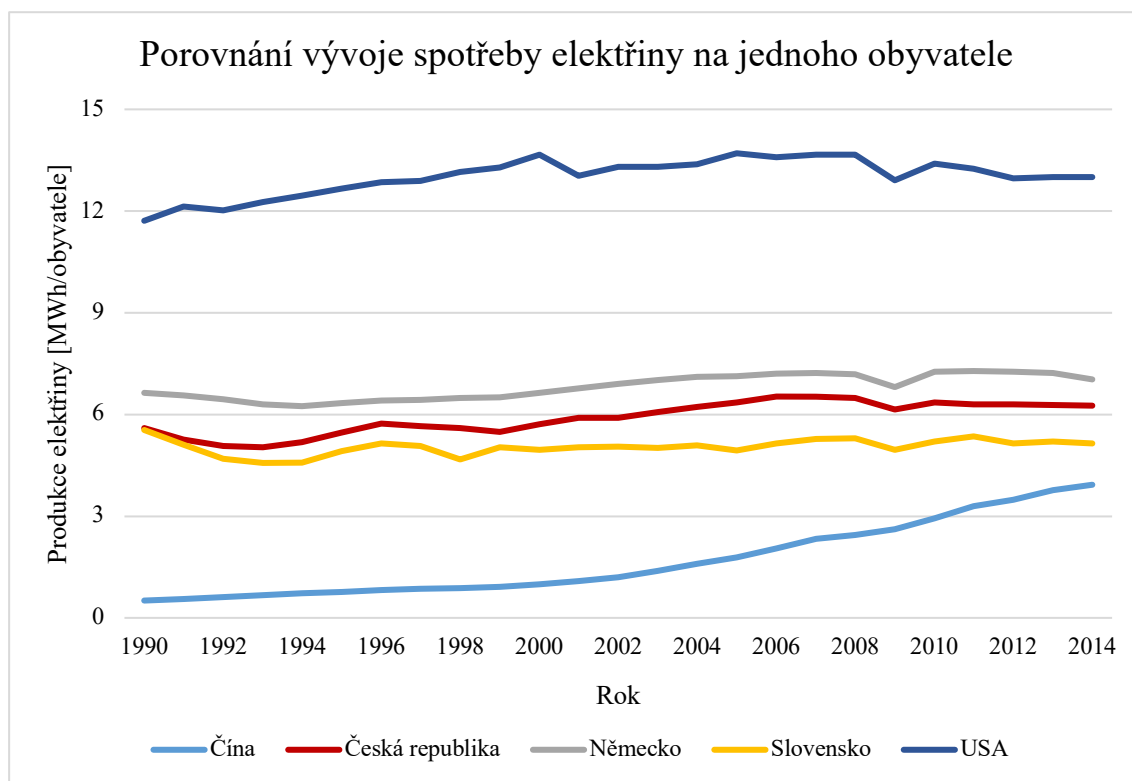
V2G je velká příležitost do budoucna, protože už nyní je jasné, že elektromobily budou na trhu mít nemalý podíl. Kromě výhod, které jsou dány samotným konceptem elektromobility, by také mohly přispět ke stabilizování sítě. Velký potenciál má V2G v decentralizovaných systémech, kdy by elektromobily mohly sloužit jako pojízdné úložiště a také jako záložní zdroj energie při výpadku napájení. Vhodná doba pro zavedení tohoto řešení však teprve přijde, protože nejsou vyřešeny všechny technologické požadavky pro bezproblémový chod. Také se musí nastavit jasný ekonomický rámec tak, aby samotní majitelé elektromobilů nebyli proděleční. Ideálním prostředím pro aplikaci systému V2G jsou vyspělé země s malou hustotou obyvatelstva a malým využitím hromadné dopravy. V těchto zemích se zpravidla nacházejí domácnosti, které vlastní větší počet vozidel. [29]

## 5.2 Efektivní budovy s inteligentním systémem řízení

Výkyvy v elektrizační soustavě nemusíme řešit pouze řízením výroby, či akumulací energie. Lze je zmírnit i úsporami na straně spotřeby. Snaha instalovat nové úspornější technologie a zvyšovat energetickou efektivitu budov už nějakou dobu trvá, což lze vidět v grafu 5. Konkrétně to zjistíme, když se zaměříme na křivky od roku 2010, které (až na Čínu) nevykazují rostoucí tendenci. Nicméně tato snaha by mohla a měla být větší, jelikož se v budoucnosti může stát, že energie nebude dostatek nebo bude díky vysoké poptávce a malé nabídce velmi drahá.

