

**Fakulta elektrotechnická
Regionální inovační centrum elektrotechniky**

**Rešerše a zhodnocení současných technologií
akumulace energie z hlediska jejich integrace
v systémech výroby elektrické energie a tepla**

Pracoviště:	RICE – energetika a průmyslové systémy
Číslo dokumentu:	22190-027-2018
Typ zprávy:	Výzkumná zpráva
Řešitelé:	Ing. Martin Vinš
Vedoucí projektu:	Ing. Martin Sirový, Ph.D.
Počet stran:	67
Datum vydání:	18. 10. 2018
Oborové zařazení:	JE – Nejaderná energetika, spotřeba a užití energie

Zadavatel / zákazník:

Zpracovatel / dodavatel:

Západočeská univerzita v Plzni
Regionální inovační centrum
elektrotechniky
Univerzitní 8
306 14 Plzeň

Kontaktní osoba:

Ing. Martin Vinš
tel. 377634195
mvins@kev.zcu.cz

Tato výzkumná zpráva vznikla za podpory projektu CANUT TE01020455 a projektu SGS-2018-009.

Anotace

Tato výzkumná zpráva se v první části zabývá popisem jednotlivých systémů pro akumulaci energie použitelných v energetice, v druhé části tyto systémy vzájemně porovnává, přičemž zhodnocuje jejich výhody, nevýhody a diskutuje možnost nasazení jednotlivých technologií. V poslední, třetí části jsou představeny potenciální vhodné kombinace jednotlivých technologií akumulace a výroby elektrické energie a tepla.

Klíčová slova

Energetické úložiště, Baterie, Power to gas, Stlačený vzduch, Kapalný vzduch, Setrvačník, Tepelné úložiště

Název zprávy v anglickém jazyce / Report title

Overview and evaluation of current technologies of energy storages from the point of view of their integration in the systems of electricity and heath generation

Anotace v anglickém jazyce / Abstract

This research report deals with the description of individual energy storage systems for power applications in the first part. In the second part, these systems compare each other, evaluating their advantages, disadvantages and discussing the possibility of deploying individual technologies. In the last, the third part are presented potential suitable combinations of individual technologies of energy accumulation and production of electric energy and heath.

Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

Power storage, Battery, Power to gas, Compressed air, Liquid air, Flywheel, Thermal energy storage

Seznam symbolů a zkratk

CAES	Compressed Air Energy Storage (Systémy s akumulací stlačeného vzduchu)
ES	Energy Storage (Energetické úložiště)
Li-ion	Lithium-iontové baterie
NaS	Sodíkovo-sírové baterie
NiCd	Nikl-kadmiové baterie
OZE	Obnovitelné Zdroje Energie
PSB	Polysulfid-bromové baterie
PHS	Pumped Hydro Storage (Přečerpávací elektrárna)
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage (Supravodivé magnetické systémy)
TES	Thermal Energy Storage (Tepelné akumulční systémy)
VRB	Vanadové redoxní průtokové baterie
ZnBr	Zinko-bromové baterie

