

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Odhad vývoje evropské elektrické výroby v kontextu současných
geopolitických problémů

Autor práce: **Ondřej Vaško**
Vedoucí práce: **Ing. Aleš Hromádka, Ph.D.**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Ondřej VAŠKO**
Osobní číslo: **E19B0178P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Téma práce: **Odhad vývoje evropské elektrické výroby v kontextu současných geopolitických problémů**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte odhad a hodnocení možností budoucího vývoje evropské elektrické výroby v kontextu současných geopolitických problémů.
2. Zhodnoťte stav současného poznání současné elektrické výroby.
3. Zpracujte rešerši perspektivních inovativních konceptů pro budoucnost elektrické výroby.
4. Navrhněte možné varianty budoucího vývoje evropské elektrické výroby a orientačně spočítejte jejich investiční náročnost.
5. Vytvořte SWOT analýzu každé varianty a srovnajte navržené varianty.


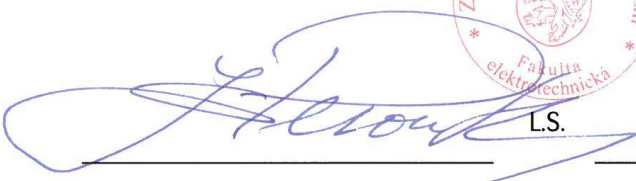
Rozsah bakalářské práce: **30 – 40**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**


Seznam doporučené literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Aleš Hromádka, Ph.D.**
Research and Innovation Centre for Electrical
Engineering

Datum zadání bakalářské práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2023**



L.S.
Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan


Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá budoucím vývojem výroby elektrické energie v Evropě. Nejprve jsou shrnuty současné geopolitické problémy, klimatické dohody a nařízení EU. Na základě klimatických dohod je nastíněn budoucí směr elektroenergetiky v Evropě a také je zde rozebrán vývoj v České republice. Dále jsou zmíněny a zhodnoceny současné způsoby výroby elektrické energie a analýzy předchozích let. V další části práce jsou uvedeny některé budoucí koncepty jako jsou malé modulární reaktory, systémy pro zachytávání oxidu uhličitého, jaderná fúze, organické Clausius Rankinovy cykly, decentralizované zdroje a grid forming střídače. Poslední část je věnována variantám budoucího vývoje elektroenergetiky v EU, jsou řešeny dvě varianty popisující předpokládaný směr vývoje s ohledem na Českou republiku. Na závěr je pro porovnání obou variant provedena SWOT analýza.

Klíčová slova

Budoucnost výroby elektrické energie, současné poznání evropské elektrické výroby, modulární reaktor, jaderná fúze, organický Rankinův cyklus, decentralizace energetického systému, budoucí přístup k energetické krizi, grid forming funkce, inovativní koncepty budoucí elektrické výroby, systémy CCS/CCUS

Abstract

This bachelor thesis focuses on the future development of electricity production in Europe. First, current geopolitical problems, climate agreements and EU regulations are summarized. Based on these climate agreements, the future direction of power engineering in Europe is outlined, along with an analysis of the development in the Czech Republic. Furthermore, the current methods of electricity production and analyses from previous years are mentioned and evaluated. The next section introduces several future concepts, such as small modular reactors, carbon capture systems, nuclear fusion, organic Clausius Rankine cycles, decentralized sources, and grid-forming inverters. The last part explores potential scenarios for the future development of power engineering in the EU, considering two options that describe the expected direction of development with respect to the Czech Republic. Finally, a SWOT analysis is conducted to compare both scenarios.

Key Words

The future of electricity generation, the current knowledge of European electricity generation, modular reactors, nuclear fusion energy, organic Rankine cycle, decentralization of power system, future way how to approach to the power energetic crisis, grid forming function, innovative concepts for the future of electrical production, systems CCS/CCUS

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval mému vedoucímu práce, Ing. Alešovi Hromádkovi, Ph.D., za jeho vždy vstřícný přístup, ochotu věnovat mi svůj volný čas a poskytnout užitečné rady. Rovněž bych chtěl vyjádřit svou vděčnost své rodině a přátelům, kteří mě podporovali.

Obsah

Úvod	- 10 -
1 Budoucí vývoj evropské elektrické výroby	- 11 -
1.1 Geopolitické problémy	- 11 -
1.2 Klimatické dohody	- 12 -
1.3 Budoucí vývoj	- 13 -
1.3.1 Směr budoucího vývoje na základě dohod a nařízení	- 13 -
1.3.2 Možnosti budoucího vývoje v EU	- 14 -
1.3.3 Možnosti budoucího vývoje v ČR	- 15 -
2 Současné poznání elektrické výroby	- 19 -
2.1 Výroba elektřiny	- 19 -
2.2 Zdroje energie	- 19 -
2.3 Elektrárny	- 20 -
2.3.1 Tepelné elektrárny	- 20 -
2.3.2 Klasické tepelné elektrárny	- 20 -
2.3.3 Paroplynové elektrárny	- 23 -
2.3.4 Jaderné elektrárny	- 25 -
2.3.5 Vodní elektrárny	- 28 -
2.3.6 Elektrárny využívající energii mořské vody	- 29 -
2.3.7 Sluneční elektrárny	- 31 -
2.3.8 Větrné elektrárny	- 33 -
2.3.9 Geotermální elektrárny	- 35 -
3 Současný stav elektrické výroby v Evropě	- 36 -
3.1 Vývoj výroby elektrické energie v Evropě v průběhu minulých let	- 36 -
3.2 Analýza roku 2021	- 37 -
3.3 Analýza roku 2022	- 43 -
4 Budoucí koncepty	- 51 -
4.1 SMR (Small Modular reactor) – Malý modulární reaktor	- 51 -
4.2 Systémy pro zachytávání, využívání a ukládání CO ₂	- 55 -
4.3 Jaderná fúze	- 60 -
4.3.1 Jaderná fúze obecně	- 60 -

4.3.2	Princip jaderné fúze	- 62 -
4.3.3	Lawsonovo kritérium.....	- 62 -
4.3.4	Druhy konceptů fúzních reaktorů	- 63 -
4.4	Organické Clausius Rankinovy cykly.....	- 67 -
4.4.1	Úvod	- 67 -
4.4.2	Koncepční typy ORC	- 68 -
4.4.3	Pracovní kapaliny a zdroje tepla.....	- 70 -
4.4.4	Budoucí využití	- 72 -
4.5	Decentralizované, distribuované zdroje energie a chytré sítě.....	- 73 -
4.5.1	Decentralizované a distribuované zdroje energie	- 73 -
4.5.2	Chytré sítě.....	- 76 -
4.6	Grid forming	- 78 -
5	Varianty budoucího vývoje	- 80 -
5.1	Jaderná energie	- 80 -
5.2	Decentralizované zdroje.....	- 81 -
6	SWOT analýza jednotlivých variant.....	- 84 -
6.1	Jaderná energie	- 84 -
6.2	Decentralizované zdroje.....	- 85 -
	Zhodnocení a závěr.....	- 86 -
	Literatura	- 88 -
	Seznam obrázků.....	I
	Seznam grafů	III
	Seznam tabulek.....	IV

Seznam symbolů a zkratk

Zkratka	Popisek	Jednotka
<i>CCS</i>	<i>Systém pro zachytávání a ukládání CO₂</i>	
<i>CCUS</i>	<i>Systém pro zachytávání, ukládání a využívání CO₂</i>	
<i>CO₂</i>	<i>Oxid uhličitý</i>	
<i>CZK</i>	<i>Česká koruna</i>	
<i>DSR</i>	<i>Reakce ze strany poptávky</i>	
<i>E</i>	<i>Elektrická energie</i>	<i>(Wh)</i>
<i>EENS</i>	<i>Celková roční nedodávka</i>	<i>(GWh)</i>
<i>EUR</i>	<i>Euro</i>	
<i>JE</i>	<i>Jaderná elektrárna</i>	
<i>LNG</i>	<i>Zkapalněný zemní plyn</i>	
<i>LOLE</i>	<i>Počet hodin s nedodávkou elektřiny</i>	<i>(h/rok)</i>
<i>LOLE_{NS}</i>	<i>Národní norma spolehlivosti LOLE</i>	<i>(h/rok)</i>
<i>NO_x</i>	<i>Oxidy dusíku</i>	
<i>NPV</i>	<i>Čistá současná hodnota</i>	
<i>ORC</i>	<i>Organické Clausius Rankinovy cykly</i>	
<i>P_i</i>	<i>Instalovaný výkon</i>	<i>(W)</i>
<i>SMR</i>	<i>Malý modulární reaktor</i>	
<i>SO_x</i>	<i>Oxidy síry</i>	
<i>USD</i>	<i>Americký dolar</i>	

Překlad anglických výrazů

Bioenergy	Bioenergie (energie získaná z biomasy)
Coal	Uhlí
Gas	Plyn
Hydro	Vodní
Nuclear	Jaderné
Other Fossil	Ostatní fosilní
Other Renewables	Ostatní obnovitelné zdroje
Solar	Sluneční
Wind	Vítr

Úvod

V současné době se evropská energetika nachází ve složitém kontextu geopolitických problémů, které mají zásadní vliv na energetickou bezpečnost a udržitelnost. Klimatické dohody, energetická krize a konflikt na Ukrajině představují nové výzvy, které značně transformují průmyslovou výrobu elektrické energie. Růst cen fosilních paliv, na kterých je Evropa stále z velké části závislá, společně s politikou Evropské unie, která se intenzivně snaží o jejich vyřazení a přechod na obnovitelné zdroje energie, přináší výzvy a nutnost transformace energetického sektoru.

Rychlý rozvoj a rozsáhlá integrace obnovitelných zdrojů energie a trend decentralizace s sebou nese nové problémy související se stabilitou energetické sítě a nutností instalace „chytrých“ zařízení, podpůrných a akumulčních systémů. Přechod k obnovitelným zdrojům přináší bezpochyby výhodu bezemisní výroby elektrické energie, ale zároveň klade nároky na stabilitu a spolehlivost sítě. Budoucí rozvoj elektrifikace zejména v oblasti dopravy a vytápění bude znamenat zvýšenou poptávku po elektrické energii, a to vyžaduje intenzivní hledání dlouhodobě udržitelných řešení pro klimaticky neutrální výrobu elektřiny.

Cílem práce je na základě analýzy současného stavu, poznání a výzev kterým dnes čelí výroba elektrické energie v Evropě, nastínit možné směry budoucí vývoje a představit některé inovativní koncepty pro budoucnost elektrické výroby. V závěru jsou uvedeny dvě možné varianty, jak by se daly nahradit vyřazené elektrárny na fosilní paliva v EU s ohledem na možnosti v České republice a orientačně stanovené náklady a vypočítaná přibližná doba návratnosti obou variant na základě metody čisté současné hodnoty (NPV). Navržené varianty jsou porovnány pomocí SWOT analýzy.

1 Budoucí vývoj evropské elektrické výroby

1.1 Geopolitické problémy

Globální oteplování je v dnešní době velmi zmiňovaný pojem. EU se svojí politikou intenzivně snaží o dodržení Pařížské dohody a omezení globálního oteplování vlivem vypouštění skleníkových plynů do atmosféry. Velká část skleníkových plynů, především CO₂, je produkována v energetickém sektoru. Je zde snaha o vyřazení fosilních paliv, především uhlí, které je bezpochyby velmi problematické z tohoto ohledu. Jako náhrada fosilních paliv je v posledních několika letech kladeno enormní úsilí na implementaci více obnovitelných zdrojů, především větrné a sluneční energie. Dále se využívá zemní plyn, jakožto přechodné palivo, protože produkuje oproti uhlí méně emisí.

Energetická krize, která byla způsobena zvyšováním cen fosilních paliv, vedla k podstatnému zdražení nejen elektrické energie. Prudký nárůst cen fosilních paliv, především zemního plynu způsobilo hned několik faktorů: globální růst poptávky po elektrické energii, který následoval po poklesu při pandemii COVID-19, růst cen emisních povolenek, nižší dodávky plynu z Ruské federace a vyčerpané zásoby zemního plynu z chladné zimy. Důsledkem energetické krize bylo zastropování cen energií. V energetické krizi hrály důležitou roli obnovitelné zdroje energie, které zaznamenaly několik rekordů. Ukázalo se, že ne vždy se lze spolehnout na zemní plyn jako přechodné palivo na čistou elektřinu. [4] [68]

Válka na Ukrajině ještě prohloubila trvající energetickou krizi v Evropě a urychlila přechod na obnovitelné zdroje. Vysoké ceny, omezování a nespolehlivost dodávek fosilních paliv z Ruska značně ohrožily energetickou bezpečnost EU. Válka poukázala na silnou závislost evropské energetiky na dodávkách fosilních paliv, převážně zemního plynu z Ruské federace. Prudký nárůst cen fosilních paliv výrazně změnil pohled na energetiku. Mnoho zemí začalo uvažovat o odklonu od fosilních paliv a přechodu k nízkouhlíkovým zdrojům energie jako jsou obnovitelné zdroje a jaderná energie. To vedlo v mnoha zemích ke zvýšení politických ambicí a cílů v zavádění obnovitelných zdrojů energie v důsledku obav o energetickou bezpečnost. Evropská komise jako reakci představila plán REPowerEU, kde navrhuje ukončit závislost na ruských fosilních palivech do roku 2027 a mimo jiné si klade za cíl zvýšit podíl obnovitelných zdrojů na výrobě elektrické energie z plánovaných 40 % na 45 % do roku 2030. V rámci odklonu od ruských fosilních paliv bylo nutné diverzifikovat dodávky z jiných regionů. V důsledku obav některé země EU zavedly

nouzová opatření, k nimž patřilo zejména navrácení několika odstavených, nebo prodloužení termínu uzavření některých uhelných elektráren. Celkem se tak do provozu uvedlo 26 uhelných bloků o instalované kapacitě 11 GW. Některé uhelné bloky v Evropě taktéž dostaly povolení pracovat na vyšší zatížení. Kvůli těmto uhelným blokům bylo zvýšeno množství dovezeného uhlí, nicméně větší část byla uskladněna a celkově tyto přidané uhelné bloky v roce 2022 výrazně nepřispěly k výrobě elektrické energie. V reakci na energetickou krizi a válku na Ukrajině bylo také odsunuto odstavení zbývajících jaderných reaktorů v Německu do dubna 2023. V některých zemích se také zrychlil proces licencování a povolení pro výstavbu fotovoltaických a větrných elektráren, především v Německu a Španělsku. Předpokládá se, že mezi lety 2022–2027 se zdvojnásobí instalovaná kapacita obnovitelných zdrojů energie. [8] [67]

1.2 Klimatické dohody

- **Pařížská dohoda** je mezinárodní dohoda o omezení globálního oteplování. Byla přijata v Paříži v roce 2015. Stanovuje snížení emisí skleníkových plynů, tak aby nárůst teploty způsobený globálním oteplováním byl pod 2 °C a usiluje o omezení nárůstu teploty o 1,5 °C oproti hodnotám před průmyslovou revolucí. Pařížská dohoda byla doplněna zprávou IPCC, která poukazuje na to, že pro omezení oteplení na 1,5 °C je nutné snížit emise skleníkových plynů na polovinu do roku 2030 a dosáhnout klimatické neutrality do roku 2050. [65]
- **Green Deal (zelená dohoda)** je iniciativa Evropské komise představena v roce 2019, zahrnuje různá opatření pro ochranu životního prostředí a boj proti změně klimatu. Cílem je dosažení klimatické neutrality do roku 2050 a snížení emisí skleníkových plynů oproti roku 1990 alespoň o 55 % do roku 2030. Toho se z hlediska energetiky dosáhne větší integrací obnovitelných zdrojů, jaderných elektráren a vyřazování uhelných elektráren. Podle dohody by se měl zvýšit podíl obnovitelných zdrojů v energetickém mixu EU do roku 2030 na 40 %. [62] [63]
- **Evropský klimatický zákon** přijatý v roce 2021 ustanovuje Zelenou dohodu jako právně závaznou pro EU, EU se má stát klimaticky neutrální do roku 2050 a sníží do roku 2030 emise skleníkových plynů o 55 % oproti roku 1990. [65]
- **Fit for 55** je balíček návrhů/opatření, který byl taktéž přijat v roce 2021, slouží pro dosažení cílů v oblasti klimatu do roku 2030. Udává, jak má EU snížit emise skleníkových plynů nejméně o 55 % do roku 2030 oproti roku 1990. Z hlediska

energetiky se zaměřuje zejména na rychlejší snižování emisních povolenek, snižování emisí skleníkových plynů, především metanu a oxidu uhličitého. Dalším cílem je do roku 2030 dosáhnout minimálně 40% podílu obnovitelných zdrojů v energetickém mixu EU. V neposlední řadě je navrhován přechod od zemního plynu k obnovitelným a nízkouhlíkovým druhům plynu. [64] [65]

- **REPowerEU** je plán Evropské unie, který vznikl v reakci na válku na Ukrajině. V rámci realizace tohoto plánu EU snížila závislost na dodávkách fosilních paliv z Ruska a snažila se diverzifikovat dodávky z jiných zemí. Dále se zavedlo zastropování cen plynu a ropy. EU také zvedla svoje cíle pro podíl obnovitelných zdrojů energie na rok 2030 na 42,5 %, přičemž se cílí na 45 %. [66]

1.3 Budoucí vývoj

1.3.1 Směr budoucího vývoje na základě dohod a nařízení

Na základě dosavadních klimatických dohod a aktuálního vývoje, lze předpokládat, že se bude pokračovat v trendu zvyšování instalované kapacity obnovitelných zdrojů, zejména větrné a solární energie a vyřazování elektráren spalujících fosilní paliva, především uhelných. Dlouhodobým cílem nejen Evropské Unie, ale i globálně je snaha o dekarbonizaci a dodržení Pařížské dohody. Ve snaze omezit emise skleníkových plynů produkovaných průmyslovou výrobou zavedla emisní povolenky a snaží se omezit jejich počet na trhu [69]. Evropská unie chce v tomto jít příkladem a stát se první v dosažení klimatické neutrality do roku 2050. Postupné vyřazování elektráren spalující fosilní paliva, které pokrývají základní a pološpičkové zatížení bude nutné nahradit, a to nejspíše zajistí z části právě obnovitelné zdroje, nicméně bude důležité postavit nové jaderné elektrárny, které pokryjí základní zatížení a budou poskytovat stálý a spolehlivý zdroj energie nezávislý na počasí a povětrnostních podmínkách. Francie jde v tomto příkladem, téměř 70 % své elektřiny vyrábí z jadra, ukazuje tak, že jaderná energetika může být čistým bezemisním a uhlíkově neutrálním řešením [70].

V reakci na energetickou krizi a válku na Ukrajině, ve spojitosti s nestabilitou cen fosilních paliv, spoustu zemí v Evropě zvýšilo svoje ambice v oblasti jaderné energetiky, s výjimkou Rakouska a Německa, a plánují vystavět nové jaderné bloky. V EU se plánuje v příštích 15 letech vystavět celkem 7 jaderných reaktorů a v Británii další 2. V průběhu nadcházejících let, můžeme očekávat, že se tento počet ještě zvýší, protože v EU je navrženo postavit dalších 25 reaktorů a také několik v Evropě mimo EU. Francie, jakožto největší

představitel jaderné energetiky v EU, dokončuje výstavbu reaktoru Flamanville 3, který má být poprvé spuštěn v roce 2024, poté plánuje výstavbu 6 nových reaktorů a další zvažuje [70]. K dekarbonizaci by také v budoucnu mohli přispět malé modulární reaktory (SMR), na jejich výzkumu, vývoji a integraci do svého energetického systému se zaměřuje mnoho zemí v Evropě, například Finsko, Rumunsko, Polsko, Velká Británie a další [70]. Dále lze předpokládat, že vyřazení elektráren na fosilní paliva se bude týkat hlavně uhelných elektráren, protože na jednotku vyrobené elektrické energie produkují nejvíce emisí CO₂ [72]. Plynové elektrárny budou v budoucnu hrát důležitou roli jako náhrada za uhlí, hlavně v zemích bez jaderné energetiky např. v Německu. Německo v dubnu v roce 2023 odstavilo všechny své poslední jaderné reaktory, a bude se tak v budoucnu muset spoléhat, pro pokrytí základního zatížení, právě na zemní plyn anebo import elektrické energie od svých sousedů. V dlouhodobém časovém horizontu lze také předpokládat snahu o postupné vyřazování plynu z energetiky a náhradu jinou alternativou například vodíkem. [69]

Podle plánu REPowerEU by se v roce 2030 mělo dosáhnout celkového podílu obnovitelných zdrojů 45 %, přičemž na výrobě elektrické energie by se obnovitelné zdroje měly podílet 69 %. Instalovaná kapacita větrných elektráren by měla dosáhnout 510 GW a fotovoltaických elektráren 592 GW. [71]

Společně s obnovitelnými zdroji bude nutné zvýšit kapacitu bateriových úložišť elektrické energie, které částečně vyrovnají nestálost výroby elektřiny z elektráren využívající obnovitelné zdroje energie. Protože se klimatické dohody týkají i automobilů se spalovacím motorem, bude nutné se zaměřit i na elektromobilitu, především bude nutné zvýšit počet dobíjecích stanic.

1.3.2 Možnosti budoucího vývoje v EU

Dle společnosti *ENERGY BRAINPOOL* existují na základě současné politické situace 4 scénáře budoucího vývoje energetiky v zemích EU, Velké Británie, Norsku a Švýcarsku. [75]

- **Střední scénář** předpokládá, že zmíněné země Evropy ve spojitosti s konfliktem na Ukrajině zastaví dodávky ruského plynu nejpozději do roku 2027. Ruský zemní plyn bude kompletně nahrazen zkapalněným zemním plynem LNG od jiných dodavatelů. Energetický systém bude silně decentralizovaný a silně závislý na obnovitelných zdrojích energie. Z dlouhodobého hlediska nahradí zemní plyn syntetická paliva a „zelený“ vodík. Do roku 2060 se předpokládá plná dekarbonizace v důsledku odklonu od fosilních paliv, rozvojem tepelných

čerpadel a zvyšující se výroby a využití vodíku. Všechny obnovitelné zdroje budou tvořit do roku 2050 85 % instalované kapacity. Podíl elektromobilů a nákladních elektrických vozidel vzroste na 95 %. [75]

- **Pesimistický scénář** uvažuje horší variantu, zvyšující se napětí mezi Ruskem a západem bude pokračovat, a tak Evropa bude usilovat o co nejrychlejší zastavení dodávek ruského plynu. V některých zemích je rozvoj obnovitelných zdrojů pomalejší. [75]
- **Optimistický scénář** naopak zobrazuje situaci, kdy se napětí mezi Ruskem a západem v nadcházejících letech zmírní. Nadále bude pokračovat dovoz zemního plynu z Ruska do Evropy, nicméně bude snaha o postupné omezení závislosti na ruských fosilních palivech. Cíle v oblasti rozvoje obnovitelných zdrojů by zůstaly na podobné úrovni jako v období krize. [75]
- **Vodíkový scénář** předpokládá nahrazení zemního plynu zeleným vodíkem. Scénář počítá také s výraznou elektrifikací a s tím spojené navýšení poptávky po elektrické energii. Nárůst poptávky bude pokryt obnovitelnými zdroji energie a plynovými turbínami spalující vodík. [75]

Mnoho dnešních elektráren přesáhne do roku 2050 hranici své životnosti a budou muset být nahrazeny. Instalovaná kapacita uhelných elektráren se do roku 2050 sníží více než o 81 % a do roku 2060 o více jak 92 %. Vyřazené uhelné elektrárny budou v budoucnu nahrazeny plynovými, jadernými elektrárnami a obnovitelnými zdroji. Předpoklad je tedy budoucí nárůst plynových elektráren, které produkují nižší emise než uhelné elektrárny a v moderních plynových turbínách lze spalovat místo zemního plynu i vodík a další syntetická paliva. Díky poklesu nákladů bude nadále růst větrná a sluneční energie. Obnovitelné zdroje, jaderné elektrárny a plynové elektrárny spalující vodík budou do roku 2050 tvořit bezemisní výrobu elektřiny, která stoupne na 99 %. [75]

1.3.3 Možnosti budoucího vývoje v ČR

Podle hodnocení zdrojové přiměřenosti elektrizační soustavy ČR do roku 2040, vydané společností ČEPS, a.s. existují 4 scénáře budoucího vývoje české energetiky. Jsou zde zohledněny faktory jako je budoucí energetický mix, síťová kapacita pro import a export, spotřeba, dopad na životní prostředí a ekonomická stránka. [72]

První možností je **Respondentní scénář**, který je založen na strategiích a plánech provozovatelů energetických zdrojů, podle dotazníkového průzkumu. Tento scénář neuvažuje odstup od uhlí do roku 2040. Dochází k postupnému navyšování spotřeby

elektrické energie v důsledku střední elektrifikace a pozvolnému nárůstu instalované kapacity obnovitelných zdrojů energie. Protože odchod od uhlí je zde uvažován až po roce 2040, je roční počet hodin s nedodávkou elektřiny (LOLE) nejnižší ze všech uvedených scénářů (maximálně 3 h/rok) a hodnota celkové roční nedodávky (EENS) je také nejnižší (0,9 GWh). Takový energetický systém je tedy zdrojově přiměřený a je zajištěna dostatečná spolehlivost a stabilita dodávek elektrické energie. Tento scénář je ekonomicky nejpřívětivější a lze jej nejsnáze realizovat, protože nepřipouští tak rapidní změnu energetické soustavy. [72]

Konzervativní scénář uvažuje ukončení spalování uhlí v energetice do roku 2038. Rozvoj obnovitelných zdrojů energie, elektrifikace a budoucí spotřeby je obdobný jako Respondentní scénář. Nahrazení vyřazených uhelných elektráren zajistí plánovaný nový jaderný blok v Dukovanech, zvýšené vytížení plynových zdrojů a částečně import ze zahraničí. I když je tento scénář náročnější než předchozí, nezpůsobí do roku 2040 výrazné problémy v zajištění dodávky elektrické energie. LOLE stále nepřekročí normu spolehlivosti ČR, která je stanovena do 15 h/rok ($LOLE_{NS} = 15 \text{ h/rok}$). [72]

Dalším je **Progresivní scénář**, který počítá s vyřazením uhlí do roku 2033 a výraznějším nárůstem instalované kapacity obnovitelných zdrojů. Shoduje se tedy s plánovanými klimatickými cíli dekarbonizace EU. Vyšší míra elektrifikace způsobuje zvýšení spotřeby elektrické energie. Progresivní scénář nesplňuje normu spolehlivosti elektrizační soustavy, protože značně překračuje počet hodin nepokrytého zatížení (LOLE), v roce 2040 až na 389 hodin. Vyřazené uhelné elektrárny by bylo třeba kompenzovat výrazným zvýšením produkce plynových elektráren, nicméně to by samo o sobě nestačilo a bylo by nutné zajistit značné objemy dodávek elektřiny ze zahraničí, které hraničí s přenosovou kapacitou naší elektrizační soustavy. [72]

Poslední uvedená možnost je **Dekarbonizační scénář**, který souvisí s rozsáhlou elektrifikací v dopravě, průmyslu a vytápění. Rozsáhlá elektrifikace souvisí se značným nárůstem spotřeby elektrické energie. Tento scénář je velice ambiciózní, protože počítá s dekarbonizací, odchodu od uhlí do roku 2030 a rapidním nárůstem instalované kapacity obnovitelných zdrojů až téměř na dvojnásobnou hodnotu Konzervativního scénáře. Značná zdrojová nepřiměřenost a nespolehlivost elektrizační soustavy i při vysokém importu a maximálním využití plynových zdrojů, ukazuje tento scénář jako nepřilíš realizovatelný. To potvrzuje ukazatel LOLE, který pro rok 2040 dosahuje 1085 hodin a také ukazatel EENS, kdy celková roční nedodávka by byla 2676 GWh. Rozsáhlé investice do obnovitelných zdrojů, nákup velkého objemu roční spotřebované elektřiny a velká spotřeba zemního plynu

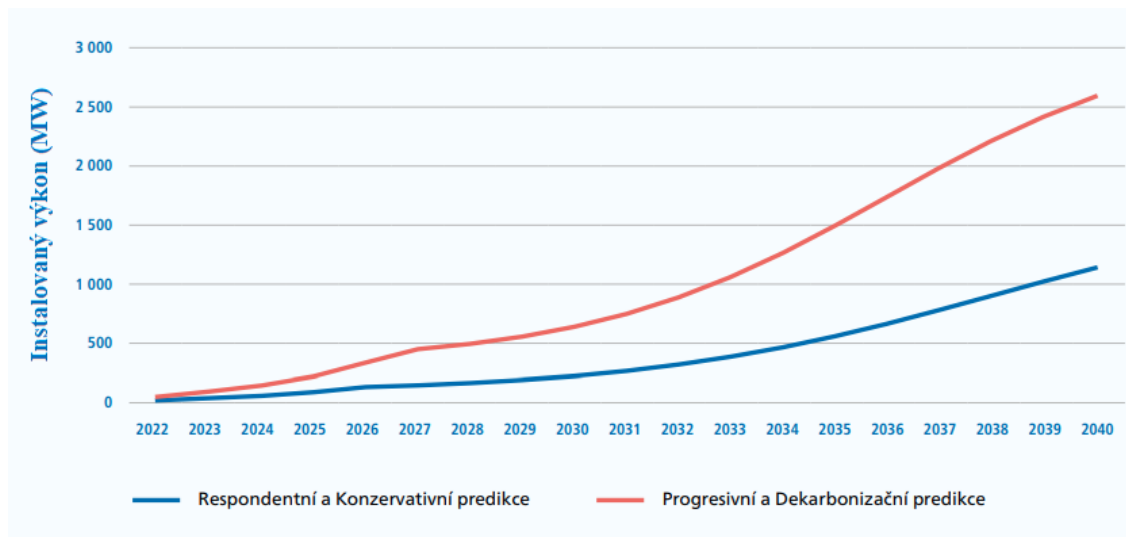
dělá tento scénář ekonomicky nejnáročnějším. Paradoxně je Dekarbonizační scénář emisně nejnáročnější, protože značná elektrifikace zvýší produkci plynových elektráren a je nutné vybudovat či revitalizovat infrastrukturu pro obnovitelné zdroje energie. Vysoká emisní náročnost může být jen přechodného charakteru, nicméně pro ČR je tento scénář spíše celkově nerealizovatelný. [72]

Progresivní a Dekarbonizační scénář naznačují, že Česká republika bude v dlouhodobém horizontu potřebovat stavbu dalších nových jaderných zdrojů. Všechny scénáře ukazují, že výstavba nového jaderného zdroje má minimální vliv na cenu elektrické energie a počítají s novým reaktorem v JE Dukovany o instalovaném výkonu netto (výkon s uvažováním vlastní spotřeby) 1140 MW. Souběh současných jaderných bloků a nového bloku v Dukovanech je nutný pro postupné vyřazování uhlí z energetiky a snižování emisí v ČR. Do budoucna se předběžně uvažuje o stavbě dalších jaderných bloků i v JE Temelín 3, 4 a v JE Dukovany 6. Česká republika se také podílí na vývoji malých modulárních reaktorů a zkoumá jejich potenciální využití. V březnu 2022 společnost ČEZ oznámila, že v areálu JE Temelín vyčlenila plochu, která bude v budoucnu sloužit pro výstavbu prvních malých a středně velkých modulárních reaktorů. Vysoká míra elektrifikace a s tím související nárůst spotřeby energie, bude vyžadovat integraci nových zařízení pro řízení a regulaci elektrizační soustavy. Rozvoj bude nutný v oblasti digitalizace, služeb systémové rovnováhy, kapacitních mechanismů a akumulace, řízení decentralizovaných zdrojů a DSR (odezva na straně spotřeby). [72] [73]

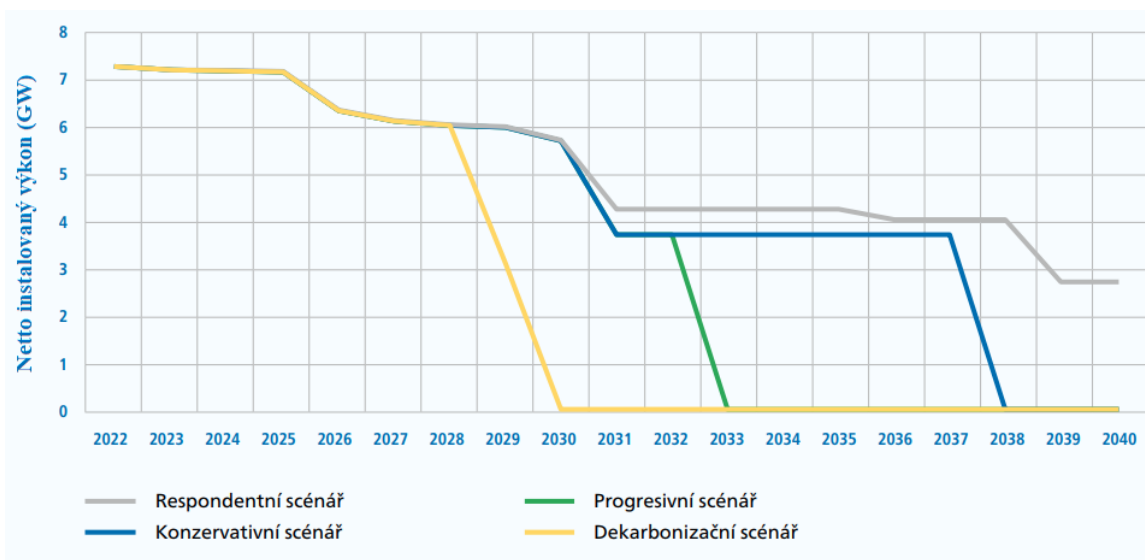
Tabulka 1 Hodnoty LOLE pro jednotlivé scénáře, červené hodnoty překračují normu spolehlivosti [72]

Scénář	2030	2035	2040
Respondentní	1 h	1 h	3 h
Konzervativní	1 h	1 h	12 h
Progresivní	1 h	146 h	389 h
Dekarbonizační	105 h	623 h	1085 h

Potřebu vyrovnávat přebytek i nedostatek energie z obnovitelných zdrojů, především fotovoltaických elektráren zajistí bateriová akumulace elektřiny. Akumulace při vysokém podílu obnovitelných zdrojů bude nedílnou součástí elektrizační soustavy. Kromě malých baterií pro střešní fotovoltaické panely je nutné instalovat i velké stacionární baterie, které dosahují výkonů a kapacit jednotek až desítek MW, resp. MWh. [72]



Graf 1 Předpokládaný vývoj bateriové akumulace v ČR [72]



Obr. 1 Postupné vyřazování uhlí podle jednotlivých scénářů [72]

Vzhledem k narůstajícím nárokům na snižování emisí CO₂ je kladen velký důraz na elektrifikaci v oblasti automobilové dopravy. V dlouhodobém horizontu může taková elektrifikace klást značné požadavky na elektrizační soustavu. Tyto požadavky se týkají jak požadovaného výkonu pro dobíjení elektrických vozidel, tak i potřebné infrastruktury pro toto dobíjení. Dle predikce vývoje elektromobility v ČR do roku 2045 by se mohla většina dnešních osobních automobilů nahradit elektromobily, tj. cca 3,5 až 4,5 milionů vozidel. S uvažováním dalších 300 až 400 tisíc lehkých užitkových vozů by mohlo z hlediska výkonových dopadů na síť být výsledně špičkové zatížení cca 5 GW, které je předpokládáno ve večerních hodinách. Bude nutné zajistit dostatečnou kapacitu a výkon sítě pro efektivní dobíjení. Zároveň je důležité budovat dobíjecí infrastrukturu, k zajištění dostatečného množství dobíjecích bodů a stanic, aby bylo možné pokrýt rostoucí poptávku. [74]

2 Současné poznání elektrické výroby

2.1 Výroba elektřiny

Jak vyplývá ze zákona zachování energie, energii nelze přímo vyrobit nebo zničit, ale pouze přeměnit na různé formy. Formy energie vyskytující se v přírodě jsou často obtížně přepravitelné a nelze je příliš prakticky využít, proto musíme tyto formy energie tzv. zušlechtit, tedy přeměnit na jiný druh. Různé formy energie přeměňujeme na energii elektrickou, kterou lze poměrně snadno přenést na velké vzdálenosti a poté ji lze zase přeměnit například na teplo nebo mechanickou energii v elektrických strojích. Právě díky snadnému přenosu, distribuci a poměrně dobře zvládnuté problematice energetické přeměny je v dnešní době elektrická energie lidstvem hojně využívána. Energie se nevyskytuje samostatně jako taková, ale je vždy vázána na nějakou kapalnou, pevnou anebo plynnou látku, které říkáme nositel energie. Elektrickou energii v současnosti vyrábíme ve velkém měřítku v elektrárnách, kde se přeměňuje jiná forma energie z přírodních zdrojů na energii elektrickou. Nejčastěji se jedná o termodynamickou přeměnu energie spalováním fosilních paliv a energie jaderného paliva na mechanickou energii a následně v alternátoru na energii elektrickou. Dalším hojně využívaným způsobem je přeměna kinetické a potenciální energie vody na energii mechanickou a následně opět na elektrickou energii v alternátoru. K výrobě elektřiny se také dnes hojně využívá pohybová energie větru, energie slunečního záření. V neposlední řadě se využívá geotermální energie, energie z biomasy, slapová energie (energie mořského přílivu a odlivu), energie mořských vln a tepelná energie moře (teplotní rozdíl vrstev mořské vody). [11] [12]

2.2 Zdroje energie

Zdroje využívané k výrobě elektřiny lze rozdělit na obnovitelné, neobnovitelné a alternativní. Mezi neobnovitelné zdroje energie řadíme klasická fosilní paliva (uhlí, ropa, zemní plyn atp.) a jaderné palivo. Výhodou neobnovitelných zdrojů energie je jejich velká výkonová hustota, vysoká spolehlivost a pohotovost, což jsou bezpochyby vlastnosti vhodné pro výrobu elektřiny, nicméně fosilní paliva přinášejí i mnohé nevýhody. Největší a v poslední době hodně poukazovanou nevýhodou je dopad na životní prostředí (produkce emisí). Dále v dnešní době energetické krize je také jejich velkou nevýhodou vysoká cena daná i emisními povolenkami, která přímo zvyšuje cenu produkované elektrické energie.

