



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**SYSTÉMY AKUMULACE MECHANICKÉ ENERGIE
MECHANICAL ENERGY STORAGE SYSTEMS**

Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Vypracoval: Josef Hynek

Vedoucí práce: doc. Ing. Radek Šulc, Ph.D.

Akademický rok: 2023/24



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hynek** Jméno: **Josef** Osobní číslo: **508866**
 Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
 Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
 Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**
 Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Systémy akumulace mechanické energie

Název bakalářské práce anglicky:

Mechanical Energy Storage Systems

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte literární rešerši se zaměřením na technologie používané pro akumulaci mechanické energie, používaná zařízení a obvyklé parametry. Při zpracování rešerše se zaměřte zejména na:

1. Akumulaci energie pomocí technologie FESS.
2. Akumulaci energie pomocí technologie PHES.
3. Akumulaci energie pomocí technologie CAES.

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Radek Šulc, Ph.D. ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **16.04.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **02.08.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

doc. Ing. Radek Šulc, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou prací na téma Systémy akumulace mechanické energie vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne.....

.....
Josef Hynek

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce, panu doc. Ing. Radku Šulcovi, Ph.D. za jeho odborné konzultace a cenné rady. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za obrovskou podporu, které se mi během celého studia dostávalo.

Anotační list

Autor práce:	Josef Hynek
Název práce:	Systémy akumulace mechanické energie
Title:	Mechanical Energy Storage Systems
Akademický rok:	2023/2024
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství
Studijní obor:	bez oboru
Ústav:	Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Vedoucí práce:	doc. Ing. Radek Šulc, Ph.D.
Rozsah práce:	Počet stran: 78 Počet obrázků: 47 Počet tabulek: 16 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	akumulace energie, elektřina, mechanická energie
Keywords:	energy storage, electricity, mechanical energy
Abstrakt:	Práce se zabývá problematikou systémů akumulace mechanické energie. Cílem práce je v první části obecně popsat systémy akumulace energie a dále popsat mechanické způsoby akumulace energie a představit jejich princip. Druhá část se věnuje podrobnějšímu popisu tří nejhlavnějších systémů mechanické akumulace energie 1. Akumulace energie pomocí technologie FESS, 2. Akumulace energie pomocí technologie PHES a 3. Akumulace energie pomocí technologie CAES. U těchto technologií se práce zaměřuje na princip fungování, používané zařízení a komponenty, obvyklé provozní parametry a praktické použití.
Abstract:	The thesis deals with the problem of mechanical energy storage systems. The objective of the thesis is to describe energy storage systems in general in the first part and then to describe the mechanical methods of energy storage and to present their rough principles. The second part is devoted to a more detailed description of the three main mechanical energy storage systems 1. Energy storage using FESS technology, 2. Energy storage using PHES technology and 3. Energy storage using CAES technology. For these technologies, the thesis focuses on the principle of operation, the equipment and components used, common operating parameters and practical applications.

Obsah

1. Úvod.....	8
2. Akumulace energie	9
2.1 Úvod do akumulace energie.....	9
2.2 Aplikace systémů pro akumulaci energie	10
2.3 Globální data akumulace energie.....	12
2.3.1 Srovnání dat technologií akumulace energie.....	12
2.3.2 Mezinárodní srovnání dat akumulace energie	13
3. Rozdělení technologií akumulace energie	14
4. Systémy akumulace mechanické energie.....	15
4.1 Akumulace energie pomocí setrvačníků (FESS).....	15
4.1.1 Princip fungování technologie FESS	15
4.1.2 Zařízení a komponenty technologie FESS	15
4.1.3 Technické parametry technologie FESS.....	19
4.1.4 Použití technologie FESS	22
4.2 Přečerpávací vodní elektrárny (PHES).....	25
4.2.1 Princip fungování technologie PHES	25
4.2.2 Umístění technologie PHES	26
4.2.3 Zařízení a komponenty technologie PHES	27
4.2.4 Technické parametry technologie PHES	35
4.2.5 Systémy PHES v České republice a ve světě.....	36
4.3 Akumulace energie do stlačeného vzduchu (CAES).....	40
4.3.1 Princip fungování technologie CAES	40
4.3.2 Rozdělení technologie CAES	40
4.3.3 Zařízení a komponenty technologie CAES	48
4.3.4 Technické parametry technologie CAES.....	55
4.3.5 Systémy CAES ve světě	59
5. Srovnání posuzovaných systémů MESS	66
6. Závěr.....	67
Seznam zkratk.....	68
Seznam obrázků.....	70
Seznam zdrojů.....	74

1. Úvod

V dnešní době moderní společnosti je svět čím dál častěji ovlivňován novými technologiemi, které inovují a mění způsob, jakým lidé žijí, pracují a komunikují s okolním světem. Moderní společnost je tedy zcela závislá na elektrické energii, s její rostoucí spotřebou je však nutné se hlouběji zabývat nad dopadem její výroby, přenosu a distribuci na životní prostředí. Trend posledních let je směrem k udržitelnosti a ochraně životního prostředí, který je implementován také do oblasti energetiky, kde je snaha zvýšit podíl elektrické energie vyráběné pomocí obnovitelných zdrojů energie. Ty mají menší dopad na životní prostředí oproti konvenčním způsobům výroby, které jsou závislé na fosilních palivech nebo jiných neobnovitelných zdrojích. Snaha je tedy snížit emise skleníkových plynů a závislost na neobnovitelných zdrojích energie, které jsou v pohledu do budoucna neudržitelné a jednoho dne se vyčerpají. V pohledu čistě na konvenční výrobu elektrické energie lze také snížit dopad na životní prostředí, např. zlepšením účinnosti cyklů, flexibilnější výrobou, efektivnějším skladováním a přenosem nebo lepším řízením elektrizační sítě. Částečným řešením těchto problémů jsou systémy pro akumulaci energie. Jedním z typů systémů akumulace energie jsou systémy akumulace mechanické energie, kterými se budu zabývat v této bakalářské práci.

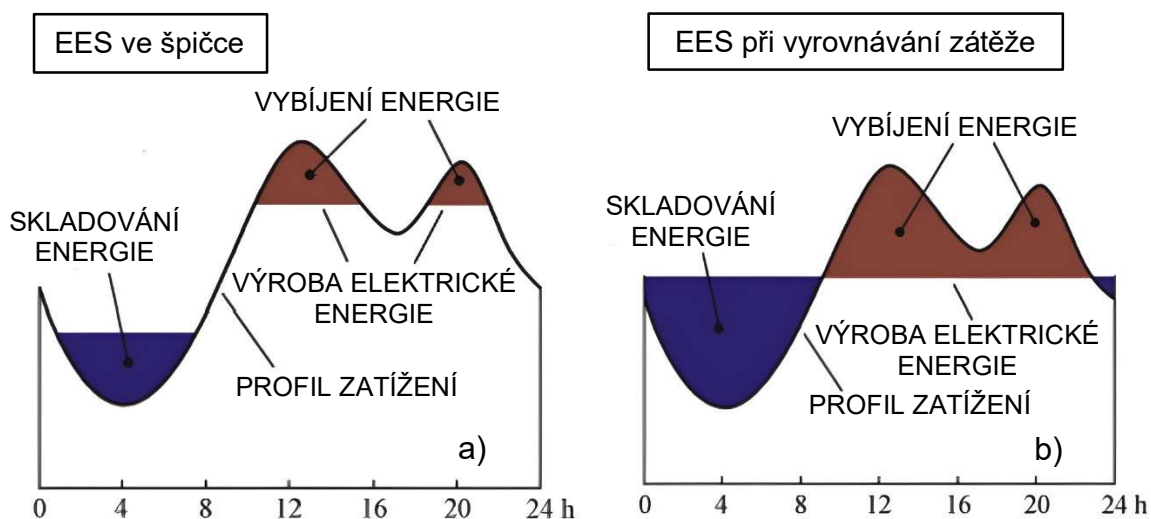
Tato bakalářská práce se zaměřuje na mechanické systémy akumulace energie, které představují jednu z cest k udržitelnějšímu energetickému hospodářství. Cílem této práce je nejprve obecně popsat obecný princip akumulace energie, její aplikace, globální data a rozdělení pro získání základního vzhledu do problematiky a kontextu pro následující detailnější popis mechanických systémů akumulace energie. Dále je práce zaměřena na detailní popis tří systémů pro akumulaci mechanické energie, a to akumulace energie pomocí setrvačnicků (FESS), přečerpávací vodní elektrárny (PHES) a akumulace energie do stlačeného vzduchu (CAES). Pro každou z těchto technologií je popsán princip fungování, používaná zařízení a komponenty, obvyklé provozní parametry a jejich praktické využití v průmyslu.

2. Akumulace energie

2.1 Úvod do akumulace energie

Skladování (akumulace) energie je jedním ze základních prvků procesu dodávky energie. Skladování elektrické energie (EES) je proces transformace elektrické energie ze sítě do formy, kterou lze patřičně skladovat a v případě nutnosti zpětně přeměnit na elektrickou energii. Tento proces umožňuje vyrábět elektrickou energii v době nízké poptávky, tedy v době, kdy je této energie přebytek, a využít ji naopak v době vysoké poptávky, kdy je energie nedostatek. Dalším faktorem, který nahrává systémům EES je skutečnost, že v době nízké poptávky je ekonomicky výhodné vyrábět a akumulovat energii do systémů EES, a následně tuto energii distribuovat v době, kdy se z důvodu nárůstu poptávky podstatně znásobí výrobní náklady, nebo v době, kdy nejsou k dispozici jiné způsoby výroby. [1][2]

Jak bylo již zmíněno, konvenční odvětví výroby elektrické energie nutně potřebuje systémy EES. Přenosové a distribuční soustavy fungují na principu jednoduché přepravy ze vzdálených a velkých elektráren ke spotřebitelům, z čehož je patrné, že tato dodávaná elektrická energie musí být spotřebována okamžitě. Poptávka po elektřině však v čase značně kolísá, a to v krátkém denním, ale také dlouhém sezónním časovém úseku. Skokové poptávky po elektrické energii vedou k méně účinným, předimenzovaným a následně provozně drahým elektrárnám. Systémy EES umožňují separovat výrobu energie od její dodávky, a to jak vyrobené z vlastních zdrojů, tak i nakoupené. Díky tomu, že jsou dostupné velkokapacitní systémy EES, jak je znázorněné na obrázku 1 mohou být výrobní kapacity dimenzovány pouze pro pokrytí průměrné poptávky po elektrické energii, a nikoliv té špičkové. To je důležité především pro velké výrobní systémy, jako např. jaderné elektrárny, které musí z ekonomických důvodů pracovat na téměř plnou kapacitu výroby. Dalšími výhodami systémů EES jsou sledování a následné vyrovnání zatížení sítě nebo jako pohotovostní rezerva elektrické energie při neočekávaných situacích. [1]

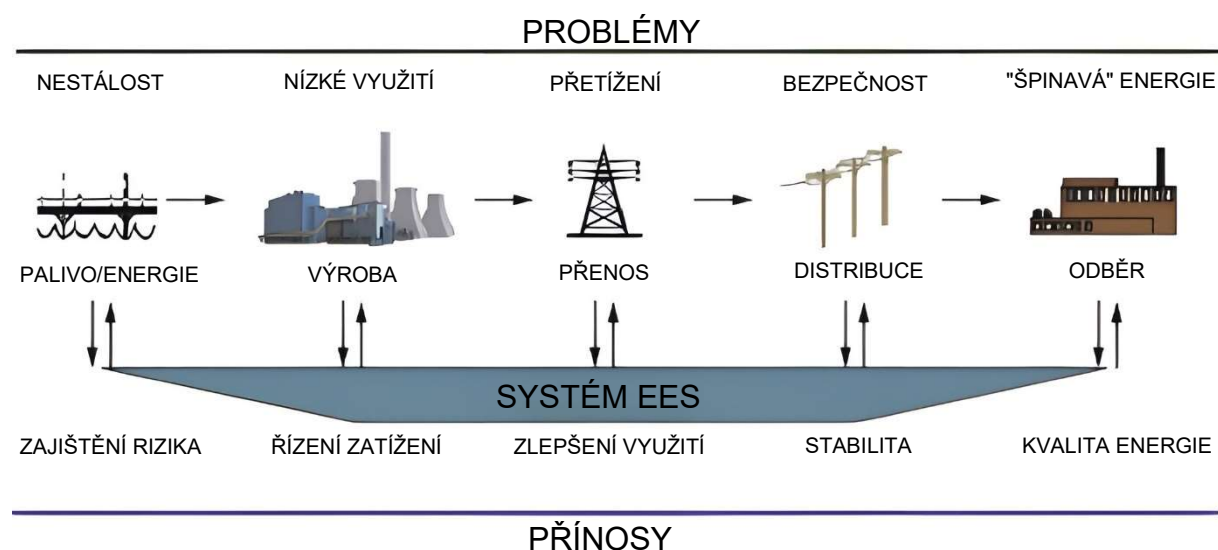


Obrázek 1: Profil zatížení vysokokapacitního systému EES. a) systém EES ve špičce b) systém EES při vyrovnávání zátěže, převzato a upraveno z [1]

Implementace systémů EES do elektrizační sítě je důležitá také vzhledem k tomu, že se ve světě stále větší část elektrické energie vyrábí z obnovitelných zdrojů energie jako jsou solární, větrné a vodní elektrárny. Jedním z hlavních problémů, kterým čelí většina obnovitelných zdrojů je jejich přerušovaný provoz, což je činí nespolehlivými pro stabilní dodávku elektrické energie do elektrizační sítě. Názorným příkladem je např. energie z fotovoltaických zdrojů, kde se může v průběhu dne výroba elektrické energie pohybovat od 0 % v noci až po 100 % v poledne, což vykazuje velkou přerušovatelnost a neovladatelnost výroby. Tato nevýhoda se stala jednou z hlavní překážek rozsáhlejšího využití obnovitelných zdrojů energie a zeleného elektroenergetického průmyslu. Začleněním vhodného systému EES lze z obnovitelných zdrojů vytvořit spolehlivé a stabilní zdroje elektrické energie. Toho lze dosáhnout ukládáním energie vyrobené v době, kdy jsou obnovitelné zdroje k dispozici, a opětovným využitím uložené energie v době, kdy obnovitelné zdroje nejsou k dispozici. [1][2][3]

2.2 Aplikace systémů pro akumulaci energie

Tradiční výrobní řetězec elektřiny se skládá z pěti částí: zdroj paliva/energie, výroba, přenos, distribuce a odběr spotřebitele. Jak je znázorněno na obrázku 2, dodáváním nebo odebíráním energie u každého ze zmíněných procesů, se systémy EES stávají "šestou částí" řetězce, čímž vytváří trh, který může lépe reagovat na potřeby spotřebitele. [1]



Obrázek 2: Přínosy systémů EES ve výrobním řetězci elektřiny, převzato a upraveno z [1]

Vzhledem k rozdílnosti parametrů různých systémů EES je možné jimi pokrýt celé spektrum aplikací ve výrobním řetězci elektřiny, ale také v jiných průmyslových aplikacích jako: [1]

Výroba:

- Skladování velkoobjemové energie v období nízké poptávky pro použití v období vysoké poptávky, čímž je umožněn rovnoměrnější průběh výrobních, přenosových a distribučních soustav.

- Tvoření pohotovostní rezervy, tedy možnost poskytnout energii pro zajištění poptávky spotřebitele v případě, že dojde k výpadku energetického zařízení. Hlavní roli zde hraje reakční doba systému EES, která musí být co možná nejpříznivější.
- Regulace frekvence umožňující udržovat stav frekvenční rovnováhy během pravidelných i nepravidelných režimů sítě. Frekvenční nerovnováha, vznikající při velkých a rychlých změnách elektrického zatížení soustavy může poškodit generátor a elektrická zařízení v celém výrobním řetězci elektřiny.
- Zajištění možnosti Black-startu. Jedná se o systémy EES se schopností samostatného spuštění za účelem uvedení přenosové soustavy do provozu a pomoci jiným zařízením při spuštění a se synchronizací se sítí.
- Využití elektrické arbitráže, tedy využívání rozdílů ceny elektřiny. V souvislosti se systémy EES se levně nakoupená elektřina akumuluje a následně distribuuje (prodává) v době jejího významného zdražení.

Přenos a distribuce:

- Schopnost udržovat všechny součásti soustavy na přenosovém vedení ve vzájemně synchronním provozu a zabráněním tak jejího kolapsu.
- Regulace napětí, která se provádí udržováním stabilního napětí mezi jednotlivými konci všech elektrických vedení.

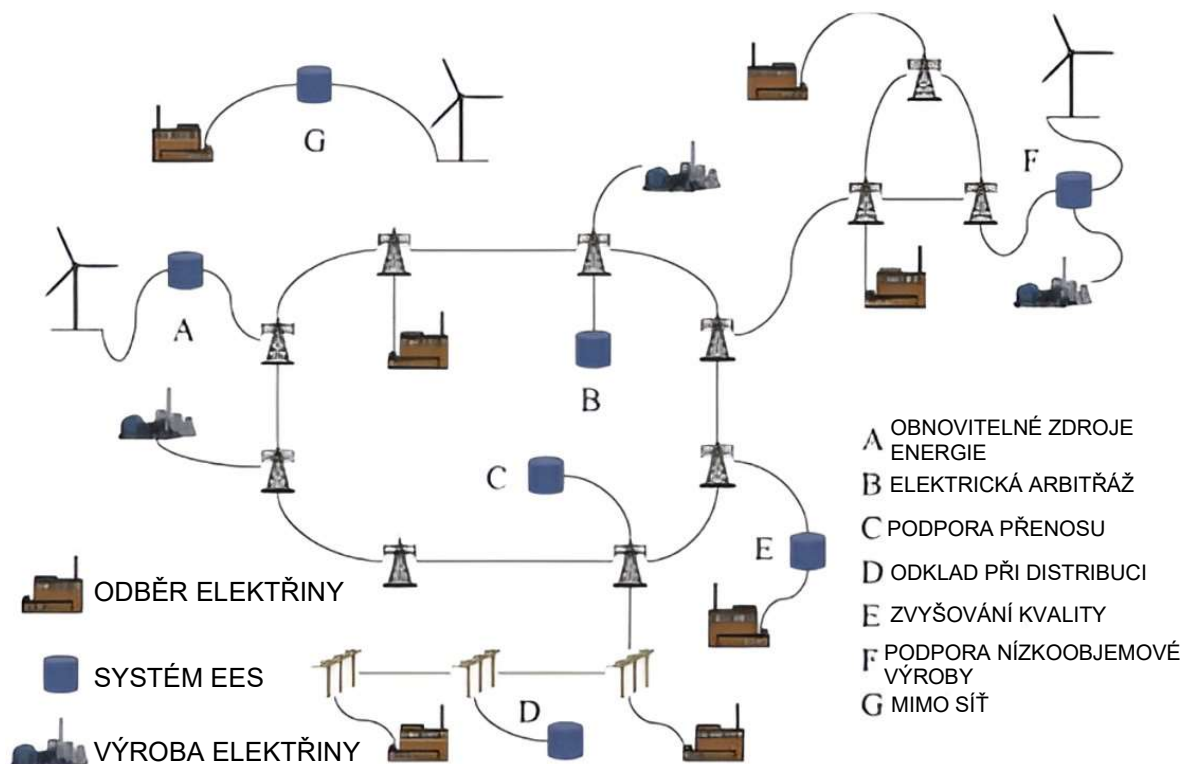
Odběr spotřebitelem:

- Řízení spotřeby energie, umožňující zákazníkům snížit spotřebu energie ve špičce tím, že přesunou poptávku po energii z jedné denní doby na jinou, čímž sníží své poplatky za spotřebu.
- Zvyšování kvality energie, což poskytuje spotřebitelům dodávku elektrické energie bez jakýchkoliv výkyvů/propadů nebo jiných narušení.
- Spolehlivost napájení, kterou zajišťuje nepřerušitelné napájení (systémy UPS, podrobněji popsány v kapitole 4.1.4), pro překonání přerušování dodávky elektrické energie. Ve spojení se systémy EES je možné provozování napájení na dálku.

Obnovitelné zdroje:

- Zmírnění omezení dodávek nárazově vyrobené elektrické energie způsobené nedostatečnou přenosovou kapacitou.
- Posílení a doplnění vyrobené energie jejím ukládáním v době mimo špičku, doplněné o elektrickou energii ekonomicky výhodně nakoupenou ze sítě, a uloženou energii pak vybíjet ve špičce.
- Podpora frekvence sítě pomocí skladování energie při náhlých poklesech výroby energie intervalem vybíjení.
- Stabilizace výroby potlačením výkyvů absorbováním a následným dodáváním energie během krátkodobých výkyvů výkonu.

Některé způsoby integrace systémů EES do výrobního řetězce elektřiny a kooperaci s obnovitelnými zdroji energie jsou znázorněny na obrázku 3.



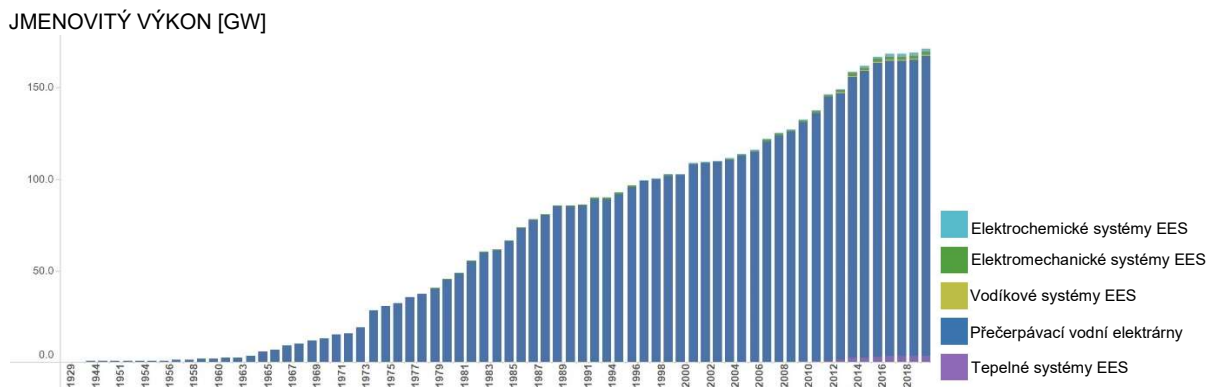
Obrázek 3: Aplikace systémů EES, převzato a upraveno z [1]

2.3 Globální data akumulace energie

2.3.1 Srovnání dat technologií akumulace energie

Dle dostupných dat z [4] pro rok 2020 je globální instalovaný výkon v systémech EES 171,05 GW v celkovém součtu 1 267 projektů EES. Největší část celkového výkonu zaujímají přečerpávací vodní elektrárny (PHES) a to 164,6 GW, tedy téměř 96 % z celkového objemu instalovaného výkonu. Na tomto celku se také podílí výkonem 3,2 GW tepelné systémy, 1,6 GW elektromechanické systémy a 1,6 GW elektrochemické systémy EES.

Například v roce 2000 byl globální instalovaný výkon 105,87 GW, nárůst za posledních 20 let je tedy v celkovém horizontu vývoje významný. Instalovaný výkon v průběhu let 1929 až 2020 s vyznačenými technologiemi EES je graficky znázorněn na obrázku 4. [4]



Obrázek 4: Instalovaný výkon v průběhu let 1929 až 2020, převzato a upraveno z [4]

Z dat grafu na obrázku 4 je také zřejmé, že se zvyšuje počet projektů ostatních (nekonvenčních) technologií, které se s postupem času zdokonalují a jejichž parametry mohou být časem srovnatelné s konvenčními systémy EES jako např. PHES. V již zmíněném srovnání s rokem 2000, kdy byl podíl technologie PHES přes 99 %, lze vidět, že podíl ostatních technologií EES vzrostl o 3 %, což je v pohledu do budoucna velmi příjemná statistika. [4]

2.3.2 Mezistátní srovnání dat akumulace energie

Srovnání z pohledu objemu instalovaného výkonu jednotlivých států budeme provádět na opět na základě dat z [4]. Pro jednoduchost a přehlednost tohoto srovnání je výčet nejlepších deseti států znázorněn v tabulce 1, kde jsou státy seřazeny podle množství instalovaného výkonu. Kromě toho je také v tabulce uvedený počet projektů, z kterých je instalovaný výkon generovaný.

Pořadí	Stát	Instalovaný výkon [GW]	Počet projektů
1.	Čína	32,104	94
2.	Japonsko	28,506	90
3.	Spojené státy americké	24,123	494
4.	Španělsko	8,121	66
5.	Německo	7,567	76
6.	Itálie	7,133	52
7.	Indie	6,013	18
8.	Francie	5,834	21
9.	Jižní Korea	4,991	62
10.	Švýcarsko	4,680	19

Tabulka 1: Srovnání států dle instalovaného výkonu [4]

Z tabulky 1 je na první pohled zřejmé, že v pořadí první tři státy mají zhruba třikrát větší instalovaný výkon než zbylé státy. Hlavními příčinami takového rozdílu jsou zejména ekonomické prostředky těchto států a vhodné geografické podmínky. Dalším zajímavým poznatkem je počet projektů ve Spojených státech amerických, který je násobný ve srovnání s ostatními státy. Zapříčiněno to nejspíše bude velkým množstvím EES zařízení, generující malé množství výkonu, které je však v konečném součtu srovnatelné se státy jako Čína a Japonsko.

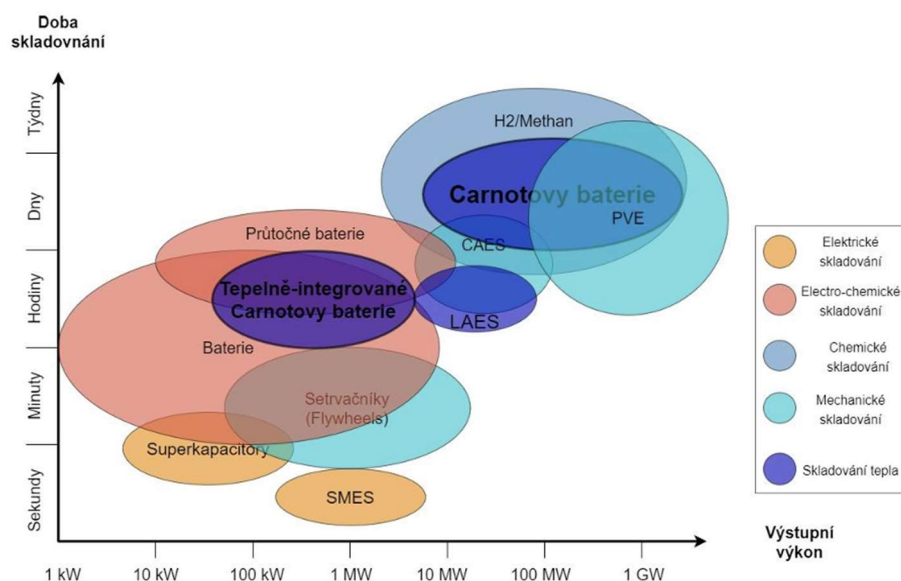
3. Rozdělení technologií akumulace energie

Doposud známé technologie akumulace energie mají velmi široký rozsah využití, které může mít také mnoho podob, od akumulací v menších objemech pomocí baterií v běžných domácnostech až po akumulaci aplikovanou k sledování a následné vyrovnání zatížení sítě nebo jako pohotovostní rezerva. Vzhledem ke značným diferencím použití akumulace je nutné, aby i použití jednotlivých technologií bylo rozdílné. Omezení v použití může být například velikost, rychlost nabití nebo čas, po který je možné elektrickou energii akumulovat. Nejčastěji se systémy EES rozdělují dle formy energie, na kterou elektrickou energii přeměníme na: [5][6]

- Mechanické
- Elektrické
- Elektrochemické
- Chemické
- Tepelné

Je nutné zmínit, že výčet těchto druhů technologií není zcela kompletní, jelikož různých typů technologií akumulace energie je velké množství. Úroveň vývoje těchto jednotlivých technologií jsou rozdílné, např. technologie přečerpávacích vodních elektráren je již téměř plně vyvinutá, oproti různým palivovým nebo solárním článkům, které jsou ještě v počátku vývoje. [5]

Jedny z nejzákladnějších parametrů, které definují vhodnost technologie pro jednotlivé použití v běžné praxi jsou doba skladování a výsledný výstupní výkon celého systému. Na grafu obrázku 5 jsou znázorněny oblasti působení jednotlivých systémů EES. Lze zde vidět, že největší výstupní výkon mají technologie přečerpávacích vodních elektráren (PVE), Carnotovy baterie, vodíkové a systémy akumulace do stlačeného vzduchu (CAES). Výstupní výkony těchto technologií jsou v rozsahu 10 MW až 1 GW s dobou skladování od dní po týdny. Opakem jsou pak superkapacitory, různé druhy chemických baterií nebo například setvačnický, kde jsou výstupní výkony od 1 kW po 1 MW s dobou skladování v jednotkách sekund až hodin. Takto široká škála těchto dvou parametrů je velmi výhodná z důvodu širokého spektra využití při rozdílných aplikacích akumulace energie.