Velkých energetických úspor můžeme dosáhnout snižováním energetické náročnosti nemovitostí. Toho se dá dosáhnout jednak úpravou konstrukce budovy, využíváním úsporných spotřebičů, ale také novými technickými zařízeními. Technickým zařízením, který by mohlo úspory zvýšit, je domácí systém inteligentního řízení energie (home energy management systém, HEMS). Tento systém koresponduje s představou budoucí inteligentní sítě a zároveň představuje její podmnožinu. HEMS se dá popsat jako

uskupení a vzájemné propojení všech elektrických zařízení v domácnosti tak, aby pracovala co nejefektivněji a nejlépe bez aktivního zásahu člověka. S tím souvisí také odkládání spuštění spotřebičů v době, kdy je elektřiny v síti nedostatek. [30]



Graf 5 Porovnání vývoje spotřeby elektřiny na jednoho obyvatele [31]

Pro představu uvedu příklad domácnosti, která má na střeše fotovoltaickou elektrárnu, uvnitř domu baterii a tepelné čerpadlo. HEMS je schopen elektřinu produkovanou solárními panely během dne akumulovat v baterii a přebytečnou energii využít k ohřátí vody v zásobníku. Přes noc, když solární panely nedodávají žádný výkon, je využívána akumulovaná energie z baterie. Navíc existuje možnost energii, kterou není kam uložit, dávat do sítě. Aby to však bylo možné, HEMS musí umět komunikovat nejen s domácími spotřebiči a fotovoltaickou elektrárnou, ale také s distributorem, aby energii do sítě nedodával, když je jí zrovna přebytek. V teoretickém případě společné aplikace HEMS a V2G v jedné domácnosti vznikne poměrně velká kapacita pro uložení elektrické energie a potenciálně velký manipulační prostor pro to, aby domácnost s tímto systémem mohla svým výkonem přispět ke stabilitě celé elektrizační soustavy. [31]

### 5.3 Využití opotřebovaných baterií z elektromobilů

S rozmachem elektromobility v posledním desetiletí se stále více řeší otázka ekologie výroby lithiových baterií, které tvoří nejdražší část elektromobilu. Díky lithiovým bateriím vzniká při výrobě elektromobilu mnohem více emisí CO<sub>2</sub> než při výrobě stejného auta se spalovacím motorem. Až po nájedu určitého množství kilometrů se díky nulovým provozním emisím elektromobilu množství vyprodukovaných emisí vyrovná. Počet kilometrů závisí na typu a velikosti vozidla. [32]

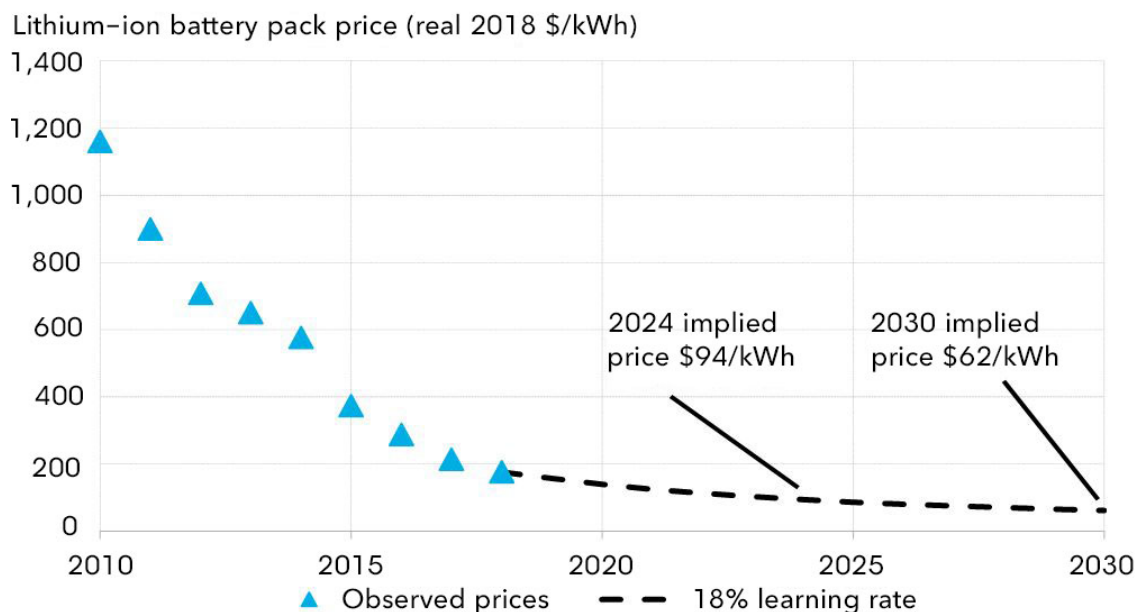
Jedna z možností, jak emisní dopady vzniklé výrobou baterií snížit, je prodloužit její životaschopnost. Jak je popsáno v kapitole 4.2, baterie v automobilech je třeba vyměnit, jakmile jejich kapacita dosáhne 80 %. Potom jsou podle zákona 185/2001 Sb., Zákon o odpadech, povinni výrobci elektromobilů baterie zpětně odebrat.