Problémem je také, že fosilních paliv je v přírodě omezené množství, které se jednoho dne vyčerpá. [14]

Obnovitelné zdroje energie pochází z přírodních procesů a pochodů, které se konstantně přirozeně obnovují, odtud také název „obnovitelné zdroje“. V základu obnovitelná energie pochází přímo nebo nepřímo ze Slunce, větru, vody včetně energie mořských vln, energie přílivu a odlivu, biopaliva (bioplyny, bio-oleje, biomasa a obnovitelný vodík) anebo z tepla generovaného hluboko uvnitř země (geotermální energie). Ačkoliv tyto biopaliva podle Směrnice EU jsou zařazeny mezi obnovitelné zdroje rozhodně nejsou bezemisní, vědecké výzkumy ukazují, že některé formy bioenergie produkují značné emise [4]. [2]

Velkou výhodou obnovitelných zdrojů je bezpochyby jejich nevyčerpatelnost, ekologičnost a relativně nízké provozní náklady. Naproti tomu, ale nemají tak vysokou výkonovou hustotu a pohotovost (např. větrná a sluneční energie) a nepříznivý rozdíl mezi podílem na instalovaném výkonu a podílem na vyrobené elektrické energii. [14]

2.3 Elektrárny

2.3.1 Tepelné elektrárny

Pojem tepelná elektrárna je obecně výrobní elektrárna, která produkuje elektrickou energii přeměnou z tepelné energie. Principiálně lze mezi tepelné elektrárny zařadit jak klasické tepelné elektrárny spalující fosilní paliva, tak i paroplynové, jaderné, geotermální a sluneční tepelné elektrárny využívající energii Slunce. [13]

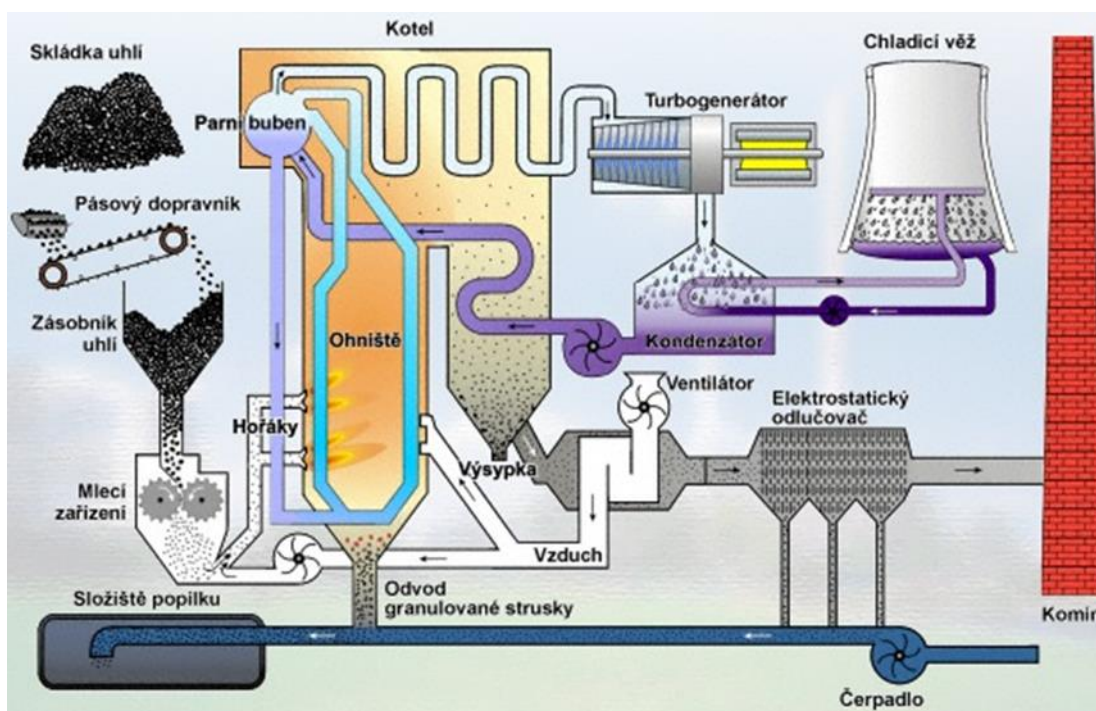
2.3.2 Klasické tepelné elektrárny

Základní princip klasických tepelných elektráren spočívá v přeměně chemické energie vázané v palivu na tepelnou, tepelná energie se akumuluje a přenáší médiem obvykle párou za určitého tlaku a teploty a následně se tato tepelná energie mění v kinetickou energii a ta se nakonec mění v energii elektrickou. [15]

Chemická energie ukrytá v palivu se spalováním v kotli přemění na tepelnou energii a vyprodukované teplo je uvolněno do vody, která se mění v parogenerátoru kotle na páru. V přehříváku, což je součást kotle je získaná sytá pára dále přehřívána a mění se na superkritickou. Vysokotlaká superkritická pára je poté parovody vedena do turbíny, kde expanduje a přemění svou tepelnou energii na kinetickou energii nebo také mechanickou práci. Otáčející se turbína je na společné hřídeli se synchronním turboalternátorem, který následně přeměňuje kinetickou energii na elektrickou. Tepelné elektrárny jsou vždy

principiálně stejné, liší se však palivem, způsobem vzniku a parametry páry. Jako palivo lze využít černé, hnědé uhlí, lignit, antracit, zemní plyn, ropu a ropné produkty, bioplyn, energo plyn, biomasu atp. [15]

Historicky nejrozšířenějším typem klasické tepelné elektrárny je uhelná elektrárna. Většina dnešních uhelných elektráren se skládá z několika výrobních bloků. Jeden elektrárenský výrobní blok se skládá z kotle, turbíny, generátoru, odlučovačů popílku, chladicí věže, blokového transformátoru a odsiřovacího zařízení, přičemž některá zařízení elektrárny jako je komín, pomocná zařízení k odběru a odsiřování, zařízení na úpravu vody a zauhlování jsou společné pro několik elektrárenských bloků. [16]

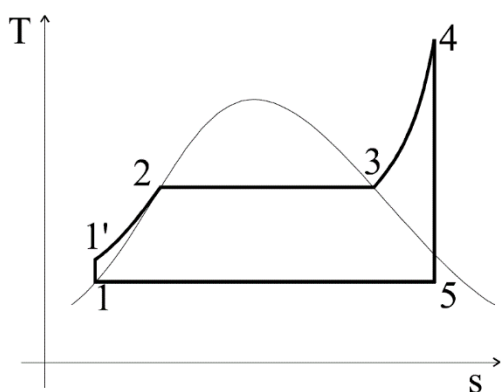


Obr. 2 Schéma uhelné elektrárny, převzato z [13]

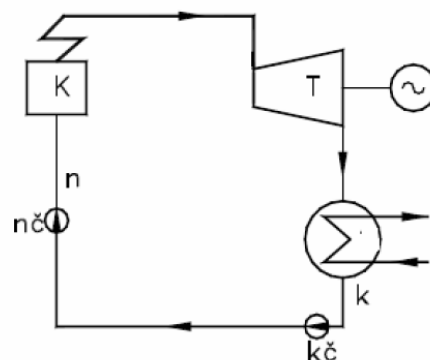
Klasické tepelné elektrárny pracují na principu Clausius – Rankinova cyklu. Tento termodynamický cyklus popisuje cirkulaci napájecí vody a její skupenské změny v tepelném okruhu elektrárny. Cyklus probíhá v několika fázích. Nejprve dochází k adiabatické kompresi, čerpá se upravená demineralizovaná voda hlavním oběhovým čerpadlem (napáječkou) a probíhá přehřev vody pro zvýšení účinnosti cyklu (1-1'), poté voda vstupuje do ohříváku (součást kotle), kde je izobaricky ohřívána až na mez sytosti, kdy voda začne vřít (1'-2). V další části kotle (ve výparníku) probíhá izobarický a současně izotermický var a vzniká sytá pára (2-3). Než pára opustí kotel je v přehříváku izobaricky ohřívána na pracovní teplotu (3-4). Parovody je pára vedena do turbíny, kde dochází k adiabatické expanzi a pára předá svou tepelnou a kinetickou energii (4-5). Parní turbína je

obvykle složena z více těles rozdělených podle pracovního tlaku na vysokotlakou, středotlakou a nízkotlakou. Pro zvýšení účinnosti je mezi jednotlivými částmi turbíny pára vedena zpět do kotle pro zvýšení teploty (přihřívání). Poté je pára vedena z turbíny do kondenzátoru pro izobarickou a adiabatickou kondenzaci, pára tedy mění skupenství z plynného opět na kapalinu a je společně s napájecí vodou z nádrže vedena opět do kotle (5-1). [11] [15]

Účinnost klasické tepelné elektrárny se pohybuje okolo 40 %, moderní elektrárny dosahují účinnosti až 45 % a rekordně se podařilo dosáhnout účinnosti až 47,5 % [17]. Účinnost tepelné elektrárny je omezena hlavně účinností Clausius – Rankinova cyklu. Je tedy snaha zvyšovat účinnost cyklu samotného, nejčastěji se používají přihříváky páry nebo regenerativní ohřev napájecí vody, tyto metody zlepšují účinnost jen o několik jednotek procent. Dále lze účinnost zvýšit navýšením parametrů admisní páry (tlaku a teploty) a také zvyšováním účinnosti jednotlivých komponentů (zařízení) tepelného oběhu. Největším problémem zvyšování parametrů admisní páry jsou konstrukční limity materiálů tepelného oběhu (kotel, potrubí, turbína). V budoucnu se předpokládá, že nejmodernější pokročilé tepelné elektrárny dosáhnou účinnosti až 50 % a to díky pokročilým kovovým slitinám, které budou schopné vydržet teploty nad 700 °C a tlaky nad 350 barů [17]. [15]



Obr. 3 TS diagram Clausius – Rankinova cyklu [11]



Obr. 4 Blokové schéma RC cyklu: kč=kondenzátorové čerpadlo, nč=napájecí čerpadlo, n=napájecí potrubí, K=kotel, T=turbína, ~ = turboalternátor, k= kondenzátor[15]

Největší předností tepelných elektráren je poměrně velký a regulovatelný výkon (regulace spalování v kotli), stálý a stabilní výkon, levnější náklady na výstavbu oproti jaderným elektrárnám [18]. Oproti tomu velkou nevýhodou je fakt, že spalováním fosilních paliv vznikají vedlejší produkty a obrovské množství emisí, které znečišťují životní prostředí a mají negativní dopad na zdraví živých organismů [18]. Při spalování uhlí vznikají plynné spaliny, popílek a tuhé znečišťující zbytky (škvára, struska). Popílek se

zachytává odlučovači, z nichž je nejúčinnější elektrostatický odlučovač. Pevné exhalace jsou využívány na výrobu stavebních materiálů a při rekultivacích. Plynné spaliny jsou hlavně oxidy síry, dusíku a oxid uhličitý. Oxidů síry se zbavujeme odsiřováním, založeným na metodě buď mokré vápencové vypírky, nebo polosuché metodě. U fluidních kotlů se oxidy síry zachytávají přidáním vápence přímo do ohniště kotle. Oxidy dusíku se redukuje pomocí množství vzduchu přiváděného do kotle a snížením teploty spalování (fluidní kotle). Při spalování kapalných paliv se sice výrazně redukuje produkované pevné exhalace, ale stále zůstávají plynné spaliny (NO_x , CO_2 , SO_x). Další nevýhodou tepelných elektráren je samotný fakt nutnosti využití neobnovitelných zdrojů a potřeba vodního zdroje pro kontinuální doplňování napájecí vody [18]. [15] [19]

Vzhledem k tomu, že při spalování fosilních paliv vzniká spousta škodlivin (NO_x , CO_2 , SO_2 , prachové částice nebo polycyklické aromatické uhlovodíky), které musí být před vypuštěním do ovzduší zachyceny a v dnešní době kolísavých cen fosilních paliv je tedy tento druh výroby elektřiny poměrně neperspektivní a nákladný, což ještě podporuje politika EU, která zavedla nákup emisních povolenek. Ačkoliv je snaha o zmírnění dopadů na životní prostředí, stále se zcela nepodařilo vyřešit zachytávání a ukládání CO_2 . Systém CSS (Carbon Capture and Storage) je zatím stále ve fázi vývoje a zkušebního provozu v několika zemích a je v něj kladena velká důvěra do budoucnosti [21]. [20]

2.3.3 Paroplynové elektrárny

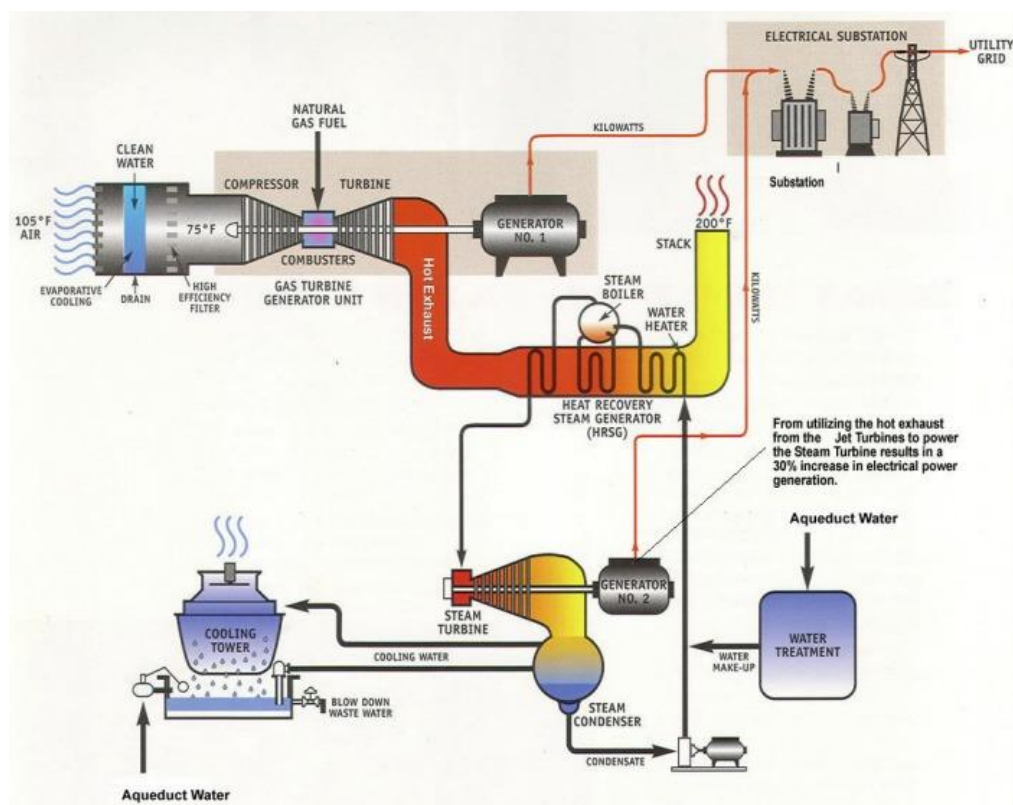
Tento druh elektrárny lze zařadit do klasických tepelných elektráren, nicméně proces výroby a přeměny energie zde probíhá trochu odlišně. Paroplynová elektrárna využívá paroplynový cyklus, z technického hlediska se jedná o dva cykly: plynový Braytonův cyklus a klasický parní Clausius – Rankinův cyklus navzájem propojenými spalinovými cestami. Velkou výhodou kombinovaných cyklů je vícenásobné využití vstupního tepla, a tak lepší využití vložené energie, a tedy vyšší účinnost. [22]

Princip funkce spočívá nejprve v plynovém Braytonovu cyklu, ohřátý a kompresorem stlačený vzduch se mísí s palivem (zemní plyn) a vhání do spalovací komory. Spaliny pohánějí plynovou turbínu, která roztáčí alternátor. Spaliny vystupující z plynové turbíny jsou pro zvýšení účinnosti zahřívány a vháněny do spalinového výměníku, kde jsou využity pro generaci páry. Dále následuje již známý parní Clausius – Rankine oběh. [23]

Jako palivo se nejčastěji používá zemní plyn, méně často olej, dále se využívají např. bioplyn, nebo plyny vznikající zplynováním uhlí. V budoucnosti se očekává rozvoj

paroplynových zdrojů, které budou využívat integrovaného zplynování uhlí (takzvaný IGCC – Integrated Gasification Combustion Cycle). [22]

Paroplynová elektrárna má díky plynovému oběhu několik výhod, hlavní výhodou je flexibilita regulace výkonu a jsou tak velice pružným zdrojem elektrické energie, který se používá k vykrývání špiček denního diagramu zatížení. Rychlost připojení k síti několik minut po spuštění je také velkou výhodou. Díky rychlé regulaci jsou právě tyto elektrárny vhodné v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie. Oproti klasickým uhelným a jaderným elektrárnám mají výrazně kratší dobu výstavby a také mají nižší investiční náklady. Díky kombinovanému paroplynovému cyklu dosahuje tento typ výroben elektrické energie vyšší účinnosti až 55 %. Další předností je lepší šetrnost k životnímu prostředí, nízká produkce emisí na jednotku vyrobené energie díky palivu a vícenásobnému využití energie. Paroplynové elektrárny také neprodukují žádný popílek a mají nižší vlastní spotřebu než uhelné elektrárny [15]. Největší nevýhodou tohoto typu elektráren je však drahé palivo (zemní plyn), což ještě umocnila energetická krize. Další nevýhodou může být i závislost výkonu na teplotě vzduchu, nadmořské výšce a relativní vlhkosti. [22] [23]



Obr. 5 Schéma paroplynové elektrárny, převzato z [23]

Paroplynové elektrárny jsou díky nižším emisím a vyšší účinnosti hojně využívány a po celé EU, při přechodu na obnovitelné zdroje a čistou energii, nicméně energetická krize ukázala, že zemní plyn není po ekonomické stránce tou nejlepší volbou.

2.3.4 Jaderné elektrárny

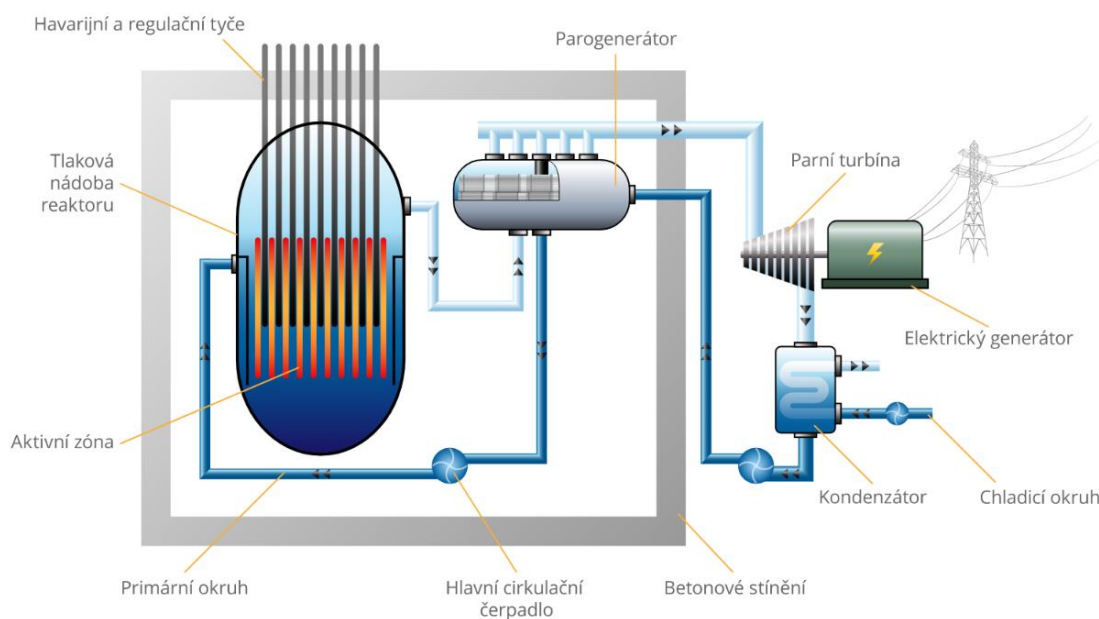
Jadernou elektrárnu lze také zařadit mezi tepelné elektrárny, ale tepelná energie nevzniká spalováním fosilních paliv v kotli, nýbrž řízenou jadernou reakcí nejčastěji řetězovou štěpnou reakcí v reaktoru. Dalším typem jaderné reakce je termonukleární fúze, ale zatím se tento typ reaktorů nachází ve vývoji. Existuje několik typů reaktorů, které se liší chladicím médiem, moderátorem, výstupními tlaky a teplotami média a využívaným jaderným palivem. Podle typu reaktoru pak rozlišujeme jednookruhovou, dvouokruhovou, nebo tříokruhovou jadernou elektrárnu. Jako jaderné palivo se nejčastěji využívá obohacený uran izotopem U^{235} , případně přírodní uran, nebo směsné palivo MOX (Mixed Oxide Fuel). V dnešní době se používá keramické palivo UO_2 , z práškové formy se lisuje do tzv. pelet, které jsou poskládány a hermeticky uzavřeny do palivových tyčí neboli prutů. Palivové elementy jsou poté skládány do palivových souborů (kazet). U některých typů reaktorů jsou pelety přímo volně vsypávány do aktivní zóny reaktoru. Dnes všechny reaktory v průmyslovém provozu pracují na principu řízené řetězové nukleární štěpné reakce. Princip přeměny energie v jaderné elektrárně je následující: štěpnou reakcí se mění vazebná energie atomů na teplo, tepelná energie se mění na kinetickou a ta se následně mění na elektrickou. Jako chladivo se používá lehká voda, těžká voda, oxid uhličitý, helium, sodík a některé soli nebo slitiny. Moderátorem bývá nejčastěji lehká, těžká voda, grafit nebo plyn, u některých typů reaktorů moderátor chybí (rychlý množivý reaktor). [14] [15]

Tabulka 2 Přehled typů reaktorů, převzato z [15]

Označení typu	Anglický název	Český název
AGR	Advanced Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor	Pokročilý plynem chlazený, grafitem moderovaný reaktor
BWR	Boiling Light Water Cooled and Moderated Reactor	Varný, lehkou vodou chlazený a moderovaný reaktor
FBR	Fast Breeder Reactor	Rychlý množivý reaktor
GCR	Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor	Plynem chlazený, grafitem moderovaný reaktor
HTGR	High Temperature, Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor	Vysokoteplotní, plynem chlazený a moderovaný reaktor
HWGCR	Heavy Water Cooled, Graphite Moderated Reactor	Těžkou vodou chlazený a moderovaný reaktor
LWGR	Light Water Cooled, Graphite Moderated Reactor	Lehkou vodou chlazený, grafitem moderovaný reaktor

PHWR	Pressurized Heavy Water Moderated and Cooled Reactor	Tlakovou těžkou vodou chlazený a moderovaný reaktor
PWR	Pressurized Light Water Moderated and Cooled Reactor	Tlakovou lehkou vodou chlazený a moderovaný reaktor
SGHWR	Steam Generating Heavy Water Reactor	Varný těžkovodní reaktor

Nejrozšířenějším reaktorem na světě je typ PWR (Pressurized light Water Reactor) nebo jeho ruský ekvivalent VVER (Vodo – Vodjanoj Energetičeskij Reaktor) [24]. Tento typ využívá jako moderátor, který zpomaluje rychlost neutronů i jako chladivo lehkou vodu [24]. V ČR se používají dvouokruhové jaderné elektrárny s lehkovodními reaktory typu VVER 1000 a 440. V primárním okruhu cirkuluje demineralizovaná voda, která odvádí teplo vzniklé štěpnou řetězovou reakcí z aktivní zóny reaktoru. Lehká voda je pod vysokým tlakem, a tak i při vysoké teplotě nedosáhne bodu varu. Důležitou částí primárního okruhu je i kompenzátor objemu vody, který udržuje objem při změně tlaku a teploty. Z reaktoru proudí voda potrubím do parogenerátorů, kde předá svou tepelnou energii cirkulující vodě v sekundárním okruhu. V sekundárním okruhu již není tak vysoký tlak, a tak se voda mění v sytou páru. Parovody je sytá pára vedena do turbíny, která je obvykle rozdělena, jako u klasických tepelných elektráren, podle tlaku na více částí. Pára v turbíně expanduje a předá jí kinetickou energii. Turbína na společné hřídeli roztáčí alternátor a ten přemění kinetickou energii na elektrickou. Pára se z turbíny odvádí do kondenzátorů, kde mění skupenství na vodu. Voda z kondenzátorů je čerpadlem vháněna opět do parogenerátoru a tím je okruh uzavřen. Výkon reaktoru se reguluje řídicími tyčemi a koncentrací kyseliny borité v chladicím médiu. Řídicí tyče jsou do reaktoru zasouvány či vysouvány pomocí elektromagnetů. [25]



Obr. 6 Schéma dvouokruhové jaderné elektrárny s reaktorem PWR (VVER), převzato z [24]

Největší výhodou jaderné energie je bezpochyby to, že neprodukuje emise CO_2 , SO_2 , NO_x ani popílek, za normálního provozu produkuje pouze odpadní teplo a vodní páru. V jaderné elektrárně se palivo nespáluje, tím pádem nespoteblovává kyslík. Výkon jaderné elektrárny je téměř nezávislý na počasí a je tedy stabilní po celý rok, kromě odstávek na výměnu paliva. Oproti tepelným elektrárnám, jaderné elektrárny spotřebovávají minimum paliva, cena výroby elektřiny je stabilní a nepodléhá cenovým výkyvům a poskytuje vysoký výkon k poměru spotřebovaného paliva. Elektřina vyrobená v jaderné elektrárně je také oproti ostatním zdrojům poměrně levná. Jaderné elektrárny mají nízké provozní náklady a dlouhou životnost. [15] [18]

Rozvoj jaderné energetiky však brzdí její velké nevýhody, především její potenciální nebezpečí při havárii, které vedou k úniku radiace a dlouhodobému zamoření okolí. I když je jaderná energie poměrně bezpečná, v podvědomí veřejnosti na základě havárie jaderné elektrárny v Černobylu a Fukušimě, bude stále předmětem obav a sporů. Kvůli faktu nebezpečnosti některé státy, kupříkladu Německo uzavřeli všechny své jaderné elektrárny a nadobro se zřekly využívání jaderné energie. Další podstatnou nevýhodou je technologicky náročné získávání paliva a jeho cena. Dalším problémem je skladování a nakládání s vyhořelým radioaktivním palivem. Vysoké investiční náklady na výstavbu a dlouhá doba realizace jsou také překážkou rozvoje jaderné energetiky. Mezi nevýhody lze zařadit i to, že uran je neobnovitelným zdrojem energie. Odpůrci jaderné energetiky mohou také poukázat

na nižší účinnost jaderných elektráren, oproti klasickým tepelným elektrárnám, asi 33 %, z důvodu nižších termodynamických parametrů páry vstupující do turbíny. Jaderné elektrárny potřebují také pro svůj provoz velké množství vody, tudíž je nelze vystavět všude. [15] [18]

Za normálního provozu je jaderná energie bezpečný a stabilní zdroj energie poskytující poměrně vysoký výkon, se kterým by se mělo počítat do budoucna, zejména při snaze vyřazení fosilních paliv a přechodu na čistou (bezemisní) výrobu elektrické energie, protože poskytují stálý a stabilní výkon nezávislý na počasí a povětrnostních podmínkách, na rozdíl od obnovitelných zdrojů jako je větrná a sluneční energie.

2.3.5 Vodní elektrárny

Vodní elektrárny přeměňují potenciální, tlakovou a kinetickou energii vody na elektrickou. Základ každé vodní elektrárny je tvořen vodní turbínou a hydro alternátorem. Typ turbíny se volí dle velikosti spádu, tlaku a průtoku. Rozlišujeme 4 základní typy konstrukce vodní turbíny: Peltonova, Kaplanova, Francisova a Bánkiho. Podle principu funkce rozlišujeme tři typy vodních elektráren: Průtočné, akumulární a přečerpávací. Průtočné vodní elektrárny se budují přímo na vodních tocích, které mají velký a stálý průtok vody. Tyto elektrárny nemají žádný prostor k akumulaci vody. Mohou být buď přímo na korytě řeky a nelze řídit průtok vody anebo jako derivační, tedy k vodní elektrárně je voda přiváděna uměle vybudovaným kanálem a průtok lze regulovat pomocí vzdouvacích zařízení a stavidel. Výkon je závislý na průtoku vody a přebytečné množství vody odteče bez využití. Tyto elektrárny většinou přispívají do základní části denního diagramu zatížení. Akumulární vodní elektrárny jsou součástí hráze velkého vodního díla tvořící přirozenou akumulaci vody. Z denního diagramu zatížení pokrývají akumulární elektrárny polo špičkové či špičkové zatížení. Vodní dílo, které je vybudováno společně s akumulární VE, zajišťuje obvykle zdroj pitné a užitkové vody, stabilizuje průtok vody v řece, chrání před povodněmi a břehy nádrže slouží jako rekreační oblasti. Přečerpávací vodní elektrárny využívají dvě rozdílně výškově položené vodní nádrže. Jako akumulární elektrárny shromažďuje vodu v horní nádrži, ale když je v síti nadbytek energie tak ze spodní nádrže načerpá vodu do výše položené nádrže, a tak spotřebuje energii, a naopak při nedostatku energie se voda v horní nádrži vypustí přes turbínu do spodní nádrže a elektrárna vyrábí elektrickou energii. Přečerpání vody vyžaduje vynaložit větší energii, než kolik energie se vyrobí při vypuštění, proto se čerpá většinou v noci, kdy je energie levnější a v síti je jí nadbytek. Přečerpávací vodní elektrárny jsou tedy schopné vyvažovat výrobu a spotřebu elektrické energie. Používají se k pokrytí špiček denního diagramu zatížení. [15] [26]

Velkou výhodou vodních elektráren jsou jejich rychlost náběhu a připojení do soustavy obvykle trvající jen několik minut a bezemisní provoz. Při výrobě elektřiny neprodukují žádný odpad využívají k výrobě elektřiny obnovitelný zdroj energie a nepotřebují dovoz externího paliva. Akumulační a přečerpávací vodní elektrárny pokrývají díky jejich rychlosti regulace většinou špičkové zatížení. [18]

Nevýhodou vodních elektráren je jejich závislost na množství vody ve vodních tocích či vodních dílech, což je závislé na množství srážek v dané oblasti. Dále při výstavbě velkých vodních děl se značně narušuje a mění krajina, což má velký dopad na živočichy a rostliny, navíc je vybudování velkého vodního díla časově i ekonomicky náročné. Vodní elektrárny také nelze vybudovat všude, protože potřebují vhodné vodní zdroje. [18]

Vodní elektrárny jsou výhodným zdrojem elektrické energie a díky jejich schopnostem regulace jsou vhodné v kombinaci s kolísavým výkonem dnes hojně využívaných obnovitelných zdrojů energie jako jsou solární a větrné elektrárny. Nicméně kvůli suchu a faktu, že potenciál v tomto zdroji energie není neomezený z hlediska prostoru a podmínek, nelze dále zvyšovat jeho instalovanou kapacitu v ČR. Z těchto důvodů se nelze do budoucna na vodní elektrárny spoléhat jako na základ výroby elektřiny, ale spíše jako vyrovnávací zdroj mezi výrobou a spotřebou.