Obsah

1	ÚVOD	7
2	TYPY TECHNOLOGIÍ	8
2.1	SYSTÉMY S AKUMULACÍ STLAČENÉHO VZDUCHU.....	8
2.1.1	<i>Základní popis funkce</i>	8
2.1.2	<i>Technická charakteristika a parametry</i>	9
2.1.3	<i>Funkce</i>	9
2.1.4	<i>Nasazení</i>	9
2.1.5	<i>Výzkum a vývoj</i>	10
2.1.5.1	Vylepšený systém se stlačeným vzduchem	10
2.1.5.2	Pokročilý adiabatický systém se stlačeným vzduchem	11
2.1.5.3	Malý systém se stlačeným vzduchem.....	12
2.1.6	<i>Shrnutí systémů s akumulací stlačeného vzduchu</i>	13
2.2	SETRVAČNÍKY	14
2.2.1	<i>Základní popis funkce</i>	14
2.2.2	<i>Technická charakteristika a parametry</i>	14
2.2.2.1	Nízkorychlostní setrvačníky	15
2.2.2.2	Vysokorychlostní setrvačníky	15
2.2.3	<i>Funkce</i>	15
2.2.4	<i>Výzkum a vývoj</i>	15
2.2.4.1	Optimalizace tvaru a materiálu setrvačníku	15
2.2.4.2	Optimalizace magnetických ložisek	16
2.2.4.3	Optimalizace pro konkrétní použití	16
2.2.5	<i>Shrnutí akumulčních systémů se setrvačníky</i>	17
2.3	TEPELNÉ AKUMULAČNÍ SYSTÉMY	17
2.3.1	<i>Základní popis funkce</i>	17
2.3.1.1	Vysokoteplotní tepelné akumulční systémy	18
2.3.1.1.1	Systémy se stálým skupenstvím akumulčního média.....	18
2.3.1.1.2	Systémy s proměnným skupenstvím akumulčního média	19
2.3.1.1.3	Systémy s chemickými změnami akumulčního média.....	19
2.3.1.2	Nízkoteplotní tepelné akumulční systémy.....	20
2.3.1.2.1	Systémy s kapalným vzduchem	20
2.3.2	<i>Technická charakteristika a parametry</i>	21
2.3.3	<i>Funkce</i>	22
2.3.4	<i>Nasazení</i>	22
2.3.4.1	Systémy s proměnným skupenstvím akumulčního média	22
2.3.4.2	Systémy s kapalným vzduchem	23
2.3.5	<i>Výzkum a vývoj</i>	23
2.3.5.1	Systémy se stálým skupenstvím akumulčního média	23
2.3.5.1.1	Omezení mísení.....	23
2.3.5.2	Systémy s proměnným skupenstvím akumulčního média.....	23
2.3.5.2.1	Optimalizace materiálů a teplotních přenosů	23
2.3.5.2.2	Propojení se systémem solárně termické přeměny	24
2.3.5.3	Systémy s chemickými změnami akumulčního média	25
2.3.5.4	Systémy s kapalným vzduchem	25
2.3.5.4.1	Propojení s klasickou plynovou elektrárnou	25
2.3.5.4.2	Propojení se systémem solárně termické přeměny	26
2.3.5.4.3	Propojení s jadernou elektrárnou	27
2.3.5.4.4	Propojení s procesem regasifikace zkapalněného zemního plynu	31
2.3.6	<i>Shrnutí tepelných akumulčních systémů</i>	31
2.4	BATERIOVÉ SYSTÉMY PRO AKUMULACI ENERGIE.....	32
2.4.1	<i>Základní popis funkce</i>	32
2.4.1.1	Statické bateriové úložiště	32
2.4.1.2	Průtokové bateriové úložiště.....	32
2.4.2	<i>Technická charakteristika a parametry</i>	33
2.4.2.1	Statické baterie.....	33
2.4.2.1.1	Olověné baterie.....	33
2.4.2.1.2	Lithium-iontové baterie	33