Ve světě převažují dva rozdílné názory, jak s použitými bateriemi naložit. První možností je baterie recyklovat (což prosazuje například americká Tesla). Druhá možnost je baterie prodat, vzhledem k opotřebování, za nižší cenu. Ve studiích se tento postup nejčastěji objevuje pod názvem „druhý život baterie“ (2nd life battery usage, B2U).

Aspekt snížené kapacity, který je v elektromobilu na škodu, nemusí být problémem v jiných aplikacích. Možnost, která se nabízí, je využít baterie jako úložiště pro zdroje energie, které v čase neprodukují stálý výkon, tedy fotovoltaické a větrné elektrárny. Princip podpory stabilizace sítě je v zásadě stejný jako u systému V2G, až na to, že použité baterie by byly zabudovány pevně v domácnosti. U této aplikace snížená kapacita není problémem, naopak je velká výhoda v ušetřených nákladech na pořízení oproti nákupu nových baterií. V grafu 6 podle studie BloombergNEF vidíme, že v roce 2024 je odhadovaná cena 94 USD/kWh. Z diplomové práce [33] vyplývá, že v nejlevnějším případě se cena použité baterie může dostat až pod hranici 20 USD/kWh.

Budoucí využití však závisí na poptávce po tomto řešení a na možných rizicích, které B2U přináší. Zejména je to větší zahřívání oproti novým bateriím a také možné náklady na analýzu použitých baterií. Také se může stát, že ceny nových lithiových baterií klesnou tak nízko, že se toto řešení finančně nevyplatí.

### Lithium-ion battery price outlook



Source: BloombergNEF

Graf 6 Vývoj cen lithiových akumulátorů [34]

## 5.4 Nové způsoby akumulace energie

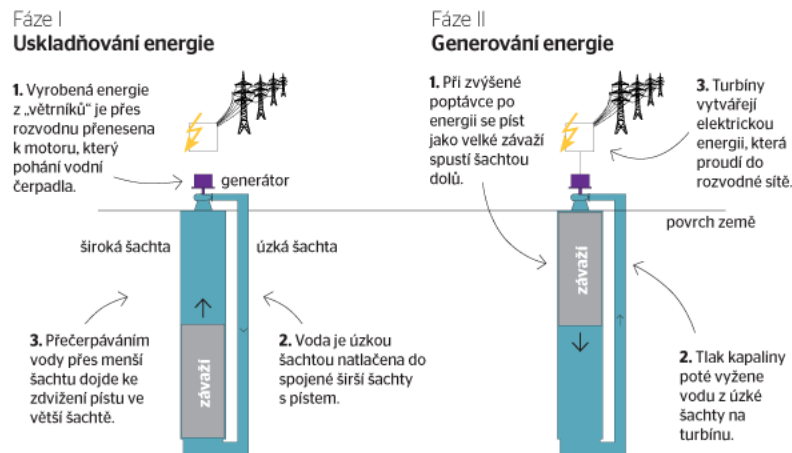
V této kapitole jsem se zaměřil zejména na technologie, které mohou spolu s lithiovými bateriemi tvořit zásobu regulační energie pro utlumování výkyvů v síti.

### 5.4.1 Elektrárna využívající gravitační sílu

Tato elektrárna si bere příklad z osvědčených principů přečerpávací vodní elektrárny. Oproti ní by měla nabízet nižší pořizovací cenu, kratší dobu výstavby a menší zásah do krajiny. Princip fungování elektrárny je píšť, gravitační silou uveden do pohybu, vytlačující vodu ze spodní poloviny široké podzemní šachty směrem nahoru, přes úzkou část šachty do generátoru. Voda, která projde generátorem vyrábí elektrickou energii a proudí do vrchní části široké podzemní šachty. Při čerpadlovém provozu voda proudí v opačném směru. Turbína v této elektrárně má být, stejně jako u přečerpávacích vodních elektráren, Francisova reverzní. Tím, že je celý systém zabudovaný v zemi, nemělo by docházet k odparu vody a celková účinnost tohoto systému by měla dosahovat kolem 80 %, což je mnohem více než u přečerpávacích elektráren. Znázornění principu fungování je popsáno také na obrázku 7. [35]