2.3.6 Elektrárny využívající energii mořské vody

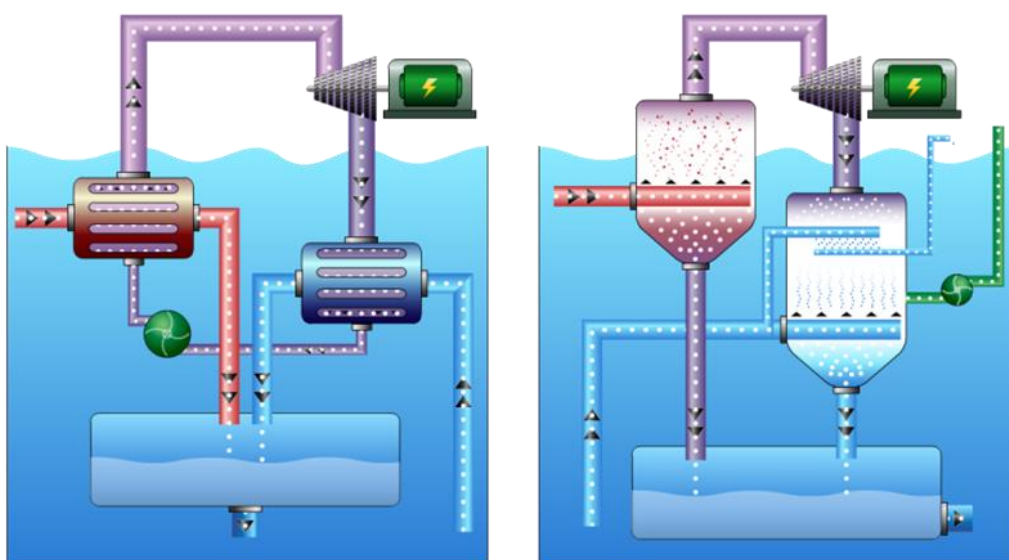
V zásadě se jedná o přeměnu energie ukrytou v mořích a oceánech na energii mechanickou a následně na energii elektrickou, ale existují i jiné principy. Podle druhu využívané energie mořské vody rozlišujeme několik typů elektráren. Elektrárny využívající kinetickou energii mořských proudů, energii mořských vln, tepelnou energii ukrytou v mořské vodě anebo energii mořského přílivu a odlivu. [34]

Vodní elektrárny využívající slapové jevy, mohou fungovat buď jako samostatné přílivové turbíny na mořském dně, nebo jako přehradové elektrárny. Druhý zmíněný typ funguje tak, že v době vysokého přílivu je voda zachycena a nahromaděna v bazénu a při odlivu je následně vypouštěna přes bariéru ve které se nachází vodní turbíny. Proudící voda roztáčí turbíny a ty předají mechanickou energii generátoru, který vyrábí elektřinu. Teoreticky lze turbíny využít i v opačném směru, tedy při přílivu, ale v praxi je ekonomicky výhodnější využít je pouze při odlivu. Nevýhodou přílivové přehradové elektrárny je náročná, nákladná výstavba a velký zásah do životního prostředí, stejně jako u velkých hydroelektráren. Výstavba přehrady v zálivu znemožňuje migraci ryb a lodní dopravu. Z

tohoto hlediska se jeví jako lépe využitelné a ekonomicky přívětivější samostatně umístěné přílivové turbíny na mořském dně ve vhodně tvarovaných mořských úžinách. [34]

Dalším typem je elektrárna využívající energii mořských proudů. Protože mořské proudy jsou relativně stálé, tečou pořád stejným směrem a díky vyšší hustotě vody vážou mnohem více energie než proudění vzduchu i když jsou pomalejší, jeví se tento způsob výroby elektrické energie jako poměrně stálý a stabilní zdroj. Konstrukce je založena na vodní turbíně, která svým principem připomíná větrnou turbínu s horizontální osou. Proudící voda roztáčí lopatky turbíny a ta opět roztáčí elektrický generátor. Pomalejší rotace turbín nenarušuje přirozený pohyb ryb. Otázkou je náročná údržba takových zařízení. [34]

Protože vrchní vrstva vody v oceánech je značně teplejší než spodní vrstvy, lze využít tento teplotní rozdíl (teplo) k výrobě elektrické energie. Jedná se o systémy konverze tepelné energie OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) buď o uzavřený anebo otevřený cyklus. V případě uzavřeného cyklu je teplonosným médiem např. amoniak. Teplá povrchová voda amoniak odpaří a vzniklý plyn pohání turbínu. Chladnější voda ve spodních vrstvách toto médium opět zkondenzuje. V případě otevřeného cyklu se používá mořská voda, která se snížením tlaku změní na páru a opět pohání turbínu. Nevýhodou tohoto způsobu výroby elektriny je nutnost pro největší efektivitu velkého teplotního rozdílu horních a spodních vrstev vody, náročná údržba a provoz. [34]



Obr. 7 Cyklus konverze tepelné energie oceánů, vlevo uzavřený, vpravo otevřený [34]

Značná část energie moří a oceánů se také nachází ve vlnách. Existují nejrůznější konstrukce od pohybujících se bójí, hladinových tlumičů, přeplňovacích zařízení a konvertory využívající pružné membrány z elastických materiálů, kyvný pohyb dlouhých

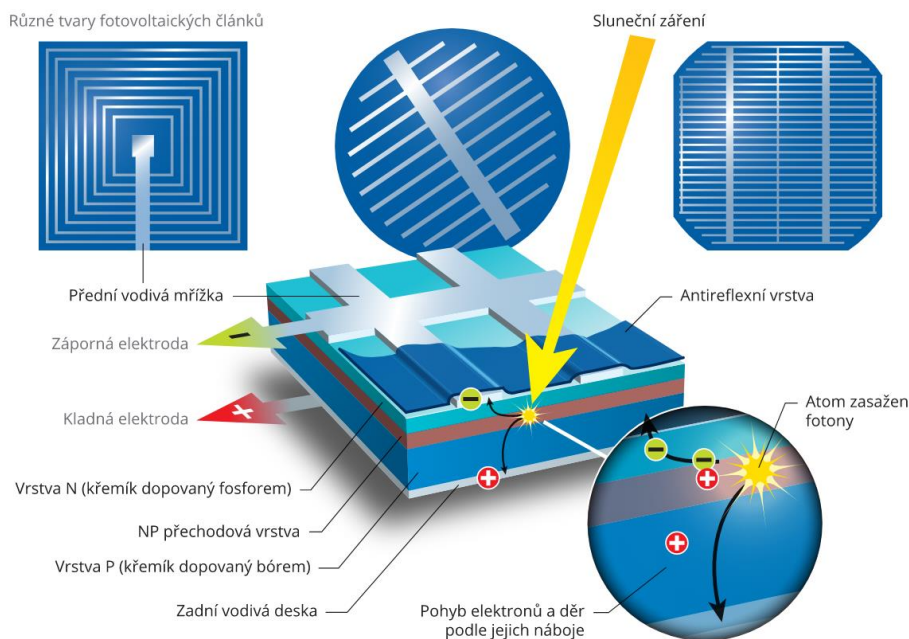
spojených ramen na hladině atd. Zajímavostí je, že některé z těchto systémů využívají pro výrobu elektrické energie lineární indukční generátory. [34]

Výroba elektřiny z energie ukryté v mořích a oceánech představuje obrovský potenciál, je plně bezemisní, ekologická a využívá obnovitelný nevyčerpatelný zdroj energie. Již dnes existuje několik typů konstrukcí a realizací takovýchto elektráren, nicméně používání ve velkém měřítku je spíše otázkou do budoucnosti.

2.3.7 Sluneční elektrárny

Solární elektrárny rozlišujeme podle přeměny sluneční energie na energii elektrickou, buď se jedná o přímou přeměnu-fotovoltaické elektrárny, anebo nepřímou přeměnu-solární tepelné a termoelektrické elektrárny. [27]

Fotovoltaické elektrárny se skládají z fotovoltaických panelů, které jsou složeny z několika spojených fotovoltaických článků. Fotovoltaický článek přeměňuje sluneční záření (energii elektromagnetického záření) přímo na elektrickou energii, využívá fotoelektrický jev. Fotovoltaický článek je vyroben z polovodiče, nejčastěji tenká destička z monokrystalu křemíku (monokrystalický článek), existují i polykrystalické a amorfnní články. Destička je z jedné strany dotována atomy trojmocného prvku (např. bór) a z druhé strany atomy pětímocného prvku (např. arzen), tím vzniká PN přechod s jednosměrným průchodem volných elektronů. Dopadající foton předá energii, uvolní elektron, který přejde do oblasti typu N a vzniká tak rozdíl potenciálů. Napětí na jednom článku je přibližně 0,6 V. Pro zvýšení velikosti napětí se jednotlivé články zapojují sériově za sebou a pro zvýšení proudu se zapojují paralelně. Pomocí spojení více článků paralelně a sériově je vytvořen fotovoltaický panel. Fotovoltaické panely generují stejnosměrné napětí, je tedy nutné ho před připojením do energetické sítě ve střídači změnit na střídavé napětí o požadované frekvenci [27]. Účinnost fotovoltaických monokrystalických panelů se pohybuje okolo 20 %, dražší fotovoltaické panely na bázi arsenidu galia používané v kosmu dosahují účinnosti okolo 30 %. V dnešní době je trendem umisťovat solární panely nejen na pevnině, ale také na vodní plochy. Životnost solárního panelu se pohybuje přibližně okolo 30 let. [28] [29]



Obr. 8 Princip a konstrukce fotovoltaického panelu [28]

Tepelné (termální) sluneční elektrárny přeměňují tepelnou energii slunečního záření na elektrickou energii. Soustava otáčivých počítačem řízených zrcadel (kolektorů) různého tvaru směřují sluneční paprsky do jednoho bodu (ohniska). V ohnisku je umístěný absorber, kde je ohříváno teplotnosné médium, může to být přímo voda nebo např. olej. Vodní pára pohání turbínu, která je opět svázána společnou hřídelí s generátorem stejně jako v klasické tepelné elektrárně. [27]

Termoelektrické elektrárny využívají tzv. Seebeckova jevu – termočlánek. Termočlánek je tvořen dvěma rozdílnými na jednom konci spojenými vodiči. Při různé teplotě konců vzniká mezi volnými konci malé stejnosměrné napětí. Nepřímá přeměna tepelné energie na elektrickou je založena na získání tepla pomocí slunečních kolektorů (sběračů). V ohnisku sběračů jsou propojené termočlánky do termoelektrického generátoru. [27] [29]

V poslední době jsou sluneční elektrárny velice populární v EU, protože se jedná o čistý a ekologický obnovitelný zdroj elektrické energie. Při výrobě elektřiny nevzniká žádný odpad ani emise. Sluneční záření jako zdroj energie je snadno dostupné a zadarmo, to znamená že cena vyrobené elektřiny je poměrně stabilní. Fotovoltaické panely mají poměrně dlouhou životnost a dalším plusem jsou nízké náklady na údržbu a provoz. [18]

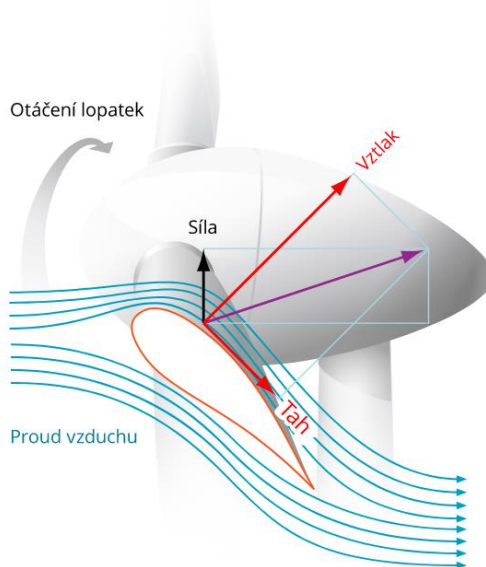
Největší nevýhodou sluneční energie je nespolehlivost a nestálost v závislosti na počasí, podnebí a denní době. Problémem je i fakt, že ve slunných letních dnech při velkém počtu instalované kapacity, může dojít k nevybalancování dodávky a spotřeby elektrické energie,

a tedy k přetížení energetické sítě. Nestálost dodávaného výkonu do sítě je řešena specifickým řízením dodávky a pomocí akumulčních stanic nebo zásobníků tepla. Další nevýhodou slunečních elektráren je oproti ostatním typům, že zabírají velkou plochu ať už na pevnině nebo na moři a narušují tak krajinu, i když např. fotovoltaické panely lze umístit na střechy domů, nebo zemědělsky užitkové plochy. Další nevýhodou mohou být také počáteční náklady fotovoltaických panelů a nižší účinnost oproti ostatním typům elektráren. [18] [20]

Sluneční elektrárny, zejména fotovoltaika se v posledních letech rychle rozvíjí. I když se jedná o čistě ekologický způsob výroby elektrické energie je třeba mít na paměti mnohé nedostatky a potřebu bateriových uložišť pro částečné pokrytí dodávky i v době kdy nesvítí slunce a vybalancování přebytečné energie v době největšího výkonu. Nicméně s přechodem výroby elektřiny na čisté bezemisní zdroje energie bude nejspíše trend růstu instalované kapacity i nadále pokračovat.

2.3.8 Větrné elektrárny

Vítr vzniká vyrovnáváním tlakových rozdílů v zemské atmosféře. Kinetická energie větru roztáčí lopatky větrné turbíny, která mění kinetickou energii větru na mechanickou energii a roztáčí tak hřídel generátoru, který mění mechanickou energii na základě elektromagnetické indukce na elektrickou. Podle principu využití kinetické energie větru rozlišujeme větrné stroje využívající tlakový nebo odporový princip. Většina moderních větrných turbín pracuje na vztlakovém principu. Podle uspořádání hřídele rozlišujeme větrné turbíny s horizontální a vertikální osou (Darrieova turbína). Nejrozšířenější je uspořádání s horizontální osou hřídele s trojlístou nebo dvoulístou vrtulí, která se dnes umísťuje výhradně před věží. U tohoto typu je celá strojovna s generátorem umístěna v gondole na ocelové, nebo železobetonové věži a natáčí se proti směru větru pomocí servomotorů, pro maximální efektivitu jsou natáčeny i jednotlivé listy vrtule. Větrná turbína je spojena přes převodovku s elektrickým generátorem. Účinnost větrných elektráren s horizontální osou je přibližně 40 % až 50 %. Provozní omezení větrných elektráren je v závislosti na rychlosti proudění vzduchu, minimální rychlost větru se pohybuje kolem 3-4 m/s, optimální rychlost je okolo 15 m/s a při rychlosti větru nad 25 m/s se větrné turbíny musí zastavovat, aby nedošlo k mechanickému poškození. Větrné parky se staví jak na pevnině (onshore), tak i na moři (offshore). Větrná turbína má očekávanou životnost 20 až 25 let a provozní dobu kolem 120 000 hodin. [30] [31]



Obr. 9 Princip vzniku vztlačové síly na lopatkách [30]

Větrná energie je čistý (bezemisní) ekologický a téměř nevyčerpatelný obnovitelný zdroj. Při výrobě elektřiny nevzniká žádný odpad, skleníkové plyny ani jiné znečišťující látky. Větrná energie je snadno dostupná a je zdarma. Další výhodou je poměrně dlouhá životnost větrných turbín a dobrá účinnost. [18]

Stejně jako sluneční elektrárny, tak i větrné elektrárny neposkytují stálou a stabilní výrobu elektrické energie, výkon větrných elektráren je závislý na místních povětrnostních podmínkách a na aktuální rychlosti větru. Větrné elektrárny také nedisponují optimálním využitím energie z hlediska rychlosti větru, tj. mají určitá provozní omezení. Další nevýhodou oproti jaderným a tepelným elektrárnám je relativně malá koncentrace energie, pro větší výkony je nutné stavět rozlehlé větrné farmy o rozloze několika km². Díky masivním rozměrům (výška a průměr lopatek až v řádu stovek metrů) je nutné pečlivě vybírat lokality pro vybudování větrných elektráren. Náročná údržba představuje výzvu pro bezporuchový chod mechanického soustrojí. V neposlední řadě při provozu větrné turbíny způsobují hluk a stroboskopický efekt. Z hlediska jejich rozměrů narušují krajinu a mohou mít negativní dopad na živočichy, zejména ptactvo. [18] [30]

Společně se solární energii patří větrná energie v posledních letech mezi hojně rozvíjené a využívané zdroje elektrické energie. Stejně jako solární energie má výroba elektřiny z větrné energie svoje nedostatky a omezení. Nicméně při vyřazování fosilních paliv z energetického sektoru hraje důležitou roli a do budoucna se bude nadále zvyšovat instalovaná kapacita.

2.3.9 Geotermální elektrárny

Geotermální elektrárny využívají k výrobě elektřiny teplo z hlubin Země, v podstatě se také jedná o druh tepelné elektrárny. Z hlubinných vrtů se získává buď přímo suchá nebo mokrá pára, při nižších teplotách podzemní vody se využívá teplo pro ohřev a odpaření jiné pracovní látky s nižším bodem varu (organická média) v tepelném výparníku. Pára nebo plyn je následně veden do turbíny, kde předá kinetickou energii a turbína roztáčí generátor, který vyrábí elektrickou energii stejně jako v tepelných elektrárnách. Při nedostatku teplonosné látky v podzemí, kde je vysoká teplota se musí teplonosná látka přivádět z povrchu, jedná se o tzv. systém HDR (Hot Dry Rock). Geotermální elektrárny rozdělujeme podle způsobu, jakým se získává pára, na tři typy: elektrárny s mokrou párou, elektrárny se suchou párou a elektrárny s binárním cyklem. Každý z těchto typů má rozdílnou účinnost, nicméně nejvyšší účinnosti dosahuje geotermální elektrárny se suchou párou (15 %). [32] [33]

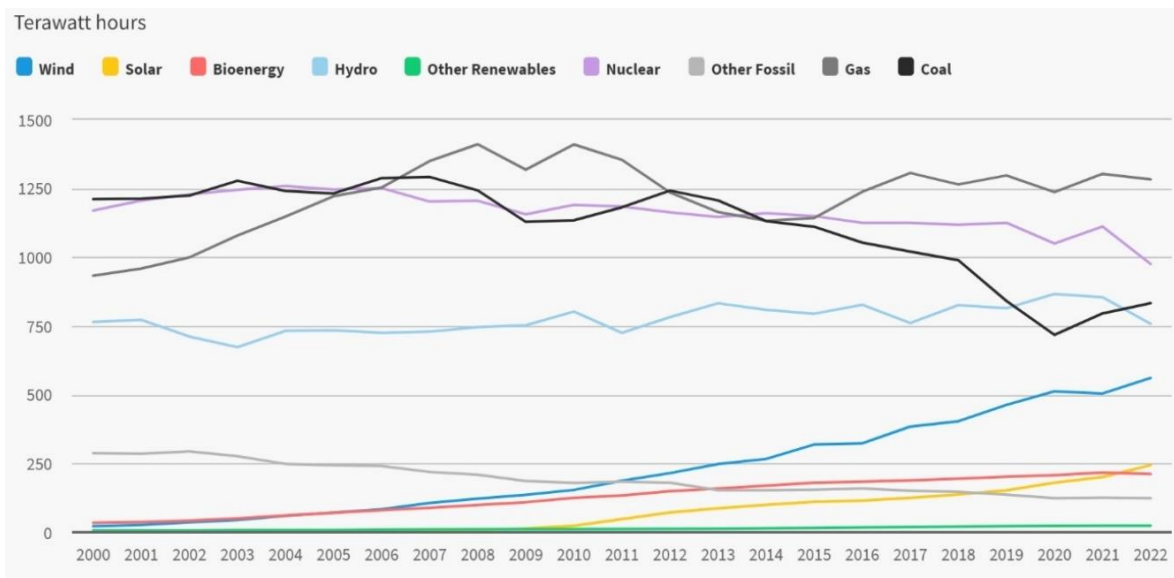
Hlavními výhodami geotermálních elektráren je využití obnovitelného zdroje energie, nezávislost na dodávkách paliva a s tím související i stálost nízkých nákladů na výrobu elektrické energie, bezemisní provoz (neprodukuje oxid uhelnatý a oxid dusičitý), stabilní a stálá výroba elektrické energie v průběhu celého roku, téměř bezobslužný provoz a dalším plusem je, že získané teplo může být využito i pro vytápění budov. [18] [32]

Největší nevýhodou geotermálních elektráren je závislost na geologických podmínkách, jedná se o specifický zdroj, a tudíž je nelze vystavět na libovolném místě. Pro využití geotermální energie bývají nejlepší podmínky v místě styku litosférických desek, kde je nejtenčí zemská kůra [33]. S tímto je i spojené možné riziko zvýšení seismické aktivity v dané oblasti [33]. Velice náročné je také schválení, plánování a samotná výstavba, která je velmi nákladná. V případě nesprávného návrhu může dojít ke znečištění a poškození životního prostředí. Geotermální elektrárny pracující v otevřeném cyklu mohou do ovzduší vypouštět škodlivé látky rozpuštěné v horké vodě [33]. Navíc samotná výstavba s hlubinnými vrty značně narušuje okolní krajinu, což narušuje přirozené prostředí některých živočichů. [18] [32]

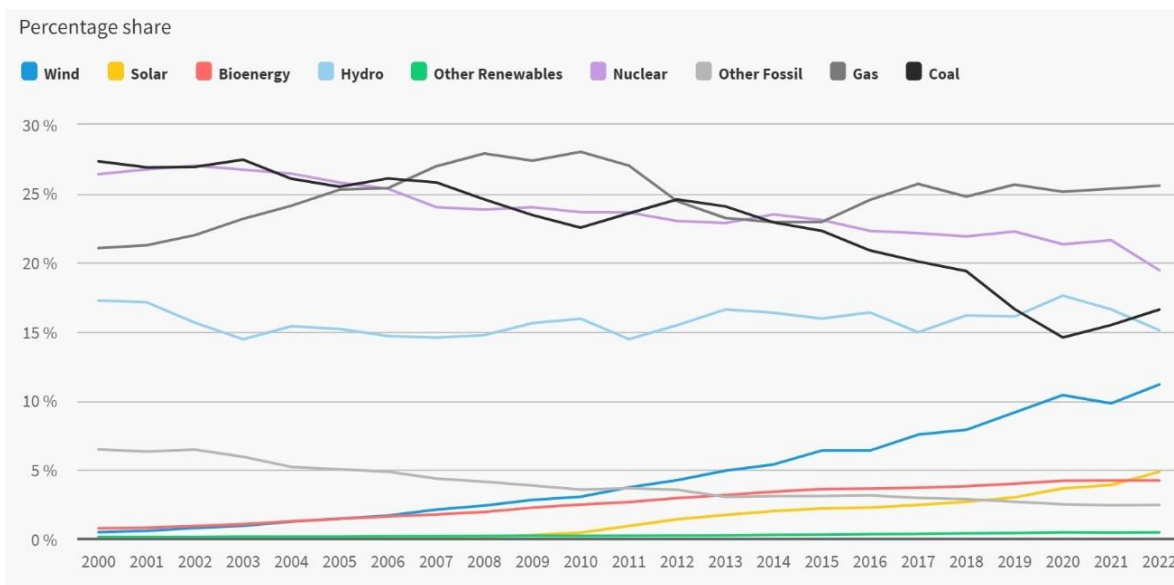
Protože se jedná o velmi specifický zdroj elektrické energie nelze se na něj příliš spoléhat do budoucna, nicméně lze předpokládat, že počet geotermálních elektráren vzroste, zejména v kombinované výrobě elektřiny a tepla.

3 Současný stav elektrické výroby v Evropě

3.1 Vývoj výroby elektrické energie v Evropě v průběhu minulých let



Graf 2 Výroba elektrické energie v Evropě podle zdroje v (TWh) [4]



Graf 3 Výroba elektrické energie v Evropě podle zdroje – procentní podíl [4]

Oba grafy zobrazují vývoj evropské výroby elektrické energie v rozmezí od roku 2000 do roku 2022. Jednotlivé barevně odlišené křivky v grafech znázorňují jednotlivé zdroje elektrické energie. Celkový trend ukazuje, že výroba elektřiny pomocí větrné energie („Wind“) od roku 2000 prudce relativně stoupá na současných 11,18 % celkové výroby. Na druhou stranu získávání elektrické energie z uhlí („Coal“) z dlouhodobého hlediska klesá, například v roce 2020 byla výroba energie uhelných elektráren na svém minimu cca 14,6 %

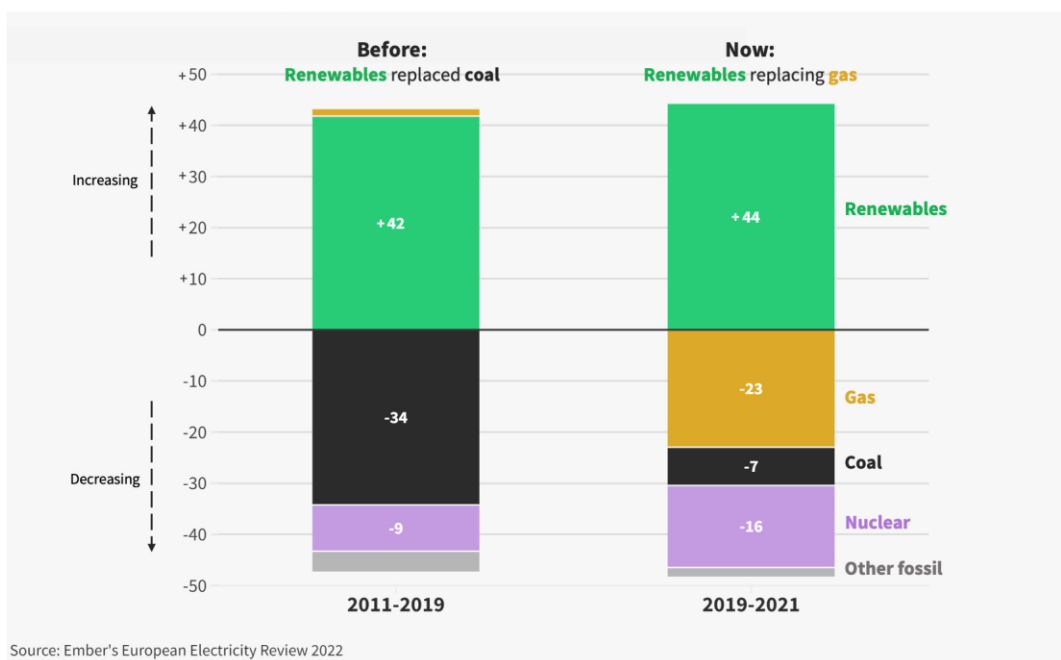
za vyšetřované roky. Stejně tak využití ostatních fosilních paliv („Other Fossil“) postupně klesá. Nicméně lze si povšimnout, že od roku 2020 využití uhlí opět mírně vzrostlo o cca o 2 %, to bylo zřejmě způsobeno rostoucí cenou plynu. Velmi znepokojující může být fakt, že v dlouhodobém měřítku pozvolna také klesá využití jaderné energie („Nuclear“). Využití sluneční energie („Solar“) také narůstá, od roku 2010 průměrně o 0,37 % za rok. Společně se sluneční energií, roste také výroba energie z biomasy (tzv. bioenergie).

Obecně lze říct, že v posledních letech byl pozorovatelný velký nárůst obnovitelných zdrojů, resp. sluneční a větrná energie. Výrazný pokles podílu jaderné energie mezi lety 2021 a 2022 byl pravděpodobně pouze dočasný z důvodu odstávek jaderných elektráren, jak bude zmíněno níže. Pokles výroby vodních elektráren byl taktéž spíše dočasný a byl způsoben enormním suchem v posledních letech. Nárůst výroby elektřiny z uhlí oproti tomu zaznamenal po velkém propadu v roce 2020 v posledních dvou letech nárůst, což bylo pravděpodobně důsledkem energetické krize a války na Ukrajině.