Obrázek 5: Diagram oblasti působení rozdílných technologií EES, převzato z [7]

4. Systémy akumulace mechanické energie

Systémy mechanického skladování energie (MESS) jsou vzhledem k průmyslovému použití akumulace energie velmi příznivá. Jejich hlavními výhodami jsou nízký dopad na životní prostředí, náklady na provoz a udržitelnost. Největší výhodou je ale rychlost zpětné přeměny energie na elektrickou, což je důležitý parametr, díky kterému jsou tyto technologie tak často využívány. Hlavními třemi druhy mechanických systémů jsou akumulace energie pomocí setrvačníků (FESS), přečerpávací vodní elektrárny (PVE resp. PHES v anglickém jazyce) a skladování energie ve stlačeném vzduchu (CAES). Další možné formy MESS jsou kapalinové písky, gravitační skladování a mechanické pružiny. Ty ale v současné době nejsou příliš často používány a z toho důvodu se jimi nebudu dále zabývat.

Pokud nastane fáze nízké poptávky, tak se elektrická energie přeměňuje na energii mechanickou ve formě kinetické-setrvačnický (FESS), potenciální-přečerpávací vodní elektrárny (PHES) a v případě technologie stlačeného vzduchu (CAES) je to, jak název napovídá, ve formě stlačeného plynného média. [8]

4.1 Akumulace energie pomocí setrvačníků (FESS)

4.1.1 Princip fungování technologie FESS

Systémy skladování energie pomocí setrvačníků (FESS) pracují, jak již bylo zmíněno, na principu akumulování energie ve formě kinetické energie setrvačnicku (rotoru), který se otáčí vysokou úhlovou rychlostí. Nabíjecí (ukládaná) energie se přivádí do setrvačnicku a ukládá se jako kinetická energie. Tuto uloženou energii lze pak dle potřeby zpětně přeměnit na elektrickou energii. V porovnání s technologiemi PHES a CAES, které jsou technologiemi pro dlouhodobou akumulaci energie (jak lze vidět na obrázku 3), jsou systémy FESS pro aplikace s akumulací krátkodobou. [8][9]

4.1.2 Zařízení a komponenty technologie FESS

Kinetická energie se přenáší do setrvačnicku, a následně ze setrvačnicku do sítě pomocí elektrického stroje, který funguje ve dvou režimech. Při roztáčení setrvačnicku (dodávání elektrické energie) elektrický stroj pracuje jako motor a v režimu vybíjení (odebírání elektrické energie) jako generátor elektrické energie. Obecně se tedy elektrický stroj v technologiích FESS používá k přeměně elektrické energie na energii kinetickou a naopak. Nejčastěji se používají synchronní motory s permanentními magnety (PMSM), asynchronní (též indukční) motory (IM) nebo spínací reluktanční motory (SRM). Používají se i jiné typy, avšak tyto 3 jsou nejčastěji využívány pro systémy FESS. Pro jmenovitý výkon setrvačnicku je rozhodující konstrukce tohoto motor/generátoru, včetně hustoty výkonu a proudové zatíženosti. Výčet výhod a nevýhod výše zmíněných elektrických strojů (motor/generátorů) je znázorněn v tabulce 2. [10][11]

Typ motoru	Výhody	Nevýhody
PMSM	vysoká hustota výkonu vysoká účinnost malé rozměry	vyšší náklady demagnetizace méně odolné vyšší ztráty při volnoběhu
IM	nižší náklady větší odolnost jednoduchá konstrukce	nízká hustota výkonu nižší účinnost
SRM	nedochází k demagnetizaci větší odolnost jednoduchá konstrukce	komplexní řízení méně vyspělá technologie

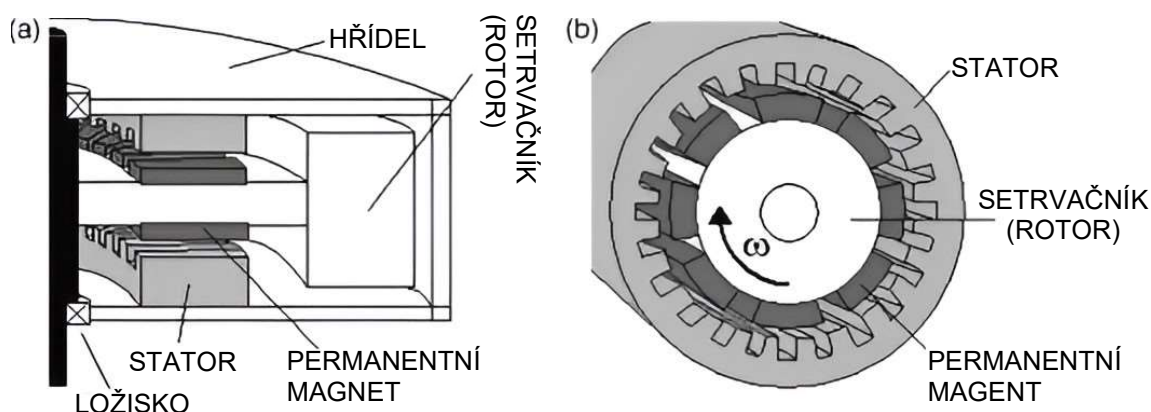
Tabulka 2: Srovnání výhod a nevýhod elektrických strojů používaných v technologiích FESS [11]

PMSM – Synchronní motor s permanentními magnety je motor pracující na střídavý proud, který pro vytvoření magnetického toku místo budícího vinutí využívá permanentní magnety, které mají pevně stanovenou polaritu a vytvářejí konstantní magnetické pole, čímž vytvářejí požadovaný točivý moment na rotoru. Synchronní motory, jak je z názvu patrné, synchronizují otáčky rotoru s otáčkami pole ve statoru, tedy rotor rotuje v synchronním poměru s magnetickým polem statoru. [12]

IM – Asynchronní motor nebo také indukční motor je typ elektromotoru, který pracuje na střídavý proud. Princip jeho funkce spočívá v pohybu rotoru díky elektromagnetické indukci způsobené již zmíněným střídavým proudem, který prochází vinutím statoru. Tímto způsobem se vytváří točivý moment, který pohání rotor. [12]

SRM – Spínací reluktanční motor využívá principu reluktance k vytváření točivého momentu, tedy vytváření magnetického pole v statoru, které následně přitahuje nespárované části rotoru k sobě, čímž se vzniká točivý moment na rotoru. Řízení těchto motorů zahrnuje postupné spínání fází statoru pomocí elektroniky, která optimalizuje vytváření magnetického pole a tím i výkon motoru. [12]

Motor/generátory typu PMSM se používají ve dvou typech, a to s axiálním nebo radiálním uspořádáním permanentních magnetů (AFRM a RFPM). Znázornění těchto dvou typů motor/generátoru je na obrázku 6.



Obrázek 6: Uspořádání motor/generátoru PMSM a) typ AFRM b) typ RFPM, převzato a upraveno z [13]

Na rozdíl od radiálních (RFPM) mohou mít axiální (AFPM) dvě pracovní plochy (použití obou typů lze vidět také na obrázku 7). Na obrázku 6 lze také vidět použití buď s dvěma rotory kombinované s jedním státorem, nebo jeden rotor kombinovaný se

dvěma statory. Hlavními výhodami použití stroje se dvěma pracovními plochami je zvýšení výkonu, rovinně nastavitelnou vzduchovou mezerou a snadné uspořádání chlazení, což je důležité při práci za nízkého tlaku. [13]

Rotory setrvačnicků se nejčastěji vyrábí z oceli, ocelolitinu a kompozitních materiálů. Můžeme je dále rozdělit na pomaloběžné s otáčkami od 5 000 ot./min a na rychloběžné s otáčkami do 50 000 ot./min. Existují však také lehké setrvačnický, které pracují s otáčkami až 100 000 ot./min. Tento parametr je stěžejním při výběru materiálu setrvačnicku, kdy u pomaloběžných je možné zvolit ekonomicky příznivější ocel, avšak u rychloběžných se vzhledem k vyšší pevnosti za rotace volí i přes vysokou cenu kompozitní materiály. [10][14]

Výzkum v oblasti kompozitních setrvačnicků se zaměřuje především na zlepšení jejich měrné energie. Existuje totiž přímá souvislost mezi poměrem pevnosti materiálu k hustotě hmoty a měrnou energií setrvačnicku. Kompozitní materiály se vyznačují nízkou hustotou a vysokou pevností v tahu. Jelikož jsou ale kompozitní materiály anizotropní, mají vyšší podélnou pevnost v tahu, ale mnohem nižší pevnost v tahu v radiálním směru, což významně omezuje jejich energetickou kapacitu. Řešením této nežádoucí vlastnosti je nalisování za tepla několik kompozitních prstenců na sebe, čímž docílíme snížení napětí v radiálním směru. Kompozitní setrvačnick obvykle obsahuje několik různých materiálů, jako jsou uhlíková vlákna, skleněná vlákna a epoxid. Často se provádí optimalizační proces pro nalezení optimálního návrhu s ohledem na tloušťku válce, přísadků na smrštění a různou kombinaci materiálů. [11]

Ocelové setrvačnický jsou často řazeny do kategorie starých a méně účinných. Řada nových nedávno vyvinutých projektů FESS, a to jak na ve výzkumu, tak v průmyslu, je založena na vysokopevnostní oceli pro jejich konkurenceschopné náklady a širší dostupnost na trhu. Srovnání hustoty, pevnosti v tahu a nákladů mezi kompozitem a ocelí je shrnuto v tabulce 3. Například uhlíkové vlákno Carbon T1000 má sice nižší hustotu (20 % hustoty oceli) a vyšší pevnost v tahu (zhruba o 26 % vyšší než ocel), ale jeho pořizovací cena je téměř stokrát vyšší. Z hlediska nákladů jsou tak systémy FESS na bázi vysokopevnostních ocelí vhodnější pro sériovou výrobu. Srovnávací studie [15] dospěla například k závěru, že pro aplikace FESS, kde je potřeba maximalizovat poměr akumulované energie a pořizovacích nákladů, jsou kovy lepší variantou než kompozitní materiály rotorů. [11]

Materiál	Hustota [kg/m ³]	Pevnost v tahu [MPa]	Měrná energie [Wh/kg]	Cena [\$/kg]
Ocel 4340	7700	1520	50	1
S2-glass	1920	1470	210	24,6
Carbon T1000	1520	1950	350	101,8
Carbon AS4C	1510	1650	300	31,3

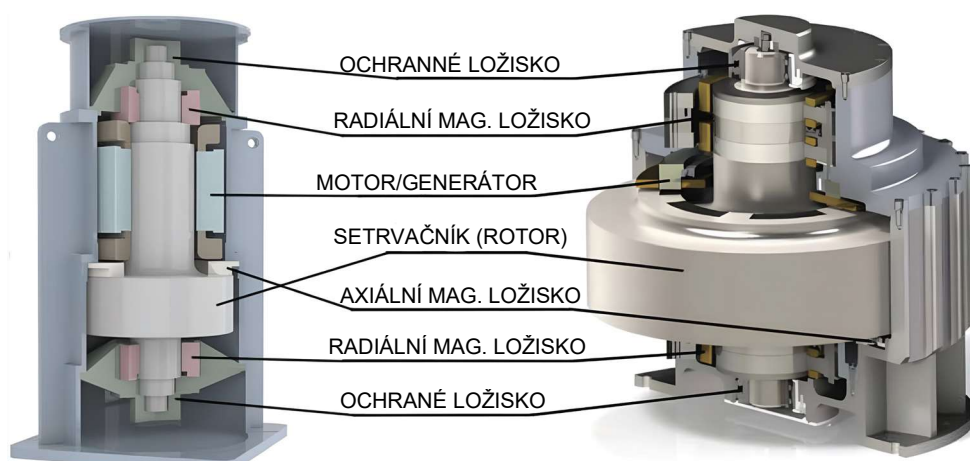
Tabulka 3: Srovnání parametrů různých materiálů setrvačnicků [11]

Ocel 4340 – Značená také jako AISI 4340. Z důvodu dostupnosti je nahrazena evropskými normami 36CrNiMo4, EN24 a 1.6511. Je to středně uhlíková, nízko legovaná ocel, známá pro svoji vysokou houževnatost a pevnost.

S2-glass – Skelná vlákna používaná v kompozitních materiálech. Jsou vyráběna z taveniny skleněných materiálů.

Carbon T1000 – Jsou uhlíková vlákna, která se používají v kompozitních materiálech.

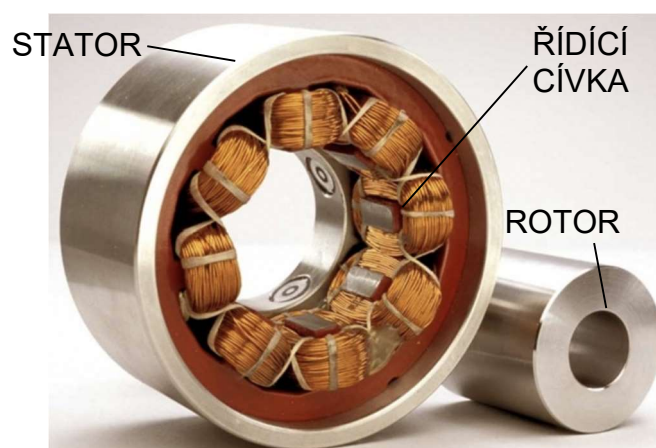
Carbon AS4C – Těž uhlíková vlákna používaná v kompozitních materiálech. AS4C je součástí řady AS4 uhlíkových vláken vyvinutých firmou Hexcel.



Obrázek 7: Schéma konstrukce setrvačníku, převzato a upraveno z [16]

Jednou z nejdůležitějších mechanických součástí pro správný, a hlavně energeticky výhodný, chod v systémech FESS jsou ložiska, ve kterých je uložena hřídel setrvačníku. V konstrukci těchto strojů se používají dva typy ložisek, mechanická a magnetická. Mechanická ložiska se obvykle používají pro již zmíněné pomaloběžné setrvačnické rotory. Mají však značné nevýhody, jako je vysoké tření, tím pádem i vysoké tepelné ztráty, potřeba mazání a údržby a nízkou životnost. Magnetická ložiska vlivem elektrického a magnetického pole levitují kolem hřídele bez jakéhokoliv fyzického kontaktu. Tím pádem díky nízkému tření tato ložiska snižují ztráty a díky tomu může celý systém dosahovat větších otáček, používají se tedy především u rychloběžných setrvačnických rotů. [10]

Existují dále dva typy magnetických ložisek, pasivní a aktivní. Pasivní ložiska jsou vyrobena z permanentních magnetů, zatímco aktivní se skládá z cívek a systému zpětné vazby (jak si lze povšimnout na obrázku 8), díky čemuž jsou stabilnější než pasivní ložiska, ale bohužel také dražší. Použitím magnetického ložiska lze zvýšit otáčky hřídele, s tím se ale také zvyšuje aerodynamické tření, které způsobuje aerodynamické ztráty. K eliminaci těchto ztrát jsou rotor (setrvačnický rotor) a magnetické ložisko uzavřeny do krytu, ve kterých je vakuum nebo helium. Tato kombinace je nyní velmi drahá, ale očekává se, že v budoucnu se jejich náklady sníží a jejich použití v systémech FESS bude ekonomičtější. [10]



Obrázek 8: Magnetické radiální ložisko (aktivní), převzato a upraveno z [17]

4.1.3 Technické parametry technologie FESS

Kinetická energie uložená v setrvačnicku (rotoru) je dána tvarem a materiálem setrvačnicku. Je lineárně úměrná momentu setrvačnosti a kvadrátu jeho úhlové rychlosti

$$E = \frac{1}{2}J\omega^2, \quad (4.1)$$

kde E je uložená kinetická energie (J), J moment setrvačnosti ($\text{m} \cdot \text{s}^2$) a ω úhlová rychlost (s^{-1}).

Z rovnice (4.1) je patrné, že nejefektivnějším způsobem, jak zvýšit akumulovanou energii je zvýšit úhlovou rychlost. Elektricky poháněný setrvačnick obvykle pracuje v daném rozmezí úhlových rychlostí, aby se zabránilo příliš velkému kolísání napětí a aby se omezil maximální krouticí moment motoru/generátoru pro daný jmenovitý výkon. Kinetickou energii setrvačnicku v rozsahu minimálních otáček (ω_{min}) a maximálních otáček (ω_{max}) lze určit ze vztahu [18]

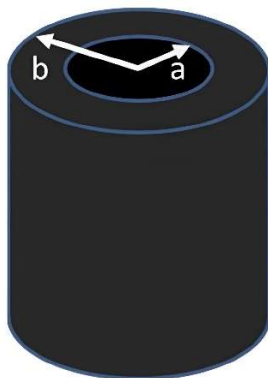
$$E = \frac{1}{2}J(\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2) = \frac{1}{2}J\omega_{max}^2 \left(1 - \frac{\omega_{min}^2}{\omega_{max}^2}\right). \quad (4.2)$$

Již zmíněný moment setrvačnosti je funkcí hmotnosti setrvačnicku a jeho tvaru. Setrvačnicky jsou nejčastěji konstruovány jako plné nebo duté válce, od tenkých diskových až po silnostěnné bubnové. Pro plný váleček je moment setrvačnosti dán vztahem

$$J = \frac{1}{2}mr^2, \quad (4.3)$$

kde m je hmotnost setrvačnicku (kg) a r jeho poloměr (m). Pro dutý váleček s vnitřním poloměrem a a vnějším poloměrem b , jak je znázorněno na obrázku 9, je moment setrvačnosti [18]

$$J = \frac{1}{2}m(b^2 - a^2). \quad (4.4)$$



Obrázek 9: Dutý setrvačnick se zakótovaným vnitřním a vnějším poloměrem, převzato z [18]

Pro setrvačnick s tloušťkou h (m) a hustotou ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) je moment setrvačnosti

$$J = \frac{1}{2} \pi \rho h (b^4 - a^4). \quad (4.5)$$

Pak kinetická energie tohoto setrvačnicku bude

$$E = \frac{1}{4} \pi \rho h \omega^2 (b^4 - a^4). \quad (4.6)$$

Výsledná elektrická energie získaná na svorkách elektrického generátoru E_s pak tedy bude

$$E_{sv} = \frac{1}{4} \pi \rho h \omega^2 (b^4 - a^4) \eta_G, \quad (4.6)$$

kde η_G je účinnost elektrického generátoru (1).

Výkon je definovaný jako časová derivace energie neboli rychlost změny energie v čase. Jelikož lze předpokládat, že hustota materiálu a rozměry setrvačnicku budou v čase konstantní, lze vyjádřit vztah pro generovaný výkon jako

$$P = \frac{dE_{sv}}{dt} = \frac{1}{4} \pi \rho h \frac{d\omega^2}{dt} (b^4 - a^4) \eta_G = \frac{1}{2} \pi \rho h \alpha^2 t (b^4 - a^4) \eta_G, \quad (4.7)$$

kde α je úhlové zrychlení (resp. zpomalení) (s^{-2}) a t čas potřebný k vybití veškeré kinetické energie naakumulované v setrvačnicku (s).

Výsledná účinnost celého systému FESS η_{FESS} je dána vztahem

$$\eta_{FESS} = \frac{E_{vyrobená}}{E_{dodaná}}, \quad (4.8)$$

kde $E_{vyrobená}$ odpovídá elektrické energii získané na svorkách generátoru při fázi vybití a $E_{dodaná}$ je elektrická energie dodávaná motoru při fázi nabíjení.

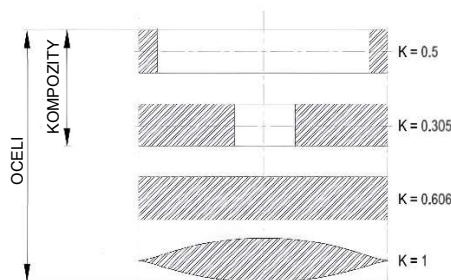
Mezní úhlová rychlost setrvačnicku je dána napětím, které v setrvačnicku vzniká v důsledku setrvačných sil, které nesmí překročit dovolenou pevnost materiálu v tahu σ_{dov} (MPa). Vliv geometrie rotoru lze zohlednit pomocí tzv. koeficientem tvaru setrvačnicku K . Maximální specifická energie (energie na jednotku hmotnosti) a maximální hustota energie (energie na jednotku objemu) pak budou [18]

$$\frac{E}{m} = K \frac{\sigma}{\rho} \quad (4.9)$$

$$\frac{E}{V} = K \sigma, \quad (4.10)$$

kde σ je napětí v setrvačnicku odpovídající úhlové rychlosti setrvačnicku.

Z rovnic (4.9) a (4.10) vyplývá, že specifická energie a hustota energie setrvačnicku závisí na jeho tvaru, kterým je vyjádřen již zmíněným koeficientem tvaru K . Tvar setrvačnicku je důležitým faktorem pro určení mezní úhlové rychlosti setrvačnicku, a tedy i maximální kinetické energie, kterou lze naakumulovat. Koeficient tvaru K je parametr, který definuje, s jakou efektivitou dokáže geometrie setrvačnicku využít pevnost materiálu pro uložení energie. Pro případ rovinného namáhání a materiál z homogenního izotropního materiálu jsou na obrázku 10 znázorněny hodnoty K pro nejběžnější typy geometrií setrvačnicků. Lze zde vidět, že maximální hodnoty $K = 1$ se může dosáhnout s použitím tzv. kotouče konstantního napětí, kde se tloušťka kotouče mění tak, aby v každé vzdálenosti od osy bylo stejné radiální napětí. [18]



Obrázek 10: Průřezy různých typů setrvačnicku, převzato a upraveno z [18]

Průměrná hodnota měrného množství akumulované energie je u pomaloběžných setrvačnicku od 5 Wh/kg a do 100 Wh/kg u rychloběžných setrvačnicků. Ty největší setrvačnicku s hmotností v desítkách tun jsou schopny akumulovat energie až 5 MJ, tj. až 1,38 MWh. Systémy FESS jsou jedny z nejpoužívanějších technologií ESS vůbec. Jejich hlavní charakteristikou je nízká hustota energie a vysoká hustota výkonu, díky čemuž je vhodný na krátkodobé aplikace (což je dokumentováno na obrázku 3), kdy jsou schopny vygenerovat velké množství energie v jednotkách sekund až minut. Největšími výhodami jsou vysoký měrný výkon v kombinaci s vysokou účinností (kolem 90 %), ale také dlouhá životnost (ta je dána mechanickým opotřebením rotující části a průměrně činí 20 let), vysoký počet cyklů nabití a možnost hlubokého vybití. Ačkoli má poměrně vysoké investiční náklady (5000 \$/kWh), má nízké roční náklady na provoz a údržbu (19 \$/kWh). Výhodou je pak také udržitelnost této technologie bez znečišťování okolí. [10][11]

Nevýhodou jsou pak vysoké počáteční náklady a vysoká četnost samovybití, která je způsobena odpory proti pohybu, zejména kvůli tření mezi pláštěm rotoru a okolním prostředím a energetickými ztrátami v uložení (mechanické a elektrické), až ~20 % samovybití uložené kapacity za hodinu. [11][19]

Parametr	Hodnota
Jmenovitý výkon [MW]	0,1 - 20
Účinnost [%]	90-95
Jmenovitá energetická kapacita [MWh]	0,005-1,38
Hustota energie [Wh/l]	20-80
Reakční doba	milisekundy-sekundy
Čas vybití	15 s-15 min
Životnost [cykly]	20000+

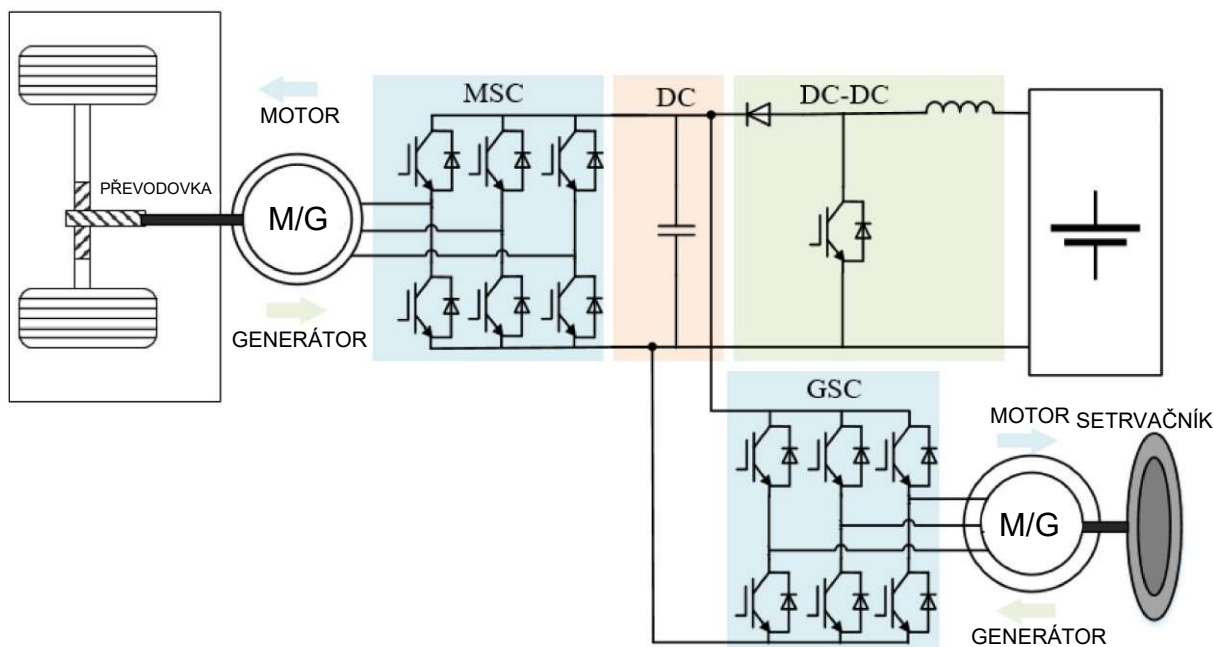
Tabulka 4: Základní technické parametry technologie FESS [19]

4.1.4 Použití technologie FESS

Systémy FESS se při průmyslovém použití často srovnávají se systémy akumulace energie pomocí baterií (BESS). Toto srovnání je logické, vzhledem k jejich podobným parametrům vhodných pro akumulaci elektrické energie. Této podobnosti si lze také všimnout na obrázku 3, kde mají tyto dvě technologie akumulace energie podobné doby skladování a podobný výstupní výkon. Výhodou systémů FESS oproti systémům BESS je rychlá odezva, tedy větší rychlost nabíjení a vybíjení, která je u BESS vzhledem k vnitřnímu chemickému procesu podstatně pomalejší a počet jejich cyklů je též značně omezený. Dalším faktorem je životnost baterie, která je u FESS výrazně větší. Systémy FESS jsou také na rozdíl od BESS, které obsahují chemický materiál, šetrné k životnímu prostředí a neznečišťují životní prostředí. [10]

Aplikace systémů FESS se s postupným zdokonalováním rozšiřují do různých oblastí s různými účely, jako např. ve vozidlech, vesmírných a vojenských projektech. Také v technologiích FACT, či UPS a také integrací do výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie.