### Skladování energie v modulu GPM (Gravity Power Module)

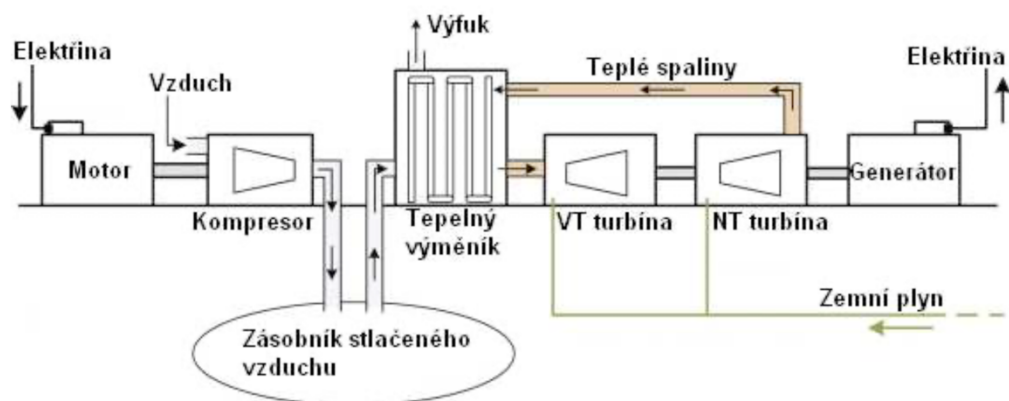
- systém vytvořila firma Gravity Power z Kalifornie
- metoda využívá dvou vzájemně propojených šachet naplněných vodou
- výhodou je relativně snadná a rychlá instalace v místě potřeby, efektivita asi **80 procent**



Obr. 7 Princip funkce elektrárny využívající gravitační sílu [36]

#### 5.4.2 Akumulace pomocí stlačeného vzduchu

Systém akumulace energie ve stačeném vzduchu (Compressed Air Energy Storage, CAES) není úplnou novinkou. V 70. letech minulého století se začaly objevovat po boku rozvíjejících se jaderných elektráren. V 80. letech nastal útlum, protože se do popředí dostala výroba pomocí paroplynových a uhelných elektráren, které vzhledem ke své rychlosti náběh toto úložiště nepotřebovaly. Do kategorie progresivních metod ji řadím, protože se o ní začíná v souvislosti s nárůstem obnovitelných zdrojů energie znovu uvažovat jako o možném řešení pro pokrývání špiček výkonu elektrické energie v elektrizační soustavě. Energie je akumulována tak, že se do velkých zásobníků natlačí stlačený vzduch kompresorem, který je poháněn elektromotorem. Elektromotor elektrickou energii odebírá v době, kdy je jí přebytek a v období nedostatku stlačený vzduch prochází přes generátor a vyrábí elektřinu. Jako úložné místo pro stlačený vzduch lze využít umělých nebo přirozených podzemních prostor (jeskyně). Problém, který se stlačováním vzduchu souvisí, je teplo, které při něm vzniká. V případě akumulace energie se teplo uvolňuje a při dekompresi je potřeba jej zpětně dodávat. Moderní CAES umí teplo vytvořené stlačením uchovávat a následně ho využít při adiabatické dekompresi. Označují se jako AA CAES (Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage) a původní účinnost 40 % zvyšují až na 70 %. Tato možnost akumulace energie je atraktivní pro Německo, protože nemají kapacitu na postavení dostatečného množství vodních přečerpávacích elektráren. [35]



Obr. 8 Princip technologie CAES [13]

## 6 Budoucí vývoj

Jak bylo zmíněno v kapitole 2.6, budoucnost je ve znamení obnovitelných zdrojů energie. V této kapitole jsem se zaměřil na vlivy, které mohou stabilitu elektrizační soustavy nejvíce ohrozit.

### 6.1 Směrnice EU

Pro Českou republiku je momentálně největším úskalím splnění limitů aktualizované normy Evropské unie, která má vejít v platnost v začátku roku 2022. Tato norma je zpřísněním původní směrnice o průmyslových emisích (IED) a pomocí referenčních dokumentů o nejlepších dostupných taktikách (BREF) určuje nejlepší dostupné techniky (BAT). V literatuře se pro stručnost užívají právě zkratky BAT a BREF. Hlavním cílem této aktualizované normy je pomocí technologií, které je možné zavést za technicky a ekonomicky přijatelných podmínek, dosáhnout co nejnižších emisí. BREF tyto technologie detailně popisuje pro každý energetický sektor.

Ze zmíněných norem vyplývá, že ČR musí razantně redukovat podíl fosilních paliv v energetickém mixu. Vzhledem k tomu, že podíl těchto paliv tvoří zhruba polovinu celkové výroby elektřiny, půjde o velký zásah do stability elektrizační soustavy. Zdá se, že nejvhodnějším řešením by bylo postavit nový jaderný zdroj, který by nahradil chybějící parní uhelné elektrárny. To se však setkává s odporem např. ze strany Rakouska. Další možností je spolehnout se čistě na obnovitelné zdroje. Ty však v ČR nejsou schopny nahradit tak velkou část energie, jakou dnes pokrývají parní uhelné elektrárny. Alespoň ne v nočních hodinách a při bezvětří. V úvahu přichází i možnost, výroby menšího množství, než činí předpokládaná spotřeba. V takovém případě by se ČR změnila z exportéra (v současné době exportujeme téměř 18 % vyrobené elektřiny brutto) elektřiny na importéra závislého na dostatku elektrické energie v sousedních státech.