2.4.2.1.3	Sodíkovo-sírové baterie	34
2.4.2.1.4	Nikl-kadmiové baterie	34
2.4.2.1.5	Další možné typy statických baterií	34
2.4.2.2	Průtokové baterie	35
2.4.2.2.1	Vanadové redoxní baterie	35
2.4.2.2.2	Zinko-bromové baterie	36
2.4.2.2.3	Polysulfid-bromové baterie	36
2.4.3	<i>Funkce</i>	37
2.4.4	<i>Nasazení</i>	37
2.4.4.1	Olověné baterie	37
2.4.4.2	Lithium-iontové baterie	37
2.4.4.3	Sodíkovo-sírové baterie	37
2.4.4.4	Nikl-kadmiové baterie	38
2.4.4.5	Vanadové redoxní baterie	38
2.4.4.6	Zinko-bromové baterie	38
2.4.5	<i>Výzkum a vývoj</i>	38
2.4.5.1	Olověné baterie	38
2.4.5.1.1	Inovace materiálů pro zlepšení výkonu	38
2.4.5.1.2	Implementace do aplikací s OZE	38
2.4.5.2	Lithium-iontové baterie	38
2.4.5.2.1	Zvyšování výkonu baterie za použití nanomateriálů	38
2.4.5.2.2	Zvyšování hustoty akumulované energie použitím pokročilých elektrodo- vých materiálů a elektrolytových roztoků	38
2.4.5.3	Sodíkovo-sírové baterie	38
2.4.5.3.1	Zvýšení indexů výkonosti článků	38
2.4.5.3.2	Snížení/odstranění provozních omezení při vysokých teplotách	39
2.4.5.4	Vanadové redoxní baterie	39
2.4.5.4.1	Zvýšení nízké elektrolytové stability a rozpustnosti	39
2.4.6	<i>Shrnutí bateriových systémů pro akumulaci energie</i>	39
2.5	KONDENZÁTORY A SUPERKONDENZÁTORY	40
2.5.1	<i>Základní popis funkce</i>	40
2.5.2	<i>Technická charakteristika a parametry</i>	40
2.5.3	<i>Funkce</i>	41
2.5.4	<i>Nasazení</i>	41
2.5.5	<i>Výzkum a vývoj</i>	41
2.5.5.1	Inovace materiálů pro elektrody	41
2.5.6	<i>Shrnutí akumulačních systémů se superkondenzátory</i>	41
2.6	SYSTÉMY NA BÁZI POWER TO GAS	42
2.6.1	<i>Základní popis funkce</i>	42
2.6.1.1	Vodík získaný elektrolýzou vody	42
2.6.1.1.1	Alkalické elektrolýzy	42
2.6.1.1.2	Elektrolýzy s protonovou membránou	43
2.6.1.1.3	Pevné oxidační elektrolýzy	44
2.6.1.2	Metan získaný metanací vodíku	46
2.6.1.3	Výroba elektrické energie	46
2.6.1.4	Skladování vodíku	48
2.6.2	<i>Technická charakteristika a parametry</i>	48
2.6.3	<i>Funkce</i>	50
2.6.4	<i>Výzkum a vývoj</i>	51
2.6.4.1	Vylepšování elektrolýzy	51
2.6.4.1.1	Alkalické elektrolýzy	51
2.6.4.1.2	Elektrolýzy s protonovou membránou	51
2.6.4.1.3	Pevné oxidační elektrolýzy	51
2.6.4.2	Optimalizace pro použití s obnovitelnými zdroji energie	51
2.6.4.3	Metanace	51
2.6.4.4	Optimalizace palivových článků	51
2.6.4.5	Optimalizace cyklů pro přeměnu vodíku na elektrickou energii	51
2.6.5	<i>Shrnutí akumulačních systémů na bázi power to gas</i>	51
2.7	SUPRAVODIVÉ MAGNETICKÉ SYSTÉMY	53
2.7.1	<i>Základní popis technologie</i>	53
2.7.2	<i>Technická charakteristika a parametry</i>	53

2.7.3	<i>Funkce</i>	54
2.7.4	<i>Nasazení</i>	54
2.7.5	<i>Výzkum a vývoj</i>	54
2.7.5.1	Snižování investičních nákladů supravodivých cívek a chladících systémů	54
2.7.5.2	Zvyšování výkonu	54
2.7.5.3	Vývoj vysokoteplotních supravodivých materiálů	55
2.7.6	<i>Shrnutí supravodivých magnetických akumulačních systémů</i>	55
3	VZÁJEMNÉ POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ	56
3.1	METODIKA POROVNÁVÁNÍ	56
3.2	POROVNÁNÍ OBJEMOVÉ HUSTOTY VÝKONU NA OBJEMOVÉ HUSTOTĚ AKUMULOVANÉ ENERGIE	56
3.3	POROVNÁNÍ INSTALOVANÉHO VÝKONU NA CELKOVÉM MNOŽSTVÍ AKUMULOVANÉ ENERGIE	57
3.4	POROVNÁNÍ NA ZÁKLADĚ ÚČINNOSTI CYKLU NABITÍ-VYBITÍ	58
3.5	POROVNÁNÍ NA ZÁKLADĚ INVESTIČNÍCH A PROVOZNÍCH NÁKLADŮ	58
3.6	SHRUTÍ	59

1 Úvod

Systémy pro akumulaci energie slouží buď k přímému ukládání elektrické energie, nebo jiné formy energie tak, aby mohla být v případě potřeby přeměněna na elektrickou energii. Tento proces umožňuje vyrábět elektrickou energii v době nízké poptávky, při nízkých výrobních nákladech, nebo nestálé výrobě, přičemž tato energie může být následně využita v době vysoké poptávky.

Bylo vyvinuto několik technologických řešení ukládání energie, přičemž každé má své specifické výhody i nevýhody. Aktuální problematika se soustředí zejména na rozvoj bateriových systémů, které se blíží komerčnímu nasazení a jsou nejméně omezovány nároky na specifickou geografii, prostor a zároveň jsou schopny podávat relativně vysoké výkony. Dalšími velmi perspektivními technologiemi jsou systémy na bázi power to gas, kde se však kvůli technologickým výzvám a vysokým nákladům rozsáhlejší komerční nasazení v příštích letech neočekává a tepelné akumulační systémy, kde některé typy jsou komerčně dostupné, avšak mají značně pomalou dynamiku, kvůli čemuž je výhodné jejich použití v kombinaci s jiným systémem o menším výkonu, ale rychlejší dynamikou.