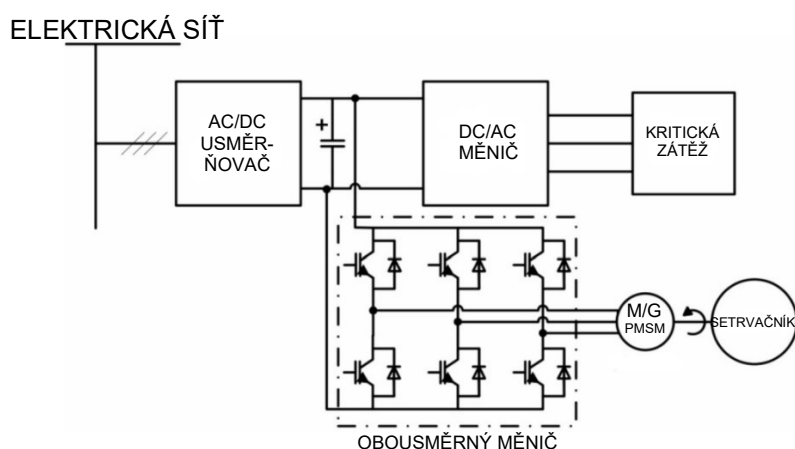
Mnoho trakčních a vozidlových aplikací využívá FESS jako akumulační systém, který může ukládat určité množství energie. Na obrázku 11 je znázorněn systém FESS v elektromobilu, který usnadňuje rekuperační brzdění a nárazové dodávání energie. Použití systémů FESS snižuje znečištění a ztráty, zvyšuje účinnost a má rychlejší odezvu, nižší hmotnost, vyšší kapacitu a kratší dobu vybíjení ve vozidlech a vlcích ve srovnání s běžnými bateriemi (BESS). V aplikacích kosmických lodí a letadel se systémy FESS využívají pro řízení polohy, řízení hybnosti, primární skladování elektrické energie a záložní systémy skladování energie. FESS s vysokým výkonem mohou také uchovávat sluneční energii získanou fotovoltaickými panely a poskytnout ji kosmické lodi na oběžné dráze na noc. [10][20]



Obrázek 11: Aplikace systému FESS v elektromobilu, převzato a upraveno z [20]

Systémy FESS mají významné zastoupení také v technologiích FACT, které se používají k řízení a optimalizaci přenosu elektrické energie a v sítích střídavého proudu (AC). Tyto technologie přináší různé výhody, včetně zlepšení spolehlivosti a stability sítě, zvýšení přenosové kapacity a optimalizace provozní efektivity. Jednou z hlavních součástí, které mohou ovlivnit zařízení FACT, jsou systémy ESS. Právě FESS je díky své vysoké rychlosti odezvy jedním z nejlepších alternativ pro tyto aplikace. [10]

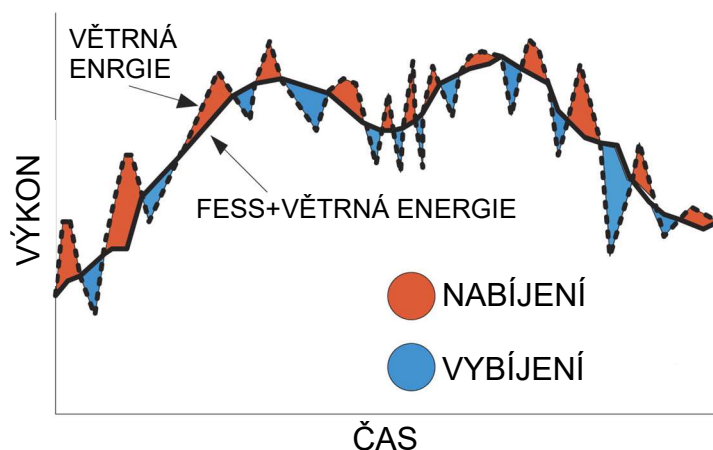
Efektivní použití FESS je také v systémech UPS, což jsou zařízení navržena k poskytování dočasné záložní energie pro elektrická zařízení v případě výpadku nebo nestabilního napájení z hlavní elektrické sítě. Jedno ze základních zapojení UPS s FESS je znázorněno na obrázku 12. Napájecí síť dodává kritické zátěži energii prostřednictvím dvou výkonových elektronických měničů. Ty fungují jako usměrňovače AC/DC a měnič DC/AC. FESS je připojen k systému UPS prostřednictvím stejnosměrného propojení mezi dvěma měniči, tímto způsobem je napětí na stejnosměrné sběrnice přesně regulováno pomocí FESS. [21]



Obrázek 12: Základní zapojení FESS v UPS, převzato a upraveno z [21]

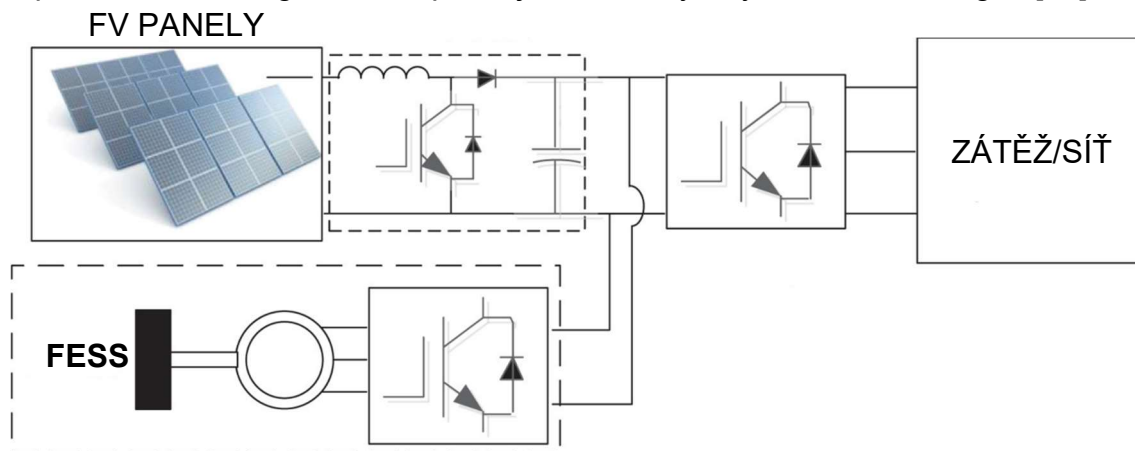
FESS v zapojení na obrázku 12 pracuje ve třech režimech a to 1) nabíjení, 2) pohotovostní režim a 3) vybíjení. V režimu nabíjení dodává elektrická síť energii do setrvačnicku prostřednictvím AC/DC a obousměrného měniče. Když setrvačnick zrychlí na jmenovitou rychlost, FESS přejde do pohotovostního režimu, v němž se udržuje malý nabíjecí proud, aby se udržovala jmenovitá rychlost. Pokud dojde k výpadku napájení, tedy k potřebě přeměnit zpět naakumulovanou energii, přejde FESS do vybíjecího režimu. Motor/generátor nyní pracuje jako generátor, který dodává energii kritické zátěži. Když se elektrická síť po výpadku obnoví, FESS opět přejde do nabíjecího režimu a je opět připraven na výpadek napájení. [21]

Některé zdroje energie v energetické soustavě mají kolísavý charakter, což významně snižuje jejich spolehlivost. Typickým příkladem jsou obnovitelné zdroje energie, jako je např. výroba elektrické energie z větru, které jsou známé nestálým a nepředvídatelným charakterem generovaného výkonu. Systémy FESS se tedy v těchto systémech používají jako zařízení pro vyhlazování výkonu a snižování špiček výroby. Na obrázku 13 je graficky znázorněn účinek FESS při vyhlazování výstupního výkonu generovaného větrnou elektrárnou. [10]



Obrázek 13: Výkon větrných elektráren s použitím a bez použití systému FESS, převzato a upraveno z [10]

Z obrázku 13 je také patrné, že i po vyhlazení výstupního výkonu systémem FESS je trend křivky výstupního výkonu z větrné elektrárny poměrně nestálý. To ovšem způsobuje také kolísání napětí a frekvence elektrizační soustavy. Ke stabilizaci těchto parametrů se také používají systémy FESS. Udržení frekvence sítě, tedy 50 nebo 60 Hz, je nezbytné pro stabilitu a spolehlivost elektrizační sítě, což je hlavní prioritou při výrobě elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Na obrázku 14 je ukázáno právě využití systémů FESS spolu s fotovoltaickými panely, které přeměňují energii slunečního záření na energii elektrickou. Sluneční záření se však během dne nebo ročního období výrazně mění, vyrobená elektrická energie tak tedy není konstantní. Systémy FESS zde proto vhodnou regulací kompenzují kolísání výroby elektrické energie. [10]



Obrázek 14: Aplikace systému FESS s fotovoltaickými panely, převzato a upraveno z [10]

V roce 2011 byla v New Yorku uvedena do komerčního provozu modulární elektrárna o výkonu 20 MW postavená společností Beacon Power. Využívá 200 jednotek vysokorychlostních setrvačnickových systémů FESS, které poskytují síti služby regulace frekvence s rychlou odezvou a zajišťují ~10 % celostátní potřeby regulace frekvence. V tabulce 5 jsou uvedeny další komerční projekty systémů FESS. [19]

Firma/instituce	Charakteristické parametry	Oblast použití
Active Power Company	Zařízení řady Clean Source 100-2000 kW	Záložní zdroj energie, systémy UPS
Beacon Power Company	100/150 kW na jednotku, 20 MW/MWh celé zařízení	Regulace frekvence, kvalita energie
Boeing Phantom Works	100 kW/5 kWh, vysokoteplotní magnetická ložiska	Kvalita energie, vyhlazování výkonu
Japan Atomic Energy Center	235 MVA, ocelový setrvačnick	Dodávka vysokého výkonu do jaderné fúzní pece
Piller power systems Ltd.	1500-3600 ot./min, 2,4 MW generovaný za 8 s	Průběžné napájení a zdroj záložního napájení
NASA Glenn research center	$2 \cdot 10^4$ - $6 \cdot 10^4$ ot./min, 3,6 MWh	Zásobování energie v letectvém a kosmickém průmyslu

Tabulka 5: Vybrané komerční projekty systémů FESS [19]

4.2 Přečerpávací vodní elektrárny (PHES)

4.2.1 Princip fungování technologie PHES

Přečerpávací vodní elektrárna (PHES) je dalším ze způsobů mechanické akumulace energie (MESS), který akumuluje elektrickou energii ve formě hydraulické potenciální energie. Přečerpávací vodní elektrárna se skládá ze dvou nádrží, dolní a horní akumulární, které mezi sebou mají výškový rozdíl, díky kterému vzniká již zmíněná hydraulická potenciální energie. V době nízké poptávky po elektrické energii (např. v noci), je voda čerpána pomocí čerpadla (reverzní turbíny) z dolní do horní akumulární nádrže v tzv. čerpadlovém režimu. Následně v době, kdy nastane fáze vysoké poptávky po elektřině, začne elektrárna pracovat v tzv. turbínovém režimu, kdy je tato voda z horní akumulární nádrže vypouštěna do dolní nádrže, čímž se její potenciální energie mění na energii kinetickou. Tato kinetická energie roztáčí turbínu a přes generátor se zpětně vytváří elektrická energie. [9][22]

Z hlediska základního uspořádání existují dva hlavní typy systémů PHES: [23]

- **s umělou (sekundární) akumulací** – Tento druh PHES se vyznačuje uzavřeným koloběhem vody mezi dolní a horní nádrž. Zpravidla umělá horní akumulární nádrž není napájena přirozeným přítokem vody, její napouštění, resp. vypouštění je tedy závislé pouze na čerpání, resp. vypouštění pomocí turbíny/čerpadla. Příkladem tohoto typu je největší PHES v České republice Dlouhé Stráně, která má uměle vybudovanou horní akumulární nádrž, kterou lze vidět na obrázku 15.
- **se smíšenou (přirozenou a umělou) akumulací** – Naopak PHES se smíšenou akumulací mají horní akumulární nádrž, která má přirozený přítok vody, a to obvykle díky umístění u řeky nebo jiného vodního toku. Dolní nádrž pak plní funkci vyrovnávací nádrže. Tato vodní elektrárna tedy může fungovat jako průtočná, tak i přečerpávací. Jejím příkladem je např. PHES Dalešice.

Oba tyto typy lze dále rozdělit na dalších podskupiny dle způsobu provedení dolních nádrží, dle provedení přivaděčů anebo umístění strojovny. [23]



Obrázek 15: Horní nádrž Přečerpávací vodní elektrárny Dlouhé stráně, převzato z [24]

4.2.2 Umístění technologie PHES

Při budování systémů PHES ovlivňuje volbu místa řada faktorů, jako jsou: [23]

- 1) Topografie terénu – Místa s výrazným převýšením jsou ideální pro výstavbu systémů PHES, jelikož rozdíl nadmořské výšky obou nádrží má přímý vliv na celkový výkon elektrárny.
- 2) Geologické podmínky – Mohou ovlivnit stabilitu stavby systémů PHES, kdy hledáme co nejpevnější horniny, které poskytují stabilní základy pro výstavbu.
- 3) Hydrologické podmínky – Množství dostupné vody a její rovnoměrná sezónní distribuce jsou zásadními kritérii při výběru lokality systémů PHES.
- 4) Vliv na životní prostředí – Při výběru místa je důležité také zvážit možné dopady na životní prostředí, včetně ekosystémů, migrace ryb a potenciálních povodní.
- 5) Technická proveditelnost – Některé terény mohou být technicky velmi obtížné nebo dokonce neproveditelné, a to především v závislosti na velikosti systémů PHES.

Z pohledu dosažení optimální účinnosti celkové akumulace, je dobré splňovat tyto hlavní předpoklady: [23]

- a) Dosažení co největšího obsahu nádrží.
- b) Zajistit co největší výškový rozdíl při co nejmenší délce přivaděčů.
- c) Volba nejvýhodnějšího poměru mezi hlavními parametry použitých strojů, což jsou hlavně průtok, výkon a příkon.
- d) Umístění systémů PHES co nejbližší zdroji spotřeby elektrické energie při maximálním zatížení, s ohledem na minimalizaci ztrát a zajištěním provozní bezpečnosti přenosu.

Z těchto podmínek pro správné umístění systémů PHES je zřejmé, že splnit všechny podmínky současně je možné jen ve výjimečných případech. Z toho se stává volba místa systémů PHES kompromisem mezi jednotlivými podmínkami. Obecně je volba místa, které vyhovuje většině zmíněných parametrů u systémů se sekundární akumulací snazší než u podobných systémů se smíšenou akumulací. [23]

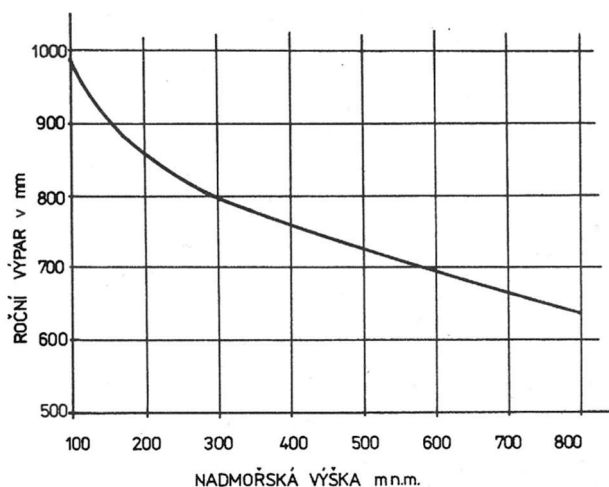
4.2.3 Zařízení a komponenty technologie PHES

Jak již bylo zmíněno, hlavními komponenty přečerpávací vodní elektrárny jsou dvě nádrže, dolní a horní. V těchto nádržích se dle režimu nachází akumulární médium – voda. Jejich velikost a vzájemný výškový rozdíl jsou dva parametry, které nejvíce ovlivňují výsledný výkon systému PHES, a právě proto je jejich návrh velmi významný pro celkový chod. Jak již bylo zmíněno, výstavba horní nádrže se liší dle typu akumulace, kterou ovlivňují topografické a geografické podmínky. Horní akumulární nádrž tedy můžeme být uměle vybudována, a to vyhloubením do hory nebo vytvořením obvodových hrází (umělá akumulace) nebo přírodní, vytvořena přehrazením údolí s přirozeným vodním tokem (smíšená akumulace). Dolní nádrž je pak nejčastěji vytvořena přehrazením vodního toku v nejužším místě údolí nebo pro vytvoření uzavřeného koloběhu vody uměle vybudována mimo přírodní tok. Kromě co možno nejkratšího přivaděče při co možno největším výškovým rozdílem je pro horní akumulární nádrž také důležitý požadavek, aby vtokový objekt byl co nejbližší ke spádu vedoucímu k dolní nádrži. Tím se ušetří náklady na výstavbu vyrovnávací komor, které jsou u aplikací s dlouhými přivaděči s mírným sklonem nutné. Při budování horních akumulárních nádrží je také nutné stavět spíše nádrže s velkou plochou a menší hloubkou užitečného akumulárního prostoru, jelikož tím klesají stavební náklady. Na druhou stranu se tím ale zvětšuje vypařovací a průsaková plocha, je tedy nutné najít optimální kompromis mezi těmito parametry. [23][25]

Výpočet ztrát výparem lze stanovit ze vztahu

$$H_d = 13,5 \cdot \frac{T}{w_r}, \quad (4.11)$$

kde H_d je denní výpar (mm/den), T průměrná měsíční teplota vzduchu ($^{\circ}\text{C}$) a w_r průměrná měsíční relativní vlhkost vzduchu (%). Tento vztah je platný pouze pro $T > 5^{\circ}\text{C}$, pro nižší teploty se pak uvažuje $H_d = 0$. Orientačně je možné roční množství výparu určit z diagramu na obrázku 16 v závislosti na nadmořské výšce horní akumulární nádrže. Procentuální rozdělení ročního výparu na jednotlivé měsíce je pak uvedeno v tabulce 5. [26]



Obrázek 16: Diagram orientačních hodnot průměrného ročního výparu z volné hladiny v závislosti na nadmořské výšce, převzato z [26]

Měsíc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
% ročního výparu	2	2	4	6	11	14,5	18	17	11,5	7	4	3

Tabulka 6: Procentuální rozdělení ročního výparu na jednotlivé měsíce [26]

Při předpokladu, že hladina podzemní vody je rovnoběžná s dnem je možné určit ztrátu vsakem do dna vztahem

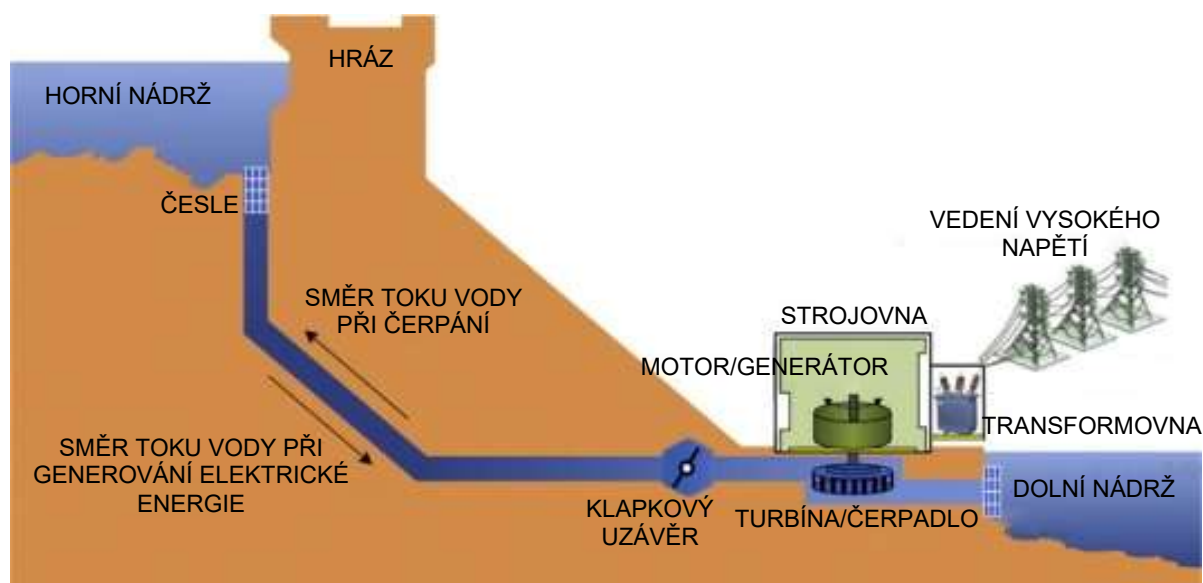
$$Z_d = \frac{p}{100} \cdot (h - h_k) \cdot S, \quad (4.12)$$

kde Z_d je ztráta vsakem do dna (m^3), p průměrná pórovitost materiálu dna nad výškou kapilárního vztlínání (%), h hloubka hladiny podzemní vody pode dnem nádrže (m), h_k kapilární výška (odpovídající materiálu dna nádrže) (m) a S plocha dna nádrže (m^2). [26]

S ohledem ke ztrátám výparem a vsakem, by se měly dolní nádrže stavět na vodním toku za pomoci hráze. Tím je tak možné ztráty výparem a vsakem vykompenzovat prodloužením čerpadlového režimu, kdy dojde k navýšení objemu vody právě o úbytek způsobený těmito ztrátami. [23]

Dle použitého materiálu lze nádrže rozdělit na: [25]

- Zděné
- Z lomového zdiva
- Betonové gravitační nebo klenbové
- Železobetonové klenuté
- Zemní
- Hlinité
- Balvanité



Obrázek 17: Schéma přečerpávací vodní elektrárny, převzato a upraveno z [19]

Pro dopravování vody z horní akumulární do dolní nádrže (nebo naopak) a jejich vzájemné spojení slouží již zmíněné přivaděče. Při návrhu systémů PHES je velmi zásadním parametrem přivaděčů jejich sklon $\Delta h/L$. Je to poměr mezi výškovým rozdílem hladin dolní a horní nádrže (Δh) a délkou přivaděčů (L). Vhodnou lokalitou systému PHES lze minimalizovat délku přivaděčů a zvýšit tím efektivitu celého systému. V praxi se ukázalo, že při malém poměru $\Delta h/L$ (řádově $< 0,10$), je vyrovnávání nízkých a krátkodobých výkyvů zatížení sítě velmi obtížné a nevhodné. Dle topografických a geologických podmínek jsou přivaděče v podzemí ve formě tlakových šachet nebo tunelů vylámaných ve skále. Při určitých podmínkách mohou být přivaděče také vedeny po povrchu jako potrubí, ty se však většinou z bezpečnostních nebo estetických důvodů zasypávají. Pro stanovení správného průměru tohoto potrubí je nutné vzít v potaz obousměrný tok vody a s tím spojené jiné parametry proudění při čerpadlovém a turbínovém režimu. Při turbínovém režimu bývá většinou podstatně větší průtok a tím i rychlost proudění vody než v režimu čerpadlovém. Pozornost je třeba také věnovat tlakovým změnám v přivaděčích při obou režimech, zvláště v jejich horní části. Při turbínovém režimu bývá horní část vystavena jen malým statickým tlakům a nepatrnému podílu dynamického zvýšení tlaku, ovšem při režimu čerpadlovém je vystaven mnohem větším tlakovým změnám statickým i dynamickým, které jsou závislé na charakteristice čerpadla a uzavěry přivaděče. Maximální možný tlak v přivaděčích může nastat při čerpadlovém provozu, kdy se následkem poruchy nebo chybné manipulace uzavře rychlouzávěr. Na tento tlak tak tedy musí být průměr potrubí dimenzován. [23][25]

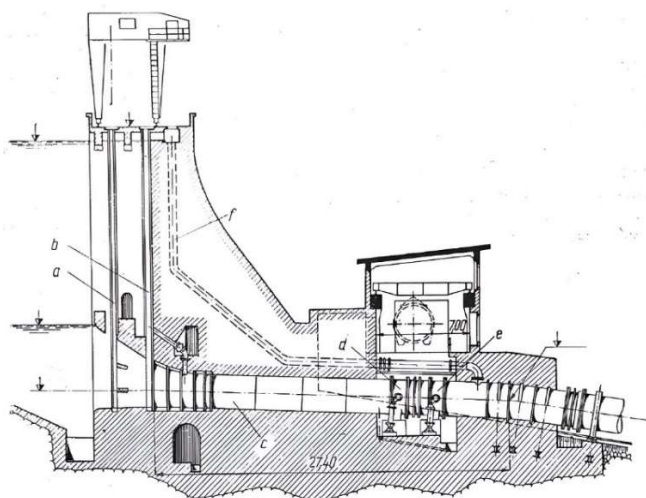
Prouděním vody v přivaděčích vznikají také podstatné ztráty. Vzhledem k tomu, že v systémech PHES jsou přivaděče velmi dlouhé, se při výpočtech uvažují především třecí ztráty a místní ztráty se zanedbávají. Třecí ztráty v kruhovém potrubí (přivaděči) lze určit pomocí Darcy-Weisbachovy rovnice

$$e_z = \lambda \frac{l v^2}{d}, \quad (4.13)$$

kde v je střední objemová rychlost ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), l délka potrubí (m), d průměr potrubí (m) a λ součinitel třecích ztrát (1). Součinitel třecích ztrát je dále funkcí střední objemové rychlosti v , viskozity kapaliny ν , průměru a délce potrubí d a l , jeho absolutní drsnosti k , času t , koncentrace příměsí atd. [23][25][27]

Pro zajištění bezpečného a regulovatelného provozu jsou nedílnou součástí přivaděčů v systémech PHES také uzavírací orgány. V oblasti vtoku vody do přivaděčů se nachází česle pro zachytávání větších nečistot jako např. stromy, větve atd. Po česlích se nejčastěji umísťují tabulové nebo klapkové uzavěry (jak lze také vidět na obrázku 17), ty slouží k regulaci průtoku vody do přivaděče a umožňují např. celkové uzavření toku v případě potřeby údržby nebo opravy. Před a za turbínou/čerpadlem se většinou ještě nachází uzavěry, které jsou převážně kulové nebo prstencové, ty umožňují opět regulaci průtoku vody nebo její již zmíněné uzavření. Kulové uzavěry se používají zejména, pokud jsou akumulární čerpadla opatřena natáčivými rozváděcími lopatky, ty však neslouží k regulaci průtoku, ale mají pouze roli automaticky uzavíratelných orgánů. Pokud je na jedno potrubí připojeno více turbín nebo čerpadel, je vhodné použít kulový uzávěr s oboustranným těsněním, což umožňuje revizi jednoho ze soustrojí pod dvojitým uzávěrem bez nutnosti celý přivaděč vyprázdnit a provoz ostatních soustrojí zastavit. U hojněji používaných čerpadel bez natáčivých rozváděcích lopatek jsou

vhodnější prstencové uzávěry, které se používají také jako automatický uzavírací prvek při závadě v dodávce proudu při čerpadlovém režimu, aby se předešlo zpětnému roztáčení čerpadel. [23][25]



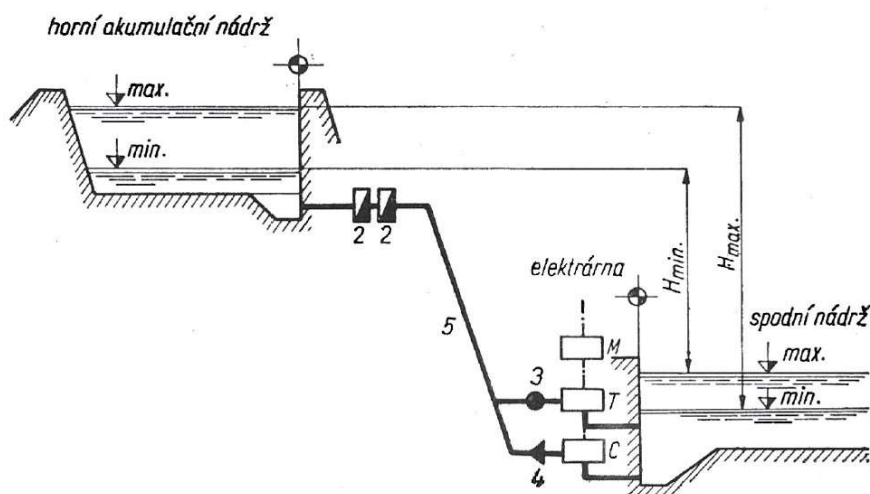
Obrázek 18: Vtokový objekt systému PHEES s klapkovými rychlouzávěry, převzato z [23]

Na obrázku 18 lze také vidět jedno z mnoha možných konstrukčních provedení vtokového objektu do tlakového přivaděče, kde *a* jsou vyťahovací česle, *b* nouzové hrazení před vtokem, *c* pancéřování vtoku, *d* nouzový klapkový uzávěr, *e* klapkový rychlouzávěr a *f* zavzdušňovací potrubí. [23]

Strojovna může být dle uspořádání jednotlivých soustrojí buď horizontální nebo vertikální. Horizontální uspořádání soustrojí, tedy na jednom společném podlaží zvětšuje celkovou přehlednost a hodí se zejména pro menší rozdíl stavů hladin v dolní nádrži. Pro větší rozdíly a pro větší výškový rozdíl mezi oběma nádržemi je však výhodnější vertikální uspořádání soustrojí, a to z důvodu lepšího využití celkového výškového rozmístění jednotlivých zařízení vzhledem k potřebné sací a výtlačné výšce turbín a čerpadel. [23]

V běžném provozu se nejčastěji nachází strojovny s dvoustrojovým, třístrojovým a čtyřstrojovým uspořádáním soustrojí. Díky menším rozměrům, snazší údržbě a nižším nákladům na výstavbu i provoz je nejčastěji používaná varianta dvoustrojového uspořádání. To se skládá pouze z turbínového čerpadla (reverzní turbíny) a motorgenerátoru, tato reverzní turbína pracuje v turbínovém i čerpadlovém režimu, tedy čerpá vodu do horní nádrže jako čerpadlo a při vypouštění vody do dolní nádrže funguje jako turbína. Tento koloběh vody zajišťuje motorgenerátor, ten při čerpadlovém režimu pohání turbínu a při turbínovém režimu generuje elektrickou energii. Třístrojové uspořádání pak vznikne, pokud je soustrojí opatřeno samostatným čerpadlem (jak lze vidět na obrázku 19), zde turbína pracuje pouze v turbínovém režimu a režim čerpadlový zajišťuje již zmíněné samostatné čerpadlo. Pro spojení turbíny a samostatného čerpadla se používají pevné nebo výsuvné spojky, pokud použijeme pevnou spojku, je nutné před přechodem do turbínového režimu zavzdušnit čerpadlo z důvodu předcházení nežádoucích ztrát. Výhodou oproti dvoustrojovému uspořádání je možnost dosažení větších výškových rozdílů mezi nádržemi a vyšší účinnosti, nevýhodou pak zvýšení nákladů na výstavbu a provoz a větší zastavěná plocha. A nakonec čtyřstrojové uspořádání se skládá z turbíny, samostatného čerpadla a zde již rozděleného motoru a

generátoru. To se používá především u systémů PHES, které mají významně velký výškový rozdíl mezi nádržemi anebo pokud se skládají z více akumulčních nádrží. [23]



Obrázek 19: Schéma přečerpávací elektrárny s umělou akumulací a třístrojovým uspořádáním, převzato z [23]

Dalším nezbytným zařízením PHES je vodní turbína, což je rotační hydraulický stroj, který v systémech PHES přeměňuje potenciální energii vody na energii mechanickou ve formě kroutícího momentu na hřídeli motor/generátoru, který pak přeměňuje tuto mechanickou energii na elektrickou. Vodní turbíny lze rozdělit podle: [28]

Změny tlaku vody v pohybovou energii:

- **Rovnotlaké (akční)** – Tlaková energie vody se již před oběžným kolem mění v energii kinetickou pomocí trysky (vodní paprsek). Tento proud vody působí na lopatky oběžného kola po celé délce stejným tlakem. Tlak vody před i za turbínou je stejný. Oběžné kolo je umístěno nad hladinou dolní nádrže, čímž vzniká ztráta spádu, která je však pro turbíny pracující s vysokými spády zanedbatelná. Příkladem je např. Peltonova nebo Bánkiho turbína.
- **Přetlakové (reakční)** – V kanálech rozváděcího kola těchto turbín se část tlakové energie vody mění v kinetickou, zbylá tlaková energie vody (zpravidla větší) se mění až při průchodu oběžným kolem. Zmíněným průchodem vody oběžným kolem se tlak vody snižuje, tlak vody je tak na výstupu řádově menší než na vstupu. V těchto turbínách je tedy využita i tlaková energie vody. Příkladem jsou zde např. Francisova, Kaplanova nebo Deriazova turbína.