### 6.2 Odklon od jaderné energie

Rušení jaderných elektráren je německou záležitostí. Od roku 2022 má Německo v plánu kompletně zastavit veškerou výrobu energie pomocí jaderných elektráren. V ČR to není, a ještě dlouhou dobu nebude možné, jelikož jaderná energie je jediný zdroj, který nám může stabilně dodávat energii ve větším měřítku. Vzhledem k propojenosti evropské elektrizační soustavy bude mít zrušení jaderných elektráren v Německu vliv i na českou energetiku. Aby Německo pokrylo výkon z jaderných elektráren, začalo budovat větrné

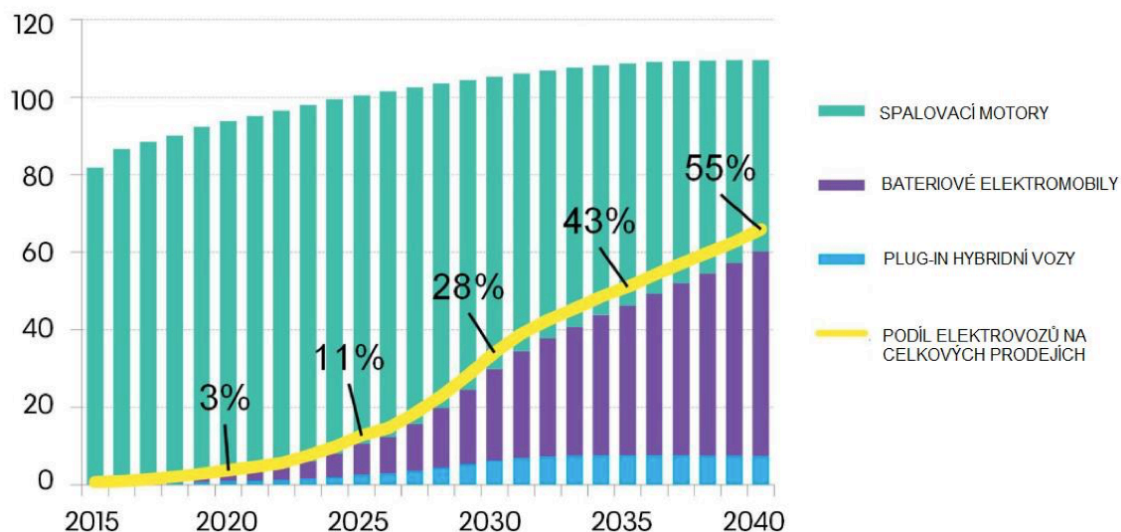


elektrárny. Na severu Německa bylo na konci roku 2017 55 GW instalovaného výkonu ve větrných elektrárnách, které vyrobily celkem 103 TWh energie (19% celkové produkce elektřiny v Německu). Tak velký instalovaný výkon na relativně malém území spolu s nedostačující kapacitou vedení mezi severem a jihem Německa má za následek, že ve špičkách vedení není schopné vyrobený výkon dostat kam je potřeba a je ho třeba uložit. K tomu Německo využívá rakouských přečerpávacích vodních elektráren. Elektrický výkon však při cestě do Rakouska jde cestou nejmenšího odporu, a proto prochází i nezátíženou elektrizační soustavou České republiky. Tato situace se sice zlepšila díky výstavbě transformátorů s řízeným posuvem fáze na česko-německých hranicích, ale může se opětovně zhoršit po odstavení německých jaderných zdrojů. [14]

### 6.3 Nárůst elektromobilů

Předpovědi různých studií indikují, že trh s elektromobily bude růst. V ČR máme zatím pouze 0,03 % vozového parku elektrických, ale rostoucí tendence se u nás dají očekávat také. Odhad pro rok 2030 je, že 28 % všech automobilů na světě bude elektrických. Pro ČR je podle [27] odhadováno, že podíl elektromobilů bude tvořit 6,9 %.

**Roční světové prodeje vozů podle druhu paliva (v milionech)**



*Graf 7 Roční světové prodeje vozů podle druhů paliva [37]*

Dá se předpokládat, že tento nárůst způsobí další nestabilitu elektrizační soustavy. V případě, že část parních uhelných elektráren bude nahrazena obnovitelnými zdroji energie, bude elektřina dostupná zejména přes den. Jenže nabíjení aut bude pravděpodobně prováděno hlavně v noci, kdy bude elektrické energie nedostatek. Bude muset být zavedeno chytré řešení, které dokáže komunikovat s distributorem a nabíjení naplánovat tak, aby bylo provedeno v ideálním čase pro udržení stability sítě.

## 7 Závěr

V této bakalářské práci jsem nastínil problematiku stability sítě a uvedl možné způsoby, jak ji řešit pomocí tradičních metod a metod, které se zatím nepoužívají. Tato práce je rešeršní a měla za úkol uvést do problematiky stabilizace elektrizační soustavy a metod pro její řešení. Dle mého názoru tato práce splnila všechny zadané cíle.