2 Typy technologií

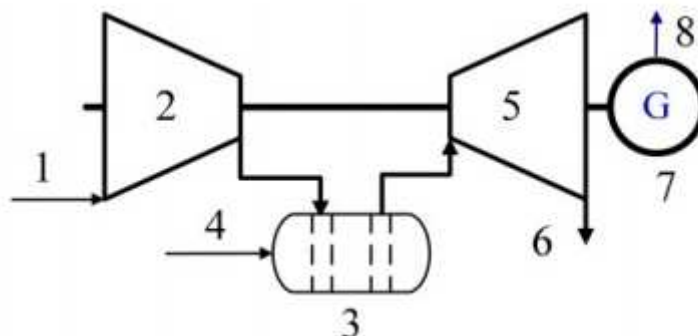
2.1 Systémy s akumulací stlačeného vzduchu

2.1.1 Základní popis funkce

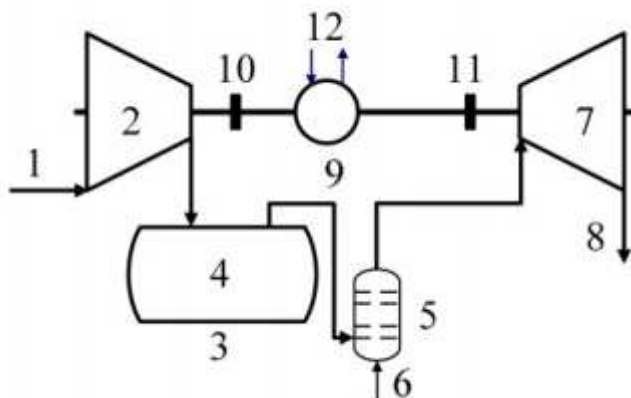
Principiálně se jedná o systém s klasickou plynovou turbínou, kde je oddělen kompresní a expanzní cyklus (Obr. 2.1). Energie se ukládá ve formě stlačeného vzduchu. Během kompresního cyklu je vzduch ukládán v hermetickém prostoru o obvyklém tlaku 4-8 MPa. Výhodné se jeví využití přírodních jeskyní apod. Při expanzním cyklu je vzduch odebírán z hermetického prostoru, smíchan s palivem a spálen za expanze na turbíně. Turbína i kompresor jsou spojeny spojkou s motorem/generátorem (Obr. 2.2). Odpadní teplo spalin může být částečně zachyceno v rekuperátoru, než dojde k jeho uvolnění do atmosféry. [1]

Hlavními komponenty systému jsou:

- Motor/generátor, který je přes spojkou spojen s kompresorem, nebo turbínou
- Vzduchový kompresor (může vyžadovat 2 i více stupňů), chladiče a mezichladiče
- Turbína (s vysokotlakou i nízkotlakou částí)
- Ovládací zařízení pro řízení turbíny, kompresoru a pomocných zařízení a pro přepínání do výrobního a akumulačního režimu
- Pomocná zařízení pro skladování a manipulaci s palivem, mechanické a elektrické systémy potřebné k podpoře provozu zařízení
- Tlaková nádoba, případně podzemní dutina pro skladování stlačeného vzduchu [1]



Obr. 2.1 Principiální znázornění systému s klasickou plynovou turbínou (1 vzduch, 2 kompresor, 3 spalovací komora, 4 palivo, 5 plynová turbína, 6 výfuk spalin, 7 generátor, 8 elektrická energie) [1]



Obr. 2.2 Principiální znázornění akumulčního systému se stlačeným vzduchem (1 vzduch, 2 kompresor, 3 tlaková nádoba, 4 stlačený vzduch, 5 spalovací komora, 6 palivo, 7 plynová turbína, 8 výfuk spalin, 9 motor/generátor, 10 a 11 spojka, 12 elektrická energie) [1]

2.1.2 Technická charakteristika a parametry

Systémy s akumulací stlačeného vzduchu mají oproti většině akumulačních systémů dlouhou dobu možnosti skladování (více než rok s relativně malými ztrátami), nízké investiční náklady (typicky 400-800 USD/kW), ale relativně nízkou účinnost (typicky 60-80 %). Typické výkonové rozmezí je od 50 do 300 MW, ve speciálních případech může být výkonové rozmezí 5-350 MW. Typická životnost je 20-40 let. Typická hodnota akumulované energie je 3-6 Wh/litr vzduchu.