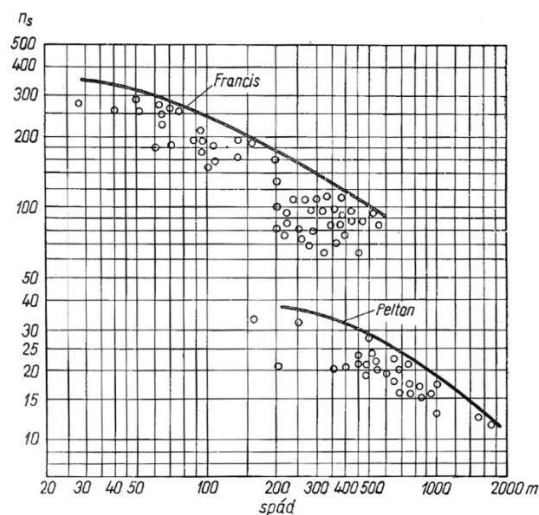
Směru působení vody na oběžné kolo:

- **Axiální** – Voda protéká rovnoběžně s osou oběžného kola turbíny.
- **Radiální** – Voda protéká kolmo k ose oběžného kola turbíny.
- **Radiálně-axiální** – Směr proudu vody se v oběžném kole turbíny mění z radiálního na axiální (Francisova turbína)
- **Tangenciální** – Voda působí na oběžné kolo turbíny v tangenciálním směru.

Polohy hřídele:

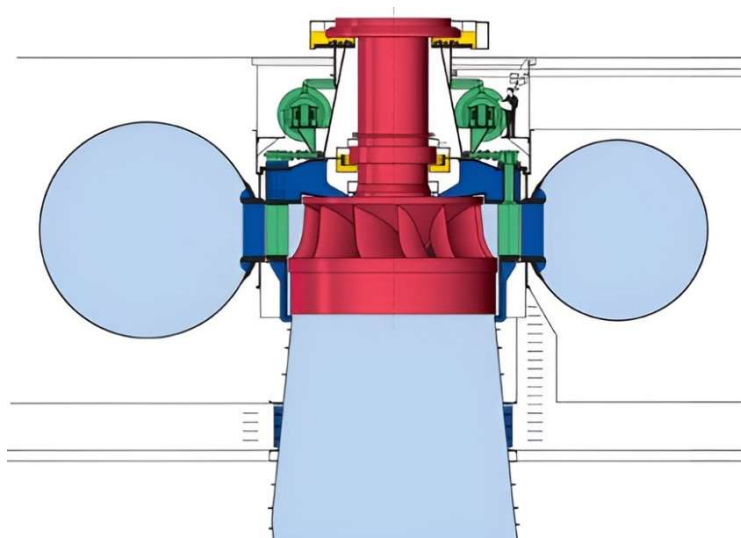
- **Horizontální**
- **Šikmé**
- **Vertikální**

V systémech PHES se nejčastěji používají Francisova a Peltonova turbína, jejich jednotlivé aplikace v systémech PHES se liší především dle výškového rozdílu mezi horní a dolní nádrží (spádu) Δh . Pro spády do 500 m se používají Francisovy turbíny s větší hltností nebo Peltonovy s menší hltností. V určitých aplikacích může Francisova turbína pracovat i se spádem 700 m. U větších spádů se pak používají výhradně Peltonovy turbíny. Obě tyto turbíny mohou být uspořádány horizontálně i vertikálně. Oblasti použitelnosti obou typů turbín v závislosti na spádu a měrných otáčkách jsou znázorněny na obrázku 20. [23]



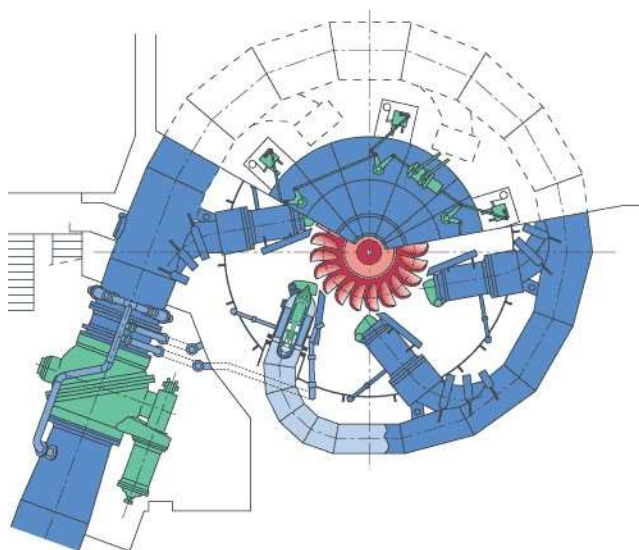
Obrázek 20: Diagram použitelnosti Francisovy a Peltonovy turbíny, převzato z [23]

Nejpoužívanější vodní turbínou v systémech PHES je již zmíněná přetlaková radiálně-axiální Francisova turbína, a to především z důvodu možnosti reverzibility, tedy možnosti použít tuto turbínu také jako čerpadlo při čerpadlovém režimu (jak lze vidět na obrázku 17). Voda je zde přiváděna postupně se zužujícím potrubím a směřována na oběžné lopatky rotoru za pomoci rozváděcích lopatek. Jelikož jsou lopatky oběžného kola upevněny napevno se regulace výkonu provádí natáčením rozváděcích lopatek. Tato turbína je vhodná pro spády od 30 až do 700 m při určitých podmínkách. Vertikální provedení Francisovy turbíny je znázorněno na obrázku 21. [28][29]



Obrázek 21: Vertikální Francisova turbína, převzato z [28]

Druhou nejčastěji používanou vodní turbínou v systémech PHES je rovnotlaká tangenciální Peltonova turbína, která může pracovat až se spádem dvou kilometrů. Oběžné lopatky mají tvar dvojitých korečků a jsou také upevněny napevno. Rozváděcí ústrojí zde tvoří 1-6 dýz, které jsou také zobrazeny na obrázku 22, díky kterým voda vystupuje ve formě paprsku kruhového průřezu, ten ostříkuje oběžné lopatky na jejich roztečném průměru, čímž vzniká žádaný krouticí moment. Regulace je zde zajištěna pomocí zavírání nebo otevírání výtokového otvoru dýzy pohybem regulační jehly. Jelikož u Peltonovy turbíny není možnost reverzibility, používá se turbína v kombinaci s čerpadlem v třístrojovém provedení (turbína-motorgenerátor-čerpadlo). Zde nekoná funkci čerpadla turbína, ale je zde nutnost samostatného čerpadla pro čerpání vody do horní nádrže při čerpadlovém režimu. [25][29]



Obrázek 22: Peltonova turbína, převzato z [28]

Srovnání parametrů těchto dvou zmíněných turbín je prezentováno v tabulce 7. V tabulce si lze všimnout, že při použití Francisovy turbíny se mění její parametry v závislosti na použití reverzibilní nebo nereverzibilní varianty. Varianta s možnou reverzibilitou je omezena velikostí spádu a zároveň má větší průměr, oproti variantě bez reverzibility.

Parametr	Spád [m]	Průměr [mm]	Výkon [MW]
Francisova turbína	10 - 700	400 - 7500	0,2 – 350
Reverzibilní Francisova turbína	40 – 550	1000 - 7500	5 - 400
Peltonova turbína	70 - 1200	40 - 550	0,3 - 350

Tabulka 7: Srovnání parametrů vybraných vodních turbín [30]

Pro dodávání a zpětnou výrobu elektrické energie je nutný také motorgenerátor, což je elektrický stroj. Ten je schopný pracovat při čerpadlovém režimu jako motor, čímž se dodává krouticí moment hřídeli turbíny, a je tedy možno čerpat vodu do horní nádrže, ale také jako generátor při turbínovém režimu pro zpětné generování a dodávání elektrické energie do sítě. Ve vodních elektrárnách se nejčastěji používají synchronní motor s vyniklými póly, a to z důvodu, že je pohánějí vodní turbíny, které dosahují menších hodnot otáček, zpravidla několik stovek otáček za minutu. Tyto elektrické stroje

se nazývají z důvodu pohonu vodními turbínami hydroalternátory. V porovnání se synchronním motorem s permanentními magnety, který se používá v systémech FESS a který byl zmíněn v kapitole 4.1.2, se synchronní motor s vyniklými póly používají v aplikacích s vyššími výkony, které mají systémy PHES oproti FESS podstatně vyšší. Synchronní stroje s permanentními magnety se pak používají spíše v menších aplikacích, což systémy FESS ve srovnání se systémy PHES podstatně jsou. [25][31]

Synchronní motor s vyniklými póly se skládá z dvou hlavní částí, a to statoru a rotoru, jež lze vidět na obrázku 23. Stator je pevně zabudovaná část tohoto motoru a skládá se z dynamových plechů, které na vnitřní straně mají drážky, ve kterých jsou uloženy cívky. V těchto drážkách jsou cívky spojeny a rovnoměrně rozloženy do tří jednofázových vinutí. Do cívek statoru se indukuje střídavé napětí, které způsobuje průchod střídavého proudu. Otáčivá část nazývaná rotor je pak po obvodu osazen vyčnívajícími (vyniklými) magnety, na kterých jsou pólové nástavce a budicí cívky. Tyto póly jsou buzeny stejnosměrným proudem. V čerpadlovém režimu v systémech PHES umožňuje asynchronní rozběh celého hydroalternátoru do požadované funkce synchronního motoru, v tom případě tlumič (který se nachází v pólových nástavcích) vytváří klec, kterou mají asynchronní motory. [31]



Obrázek 23: Rotor s vyniklými póly v PHES Dalešice, převzato z [32]

Základními prvky elektrické části systémů PHES jsou také transformovna a rozvodna, kdy transformovna může být buď součástí strojovny nebo např. z důvodu větší bezpečnosti zvlášť oddělena (jak lze vidět na obrázku 17). V transformovně se nachází transformátor, který zajišťuje potřebné zvýšení napětí a snížení proudu na výstupních svorkách pro snížení přenosových ztrát. Na vstupních svorkách pak probíhá stejný, jen opačný děj, tedy dochází ke snížení napětí a zvýšení proudu pro dosažení jmenovitých hodnot napětí a proudu motorgenerátoru. Dalším elektrickým zařízením je rozvodna, která slouží k distribuci vyrobené elektrické energie. Je tedy nezbytnou pro přenos elektřiny ze systémů PHES do elektrické sítě, která pak dodává elektřinu spotřebitelům. [25]

4.2.4 Technické parametry technologie PHES

Jak bylo uvedeno, systémy PHES akumulují elektrickou energii ve formě hydraulické potenciální energie E [J], kterou lze stanovit dle vztahu

$$E = mg\Delta h = \rho V g \Delta h, \quad (4.14)$$

kde ρ je hustota vody ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), V přenášený objem (m^3), g tíhové zrychlení ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) a Δh výškový rozdíl mezi horní a dolní nádrží (m). [33]

Jak již bylo zmíněno, výkon je definován jako časová derivace energie. Při předpokladu, že hustota vody, tíhové zrychlení a výškový rozdíl mezi horní a dolní nádrží jsou v čase konstantní, lze napsat

$$P = \frac{dE}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} g \Delta h. \quad (4.15)$$

Dále z definice objemového toku, který vyjadřuje množství kapaliny procházející za časový interval průřezem přivaděče, je tedy objemový tok roven časové derivaci přenášeného objemu. Z toho vychází teoretický výkon turbíny generované elektrickou energií

$$P = \dot{V} \Delta h \rho g \eta, \quad (4.16)$$

kde \dot{V} je objemový průtok ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) a η účinnost turbíny/generátoru (dle režimu) (1). [33]

Ze vztahu 4.15 je patrné, že parametry, které lze měnit, jsou pouze přenášený objem V , resp. objemový průtok \dot{V} , výškový rozdíl mezi dolní a horní nádrží Δh a účinnost turbíny η_t . Pokud bychom tedy chtěli maximalizovat výsledný výkon systému CAES, jsou to právě tyto parametry, které to ovlivní. Systémy PHES s umělou akumulací jsou většinou situovány v horách, kde je značně omezený prostor na výstavbu akumuláční nádrže a tím je možné akumulovat menší množství objemu vody. Díky tomu se tyto elektrárny staví s co možná největším výškovým rozdílem mezi horní a dolní nádrží. Systémy PHES se smíšenou akumulací se pak většinou nachází u řeky nebo jiného vodního díla a mohou tedy umožňovat objemový průtok po dlouhou dobu. Výškový rozdíl nemusí být tedy tak velký jako u systémů s umělou akumulací. [23]

Výsledná účinnost celého systému PHES η_{PHES} je dána vztahem

$$\eta_{PHES} = \frac{E_{vyrobená}}{E_{dodaná}}, \quad (4.17)$$

kde $E_{vyrobená}$ odpovídá elektrické energii generované v turbínovém režimu a $E_{dodaná}$ elektrická energie dodávaná k přečerpání vody do horní akumuláční nádrže. [23]

Energetická účinnost systémů PHES se pohybuje kolem 80 % a jejich výkon se běžně pohybuje v rozmezí 30-4000 MW. Dalšími charakteristikami systémů PHES jsou relativní spolehlivost, dlouhá životnost těchto elektráren (tj. 50 až 100 let) a nízké náklady jejich provozu a údržby ve srovnání s jinými zdroji energie, jako jsou např.

fosilní paliva. Další výhodou pak je krátká reakční doba naběhnutí v rozmezí sekund až minut a možnost regulace průtoku vody v závislosti na poptávce po elektřině. V neposlední řadě je výhodou využívání energii vody, která je obnovitelný zdroj a nepřispívá tedy k emisím skleníkových plynů a dalším formám znečištění. [9]

Mezi nevýhody patří celkově velké rozměry a s tím spojené velké rozměry jednotlivých zařízení a komponent, vysoké investiční náklady na výstavbu a geografická omezení, jako např. potřebný výškový rozdíl mezi oběma nádržemi a velký zásah do krajiny, a s tím tedy i spojené, v dnešní době hojně diskutované, ekologické omezení, což může mít dopad na místní ekosystém a biodiverzitu. [9]

Všechny tyto vlastnosti jsou důvodem, proč je tato technologie v současnosti jednou z nejefektivnějších metod skladování velkého množství elektrické energie a nejpoužívanější technologií EES, jak ukazuje sloupcový graf na obrázku 4. Systémy PHES se v pohledu do budoucna jeví jako nejslibnější technologií spojenou s přechodem z fosilních paliv na obnovitelné zdroje energie. V tabulce 8 jsou shrnuty základní parametry dosahované v systémech PHES.

Parametr	Hodnota
Jmenovitý výkon [MW]	30-4000
Účinnost [%]	70-85
Jmenovitá energetická kapacita [MWh]	500-8000
Hustota energie [Wh/l]	1-2
Reakční doba	minuty
Doba vybíjení při jmenovitém výkonu	6-10 h
Životnost [cykly]	10000-30000

Tabulka 8: Základní technické parametry technologie PHES [19]

4.2.5 Systémy PHES v České republice a ve světě

Systémy PHES v České republice

V České republice jsou v tuto chvíli v provozu 3 přečerpávací vodní elektrárny a to Dalešice, Dlouhé stráně a Štěchovice II.

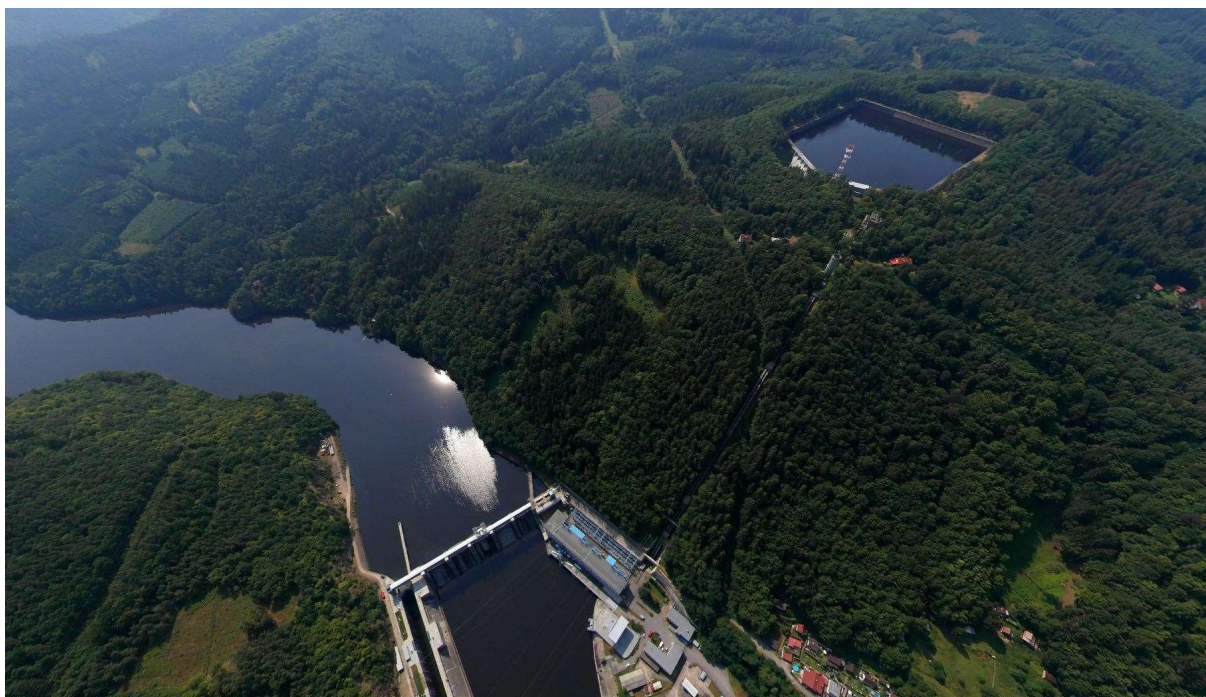
Přečerpávací vodní elektrárna Dalešice byla postavena v letech 1970-1978 v souvislosti s budováním blízké Jaderné elektrárny Dukovany. Jedná se o systém PHES se smíšenou akumulací. Elektrárna se skládá z horní akumulární nádrže Dalešice, která slouží k zajišťování technické vody pro tuto jadernou elektrárnu a k rekreačním účelům, a dolní vyrovnávací nádrže Mohelno. Obě tyto nádrže lze vidět na obrázku 24. Jedná se o největší funkční sypanou hráz v Evropě s výškou 100 m. Jsou zde instalovány 4 reverzní Francisovy turbíny pro spád 90 m. Celkový instalovaný výkon této elektrárny je 4 x 120 MW s rychlostí najetí 60 sekund. Ročně tato elektrárna vyrobí přibližně 500 GWh elektrické energie. [34][35]



Obrázek 24: Přečerpávací vodní elektrárna Dalešice, převzato z [35]

Výstavba *Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně* byla zahájena v roce 1978 a uvedena do provozu byla v roce 1996. Jedná se o přečerpávací elektrárnu s umělou akumulací, s největším instalovaným výkonem v ČR a to 2 x 325 MW a elektrárnu s největším spádem v ČR 510,7 m. Typ akumulace je zde umělý, umělá horní akumuláční nádrž se nachází na hoře Dlouhé Stráně v nadmořské výšce 1350 m s celkovým objemem 2,72 mil. m³ a umožňující akumulovat až 3700 MWh. Dolní nádrž leží na říčce Divoká Desná. Nádrže jsou spojeny dvěma přivaděči (každý pro jedno soustrojí) s délkou zhruba 1500 m. Elektrárna je hnaná sadou dvou největších reverzních Francisových vodních turbín v Evropě. Svoji velikostí se elektrárna řadí mezi největší systémy PHES na světě a plní významnou roli v elektrizační soustavě. [24]

V porovnání s předešlými dvěma systémy PHES je *Přečerpávací vodní elektrárna Štěchovice II* z pohledu instalovaného výkonu malou vodní elektrárnou s instalovaným výkonem 45 MW a spádem 220 m. Jedná se také o systém PHES s umělou akumulací, umělá horní akumuláční nádrž se nachází na kopci Homole a má obsah 500000 m³ a dolní nádrž, která je společná s průtočnou vodní elektrárnou Štěchovice I (jak lze vidět na obrázku 25). Elektrárna byla uvedena do provozu v roce 1947 a na svoji dobu byla plně automatizována. V letech 1992-1996 bylo původní třístrojové uspořádání o výkonu 21 MW nahrazeno upořádáním dvoustrojovým, s reverzní Francisovou turbínou s oběžným kolem o průměru 2,2 m. Celé soustrojí je umístěno v 45 m hluboké podzemní strojovně. [36]



Obrázek 25: Přečerpávací vodní elektrárna Štěchovice II, převzato z [36]

V tabulce 9 jsou shrnuty základní parametry tří v dnešní době jediných funkčních přečerpávacích vodních elektráren.

Systém PHES	Štěchovice II	Dalešice	Dlouhé stráně
Uvedení do provozu	1947	1978	1996
	1996 rekonstrukce	2007 rekonstrukce	
Výkon [MW]	45	480 (4 x120)	650 (2 x 325)
Počet soustrojí	1	4	2
Typ turbín	Francisova reverzní	Francisova reverzní	Francisova reverzní
Turbínový spád [m]	209,8-219,5	60,5-90,7	534,3
Průtok turbínou [m³/s]	24 (výroba)	150 (výroba)	68,6 (výroba)
	21 (čerpání)	137,5 (čerpání)	54,5 (čerpání)
Průměr oběžného kola [mm]	2200	6000	4540
Otáčky [ot./min]	600	136,4	428,6
Objem horní nádrže [mil. m³]	0,467	127	2,72

Tabulka 9: Souhrn základních parametrů přečerpávacích vodních elektráren v ČR [37]

Systémy PHES ve světě

Na konci roku 2021 byl v okrese Fengning v Číně vybudován k dnešnímu dni největší systém PHES na světě s výkonem 3600 MW a možností akumulovat až 40 GWh. Výstavba tohoto projektu v hodnotě 2,1 miliardy liber (2,7 miliardy českých korun) probíhala od června 2013 a byla realizována ve dvou etapách, každá o výkonu 1600 MW. Projekt systému PHES Fengning byl vybudován především pro zajišťování bezpečného a stabilního provozu sítě Peking-Tianjin-Severní Hebei a zároveň pro vyrovnávání nepravidelných dodávek elektrické energie z velkých větrných a solárních parků v severních oblastech Hebei a vnitřního Mongolska. Účelem bylo ale také zajištění ekologického provozu zimních olympijských her v Pekingu v roce 2022. Očekává se, že tento systém PHES zabrání použití 480000 tun standardního uhlí a sníží emise oxidu uhličitého o 1,2 milionu tun ročně. Celkový výkon je zde realizován 12 reverzibilními Francisovými turbínami, každou jednotkou tedy s výkonem 300 MW, které jsou schopny vyprodukovat 3,424 TWh elektrické energie ročně. Pro možné generování elektrické energie v turbínovém režimu je zde spád 471 metrů mezi horní akumulací nádrží, která se v Huiyazigou v levém břehu řeky Luanhe s kapacitou 48830000 m³ a dolní nádrží, která se využívá z již stávající vodní průtočné elektrárny Fengning s objemem 66150000 m³. [38][39]

Přečerpávací vodní elektrárny jsou nejčastěji komerčně používané technologie ESS, ve světě se tedy nachází nespočet projektů. Některé vybrané projekty systémů PHES jsou uvedeny v tabulce 10.

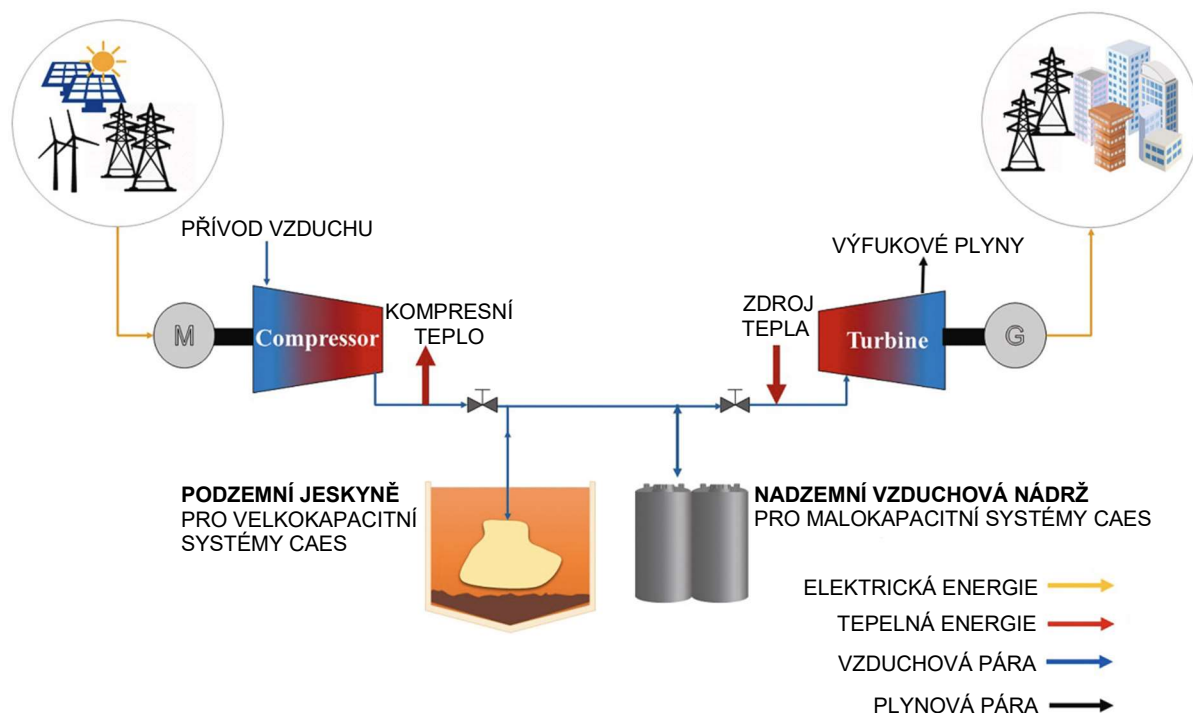
Název	Země	Jmenovitý výkon [MW]	Charakteristika
Rocky river PHES	Spojené státy americké	32	První komerční systém PHES na světě
Bath country PHES	US	3003	Do roku 2021 největší systém PHES dle jmenovitého výkonu
Okinawa Yanbaru PHES	Spojené státy americké	~ 30	Jediný komerční systém PHES s mořskou vodou
Hawaiian Elec. Co. PHES	Spojené státy americké	-	Uváděná účinnost cyklu 87 %
PHES Ikaria Island	Řecko	2,655	Jedna z prvních systémů PHES s integrovaným větrným zdrojem

Tabulka 10: Vybrané komerční projekty systémů PHES ze světa [19]

4.3 Akumulace energie do stlačeného vzduchu (CAES)

4.3.1 Princip fungování technologie CAES

Akumulace energie do stlačeného vzduchu (CAES) je technologií spočívající v přeměně elektrické energie na formu mechanické energie ve formě stlačeného vzduchu, která se v případě nutnosti přemění zpět na elektrickou energii. Systémy CAES jsou jedny z hojně komerčně využívaných systémů EES, především pro jejich široké rozmezí velikostí od malých až po velké. Princip fungování systémů CAES je založen na třech fázích a to komprese (nabíjení), skladování a expanze (vybíjení). Během fáze komprese (nabíjení) je vzduchu stlačován pomocí kompresoru, který je poháněn motorem využívající mimo špičkovou elektrickou energii nebo energii z obnovitelných zdrojů a mění ji na vnitřní energii vysokotlakého vzduchu. Během komprese a před uskladněním stlačený vzduch prochází připojenými výměníky tepla nebo jinými chladiči, z důvodu snížení jeho teploty, která při stlačování významně naroste, pro snížení spotřeby energie při kompresi. Vysokotlaký stlačený vzduch se dále ukládá do vhodného akumulacího úložiště stlačeného vzduchu (CAS), obvykle do podzemních dutin, jeskyní nebo do nádrží, dle velikosti jednotlivého systému CAES. Ve fázi skladování je stlačený vzduch skladován v zásobnících, dokud nenastane fáze expanze (vybíjení), tedy potřeba elektrické energie ve špičce. Fáze expanze nastává, pokud je potřeba vyprodukovat zpětně elektrickou energii. Stlačený vzduch je nejprve zpětně ohříván výměníky tepla nebo jinými zdroji tepla a následně expanduje přes plynovou turbínu, která roztáčí hřídel generátoru a ta zpětně vytváří elektrickou energii. Schéma celého cyklu konvenčního systému CAES je znázorněno na obrázku 26. [40][41][42]