V úvodní části jsem popsal důvody, které mě vedly k výběru tématu a vysvětluji, že stabilita elektrické sítě je důležitá pro ekonomiku celého státu.

V druhé části jsem se zabýval elektrizační soustavou ČR, kde jsem položil základy pro kapitolu stability elektrizační soustavy. Popsal jsem přenosovou soustavu, distribuční soustavu a věnoval jsem se i rozdílu výroby energie z obnovitelných a neobnovitelných zdrojů. Vysvětlil jsem, kdo má stabilitu elektrizační soustavy ČR na starosti a jaké má pro její udržení nástroje.

Třetí kapitola obsahuje popis samotné problematiky stabilizace. Definoval jsem kritéria stability: vyrovnaná denní, týdenní, měsíční a roční bilance, rezerva pro regulaci, mezinárodní propojení soustav a rezerva pro déletrvající výpadek zdroje. Uvedl jsem jaké typy stability se v elektrické síti vyskytují a jak se stabilitou souvisí energetický mix. V závěru této části jsem naznačil budoucí vývoj vyrovnavání výkyvů v síti.

Čtvrtá kapitola je věnována konvenčním metodám. Důraz je kladen na rozbor metod, které se snaží vyrovnat nabídku a poptávku elektřiny v síti, a tak udržovat stabilitu elektrizační soustavy. Je rozebráno jako tomu dopomáhá přečerpávací vodní elektrárna, jakou roli hrají parní uhelné elektrárny. Dále je vysvětlen systém HDO.

V páté části práce jsou popsány metody, které se ke stabilizaci zatím nepoužívají nebo se využívají málo a čekají na implementaci. Část z nich čeká na chytré propojení s distributory a okolními spotřebiči v rámci smart grid. V této kapitole jsem vycházel z vlastních zkušeností, které jsem získal při práci na projektech v zahraničí a v ČR (zejména u bodů 5.1 a 5.3).

Obsahem šesté kapitoly je popis budoucího vývoje pro stabilizaci sítě v ČR. Tato část obsahuje rozdělení podle třech nejdůležitějších faktorů, které na českou elektrizační soustavu budou mít vliv.

Kvůli nejistotám, které s sebou nese období po roku 2022 by bylo dobré soustředit se na decentralizaci elektrizační soustavy. Jednou z možností je nově stavěné nemovitosti

udělat energeticky soběstačnými nebo alespoň s minimálními potřebami elektrické energie. S výhodou by bylo i zavedení HEMS pro komunikaci s distributorem v reálném čase. Jako další možnost se jeví zvýšit kapacitu elektrického vedení a zmodernizovat jej. To znamená instalovat inteligentní měřiče schopné dálkové komunikace a regulace. Nabízí se také možnost rozšíření HDO na nové spotřebiče, které mají velkou spotřebu. Dle mého názoru se skrývá velký potenciál i v elektromobilitě, díky které si možná v budoucnosti budeme schopni navýšit kapacitu domácího úložiště nebo si energii dovézt třeba na místa kde normálně není k dispozici.

## Seznam zkratek

AA CAES – Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage (pokročilá akumulace energie v adiabaticky stačeném vzduchu)

BAT – Best Available Techniques (nejlepší dostupné techniky)

BREF – Reference Document on Best Available Techniques (referenční dokument o nejlepších dostupných technikách)

B2U – Battery second usage („druhý život baterie“)

CAES – Compressed Air Energy Storage (akumulace energie ve stačeném vzduchu)

ČEPS – ČEPS, a.s.

ČR – Česká republika

ERÚ – Energetický regulační úřad

GCC – Grid Control Cooperation (Společná spolupráce při řízení sítě)

HDO – hromadné dálkové ovládání

HEMS – Home Energy Management System (domácí systém inteligentního řízení energie)

IEEE – Electrical and Electronics Engineers (Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství)

V2G – Vehicle-to-grid (auto jako podpůrný systém)

## Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] Technická infrastruktura. *ČEPS, a.s.* [online]. 2019 [vid. 2019-12-22].  
Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/technicka-infrastruktura>
- [2] Stabilita elektrizační soustavy. *Vesmír.cz* [online]. 2007 [vid. 2019-12-23].  
Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2007/cislo-1/stabilita-elektrizacni-soustavy.html>
- [3] 1207\_schema-siti-2018-cz-fhd.jpg 1 920×1 552 pixelů. *ČEPS, a.s.* [online].  
[vid. 2019-12-22]. Dostupné z: [https://www.ceps.cz/admin-assets/pages/7774/modules/gallery/323\\_/1207\\_schema-siti-2018-cz-fhd.jpg](https://www.ceps.cz/admin-assets/pages/7774/modules/gallery/323_/1207_schema-siti-2018-cz-fhd.jpg)
- [4] WWW.FG.CZ, 2016, FG Forrest, a s. Technologie a zabezpečení. *Skupina ČEZ - O Společnosti* [online]. [vid. 2019-12-22]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/ete/technologie-a-zabezpeceni-1>
- [5] Česká přenosová a distribuční soustava - 1. díl: Elektrifikace a princip funkce. *oEnergetice.cz* [online]. [vid. 2019-12-21].  
Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/ceska-prenosova-a-distribucni-soustava-1-dil-elektrifikace-a-princip-funkce/>
- [6] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [7] pre\_eon\_cez\_1.png 490×298 pixelů. *Predistribuce* [online]. [vid. 2019-12-28].  
Dostupné z: [https://www.predistribuce.cz/cs/distribucni-sit/technicke-informace/Contents/2/pre\\_eon\\_cez\\_1.png](https://www.predistribuce.cz/cs/distribucni-sit/technicke-informace/Contents/2/pre_eon_cez_1.png)
- [8] Rozdělení elektrické energie - TZB-info. *TZB-info* [online]. [vid. 2019-12-23].  
Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-elektrinou/305-rozdeleni-elektricke-energie>
- [9] ČEPS, A.S. Dispečink ČEPS. *ČEPS, a.s.* [online]. [vid. 2019-12-31].  
Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/dispecink-ceps>
- [10] Systémové služby. *ČEPS, a.s.* [online]. [vid. 2020-01-01].  
Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/systemove-sluzby>

- [11] GRIGSBY, Leonard L. *Power system stability and control*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, c2012. ISBN 978-1-4398-8320-4.
- [12] MÁŠLO, Karel. Příčiny a následky velkých výpadků v dodávkách elektřiny - Časopis Elektro - Odborné časopisy. *Odbornecasopisy.cz* [online]. 2005 [vid. 2019-12-31]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/priciny-a-nasledky-velkych-vypadku-v-dodavkach-elektřiny--13130>
- [13] PAVLÍČEK, Jiří. *Možnosti regulace obnovitelných zdrojů elektrické energie* [online]. Brno, 2013 [vid. 2020-01-01]. Vysoké učení technické. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=67944](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=67944)
- [14] BERAN, Hynek, Vladimír WAGNER a Václav PAČES. *Česká energetika na křižovatce*. Praha: Management Press, 2018. ISBN 978-80-7261-560-5.
- [15] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. *Roční zpráva o provozu ES ČR* [online]. 11. prosinec 2019. Dostupné z: [http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Rocni\\_zprava\\_provoz\\_ES\\_2018.pdf/1420388b-8eb6-4424-9ad9-c06a57b5326c](http://www.eru.cz/documents/10540/4580207/Rocni_zprava_provoz_ES_2018.pdf/1420388b-8eb6-4424-9ad9-c06a57b5326c)
- [16] PROKOP, Ondřej. *Analýza provozu uzlu sítě po připojení jaderného bloku velkého výkonu* [online]. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=124958](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=124958)
- [17] MÁŠLO, Karel et al. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy* [online]. B.m.: Československá odborná sekce IEEE PES, 2013. Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/attach/PrilohyVyuka/Ř%C3%ADzen%C3%AD%20a%20stabilita%20elektrizačn%C3%AD%20soustavy.pdf>
- [18] *Kodex přenosové soustavy, Bezpečnost provozu a kvalita na úrovni PS* [online]. B.m.: ČEPS, a.s. 2018 [vid. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/documents/10540/3727955/ČEPS+PPPS+část+V.pdf/a7d70574f-bc22-46e1-b970-8f609d6c29df>
- [19] ČÍŽEK, Ondřej. *Stabilita napětí v NN sítích zatížených měniči s aktivní regulací na konstantní výstup* [online]. Brno, 2017 [vid. 2019-12-28]. Vysoké učení technické.

Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=147202](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=147202)

[20] Národní energetický mix. *OTE, a.s.* [online]. [vid. 2020-01-01].

Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/narodni-energeticky-mix>

[21] Solar - Fuels & Technologies. *IEA* [online]. [vid. 2020-01-01].

Dostupné z: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/solar>

[22] ZBORNÍK, Luděk. *Význam přečerpávacích vodních elektráren pro energetiku ČR*. Praha, 2019. České vysoké učení technické.

[23] KUBICA, Jan a Jiří WOJNAR. *Elektrotechnika* [online]. 2013 [vid. 2020-01-03]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/1108690-Elektrotechnika-kod-oboru-21-42-m-01-zamereni-hlubinne-dobyvani-lozisek-jan-kubica-jiri-wojnar.html>

[24] Statistiky SVR. *ČEPS, a.s.* [online]. [vid. 2020-01-01]. Dostupné

z: <https://www.ceps.cz/cs/statistiky-svr>

[25] SIDEK, Vojtěch. *Univerzální přijímač hromadného dálkového ovládní* [online]. Praha, nedatováno [vid. 2020-01-01]. České vysoké učení technické.