[\[1\]](#)

Hlavní podmínkou pro realizaci systémů pro vyšší výkony je příznivá geografie (např. podzemní jeskyně), proto je možnost využití pro elektrárny značně limitována. Nejedná se o samostatný systém, kvůli nutnosti plynové turbíny z čehož vyplývá i neekologičnost způsobená emisemi ze spalování plynu. [\[1\]](#)

Klasické akumulační systémy se stlačeným vzduchem mají dobu odezvy v řádech minut, malé systémy s akumulací stlačeného vzduchu však mohou mít dobu odezvy i několik desítek sekund. Přechod z nabíjení do vybíjení bude delší než odezva, protože je ještě třeba odpojit kompresor, připojit turbínu a motor/generátor musí přejít z motorického do generátorového režimu. [\[1\]](#)

Cycle efficiency (%)	Power rating (MW)	Rated energy capacity (MWh)	Response time	Charge/discharge transient time	Technology
70	110-1000	<2860	Minutes	Minutes	Large-scale Compressed Air ES
	0.003-10	0.01	Seconds-minutes	Minutes	Small Compressed Air ES

Tab. 2.1 Základní technické charakteristiky systémů s akumulací stlačeného vzduchu [\[5\]](#)

2.1.3 Funkce

Systémy s akumulací stlačeného vzduchu jsou navrženy tak, aby během dne pracovaly v částečném zatížení, což umožňuje rychlý přechod z výrobního do akumulačního režimu. Start je možný bez externího přívodu elektrické energie a během několika minut lze dosáhnout plného výkonu. [\[1\]](#)

Díky těmto vlastnostem lze systém využít pro:

- Vykrytování špiček
- Vyrovnávání zatížení (díky navržení na časté střídání start/stop cyklů)
- Energetické řízení
- Kompenzace OZE
- Pohotovostní režim (s možností nahrazení bateriových systémů) [\[1\]](#)

2.1.4 Nasazení

Ačkoli se jedná o technicky zvládnutou a komerčně dostupnou technologii, v roce 2014 byly operativní pouze 2 tyto systémy na světě (USA, Spolková republika Německo).

V SRN ve městě Huntorf se jedná o nejstarší systém v provozu (40 let od roku 1978) s výkonem 290 MW. Objem jeskyně, která se nachází v bývalém solném dole 600 metrů pod zemí, je asi 310 000 m³. Pro plné nabití je třeba 8 hodin (naplnění celé jeskyně vzduchem). Ovládací flexibilita je však značně omezena malým objemem jeskyně. Komprese je dosaženo použitím

60 MW elektricky poháněných kompresorů do maximálního tlaku 10 MPa. Při plném zatížení je systém schopen generovat elektrický výkon 290 MW po 2 hodiny. [1]

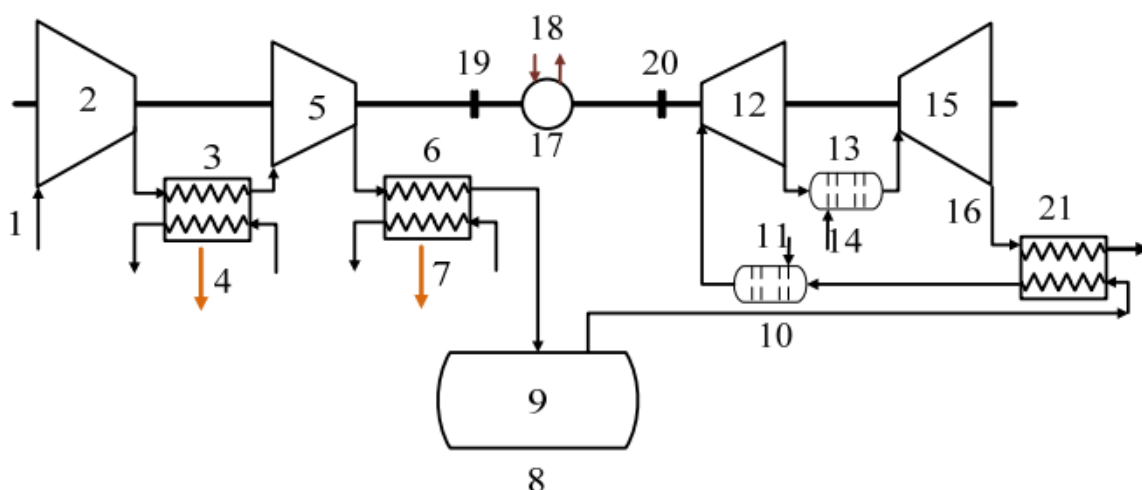
V USA ve městě McIntosh je systém v provozu od roku 1991 (27 let). Vzduch je uchováván pod tlakem 7,5 MPa v podzemní jeskyni v bývalém solném dole 450 metrů pod zemí. Objem jeskyně je asi 500 000 m³, schopných poskytnout maximální výkon 110 MW. Při plném zatížení je systém schopen generovat elektrický výkon 110 MW po 26 hodin. Tento systém také využívá rekuperátor k opětovnému využití části odpadního tepla (viz kapitola 2.1.5.1), což snižuje spotřebu paliva o 25% oproti systému v SRN. [1].