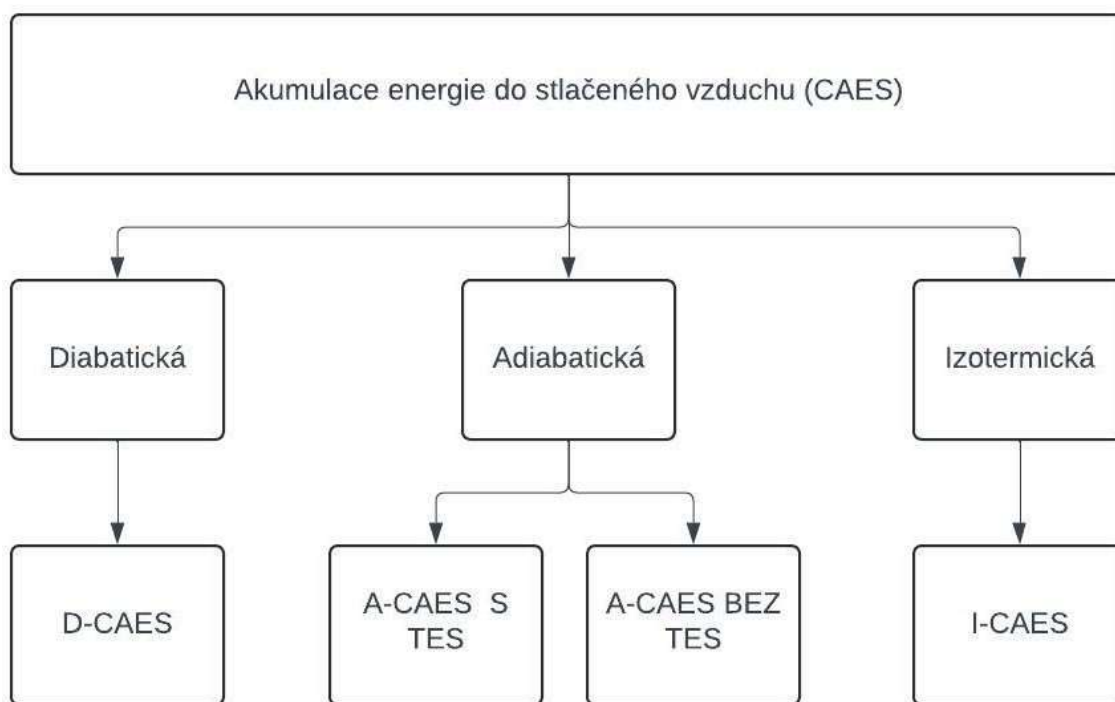
Obrázek 26: Schéma principu fungování konvenčních systémů CAES, převzato a upraveno z [40]

4.3.2 Rozdělení technologie CAES

V závislosti na velikosti lze systémy CAES rozdělit na velkokapacitní (LS-CAES > 50 MW), malokapacitní (SS-CAES ~ 10 MW) a mikrokapacitní (S-CAES < 100 kW). Velkokapacitní systémy LS-CAES se obvykle budují pro síťové aplikace při přesunu zátěže, snižování špiček a regulaci frekvence nebo napětí. Malokapacitní systémy SS-CAES jsou vhodnější pro integraci s obnovitelnými zdroji energie pro zálohování,

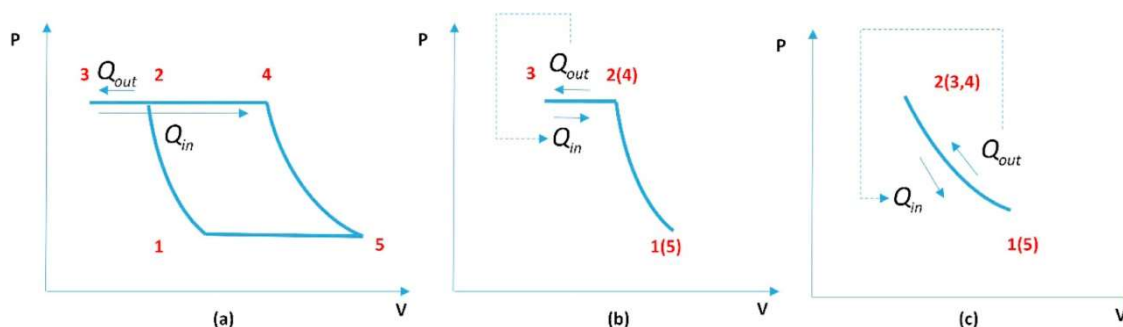
sledování zátěže a nepřerušitelné napájení. Mikrokapacitní systémy S-CAES je pak vhodné používat ve víceúčelových systémech, kombinující více procesů a jsou pouze jejím doplňkem. [40][42]

Další rozdělení systémů CAES vychází ze způsobu řízení tepla během fáze komprese (nabíjení) a expanze (vybíjení). Dle tohoto kritéria se systémy CAES rozdělují na diabatické (D-CAES), adiabatické (A-CAES) a izotermické (I-CAES), jak je znázorněno na obrázku 27. [40]



Obrázek 27: Diagram rozdělení systémů CAES dle způsobu řízení tepla při fázi komprese a expanze

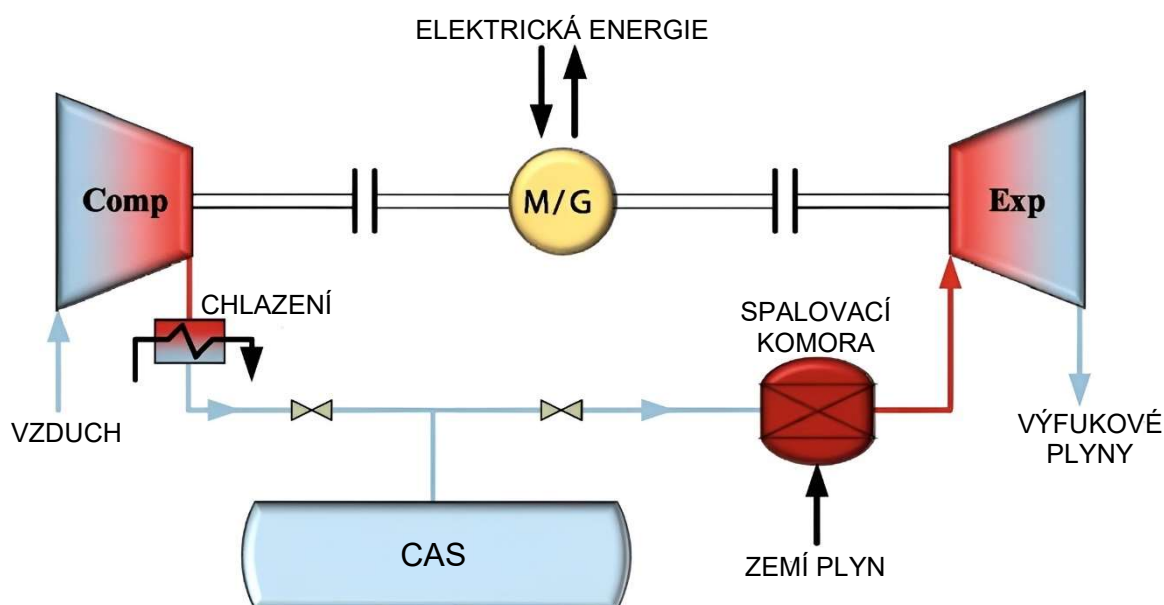
P-V digramy jednotlivých typů CAES jsou na obrázku 28, kde stavy 1-5 představují: 1 - počáteční vzduch, 2 – stlačený vzduch, 3 - uskladněný vzduch, 4 - vypouštěný vzduch z CAS a 5 - expandovaný vzduch. [42]



Obrázek 28: P-V diagramy tří základních typů systémů CAES a) D-CAES, b) A-CAES a c) I-CAES, převzato z [42]

V diabatických systémech CAES (D-CAES) se teplo uvolňované při stlačování vzduchu kompresorem odvádí do atmosféry a tím dochází k ochlazení stlačeného vzduchu (Q_{out}). Vysokotlaký ochlazený vzduch je dále veden do akumulačního prostoru (CAS). Během fáze expanze je stlačený vzduch nejprve veden do spalovací

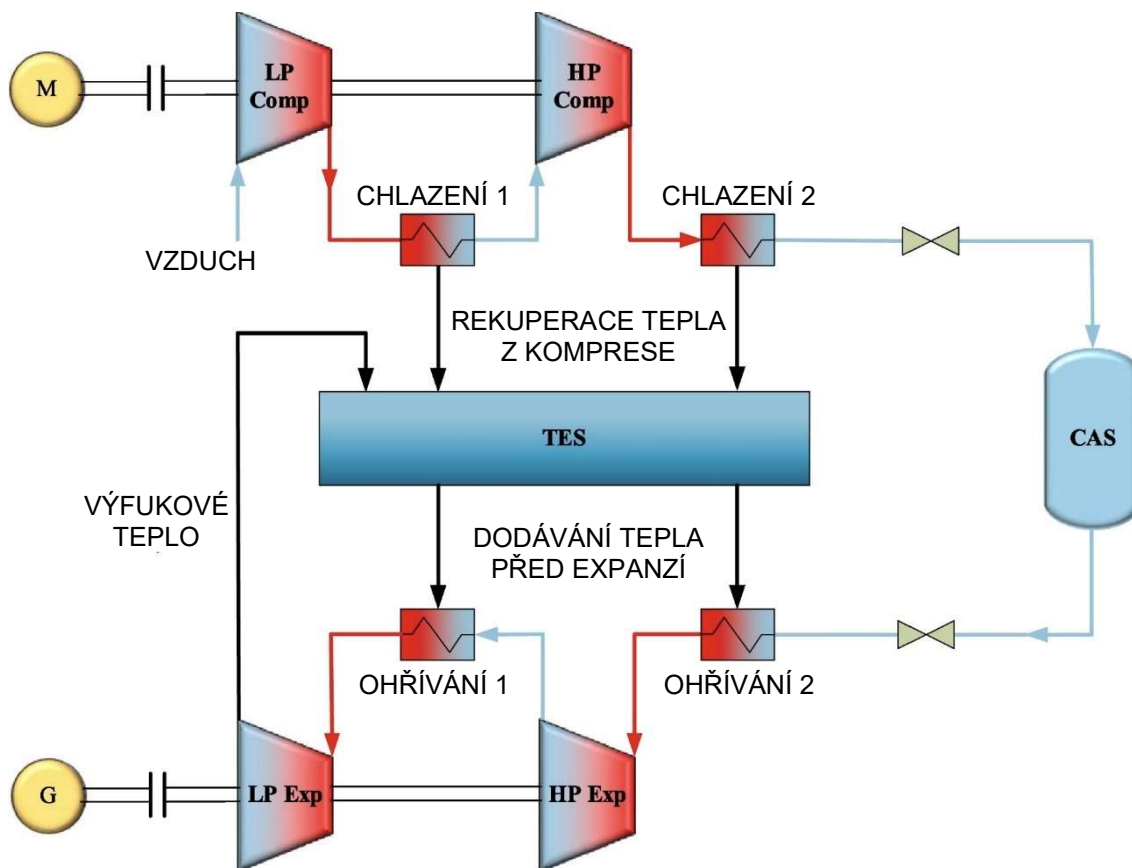
komory, kde je smíchán se zemním plynem a spálen za uvolnění tepla ve formě ohřevu výstupní směsi spalin. Následně horké výstupní spaliny expandují přes plynovou turbínu a vyrábějí tím elektrickou energii, spaliny se pak vypouštějí do okolní atmosféry. Tento cyklus představuje nejjednodušší konfiguraci CAES, která v podstatě funguje jako Braytonův cyklus rozdělený na dvě fáze, nejprve komprese vzduchu a následně ohřev a komprese vzduchu. Jak je znázorněno na obrázku 28 a), kvůli teplu uvolněnému při spalování (Q_{in}) se teplota a tím i objem vzduchu ze stavu 3, který představuje uložený stlačený vzduch, výrazně zvýší na stav 4. V důsledku toho lze ve fázi expanze ze stavu 4 do stavu 5 vygenerovat více technické práce. Systémy D-CAES mají však některé nevýhody, jako jsou značné tepelné ztráty, závislost na fosilním palivu a náročné geologické podmínky. K překonání těchto nevýhod a tím zvýšení výkonu systémů D-CAES se pro zvýšení teploty stlačeného vzduchu před turbínou používají rekuperátory. S tím se také snižuje spotřeba paliva (zemního plynu) o zhruba čtvrtinu, a to vede také ke zvýšení účinnosti celého oběhu. Zatím jsou v provozu dva systémy D-CAES a to elektrárna Huntorf v Německu a McIntoshi v Alabamě. Detailnější popis těchto systémů D-CAES bude proveden v kapitole 4.3.5. Uspořádání tohoto typu CAES je na obrázku 29. [41][42]



Obrázek 29: Schéma systému D-CAES, převzato a upraveno z [43]

Pokročilejší adiabatický systém A-CAES byl diskutován již při vývoji prvních diabatických systémů D-CAES v 70. a 80. letech minulého století. V té době však byly systémy A-CAES omezeny nevyzrálou technologií skladování tepla, a proto pro zvýšení teploty a tím i efektivnější expanzi stlačeného vzduchu byla stále nutnost spalování fosilních paliv, tak jako u systémů D-CAES. Systémy D-CAES tak byly vyhodnoceny jako technicky a ekonomicky výhodnější a k dalšímu vývoji systémů A-CAES již nedošlo. Začátkem 21. století, kdy byl čím dál častěji kladen důraz na snížení spotřeby fosilních paliv a s rozvojem technologie TES se technologii A-CAES dostalo opět pozornosti a odstartoval výzkum druhé generace pokročilých adiabatických systémů AA-CAES. Pokročilé adiabatické systémy AA-CAES ukládají teplo vznikající při stlačování vzduchu kompresorem a dále ho využívají ve fázi expanze. Jak si lze všimnout na obrázku 28 b), teplo uvolněné ze stavu 2 do stavu 3 se ukládá a znovu se využívá ke zvýšení teploty vzduchu ze stavu 3 do stavu 4. Díky ukládání tohoto tepla je

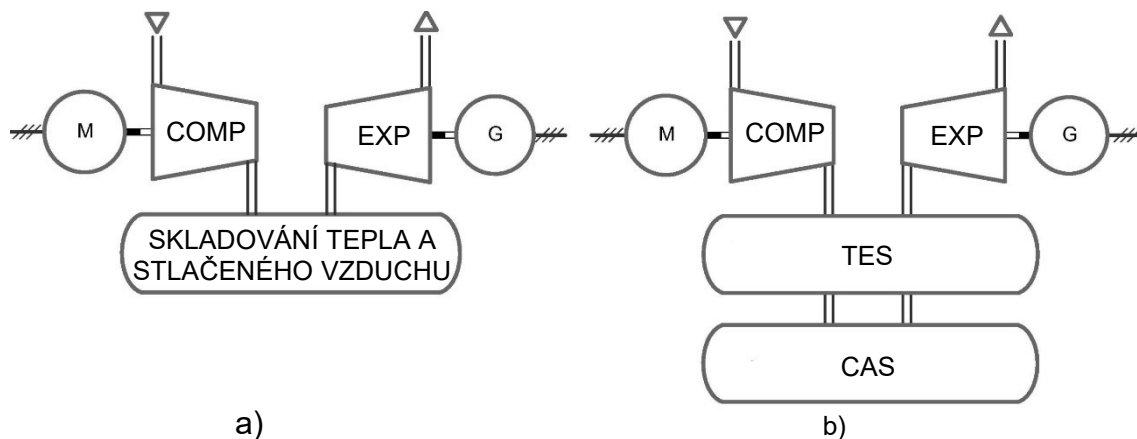
v systémech AA-CAES vstupní energií pouze mimo špičková elektrická energie nebo elektrická energie generovaná obnovitelnými zdroji a není zde tedy potřeba dodávat externí tepelnou energii pomocí fosilních paliv pro zvýšení teploty skladovaného vzduchu před jeho spalováním jako je tomu u systémů D-CAES. Na obrázku 30 je znázorněno schéma systému AA-CAES. Zkratka LP COMP/EXP značí nízkotlaký kompresor/turbínu a zkratka HP COMP/EXP vysokotlaký kompresor/turbínu. [42][43]



Obrázek 30: Schéma systému AA-CAES, převzato a upraveno z [43]

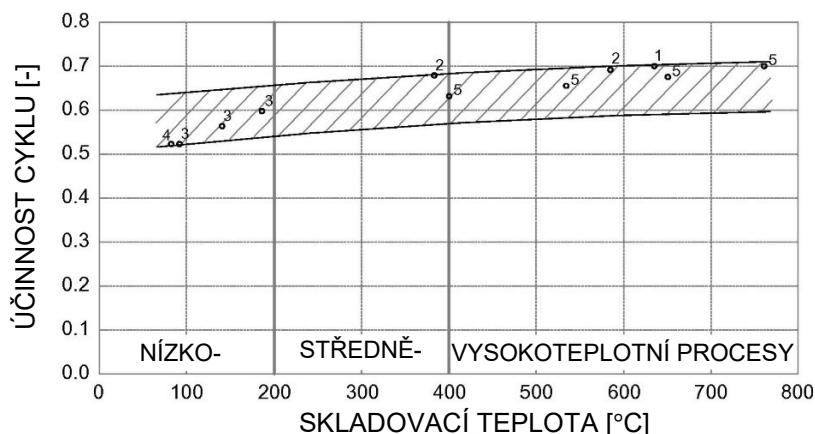
Dle způsobu uskladnění tepla vznikajícího při kompresi je lze dále rozdělit AA-CAES systémy na systémy AA-CAES s a bez odděleného systému skladování tepelné energie (TES), jak lze vidět na obrázku 31. Jednodušší z obou způsobů, AA-CAES bez TES, funguje na principu uložení samotného horkého vzduchu do kombinovaného zásobníku tepelné energie a stlačeného vzduchu (obrázek 31 a)). Vzhledem k vysokým teplotám při již poměrně nízkých tlakových poměrech vyžadují tyto koncepce vysoce teplotně odolné skladovací prostory (například adiabatickým stlačením okolního vzduchu na mírný tlak 1 MPa se vzduch zahřeje na teplotu přibližně 277 °C). Z toho důvodu jsou AA-CAES bez TES omezeny na poměrně nízké skladovací tlaky a v důsledku toho také na nízké hustoty energie. Tento koncept A-CAES byl zatím realizován pouze v laboratorních podmínkách, komerční využití nelze v blízké budoucnosti očekávat vzhledem ke značným materiálovým nárokům na již zmiňovaný kombinovaný akumulační prostor, které musí být splněny pro zajištění bezpečného a spolehlivého provozu celého systému. Kromě toho je v důsledku relativně nízké hustoty velmi horkého stlačeného vzduchu nutné chránit tak velký povrch před tepelnými ztrátami. Oba tyto problémy znamenají vysoké počáteční náklady, což je stěžejní při budování jakýchkoliv ESS. Vzhledem k těmto omezením, které systémy AA-CAES bez TES mají, je

ekonomicky výhodnější použití oddělených systémů skladování tepelné energie AA-CAES s TES (obrázek 31 b)). Odvedením části tepla z proudu vzduchu do TES vede k vyšším konečným tlakům, což má za následek vyšší hustotu energie a tím větší účinnost. Z důvodu oddělení již zmíněné části tepla lze ochlazený stlačený vzduch skladovat v úložišti stlačeného vzduchu (CAS) s menšími materiálovými nároky. [42][44]



Obrázek 31: Zjednodušené koncepty systémů AA-CAES a) bez TES a b) s TES, převzato a upraveno z [44]

Teplota TES představuje teplotu úložiště po výměně tepla přes výměník tepla během procesu ukládání energie a je zásadním parametrem v systémech AA-CAES s TES, který má přímý vliv na konstrukci systému i na provozní chování celého úložiště. Jak ukazuje obrázek 32, rozdíl od účinnosti výměníků tepla má teplota uvnitř TES malý vliv na účinnost cyklu celého systému. Je zde také vidět, že dochází ke snížení účinnosti cyklu při nižších teplotách TES, to je způsobené ztrátami tepla v jednotlivých stupních procesu komprese a expanze, které jsou relativně vyšší než u systémů s vyššími teplotami TES. Body 1-5 v diagramu označují výsledky rozdílných laboratorních měření (zdroje hodnot z měření jsou uvedeny ve studii [44]). [43][44]

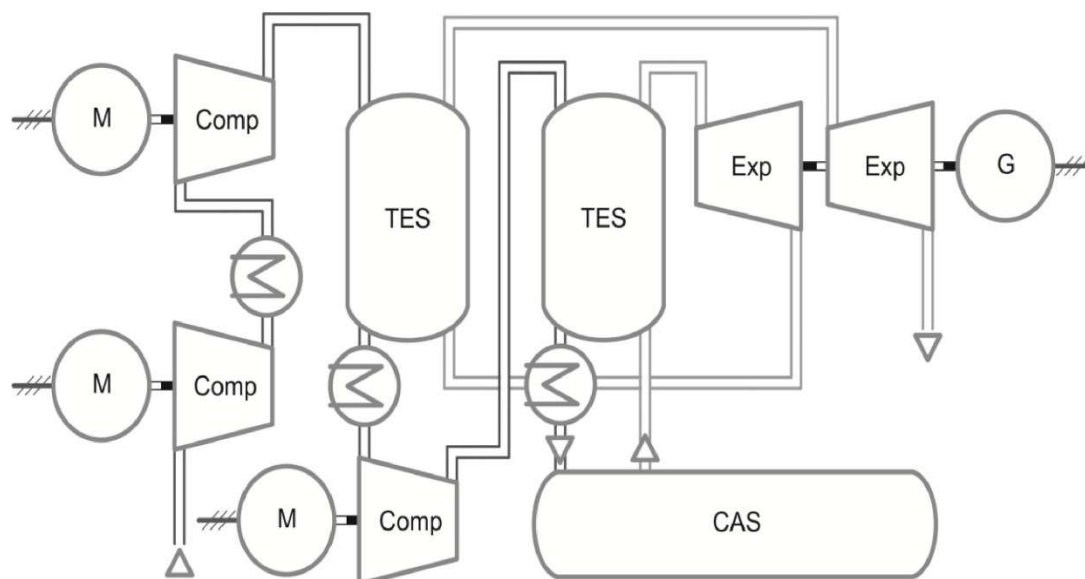


Obrázek 32: Účinnost cyklu systémů AA-CAES v závislosti na skladovací teplotě, převzato a upraveno z [44]

Z důvodu značných rozdílů z hlediska konstrukce, technologie TES a výsledným provozním parametřům lze systémy AA-CAES rozdělit, jak ukazuje obrázek 32 na tři typy procesů, dle skladovací teploty TES na: [44]

- Vysokoteplotní procesy – skladovací teploty nad 400 °C
- Středně teplotní procesy – skladovací teploty mezi 200 °C a 400 °C
- Nízkoteplotní procesy – skladovací teploty do 200 °C

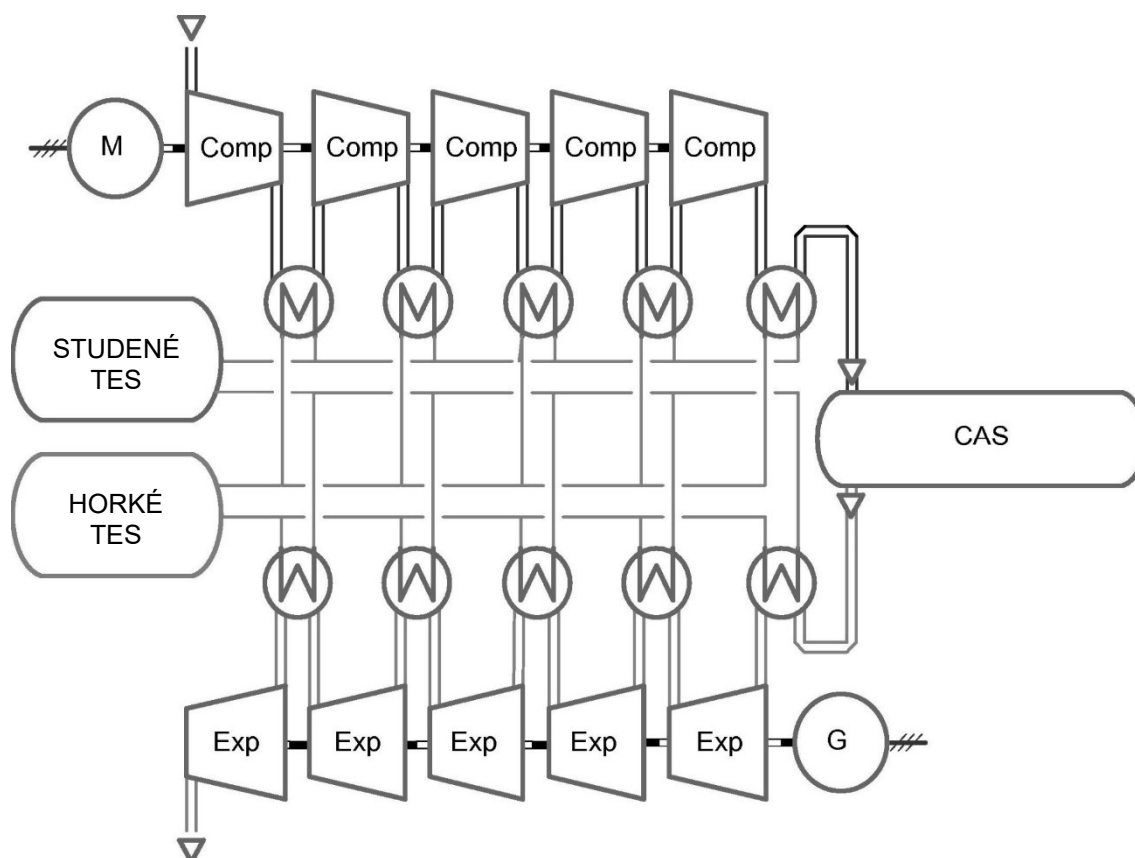
Teploty TES v systémech AA-CAES s vysokoteplotním procesem se pohybují okolo 600 °C. Konstrukce těchto typů systémů AA-CAES je zobrazeno na obrázku 30. Jejich výhodou je vyšší účinnost (až 70 %) a jednodušší konstrukce s jedním nebo dvěma stupni komprese nebo expanze a jednou jednotkou TES oproti ostatním dvěma typům. Nevýhodou je pak nutnost jednotky TES odolávat kombinaci tepelného a mechanického namáhání, což vyžaduje speciální materiály a také nedostatek volně dostupných elektricky poháněných kompresorů, které pracují při tak vysokých teplotách. Tepelné a mechanické namáhání může vést k úbytku materiálu TES, při němž může dojít k uvolnění malých částic, které mohou způsobit poškození vstupních lopatek i expanzních kol. Další nevýhodou je reakční doba, která je zde 10-15 min, což je poměrně pomalé ve srovnání se systémy PHES, které jsou schopny náběhu do dvou minut. Nižších skladovacích teplot se u AA-CAES se středně teplotními procesy zajišťuje dvoustupňovou TES. Aby se předešlo nutnosti rozsáhlého výzkumu a vývoje, snižuje se zde skladovací teplota pod 400 °C tím, že se teplotně závislá část energie stlačeného vzduchu přenáší do zařízení TES dvakrát. Mírně nižší účinnost cyklu je zde kompenzována použitelností dostupnějších materiálů pro TES a elektricky poháněných kompresorů. I přes tyto technické výhody je zde stejně jako u vysokoteplotních AA-CAES reakční doba stále 10-15 min z důvodu stále velkých tepelných namáhání. Jak je znázorněno na obrázku 33, je zde okolní vzduch v prvním stupni stlačen na 0,24 MPa a po mezichlazení je ve druhém stupni dále stlačen na 1,9 MPa. Stlačený vzduch opouští druhý stupeň komprese při teplotě přibližně 380 °C a je opět chlazen průtokem přes první zařízení TES a uložen v CAS. Proces vybíjení pak zahrnuje dva expanzní stupně s předehřevem pomocí obou zařízení TES. [44][45][46]



Obrázek 33: Schéma středně teplotního AA-CAES, převzato z [44]

V poslední době bylo realizováno mnoho výzkumných aktivit zaměřených na zkoumání skladovacích teplot pod 200 °C, což spadá pod skupinu systémů AA-CAES s nízkoteplotními procesy. Při těchto teplotách je možné použití kapalného média v zařízeních TES, oproti použití pevného média u vysokoteplotních TES a sypaného média u středně teplotních TES. Další velkou výhodou je nízká reakční doba, kdy jsou tyto systémy schopny provozu do 5 minut. Jak již bylo zmíněno, pro dosažení těchto nízkých teplot je zde potřeba více kompresních a expanzních stupňů než u výše zmíněných typů. Na obrázku 34 je koncept nízkoteplotního zařízení AA-CAES s kapalným