Dostupné z: [https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/8/87/Dp\\_2012\\_sidek\\_vo\\_jtech.pdf](https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/8/87/Dp_2012_sidek_vo_jtech.pdf)

[26] *HDO* [online]. 2019 [vid. 2020-01-02].

Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=HDO&oldid=17402078>

[27] NOVÁK, Radek. *Elektromobilita v ČR* [online]. B.m.: Česká spořitelna. 2019 [vid. 2020-01-03].

Dostupné z: [https://www.csas.cz/content/dam/cz/csas/www\\_csas\\_cz/Dokumenty-korporat/Dokumenty/Analytici/vyhled\\_elektromobility\\_v\\_CR\\_2019\\_03.pdf](https://www.csas.cz/content/dam/cz/csas/www_csas_cz/Dokumenty-korporat/Dokumenty/Analytici/vyhled_elektromobility_v_CR_2019_03.pdf)

[28] *Global EV Outlook 2019 – Analysis - IEA* [online]. [vid. 2020-01-02].

Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>

[29] LU, Jungwei a Jahangir HOSSAIN. *Vehicle-to-grid: Linking Electric Vehicles to the Smart Grid*. London: Institution of Engineering and Technology, 2015. ISBN 978-1-84919-855-4.

[30] AMRITANSHU, Shukla a Atul SHARMA. *Sustainability through energy-efficient buildings*. Boca Raton: CRC Press, 2018. ISBN 978-1-138-06675-5.

- [31] Electric power consumption (kWh per capita) | Data. *The World Bank* [online]. 2014 [vid. 2020-01-02].  
Dostupné z: [https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC?end=2018&locations=CZ&most\\_recent\\_year\\_desc=true&start=1990](https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC?end=2018&locations=CZ&most_recent_year_desc=true&start=1990)
- [32] Jízda čistá, ale co výroba? Kolik CO2 vznikne při výrobě elektromobilů? *Auto.cz* [online]. [vid. 2020-01-02]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/jizda-cista-ale-co-vyroba-kolik-co2-vznikne-pri-vyrobe-elektromobilu-131387>
- [33] ŽERT, František. *Strategie automobilky ve využití baterií z elektromobilu* [online]. Praha, 2019 [vid. 2020-02-01]. Diplomová práce. České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická.  
Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/82552/F3-DP-2019-Zert-Frantisek-Strategie\\_automobilky\\_ve\\_vyuziti\\_baterii\\_z\\_elektromobilu.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/82552/F3-DP-2019-Zert-Frantisek-Strategie_automobilky_ve_vyuziti_baterii_z_elektromobilu.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [34] A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices. *BloombergNEF* [online]. 5. březen 2019 [vid. 2020-01-03].  
Dostupné z: <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>
- [35] Velký přehled: Využívané i perspektivní technologie akumulace energie. *oEnergetice.cz* [online]. [vid. 2020-01-02].  
Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/velky-prehled-vyuzivane-i-perspektivni-technologie-akumulace-energie>
- [36] ECONOMIST, The. EKONOM: Jak skladovat elektřinu v moři a pod zemí. *Hospodářské noviny (IHned.cz)* [online]. 25. březen 2012 [vid. 2020-01-03].  
Dostupné z: <https://byznys.ihned.cz/c1-55152770-jak-zabalit-elektrinu>
- [37] Electric Vehicles. *BloombergNEF* [online]. 5. březen 2019 [vid. 2020-01-03].  
Dostupné z: <https://bnef.turtl.co/story/evo2018/?teaser=true>



## Seznam obrázků

Obr. 1 Uspořádání elektrizační soustavy [2] .....	11
Obr. 2 Schéma přenosové soustavy ČR [3] .....	12
Obr. 3 Rozdělení distribučních sítí podle provozovatelů [7].....	13
Obr. 4 Rozdělení stability elektrizační soustavy [2].....	23
Obr. 5 Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto v ČR – 2018 [15] .....	27
Obr. 6 Princip přečerpávací vodní elektrárny [23] .....	30
Obr. 7 Princip funkce elektrárny využívající gravitační sílu [36] .....	38
Obr. 8 Princip technologie CAES [13] .....	39

## Seznam grafů

Graf 1 Vývoj výroby a spotřeby elektřiny v ČR od roku 2009 - brutto [15].....	20
Graf 2 Brutto spotřeba elektřiny v ČR v roce 2018 [15] .....	21
Graf 3 Celosvětový kumulativní instalovaný výkon větrných a solárních elektráren v jednotlivých letech [21] .....	28
Graf 4 Kumulativní prodeje elektromobilů ve vybraných regionech [28] .....	33
Graf 5 Porovnání vývoje spotřeby elektřiny na jednoho obyvatele [31].....	35
Graf 6 Vývoj cen lithiových akumulátorů [34] .....	37
Graf 7 Roční světové prodeje vozů podle druhů paliva [37].....	41

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Vymezené frekvence v Hz pro jednotlivé zdroje energie [16].....	24
---	----