3.2 Analýza roku 2021

Historicky rostoucí podíl elektrické energie z obnovitelných zdrojů v Evropě nahrazoval uhlí, které produkuje nejvíce emisí v energetice. Nicméně, vzhledem k prudkému nárůstu cen plynu v druhé polovině roku 2021, obnovitelné zdroje místo uhlí nahradily drahý plyn. Takový nárůst cen plynu zpomalil postupné vyřazování uhlí a v důsledku toho se zpomalilo snižování množství emisí v energetice. Elektrická energie vyrobená z obnovitelných zdrojů v Evropě v letech 2020 a 2021 průměrně rostla o 44 TWh ročně. Od roku 2019 do konce roku 2021 více než polovina (52 %) nových obnovitelných zdrojů nahradily plyn, třetina nahradila jadernou energii, ale pouze šestina nahradila elektřinu z uhlí. V porovnání s tímto lze uvést, že od roku 2011 do roku 2019, dokonce až 80 % nových obnovitelných zdrojů nahradilo produkci z uhlí. V letech 2020 až 2021 výroba elektřiny z uhlí klesla ve Španělsku (-42 %) a Řecku (-43 %), ale tento pokles způsoben uzavřením některých uhelných elektráren, byl z velké části vykompenzován nárůstem v Polsku (+7 %). [4]

V roce 2021 fosilní paliva vyrobily 37 % elektřiny v EU, což je mírný pokles ve srovnání s rokem 2019, kdy fosilní paliva generovaly 39 % elektřiny. Obnovitelné zdroje energie se podílely na výrobě elektrické energie také 37 % a jaderná energie vyrobila 26 % celkové elektřiny v EU. [4]



Obr. 10 Průměrná roční změna výroby elektřiny podle zdroje v (TWh) ve 27 zemích EU [4]

V období energetické krize byly velice důležité obnovitelné zdroje energie, zaznamenaly nové rekordy ve výrobě elektrické energie, zejména v druhé polovině roku 2021. V tomto roce poprvé v historii, větrná a solární energie vyrobily více elektřiny než plyn, a to i navzdory nižší rychlosti větru. Solární a větrná energie dohromady vyrobily 547 TWh elektrické energie, zatímco z plynu se vyrobilo 524 TWh. Ve srovnání s rokem 2019 solární energie produkuje v roce 2021 o 27 % více elektřiny, velký nárůst byl zaznamenán zejména na severu a jihu Evropy. V Nizozemsku a Španělsku se meziročně zdvojnásobila produkce solárních elektráren. Energetická krize ukázala, že přílišná závislost na fosilních palivech je při kolísavých cenách, zejména zemního plynu dlouhodobě neudržitelná. Již před vypuknutím energetické krize byla cena elektřiny z větrných a solárních elektráren nižší než cena elektřiny plynových elektráren, v průběhu krize se tento rozdíl ještě zvětšil. Mezinárodní agentura pro energii potvrdila, že během energetické krize se tak staly obnovitelné zdroje zejména větrná a solární energie výrazně konkurenceschopnější, a to i navzdory nárůstu cen komodit a energií. [4]

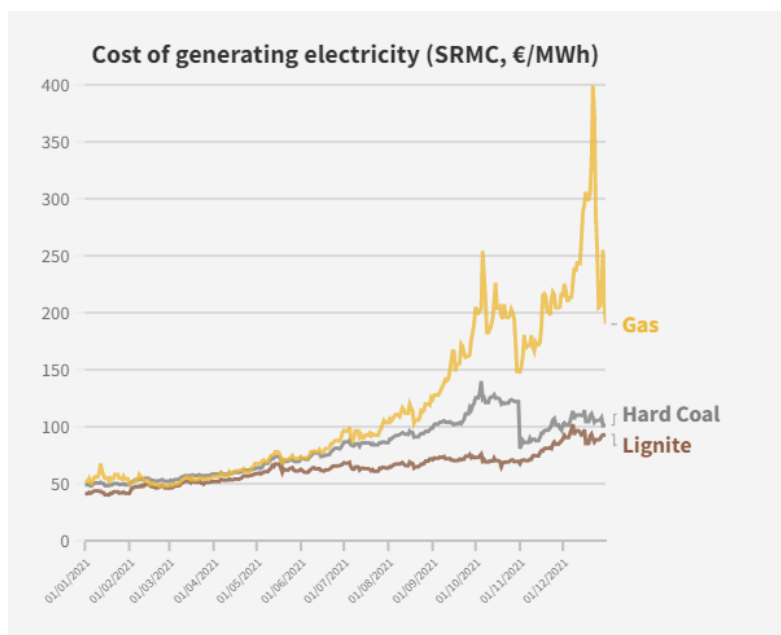
Poptávka po elektrické energii v EU v roce 2021 se stále plně nezotavila z pandemie, i když podle dat se vrátila téměř na původní úroveň jako v roce 2019 před pandemií. První vlna pandemie měla na poptávku největší dopad, protože z důvodu uzavírání továren, úřadů, obchodních center atd. celková poptávka mezi lety 2019 a 2020 klesla o 3,5 % (-100 TWh). V roce 2021 se naopak poptávka meziročně zvýšila o 3,4 % (+95 TWh). Protože rok 2021 byl chladnější než 2019, nelze tomuto srovnání přikládat příliš velkou váhu, protože

chladnější počasí znamená za normálních podmínek zvýšení celkové poptávky. Pokud tedy vezmeme v potaz počasí, lze říct, že poptávka se v roce 2021 ještě plně nevrátila na úroveň před pandemií. [4]

Výroba elektřiny v EU z fosilních paliv v roce 2021 meziročně vzrostla o 4 % (+43 TWh) a celkově tak fosilní paliva vyrobily 1069 TWh elektrické energie. Příčinou takového nárůstu bylo pravděpodobně zvýšení poptávky o 95 TWh po pandemii koronaviru. I když se jedná o meziroční nárůst, v důsledku neustálého zvyšování podílu obnovitelných zdrojů, je stále výroba elektřiny z fosilních paliv o 6 % (-64 TWh) menší než před pandemií v roce 2019. V roce 2021 vyrobily fosilní paliva celkově 37 % elektrické energie v EU, pro srovnání v roce 2019 to bylo 39 %, tedy byl zaznamenán mírný pokles. Z uhlí se vyrobilo 15 % (436 TWh) a z plynu se vyrobilo 18 % (524 TWh) elektrické energie, což je minimum za poslední tři roky. [4]

Nevídaný nárůst cen fosilních paliv v roce 2021 přirozeně způsobil navýšení nákladů na výrobu elektrické energie, u plynových elektráren až sedminásobně. Nárůst výrobních nákladů vedl ke zdražení elektrické energie napříč celou Evropou. Od července 2021 byly náklady na výrobu elektřiny z plynu vyšší než z uhlí. Kombinace chladné zimy na začátku roku 2021, která vyčerpala zásoby plynu, zvýšení celosvětové poptávky po pandemii a dále nižší dodávky z Ruska do EU způsobily nevídaný nárůst cen plynu. Plyn se tak stal v prosinci roku 2021 nejdražším zdrojem pro výrobu elektrické energie. Společně s raketově rostoucí cenou plynu (až o 585 %), však rostla i cena uhlí a uhlíku. Nicméně rychlý exponenciální nárůst ceny plynu způsobil, že se cenový rozdíl mezi plynem a uhlím v průběhu druhé poloviny roku 2021 prudce zvětšoval, jak ukazuje Graf 4. V prosinci roku 2021 se ceny elektřiny vyšplhaly na rekordní hodnoty napříč celou EU. Evropa se tak v důsledku raketově rostoucích cen fosilních paliv ocitla v energetické krizi. Energetická krize tak ukázala, že na fosilní plyn, jako na přechodné palivo k čisté energii se příliš nelze spoléhat. Trend snižování produkce uhelných elektráren v roce 2021 výrazně omezilo zdražení plynu, zvýšený počet odstávek a uzavření některých jaderných elektráren od konce roku 2019. [4]

Ve srovnání s rokem 2019 se množství vyrobené elektrické energie z plynu nejvíce snížilo v Nizozemsku (-17 TWh / -24 %) a Španělsku (-15 TWh / -18 %), které jsou nejvýznamnějšími leadery v oblasti růstu větrné a solární energie, k výraznému poklesu došlo také v Belgii (-17 %) a Francii (-14 %). [4]



Graf 4 Vývoj nákladů na výrobu elektřiny z fosilních paliv v roce 2021, (SRMC = krátkodobé mezní náklady) [4]

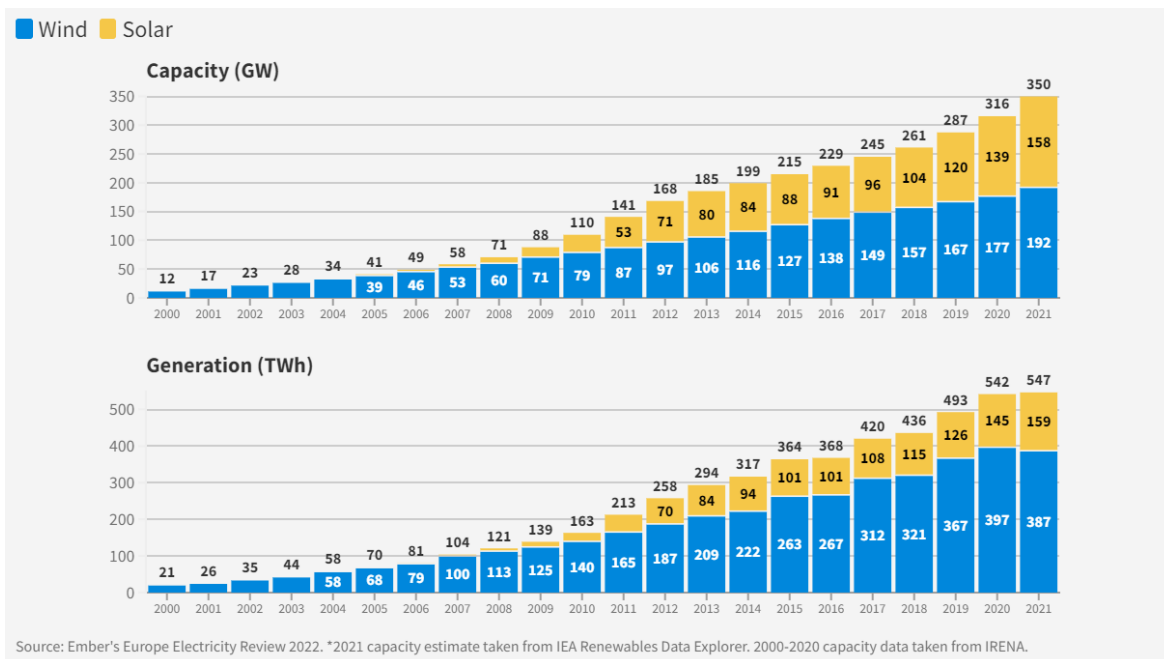
Některým zemím se podařilo od roku 2019 snížit výrobu elektřiny z uhlí, například Španělsko vyřadilo 6,5 GW, což je téměř polovina jejich celkového instalovaného výkonu v uhelných elektrárnách. Dále země jako Řecko, Itálie, Rumunsko, Portugalsko a také Česko mezi lety 2019 až 2021 vyřadily zhruba 1-2 GW uhelné kapacity. Portugalsko jako pouze 4. země v Evropě, která vyrábí elektrickou energii kompletně bez uhlí. Naopak v některých zemích se v těchto letech zvýšil podíl uhlí na výrobě elektřiny, např. Polsko o 7 % (+8 TWh) a Irsko. [4]

V roce 2021 obnovitelné zdroje v EU dosáhli nového rekordu, vyrobily 1068 TWh, což je 37 % celkové elektřiny v EU, v porovnání s rokem 2019, kdy obnovitelné zdroje vyrobily 34 %. Jedná se tedy o 9% nárůst (+88 TWh) oproti roku 2019. Z obnovitelných zdrojů se nejrychleji rozvíjí větrná a solární energie, v roce 2021 vyrobily dohromady 19 % celkové elektřiny v EU, což je nárůst ze 17 % v roce 2019. Větrná a solární energie dosáhly dalšího nového rekordu, poprvé v roce 2021 předběhly plyn ve výrobě elektřiny, protože dohromady vyrobily 547 TWh elektrické energie, z plynu se vyrobilo 524 TWh. I když podíl větrné energie na výrobě elektřiny v EU mírně meziročně poklesl o 2 % (10 TWh), nárůst solární energie o 10 % (+14 TWh) tento pokles více než vykompenzoval a nárůst podílu větrné a solární energie tak nadále pokračoval. Instalovaný výkon solárních a větrných elektráren v EU vzrostla v roce 2021, odhadem o +37 GW. Větrná a solární energie v EU v období energetické krize, ve druhé polovině roku 2021, kromě září, zaznamenaly rekordně nejvyšší výkon. Nejvýznamnějšími leadery v oblasti růstu větrné a solární energie se staly

Španělsko, Nizozemsko a Řecko. Od roku 2019 společně tyto země představují více než polovinu celkového nárůstu větrné a solární energie v EU. V Nizozemsku a Řecku větrná a solární energie dohromady vyrobily čtvrtinu celkové elektrické energie a ve Španělsku dokonce třetinu. Ve všech těchto zemích je větrná a solární energie hluboce podporována a tyto země mají v této oblasti poměrně ambiciózní cíle. Do roku 2030 Španělsko a Nizozemsko plánují vyrábět dvě třetiny své elektrické energie z větrných a solárních elektráren a v Řecku plánuje dokonce až polovinu.

Protože rok 2021 nebyl příliš větrný, v nárůstu obnovitelných zdrojů hrála zásadní roli především solární energie. Solární energie vyrobila v tomto roce 6 % celkové elektrické energie v Evropě, jedná se tak o 25% nárůst oproti roku 2019. Významným hráčem v EU v oblasti růstu využívání solární energie je Španělsko a Nizozemsko. Mezi lety 2019 až 2021 Španělsko téměř zdvojnásobilo výrobu elektřiny ze solární energie z 15 TWh na 26 TWh. Nizozemsko v roce 2021 pokrylo svoji poptávku po elektřině téměř z 10 % výhradně solární energií a Španělsko ze solární energie vyrobilo 10 % své elektřiny. Další nárůst využívání solární energie od roku 2019 byl zaznamenán v Polsku, dále v Maďarsku, které pokrylo více než 5 % své poptávky solární energií a v neposlední řadě Portugalsko které pokrylo solární energií téměř 4 % své poptávky. Portugalsko, a některé další země plánují využívat velké plovoucí fotovoltaické elektrárny. Německo také hojně využívá solární energii, v roce 2021 snížilo pokrylo 9 % své poptávky po elektřině.

Ostatní obnovitelné zdroje, zejména vodní energie a bioenergie se příliš nezměnili. Výroba vodních elektráren se v roce 2021 nezměnila v porovnání s rokem 2020, ale v porovnání s rokem 2019 stoupla o 9 %, bioenergie stoupla mezi lety 2019 až 2021 o 4 % v Nizozemsku spalováním biomasy v uhelných elektrárnách. Dlouhodobě využívání obnovitelných zdrojů roste od roku 2011 do roku 2021 vzrostla vyrobená elektrická energie z obnovitelných zdrojů o 334 TWh. [4]



Graf 5 Vývoj růstu větrné a solární energie, nahoře instalovaná kapacita, dole výroba elektřiny [4]

Jaderné elektrárny v roce 2021 vyrobily 26 % (733 TWh) celkové elektřiny v EU, to je o 7 % (+47 TWh) více než v předešlém roce, nicméně využití jaderné energie dlouhodobě klesá. V porovnání před deseti lety se z jaderné energie vyrobilo 29 % elektrické energie, v EU zaznamenáváme tedy pokles o 105 TWh. Meziročně sice jaderná energie narostla o zmíněných 7 %, ale vyrobená elektřina byla v roce 2021 o 4 % menší než v roce 2019, to činí zhruba pokles o 32 TWh. Pokles byl způsoben hlavně z důvodu plánovaných uzavírek jaderných reaktorů, a to ve Francii (-18 TWh), Švédsku (-13 TWh) a Německu (-6 TWh). V každé z těchto zemí mezi lety 2019 až 2021 byl zaznamenán pokles instalovaného výkonu v jaderných elektrárnách nejméně okolo 1,8 GW. Ve Francii v roce 2020 vyřadili dva reaktory typu PWR, Fessenheim 1 a Fessenheim 2, každý o hrubém výkonu 920 MW [5]. Dva reaktory byly uzavřeny ve Švédsku, typ BWR Ringhals 1 byl uzavřen na konci roku 2020 a typ PWR Ringhals 2 na konci roku 2019 [6]. V Německu byly vyřazeny celkem 4 reaktory, jeden reaktor typu PWR Philippsburg 2 (KKP) byl vyřazen v roce 2019, další tři reaktory byly vyřazeny v roce 2021: typ BWR Gundremmingen C a 2 reaktory typu PWR Brokdorf a Grohnde [7]. Naopak v Belgii se v roce 2021 zvýšila produkce elektrické energie z jaderných elektráren o 7 TWh, nicméně tento nárůst plně nevykompenzoval ztráty v ostatních zemích. Dlouhodobý pokles jaderné energetiky v EU příliš nepomáhá přechodu na čistou energii a snížení emisí v energetice, protože úbytek jaderné energie nahrazují obnovitelné zdroje energie, zejména větrná a solární energie, místo aby nahrazovaly fosilní paliva. [4]

3.3 Analýza roku 2022

V důsledku energetické krize a války na Ukrajině a s tím související problémy s cenami a s dodávkami ruského plynu do Evropy, je v současné době kladen velký důraz na rozšíření čisté energie. Evropa se snaží snižovat poptávku po plynu a zároveň se snaží držet se dlouhodobého plánu postupně vyřadit uhlí jakožto největšího producenta emisí v energetice. [8]

Větrná a solární energie v roce 2022 vyrobily rekordních 22 % (623 TWh) elektrické energie v EU a předběhly tak fosilní plyn, který vyrobil 20 % a uhlí, které se podílelo na výrobě elektřiny v EU 16 %. Přejít k čisté energii v roce 2022 však pozastavili dvě překážky. Nejnižší produkce vodních elektráren od roku 2000 z důvodu sucha a rozsáhlé výpadky produkce jaderných elektráren ve Francii a uzavírání jaderných reaktorů v Německu. Tyto výpadky jaderných a vodních elektráren způsobily pokles výroby o 185 TWh, což je 7 % celkové poptávky elektřiny v roce 2022 v Evropě. Pokles poptávky a zvýšená výroba větrných a solárních elektráren nahradila pět šestin tohoto poklesu, zbývající šestina byla nahrazena produkcí z fosilních paliv, z důvodu vysoké ceny plynu, zejména uhlím. Výroba elektrické energie z uhlí v roce 2022 tak vzrostla o 7 % (+28 TWh) ve srovnání s rokem 2021, a uhlí tak vyrobilo 16 % elektřiny v EU. V důsledku toho vzrostly emise v energetice o 3,9 % (+26 MtCO₂). Podíl plynu na výrobě elektřiny zůstal na podobné úrovni (+0,8 %) jako v předchozím roce, protože k výraznějším změnám došlo již v roce 2021. Největším výrobcem elektrické energie v EU z plynu byla Itálie se 141 TWh vyrobené elektřiny. Ze všech zemí EU má Malta největší procentuální podíl plynu v energetickém mixu (84 %) a druhá je Itálie (51 %). Navzdory celkovému nárůstu výroby elektřiny z uhlí v roce 2022, ve všech 4 posledních měsících tohoto roku klesla výroba elektřiny z uhlí o 6 % (-9,6 TWh) oproti roku 2021. Zaznamenaný pokles byl způsoben především poklesem poptávky. Jako reakci na energetickou krizi a válku na Ukrajině, bylo v EU vráceno celkem 26 uhelných bloků do pohotovostního režimu v sedmi zemích o celkové kapacitě 11 GW, z toho 19 (73 %) v Německu. Devět z těchto 26 přidaných bloků neposkytlo žádnou výrobu, v posledním čtvrtletí roku 2022 běžely ostatní bloky při průměrném vytížení pouze 18 % a celkově přispěly k výrobě elektrické energie z uhlí v EU jen 0,9 % a vyrobily pouze 4 TWh. Opětovné spuštění uhelných bloků je pouze dočasné nouzové řešení, protože většina z nich dostala povolení pokračovat v provozu pouze během zimy do konce března 2023, i když v Německu jsou rezervní uhelné elektrárny povoleny až do března 2024, nicméně ale vláda se jasně vyjádřila, že se hodlá držet svého plánu na vyřazení uhlí a přechodu k čisté

energii. Jako rezervu EU dovezla v roce 2022 celkem 22 Mt (o 51 %) uhlí navíc, ale využila se pouze jedna třetina. Vzhledem k tomu, že v srpnu byl zakázán dovoz uhlí z Ruska do Evropy, což vedlo k diverzifikaci dodávek uhlí z jiných zemí (Jižní Afrika, Austrálie, Kolumbie, Indonésie). V Itálii a v Nizozemsku byly odstraněny limity vytížení některých uhelných elektráren a zrušeny nařízení omezující kapacitu uhelných elektráren, aby mohli v případě potřeby běžet na vyšší výkon. [8]

Ve všech zemích EU ve čtvrtém čtvrtletí roku 2022 klesla poptávka po elektrické energii celkově o 7,9 % ve srovnání s předchozím rokem. Podobný pokles o 9,6 % byl zaznamenán ve druhém čtvrtletí roku 2020, kdy byla Evropa uvržena v karanténě. Za celý rok klesla poptávka v EU o 2,7 % (79 TWh) na 2809 TWh. Pokles poptávky byl pravděpodobně způsoben z části teplejším počasím v závěru roku 2022, ale z velké části samotnými občany, kteří se snažili ušetřit, dále opatřeními a nařízeními na snížení poptávky kvůli vysokým cenám elektřiny. [8]

Výroba elektřiny ze solární energie dále narůstá, v roce 2022 přibylo rekordních 41 GW instalované kapacity a vyrobilo se tak o rekordních 39 TWh (+24 %) více elektřiny ze solární energie. Dosud největší podíl solární energie ve svém energetickém mixu dosáhlo celkem 20 zemí v EU. Nizozemsko poprvé vyrobilo více elektřiny ze solární energie než z uhlí, celkem vyrobilo 14 % své elektřiny ze solární energie. Dále Řecko na základě dosavadního růstu podílu solární energie očekává, že dosáhne své cílené solární instalované kapacity 8 GW v roce 2023, tedy o 7 let dříve. V roce 2022 poprvé pomocí solární a větrné energie dohromady vyrobilo 22 % celkové elektřiny v EU. Výroba elektřiny z ostatních obnovitelných zdrojů a z ostatních fosilních paliv zůstala téměř beze změny. [8]

Výroba elektrické energie z fosilních paliv v roce 2022 vzrostla o 3 % a v důsledku toho vzrostly emise v energetice meziročně o 3,9 % na 712 MtCO₂. V roce 2022 byla v EU uhlíková náročnost výroby elektřiny 255 gCO₂/kWh. Válka na Ukrajině a s tím spojené problémy s dodávkami ruského plynu ještě prohloubily evropskou energetickou krizi. Jednotlivé státy EU se snažili zmírnit rizika a rozsah energetické krize k zajištění energetické bezpečnosti, mezi hlavní opatření patřilo především zprovoznění některých vyřazených uhelných bloků, zvětšení zásob dovezeného uhlí a diverzifikace dodávek fosilních paliv. Zvýšený import uhlí a nárůst výroby elektřiny z uhlí na začátku léta 2022 vyvolalo spekulace, že se Evropa díky energetické krizi vrátí zpět ke produkci elektřiny z uhelných elektráren. Elektrická energie vyrobená spalováním uhlí v EU je však stále v posledních deseti letech v úpadku, i když nárůst v roce 2022 vyvolal spekulace, podíl vyrobené energie z uhlí byl stále o 37 % nižší v porovnání s rokem 2015. V roce 2022 se z uhlí vyrobilo „jen“

16 % elektrické energie v EU a jednalo se tak o meziroční nárůst 7 %. Polsko v roce 2022 vyrobilo 124 TWh elektřiny z uhlí, má největší podíl uhlí v energetickém mixu 69 %. Největším výrobcem je ale Německo se 181 TWh elektřiny (31 % z energetického mixu). Tyto dvě země společně s Českou republikou a Bulharskem vyrábějí více než 30 % své elektřiny z uhlí. Ve čtvrtém čtvrtletí roku 2022 klesla výroba elektrické energie v EU z fosilních paliv, uhlí zaznamenalo pokles o 7 % a plyn dokonce o 10 %. Ačkoli se předpokládalo, že podíl uhlí na výrobě elektřiny bude dále narůstat a že bude dále pokračovat trend ze začátku roku, zejména v březnu roku 2022 kdy byl zaznamenán 35% nárůst výroby elektřiny z uhlí oproti předešlému roku, tak v zimě nastal opačný scénář a podíl naopak klesal. Toto bylo způsobeno klesající poptávkou a teplejším počasím. Pokles výroby elektřiny z uhlí by byl v závěru roku 2022 ještě větší, kdyby byla vyšší produkce jaderných elektráren ve Francii, protože zde bylo několik reaktorů kvůli plánované údržbě odstaveno. Meziroční nárůst výroby elektrické energie z uhlí o 7 % lze vysvětlit sníženou výrobou jaderných a vodních elektráren v roce 2022, které vyrobily o 185 TWh méně elektrické energie než v předchozím roce, 185 TWh odpovídá 7 % celkově vyrobené elektřiny v EU v roce 2022. Nicméně nárůst produkce uhelných elektráren byl oproti tomu jen 28 TWh, to tedy tvoří pouze necelou šestinu poklesu produkce jaderných a vodních elektráren, zbývajících pět šestin bylo buďto nahrazeno větrnou a solární energií anebo kvůli klesající poptávce nebylo třeba tolik elektrické energie, jen lehce k tomu přispěl malý nárůst produkce elektřiny z plynu o 0,8 % (o 4,5 TWh). Navzdory nárůstu v letech 2021 a 2022, výroba elektrické energie z uhlí za poslední dvě desetiletí klesla o 353 TWh (-44 %), z 30 % energetického mixu EU v roce 2000 na 16 % v roce 2022. V roce 2022 byl v několika zemích i přes energetickou krizi a sní souvisejícími vysokými cenami plynu zaznamenán nárůst výroby elektřiny z plynu, největší ve Španělsku (+16 TWh) a ve Francii (+9,6 TWh). Tento nárůst souvisel s poklesem produkce jaderných elektráren ve Francii, což vedlo ke snížení exportu elektřiny do Španělska. Větší pokles byl zaznamenán v Nizozemsku (-9,7 TWh) díky zvýšené výrobě solární a větrných elektráren. Za poslední dvě desetiletí se zvýšila roční výroba elektrické energie z plynu o 225 TWh (+68 %), podíl plynu jako jediného fosilního paliva vzrostl a to na 20 % energetického mixu. Nárůst podílu plynu byl způsoben faktem, že plyn před energetickou krizí hrál důležitou roli při snižování výroby elektrické energie z uhlí a přechodu na čistou energii jako tzv. „přechodné palivo“. [8]

V roce 2022 Evropu zasáhlo největší sucho za posledních 500 let, a tak byla výroba vodních elektráren nejnižší (283 TWh) od roku 2000. V roce 2021 činila produkce vodních elektráren 349 TWh, kvůli dlouhotrvající vlně veder byl tedy zaznamenán meziroční pokles

o 66 TWh (19 %). Od září roku 2022 je však situace lepší výroba vodních elektráren dosáhla úrovně roku 2021 a zásoby vodních zdrojů na začátku roku 2023 byly kvůli nižšímu úhrnu srážek v předchozím roce lehce pod průměrnými hodnotami. V roce 2022 bylo největším výrobcem elektřiny z vodní energie Švédsko, vyrobilo 69 TWh (40,2 % svého energetického mixu), za Švédskem byla Francie s 46 TWh vyrobené elektřiny a Rakousko, které mělo největší podíl vodní energie v energetickém mixu (56 %) ze všech zemí v EU a vyrobilo 36 TWh. Od roku 2000 se instalovaná kapacita vodních elektráren v EU téměř nezměnila, a tedy roční úhrn srážek je jediný faktor který ovlivňuje produkci vodních elektráren. [8]

Podíl jaderné energie na výrobě elektřiny v EU v roce 2022 taktéž zaznamenal pokles a to o 16 % (119 TWh) na nejnižší úroveň 22 % za posledních 40 let. Pokles by způsoben hlavně Francií (69 %/ 82 TWh) a Německem (27 %), z důvodu uzavírání jaderných reaktorů v Německu v prosinci roku 2021 a odstávek některých reaktorů ve Francii kvůli inspekci a údržbě. V Německu od uzavření 3 reaktorů v prosinci 2021 klesla výroba elektrické energie z jádra téměř o polovinu z 69 TWh na 37 TWh, nyní jsou v provozu pouze 3 poslední jaderné reaktory (Isar 2, Emsland, Neckarwestheim 2), které bylo původně plánované uzavřít v roce 2022, nicméně na základě současně probíhající energetické krize, bylo rozhodnuto jejich uzavření odložit do poloviny dubna roku 2023 [7]. Třetí uzavřený jaderný reaktor v belgické elektrárně Doel také přispěl ke snížení výroby [10]. Ke snížení produkce jaderných elektráren také přispěla vlna veder v létě, kvůli vyšší teplotě vody v řekách používané k chlazení reaktorů musel být snížen výkon některých francouzských jaderných elektráren. [8]

Z důvodu neplánovaných odstávek jaderných reaktorů ve Francii, dodávali jaderné elektrárny nejnižší výkon za posledních 30 let. V prosinci roku 2021 servisní prohlídka objevila na primárním okruhu reaktoru Civaux 1 závadu, korozi v blízkosti svarů na potrubí bezpečnostního vstřikovacího systému. Stejný problém byl odhalen i na druhém reaktoru Civaux 2 a následně i na reaktoru Chooz B2. Na dalším reaktoru Penly 1, desetiletá inspekční prohlídka také objevila korozi na potrubí, i když se jedná o novější řadu reaktorů a potrubí se liší od starší řady do které patří Civaux 1, 2. Na základě těchto zjištění, francouzská energetická společnost EDF musela naplánovat servisní odstávky všech reaktorů do roku 2025. Rekordní počet odstavených francouzských jaderných reaktorů v roce 2022 způsobil meziroční pokles výroby jaderných elektráren ve Francii o 22 % z 379 TWh na 297 TWh. I přes rekordní počet odstávek jaderných reaktorů, byla Francie s 297 TWh největším výrobcem elektřiny z jaderné energie v EU a zároveň je zemí s největším podílem jaderné energie (63 %) v energetickém mixu. Na rok 2023 se předpokládá, že kvůli plánovaným odstávkám se výroba francouzských jaderných elektráren zvýší jen na 300-330 TWh, což je

stále výrazně pod úrovní desetiletého průměru 395 TWh. Dvě třetiny poklesu výroby francouzských jaderných a vodních elektráren, nahradil dovoz elektřiny z jiných zemí, zejména Německa a Španělska. [5] [8]

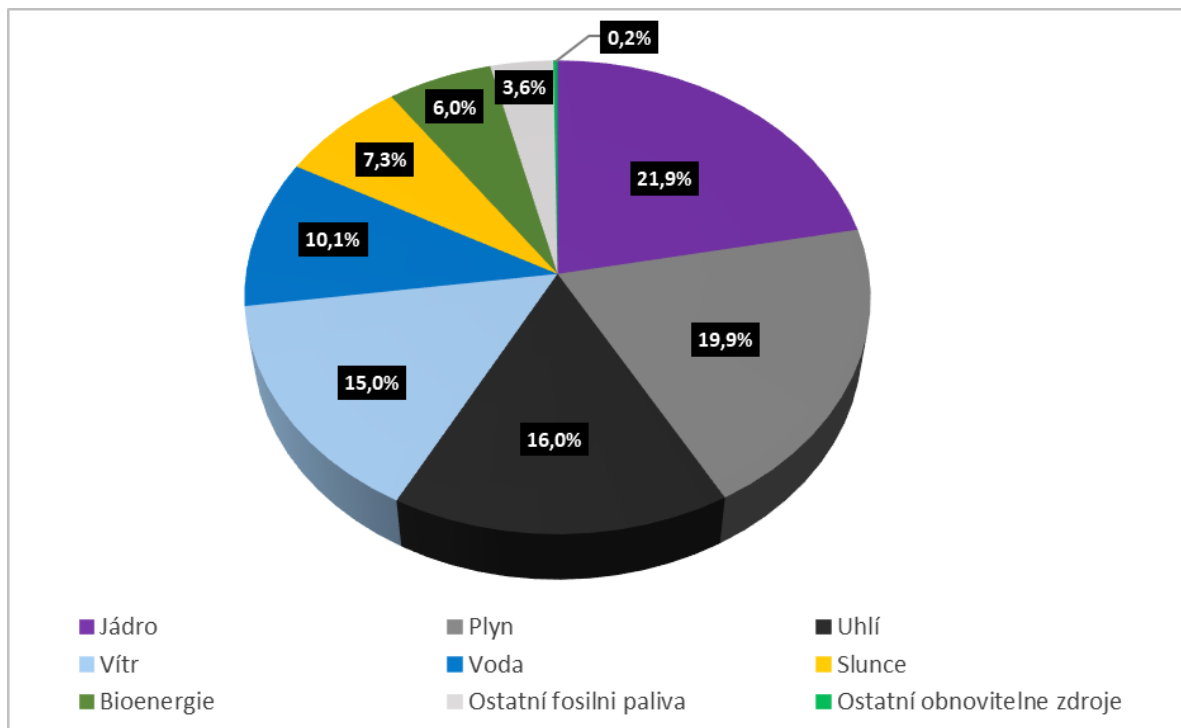
Na základě pokračujících odstávek francouzských jaderných reaktorů se podle EDF předpokládá, že výroba francouzských jaderných elektráren vzroste jen o 40 TWh, uzavírání posledních německých reaktorů v dubnu 2023 sníží ale výrobu o 30 TWh, uzavření reaktoru Tihange 2 v Belgii také sníží výrobu. Oproti tomu se ale výroba jaderných elektráren zvedne na Slovensku, kde spustili na začátku roku 2023 třetí blok v jaderné elektrárně Mochovce a ve Finsku zahájí komerční provoz nový jaderný reaktor [9]. Na základě těchto informací se předpokládá, že výroba jaderných elektráren se v tomto roce příliš nezmění. Nicméně, jaderná energetika v EU je v dlouhodobém poklesu, mezi lety 2000 a 2022 klesla výroba jaderných elektráren o 29 % a podíl v energetickém mixu tedy klesl z 33 % na 22 %. [8]

V posledním čtvrtletí roku 2022 klesla v Evropě poptávka po elektrické energii téměř o 8 %. Část poklesu poptávky lze připsat nižším teplotám, zejména říjen, listopad a prosinec byly v roce 2022 v Evropě teplejší než v roce 2021. Doporučení a nařízení Evropské komise pro snížení poptávky, které zavedla na zimu v září 2022 a vysoké ceny elektřiny také nepochybně přispěly ke snížení poptávky po elektrické energii. Snížení poptávky ke konci roku bylo hlavním faktorem poklesu výroby elektřiny z plynu a uhlí ve čtvrtém čtvrtletí o 9 %, nicméně tento pokles výrazně brzdila snížená produkce jaderných elektráren ve Francii. [8]

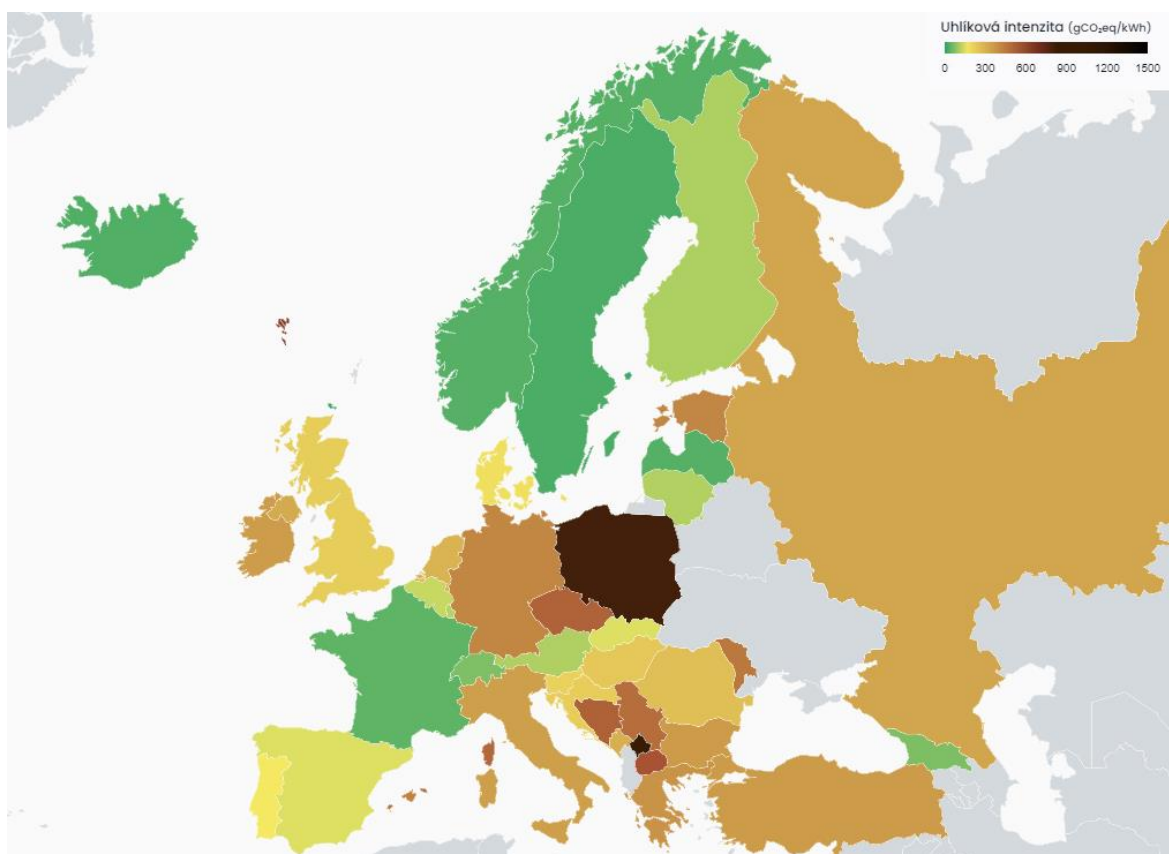
Solární a větrná energie hrály opět důležitou roli v pokračující energetické krizi, v roce 2022 vyráběly 22 % elektřiny v EU. Solární energie zažívá v Evropě velký rozmach, v roce 2022 vzrostla instalovaná kapacita na 209 GW tedy o rekordních 41 GW, kapacita vzrostla zejména v Německu o 7,9 GW, Španělsku o 7,5 GW, v Polsku o 4,9 GW, v Nizozemsku (4 GW) a Francii (2,7 GW). Solární elektrárny vyrobily v roce 2022 7,3 % (203 TWh) elektřiny v EU oproti 5,7 % v roce 2021, jedná se tedy vůbec největší absolutní nárůst výroby o 39 TWh (+24 %). Parné léto bezpochyby pomohlo ke zvýšené produkci solárních elektráren. Celkem dvacet zemí EU dosáhlo v roce 2022 nových rekordů v podílu solární energie. Novým leaderem v oblasti podílu solární energie v energetickém mixu se stalo Nizozemsko, které předběhlo Španělsko a vyrobilo tak 14 % své elektrické energie. V Nizozemsku a Řecku poprvé solární elektrárny vyrobily více elektrické energie než uhelné elektrárny. V těchto zemích jsou solární a větrná energie široce podporovány, v Nizozemsku vzrostl podíl solární energie z 1 % v roce 2015 na 14 % z energetického mixu v roce 2022. Řecko jakožto druhá země v evropském žebříčku podílu solární energie v energetickém mixu přidala v roce