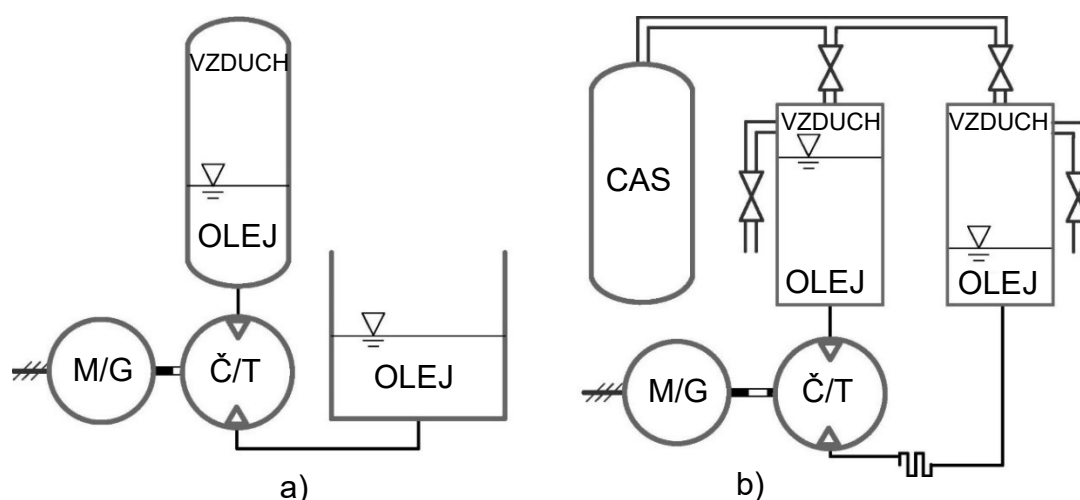
médium TES a dvěma zásobníky TES. V závislosti na stavu nabití je kapalina uložena uvnitř horké nebo studené nádrže TES, kdy v případě nabitého zásobníku je kapalina v horkém zásobníku a v opačném případě v zásobníku studeném. Během procesu nabíjení a vybíjení je kapalina čerpána přes výměníky tepla, aby ochladila, resp. předehřála vzduch. Takto aktivní zařízení TES vyžaduje ve srovnání s pasivními zařízeními TES pokročilejší řízení, ale umožňuje tak lepší řízení celého procesu. Tato koncepce je také navržena tak, aby pracovala s pěti kompresorovými a expanzními stupni s vzájemnou výměnou tepla mezi nimi. Tlakový poměr každého stupně je stejný, teplota zásobníku je omezena přibližně na 132 °C při konečném tlaku 20 MPa. [44][45]



Obrázek 34: Schéma nízkoteplotního AA-CAES, převzato a upraveno z [44]

Posledním typem systémů CAES jsou izotermické systémy I-CAES, které se snaží zabránit zvýšení teploty v kompresorech během komprese a poklesu teploty během expanze v expanzních zařízeních. Všechny dosud známé koncepce systémů I-CAES jsou založeny na pístových strojích, jelikož tyto stroje mohou provádět poměrně pomalý proces komprese nebo expanze, což zajišťuje dostatek času na proces výměny tepla uvnitř samotného stroje. Výměnu tepla lze provádět např. pomocí přídavných teplosměnných ploch a kapalinového pístu. Dalším způsobem je rozstřikování kapalin do prostoru zátky pístového stroje nebo stlačování předem namíchané pěny. Koncepce I-CAES jsou realizovány v tzv. hydropneumatických zásobnících energie, v těchto zařízeních se ke stlačování plynu používá kapalina. Rozlišují se dva základní typy hydropneumatického skladování, a to s uzavřeným cyklem (C-HyPES) a s otevřeným cyklem (O-HyPES). Hydropneumatické skladování C-HyPES funguje na principu čerpání kapaliny (hydraulického oleje) do zásobníku, kde se objem plynu zmenšuje a jeho tlak naopak roste. V případě potřeby elektrické energie se tlak plynu uvolní tím, že kapalina proudí v opačném směru a přes turbínu pohání generátor. Hlavní

nevýhodou C-HyPES je jejich nízká energetická hustota, z toho důvodu nebyly tyto systémy dosud komerčně postaveny, jsou však dále předmětem zkoumání v laboratorním měřítku. K překonání nevýhod C-HyPES slouží koncept otevřeného cyklu O-HyPES, který kombinuje vyšší hustotu energie systémů vzduch-vzduch s výhodami použití kapaliny jako pracovního média. V systémech O-HyPES je vzduch před vstupem do CAS pod vysokým tlakem stlačován pístem s kapalinou. Tato koncepce vyžaduje minimálně dva válce, do nichž lze kapalinu čerpat i následně odčerpat, a systém ventilů umožňující cyklický přívod a odvod vzduchu. Na rozdíl od systému s uzavřeným cyklem byl systém O-HyPES realizován, první zařízení o jmenovitém výkonu 2 MW bylo postaveno v Texasu a od roku 2012 je ve zkušebním provozu. Schéma obou zmínovaných typů systémů I-CAES lze vidět na obrázku 35. [44]



Obrázek 35: Zjednodušené schéma systémů I-CAES a) C-HyPES b) O-HyPES, převzato a upraveno z [44]

Tyto tři zmíněné typy systémů CAES se značně liší jak z hlediska parametrů, jako je účinnost cyklu, hustota energie a doba náběhu, ale také z hlediska stavu vývoje a oblasti použití. V tabulce 11 je prezentován přehled těchto parametrů pro všechny tři typy systémů CAES. [44]

Typ CAES	Diabatický		Adiabatický		Izotermický	
	Nyní	Cíl	Nyní	Cíl	Nyní	Cíl
Účinnost cyklu [1]	0,42-0,54	0,6	0,64	0,7	0,38	0,8
Hustota energie (na m ³ CAS)	2-15 kWh/m ³		0,5-20 kWh/m ³		1-25 kWh/m ³	
Reakční doba	10-15 min		5-15 min		< 1 min	
Rozsah výkonu	5 MW–1 GW		1 MW-1 GW		5 kW-1 GW	
Stav vývoje	Komerční aplikace		Výzkum/Zkušební provoz		Výzkum	

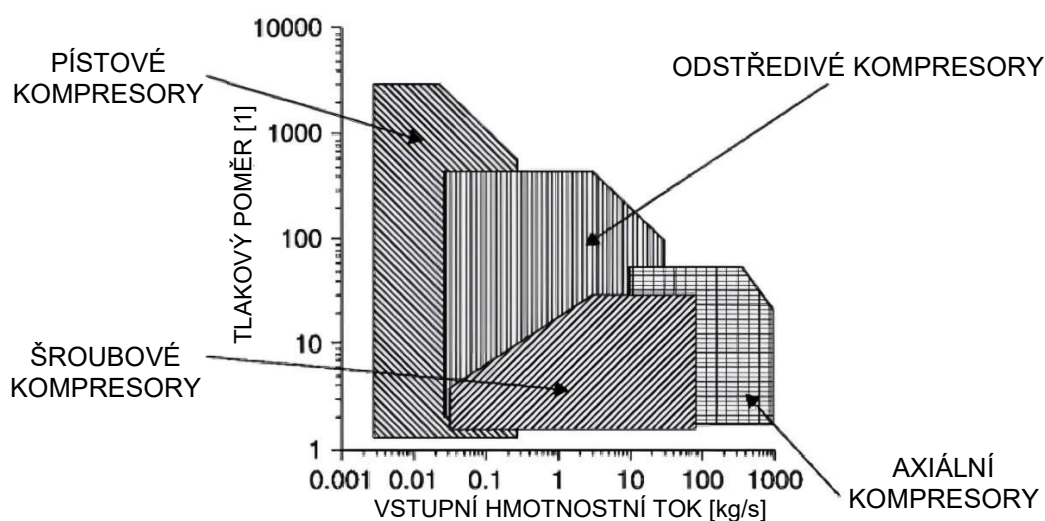
Tabulka 11: Srovnání technických parametrů tří typů systémů CAES [44]

Systémy D-CAES však nejsou pouhou technologií skladování elektrické energie, ale hybridní technologií výroby a skladování elektrické energie. K vybíjení potřebují systémy D-CAES dodatečné teplo, které se obvykle zajišťuje spalováním zemního plynu nebo lehkého oleje. Z toho plyne, že existují dva vstupní toky energie, a to elektrická energie pro pohon kompresorů a tepelná energie pro ohřev vzduchu před expanzí. Z toho důvodu může být srovnání účinnosti systémů D-CAES se systémy AA-CAES, I-CAES, ale také se systémy PHES, FESS a dalšími ESS zavádějící, právě z důvodu, že tyto zmiňované technologie jsou pouhými technologiemi skladování elektrické a nedochází u nich k dodatečnému přítoku energie pro zvýšení účinnosti. Výpočty účinností D-CAES, AA-CAES a I-CAES budou podrobněji popsány v kapitole 4.3.4. [44]

4.3.3 Zařízení a komponenty technologie CAES

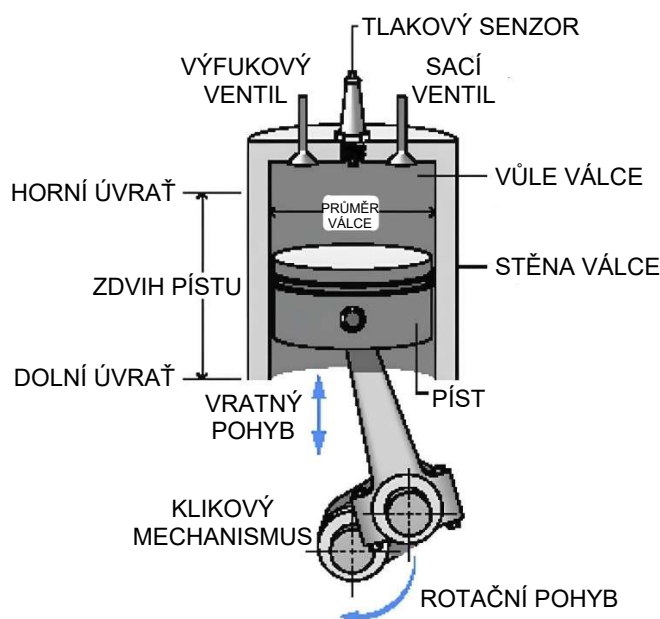
Obecně lze říct, že provedení akumulace elektrické energie v systémech CAES je velmi podobná systémům PHES. Avšak namísto přečerpávání vody z dolní nádrže do horní akumulární nádrže v době přebytku elektrické energie systémy CAES stlačují pomocí kompresoru okolní vzduch do podzemních dutin, jeskyní nebo nádrží. Tento stlačený vzduch se udržuje pod tímto jmenovitým tlakem a v době nedostatku elektrické energie se ohřívá a expanduje v expanzní turbíně, která pohání generátor, jenž pomáhá pokrýt poptávku po elektrické energii. [45]

Pro možnost akumulace elektrické energie v systémech CAES je nutné okolní vzduchu stlačit pomocí kompresoru na požadovaný akumulární tlak a následně tento stlačený vzduch expandovat přes expandér pro zpětnou generaci elektrické energie. Tyto stroje se dále dělí na dvě skupiny, dynamické (turbíny) a objemové (pístové, šroubové, spirálové,...). Dynamické stroje se mohou dále dělit na radiální a axiální. Expandéry jsou ve srovnání s kompresory hůře vyvinuté a daleko méně prozkoumané. Objemové expandéry se používají při nižších průtocích a otáčkách a jsou cenově dostupnější, jelikož jsou často vyráběny právě z kompresorů a jsou tedy závislé na vyráběných kompresorech. Komprese a expanze jsou opačné procesy, takže klíčové principy v konstrukce mají kompresory a expandéry společné. Na obrázku 36 jsou vymezeny typické provozní rozsahy používaných typů kompresorů. Z důvodu, že kompresory mají podobnou konstrukci jako expandéry, lze tyto provozní parametry považovat za přibližně stejné pro stejné typy expandérů. [42]



Obrázek 36: Provozní charakteristiky různých kompresorů, převzato a upraveno z [45]

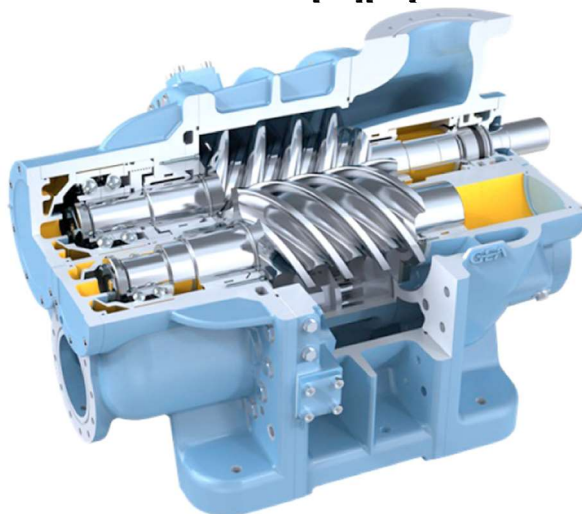
Pístové stroje jsou velmi hojně používány jako kompresory i expandéry. Tyto stroje mají nejdelší historii ve vývoji kompresorů s širokým využitím od domácnosti až po průmysl. Jedná se o stroj s přerušovaným průtokem založený na objemové tlakové změně pracovního média, která je řízena vratným pohybem pístu ve válci. V pístovém expandéru stlačený plyn proudí přes sací ventil do válce, kde se potenciální energie stlačeného vzduchu mění na mechanickou energii roztáčením klikové hřídele. Expandovaný vzduch vstupuje výfukovým ventilem. Pístový kompresor pak pracuje v obráceném smyslu, kdy se mechanická energie klikové hřídele převádí na potenciální energii stlačením vzduchu. Typická konstrukce s vyznačenými základními prvky pístových strojů je znázorněna na obrázku 37. Jak je patrné z obrázku 29, pístové stroje dosahují vysokých tlakových poměrů, ale při nízkém hmotnostním toku, který je omezen objemem válce. Z těchto důvodů jsou pístové stroje vhodné zejména pro systémy CAES pro malokapacitní a mikrokapacitní jednotky. Jejich izoentropická účinnost může dosahovat až 76 %. [42][45]



Obrázek 37: Konstrukce pístového stroje, převzato a upraveno z [42]

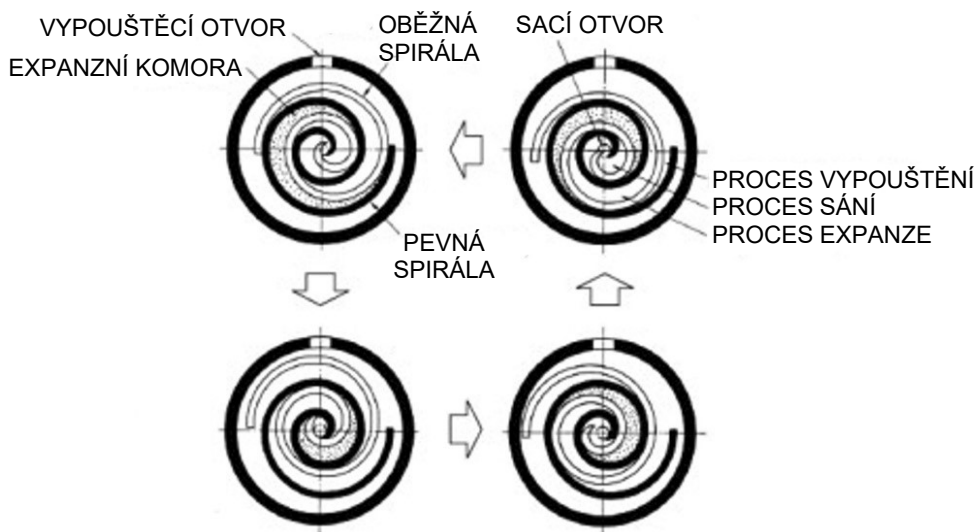
Dalšími dvěma typy objemových strojů jsou šroubové a spirálové expandéry/kompresory, které se označují také jako rotační objemové stroje. Šroubový expandér/kompresor může být buď dvoušroubový nebo jednošroubový. Dvoušroubový expandér se skládá z dvojice šroubovitých rotorů, které do sebe zabírají, jak lze vidět z obrázku 38. Jeden z rotorů je poháněn proudem stlačeného vzduchu a zároveň pohání druhý rotor, při současném vstřikování oleje nebo bez něj. Otáčením rotorů a postupným zvětšováním prostoru mezi rotorem a pláštěm vzduch expanduje. Při expanzi se objem stlačeného vzduchu postupně zvětšuje a jeho tlak snižuje, a při dosažení vypouštěcí otvoru výfukový plyn vytéká z expandéru. Jednošroubový expandér se skládá z jednošroubovitého rotoru a dvou spolu zabírajících kol, princip jeho fungování je podobný jako u dvoušroubového. Konstrukce rotorů velmi významně ovlivňuje výkon celého šroubového stroje, délka a průměr rotorů určují průtok a tlakový poměr stroje. Délka rotoru vede k vyššímu tlakovému poměru a větší průměr rotoru způsobuje větší výkon. Šroubové expandéry je možno rozdělit dle jejich pohybu na synchronizované a nesynchronizované. Synchronizované šroubové expandéry mohou dosahovat vyšších otáček z důvodu nižších hydrodynamických ztrát. V porovnání s pístovými expandéry

mají šroubové expandéry obvykle nižší tlakové poměry, a to z důvodu nižších vestavěných objemových poměrů. Avšak dosahují vyšších otáček než pístové, a i proto vyžadují redukční převodovku, aby odpovídaly otáčkám generátoru. Izoentropická účinnost zde dosahuje hodnot od 20 % do 70 %. [42][47]



Obrázek 38: Dvoušroubový kompresor/expandér, převzato z [42]

Pro aplikace systémů CAES s malými výkony se obvykle upřednostňují spirálové expandéry. Tento spirálový stroj vychází z jednoduché konstrukce, která se skládá ze dvou stejných spirál, oběžné a pevné spirály. Princip pracovního cyklu spirálového expandéru je graficky zobrazen na obrázku 39. Tlakové poměry jsou ještě nižší než u šroubových expandérů, a to z několika důvodů. Maximální velikost spirály, která ovlivňuje objemový poměr, je omezena maximální odstředivou silou, tu vytváří obíhající spirála. Vzhledem k tomu, že odstředivá síla roste kvadraticky s průměrem spirály, je maximalizace tohoto parametru značně omezena. Tento typ expandéru je relativně nový a bylo vyvinuto jen málo modelů pro simulaci tohoto procesu. Z těchto mála modelů bylo dosaženo izoentropické účinnosti kolem 70 %. Obecně řečeno rotační objemové expandéry jsou vhodné pro aplikace systémů CAES s vyššími průtoky a nižšími tlakovými poměry než pístové stroje, které jsou vhodné přesně k opačným aplikacím. Rotační objemové stroje jsou také více tolerantní k vlhkosti a dvofázovému proudění, díky čemuž jsou vhodnější pro systémy I-CAES. [42][47]



Obrázek 39: Provozní cyklus spirálového expandéru, převzato a upraveno z [47]

Výběr vhodných expandérů a kompresorů závisí na velikosti, typu a provozních podmínkách jednotlivého systému CAES. V tabulce 12 jsou shrnuty tyto parametry pro výše zmíněné expandéry a kompresory. [42]

Typ stroje		Vhodná velikost systému	Vhodné provozní podmínky	Vhodný typ systému
Pístové		Mikro a malokapacitní	Vysoký tlakový poměr, nízké otáčky	I-CAES, A-CAES
Rotační objemové	Spirálové	Mikrokapacitní	Střední tlakový poměr, nízké otáčky	I-CAES, A-CAES
	Šroubové	Malokapacitní	Střední tlakové poměr, nízké otáčky	I-CAES, A-CAES
Turbo-soustrojí	Radiální	Malo a velkokapacitní	Vysoké otáčky, nízký tlakový poměr jednostupňového systému	A-CAES
	Axiální	Velkokapacitní	Vysoké otáčky, nízký tlakový poměr jednostupňového systému	A-CAES, D-CAES

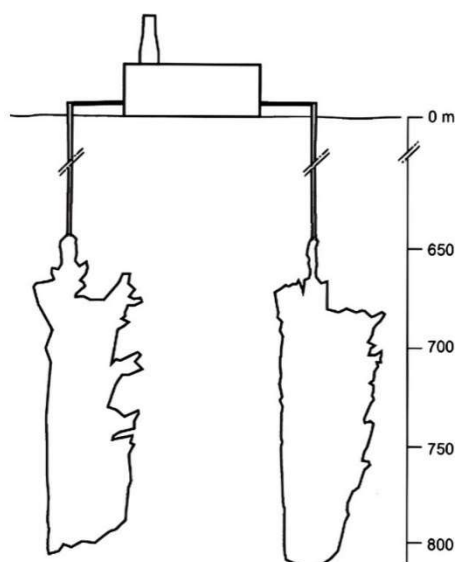
Tabulka 12: Přehled parametrů expandérů a kompresorů pro systémy CAES [42]

Jako u akumulčních systémů FESS a PHES jsou i u systémů CAES nezbytné motorgenerátory. Ten zde ve fázi komprese (nabíjení), tedy stlačování vzduchu do systému CAS, při dodávání přebytečné elektrické energie funguje jako motor a pohání kompresor, který umožňuje zmíněnou kompresi vzduchu. Ve fázi expanze (vybíjení) pak funguje jako generátor pro zpětné generování a dodávání elektrické energie do sítě. Expandující stlačený vzduch roztáčí hřídel expandéru, která je přes spojku spojena s hřídelí generátoru, jenž generuje elektrickou energii. Vzhledem k podobné velikosti systémů CAES a PHES se používají stejné nebo podobné motorgenerátory, o nichž je pojednáno v kapitole 4.3.3. Nezbytnými prvky jsou zde také transformovna a rozvodna, ty jsou také stejně koncipovány jako u systémů PHES, které jsou též blíže rozebrány v kapitole 4.3.3.

V celém procesu akumulace elektrické energie v systémech CAES je nedílnou součástí úložiště samotného stlačeného vzduchu (CAS). Funkcí úložiště je v době přebytku elektrické energie ve fázi skladování umožnit fyzický prostor pro naakumulování stlačeného vzduchu a následně v době nedostatku, tedy potřeby elektrické energie tento stlačený vzduch dále uvolnit. Obecně je dáno, že pro mikrokapacitní a malokapacitní systémy CAES se používají válcové tlakové nádoby z oceli. Jejich výhodou je tendence produkovat vyšší hustotu energie a možnost výstavby prakticky kdekoli, nevýhodou pak jsou vysoké počáteční investiční náklady, dostupnost pozemků a náklady na údržbu, jelikož je třeba neustálého kontrolování a regulování vnitřního tlaku. U velkokapacitních systémů je pak ekonomicky výhodnější používat jiné technologie, nejčastěji podpovrchové přírodní CAS. Tento typ CAS nevyžaduje rozsáhlé pozemky a jejich počáteční náklady jsou tak ve srovnání s nadzemními systémy CAS nižší. Geologické vlastnosti používaných dutin jsou zde však velmi důležité, dobrá stabilita hornin

významně snižuje tlakový rozdíl. Materiály podloží vhodné pro CAS velkokapacitních systémů CAES jsou solné skály, tvrdé kamenité skály a porézní skály. [45][49]

Solné skály jsou těmi nejvhodnějšími materiály pro systémy CAES, zejména z důvodu elasticko-plastických vlastností soli představují CAS vytvořené rozpuštěním soli minimální riziko úniku vzduchu, čímž se značně zvyšuje účinnost celého procesu. Další výhodou je spolehlivý a nízkonákladový způsob výstavby, avšak za podmínek dostatečného přísunu čerstvé vody a snadného zlikvidování vzniklé slané vody. Díky těmto výhodám se CAS vzniklé rozpuštěním solných hornin využívají ve dvou v současné době pracujících systémech CAES, v Huntorfu a McIntoshi. Systém Huntorf má skladovací kapacitu 310000 m³ a systém McIntosh 560000 m³. CAS vzniklé ze solných hornin bývají úzké a vysoké s malou stropní klenbou, jak je tomu také u obou zmiňovaných systémů CAES používajících tuto technologii, což lze také vidět na obrázku 41, kde je znázorněno schéma solné CAS systému CAES v Huntorfu, pro názornost je zde budova ve stejném měřítku jako CAS i se stupnicí v metrech. [45][49]



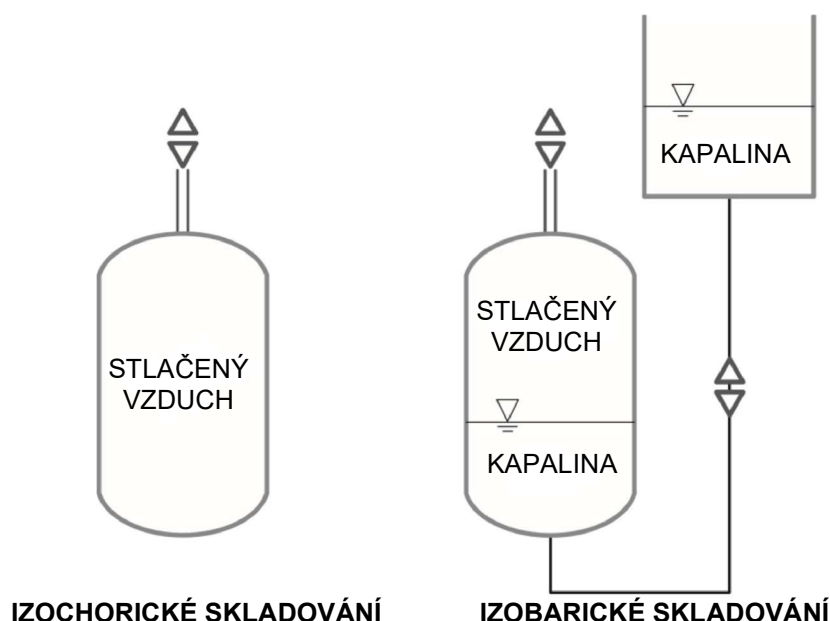
Obrázek 41: Schéma úložiště stlačeného vzduchu v systému CAES Huntorf, převzato z [49]

Dalším materiálem CAS vhodným pro velkokapacitní systémy CAES jsou tvrdé kamenité skály. Jejich největší nevýhodou a zároveň důvodem, proč se v systémech CAES téměř nevyužívají jsou vysoké náklady na těžbu a výstavbu nových nádrží. Řešením může být využití stávajících dolů, čímž náklady na výstavbu klesnou téměř o třetinu, to je však pořád ve srovnání se solnými nebo porézními ekonomicky nevýhodné. V budoucnu s vývojem těžební techniky a tím snížením nákladů na výstavbu se tato technologie může jevit slibně. Posledním vhodným materiálem pro CAS jsou porézní skály, jejichž příkladem mohou být solné akvifery (podzemní útvary nasáklé vodou). Významným pozitivem jsou zde velmi nízké náklady na výstavbu, tu však znevažuje fakt, že pro výstavbu jsou nutné rozsáhlé multioborové studie pro stanovení vhodnosti jednotlivých potenciálních míst. Tyto místa jsou celkově citlivé na znehodnocení vlivem prostředí a tím pádem také nemožnosti zde budovat systém CAES. V tabulce 13 jsou srovnány nejvýznamnější parametry pro výběr vhodného typu výše zmíněných úložišť stlačeného vzduchu pro systémy CAES. Náklady jsou rozděleny na náklady na komponenty, tzn. kompresor a expandér a na náklady na výstavbu, tzn. náklady na výstavbu samotného CAS pro akumulaci potřeby. [45][49]

Typ CAS	Kapacita [\$/kWe]	Náklady na komponenty [\$/kW]	Náklady na výstavbu [\$/kWh]	Doba skladování [h]	Celkové náklady [\$/kW]
Solné skály	200	350	1	10	360
Porézní skály	200	350	0,1	10	351
Tvrdé kamenité skály	200	350	30	10	650
Ocelové tlakové nádoby	20	350	30	3	440

Tabulka 13: Přehled parametrů vybraných typů úložišť stlačeného vzduchu pro systémy CAES [45]

Dalším způsobem rozdělení úložišť stlačeného vzduchu (CAS) je dle způsobu samotného skladování, zda skladování probíhá za konstantního objemu vzduchu, tento způsob skladování se nazývá izochorické, nebo skladování probíhá za konstantního tlaku vzduchu, pak se nazývá izobarické. Izochorické skladování, jak již bylo řečeno, probíhá za konstantního akumulárního objemu, s množstvím akumulované energie se mění tlak skladovaného vzduchu a právě velikost tohoto tlaku ukazuje stav nabití systému. Běžným příkladem izochorického skladování je v ocelových tlakových nádobách nebo v solných skalách. Při skladování izobarickým je konstantní tlak skladovaného vzduchu a mění se právě akumulární objem, ten se mění v závislosti na nabíjení/vybíjení systému. Přibližně konstantní tlak se zde udržuje hydraulicky, za pomoci vyrovnávací nádrže s kapalinou umístěné v určité výšce nad akumulárním prostorem, jak je znázorněno na obrázku 42. Výhodou izobarického skladování je velikost akumulárního prostoru, který může být podstatně menší než u izochorického skladování, vzhledem ke konstantnímu tlaku vzduchu zde lze využít téměř celý akumulární objem pro výrobu užitečné elektrické energie. Hlavní omezení izobarického skladování nastává během fáze komprese a expanze, kdy se expandéry a kompresory musí být schopny podřídit tlakům měnícím se v čase, což znamená, že nefungují na základě navrženého jmenovitého tlakového poměru a jejich účinnost se tak snižuje. Izochorické skladování má také své nevýhody, s vyprazdňováním akumulárního prostoru se snižuje tlak vzduchu, čímž se snižuje také výkon expandéru a tím se zároveň snižuje generovaná elektrická energie. To však není přijatelné při dodávání elektrické energie do sítě, kde musí být dodávaná elektrická energie v čase konstantní. Proto tak musí být expandér poháněn konstantním tlakem, nezávisle na tlaku v akumulárním prostoru, což se dosahuje škrcením vzduchu před vstupem do expandéru. V celkovém srovnání obou typů CAS se častěji používá izochorické skladování z důvodu větší složitosti izobarického skladování. Izochorické skladování se používá i v systémech CAES v Huntolfu a McIntoshi. Schéma obou typů skladování stlačeného vzduchu v systémech CAES jsou na obrázku 35. [45][49]



Obrázek 42: Schematicky znázorněné izochorické a izobarické skladování stlačeného vzduchu, převzato a upraveno z [45]

4.3.4 Technické parametry technologie CAES

Termodynamická analýza systémů CAES se obvykle provádí na obecném procesu komprese a expanze s využitím teorie ideálního plynu. Mechanická práce expandéru se převádí ze změny energie stlačeného vzduchu. V závislosti na trajektoriích expanze (jak je znázorněno na obrázku 28), se změny entalpie vzduchu v různých typech systémů CAES liší. Jak v systémech D-CAES, tak i v systémech A-CAES lze expanzi považovat za izoentropický (vratný adiabatický) děj bez přenosu tepla s vnějším prostředím. V případě, že dochází k přenosu tepla s vnějším prostředím, je děj považován za polytropický. Expanze probíhající v těchto dvou typech systémů CAES však mají odlišné počáteční podmínky stlačeného vzduchu z důvodu rozlišných mezistupňových procesů chlazení a ohřevu, tím pádem se jejich parametry expanze budou lišit. V systémech I-CAES je pak zachována izotermická expanze. [42][45]

Stavová rovnice ideálního plynu má tvar

$$pv = rT, \quad (4.18)$$

kde p je tlak (Pa), v měrný objem ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$), r měrná plynová konstanta ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) a T teplota (K).

V termodynamice se zmíněné expanzí děje sice liší, ale lze je obecně popsat vztahem

$$pv^n = \text{konst.}, \quad (4.19)$$

kde n je konstanta, měnící se v závislosti na typu děje: $n = 0$ při izobarickém ději, $n = 1$ při izotermickém ději, $n = \kappa$ při izoentropickém ději a $1 < n < \kappa$ při polytropickém ději. κ je Poissonova konstanta, která je dána vztahem

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}, \quad (4.20)$$

kde c_p je měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) a c_v měrná tepelná kapacita při konstantním objemu ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Měrnou technickou práci w_t ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$) při expanzi vzduchu lze určit integrací ze vztahu

$$w_t = - \int_1^2 v \, dp. \quad (4.21)$$

Spojením vztahu 4.19 (kde $n = \kappa$) a vztahu 4.21 lze odvodit technickou práci při izoentropické (vratné adiabatické) expanzi

$$w_t^s = - \int_1^{2,s} v \, dp = - \frac{\kappa}{\kappa - 1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_{2,s}}{p_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} - 1 \right], \quad (4.22)$$

kde integrační meze 1 a 2 představují počáteční a konečný stav expanze a horní index s vyjadřuje izoentropický děj. Za předpokladu nízkých tlaků, kde lze předpokládat model ideálního plynu, lze dosazením rovnice 4.18 rovnicí 4.22 přepsat na tvar

$$w_t^s = - \frac{\kappa}{\kappa - 1} r T_1 \left[\left(\frac{p_{2,s}}{p_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} - 1 \right]. \quad (4.23)$$

Pro stejný předpoklad jako u rovnice 4.23, lze určit teplotu vzduchu na výstupu z expandéru

$$T_{2,s} = T_1 \left(\frac{p_{2,s}}{p_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}. \quad (4.22)$$

Technickou práci a teplotu vzduchu na výstupu z expandéru při polytropické expanzi a předpokladu ideálního plynu lze získat stejně jako u izoentropické, jen se ve vztahu 4.19 Poissonova konstanta κ nahradí polytropickým exponentem n

$$w_t^p = - \int_1^{2,p} v \, dp = - \frac{n}{n - 1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_{2,p}}{p_1} \right)^{\frac{n}{n - 1}} - 1 \right] \quad (4.23)$$

$$w_t^p = - \frac{n}{n - 1} r T_1 \left[\left(\frac{p_{2,p}}{p_1} \right)^{\frac{n}{n - 1}} - 1 \right] \quad (4.24)$$

$$T_{2,p} = T_1 \left(\frac{p_{2,p}}{p_1} \right)^{\frac{n}{n - 1}}, \quad (4.25)$$

kde horní index p vyjadřuje polytropický děj.

Použitím $n = 1$ v rovnici 4.19 a dosazením do vztahu 4.21 lze, při předpokladu ideálního plynu, získat technickou práci pro izotermický děj

$$w_t^t = - \int_1^{2,t} v dp = p_1 v_1 \ln \left(\frac{p_1}{p_{2,t}} \right), \quad (4.26)$$

kde horní index t vyjadřuje izotermické děj.

Opět za předpokladu nízkých tlaků, kde platí rovnice 4.18, lze rovnici 4.25 přepsat jako

$$w_t^t = r T_1 \ln \left(\frac{p_1}{p_{2,t}} \right), \quad (4.27)$$

Výkon P generovaný roztáčením hřídele expandéru expanzí stlačeného vzduchu je pak dán vztahem

$$P = w_t \dot{m} \eta_M \eta_G, \quad (4.28)$$

kde \dot{m} je hmotnostní průtok vzduchu ($kg \cdot s^{-1}$), η_M mechanická účinnost expandéru (1), která zohledňuje ztráty v ložiskách expandéru, a η_G účinnost elektrického generátoru (1).

Výsledná elektrická energie E na svorkách generátoru tedy bude

$$E_v = \int_0^t P dt, \quad (4.29)$$

kde t je čas potřebný k vyčerpání plného zásobníku při plném výstupním výkonu (s).

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.3.2, výpočet účinnosti systémů D-CAES se liší od výpočtu účinnosti cyklu systémů AA-CAES a I-CAES. Je to dáno dodáváním dodatečné tepelné energie v podobě spalování fosilních paliv před expanzí v systémech D-CAES. Tato tepelná energie E_t se pak musí zohlednit při výpočtu účinnosti systémů D-CAES η_1 , kde ji přičteme k dodávané elektrické energii E_{el} na začátku procesu

$$\eta_1 = \frac{E_{vyrobená}}{E_{dodaná}} = \frac{E_v}{E_{el} + E_t}, \quad (4.30)$$

kde tepelnou energii E_t , získanou při dokonalém spalování fosilního paliva ve spalovací komoře lze získat vztahem

$$E_t = Q_i V_p \eta_s, \quad (4.31)$$

kde Q_i je výhřevnost paliva ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$), V_p objem spáleného paliva (m^3) a η_s účinnost spalování (1).

Výpočet účinností systémů AA-CAES a I-CAES pak bude podobný jako u systémů D-CAES, pouze s absencí dodávané tepelné energie v průběhu procesu, která zde není potřeba

$$\eta_2 = \frac{E_{\text{vyrobená}}}{E_{\text{dodaná}}} = \frac{E_v}{E_{el}}. \quad (4.32)$$

Jednou z výhod systémů CAES je umístění akumulčního úložiště CAS, které je většinou pod zemí, čímž nedochází k zabírání plochy nad zemí a lze ji tak využít k jiným účelům, např. pro větrné turbíny nebo solární panely pro zvýšení dodávky elektrické energie kompresním zařízením. Další výhodou je poskytování vysokého množství akumulované energie, což je zapříčiněno vysokým jmenovitým výkonem a vysokou energetickou kapacitou oproti jiným ESS. Vzhledem k stále rostoucímu množství energie z obnovitelných zdrojů je nezbytné mít k dispozici technologie s širokou škálou dob skladování. V tomto ohledu jsou systémy CAES jako technologie, která je schopna umožnit skladování energie v časovém horizontu několika hodin až dnů, schopny vyplňovat mezeru mezi krátkodobými a dlouhodobými technologiemi skladování energie. Další pozitivní vlastností je životnost, kdy může dosahovat až 12000 cyklů (což je přibližně 40 let provozu). Náklady na provoz jsou zde jedny z nejnižších mezi všemi EES (spolu s PHES), ačkoli jejich počáteční náklady jsou stejně jako u systémů PHES poměrně vysoké. [40][45]

Hlavní nevýhodou je nízká hustota energie a výkonu, což znamená, že množství energie a výkonu uložené v určitém objemu jsou nízké, což je způsobeno horšími termodynamickými vlastnostmi vzduchu. Proto je k uchování významného množství energie zapotřebí velkých zásobníků, jako např. zásobník systému D-CAES v McIntoshi s vnitřním objemem 532000 m^3 . Kromě toho mají systémy CAES relativně nízkou energetickou účinnost, rozsah energetické účinnosti se pohybuje mezi 40 a 70 %. Stávající systémy D-CAES mají energetickou účinnost 42 % v Huntorfu a 54 % v McIntoshi. Pro srovnání, pokročilejší systémy AA-CAES mají energetickou účinnost kolem 60 % v Goderichu a 67 % v Feichengu. Systémy CAES mají také ve srovnání s ostatními systémy EES vyšší dobu odezvy, jelikož se nejčastěji jedná o vícestupňové skladování, která zahrnuje proces několika mechanických systémů. Není tedy vhodná pro poskytování služeb kvality elektřiny a regulace napětí/frekvence, které vyžadují ESS s rychlou odezvou (jako jsou např. systémy FESS). U diabatických systémů D-CAES je další nevýhodou nutné spalování fosilních paliv, což má negativní vliv na životní prostředí a zároveň závislost na kolísavém trhu s fosilními palivy, to může mít dopad na dlouhodobou stabilitu systému. [40]

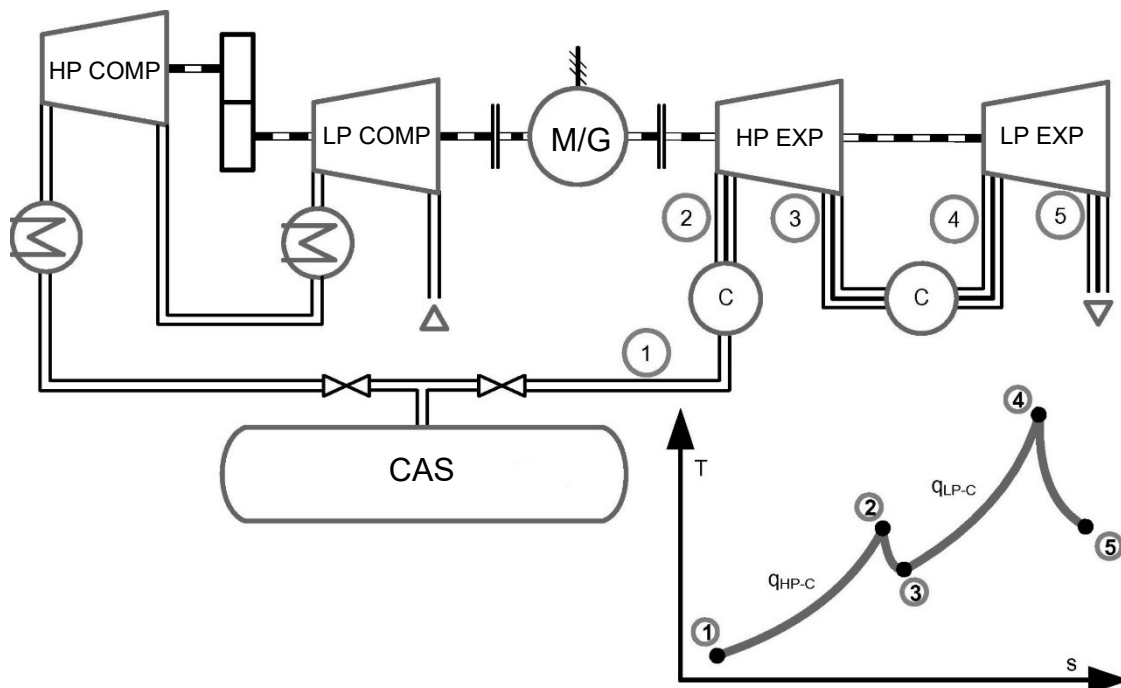
Vzhledem ke značným rozdílům v dosahovaných parametrech v závislosti na velikosti systémů CAES je tabulka 14 rozdělena na dvě části, na velkokapacitní systémy a na malokapacitní a mikrokapacitní systémy.

Parametr	Hodnota
Velkokapacitní systémy	
Jmenovitý výkon [MW]	100-321
Účinnost [%]	40-70
Jmenovitá energetická kapacita [MWh]	642-2640
Hustota energie [Wh/l]	2-6
Reakční doba	minuty
Doba vybíjení při jmenovitém výkonu	8-20 h
Životnost [cykly]	8000-12000
Malokapacitní a mikrokapacitní systémy	
Jmenovitý výkon [MW]	0,003-10
Účinnost [%]	-
Jmenovitá energetická kapacita [MWh]	0,002-0,0083
Hustota energie [Wh/l]	> 6
Reakční doba	sekundy-minuty
Doba vybíjení při jmenovitém výkonu	30 s - 40 min
Životnost [cykly]	Test 30000 stop/start

Tabulka 14: Základní technické parametry technologie CAES [19]

4.3.5 Systémy CAES ve světě

Prvním komerčním systémem CAES je elektrárna typu D-CAES Huntorf, která byla vybudována v roce 1978 nedaleko Brém v Německu. Tato elektrárna o výkonu 321 MW byla postavena primárně pro možnost black-startu jaderných bloků v blízkosti Severního moře (opětovného nastartování elektrárny během výpadku elektrické sítě) a jako doplněk k ostatním systémům ESS (zejména PHES) pro zajišťování levného špičkového výkonu a pro vyplnění výrobních mezer po pomalu reagujících uhelných elektrárnách. Stále častěji se však využívá k vyrovnávání rapidně rostoucího výkonu produkovaného větrnými elektrárnami ze severního Německa. Elektrárna Huntorf úspěšně funguje téměř 50 let. Původně byla navržena s objemem zásobníku schopným pokrýt dvě hodiny jmenovitého výkonu, od té doby byla však provozně upravena na možnost poskytovat až tříhodinovou akumulaci elektrické energie a došlo ke zvýšení výstupního výkonu z 290 MW na již zmiňovaných 321 MW. Jak lze vidět z obrázku 43, okolní vzduch je zde stlačován dvěma samostatnými turbokompresorovými jednotkami, mechizovaný dvoustupňový proces této komprese pak omezuje ztráty exergie diabatického procesu bez zařízení pro ukládání tepla (TES). CAS se skládá ze dvou solných jeskyní s celkovým objemem 310000 m³ (schéma úložiště lze vidět na obrázku 41), aby byl umožněn provoz systému i v době, kdy je jedna z kaveren v údržbě. Stejně jako u procesu komprese, proces expanze probíhá ve dvou samostatných jednotkách. Jak je také patrné ze schématu elektrárny na obrázku 43 a také z uspořádání strojovny na obrázku 44 jsou kompresní a expanzní soustavy vzájemně propojeny elektrickým motor/generátorem (M/G). Ten tak funguje jako elektromotor i generátor a je spojen s lopatkovým soustrojím přes spojku na každé straně. Jelikož vysokotlaký kompresor (HP COMP) pracuje při vyšších otáčkách, je spojen ještě s převodovkou, redukující rozdíl otáček stroju, kterou lze také vidět na obrázku 43. [44][49]



Obrázek 43: Schéma a T-s diagram expanzního procesu CAES Huntorf, převzato a upraveno z [44]

Při expanzním režimě, kdy vzduch vystupuje z CAS je nejprve přiškrcen před vstupem do vysokotlaké spalovací turbíny (C) (bod 1 na obrázku 43), to má za následek značné energetické ztráty, ale umožňuje provoz spalovací komory a vysokotlaké turbíny (HP EXP) za konstantního tlaku. Za spalovací komorou (bod 2) je vzduch ohřát měrným teplem q_{HP-C} (jak lze vidět na T-s diagramu na obrázku 43) a expanduje ve vysokotlaké turbíně (bod 3). Zde se vzduch opět ohřeje v nízkotlaké spalovací komoře (C) měrným teplem q_{LP-C} před vstupem do nízkotlaké turbíny (LP EXP) (bod 4). Již plně expandovaný vzduch vystupuje z nízkotlaké turbíny do okolí. Exergie spalin již není dále jinak využita. Jakožto první elektrárně svého druhu CAES elektrárna Huntorf přišla s unikátními prvky, které byly poprvé implementovány: [44]

- Skladování stlačeného vzduchu v solných jeskyních vytěžených roztokem
- Vysokotlaká spalovací komora
- Vysokotlaká expanzní turbína a plynová turbína s možností rychlého náběhu
- Poměr výkonu motoru/generátoru 1:5

Navzdory výše zmíněným provozním inovacím se i tak podařilo realizovat bezpečný a plynulý provoz této elektrárny. [44]

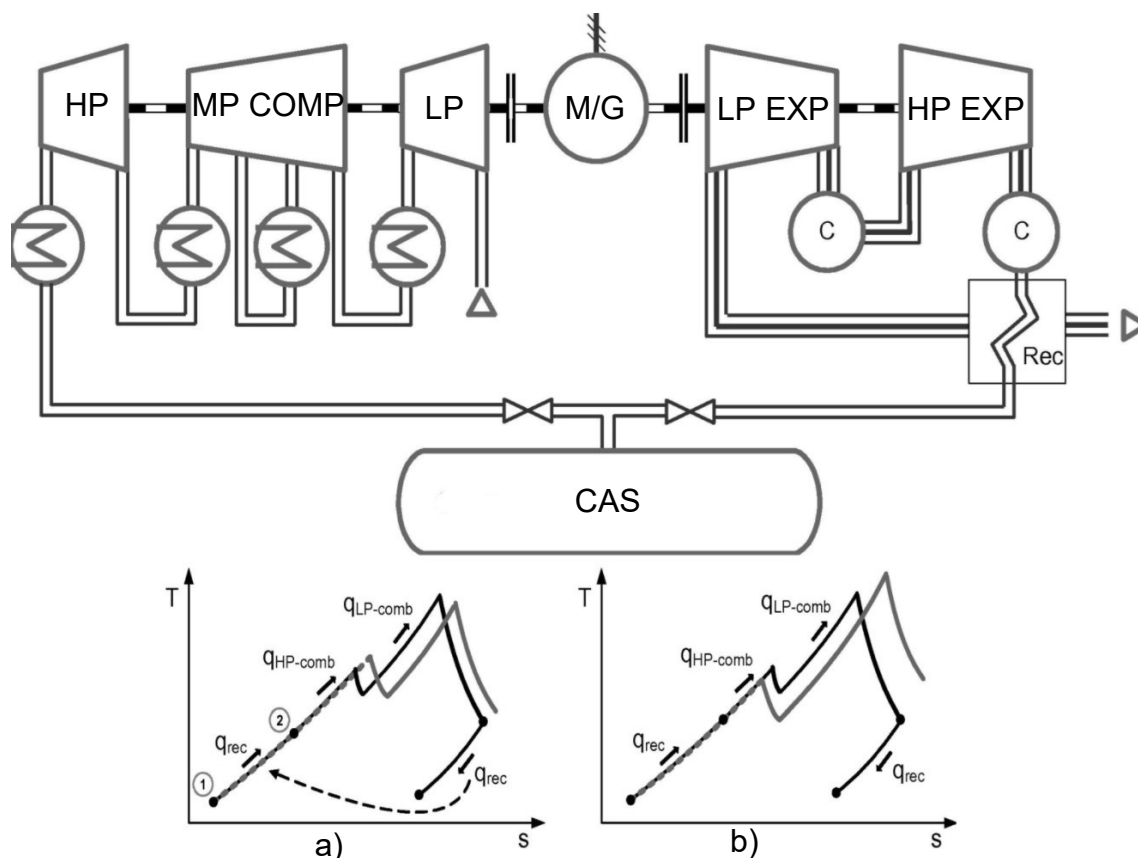
Parametrické srovnání při jednotlivých fázích cyklu elektráren CAES Huntorf a McIntosh je uvedeno v tabulce 15. Na následujícím obrázku 44 je pohled na strojovnu v CAES elektrárně Huntorf, která odpovídá schématickému zobrazení na obrázku 43.



Obrázek 44: Pohled do strojovny CAES elektrárny Huntorf, převzato z [44]

V roce 1991, 13 let po instalaci elektrárny v Huntorfu, byla v americkém McIntoshi vybudována druhá velká elektrárna D-CAES o výkonu 110 MW. Výstavba této elektrárny byla motivována vysokými cenami ropy a zemního plynu, což přitahovalo pozornost energetických společností k systémům CAES jako zdroj levné špičkové elektrické energie. Byla navržena pro 26 hodin výroby při plném výkonu a využívá oproti elektrárně v Huntorfu pouze jednu solnou jeskyni, avšak s celkovým objemem 538000 m³. Pro tuto elektrárnu byl vypracován samostatný projekt, avšak mnoho provozních aspektů elektrárny (vstupní teploty, tlaky atd.) jsou podobné těm z projektu elektrárny Huntorf. Obdobně jako Huntorf nemá ani elektrárna McIntosh žádné zařízení pro akumulaci tepla (TES). Základní uspořádání uplatňující motorgenerátor v jednohřídelovém provedení je v podstatě stejné jako v elektrárně Huntorf. Z obrázku 45 lze vidět, že okolní vzduch je stlačován třemi samostatnými turbokompresorovými stroji, mezi kterými je čtyřstupňový chladicí proces. Oproti zařízení Huntorf je zde také střednětlaký kompresor (MP COMP), který slouží k rovnoměrnějšímu průběhu komprese okolního vzduchu o atmosférickém tlaku na požadovaný ukládací tlak. Dalším rozdílem, a hlavně technologickým pokrokem je použití rekuperátoru tepla z výfukových plynů (Rec). Rekuperátor snižuje spotřebu paliva přibližně o 22 % při plném výkonu, a je vybaveno dvoupalivovou spalovací komorou schopnou spalovat kromě zemního plynu také topný olej. Během expanzního procesu se ještě horké výfukové plyny z nízkotlakového expandéru používají pomocí již zmíněného rekuperátoru k předehřevu stlačeného vzduchu proudícího z kaverty měrným teplem q_{rec} , jak je zobrazeno na obrázku 45 a) v T-s diagramu přerušovanou šipkou. Před vstupem do vysokotlakové turbíny se k němu ještě přidává měrné teplo $q_{HP-comb}$ ze spalovací komory. Po expanzi ve vysokotlakové turbíně se následně vzduch ve spalovací komoře dohřeje měrným teplem q_{LP-co} , aby se zvýšil výsledný výkon nízkotlakové turbíny. Na obrázku 45 je kromě schématu elektrárny McIntosh také uveden srovnávací přehled pomocí T-s diagramů

expanzního procesu zařízení McIntosh (černá čára) a zařízení Huntorf (šedá čára). Diagram a) porovnává expanzní procesy před modernizací elektrárny Huntorf a diagram b) pak ukazuje srovnání po modernizaci této elektrárny. Při vzájemném porovnání obou diagramů je patrný dopad modernizace v elektrárně Huntorf. Teplota na vstupu do vysokotlaké turbíny byla po této modernizaci snížena pod teplotu v elektrárně McIntosh, avšak na druhou stranu se teplota na vstupu do nízkotlaké turbíny výrazně zvýšila, což vedlo k již zmiňovanému zvýšení výkonu z 220 MW na 321 MW. [44][49]



Obrázek 45: Schéma elektrárny McIntosh a srovnávací T-s diagramy elektráren Huntorf a McIntosh a) před modernizací elektrárny Huntorf b) po modernizaci elektrárny Huntorf, převzato a upraveno z [44]

SYSTÉMY AKUMULACE MECHANICKÉ ENERGIE

Jak již bylo zmíněno obě tyto elektrárny typu D-CAES si jsou velmi podobné. Jejich parametrické srovnání při jednotlivých fázích cyklu je shrnuto v následující tabulce 15.

	Huntorf	McIntosh
Obecné parametry		
Provozní společnost	E.ON Kraftwerke	PowerSouth
Účinnost cyklu [1]	0,42	0,54
Příkon pro 1 kWh _{el} výkonu	0,8 kWh _{el} /1,6 kWh _{vzduch}	0,69 kWh _{el} /1,17 kWh _{vzduch}
Energetická kapacita [MWh]	642	2640
Plánování - výstavba - uvedení do provozu	1969-1978	1988-1991
Komprese		
Výrobce kompresoru	Sulzer (dnes MAN Turbo)	Dresser-Rand
Max. el. příkon [MW]	60	50
Max. hmotnostní průtok vzduchu [kg/s]	108	~ 90
Počet kompresorových jednotek	2	4
Doba nabíjení (při plném zatížení) [h]	~ 8	~ 38
Skladování		
Stavební společnost CAS	KBB	PB-KBB
Rozsah tlaku v CAS [MPa]	4,6-7,2	4,6-7,5
Objem CAS [m ³]	310000	538000
Expanze		
Výrobce turbíny	BBC (dnes Alstom)	Dresser-Rand
Maximální výstupní výkon [MW]	321	110
Rozsah regulace výstupního výkonu [MW]	100-321	10-110
Doba vybití (při plném zatížení) [h]	~ 2	~ 24
Reakční doba (normální/nouzová) [min]	14/8	12/7
Max. hmotnostní průtok [kg/s]	455	154
Parametry vzduchu při vstupu do vysokotlaké turbíny	4,13 MPa / 490 °C	4,2 MPa / 538 °C
Parametry vzduchu při vstupu do nízkotlaké turbíny	1,28 MPa / 945 °C	1,5 MPa / 871 °C
Teplota výfukových plynů [°C]	480	370 (před rekuperátorem)

Tabulka 15: Parametrické srovnání při jednotlivých fázích cyklu elektráren Huntorf a McIntosh [44]

V tabulce 15 si lze všimnout hlavních dvou odlišností srovnávaných elektráren D-CAES. Tou první je podstatný rozdíl mezi účinnostmi, účinnost elektrárny McIntosh je 54 % naproti tomu v Huntorfu je to pouze 42 %. Z technického hlediska to lze vysvětlit použitím rekuperátoru v McIntoshi a jeho absencí v elektrárně Huntorf. Také lze vzít v úvahu obecný technologický pokrok v účinnosti komponent, k němuž došlo během 13 let mezi instalacemi obou elektráren. Druhým nejpodstatnějším rozdílem je doba nabíjení a doba vybíjení. Tento značný rozdíl je dán účelem, pro který byla elektrárna navržena. Elektrárna McIntosh byla navržena tak, aby prováděla akumulaci na týdenní bázi, naproti tomu elektrárna Huntorf s krátkou dobou nabíjení a vybíjení byla primárně navržena k poskytování rezervního výkonu a schopnosti black-startu, kde je také vysoká účinnost méně důležitá. [44]

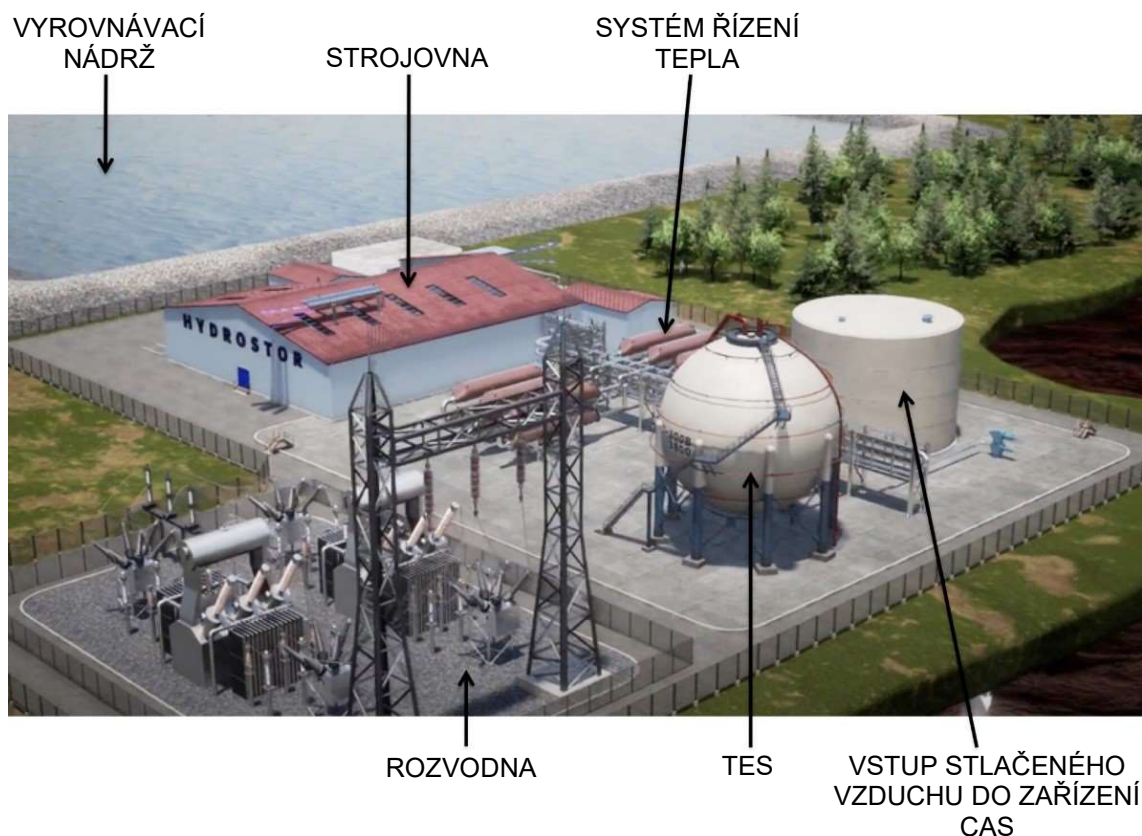
Systémy D-CAES jsou již staré technologie a jejich značnou nevýhodou při pohledu do budoucna je závislost na spalování fosilních paliv, předmětem dnešního vývoje je tak přejít především na technologie AA-CAES, které eliminují spalování paliva a zlepšují účinnost cyklu celého systému recyklací a opětovným využitím kompresního tepla, jakožto pouze akumulční zařízení. Vývojem systémů AA-CAES se ve velkém zabývá Čína, kde vznikají první komerční projekty. Ve městě Yingcheng v provincii Hubei byla 9. dubna tohoto roku připojena k síti elektrárna AA-CAES s výkonem 300 MW a energetickou kapacitou 1500 MWh, kdy využívá opuštěné solné doly ve zmíněné oblasti Yingcheng. Systém AA-CAES s názvem Hubei Yingchang byl vybudován v rozmezí dvou let, což je zhruba třikrát až čtyřikrát rychleji, než by potřeboval systém PHES. Celková investice činí 270 milionů amerických dolarů, vlastníky jsou společnosti China Energy Construction Digital Group a State Grid Hubei Integrated Energy Services Co. Projekt je navržen na dodávání 498 GWh s výrobou 319 GWh energie ročně, což představuje účinnost zhruba 64 %, která by však mohla časem dosáhnout 70 %. Jeho úkolem je především zlepšit kapacitu regionální energetické sítě pro snížení špiček. Obecně lze říci, že pomůže do sítě integrovat více obnovitelných zdrojů energie, jako je větrná nebo solární energie, které jsou známé pro svojí nekonstantní výrobu energie v čase. Cílem je také pomoci nedalekému městu Xiaogan realizovat plán na zvýšení spotřeby energie i její dekarbonizaci. Nejsou zde k dohledání žádné specifitější provozní parametry, na obrázku 46 je pouze panoramatický pohled na elektrárnu. [50][51]



Obrázek 46: Pohled na elektrárnu AA-CAES Hubei Yingcheng, převzato z [50]

Druhý významný projektem AA-CAES v Číně je elektrárna v městě Feicheng v provincii Šan-tung s celkovou kapacitou 310 MW a je budována ve dvou fázích. První fáze byla vybudována již v roce 2021 s výkonem 10 MW, kdy využívá systém solných jeskyň. Druhá fáze je v dnešní době již ve výstavbě s očekávaných výkonem 300 MW a kapacitou 1800 MWh. [51][52]

Dalším zajímavým komerčním projektem je systém AA-CAES Goderich, který je provozován společností Hydrostor, který byl uveden do provozu v roce 2019 v Goderichu v kanadském Ontariu. Tento systém AA-CAES může dodávat jmenovitý výkon 1,75 MW po dobu 5 až 6 hodin a disponuje kapacitou 10 MWh, čímž se jedná o malokapacitní systém AA-CAES, oproti výše zmíněným velkokapacitním systémům AA-CAES, které disponují řádově většími výkony a kapacity energie. Zajímavostí tohoto projektu je izobarické skladování stlačeného vzduchu v CAS. V CAS se hydraulicky udržuje konstantní tlak za pomoci vyrovnávací nádrže s kapalinou umístěného na povrchu (podrobný popis tohoto typu skladování stlačeného vzduchu v CAS je v kapitole 4.3.3), jak lze také vidět na obrázku 47, kde je zobrazeno uspořádání nadzemních zařízení tohoto systému. [3]



Obrázek 47: Obecné uspořádání nadzemních zařízení systému AA-CAES Goderich, převzato a upraveno z [3]

Jak již bylo řečeno systémy AA-CAES jsou z pohledu do budoucna slibnou technologií, jelikož nejsou závislá na fosilních palivech. V dnešní době je tedy mnoho projektů systémů AA-CAES ve výstavbě nebo na pomezí experimentálního a komerčního využití. Dochází také k rozsáhlým výzkumům, zaměřujícím se na konstrukci zařízení a na numerické simulace cyklů.