2022 rekordních 1,3 GW kapacity, zvýšila tak svoji solární instalovanou kapacitu na 5,5 GW a vyrobila 12,6 % své elektřiny ze solární energie. Tímto tempem se očekává, že Řecko dosáhne své cílené solární kapacity 7,7 GW pro rok 2030 již v roce 2023. Německo je stále na prvním místě v absolutním množství vyrobené elektřiny ze solární energie (59 TWh), následuje Španělsko (33 TWh), Nizozemsko (17 TWh), Řecko (6,6 TWh) a Maďarsko (4,5 TWh). Obecně největším problémem solárních elektráren je nebezpečí přetížení energetické sítě, země se snaží rozšiřovat bateriové jednotky pro skladování energie. Střešní fotovoltaické panely představují značnou část 66 % celkové instalované solární kapacity v EU 209 GW, jen na střechách domů přibylo v roce 2022 1,8 GW instalované kapacity. Pro urychlení přechodu na čistou energii Evropská komise stanovila cíle solární kapacity na 400 GW do roku 2025 a na 740 GW do roku 2030, společnost Solar Power Europe potvrzuje, že těchto cílů je možné dosáhnout, dokonce uvádí, že tyto cíle nejsou dostatečně ambiciózní a podle jejího středně optimistického scénáře solární kapacita dosáhne v roce 2030 920 GW. Podíl větrné energie taktéž vzrostl o 33 TWh (8,6 %) a větrné elektrárny v roce 2022 vyrobily celkově 420 TWh elektrické energie. Největším výrobcem se 126 TWh elektřiny z větrných elektráren je Německo (22 % energetického mixu), druhé je Španělsko (62 TWh, 22 %). Větrná energie má největší procentuální podíl v energetickém mixu v Dánsku (55 %/ 19 TWh), Litvě (38 %), Irsku (34 %) a Portugalsku (28 %). Větrná energie je v současnosti druhým největším výrobcem čisté elektrické energie před jádrem. Podíl bioenergie na výrobě elektřiny v roce 2022 mírně poklesl o 1,6 % (-2,8 TWh). Obecně výroba elektřiny z bioenergie v EU v dlouhodobém měřítku postupně roste, od roku 2000 se zvýšila více než pětkrát ze 30 TWh na 167 TWh, což je nárůst v energetickém mixu z 1,2 % na dnešních 6 %. Největšími výrobci elektřiny z bioenergie jsou Německo (47 TWh) a Itálie (18 TWh). [8]

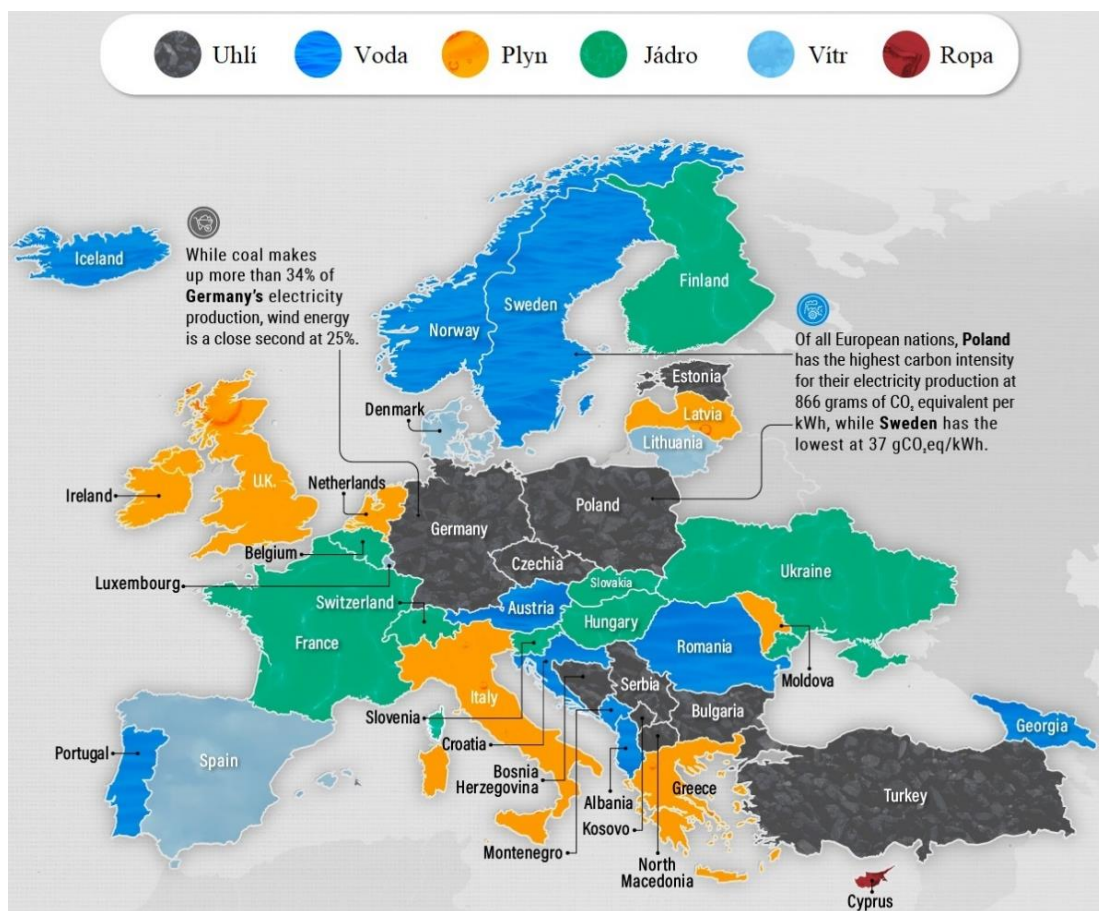
Ačkoliv se v EU silně rozvíjí obnovitelné zdroje energie, tak výroba elektrické energie je stále z velké části závislá na fosilních palivech. V roce 2022 se v EU vyrobilo 2795 TWh elektrické energie, z toho 60,5 % (1692 TWh) z čistých zdrojů; 39,5 % (1 104 TWh) z fosilních paliv, konkrétně 16 % (447 TWh) z uhlí, 20 % (557 TWh) z plynu a zbytek 3,6 % (100 TWh) tvoří ostatní fosilní paliva. Další podstatnou část energetického mixu tvoří jaderná energie 22 % (613 TWh), větrná energie 15 % (420 TWh), solární energie 7,3 % (203 TWh), vodní energie 10 % (283 TWh), bioenergie 6 % (167 TWh) a zbytek tvoří ostatní obnovitelné zdroje energie 0,2 % (6,7 TWh). [8]



Graf 6 Energetický mix EU v roce 2022 podle [8]



Obr. 11 Uhlíková náročnost výroby elektřiny v jednotlivých zemích Evropy v roce 2022 [8]



Obr. 12 Nejpoužívanější zdroj pro výrobu elektřiny v jednotlivých zemích Evropy [39]

4 Budoucí koncepty

4.1 SMR (Small Modular reactor) – Malý modulární reaktor

Současným trendem energetiky EU, a i celosvětově je nahrazování fosilních paliv čistými bezemisními, ekologickými obnovitelnými zdroji energie. Nicméně obnovitelné zdroje, především jako je větrná a sluneční energie jsou závislé na povětrnostních podmínkách a na počasí a v důsledku toho neposkytují stálou výrobu elektrické energie. Pro budoucí vývoj energetiky bude tedy velmi důležité najít bezemisní ekologický zdroj energie, nezávislý na aktuálních klimatických podmínkách a tím může být právě jaderná energie. Silným motivem pro rozvoj jaderné energetiky je fakt, že se jedná z hlediska množství vyrobené energie na jednotku paliva o nejefektivnější a nejrobustnější zdroj energie. Využívání jaderné energetiky v mnoha zemích jako je Francie, Švédsko, Švýcarsko a další prokázalo, že je nízkoemisní a nízkouhlíkovou alternativou, umožňující efektivní snižování emisí při výrobě elektřiny. Pokud chceme dodržet Pařížskou klimatickou dohodu a zpomalit globální oteplování bude nutné v budoucnu více spoléhat na jaderné zdroje. [36]

Malé modulární reaktory historicky vycházejí z jaderných reaktorů používaných k pohonu lodí (ledoborců, letadlových lodí...), či atomových ponorek. Název se skládá ze dvou přídavných jmen, malý reprezentuje nižší elektrický výkon oproti klasickým „velkým“ jaderným reaktorům, do 300 MW. Jako malý se označuje modulární reaktor o elektrickém výkonu 10–300 MW, pod 10 MW se jedná o mini nebo mikro reaktor, i když tyto výkonové hranice nejsou přesně stanoveny. Druhé slovo, modulární značí typ konstrukce, která se skládá z jednoho nebo několika submodulů vyrobených v továrnách, jež jsou sestaveny a spojeny do funkčního celku na místě výstavby zdroje. Modulární konstrukce dále umožňuje při specifické potřebě sestavit elektrárnu z více takových modulů v závislosti na požadovaném výkonu. Jednotlivé moduly mohou být postupně přidávány podle nárůstu zatížení dané lokality v delším časovém horizontu, a tak lze rozložit celkové náklady na výstavbu elektrárny oproti velké jaderné elektrárně. Jednotlivé moduly by mohly být vyráběny v továrnách sériovou výrobou. Standardizace by značně ulehčila a zlevnila výstavbu elektrárny. Velkou výhodou modulárních reaktorů jsou vylepšené a přepracované pasivní bezpečnostní systémy, které jsou založené na konceptech reaktorů IV. generace. SMR jsou navrženy pro dlouhodobý provoz bez nutnosti výměny paliva, přičemž výměna paliva by probíhala ve specializovaných závodech a továrnách, čímž by se výrazně snížily náklady na výstavbu a provoz jaderné elektrárny, protože by se eliminovala potřeba systémů

na výměnu a skladování vyhořelého jaderného paliva. Modul reaktoru s vyhořelým jaderným palivem by se pro výměnu paliva odvezl do specializované továrny a na místě elektrárny by se jednoduše vyměnil za nový. Aby se palivo nedalo zneužít k výrobě jaderných zbraní je obohaceno na maximálně 20 % izotopu uranu U^{235} . [35] [36] [38]

Na světě je více než 80 návrhů SMR v různém stádiu vývoje, přičemž na vývoji se podílí 18 států. Většina projektů SMR je ve fázi koncepčního návrhu nebo konstrukce, jen několik málo takových projektů se podařilo zrealizovat (např. plovoucí jaderná elektrárna v Rusku, v Číně a v Japonsku). Nicméně se většinou jedná o specifické projekty v odlehlých oblastech, pro demonstrační nebo testovací účely, kde není řešena vyšší finanční náročnost. Jednotlivé typy se liší, kromě odlišné konstrukce, hlavně chladícím médiem a moderátorem. V některých typech se jako chladivo klasicky používá lehká nebo těžká voda (vodou chlazené), tyto návrhy využívají mnohaleté zkušenosti pokročilé technologie, protože většina dnešních reaktorů v provozu jsou chlazené a moderované vodou. Tyto projekty zahrnují různé varianty, jako jsou integrované PWR, PHWR, kompaktní PWR, smyčkové PWR, BWR a bazénové PWR pro centrální vytápění. Některé projekty jsou již ve výstavbě např. projekt CAREM25 v Argentíně, který plánuje dosáhnout kritického stavu v roce 2026, další z projektů je čínský ACP100, který je ve výstavbě a plánuje komerční provoz v roce 2026. V jiných se používá plyn (nejčastěji helium). Tyto reaktory tzv. HTGR (High-Temperature Gas-Cooled Reactors) již podle anglického názvu dosahují vysokých teplot (≥ 750 °C), proto mohou být využity k účinnější výrobě elektrické energie, anebo jako zdroj vysokopotenciálového tepla pro průmyslové aplikace a kogenerační jednotky nebo výrobu vodíku. Tyto reaktory jsou již v provozu v Japonsku a Číně. Některé konstrukce pracující s rychlým neutronovým spektrem jsou chlazeny tekutým kovem nebo slitinou (sodík, olovo, slitina olova a bismutu). Jeden z takových reaktorů je ve výstavbě v Rusku, jedná se o olovem chlazený rychlý neutronový reaktor BREST-OD-300. Dokončení výstavby tohoto prototypu se plánuje taktéž na rok 2026. Posledním typem jsou reaktory na bázi různých tavenin solí. Reaktory s chladícím médiem a palivem v podobě tavenin obvykle fluoridových solí, slibují mnohé výhody jako je zvýšená bezpečnost, menší velikost kontejnmentu, vyšší účinnost a flexibilitu typu a složení jaderného paliva. Několik takových návrhů specifické skupiny reaktorů s pokročilou technologií chlazení taveninami solí je zatím ve fázi licencování v Kanadě, USA, Dánsku, Nizozemsku a Velké Británii. Mezi tyto konstrukce se řadí i český projekt mikroreaktoru Energy Well společnosti ÚJV, Řež, a.s. Dále lze rozlišit modulární reaktory podle nuceného anebo přirozeného chladicího okruhu. [36] [37] [38]

Modulární reaktory do budoucna mohou vyrábět nejen elektřinu, ale kombinovaně i tepelnou energii a vodík pro průmyslové použití a dopravu. Několik SMR dokáže nahradit dosluhující jaderné reaktory, anebo může nahradit nový velký jaderný reaktor. S výstavbou nových velkých bloků lze vystavět SMR a otestovat jeho efektivitu a provoz, to by mohlo být vhodnou příležitostí i v ČR například v jaderné elektrárně Temelín. [36]

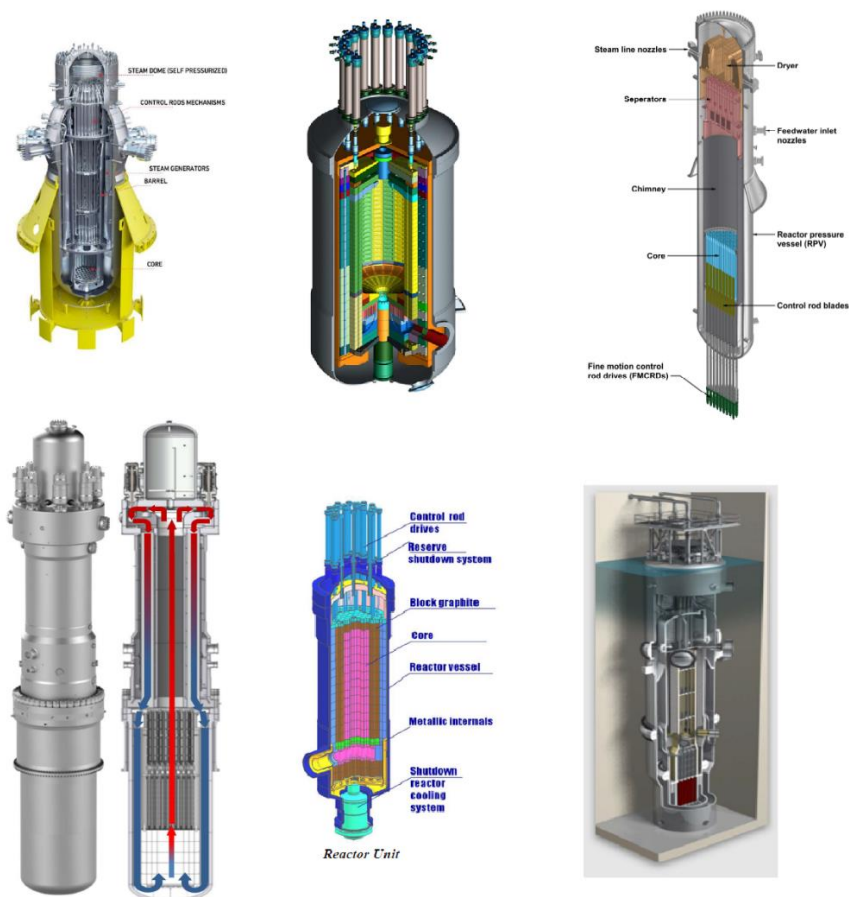
SMR mají v budoucnu potenciál napájet či nahradit centrální vytápěcí systém (district heating). Nicméně, s velkou pravděpodobností lze očekávat, že strach veřejnosti z potenciální jaderné havárie a globální nedůvěra veřejnosti v jadernou technologii nejspíše značně omezí rozsah použití SMR pro vytápění. Teplárny bývají umístěny v blízkosti hustě obydlených oblastí, aby se minimalizovaly ztráty při přenosu a distribuci tepla. Pokud bychom chtěli nahradit teplárny malými modulárními reaktory umístěnými v blízkosti měst a hustě obydlených oblastí, s velkou pravděpodobností by to vyvolalo silný odpor obyvatel, což by výrazně ztížilo schválení takového projektu městskými zastupitelstvy. Je tedy nutné se zaměřit na bezpečnostní opatření takových projektů. Modulární reaktory by mohly v budoucnu zajistit výrobu vodíku jako čistého zdroje energie budoucnosti pro průmysl a dopravu. Výroba vodíku by byla situována v odlehlejších oblastech, kde by jaderné zařízení nezbuzovalo takové obavy veřejnosti a díky poměrně snadnému transportu vodíku, by přenos a distribuce nebyly takový problém jako u elektřiny anebo tepla. Dalším možným použitím modulárních reaktorů je v průmyslových podnicích a závodech jako kogenerační jednotky anebo jako zdroj vysokopotenciálového tepla, ať už k vytápění, nebo při různých procesech výroby. Díky malým rozměrům a modulární konstrukci jsou malé a mikro modulární reaktory snadno přepravitelné po železnici a po silnici. Přeprava na železničních vagoncích nebo kamionech umožňuje výstavbu jaderné elektrárny na místech, kde postavení konvenční velké jaderné elektrárny nelze z nějakého důvodu uskutečnit. V oblastech poblíž mořského pobřeží lze SMR umístit na plovoucí platformy a vytvořit tak plovoucí jaderné elektrárny. Jeden z takových projektů se již podařilo zrealizovat v Rusku, kde plovoucí jaderná elektrárna Akademik Lomonosov poskytuje elektřinu a teplo městu Pevek na severu Sibíře. Snadná přepravitelnost a poměrně dlouhá výdrž bez nutnosti výměny paliva umožňuje použití SMR v odlehlých oblastech jako kogenerační zdroje elektrické energie a tepla. Dalším potenciálním použitím SMR je v kombinaci s geotermální energií. Při malém zatížení lze energii z SMR využít k hloubení geotermálních vrtů. Pokud je vrt dostatečně hluboký může např. v době energetických špiček produkovat geotermální energii. Takovýto autonomní zdroj energie by mohl být umístěn v podzemí a dodával by stálý a stabilní výkon nezávislý na počasí a povětrnostních podmínkách, mohl by pracovat nepřetržitě několik let,

vyznačoval by se vysokou bezpečností a minimálními vlivy na životní prostředí. Největší potenciál SMR je použití v decentralizovaných či distribuovaných zdrojích energie, zejména v odlehlých oblastech např. v dolech kde by mohli nahradit diesellové generátory. [36] [38]

Lehkododní SMR budou mít snazší proces licencování a posuzování bezpečnosti, protože tato technologie je obecně rozšířenější u klasických elektrárenských reaktorů. Licencování a posuzování bezpečnostních orgánů velmi pokročilých SMR na bázi roztavených solí pro komerční a civilní využití bude problém, protože neexistují dostatečné zkušenosti a pravidla se teprve musí vytvořit. [36]

Velká překážkou pro zavedení SMR v průmyslovém měřítku může být dlouhá doba licencování nových technologií a nesouhlas veřejnosti, někteří také pochybují o návratnosti investice z hlediska menšího výkonu reaktorů. [36]

SMR by mohly v budoucnu přispět k lepší dostupnosti jaderné energetiky, protože pro výstavbu velké konvenční jaderné elektrárny jsou potřeba velké počáteční investice, náročný a dlouhý proces výstavby a také existuje riziko, že z politických důvodů bude takovýto projekt ve výstavbě zastaven. Potenciální sériová produkce SMR by značně zlepšila možnosti financování a zlepšila by dostupnost jaderné energetiky. [36]



Obr. 13 Příklady několika konstrukčních řešení SMR [37]

4.2 Systémy pro zachytávání, využívání a ukládání CO₂

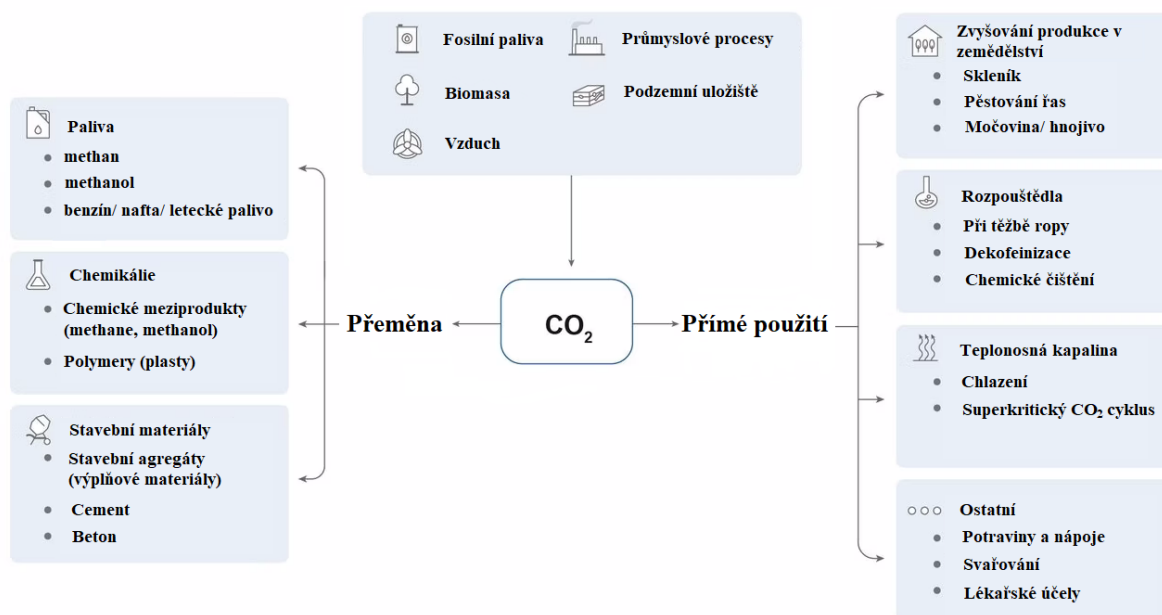
I přes zavádění obnovitelných zdrojů, je stále výroba elektrické energie z velké části závislá na spalování fosilních paliv. Při spalování fosilních paliv mimo jiné vzniká velké množství oxidu uhličitého. Budoucím řešením současného problému emisí skleníkových plynů je použití systému CCS (Carbon Capture and Storage), tedy systém pro zachytávání a ukládání CO₂ nebo CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage), systém pro zachytávání, využití a skladování CO₂.

Systémy CCUS/CCS zachytávají CO₂ buď u velkých zdrojů (továren, elektráren, rafinérií) které při spalování fosilních paliv a biomasy produkují velké množství CO₂, nebo přímo z atmosféry. Zachycený CO₂ můžeme využít přímo na místě odběru, nebo ho lze stlačit a přepravit potrubím, lodí, po železnici, po silnici pro další použití. Pro velké průmyslové systémy pro zachytávání a ukládání CO₂ je však důležité z dlouhodobého hlediska zajistit dostupnou infrastrukturu pro spolehlivou a bezpečnou přepravu do místa spotřeby a uložení. Ve velkém měřítku je nejvýhodnější použít lodní dopravu a potrubí. Lodní doprava nabízí větší flexibilitu, pokud je k dispozici více uložišť na mořském dně. Pro menší objemy lze využít nákladní automobily a železniční dopravu. Přeprava velkého množství potrubím je nejlevnější a je využívána již mnoho let. Další možností je trvalé ukládání do hlubinných uložišť jako jsou např. vyčerpaná ložiska ropy, zemního plynu a solných akviferů. Takové úložiště musí být v hloubce více než 800 metrů pod zemským povrchem, aby se stlačený CO₂ udržel v kapalném stavu a také kvůli bezpečnosti. Velké geologické úložiště CO₂ v Evropě se nachází asi 1 km pod hladinou Severního moře. Uložišťe Sleipner v Norsku slouží pro zachytávání CO₂ při těžbě plynu na moři. [40] [41]

Dnes existuje celosvětově přibližně 35 komerčních zařízení, která používají systém CCUS v průmyslových aplikacích, při transformaci paliv a při výrobě energie. Ročně průměrně zachytí přibližně 45 Mt CO₂. Nejrozšířenější a nejpokročilejší technologie pro zachytávání CO₂ jsou chemická absorpce pomocí rozpouštědel na bázi aminů, fyzikální separace, membránová separace, přímá separace, chemická smyčka, vápničková smyčka, superkritický CO₂ cyklus. Existuje zhruba 300 projektů CCUS v různých fázích vývoje. Do roku 2030 se plánuje uvést do provozu 200 nových zařízení, které zachytí přes 220 Mt CO₂ ročně. [40] [41]

Zachycený oxid uhličitý lze využít pro řadu aplikací přímo anebo prostřednictvím chemických a biologických procesů přeměnit na užitečný produkt. CO₂ se využívá pro výrobu hnojiv a při těžbě ropy (pomáhá uvolňovat a vytlačovat zbytky ropy ze zásobníků).

Další nové využití lze nalézt ve stavebnictví, při výrobě syntetických paliv, chemikálií a stavebních materiálů. Různé použití ukazuje Obr. 14. [40] [41]



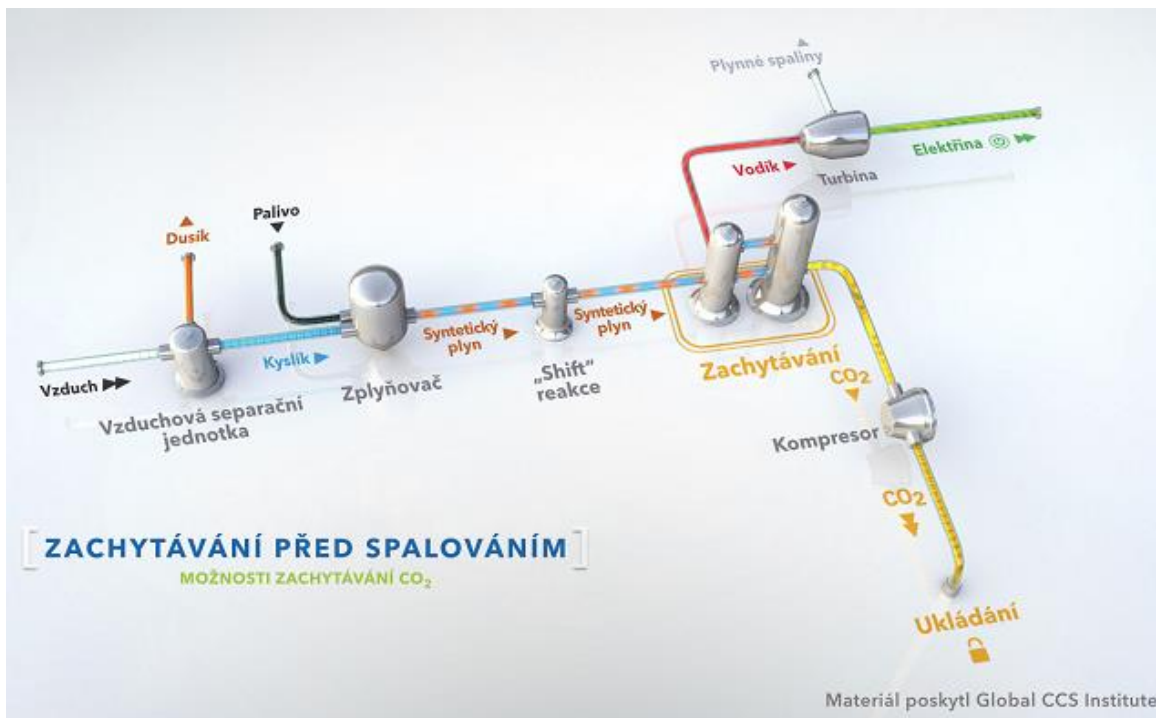
Obr. 14 Příklady použití zachyceného CO₂ [40]

Činnost systému pro zachytávání a ukládání CO₂ lze tedy rozdělit do tří kroků: zachytávání, přeprava a ukládání [44].

Zachytávání je nejdražší částí celého procesu nakládání s CO₂, odhaduje se, že proces zachytávání stojí 70–80 % celého procesu. Aby byl vyprodukovaný CO₂ čistý a dal se použít pro další aplikace je nutné, aby systém CSS produkoval co nejčistší a vysoce koncentrovaný CO₂. Je důležité správně oddělit CO₂ od ostatních znečišťujících látek jako je H₂S, CO, CH₄, SO_x a vodní pára, které mohou změnit fyzikální a chemické vlastnosti plynu a mohou tak zhoršit podmínky pro efektivní skladování. Účinnost zachytávání CO₂ je obvykle přes 90 % [45]. Existuje celkem pět druhů zachytávání, ale pro použití pro výrobu elektrické energie lze použít následující 3 druhy, a to zachytávání před spalováním, po spalování a spalování v kyslíkové atmosféře. Další metoda je zachycování přímo z atmosféry a v neposlední řadě tzv. inherentní separace, kdy při některých průmyslových procesech jako je zpracování zemního plynu, nebo výroba ethanolu vzniká vysoce čistý CO₂ [46]. V komerčním měřítku se používají pouze 2 technologie, zachycování před spalováním (používané v aplikacích při zpracování zemního plynu) a zachycování po spalování. [42] [43]

Při zachytávání před spalováním se nejprve palivo (uhlí, biomasa...) přemění na syntetickou plynou směs vodíku a CO₂, tzv. zplynování paliva. Vodík je následně oddělen fyzikální nebo chemickou metodou a spálen bez produkce dalšího oxidu uhličitého, zatímco

CO₂ se následně zachytí a stlačí pro přepravu a uložení. Koncentrace takto zachyceného CO₂ je přibližně 15-60 % s malým podílem nečistot. Zachytávání před spalováním je výrazně složitější než zachytávání po spalování, protože vyžaduje složité chemické procesy. Tato metoda se využívá hlavně při zpracování zemního plynu a dále najde využití v elektrárnách s kombinovaným cyklem. [42] [43] [44] [45]



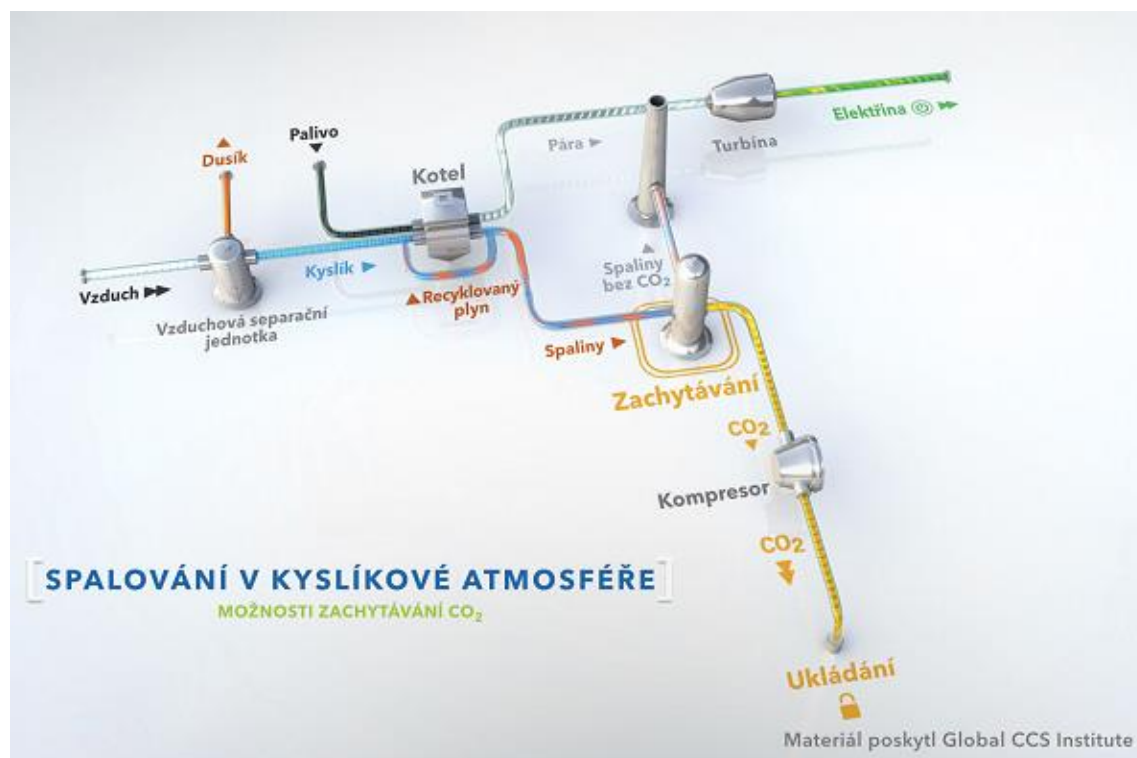
Obr. 15 Zachytávání CO₂ před spalováním [44]

Zachytávání po spalování odděluje CO₂ z plynných spalin. CO₂ se zachytává většinou pomocí kapalného rozpouštědla nebo jiné separace. Tento systém je dobře aplikovatelný jak na stávající, tak i na moderní tepelné elektrárny. Před zachycením CO₂ je nutné, aby spaliny prošli odsířením, denitrifikací a odstranili se prachové částičky a popílek. Tato metoda poměrně značně zvyšuje náklady na výrobu elektrické energie, protože spotřebuje hodně energie. Oproti tomu tepelná elektrárna dosahuje vyšší tepelné účinnosti než u metody před spalováním. Tato technologie se široce využívá k produkci CO₂ pro potravinářský průmysl a výrobu nápojů. [42] [43] [44] [45]



Obr. 16 Zachytávání CO₂ po spalování [44]

Třetí možností je technologie kyslíkového spalování. Palivo se nespaluje ve vzduchové atmosféře, ale se směsí kyslíku a recyklovaných výfukových plynů. Výsledné spaliny sestávají hlavně z CO₂ a vodní páry, kterou je poměrně snadné oddělit a získat tak vysoce čistý CO₂. Při této technologii je nutné se zbavit dusíku ze vzduchu přiváděného do kotle a dosáhnout čistoty kyslíku nad 95 %. Část spalin je přiváděna zpět do kotle, za účelem snížení teploty, protože spalování v čistém kyslíku by se dosáhlo obrovských teplot (3500 °C), na které nejsou dimenzovány dnešní kotle. Pro zavedení této technologie je nutný intenzivní výzkum materiálů schopných odolat takto vysokým teplotám. Výhodou kyslíkového spalování je produkce vysoce čistého CO₂ až (98 %), jednoduchá integrace systému, nejlevnější ze všech technologií a výrazné snížení emisí NO_x. [42] [43] [44] [45]



Obr. 17 Spalování v kyslíkové atmosféře [44]

Možná integrace systémů CCS/CCUS do stávajících a instalace do nově vybudovaných tepelných elektráren spalující fosilní paliva a biomasu v průmyslovém měřítku je otázkou budoucnosti. Velkou nevýhodou zavedení této technologie je bezpochyby ekonomická stránka věci a také se diskutuje nutnost vynaložit poměrně velké množství energie, což se může negativně projevit na zhoršení účinnosti tepelné elektrárny, nicméně je to určitě jedna z možností, jak snížit široce produkované emise CO₂ nejen v energetice.