5. Srovnání posuzovaných systémů MESS

Pro vzájemné porovnání je u všech tří systémů MESS na konci kapitoly s technickými parametry (4.1.3, 4.2.4 a 4.3.4) vždy shrnující tabulka se základními technickými parametry. Při porovnání těchto tří tabulek je patrné, že velkokapacitní systémy CAES a systémy PHES mají řádově větší jmenovité výkony oproti malokapacitním a mikrokapacitním systémům CAES a systémům FESS. Takto rozdílné provozní parametry pak vedou k odlišným aplikacím. Velkokapacitní systémy CAES a systémy PHES jsou využívány pro velkokapacitní řízení spotřeby energie a proti tomu malokapacitní a mikrokapacitní systémy CAES a systémy FESS jsou využívány spíše pro řízení kvality a spolehlivost dodávky. Podrobněji jsou aplikace systémů EES popsány v kapitole 2.2. Pro ucelený přehled o systémech MESS jsou v tabulce 16 uvedeny zásadní výhody a nevýhody technologií systémů FESS, PHES a CAES dle kterých je možné implementovat tyto systémy do průmyslové praxe. Systémy CAES jsou rozděleny na AA-CAES, I-CAES a D-CAES, ty pak dále na malokapacitní (ve kterých jsou zahrnuté také mikrokapacitní) a velkokapacitní z důvodu některých rozdílných výhod a nevýhod.

Typ MESS		Výhody	Nevýhody
FESS		krátká reakční a vybíjecí doba žádné znečištění vysoká hustota energie malé rozměry vysoká účinnost	nízká kapacita skladování hlučnost samovybíjení vysoké investiční náklady na jednotku uložené energie
PHES		vysoká kapacita skladování stabilita (spolehlivost) nejvyspělejší systém EES dlouhá životnost výborný poměr účinnost/výkon nízké náklady na provoz nezávislost na fosilních palivech	vysoké investiční náklady nízká hustota energie obrovské rozměry dlouhá vybíjecí doba potenciální dopad na životní prostředí
CAES	AA-CAES a I-CAES	flexibilita nezávislost na fosilních palivech	spíše ve fázi výzkumu proměnlivá účinnost tepelné a tlakové ztráty
	D-CAES	flexibilita technická vyspělost	závislost na fosilních palivech proměnlivá účinnost tepelné a tlakové ztráty
	Velkokapacitní	vysoká kapacita skladování možnost Black-startu	nízká hustota energie dlouhá vybíjecí doba
	Malokapacitní	vysoká hustota energie krátká reakční a vybíjecí doba	nízká kapacita skladování vysoké investiční náklady na jednotku uložené energie

Tabulka 16: Tabulka 17: Srovnání výhod a nevýhod systémů FESS, PHES a CAES [8][9]

6. Závěr

V rámci této bakalářské práce jsem se podrobně zabýval problematikou mechanických systémů akumulace energie. V první části práce jsou přehledově uvedeny technologie akumulace energie, tedy jejich obecný princip, aplikace ve výrobním řetězci elektřiny a jejich spolupráce s obnovitelnými zdroji energie, dále je prezentováno srovnání dostupných globálních a mezistátních dat v počtu projektů EES a celkového instalovaného výkonu z těchto systémů. Následně bylo provedeno rozdělení technologií akumulace energie dle formy energie, na kterou se elektrická energie přemění a také dle závislosti doby skladování na výstupním výkonu. Druhá část práce je zaměřena na tři hlavní mechanické typy akumulace energie, akumulaci energie pomocí setrvačníků (FESS), přečerpávací vodní elektrárny (PHES) a akumulaci energie do stlačeného vzduchu (CAES) a jejich detailní popis.

V části věnované systému akumulace energie pomocí setrvačníků (FESS), kdy je energie akumulována ve formě kinetické energie setrvačnicku, je popsán princip fungování, používané motor/generátory pro dodání a následné generování elektrické energie, materiály rotoru (setrvačnicku) a typy ložisek pro účinný a bezpečný provoz. Dále jsou uvedeny základní výpočetní vztahy a ideální tvary setrvačnicku pro co nejefektivnější akumulaci a jejich výhody a nevýhody. Popsány jsou také příklady využití setrvačnickové technologie v trakčních a vozidlových aplikacích, v technologiích FACT a UPS, pro vyhlazování výkonu a stabilizaci frekvence sítě včetně přehledu vybraných komerčních projektů systémů FESS.

V části věnované přečerpávacím vodním elektrárnám (PHES), kdy se akumuluje energie ve formě potenciální energie přečerpáním vody z dolní do horní akumulární nádrže, je popsán princip fungování, typy uspořádání a vhodné umístění nádrží, přiváděče pro umožnění transportu vody, turbíny pro přeměnu energie vody na energii mechanickou a motor/generátory pro přeměnu mechanické energie z turbíny na požadovanou elektrickou energii, transformovna a rozvodna pro zvýšení napětí pro následný rozvod a distribuci. Dále jsou uvedeny technické parametry s výpočetními vztahy a výhody/nevýhody systémů PHES a provozní parametry systémů PHES používaných v České republice a několika projektů PHES ve světě.

V části věnované technologii akumulace energie do stlačeného vzduchu (CAES), kdy se akumuluje energie ve formě vzduchu stlačeného kompresorem, je popsán princip fungování, rozdělení dle velikosti (jmenovitého výkonu) a dle způsobu řízení tepla během fáze komprese a expanze, používané kompresory/expandéry, typy materiálů úložiště stlačeného vzduchu a rozdělení úložišť dle způsobu samotného skladování. Dále jsou uvedeny výpočetní vztahy a výhody/nevýhody technologie, upořádání a provozní parametry systémů D-CAES Huntorf a McIntosh a dále vybrané údaje o systémech AA-CAES v Yingchengu a Goderichu.

Na závěr bylo provedeno srovnání těchto tří typů MESS včetně jejich výhod a nevýhod. Bylo zjištěno, že velkokapacitní systémy CAES a systémy PHES mají řádově větší jmenovité výkony oproti mikro a malokapacitním systémům CAES a systémům FESS. Takto rozdílné provozní parametry pak vedou k odlišným aplikacím. Velkokapacitní systémy CAES a systémy PHES jsou využívány pro velkokapacitní řízení spotřeby energie a proti tomu mikro a malokapacitní systémy CAES a systémy FESS jsou využívány spíše pro řízení kvality a spolehlivost dodávky energie.

Seznam zkratek

EES	Electrical Energy Storage (Skladování elektrické energie)
FACT	Flexible Alternating Current Transmission (Flexibilní přenos střídavého proudu)
PHES	Pumped Hydro Energy Storage (Přečerpávací vodní elektrárna)
PVE	Přečerpávací vodní elektrárna
CAES	Compressed Air Energy Storage (Akumulace energie do stlačeného vzduchu)
MESS	Mechanical Energy Storage System (Systém mechanického skladování energie)
FESS	Flywheel Energy Storage System (Akumulace energie pomocí setrvačnicků)
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor (Synchronní motor s permanentními magnety)
IM	Induction Machine (Indukční stroj)
SRM	Switched Reluctance Machine (Spínací reluktanční stroj)
AFRM	Axial Flux Permanent Magnet (Axiální uspořádání permanentních magnetů)
RFPM	Radial Flux Permanent Magnet (Radiální uspořádání permanentních magnetů)
BESS	Battery Energy Storage System (Akumulace energie pomocí baterií)
UPS	Uninterruptible Power Supply (Zdroj nepřerušitelného napájení)
MSC	Machine-side Converter (Měnič u stroje)
GSC	Grid-side Converter (Měnič u sítě)
DC	Direct Current (Stejnoseměrný proud)
AC	Alternating Current (Střídavý proud)
CAS	Compressed Air Storage (Úložiště stlačeného vzduchu)
LS-CAES	Large Scale CAES (Velkokapacitní CAES)
SS-CAES	Small Scale CAES (Malokapacitní CAES)
S-CAES	Micro Scale CAES (Mikrokapacitní CAES)
D-CAES	Diabatic CAES (Diabatické CAES)

SYSTÉMY AKUMULACE MECHANICKÉ ENERGIE

A-CAES	Adiabatic CAES (Adiabatické CAES)
AA-CAES	Advanced Adiabatic CAES (Pokročilé adiabatické CAES)
I-CAES	Isothermal CAES (Izotermické CAES)
TES	Thermal Energy Storage (Skladování tepelné energie)
COMP	Compressor (Kompresor)
EXP	Expander (Expandér)
HP	High Pressure (Vysokotlaký)
LP	Low Pressure (Nízkotlaký)

Seznam obrázků

Obrázek 1: Profil zatížení vysokokapacitního systému EES. a) systém EES ve špičce b) systém EES při vyrovnávání zátěže, převzato a upraveno z [1].....	9
Obrázek 2: Přínosy systémů EES ve výrobním řetězci elektřiny, převzato a upraveno z [1].....	10
Obrázek 3: Aplikace systémů EES, převzato a upraveno z [1].....	12
Obrázek 4: Instalovaný výkon v průběhu let 1929 až 2020, převzato a upraveno z [4]	12
Obrázek 5: Diagram oblasti působení rozdílných technologií EES, převzato z [7] ..	14
Obrázek 6: Uspořádání motor/generátoru PMSM a) typ AFRM b) typ RFPM, převzato a upraveno z [13].....	16
Obrázek 7: Schéma konstrukce setrvačníku, převzato a upraveno z [16].....	18
Obrázek 8: Magnetické radiální ložisko (aktivní), převzato a upraveno z [17]	18
Obrázek 9: Dutý setrvačnick se zakótovaným vnitřním a vnějším poloměrem, převzato z [18].....	19
Obrázek 10: Průřezy různých typů setrvačníku, převzato a upraveno z [18].....	21
Obrázek 11: Aplikace systému FESS v elektromobilu, převzato a upraveno z [20]..	22
Obrázek 12: Základní zapojení FESS v UPS, převzato a upraveno z [21]	23
Obrázek 13: Výkon větrných elektráren s použitím a bez použití systému FESS, převzato a upraveno z [10]	24
Obrázek 14: Aplikace systému FESS s fotovoltaickými panely, převzato a upraveno z [10]	24
Obrázek 15: Horní nádrž Přečerpávací vodní elektrárny Dlouhé stráně, převzato z [24]	26
Obrázek 16: Diagram orientačních hodnot průměrného ročního výparu z volné hladiny v závislosti na nadmořské výšce, převzato z [26]	27
Obrázek 17: Schéma přečerpávací vodní elektrárny, převzato a upraveno z [19]....	28
Obrázek 18: Vtokový objekt systému PHES s klapkovými rychlouzávěry, převzato z [23]	30
Obrázek 19: Schéma přečerpávací elektrárny s umělou akumulací a třístrojovým uspořádáním, převzato z [23]	31
Obrázek 20: Diagram použitelnosti Francisovy a Peltonovy turbíny, převzato z [23]	32
Obrázek 21: Vertikální Francisova turbína, převzato z [28]	32

Obrázek 22: Peltonova turbína, převzato z [28].....	33
Obrázek 23: Rotor s vyniklými póly v PHES Dalešice, převzato z [32].....	34
Obrázek 24: Přečerpávací vodní elektrárna Dalešice, převzato z [35]	37
Obrázek 25: Přečerpávací vodní elektrárna Štechovice II, převzato z [36]	38
Obrázek 26: Schéma principu fungování konvenčních systémů CAES, převzato a upraveno z [40].....	40
Obrázek 27: Diagram rozdělení systémů CAES dle způsobu řízení tepla při fázi komprese a expanze	41
Obrázek 28: P-V diagramy tří základních typů systémů CAES a) D-CASE, b) A-CAES a c) I-CAES, převzato z [42]	41
Obrázek 29: Schéma systému D-CAES, převzato a upraveno z [43].....	42
Obrázek 30: Schéma systému AA-CAES, převzato a upraveno z [43].....	43
Obrázek 31: Zjednodušené koncepty systémů AA-CAES a) bez TES a b) s TES, převzato a upraveno z [44]	44
Obrázek 32: Účinnost cyklu systémů AA-CAES v závislosti na skladovací teplotě, převzato a upraveno z [44]	44
Obrázek 33: Schéma středně teplotního AA-CAES, převzato z [44]	45
Obrázek 34: Schéma nízkoteplotního AA-CAES, převzato a upraveno z [44].....	46
Obrázek 35: Zjednodušené schéma systémů I-CAES a) C-HyPES b) O-HyPES, převzato a upraveno z [44]	47
Obrázek 36: Provozní charakteristiky různých kompresorů, převzato a upraveno z [45]	48
Obrázek 37: Konstrukce pístového stroje, převzato a upraveno z [42].....	49
Obrázek 38: Dvoušroubový kompresor/expandér, převzato z [42]	50
Obrázek 39: Provozní cyklus spirálového expandéru, převzato a upraveno z [47]...	50
Obrázek 40: Schéma a princip axiální turbíny a axiálního kompresoru, převzato a upraveno z [48].....	51
Obrázek 41: Schéma úložiště stlačeného vzduchu v systému CAES Huntorf, převzato z [49].....	53
Obrázek 42: Schematicky znázorněné izochorické a izobarické skladování stlačeného vzduchu, převzato a upraveno z [45]	55
Obrázek 43: Schéma a T-s diagram expanzního procesu CAES Huntorf, převzato a upraveno z [44].....	60

Obrázek 44: Pohled do strojovny CAES elektrárny Huntorf, převzato z [44]	61
Obrázek 45: Schéma elektrárny McIntosh a srovnávací T-s diagramy elektráren Huntorf a McIntosh a) před modernizací elektrárny Huntorf b) po modernizaci elektrárny Huntorf, převzato a upraveno z [44].....	62
Obrázek 46: Pohled na elektrárnu AA-CAES Hubei Yingcheng, převzato z [50].....	64
Obrázek 47: Obecné uspořádání nadzemních zařízení systému AA-CAES Goderich, převzato a upraveno z [3].....	65

Seznam tabulek

Tabulka 1: Srovnání států dle instalovaného výkonu [4].....	13
Tabulka 2: Srovnání výhod a nevýhod elektrických strojů používaných v technologiích FESS [11]	16
Tabulka 3: Srovnání parametrů různých materiálů setrvačníků [11].....	17
Tabulka 4: Základní technické parametry technologie FESS [19]	21
Tabulka 5: Vybrané komerční projekty systémů FESS [19].....	25
Tabulka 6: Procentuální rozdělení ročního výparu na jednotlivé měsíce [26].....	28
Tabulka 7: Srovnání parametrů vybraných vodních turbín [30]	33
Tabulka 8: Základní technické parametry technologie PHES [19].....	36
Tabulka 9: Souhrn základních parametrů přečerpávacích vodních elektráren v ČR [37]	38
Tabulka 10: Vybrané komerční projekty systémů PHES ze světa [19].....	39
Tabulka 11: Srovnání technických parametrů tří typů systémů CAES [44].....	47
Tabulka 12: Přehled parametrů expandérů a kompresorů pro systémy CAES [42]..	52
Tabulka 13: Přehled parametrů vybraných typů úložišť stlačeného vzduchu pro systémy CAES [45].....	54
Tabulka 14: Základní technické parametry technologie CAES [19]	59
Tabulka 15: Parametrické srovnání při jednotlivých fázích cyklu elektráren Huntorf a McIntosh [44].....	63
Tabulka 16: Tabulka 16: Srovnání výhod a nevýhod systémů FESS, PHES a CAES [8][9].....	66

Seznam zdrojů

- [1] CHEN, Haisheng; NGOC CONG, Thang; YANG, Wei; TAN, Chunqing; LI, Yongliang et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*. 2009, roč. 19, č. 3, s. 291-312.
- [2] ANEKE, Mathew a WANG, Meihong. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. *Applied Energy*. 2016, roč. 179, s. 350-377.
- [3] LOBNER, Peter. New Grid-scale Energy Storage Alternatives to Batteries. Online. Dostupné z: <https://lynceans.org/all-posts/new-grid-scale-energy-storage-alternatives-to-batteries/>. [cit. 2024-05-05].
- [4] *DOE Global Energy Storage Database*. Online. Dostupné z: <https://public.tableau.com/views/DOEGlobalEnergyStorageDatabase/Top10Countries?%3AshowVizHome=no>. [cit. 2024-05-05].
- [5] SCHMIEGEL, Armin U. *Energy Storage Systems: System Design and Storage Technologies*. Oxford: Oxford University Press, 2023. ISBN 0192858009.
- [6] Everything You Need To Know About Energy Storage Systems. Online. Dostupné z: <https://www.nesfircroft.com/resources/blog/everything-you-need-to-know-about-energy-storage-systems/>. [cit. 2024-05-05].
- [7] BAŠTA, Vít; ŠPALE, Jan; RATHAN, Miroslav; HOFMAN, Martin; KASAN, Michal et al. Skladování elektřiny prostřednictvím tepla aneb Carnotovy baterie 1. díl – principy a přehled. Online. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektřiny/21610-skladovani-elektřiny-prostřednictvím-tepla-aneb-carnotovy-baterie-1-díl-principy-a-přehled>. [cit. 2024-05-05].
- [8] MAHMOUD, Montaser; RAMADAN, Mohamad; OLABI, Abdul-Ghani; PULLEN, Keith a NAHER, Sumsun. A review of mechanical energy storage systems combined with wind and solar applications. *Energy Conversion and Management*. 2020, roč. 210, č. článku 112670.
- [9] KOOHI-FAYEGH, S. a ROSEN, M.A. A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage*. 2020, roč. 27, č. článku 101047.
- [10] KHODADOOST ARANI, A.A.; KARAMI, H.; GHAREHPETIAN, G.B. a HEJAZI, M.S.A. Review of Flywheel Energy Storage Systems structures and applications in power systems and microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, roč. 69, s. 9-18.
- [11] LI, Xiaojun a PALAZZOLO, Alan. A review of flywheel energy storage systems: state of the art and opportunities. *Journal of Energy Storage*. 2022, roč. 46, č. článku 103576.
- [12] KOBRLE, Pavel a PAVLEKA, Jiří. *Elektrické pohony a jejich řízení*. 3: přepracované vydání. Praha: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06007-0.
- [13] BOLUND, Björn; BERNHOFF, Hans a LEIJON, Mats. Flywheel energy and power storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2007, roč. 11, č. 2, s. 235-258.
- [14] ZAPOMĚL, Jaroslav. Skladování energie – setrvačníky. Online. Dostupné z: <http://upase.it.cas.cz/skladovani-energie-setrvacniky/>. [cit. 2024-05-05].

- [15] KALE, V. a SECANELL, M. A comparative study between optimal metal and composite rotors for flywheel energy storage systems. *Energy Reports*. 2018, roč. 4, s. 576-585.
- [16] JI, Weiming; HONG, Feng; ZHAO, Yuzheng; LIANG, Lu; DU, Hao et al. Applications of flywheel energy storage system on load frequency regulation combined with various power generations: A review. *Renewable Energy*. 2024, roč. 223, č. článku 119975.
- [17] Magnetic Bearings. Online. Dostupné z: <https://www.kamansensors.com/industry/magnetic-bearings/>. [cit. 2024-05-05].
- [18] AMIRYAR, Mustafa a PULLEN, Keith. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. *Applied Sciences*. 2017, roč. 7, č. 3, č. článku 286.
- [19] LUO, Xing; WANG, Jihong; DOONER, Mark a CLARKE, Jonathan. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*. 2015, roč. 137, s. 511-536.
- [20] ZHANG, J.W.; WANG, Y.H. a TIAN, G.Z. A review of control strategies for flywheel energy storage system and a case study with matrix converter. *Energy Reports*. 2022, roč. 8, s. 3948-3963.
- [21] ZHOU, Long a QI, Zhi ping. Modeling and control of a flywheel energy storage system for uninterruptible power supply. *2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*. Nanjing, China, 2009, s. 1-6.
- [22] REHMAN, Shafiqur; AL-HADHRAMI, Luai M. a ALAM, Md. Mahbub. Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, roč. 44, s. 586-598.
- [23] HUŠEK, Josef. *Přečerpávací vodní elektrárny*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [24] *Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně*. Online. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/obnovitelné-zdroje/voda/vodní-elektrárny/ceska-republika/dlouhe-strane-58155>. [cit. 2024-05-05].
- [25] BUDÍN, Jan. Přečerpávací vodní elektrárna - princip a uspořádání. Online. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/precerpavaci-vodni-elektrarna-princip-usporadani-2>. [cit. 2024-05-05].
- [26] VRÁNA, Karel. *Rybníky a účelové nádrže : příklady*. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1991. ISBN 80-01-00656-5.
- [27] JEŽEK, Jan; VÁRADIOVÁ, Blanka a ADAMEC, Josef. *Mechanika tekutin*. 3. přepracované vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-01615-3.
- [28] Vodní turbíny. Online. Dostupné z: http://hgf10.vsb.cz/546/VHZ3/vodni_turbiny.html. [cit. 2024-05-05].
- [29] MELICHAR, Jan. *Hydraulické a pneumatické stroje, část vodní turbíny*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2013. ISBN 978-80-01-05283-9.
- [30] ČKD Blansko. Online. Dostupné z: <https://www.ckdlh.cz/cs/>. [cit. 2024-05-05].
- [31] ČERMÁK, Jiří. Synchronní stroje - konstrukce, princip a použití. Online. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/synchronni-stroje-konstrukce-princip-a-pouziti>. [cit. 2024-05-05].

- [32] Rotor elektrárny váží 300 tun a spouštěli ho s přesností na 2 centimetry. Online. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/clanek/regiony/rotor-elektrarny-vazi-300-tun-a-spousteli-ho-s-presnosti-na-2-centimetry-133475>. [cit. 2024-05-05].
- [33] BRADBURY, Kyle. *Energy storage technology review*. Durham: Duke University, 2010. Dostupné z: chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://people.duke.edu/~kjb17/tutorials/Energy_Storage_Technologies_2010.pdf. [cit. 2024-05-05].
- [34] *Přečerpávací vodní elektrárna Dalešice*. Online. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/obnovitelné-zdroje/voda/vodní-elektrárny/ceska-republika/dalesice-58156>. [cit. 2024-05-05].
- [35] *V Dalešicích oslaví Světový den vody speciálními exkurzemi pro návštěvníky*. Online. Dostupné z: <https://www.aktivnizona.cz/cs/zpravy/v-dalesicich-oslavi-svetovy-den-vody-specialnimi-exkurzemi-pro-navstevniky-28633>. [cit. 2024-05-05].
- [36] *Vodní elektrárny Štěchovice*. Online. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/obnovitelné-zdroje/voda/vodní-elektrárny/ceska-republika/stechovice-58100>. [cit. 2024-05-05].
- [37] VOBOŘIL, David. Přečerpávací vodní elektrárny v České republice. Online. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/precerpavaci-vodni-elektrarny-v-ceske-republice>. [cit. 2024-05-05].
- [38] 3.6 GW Fengning pumped storage to power Beijing Winter Olympics. Online. Dostupné z: <https://www.hydroreview.com/hydro-industry-news/pumped-storage-hydro/massive-3-6-gw-fengning-pumped-storage-to-power-beijing-winter-olympics/>. [cit. 2024-05-05].
- [39] Fengning Pumped Storage Power Plant. Online. Dostupné z: <https://www.nsenergybusiness.com/projects/fengning-pumped-storage-power-plant/>. [cit. 2024-05-05].
- [40] BAZDAR, Elaheh; SAMETI, Mohammad; NASIRI, Fuzhan Nasiri a HAGHIGHAT, Fariborz. Compressed air energy storage in integrated energy systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022, roč. 167, č. článku 112701.
- [41] BURIAN, Ondřej a DANČOVÁ, Petra. Compressed Air Energy Storage (CAES) and Liquid Air Energy Storage (LAES) Technologies—A Comparison Review of Technology Possibilities. *Processes*. 2023, roč. 11, č. 11, č. článku 3061.
- [42] HE, Wei a WANG, Jihong. Optimal selection of air expansion machine in Compressed Air Energy Storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, roč. 87, s. 77-95.
- [43] ZHOU, Qian; DU, Dongmei; LU, Chang; HE, Qing a LIU, Wenyi. A review of thermal energy storage in compressed air energy storage system. *Energy*. 2019, roč. 188, č. článku 115993.
- [44] BUDT, Marcus; WOLF, Daniel; SPAN, Roland a YAN, Jinyue. A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments. *Applied Energy*. 2016, roč. 170, s. 250-268.
- [45] OLABI, A.G.; WILBERFORCE, Tabbi; RAMADAN, Mohamad; ABDELKAREEM, Mohammad Ali a ALAMI, Abdul Hai. Compressed air energy storage systems: Components and operating parameters – A review. *Journal of Energy Storage*. 2021, roč. 34, č. článku 102000.

- [46] WOLF, Daniel a BUDT, Marcus. LTA-CAES – A low-temperature approach to Adiabatic Compressed Air Energy Storage. *Applied Energy*. 2014, roč. 15, č. 125, s. 158-164.
- [47] QIU, Guoquan; LIU, Hao a RIFFAT, Saffa. Expanders for micro-CHP systems with organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering*. 2011, roč. 31, č. 16, s. 3301-3307.
- [48] Typy turbín. Online. Dostupné z: <https://cz.wenzel-group.com/blog/all-about-blades-arten-von-turbinen>. [cit. 2024-05-05].
- [49] SUCCAR, Samir a WILLIAMS, Robert H. *Compressed Air Energy Storage: Theory, Resources, And Applications For Wind Power*. Princeton: PRINCETON UNIVERSITY, 2008.
- [50] MURRAY, Cameron. 'World's largest' compressed air energy storage project connects to the grid in China. Online. Dostupné z: <https://www.energy-storage.news/worlds-largest-compressed-air-energy-storage-project-connects-to-the-grid-in-china/>. [cit. 2024-05-05].
- [51] TONG, Zheming; CHENG, Zhewu a TONG, Shuiguang. A review on the development of compressed air energy storage in China: Technical and economic challenges to commercialization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021, roč. 135, č. článku 110178.
- [52] Shandong Feicheng 300MW/1800MWh Compressed Air Energy Storage Project Started Construction. Online. Dostupné z: <https://www.battery-energy-storage-system.com/news/300MW-1800MWh-Compressed-Air-ESS.html>. [cit. 2024-05-05].