4.3 Jaderná fúze

4.3.1 Jaderná fúze obecně

Jaderná fúze funguje na opačném principu než štěpná reakce, jde tedy o slučování atomových jader lehkých prvků, stejný proces termojaderné fúze probíhá v každém okamžiku uvnitř hvězd ve vesmíru, tedy i na Slunci. Jaderná fúze je stejně jako štěpná reakce bezemisní a nízkouhlíkový zdroj elektrické energie, který na rozdíl od obnovitelných zdrojů nezávisí na aktuálních povětrnostních podmínkách a počasí. Termojadernou fúzi se zatím podařilo zvládnout lidstvu pouze v podobě vodíkové bomby. Fúzní reaktory, také označované jako reaktory 5. generace zcela odstraňují, nebo maximálně snižují největší problémy a rizika současných jaderných reaktorů pracujících na bázi štěpné jaderné reakce, mezi které patří radioaktivní vyhořelé palivo a potenciální nebezpečí jaderné havárie. Fúzní reaktory mají velkou výhodu bezpečnosti, a to z několika důvodů. Za prvé, bezpečnost zajišťuje samotný složitý princip vytvoření řízené jaderné fúze, protože udržet a řídit dlouhodobě termonukleární fúzi je velice obtížné a technologicky náročné, je nutné splnit podmínky jako je extrémně vysoká teplota (až stovky milionů °C). Jakmile se teplota sníží celý proces se zastaví, pokud by došlo například k poruše integrity reaktoru, palivo se přirozeně ochladí a reakce se samovolně přeruší. Reakci lze také zastavit přerušením napájení. Ze samotného principu fúzních reaktorů tedy vyplývá, že vznik neřízené reakce není možný a díky tomu jsou bezpečné. Bezpečnost ještě podtrhuje fakt, že při provozu bude v těchto reaktorech v každém časovém okamžiku jen několik gramů paliva, které by i při úniku z reaktoru v tomto malém množství nezpůsobilo příliš rozsáhlé škody, navíc přerušením jeho přívodu se fúze zastaví. Je tedy spíše problémem jadernou fúzi vytvořit a udržet v delším časovém intervalu, než aby nastal problém neřízené reakce. Za druhé je velmi náročné udržet termonukleární fúzi dostatečně dlouho, aby se vyrobilo více energie, než se spotřebuje pro započítí reakce a každá nestabilita reakci opět sama zastaví. Za třetí odpadem fúzních reaktorů bude pouze inertní plyn helium a také mohou vznikat některé radioaktivní prvky při reakci neutronů s vnitřním pláštěm reaktoru, nicméně při zvolení vhodných materiálů, bude radioaktivní záření do sto let na bezpečné hladině, což je oproti radioaktivnímu odpadu štěpných reaktorů poměrně krátká doba. Helium vznikající při provozu bude použito pro řadu aplikací včetně chlazení samotného reaktoru. [36] [47]

První generace fúzních reaktorů bude pro výrobu energie slučovat izotopy vodíku deuterium a tritium, které v reaktoru vzniká z lithia. Při slučování se uvolní helium a volné neutrony, které odvedou uvolněné teplo směrem ke stěnám reaktoru, kde předají tepelnou

energii chladicímu systému, která se následně využije k výrobě elektrické energie. Další generace pak bude jako palivo využívat jen deuterium, což je izotop vodíku, který se nachází ve vodě. Velkou výhodou kromě bezemisního provozu je také malá spotřeba paliva v porovnání se štěpnými reaktory a velké množství zásob paliva na Zemi, jak lithium, tak deuterium vystačí lidstvu na několik milionů let. Fúzní elektrárna o výkonu 2 GW by denně vystačila pouze s 2 kg vodíkových izotopů, oproti tomu jaderná elektrárna by spotřebovala cca 125 kg oxidu uranu, a to je ještě výrazně menší množství oproti množství spotřebovaného uhlí v tepelné elektrárně. [36] [47]

Jeden z typů konstrukcí fúzních reaktorů, který je technologicky nejvyspělejší je Tokamak. Jedná se koncept již ze Sovětského svazu. Reaktor je ve tvaru dutého prstence (toroidu) obklopeného cívkami a využívá k udržení plazmatu při termonukleární reakci silné magnetické pole. Na světě existuje několik projektů tokamak, největší z nich JET (Joint European Torus) je v Evropě konkrétně v Anglii. Český projekt fúzního reaktoru tokamak COMPASS provozuje ústav fyziky plazmatu Akademie Věd ČR. [36] [47]

Největší mezinárodní projekt tokamaku ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) se staví u francouzského výzkumného centra Cadarache. Na tomto mezinárodním projektu se podílí několik zemí EU, USA, Rusko, Čína, Indie, Japonsko a Jižní Korea. Projekt fúzního reaktoru ITER o tepelném výkonu 500 MW při příkonu 50 MW, nebude vyrábět elektrickou energii, ale bude sloužit pouze pro testovací účely komponent a technologií pro budoucí fúzní jaderné elektrárny a také jako ukázka možností jaderné fúze. Cílem projektu je otestovat materiály použité na komponenty konstrukce reaktoru, protože hlavním problémem je hlavně vysoká teplota uvnitř reaktoru, palivo ve formě plazmatu dosáhne teploty více než 150 milionů °C, je tedy velkým problémem vyvinout co nejvhodnější a nejodolnější materiály. Náročné je zejména najít vhodné materiály pro vnitřní povrch stěny reaktoru a pro čidla využívající Hallovy sondy, které odolávají vysokým teplotám plazmatu. Reaktor ITER by měl být spuštěn v roce 2028 a dosažení plného výkonu se plánuje na rok 2036, nicméně jde o předběžné termíny, které se mohou změnit. Pokud se projekt osvědčí, plánuje EU vystavět prototypy fúzních elektráren DEMO, které budou sloužit pro demonstraci výroby elektrické energie. Tyto elektrárny s reaktory DEMO by měli dosahovat elektrického výkonu 400 MW, výstavba by měla být zahájena v roce 2040 a zprovoznění se plánuje do roku 2060 až 2070. Na světě jsou i další koncepty fúzních reaktorů např. čínský projekt CFETR, nebo americký projekt ARC a mnoho dalších. [36] [47]

V posledních letech je jaderná energetika v období stagnace. Jedním z hlavních důvodů jsou především vysoké náklady na výstavbu a více či méně opodstatněné obavy veřejnosti z

jaderné havárie. Pokud se projekty fúzních elektráren osvědčí v praxi, mohly by výrazně změnit budoucnost energetiky a přispět tak k bezpečné, efektivní a bezemisní výrobě elektrické energie. [36] [47]

4.3.2 Princip jaderné fúze

Při jaderné fúzi se využívá vazebná energie atomových jader stejně jako při štěpení, ale jak již bylo zmíněno, namísto štěpení jde o slučování jader izotopů vodíku [51].

Za normálních podmínek není jaderná fúze možná, protože mezi kladně nabitými jádry atomů působí odpuzivé elektrostatické síly. Pokud se však jádra atomů přiblíží na dostatečně malou vzdálenost pak přitažlivá jaderná síla, která váže protony a neutrony v jádrech atomů, převáží nad odpuzivou (elektrostatickou) silou a umožní jádrům fúzi. Pro dosažení fúze je tedy nutné překonat tuto elektrostatickou odpuzivou sílu tzv. columbovskou bariéru. K překonání odpuzivé síly musíme atomům dodat energii, při současném poznání se jeví jako nejvhodnější metoda dodat atomům tepelnou energii. Při zvýšení teploty se zrychlí pohyb iontů, které nakonec dosáhnou dostatečně vysokých rychlostí, aby se přiblížily k sobě a jádra atomů se pak mohli sloučit, což uvolní požadovanou energii. Na Slunci tvoří podmínky pro vznik fúzní reakce velká gravitační síla, na Zemi je však výrazně obtížnější takových podmínek dosáhnout. Je nutné zahřát fúzní palivo na velmi vysokou teplotu v řádu až stovek milionů stupňů °C pod silným tlakem. Při takto vysoké teplotě bude palivo ve formě plazmatu. Plazma musí být dostatečně husté a uzavřené po dostatečně dlouhou dobu, aby se jádra atomů mohla sloučit a uvolnit energii. Cílem je vytvořit fúzní reaktor, v němž proběhne dostatečné množství reakcí, tak aby se proces stal soběstačný a při přidání dalšího paliva proces pokračoval. Jaderná fúze by měla produkovat čtyřikrát více energie než štěpná reakce. [48] [51]

4.3.3 Lawsonovo kritérium

Lawsonovo kritérium určuje podmínky pro využití jaderné fúze jako zdroj energie. V publikaci *Budoucnost energetiky: jaderná fúze* je popsán význam Lawsonova kritéria následovně: „*Lawsonovo kritérium zjednodušeně říká, že fúzní palivo musí na dostatečně dlouhou dobu dosáhnout takové hustoty a teploty, aby četnost fúzních jaderných reakcí zajistila celkový energetický zisk.*“ [51] Cílem je, aby výstupní energie z reakce převyšovala vstupní energii potřebnou k udržení fúze [51].

Lawsonovo kritérium představuje podmínky, které musí splňovat fúzní palivo uvnitř reaktoru, aby se dosáhlo dané energetické rovnováhy. Z vědeckého hlediska se řeší tři

rovnováhy. Pokud se fúzní výkon rovná výkonu ohřevu plazmatu jedná se o tzv. vědecké vyrovnání. Pokud je stejný fúzní výkon absorbovaný v plazmatu jako ztrátový výkon plazmatu, hovoříme o zapálení. A konečně pokud dosáhneme rovnováhy mezi hrubým výkonem fúzní elektrárny a vlastní spotřebou elektrárny, říkáme, že jde o inženýrské vyrovnání. Lawsonovo kritérium představuje tedy rovnici, která určuje pro každou energetickou rovnováhu minimální hodnotu součinu hustoty (počtu jader) n (m^{-3}) a doby udržení energie τ_E (s) při teplotě T (K). [51]

$$n \cdot \tau_E = f(T) \quad (4.1)$$

Podmínku součinu na levé straně rovnice lze splnit dvěma způsoby. Buď můžeme fúzi provést inerciálním udržením, dosáhneme tedy velmi vysoké hustoty jader na velmi krátkou dobu, stlačením fúzního paliva pomocí výkonných laserů, nebo rentgenové záření. Druhým způsobem je magnetické udržení, zde se plazma spoutá pomocí silného magnetického pole, tento způsob využívá i nejpokročilejší typ fúzního reaktoru tokamak. [51]

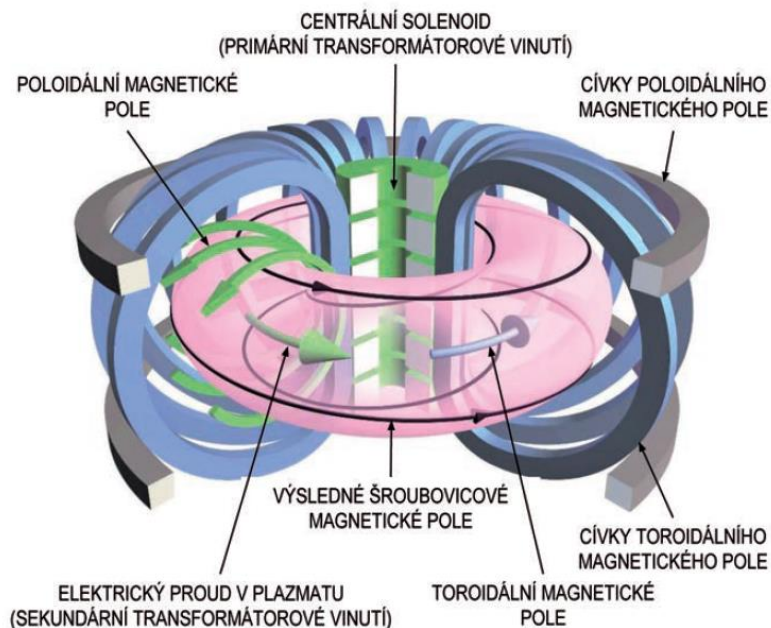
4.3.4 Druhy konceptů fúzních reaktorů

K dosažení jaderné fúze existuje několik přístupů, v současné době se však nejintenzivněji vyvíjejí dva druhy, a to Magnetické udržení fúze (MCF=Magnetic confinement fusion) a Inerciální udržení fúze (ICF=Inertial confinement fusion). Další vyvíjené metody jsou Magnetizovaná cílová fúze (MTF=Magnetized Target Fusion), hybridní fúze a další. [48]

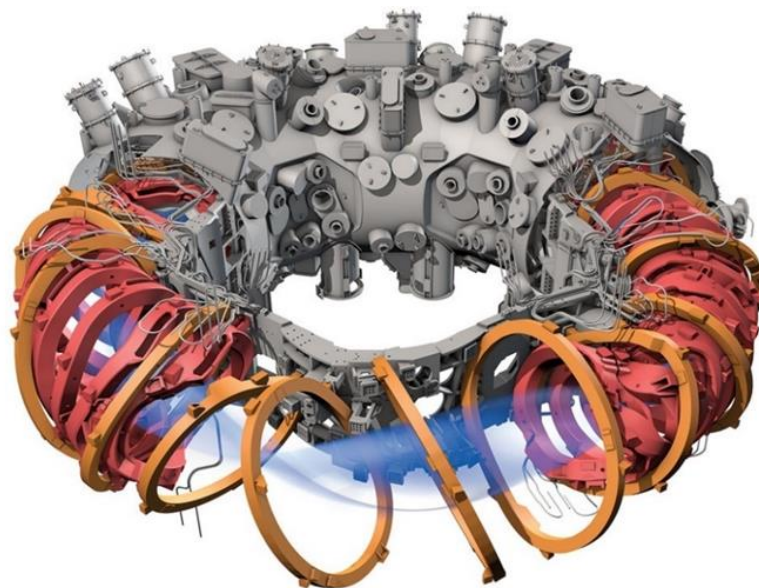
- Magnetické udržení fúze (MCF) používá k zahřátí a udržení horkého plazmatu silné elektromagnetické pole vybuzené velkými supravodivými cívkami. Magnetické pole brání rozptýlení plazmatu a kontaktu se stěnou reaktoru, která by takovou teplotu nevydržela a reaktor by se zničil. Nejúčinnější magnetické uspořádání je ve tvaru dutého toroidu, v němž je magnetické pole zakřiveno a tvoří uzavřenou smyčku. Toroidní pole musí být pro správné uzavření magnetického pole a udržení plazmatu překryto kolmou (poloidální) složkou pole. Vznikne tak magnetické pole se siločarami sledujícími spirálové dráhy (šroubovice) pro ovládání plazmatu. Vyvinulo se několik typů toroidních systémů, z nichž nejvýznamnější jsou tokamak, stellarátor a zařízení se zpětným ohybem pole (RFP). [48] [49]

V tokamaku je toroidní pole vytvářeno supravodivými cívkami ve tvaru torusu jsou rozmístěny okolo toroidní komory. Horizontální cívky vně toroidu pak stabilizují dráhu plazmatu a brání kontaktu se stěnou reaktoru. Centrální cívka ve tvaru solenoidu indukují ve vodivém plazmatu velký elektrický proud, který zahřívá

plazma a také přispívá k poloidálnímu magnetickému poli. Typ stelarátor má speciálně složitě tvarované supravodivé cívky pomocí počítačového modelování. Tento typ se vyznačuje lepší stabilitou a symetrií plazmatu oproti tokamaku. Speciální tvar cívek umožňuje mnohem lepší kontrolu a sledování plazmatu, díky tomu mají stelarátory velký potenciál pro dlouhodobý provoz, nicméně konstrukce a výstavba takového reaktoru by byla velmi časově a technologicky náročná. Fúzní reaktory fungující na principu MCF jsou z hlediska vývoje nejrozšířenější. [48] [49]

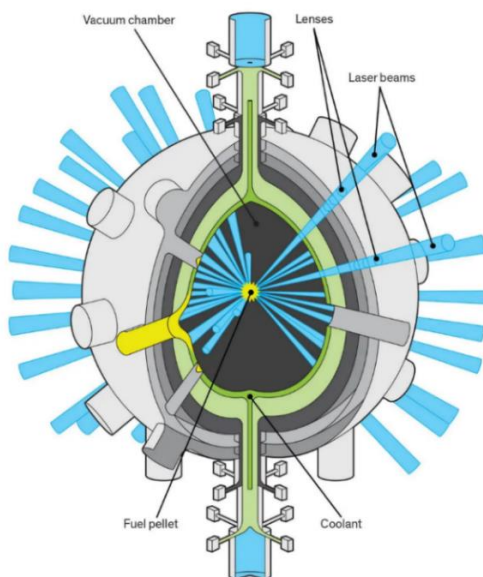


Obr. 18 Magnetický systém reaktoru tokamak [51]



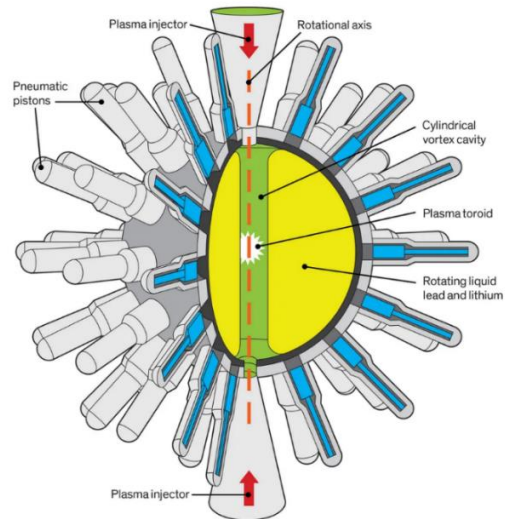
Obr. 19 Detail konstrukce fúzního reaktoru typu stelarátor [50]

- Inerciální udržení fúze (ICF) využívá malé pelety o průměru několika milimetrů z deuteria a tritia, která je zahřívána a stlačována na extrémně vysokou hustotu pomocí silných laserů nebo paprsků částic. Jádru je stlačeno až na tisícinásobek své kapalné hustoty a vznikají tak dostatečná teplota a tlak pro vznik jaderné fúze. Uvolněná energie zahřeje okolní palivo a může dojít k zážehu řetězové reakce šířící se palivem. Potřeba složitých a drahých laserových zařízení je velkou výzvou nasazení tohoto systému pro budoucí fúzní elektrárny. [48] [49]



Obr. 20 Princip fúzního reaktoru na bázi IFC [49]

- Magnetizovaná cílová fúze (MTF) někdy se také nazývá magnetoinerciální fúze, je hybridní systém, který využívá magnetické pole k udržení plazmy jako MCF a kompresní ohřev pomocí laserů nebo pneumatických pístů jako u ICF. [49]



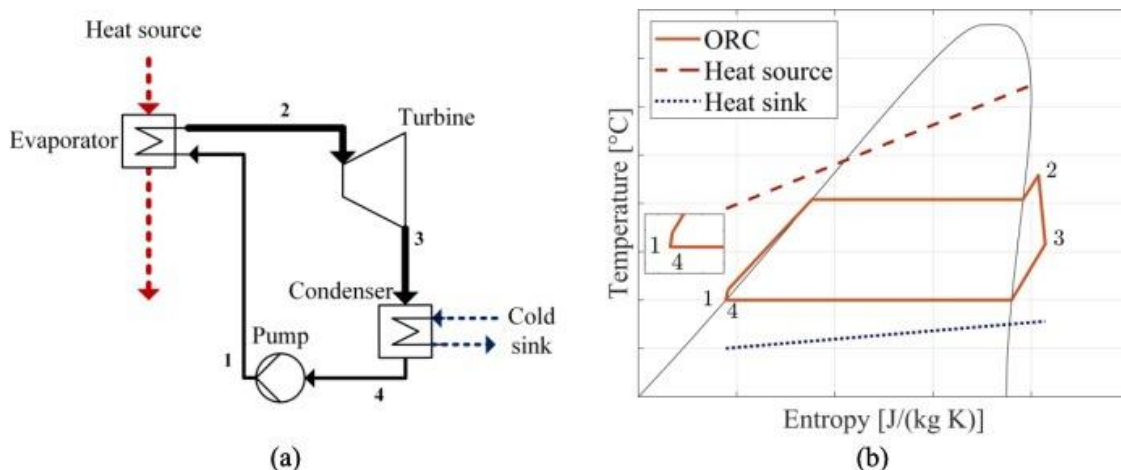
Obr. 21 Princip fúzního reaktoru MTF [49]

- Hybridní fúze je kombinací jaderné fúze a štěpné reakce, kde fúzní reakce by sloužila jako zdroj neutronů pro štěpení. Obal obklopující jádro by fungoval jako štěpný reaktor, fúzní reakce by produkovala neutrony, které by bombardovaly obal a vyvolávaly by tak další štěpné reakce. [48]

4.4 Organické Clausius Rankinovy cykly

4.4.1 Úvod

Technologie ORC zaznamenala od roku 2000 rozvoj a rozšíření na trhu. Systémy ORC se vyznačují vysokou flexibilitou, která spočívá především v optimalizaci a přizpůsobení konstrukce a pracovní tekutiny pro konkrétní účely, kompaktním designem a lze je použít pro nízko a středně teplotní zdroje tepla. ORC mohou hrát důležitou roli při přechodu na bezemisní obnovitelné zdroje elektrické energie a tepla. ORC mohou taktéž být významnou součástí decentralizované energetiky. ORC vycházejí principiálně z běžného Clausius Rankine cyklu s vodou, ale v ORC se jako pracovní médium využívá místo vody organická látka s nižší teplotou odpařování. Látka na organické bázi umožňuje využití zdroje tepla s nižší teplotou, který by nebyl využitelný v parovodních cyklech. Na obrázku 20 je principiální schéma ORC a odpovídající TS diagram. Princip je v podstatě obdobný jako CR cyklus s vodní párou: nejprve se kapalina přehřeje, odpaří a lehce přehřeje ve výměníku tepla (1-2), a poté v expanzním zařízení, obvykle turbíně expanduje (2-3) a předá tak kinetickou energii, která je rotujícím pohybem hřídele přenesena na elektrický generátor, ten přemění mechanickou energii na elektrickou. Dále je pracovní médium ochlazeno a zkondenzuje zpět na kapalinu (3-4). Zkondenzovaná kapalina je čerpadlem stlačena a vháněna zpět do výměníku tepla (4-1) a tím je celý cyklus uzavřen. V posledních letech je kladen velký důraz na systémy ORC využívající tepelné energie z geotermálních zdrojů a odpadního tepla například z průmyslových procesů (rekuperační ORC systémy). [52]

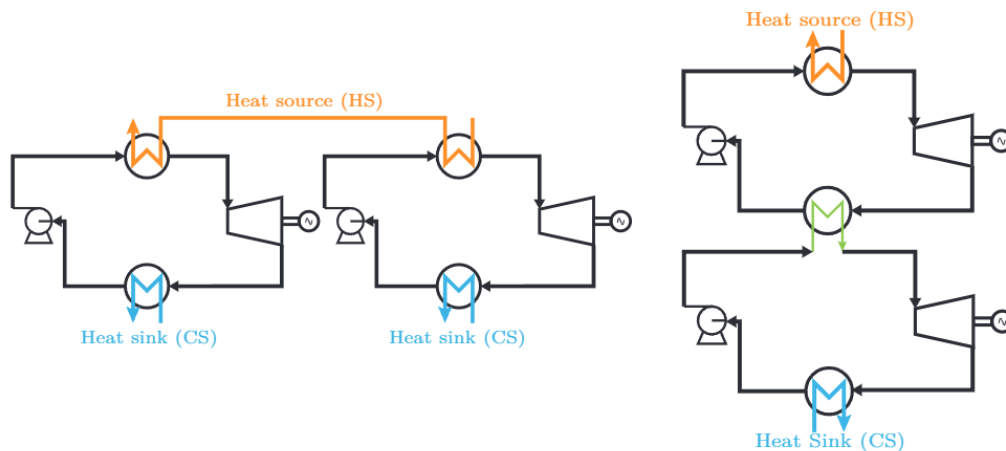


Obr. 22 Schéma organického CR cyklu (vlevo) a jeho TS diagram (vpravo) [52]

4.4.2 Koncepční typy ORC

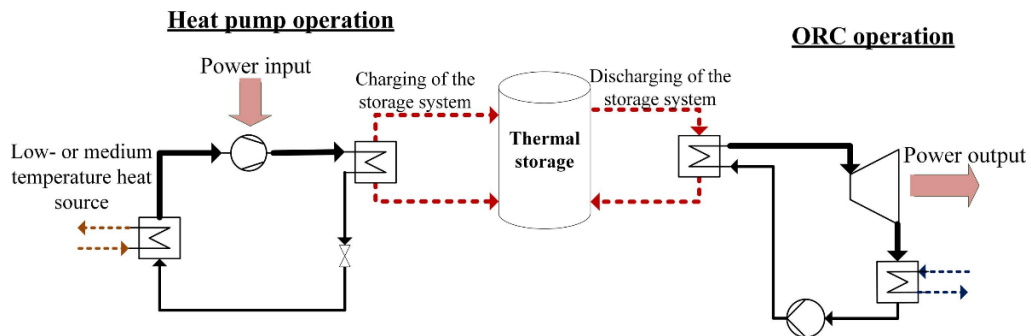
- Klasické ORC – popsáno viz. výše
- Transkritické a superkritické ORC – pracovní látka v plynném stavu dosahuje transkritických anebo superkritických parametrů (tlaku a teploty). Výhoda je dosažení vyšší účinnosti díky lepším parametrům (tlaku a teplotě) pracovního média. Nevýhodou může být ekonomická stránka, potřeba dražších zařízení odolávající vyšším tlakům a tepelného zdroje o vyšší teplotě. Pro tento systém bylo testováno nejrůznějších pracovních látek jako helium, CO₂ a různá chladicí média (hydrofluoroolefiny) R1234yf, R1234ze(E) and R1233zd(E). [52]
- Rekuperační ORC – využívá výměník tepla (rekuperátor), zbylá tepelná energie po expanzi plynného média se využívá k předehřevu pracovní kapaliny (média) před vstupem do výparníku, čímž se opět zvýší účinnost cyklu. Jedná se v podstatě o analogii regenerativního ohřevu u CR cyklu, nicméně předehřev probíhá plynným médiem až po expanzi. Při přehřátí na vyšší teplotu je rekuperace tepla mnohem lepší a tím i vyšší účinnost. Rekuperace je výhodnější pro suchá pracovní média. Aplikace rekuperačního ORC nemusí být vhodná tam, kde je zdroj odpadní teplo, protože teplota nemusí být dostatečná pro předehřátí, a tak klesá výkon i účinnost. [52]
- Regenerativní ORC – využívá stejného principu jako rekuperační ORC, s tím rozdílem že pracovní médium v plynném stavu je pro předehřev kapaliny odebráno na mezistupni expanze (např. pokud je turbína rozdělena na více částí podle tlaku). Tento systém je principiálně shodný s regenerativním ohřevem u klasického CR cyklu. Případně odebrané plynné médium může být smíšeno s kapalinou a dodávat jí tepelnou energii přímo. Bylo prokázáno, že stejně jako u rekuperačního ohřevu pracuje lépe při použití suchého pracovního média. [52]
- Vícestupňové ORC – jedná se o systém s vícestupňovým odpařováním pracovního média, přičemž každému stupni odpovídá jiný tlak a teplota. V principu jde vlastně o více CR cyklů, které jsou navzájem svázány tepelnou výměnou. Výhoda tohoto uspořádání je lepší využití tepla. Na druhé straně je jejich hlavní nevýhodou složité uspořádání a zvýšené náklady, protože se skládají ze dvou cyklů namísto jednoho a tím je nutný větší počet součástí (výměníky tepla, čerpadla atd.). Pokud budeme uvažovat dvoustupňový ORC lze oba cykly svázat sériově, tak že rozdělíme tepelný zdroj na dva stupně a každý stupeň použijeme pro jiný cyklus, anebo spojíme oba

cykly do kaskády a využijeme zbytkové teplo po expanzi z prvního cyklu ve druhém cyklu. Obě řešení ukazují Obr. 23. [52] [53]



Obr. 23 Možná řešení dvoustupňového ORC [53]

- Superkritický ORC s CO₂ – z termodynamického hlediska jde o cyklus podobný Braytonovu cyklu s plynovou turbínou, nicméně v tomto případě je použito jiné pracovní médium (CO₂) a jedná se o uzavřený cyklus s vnějším ohřevem bez spalovací turbíny. Nejvyšší účinnosti dosahuje při teplotě a tlaku mírně nad kritickým bodem (73,8 bar a 31,1 °C). Výhodou pracovního média CO₂ oproti vodě je silnější termosifonový efekt (přirozené proudění kvůli rozdílu hustot mezi teplejší a chladnější částí média). Ačkoli CO₂ není organická sloučenina, použití jako pracovní tekutiny se v poslední době zkoumá. CO₂ je oproti některým pracovním látkám a chladivům snadno dostupný, nehořlavý a netoxický. S rozvojem systémů pro zachytávání a ukládání CO₂ se jeho použití stále více diskutuje. [52]
- Reverzibilní tepelné čerpadlo ORC (RHPORC) – kombinace tepelného čerpadla a ORC. V režimu nabíjení systém pracuje jako tepelné čerpadlo přebytečná elektrická energie např. z obnovitelných zdrojů je přeměněna na tepelnou energii, která se akumuluje. Při vybíjení systém pracuje jako ORC a akumulované teplo se využije k výrobě elektrické energie. [52]



Obr. 24 Principiální schéma RHPORC [52]

- ORC s částečným odpařováním – do expanzního zařízení vstupuje směs plynu a kapaliny pracovního média (pracovní médium ve dvoufázovém stavu), tedy médium se odpaří jen částečně, a proto je tento systém vhodný pro nízkoteplotní zdroje tepla. TS diagram je částí klasického ORC. Směs kapaliny a plynu samozřejmě přináší problém pro expanzní zařízení hlavně turbíny, vlivem rychle narážejících kapiček pracovního média vzniká eroze na povrchu lopatek což způsobuje rychlé opotřebení a snižuje životnost turbíny. [52]
- Bleskové ORC – dochází k částečnému odpaření pracovního média (slaného roztoku) při rychlém snížení tlaku, směs kapaliny a plynu je přiváděna do expanzního zařízení. Tento systém se používá hlavně v geotermálních elektrárnách využívající přímou páru. Bleskové ORC dosahuje menší účinnosti než klasické ORC. [52]
- Trilaterální ORC – podobné jako bleskové ORC, ale pracovní médium není snížen tlak a je rovnou po přehřátí přímo přiváděno do expanzního zařízení. Trilaterální ORC stejně jako bleskové ORC disponuje nižší účinností než standardní ORC. TS diagram má tvar pomyslného trojúhelníku. [52]

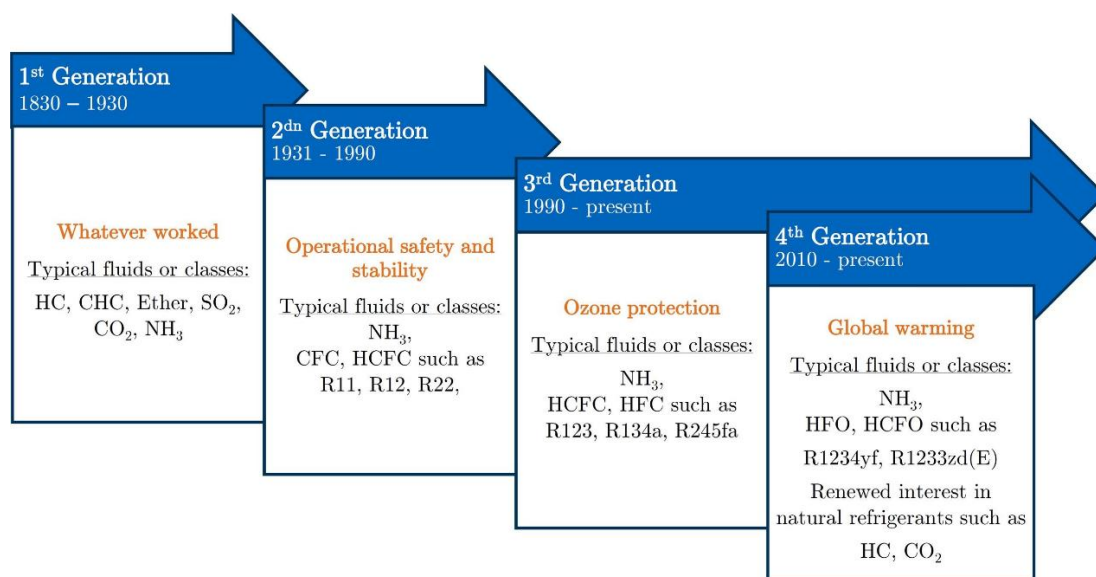
4.4.3 Pracovní kapaliny a zdroje tepla

Jako tepelný zdroj pro ORC může sloužit odpadní teplo například z různých průmyslových procesů, geotermální energie, sluneční termální energie, odpadní teplo ze spaloven odpadů, spaliny, spalování biomasy, tepelná energie mořské vody atp. [52]

Výběr pracovního média představuje důležitý aspekt při návrhu a optimalizaci ORC zařízení. Pro každou látku jsou specifické pracovní parametry jako je tlak a teplota. Na tyto parametry musejí být dimenzovány všechny součásti a klíčové komponenty celého zařízení jako jsou tepelné výměníky, čerpadla, expanzní zařízení atd. Výběr vhodné pracovní látky je velice důležitý pro správnou optimalizaci účinnosti cyklu a je závislý hlavně na zdroji

tepla pro ORC. Pokud je k dispozici vysokoteplotní zdroj tepla (biomasa, spaliny, vysokoteplotní geotermální energie, koncentrovaná solární tepelná energie) je z hlediska vyšší účinnosti vhodnější použít pracovní tekutiny s vyšší kritickou teplotou jako jsou alkany a siloxany. Pro nízkoteplotní zdroje je vhodnější využít naopak tekutiny s nižší kritickou teplotou jako jsou fluorované uhlovodíky (HFC) a hydrofluoroolefiny (HFO). Volba pracovního média nezávisí jen z hlediska teoretické termodynamiky, ale je nutné brát v úvahu další hlediska jako je bezpečnost (hořlavost a toxicita) a vliv na životní prostředí, především negativní dopad na ozonovou vrstvu a produkci skleníkových plynů. V neposlední řadě je to dostupnost, cena, technická kompatibilita a omezení pracovního média s čerpadly a expanzními zařízeními. Ačkoliv existuje velké množství nejrůznějších organických sloučenin, všechny tyto parametry značně omezují výběr pro konkrétní aplikaci. [52]

V systémech s ORC se jako pracovní tekutiny používají také tekutiny používané v chladících systémech. Obr. 25 ukazuje přehled vývoje pracovních tekutin od roku 1830. U první generace se hlavně řešila funkčnost, druhá generace se zaměřila na stabilitu a také vzrostl význam bezpečnosti. V posledních letech se používá hlavně 3. a 4. generace provozních médií. Obavy o vliv těchto látek na životní prostředí vedly k postupnému vyřazování pracovních kapalin poškozujících ozonovou vrstvu, čímž vznikla třetí generace pracovních kapalin. Ve stávajících systémech s ORC se nejčastěji používají chladiva 3. generace jako R134a a R245fa. V důsledku regulačních opatření jsou postupně vyřazovány v EU a dalších zemích fluorované uhlovodíky (HFC) a jsou nahrazovány novými alternativami jako jsou hydrofluoroolefiny (HFO). Nejmodernější 4. generace tekutin nepoškozuje ozonovou vrstvu a minimalizuje skleníkový efekt, čímž nepřispívá ke globálnímu oteplování. V poslední době je kladen důraz na použití a výzkum přírodních chladiv v ORC jako jsou uhlovodíky a také CO₂, i když se nejedná o organickou sloučeninu. Největší problém přírodních chladiv je jejich hořlavost, proto se zkoumají ve směsi s nehořlavými kapalinami. Trendem ve vývoji pracovních médií je CO₂, protože zapadá do politiky se systémy CCS/CCUS, dále je podstatně bezpečnější (nehořlavá a netoxická látka), je snadno dostupná a levná. [52]



Obr. 25 Přehled generací organických látek a chladiv využitelných v ORC [52]

4.4.4 Budoucí využití

Do budoucnosti se jeví jako nejlepší varianta využití ORC v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie jako je tepelná sluneční elektrárna, geotermální energie nebo využití odpadního tepla při spalování odpadů a průmyslových procesech, případně lze využít i tepelnou energii ukrytou v mořích a oceánech. Výhodou ORC oproti tradičnímu RC s vodní párou spočívá v možnosti použití nízkoteplotního zdroje, protože je použita organická pracovní látka s nižší teplotou vypařování a tím je systém s ORC mnohem flexibilnější a má širší škálu využití v různých aplikacích. Umožňuje využít odpadní teplo z různých průmyslových procesů k výrobě elektřiny, které by se jinak ztratilo. Integrace ORC společně s obnovitelnými zdroji energie může také v budoucnu pomoci snížit emise skleníkových plynů při výrobě elektrické energie. Budoucí hybridní systémy využívající synergii více zdrojů např. geotermální a sluneční energii, nebo spalování biomasy a sluneční energie jsou taktéž vhodné pro aplikaci ORC. Systémy ORC jsou také použitelné pro kombinovanou výrobu tepla, elektřiny a/nebo chladu (kogenerace a trigenerace). Společně s rozvojem akumulčních systémů pro skladování tepla se bude využití ORC navyšovat. [52]

4.5 Decentralizované, distribuované zdroje energie a chytré sítě

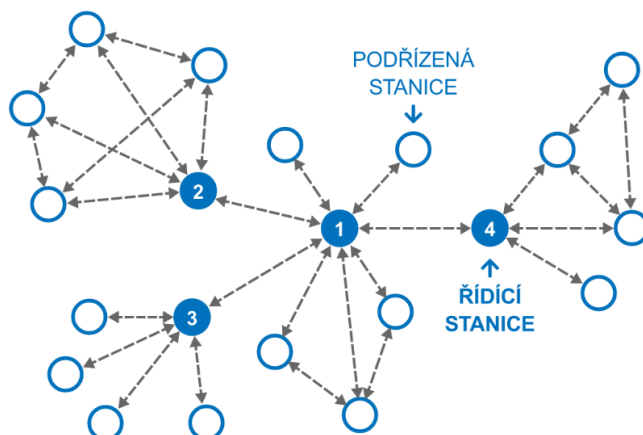
4.5.1 Decentralizované a distribuované zdroje energie

Novým trendem v oblasti energetiky jsou decentralizované zdroje energie. Se vzrůstajícím podílem malých obnovitelných zdrojů, zejména fotovoltaických panelů na střechách domů, nebo malých větrných elektráren roste v síti počet menších zdrojů elektrické energie. Tyto malé lokální zdroje využívají pro výrobu elektřiny místní zdroje energie, které jsou v dané oblasti dostupné. V minulých letech byla doposud energetika chápána jako centralizovaná síť. Velké centrální zdroje jako tepelné a jaderné elektrárny dodávaly výkon do sítě a jednotliví spotřebitelé ho odebírali dle své potřeby. Nevýhodou klasických centralizovaných zdrojů energie jsou značné ztráty kvůli dálkovému přenosu, nedostatečná flexibilita výroby kvůli malému podílu rychle regulovatelných elektráren, absence vhodných regulačních systémů spotřeby a cen energie např. v závislosti na denní době [55]. Tok výkonu byl tak zajištěn pouze jedním směrem tedy od centrálního zdroje ke spotřebiteli, který vykazoval charakter pouze pasivního odběratele energie. [54]

Největší výhodou decentralizovaných zdrojů energie je lepší zajištění dodávky energie i při poruše či výpadku některého většího zdroje, proto je v síti mnoho menších lokálních zdrojů, které mohou lépe zabezpečit dostupnost energie a přispívají k větší spolehlivosti výroby elektřiny. Je mnohem jednodušší nahradit výpadek jednoho z mnoha menších lokálních zdrojů energie než výpadek velké systémové elektrárny, která dodává do sítě značný podíl celkového aktuálního výkonu. Nicméně s velkým počtem malých zdrojů se pojí velké nároky na distribuční sítě, které budou muset být mnohem lépe řízeny, aby nedošlo k přetížení, nestabilitě sítě a aby byl zajištěn balanc mezi výrobou a spotřebou energie. Distribuční síť bude proto muset být vhodně dimenzována zejména z hlediska kapacity a bude nutné zajistit chytré řízení a automatizaci (smart grid). Tok výkonů bude možný všemi směry a distribuční síť se pomyslně rozdělí na menší podsítě tzv. micro grids, které budou navzájem propojeny do jednoho celku. Velmi pravděpodobně se tedy změní topologie sítí, namísto paprskových sítí budou vznikat okružní a mřížové sítě, které lépe propojí menší lokální zdroje energie a zabezpečí lepší rozložení výkonů. Decentralizace naopak značně ulehčí přenosovou soustavu, už nebudou muset být přenášeny, tak velké výkony na tak velké vzdálenosti jako je tomu dnes, nicméně stále nebude možné se jednoduše zbavit velkých centrálních zdrojů energie, které tvoří základ výroby energie. [54]

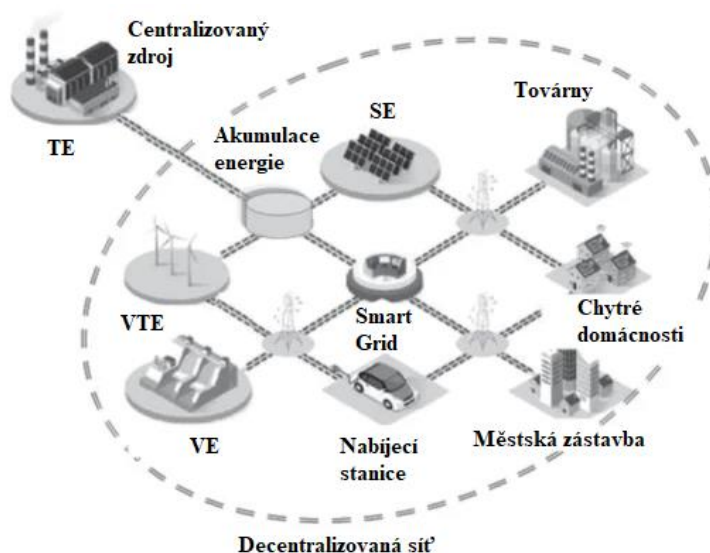
Velký význam v decentralizované energetice budou mít obnovitelné zdroje energie s bateriovými uložišti elektrické energie. Nepochybnou součástí budou i kogenerační

jednotky a v budoucnu by se mohli prosadit i malé modulární reaktory. Do konceptu decentralizované elektrické výroby zapadají i systémy s ORC. [54]



Obr. 26 Topologické schéma energetické sítě s decentralizovanými zdroji [54]

Napájení decentralizovaných systémů je zajištěno pomocí různých energetických zdrojů (různých typů elektráren). Nejlepší je využít mix nejrůznějších druhů jako jsou tepelné, paroplynové, solární, větrné, vodní, geotermální atd. Většina decentralizovaných sítí jsou myšleny jako lokální sítě propojené do centralizované energetické soustavy, pro export a import energie v případě potřeby. Decentralizované sítě zahrnují různorodé zdroje energie, zařízení pro akumulaci energie (teplo, elektřina), inteligentní řízení a hybridní napájecí a spotřební systémy (v závislosti na poptávce a denní době buď vyrábí energii anebo spotřebovává). [55]



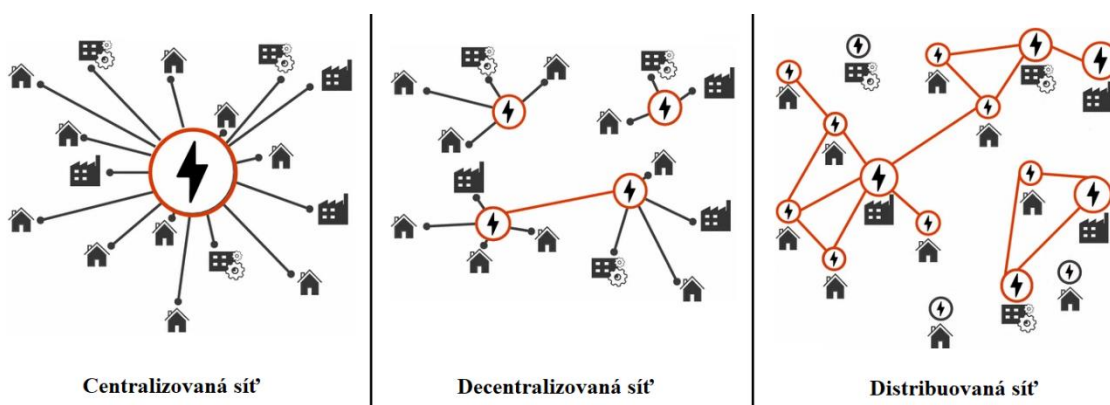
Obr. 27 Mapa decentralizované sítě [55]

Hlavní předností decentralizovaných systémů je možnost regulovat nejen výrobu elektrické energie, ale také řídit její spotřebu, a to pomocí digitalizace a informačních

technologí, které umožňují lépe rozdělit veškerou vyrobenou energii mezi spotřebitele, akumulovat nadbytečnou energii a dle potřeby dodávat, nebo odebírat energii z centralizovaného zdroje. [55]

V některých případech se pojmy decentralizované a distribuované systémy zaměňují, nicméně pro přehlednost jsou dle [56] struktury energetické sítě a systémy definovány následovně:

- Centralizované energetické systémy představují velké výrobní zdroje (elektrárny), které dodávají energii prostřednictvím rozsáhlé přenosové a distribuční sítě do často vzdálených míst spotřeby. [56]
- Decentralizované energetické systémy jsou systémy charakterizované malými zdroji (elektrárnami), které dodávají energii místním spotřebitelům. Tyto zdroje mohou být buď samostatné nebo mohou být propojeny s dalšími blízkými zdroji energie prostřednictvím sítě, pro sdílení přebytečné energie. Ve druhém případě to jsou lokálně decentralizované energetické sítě, které mohou být dále propojeny do jednoho celku s blízkými podobnými sítěmi. [56]
- Distribuovaný energetický systém představuje malé zdroje energie v místě spotřeby, nebo v jeho blízkosti, tedy spotřebitelé jsou zároveň i částečnými nebo úplnými výrobci energie. Může se jednat o jednotlivce, malé či velké podniky a/nebo místní komunity. Tyto zdroje energie mohou být samostatné nebo mohou být prostřednictvím sítě opět propojeny s dalšími blízkými zdroji za účelem sdílení přebytků energie. Ve druhém případě se jedná o lokálně distribuované energetické sítě, které mohou být dále propojeny s blízkými sítěmi do jednoho celku. [56]



Obr. 28 Typy sítí podle struktury systému, převzato z [56]

Z hlediska vývoje energetických systémů lze konstatovat, že se centralizované sítě postupně mění v decentralizované a ty se zase postupně transformují v distribuované

energetické sítě. Nicméně tento vývoj není vždy jednoznačný a z celkového pohledu se jedná spíše o jakousi směs výše zmíněných sítí.

4.5.2 Chytré sítě

Jak již bylo zmíněno pro decentralizovanou a distribuovanou energetiku je velice důležité zajištění správného a účinného řízení, a to zajišťuje právě tzv. chytrá síť. Chytré sítě neboli smart grids jsou flexibilnější, díky lepšímu řízení a automatizaci umožňují lepší optimalizaci a stabilitu energetických systémů, lepší integraci obnovitelných zdrojů a inteligentních řídicích center při výrobě a distribuci elektrické energie. [55]

V tradičních sítích chybí systémy pro monitoring, kontrolu a řízení v reálném čase. Chytré sítě nabízejí efektivnější způsob přenosu a výroby elektrické energie. Dále zlepšují provozní vlastnosti jako je spolehlivost, bezpečnost, stabilita, maximalizují účinnost přenosu a poskytují větší ovladatelnost, regulovatelnost a kontrolu nad výrobou, přenosem a spotřebou elektrické energie v celé soustavě. Zaměřují se nejen na zlepšení provozních vlastností sítí, ale také na efektivnější a ekonomičtější spotřebu energie jednotlivých odběratelů. Koncept chytré sítě zahrnuje instalaci chytrých měřicích zařízení pro monitoring a automatických řídicích a regulačních systémů. [57]

Chytré sítě oproti tradičním sítím disponují větším počtem senzorů, měřicích zařízení, automatickou kontrolou a řízením, větší digitalizací, automatizací, lepší kontrolou, a hlavně obousměrnou komunikací zdroje se spotřebou v reálném čase. S chytrou sítí jsou často spojovány právě decentralizované a distribuované sítě. [57]

Pro větší spolehlivost mají chytré sítě schopnost monitorovat a ukládat veškerá data a odhadovat spolehlivost svých služeb, to je umožněno díky digitalizaci. Digitalizace dále značně zjednoduší řízení a regulaci celé sítě pomocí informačních technologií. Nicméně s tím se pojí největší nevýhoda, což je kybernetická bezpečnost inteligentních sítí. S nárůstem automatizace, vzdáleným monitorováním a řízením sítě se síť stává zranitelnější vůči kybernetickým útokům. Pro implementaci chytrých sítí bude tedy nutné všechny data šifrovat a zaměřit se na zabezpečení komunikace a ukládání dat. [57]

Inteligentní síť poskytuje spotřebiteli možnost využívat elektrickou energii hospodárným způsobem. Pomůže nejen zvýšit účinnost na straně poptávky, ale také na straně distribuce. Při špičkovém zatížení pomáhá snížit přenášený výkon a napětí např. přesměrováním na jiný alternativní zdroj energie. Vznikají nové systémy plánování spotřeby, které umožňují každému spotřebiteli naplánovat své požadavky na dodávku elektrické energie. Tímto způsobem se značně zlepšuje řízení distribuční sítě a lépe se odhadují energetické špičky v

diagramu zatížení. Komunikace chytrých sítí s chytrými domy a inteligentními spotřebiči umožňují spotřebiteli lépe optimalizovat dodávku elektrické energie, a tak ušetřit. [57]

Automatizace distribuční soustavy je spojena s instalací inteligentních automatických měřících přístrojů s obousměrnou komunikací mezi spotřebiteli a distributory. Pomáhají nejen distributorovi přesněji určit cenu za množství spotřebované energie, také pomáhají kontrolovat spotřebu elektrické energie. Tyto elektroměry jsou vybaveny senzory pro automatizaci, sledování kvality energie a oznámení o výpadku dodávky elektrické energie. Inteligentní sítě jsou schopné samostatně odstranit poruchu, monitorováním nejrůznějších elektrických charakteristik. Zaregistrují každou odchylku a vytyčí potenciální problém v síti, izolují problémový úsek dříve, než se rozroste ve velkou poruchu, která způsobí rozsáhlý výpadek a případně přesměrují přenos energie do jiných úseků. Hlavní výhody inteligentní sítě se schopností samoopravy jsou především monitorování a reakce v reálném čase, předvídání problému a jeho rychlá izolace. To bude umožněno díky shromažďování a ukládání velkého množství dat ze senzorů a monitorovacích zařízení o provozu sítě. Data z nejrůznějších senzorů budou využita v algoritmech k předpovědi zatížení v závislosti na denní době a sestavení vzorce chování celé soustavy a přispějí tak k inteligentnímu řízení výroby a distribuci elektrické energie. [57]



Obr. 28 Schéma chytré sítě [58]

Chytrá síť je moderní síť, která obsahuje velké množství senzorů, akčních členů, měřících zařízení, komunikačních a řídicích prvků, je digitalizovaná a automatizována, má schopnost lokalizace a izolace poruch, přenos energie a informací probíhá oběma směry

mezi spotřebitelem a zdrojem. Díky digitalizaci může být řízena pomocí informačních technologií, shromažďuje a ukládá velké množství dat pro analýzu a optimalizaci řízení. Všechny tyto systémy zajišťují maximální spolehlivost, efektivitu a kontrolu nad celou energetickou sítí, včetně výroby, akumulace, distribuce a spotřeby elektrické energie v reálném čase. K rozvoji chytrých sítí by také v budoucnu mohla přispět umělá inteligence.

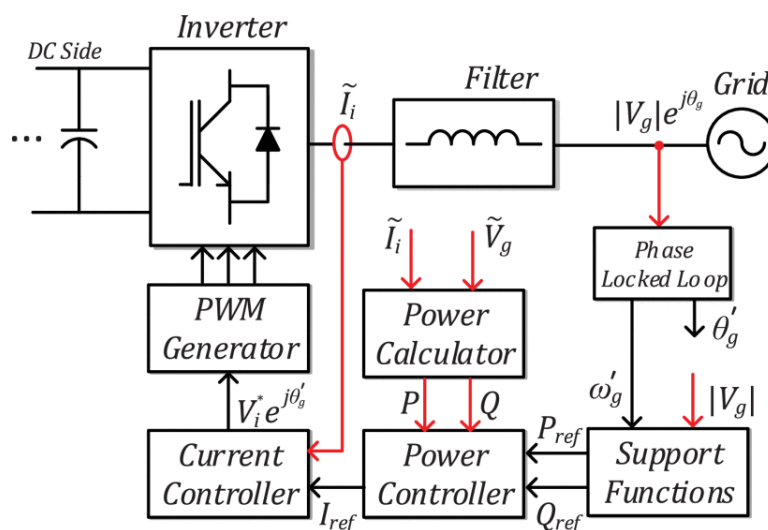
4.6 Grid forming

Tradiční zdroje energie jako jsou tepelné jaderné a vodní elektrárny využívají k výrobě elektrické energie synchronní alternátor. Ten disponuje mechanickou setrvačností rotoru, která má z hlediska výroby elektřiny o požadované frekvenci velmi důležitou roli. Mechanická setrvačnost při otáčejícím se rotoru má totiž schopnost vyhlazovat odchylky frekvence v síti. Systém disponuje tedy elektrickou setrvačností, která je důležitá pro dynamickou stabilitu sítě. Při fázového posuvu napětí v síti reaguje okamžitou výkonovou odezvou pomocí kompenzace zpoždění fázoru napětí generátoru. Klasické elektrárny se synchronním strojem mohou tedy díky setrvačnosti kompenzovat krátkodobé výrobní deficity, než dojde k aktivaci systémů výkonové rovnováhy. Obnovitelné zdroje energie obvykle neobsahují synchronní generátor, např. fotovoltaické solární elektrárny, anebo je nutné stejně generátor připojit do sítě přes vhodný měnič, který upraví parametry sítě typu frekvence a napětí pro stabilní síť. Konvenční výkonové měniče neoplývají elektrickou setrvačností, ale výkonová elektronická zařízení s vhodnými řídicími algoritmy (grid forming) mohou rovněž poskytovat elektrickou setrvačnost a stabilizovat tak síť. S rozvojem obnovitelných zdrojů v posledních letech roste jejich zastoupení v energetické síti a tím současně vzniká v síti problém nestability. Tento problém je nutné kompenzovat pomocí grid forming střídačů. [59] [60]

Termín grid forming neboli formování sítě, přesněji řečeno formování síťového napětí označuje zdroj energie, nejčastěji se jedná právě o obnovitelný zdroj energie v kombinaci se střídačem, který umožňuje přímo řídit svorkové napětí a vytvářet napětí sítě právě pomocí střídačů. Klasické střídače dodávají výkon v nezávislosti na odchylkách napětí nebo frekvence sítě. Pomocí chytrých algoritmů řízení představují grid forming střídače proměnný zdroj napětí, které poskytují okamžitou výkonovou rezervu, stabilizují síť, reagují v krátkém čase na odchylky v síti (např. přetížení) a snaží se, aby se obnovitelný zdroj elektrické energie jevil podobně jako klasická elektrárna se synchronním strojem. Pro velké několika megawattové solární elektrárny budou v budoucnu takové zařízení nezbytná pro správnou funkci a stabilitu sítě. Již v dnešní době, při jasných letních dnech a při velké

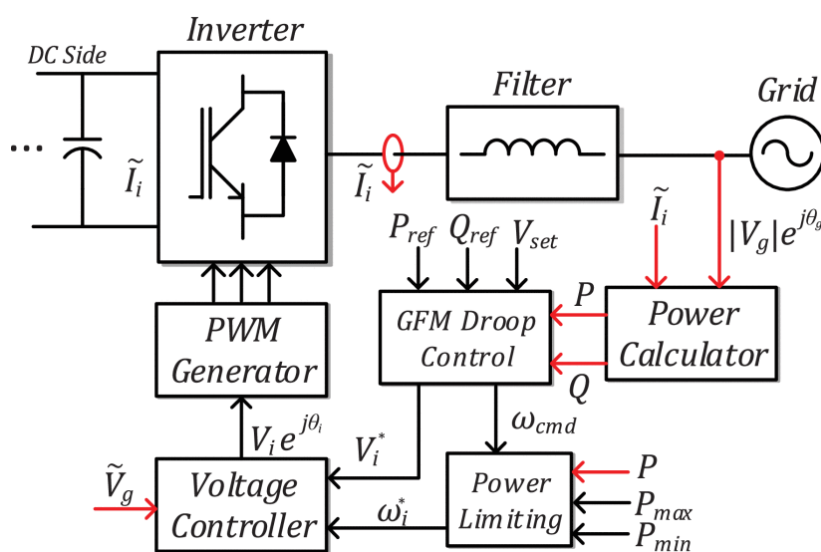
instalované kapacity fotovoltaických panelů hrozí přetížení energetických sítí. Tento problém právě mohou vyřešit grid forming střídače. [59] [60]

Existují dvě základní technologie pro řízení měničů: grid-following (GFL) and grid-forming (GFM). Měnič GFL neboli měnič sledující síť řídí činný a jalový výkon pomocí fázoru proudu. Ke sledování fázového úhlu sítě v reálném čase slouží smyčka fázového zámku (PLL). Střídač GFL nemůže přímo regulovat napětí a frekvenci sítě. Referenční napětí a frekvenci zajišťuje externě buď střídač GFM, nebo napájecí podpůrný systém. Společně s reaktancí sítě nebo filtrovací indukčností se chová jako zdroj proudu. [61]



Obr. 29 Blokové schéma GFL [61]

Střídač GFM je řízený zdroj napětí, chová se podobně jako synchronní generátory vázané na síť. Umožňuje přímé řízení napětí a frekvence. Střídače GFM reagují na změny a odchylky v síti mnohem rychleji než GFL. [61]



Obr. 30 Blokové schéma GFM [61]

5 Varianty budoucího vývoje

5.1 Jaderná energie

Jednou z možných variant je enormní rozvoj jaderné energetiky. Současný trend souvisí s rozmachem obnovitelných zdrojů, resp. větrné a fotovoltaické elektrárny, při současném vyřazování elektráren využívající fosilní paliva především uhlí. Energetická krize a konflikt na Ukrajině způsobil nárůst ceny fosilních paliv. Pro budoucnost bude tedy nutné pokrýt základní zatížení denního diagramu zdroji elektrické energie, které jsou stabilní a zároveň neprodukují emise a nepodléhají cenovým výkyvům. Kvůli těmto předpokladům a již zmíněným nedostatkům obnovitelných zdrojů se nabízí nahrazení postupně vyřazovaných tepelných elektráren jadernými zdroji. Většina evropských zemí jadernou energii podporuje, především země východní Evropy, Francie a Británie.

Pro stanovení potřebných nákladů uvedeme příklad na ČR. Do roku 2040 by instalovaný výkon netto tepelných elektráren spalující fosilní paliva mohl poklesnout ze stávajících cca 8,7 GWe (dle [72]) na cca třetinu 2,9 GWe. Tento pokles činí výkonový deficit 5,8 GWe. Pro tento případ jsem zvolil reaktor společnosti Westinghouse AP1000 o hrubém výkonu cca 1,2 GWe a výkonu netto 1,14 GWe. Pokud uvážíme použití tohoto typu reaktoru při stavbě bloku Dukovany 5 a 6, Temelínu 3 a 4, potom dostaneme instalovaný výkon cca 4,56 GWe. Při úplné náhradě a předpokládanému poklesu instalovaného výkonu fosilních elektráren na třetinu stále bude chybět cca 1,24 GWe. Tento výkonový deficit bychom mohli nahradit výstavbou dalšího bloku nové jaderné elektrárny a pro rezervu by byl postaven ještě jeden blok, dohromady se jedná o 6 bloků, každý o výkonu přibližně 1,2 GWe. Celkem to tedy činí 7,2 GWe brutto výkonu.

Výstavba jednoho bloku by měla stát cca 100 miliard korun, proto celkové náklady na šest bloků by činily cca 600 miliard korun. Před uvažováním o realizaci takové investice je nutné nejprve zjistit, kdy a zda vůbec se každý blok zaplatí a případně jestli se začne za svoji životnost, která by měla být něco přes 60 let, z ekonomického hlediska vyplácet. Při výpočtu návratnosti investice zde uvažuji směnný kurz 25 CZK/EUR, provozní náklady jednoho bloku by byly stanoveny na 26 EUR/MWh. Celková vyrobená elektrická energie při instalovaném výkonu netto 1,14 GWe a průměrným vytížení reaktoru za 1 rok na 90 % by byla cca 8,988 TWh. Roční provozní náklady by byly poté přibližně 5,842 miliard korun, přičemž roční tržby z produkce vyrobené elektřiny o stanovené ceně 80 EUR/MWh by tvořily 17,976 miliard korun. Celkový roční výnos by byl potom 12,134 miliard korun. Pro

výpočet návratnosti investice byla použita metoda NPV (čistá současná hodnota), viz. vzorec (5.1). Při takto stanovených předpokladech by se jeden blok zaplatil zhruba za 12 let. Čistá současná hodnota (NPV) jednoho bloku za 60 let je 97,2 miliard korun, tedy 6 bloků má při součtu 583,2 miliard korun.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad (5.1),$$

kde CF_t je peněžní tok v daném roce t , i je diskontní úroková míra (6 %), t je pořadový rok v rámci životnosti projektu, n je životnost projektu/sledované období (počet let).

Poznámka: výpočet je dle zdroje [76], vzorec pro výpočet NPV je v [77], hodnota provozních nákladů je uvedena na [78], diskontní úroková sazba je uvedena na [79] a cena jaderného bloku je odhadnuta na základě [80].

5.2 Decentralizované zdroje

Druhou variantou pro náhradu elektráren spalující fosilní paliva by mohla být vhodná kombinace různých decentralizovaných zdrojů energie. Základ by tvořily modulární reaktory, v kombinaci s obnovitelnými zdroji energie, v našich podmínkách by bylo nejvhodnější pravděpodobně zvolit fotovoltaiku s bateriovým uložištěm. Tuto kombinace by pravděpodobně mohly doplňovat kogenerační jednotky spalující fosilní palivo, popř. biopaliva, kde by mohlo být použito např. i ORC.

Vezmeme-li opět příklad v ČR jako byl uveden u předchozí varianty, máme po uzavření třetiny tepelných elektráren na fosilní paliva výkonový deficit 5,8 GWe.

Pro pokrytí výkonového deficitu bychom mohli rozdělit podíl instalovaného výkonu jednotlivých zdrojů následovně: 55 % (3,2 GW) bychom mohli pokrýt modulárními reaktory, 30 % (1,7 GW) fotovoltaickými elektrárnami a zbylých 15 % (0,9 GW) by připadalo na kogenerační jednotky. Pro porovnání opět stanovím přibližnou návratnost jednotlivých investic.

Nejvýznamnější podíl instalovaného výkonu by tvořily modulární reaktory. Pro tento případ jsem zvolil modulární reaktor společnosti Rolls-Royce o výkonu 470 MWe, který je jeden z uvažovaných reaktorů společností ČEZ, pro budoucí výstavbu v areálu JE Temelín. Pro pokrytí výkonového deficitu 3,2 GW bychom mohli využít 7 modulů. Provozní náklady jednoho modulu je těžké odhadnout, nicméně lze očekávat, že budou výrazně nižší než velký elektrárenský blok, odhaduji vzhledem k modulární konstrukci cca na 10 EUR/MWh. Cena, za kterou bychom mohli prodávat elektrickou energii by mohla být na úrovni cca 1400

Kč/MWh. Počáteční náklady lze odhadnout při ceně na jednotku výkonu 4,75 milionů EUR/MW na cca 49 miliard korun za reaktor, pro 7 modulů by investice činila cca 343 miliard korun. Celková vyrobená elektrická energie pro jeden modul s průměrným vytížením za 1 rok na 90 % by byla cca 3,71 TWh. Při aplikování stejného vzorce (5.1) dojdeme za daných předpokladů k návratnosti investice cca 21 let. Projektovaná životnost reaktoru je 60 let. Delší doba návratnosti je dána levnější elektřinou a nákladnější počáteční investicí, protože se jedná o novou technologii. NPV jednoho modulu je za 60 let cca 20,3 miliard korun, tedy NPV 7 modulů je cca 142 miliard korun.

Celková cena fotovoltaických elektráren pro pokrytí instalovaného výkonu 1,7 GW při uvážení nákladů na instalovaný výkon 857 USD/kW, což je při kurzu 22,02 CZK/USD cca 18 875 Kč/kW, by byla cca 32,1 miliardy korun. Pro stanovení doby návratnosti investice budu uvažovat provozní náklady ve výši 16 EUR/MWh, cenu prodávané vyrobené elektřiny 70 EUR/MWh. Celková roční vyrobená elektrická energie při výkonu 1,7 GW a uvažování jen průměrně 20% vytížení za rok by mohla být 2,98 TWh. Provozní náklady by pak při uvažování kurzu 25 EUR/CZK činily 1,19 miliard korun a roční tržby by byly cca 5,21 miliard korun. Z toho lze poté stanovit celkový roční výnos cca 3 miliardy korun. Při použití vzorce (5.1) pro metodu NPV pak návratnost investice zhruba vychází na 12 let, což je při životnosti solárních panelů až 30 let pořád ještě výhodné. NPV za 30 let je 25,1 miliard korun.

Kogenerační jednotky vyrábějí zároveň teplo i elektrickou energii. Pro pokrytí výkonového deficitu 0,9 GWe bychom potřebovali při nákladech na instalovaný výkon 3300 USD/kW cca 65,4 miliardy korun, tedy pokud uvažujeme kurz 22,02 CZK/USD. Cena prodávané elektřiny bude muset být na úrovni 75 EUR/MWh. Roční provozní náklady se pohybují okolo 1 miliardy korun. Při kurzu 25 CZK/EUR, průměrném ročním vytížení na 90 % a obdobném výpočtu dle vzorce (5.1) vychází doba návratnosti zhruba 7 let. Doba životnosti kogenerační jednotky je v průměru 10–15 let. Lze tedy konstatovat, že návratnost je na hranici životnosti. Pro porovnání je NPV za 15 let 54,1 miliard korun.

Celková výše investic pro nahrazení dvou třetin instalovaného výkonu vyřazených tepelných elektráren je v daném případě rozložení pokrytí jednotlivými zdroji, cca 441 miliard korun. Teoretický součet NPV je u decentralizovaných zdrojů dané kombinace cca 223 miliard korun. Pokud bychom uvažovali teoreticky pro porovnání, že za 60 let budeme mít jedenkrát 7 modulů reaktoru, dvakrát fotovoltaickou elektrárnu s životností 30 let a

potřebu čtyřikrát vyměnit kogenerační jednotky, které mají životnost 15 let by bylo celkové NPV 409 miliard korun.

Poznámka: výpočty návratnosti jsou dle [76], informace o modulárním reaktoru Rolls-Royce jsou uvedeny na [81], náklady na fotovoltaickou elektrárnu dle instalovaného výkonu jsou dostupné v [82], provozní náklady fotovoltaické elektrárny určeny dle [78], cena kogenerační jednotky na jednotku instalovaného výkonu dle [83], informace o době životnosti dostupná na [84], roční provozní náklady na [85] a orientačně stanovená cena elektřiny na jednotku instalovaného výkonu z [86].

6 SWOT analýza jednotlivých variant

6.1 Jaderná energie

- **Silné stránky (Strengths):**

Dlouhá životnost.

Stabilní výkon nezávislý na okolních vlivech.

Ekonomicky se dlouhodobě vyplatí.

Vysoká kapacita a spolehlivost.

Uhlíkově neutrální.

Bezemisní a současně udržitelná.

Ověřená technologie a zkušenosti s provozem.

Kontrola a řízení je soustředěna na jedno místo (centralizovaný zdroj).

Není potřebné instalace „chytrých“ složitých zařízení do sítě.

Centrální zdroj daleko od spotřeby (bezpečnost).

Levná energie.

- **Slabé stránky (Weaknesses):**

Počáteční náklady.

Dlouhodobá výstavba.

Nakládání s vyhořelým palivem.

Dlouhá doba schválení.

Potřeba poměrně velké plochy na výstavbu.

Nutnost zajištění robustní infrastruktury a energetické sítě.

Nutnost vytipování seismicky neaktivní oblasti.

Výpadek zasáhne velký počet spotřebitelů.

- **Příležitosti (Opportunities):**

Zahraniční spolupráce

Větší export elektřiny do zahraničí.

Rozvoj technologií a vzdělání.

Lepší energetická soběstačnost ČR.

- **Hrozby (Threats):**

Protijaderná politika okolních států (Německo, Rakousko).

Nesouhlas veřejnosti.

Potenciální jaderná havárie.

Nejistota při počáteční investici z hlediska možného zrušení výstavby.

6.2 Decentralizované zdroje

- **Silné stránky (Strengths):**

Flexibilita.

Diverzifikace nákladů.

Možnost postupné financování investice.

Levnější výstavba.

Lepší zajištění dodávky energie i při výpadku jednoho zdroje.

Energetická nezávislost.

Minimalizuje ztráty při přenosu a distribuci.

Podporováno politikou EU.

Nabízí možnost ušetřit.

- **Slabé stránky (Weaknesses):**

Nutnost robustní distribuční sítě se Smart technologiemi.

Větší podíl OZE a tím rostou požadavky na akumulaci.

Potřeba kompenzovat nestabilitu pomocí grid forming měničů.

Nejistota zisku investice.

Emisně náročnější.

Horší spolehlivost.

- **Příležitosti (Opportunities):**

Nové technologie.

Nové možnosti a projekty.

Spolupráce se zahraničními firmami.

Elektrifikace i v odlehlých oblastech bez infrastruktury.

Menší rozměry zdroje, lepší variabilita umístění.

- **Hrozby (Threats):**

Nedůvěra v novou technologii a v nový přístup k výrobě energie.

Zhoršení stability sítě.

Složitější rámec licencování.

Hrozí lokální přetížení nebo nedostatek energie.

Nedostatečné zajištění jmenovitých parametrů sítě (napětí a frekvence).

Zhodnocení a závěr

Na základě rešerše a současného stavu evropské elektrické výroby jsem usoudil, že pro Evropu, s ohledem na Českou republiku by mohly být nejvhodnějšími variantami budoucího vývoje za prvé, rozvoj jaderné centralizované energetiky a za druhé decentralizovaný mix obnovitelných zdrojů, malých modulárních reaktorů a např. kogeneračních jednotek na fosilní paliva. Pro orientační stanovení nákladů jednotlivých variant jsem uvažoval hypoteticky do roku 2040 pokles instalovaného výkonu tepelných elektráren na třetinu ze současných 8,7 GWe, v důsledku uzavření některých uhelných elektráren. Takový pokles by činil výkonový deficit cca 5,8 GWe, který bychom museli nahradit výše zmíněnými variantami.

Podle přibližných investičních nákladů byla podle metody čisté současné hodnoty (NPV) stanovena očekávaná doba návratnosti jednotlivých variant a pro porovnání byla čistá současná hodnota vyčíslená na rok životnosti projektů a určena celková výsledná hodnota. Při vytváření SWOT analýzy jsem se snažil přistupovat objektivně k oběma navrženým variantám.

Pokud porovnáme investiční náklady dojdeme k závěru, že varianta počítající s rozvojem jaderné energetiky vyžaduje stavbu 6 bloků o počáteční investici cca 600 miliard korun. Celková investice pro variantu uvažující decentralizované zdroje včetně 7 modulů reaktoru Rolls-Royce o výkonu 470 MWe, fotovoltaické elektrárny pro pokrytí 1,7 GW a doplnění o kogenerační jednotky s celkovým instalovaným výkonem 0,9 GWe činí přibližně 441 miliard korun. Zde je jasně viditelná vyšší počáteční investice první varianty o 159 miliard korun. Enormní rozvoj jaderné energetiky je tedy výrazně dražší možností. Na druhou stranu můžeme však projekty porovnat podle čisté současné hodnoty, která nám poskytne informaci, jak si dané investice vedou s uvážením diskontní sazby 6 %. Výhodou této metody je právě zohlednění faktoru času ve výpočtu, a tedy snížení hodnoty peněz v budoucnu.

Každý ze zdrojů nemá stejnou životnost, proto jsem u druhé decentralizované varianty uvažoval pro provoz 60 let potřebu dvou fotovoltaických elektráren, protože jedna má životnost maximálně 30 let a potřeby čtyřikrát vyměnit kogenerační jednotky, protože mají životnost maximálně 15 let a 7 modulů reaktoru vyjde teoretické NPV po 60 letech cca 409 miliard korun. Pro srovnání u první varianty 6 bloků vyjde NPV po 60 letech provozu 583,2 miliard korun. Na základě tohoto lze konstatovat, že i přes počáteční velkou investici do výstavby 6 jaderných bloků je stále tato varianta mnohem výhodnější. Je ale třeba

poznamenat, že výpočty jsou čistě orientační a skutečné hodnoty se mohou lehce lišit, nicméně si myslím že první varianta centralizované jaderné energie je stále ekonomicky mnohem výhodnější. Poměr doby životnosti a návratnosti také vychází lépe pro první variantu.

Ze SWOT analýzy vyplývá, že pro velký počet decentralizovaných zdrojů je důležitý rozvoj distribuční sítě, instalace smart grid technologií a grid forming měničů, což sebou nese další dodatečné náklady. Navíc hrozí, že se investice tolik nevyplatí. Nevýhodou decentralizace je také zhoršení stability síťových parametrů a hrozba nevyváženosti elektrizační soustavy. Na druhou stranu přinášejí výhody jako je větší flexibilita, variabilita projektů a diverzifikace pořizovacích nákladů.

Dlouhá životnost a ekonomická návratnost investice hovoří pro variantu centralizované jaderné energetiky. Oproti decentralizovaným zdrojům má stabilní výkon nezávislý na okolních vlivech, navíc jaderná energie je ověřenou technologií a nabízí levnou energii. Nevýhodami této varianty jsou velké počáteční náklady a dlouhá doba výstavby.

Protože realizace 6 jaderných bloků vyžaduje velkou počáteční investici (600 miliard korun), dlouhou dobu výstavby a současným trendem je rozvoj decentralizovaných obnovitelných zdrojů bude velmi pravděpodobně budoucí vývoj kombinací obou navrhovaných variant. Faktem ale zůstává, že pokud chceme pokrýt základní zatížení při masivním rozvoji obnovitelných zdrojů a současném vyřazení fosilních paliv, neobejde se ČR a celá Evropa bez výstavby nových jaderných bloků.

Možnou variantou za předpokladu průlomu ve vývoji jaderné fúze, by bylo nahrazení uhelných elektráren fúzními reaktory. Tato varianta je čistě hypotetická a nelze se na ni příliš spoléhat, nicméně stojí za zmínku.

Literatura

- [1] Renewable Energy... ..into the Mainstream [online]. IEA, 2002, 54 s. [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://library.um.edu.mo/ebooks/b1362376x.pdf>
- [2] ELECTRICITY MAPS [online]. Kodaň: Tomorrow, c2022 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://app.electricitymaps.com/map>
- [3] Electricity Data Explorer. EMBER [online]. 2023 [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://ember-climate.org/data/data-tools/data-explorer/>
- [4] MOORE, Charles. European Electricity Review 2022 [online]. 1.2.2022, str. 4-29 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://ember-climate.org/insights/research/european-electricity-review-2022/>
- [5] Nuclear Power in France. World Nuclear Association [online]. c2016-2023 [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france.aspx>
- [6] Nuclear Power in Sweden. World Nuclear Association [online]. c2016-2023 [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/sweden.aspx>
- [7] Nuclear Power in Germany. World Nuclear Association [online]. c2016-2023 [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/germany.aspx>
- [8] JONES, Dave. European Electricity Review 2023 [online]. 31.1.2023, str. 4-74 [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: <https://ember-climate.org/insights/research/european-electricity-review-2023/>
- [9] Nuclear Power in Slovakia. World Nuclear Association [online]. c2016-2023 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/slovakia.aspx>
- [10] Nuclear Power in Belgium. World Nuclear Association [online]. c2016-2023 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/belgium.aspx>
- [11] NOHÁČ, Karel. Termodynamika po EE1, PEE, EEN1. Fakulta elektrotechnická Západočeské univerzity v Plzni, katedra elektroenergetiky, 2022. Dostupné také z: http://home.zcu.cz/~nohac/EE1/Termodynamika_pro_EE1-prezentace.pdf

- [12] SCHEJBAL, Konstantin. Elektroenergetika pro KEE/EEN1: Základní pomocný text přednášek doc. Schejbala. Fakulta elektrotechnická Západočeské univerzity v Plzni, katedra elektroenergetiky, 2022. Dostupné také z: <http://home.zcu.cz/~nohac/EE1/Energetika.pdf>
- [13] TEPELNÁ ELEKTRÁRNA. ČEZ [online]. c1999 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/tepel_el.html
- [14] DOLEŽAL, Jaroslav, Jiří ŠTASTNÝ, Jan ŠPETLÍK, Stanislav BOUČEK a Zbyněk BRETTSCHEIDER. Jaderné a klasické elektrárny [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [15] GOŇO, Radomír a Vladimír KRÁL. Výroba a užití elektrické energie: učební text a návody pro řešení projektu [online]. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012, 212 s. [cit. 2023-04-23]. CZ.1.07/2.2.00/15.0113. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/vuee/Vuee_ucebni_texty.pdf
- [16] Jak funguje uhelná elektrárna. Skupina ČEZ [online]. Praha: ČEZ, c2023 [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/flash-model-jak-funguje-uhelna-elektrarna>
- [17] TRAMOŠLIKA, Branimir, Paolo BLECICH, Igor BONEFAČIĆ a Vladimír GLAŽAR. Advanced Ultra-Supercritical Coal-Fired Power Plant with Post-Combustion Carbon Capture: Analysis of Electricity Penalty and CO2 Emission Reduction: Analysis of Electricity Penalty and CO2 Emission Reduction. Sustainability [online]. 2021, 13(2) [cit. 2023-04-24]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: [doi:10.3390/su13020801](https://doi.org/10.3390/su13020801)
- [18] Jaké typy elektráren známe? Epet [online]. Praha: EP Energy Trading, c2023 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.epet.cz/jake-typy-elektraren-zname/>
- [19] Uhelna elektrárna podrobně: Charakteristika zdroje. Svět Energie [online]. Skupina ČEZ, Simopt, c2020 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/uhelne-elektrarny/uhelna-elektrarna-podrobne/charakteristika-zdroje/vyklad>
- [20] HODBOŇ, Josef. Kde a jak se vyrábí elektrická energie? TZB-info [online]. Praha: Topinfo, c2001-2023 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/elektricke-vytapani/23458-kde-a-jak-se-vyrabi-elektricka-energie>

- [21] CCS v praxi. Česká geologická služba [online]. Brno: Česká geologická služba [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/ccs/technologie-ccs/praxe>
- [22] PAROPLYNOVÁ ELEKTRÁRNA. Svět Energie [online]. Skupina ČEZ, Simopt, c2020 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/plynove-a-paroplynove-elektrarny/paroplynova-elektrarna>
- [23] VOBOŘIL, David. Paroplynová elektrárna – princip funkce. OENERGETICE [online]. Třebíč: OM Solutions [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/technologie/paroplynova-elektrarna-princip-funkce>
- [24] Jaderná elektrárna podrobně: Charakteristika zdroje – Typy reaktorů. Svět Energie [online]. Skupina ČEZ, Simopt, c2020 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/charakteristika-zdroje/typy-reaktoru>
- [25] Jaderná Elektrárna Temelín. Svět Energie [online]. Skupina ČEZ, Simopt, c2020 [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderne-elektrarny-cez/jaderna-elektrarna-temelin>
- [26] Vodní elektrárny. Informační portál energetické gramotnosti [online]. 2018 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.informacni-portal.cz/clanek/vodni-elektrarny#article-top>
- [27] Elektroenergetika – Výroba energie. Moje energie [online]. Praha: DONE, Topinfo CMS, c2009-2023 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <http://www.mojeenergie.cz/cz/elektroenergetika-vyroba-energie>
- [28] FOTOVOLTAICKÉ ČLÁNKY A PANELY. Svět Energie [online]. Skupina ČEZ, Simopt, c2020 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie/slunecni-elektrarny-podrobne/fotovoltaicke-clanky-a-panely/vyklad>
- [29] Jak funguje fotovoltaická elektrárna. Skupina ČEZ [online]. Praha: ČEZ, c2023 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/obnovitelne-zdroje/slunce/jak-funguje-slunecni-elektrarna>
- [30] VÍTR A JEHO VYUŽITÍ. Svět Energie [online]. Skupina ČEZ, Simopt, c2020 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie/vetrne-elektrarny-podrobne/vitr-a-jeho-vyuziti/vyklad>

- [31] VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA S HORIZONTÁLNÍ OSOU. Svět Energie [online]. Skupina ČEZ, Simopt, c2020 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie/vetrne-elektrarny-podrobne/vetrna-elektrarna-s-horizontalni-osou/vyklad>
- [32] Jak funguje geotermální elektrárna? Výhody a nevýhody. Epet [online]. Praha: EP Energy Trading, c2023 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.epet.cz/jak-funguje-geotermalni-elektrarna-vyhody-a-nevyhody/>
- [33] Geotermální elektrárna. Svět Energie [online]. Skupina ČEZ, Simopt, c2020 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie/geotermalni-elektrarna/vyklad>
- [34] Energie mořské vody. Svět Energie [online]. Skupina ČEZ, Simopt, c2020 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/obnovitelne-zdroje-energie/energie-morske-vody/vyklad>
- [35] INGERSOLL, D.T. a M.D. CARELLI. Handbook of Small Modular Nuclear Reactors: Second Edition: Woodhead Publishing Series in Energy. Elsevier Science, 2020. ISBN 9780128239179. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=RDHgDwAAQBAJ>
- [36] ĎURĎOVIČ, Martin, Slavomír ENTLER, Jan HORÁČEK, Jiří MÁLEK, Jan SYBLÍK a Vladimír WAGNER. Malé modulární reaktory. Praha: Středisko společenských činností AV ČR, v.v.i., pro Kancelář Akademie věd ČR, 2022. Strategie AV21. ISBN 978-80-200-3395-6.
- [37] ZOU, Y. a M.H. SUBKI. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments [online]. Edice 2022. Rakousko: IAEA, Nuclear Power Technology Development Section, Division of Nuclear Power, 2022 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf
- [38] MALÉ A MIKRO REAKTORY. Svět Energie [online]. Skupina ČEZ, Simopt, c2020 [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/male-a-mikro-reaktory/vyklad>
- [39] CONTE, Niccolo a Sam PARKER. Mapped: Europe's Biggest Sources of Electricity by Country. VC ELEMENTS [online]. Vancouver: Visual Capitalist, c2022 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://elements.visualcapitalist.com/mapped-europes-biggest-sources-of-electricity-by-country/>

- [40] About CCUS. International Energy Agency [online]. Paříž: IEA, c2023 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/about-ccus>
- [41] Carbon capture, utilisation and storage. International Energy Agency [online]. Paříž: IEA, c2023 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/carbon-capture-utilisation-and-storage>
- [42] RAJABLOO, Talieh, Joris VALEE, Yves MARENNE, Leo COPPENS a Ward DE CEUNINCK. Carbon capture and utilization for industrial applications. Energy Reports. 2023, 9, 111-116. ISSN 2352-4847. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.12.009>
- [43] DZIEJARSKI, Bartosz, Renata KRZYŹYŃSKA a Klas ANDERSSON. Current status of carbon capture, utilization, and storage technologies in the global economy: A survey of technical assessment: A survey of technical assessment. Fuel. 2023, 342, 127776. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127776>
- [44] Zachytávání CO₂. Informační portál pro technologie zachytávání a ukládání CO₂ [online]. Brno: Česká geologická služba [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/ccs/technologie-ccs/zachytavani>
- [45] CCS Explained: Capture: What is CCS and how is CO₂ captured?. Global CCS Institute [online]. Melbourne: Global CCS Institute, c2023 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.globalccsinstitute.com/ccs-explained-capture/>
- [46] DAEL, M.V. Market study report CCU [online]. Boeretang: VITO, 2018 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.grensregio.eu/assets/files/site/Market-Study-Report-CCU-december-2018.pdf>
- [47] VRTIŠKA, Ondřej, Lenka Vrtišková NEJEZCHLEBOVÁ a Jana OLIVOVÁ. Strategie AV21: Od jaderné fúze po lidská práva [online]. Praha: Akademie věd České republiky, 2019 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: https://admin.strategie.avcr.cz/uploads/2020_02_10_Strategie_AV_21_f1f472e7c6.pdf?updated_at=2021-12-20T02:18:22.002Z
- [48] Nuclear Fusion Power. World Nuclear Association [online]. Londýn: World Nuclear Association, c2016-2023 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-fusion-power.aspx>
- [49] CLYNES, Tom. 5 BIG IDEAS FOR MAKING FUSION POWER A REALITY: Startups, universities, and major companies are vying to commercialize

- a nuclear fusion reactor. IEEE SPECTRUM [online]. New York: IEEE, c2023 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/5-big-ideas-for-making-fusion-power-a-reality>
- [50] CLERY, Daniel. The bizarre reactor that might save nuclear fusion. In: Science/AAAS [online]. Washington, DC: American Association for the Advancement of Science, c2023 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://www.science.org/content/article/bizarre-reactor-might-save-nuclear-fusion>
- [51] ENTLER, Slavomír, Ondřej FICKER, Josef HAVLÍČEK, et al. Budoucnost energetiky: jaderná fúze. Praha: Středisko společných činností AV ČR, v.v.i., pro Kancelář Akademie věd ČR, 2019. Strategie AV21. ISBN 978-80-200-3007-8.
- [52] WIELAND, Christoph, Christopher SCHIFFLECHNER, Konstantinos BRAIMAKIS, Florian KAUFMANN, Fabian DAWO, Sotirios KARELLAS, Giorgio BESAGNI a Christos N. MARKIDES. Innovations for organic Rankine cycle power systems: Current trends and future perspectives. Applied Thermal Engineering. 2023, 225, 120201. ISSN 1359-4311. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120201>
- [53] THIERRY, David M., Antonio FLORES-TLACUAHUAC a Ignacio E. GROSSMANN. Simultaneous Optimal Design of Multi-Stage Organic Rankine Cycles and Working Fluid Mixtures for Low-Temperature Heat Sources [online]. 2015 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/283266821_Simultaneous_Optimal_Design_of_Multi-Stage_Organic_Rankine_Cycles_and_Working_Fluid_Mixtures_for_Low-Temperature_Heat_Sources
- [54] DECENTRALIZOVANÁ ENERGETIKA. Svět Energie [online]. Skupina ČEZ, Simopt, c2020 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/decentralizovana-energetika/decentralizovane-energeticke-zdroje-podrobne/decentralizovana-energetika/vyklad>
- [55] URISHEV, B. Decentralized Energy Systems, Based on Renewable Energy Sources. Applied Solar Energy. 2019, 55(3), 207-212. ISSN 1934-9424. Dostupné z: doi:10.3103/S0003701X19030101
- [56] VEZZOLI, Carlo, Fabrizio CESCHIN, Lilac OSANJO, Mugendi K. M'RITHAA, Richie MOALOSI, Venny NAKAZIBWE a Jan Carel DIEHL.

- Distributed/Decentralised Renewable Energy Systems. In: Designing Sustainable Energy for All. Cham: Springer International Publishing, 2018, s. 23-39. ISBN 978-3-319-70223-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-70223-0_2
- [57] MAJEED BUTT, Osama, Muhammad ZULQARNAIN a Tallal MAJEED BUTT. Recent advancement in smart grid technology: Future prospects in the electrical power network: Future prospects in the electrical power network. Ain Shams Engineering Journal. 2021, 12(1), 687-695. ISSN 2090-4479. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.004>
- [58] AVANCINI, Danielly B., Joel J.P.C. RODRIGUES, Simion G.B. MARTINS, Ricardo A.L. RABÊLO, Jalal AL-MUHTADI a Petar SOLIC. Energy meters evolution in smart grids: A review: A review. Journal of Cleaner Production. 2019, 217, 702-715. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.229>
- [59] VOBOŘIL, David. Jak mohou solární elektrárny přispívat ke stabilizaci soustavy, a nahradit tak roli synchronních strojů [online]. 2021 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/rychle-zpravy/mohou-solarni-elektrarny-prispivat-ke-stabilizaci-soustavy-nahradit-rolu-synchronnich-stroju>
- [60] UNRUH, Peter, Maria NUSCHKE, Philipp STRAUSS a Friedrich WELCK. Overview on Grid-Forming Inverter Control Methods. Energies [online]. 2020, 13(10) [cit. 2023-05-18]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en13102589
- [61] LASSETER, R. H., Z. CHEN a D. PATTABIRAMAN. Grid-Forming Inverters: A Critical Asset for the Power Grid: A Critical Asset for the Power Grid. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2020, 8(2), 925-935. ISSN 2168-6785. Dostupné z: doi:10.1109/JESTPE.2019.2959271
- [62] Realizace Zelené dohody pro Evropu. Evropská komise [online]. Evropská komise, c1995-2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_cs
- [63] Zelená dohoda pro Evropu: Snaha stát se prvním klimaticky neutrálním kontinentem. Evropská komise [online]. Evropská komise, c1995–2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_cs
- [64] Balíček „Fit for 55“. Evropská rada: Rada Evropské unie [online]. Brusel: Generální sekretariát rady, c2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z:

- <https://www.consilium.europa.eu/cs/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>
- [65] Mezinárodní klimatické dohody. Fakta o klimatu [online]. Brno: Otevřená data o klimatu, z. ú., c2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/svetove-dohody>
- [66] REPowerEU: Affordable, secure and sustainable energy for Europe. Evropská komise [online]. Evropská komise, c1995-2023 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_cs
- [67] Russia's War on Ukraine: Analysing the impacts of Russia's invasion of Ukraine on global energy markets and international energy security. International Energy Agency [online]. Paříž: IEA, c2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.iea.org/topics/russias-war-on-ukraine>
- [68] DVOŘÁK, Tomáš. Energetická krize a její příčiny, projevy a možnosti řešení. EPRAVO.CZ [online]. Praha: EPRAVO.CZ, c1999-2023 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://www.epravo.cz/top/aktualne/energeticka-krize-a-jeji-priciny-projevy-a-moznosti-reseni-115367.html>
- [69] Nuclear Power in the European Union. World Nuclear Association [online]. Londýn: World Nuclear Association, c2016-2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/others/european-union.aspx>
- [70] FERENC, Jan. EVROPA S JÁDREM POČÍTÁ, NĚMECKO JE MIMO [online]. SH media, spol. s r.o., 2023, 2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://svethospodarstvi.cz/ekonomika/evropa-s-jadrem-pocita-nemecko-je-mimo/>
- [71] IMPLEMENTING THE REPOWER EU ACTION PLAN: INVESTMENT NEEDS, HYDROGEN ACCELERATOR AND ACHIEVING THE BIOMETHANE TARGETS. Brusel: EUROPEAN COMMISSION, 2022, ročník 2022, SWD(2022) 230 final. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=SWD%3A2022%3A230%3AFIN&qid=1653033922121>
- [72] Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (MAF CZ 2022) [online]. 2022. Praha: ČEPS, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/zdrojova-primerenost>

- [73] Nuclear Power in Czech Republic. World Nuclear Association [online]. Londýn: World Nuclear Association, c2016-2023 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/czech-republic.aspx>
- [74] Aktualizace predikce vývoje elektromobility v ČR do roku 2045, Pracovní tým ZL 17 aktualizovaného NAP SG [online]. Praha: EUROENERGY, 2021 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/narodni-akcni-plan-pro-chytre-site/2022/2/Elektromobilita_predikce-do-2045.pdf
- [75] STEPPAT, Josephine, Alex SCHMITT a Huangluolun ZHOU. EU Energy Outlook 2060 – how will the European electricity market develop over the next 37 years? Energy BrainBlog [online]. Berlín: ENERGY BRAINPOOL GMBH & CO., c2023 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: <https://blog.energybrainpool.com/en/eu-energy-outlook-2060-how-will-the-european-electricity-market-develop-over-the-next-37-years-2/>
- [76] ODBORNÝ ČLÁNEK Temelín a jeho návratnost [online]. Fio Banka, str. 1-2 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: https://www.fio.pl/docs/zpravodajstvi/3/sk/134070_Odborny_clanek_9x.pdf
- [77] Diskontování. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Diskontov%C3%A1n%C3%AD>
- [78] WAGNER, Vladimír. Jak je to se srovnáním cen elektřiny z různých energetických zdrojů?. OENERGETICE [online]. Třebíč: OM Solutions, 2018 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/nazory/se-srovnanim-cen-elekriny-ruznych-energetickyh-zdroju>
- [79] KRMELOVÁ, Petra. ČNB ponechala úrokové sazby na stávající úrovni. Dvoutýdenní repo sazba (2T repo sazba) tak zůstává na 7 %, diskontní sazba na 6 % a lombardní sazba na 8 %. (3.5.2023). Kurzycz [online]. Praha: Kurzy.cz, spol. s r.o., AliaWeb, spol. s r.o., c2000-2023 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/zpravy/714006-cnb-ponechala-urokove-sazby-na-stavajici-urovni-3-5-2023/>
- [80] TRAMBA, David. Už je to venku! V Polsku unikla čísla, za kolik Američané, Korejci a Francouzi nabízejí své reaktory. Ekonomický deník [online]. Praha: Media Network s.r.o, 2022 [cit. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://ekonomickydenik.cz/uz->

je-to-venku-v-polsku-unikla-cisla-za-kolik-americane-korejci-a-francouzi-nabizeji-sve-reaktory/

- [81] Small Nuclear Power Reactors. World Nuclear Association [online]. Londýn: World Nuclear Association, c2016-2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>
- [82] RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2021 [online]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, c2022 [cit. 2023-05-26]. ISBN 978-92-9260-452-3. Dostupné z: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Power_Generation_Costs_2021.pdf?rev=34c22a4b244d434da0accde7de7c73d8
- [83] BURGIS, Eric. Understanding CHP and the Cost of Installation. Understanding CHP [online]. Washington DC: Energy Solutions Center, 2018 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://understandingchp.com/blog/understanding-chp-and-the-cost-of-installation/>
- [84] How to generate fast cost savings with high efficiency CHP. Edina [online]. Manchester: Edina, c2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.edina.eu/news/how-to-generate-fast-cost-savings-with-high-efficiency-chp>
- [85] LAKO, Paul. Combined Heat and Power [online]. IEA ETSAP, 2010, 1 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: https://iea-etsap.org/E-TechDS/HIGHLIGHTS%20PDF/E04-CHP-GS-gct_ADfinal%201.pdf
- [86] BADOUARD, Thierry, Débora MOREIRA DE OLIVEIRA, Jessica YEARWOOD a Perla TORRES. Final Report Cost of Energy (LCOE): Energy costs, taxes and the impact of government interventions on investments [online]. Rotterdam: Trinomics, 2020 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-10/final_report_levelised_costs_0.pdf

Seznam obrázků

Obr. 1 Postupné vyřazování uhlí podle jednotlivých scénářů [72].....	- 18 -
Obr. 2 Schéma uhelné elektrárny, převzato z [13]	- 21 -
Obr. 3 TS diagram Clausius – Rankinova cyklu [11].....	- 22 -
Obr. 4 Blokové schéma RC cyklu: kč=kondenzátorové čerpadlo, nč=napájecí čerpadlo, n=napájecí potrubí, K=kotel, T=turbína, ~ = turboalternátor, k= kondenzátor[15]	- 22 -
Obr. 5 Schéma paroplynové elektrárny, převzato z [23]	- 24 -
Obr. 6 Schéma dvouokruhové jaderné elektrárny s reaktorem PWR (VVER), převzato z [24]	- 27 -
Obr. 7 Cyklus konverze tepelné energie oceánů, vlevo uzavřený, vpravo otevřený [34]-	30 -
Obr. 8 Princip a konstrukce fotovoltaického panelu [28].....	- 32 -
Obr. 9 Princip vzniku vztlakové síly na lopatkách [30]	- 34 -
Obr. 10 Průměrná roční změna výroby elektřiny podle zdroje v (TWh) ve 27 zemích EU [4]	- 38 -
Obr. 11 Uhlíková náročnost výroby elektřiny v jednotlivých zemích Evropy v roce 2022 [8]	- 49 -
Obr. 12 Nejpoužívanější zdroj pro výrobu elektřiny v jednotlivých zemích Evropy [39]-	50 -
-	
Obr. 13 Příklady několika konstrukčních řešení SMR [37]	- 54 -
Obr. 14 Příklady použití zachyceného CO ₂ [40]	- 56 -
Obr. 15 Zachytávání CO ₂ před spalováním [44]	- 57 -
Obr. 16 Zachytávání CO ₂ po spalováním [44]	- 58 -
Obr. 17 Spalování v kyslíkové atmosféře [44]	- 59 -
Obr. 18 Magnetický systém reaktoru tokamak [51]	- 64 -
Obr. 19 Detail konstrukce fúzního reaktoru typu stelarátor [50]	- 64 -
Obr. 20 Princip fúzního reaktoru na bázi IFC [49].....	- 65 -
Obr. 21 Princip fúzního reaktoru MTF [49]	- 66 -
Obr. 22 Schéma organického CR cyklu (vlevo) a jeho TS diagram (vpravo) [52].....	- 67 -
Obr. 23 Možná řešení dvoustupňového ORC [53]	- 69 -
Obr. 24 Principiální schéma RHPORC [52].....	- 70 -
Obr. 25 Přehled generací organických látek a chladiv využitelných v ORC [52]	- 72 -
Obr. 26 Topologické schéma energetické sítě s decentralizovanými zdroji [54].....	- 74 -

Obr. 27 Mapa decentralizované sítě [55].....	- 74 -
Obr. 28 Typy sítí podle struktury systému, převzato z [56]	- 75 -
Obr. 29 Blokové schéma GFL [61]	- 79 -
Obr. 30 Blokové schéma GFM [61]	- 79 -

Seznam grafů

Graf 1 Předpokládaný vývoj bateriové akumulace v ČR [72].....	- 18 -
Graf 2 Výroba elektrické energie v Evropě podle zdroje v (TWh) [4]	- 36 -
Graf 3 Výroba elektrické energie v Evropě podle zdroje – procentní podíl [4]	- 36 -
Graf 4 Vývoj nákladů na výrobu elektřiny z fosilních paliv v roce 2021,	- 40 -
Graf 5 Vývoj růstu větrné a solární energie, nahoře instalovaná kapacita, dole výroba elektřiny [4]	- 42 -
Graf 6 Energetický mix EU v roce 2022 podle [8].....	- 49 -

Seznam tabulek

Tabulka 1 Hodnoty LOLE pro jednotlivé scénáře, červené hodnoty překračují normu spolehlivosti [72]	- 17 -
Tabulka 2 Přehled typů reaktorů, převzato z [15]	- 25 -