2.1.5 Výzkum a vývoj

Jak bylo zmíněno v 2.1.2, existují 2 hlavní překážky v realizaci systémů se stlačeným vzduchem, což jsou příznivá geografie a využití fosilních paliv. Pro lepší podmínky realizace je navrženo, nebo vyvíjeno několik vylepšení. [1]

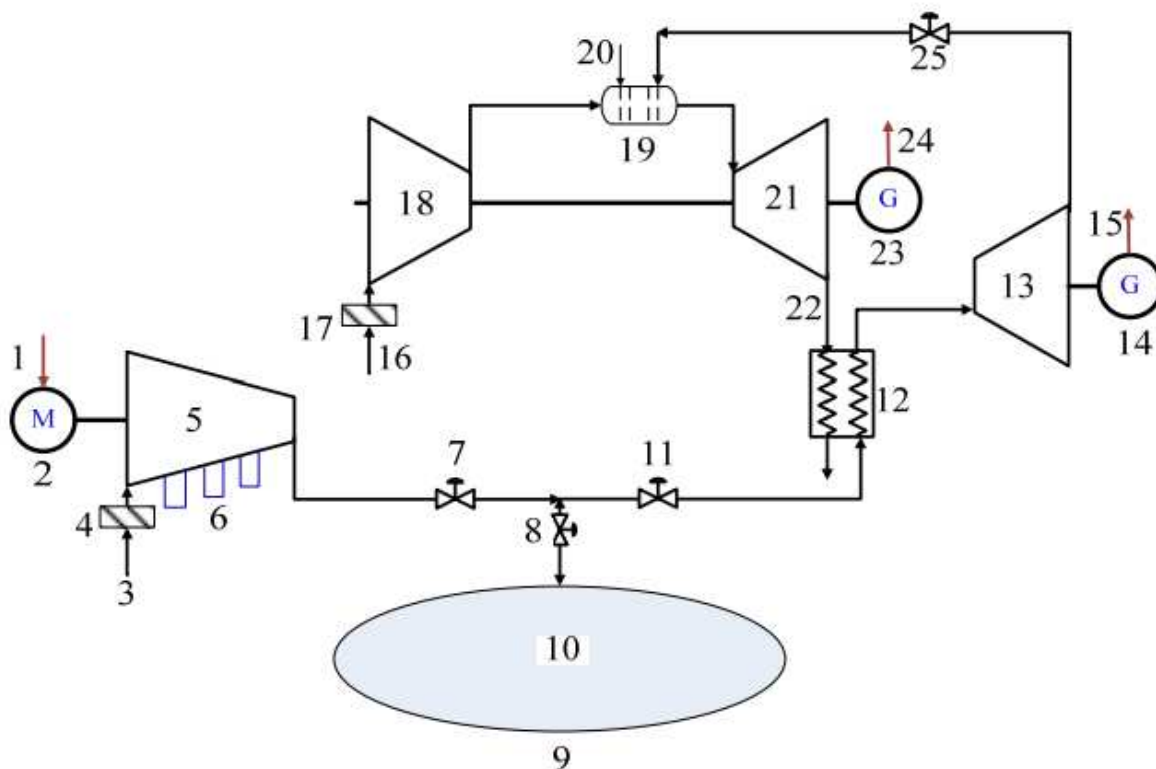
2.1.5.1 Vylepšený systém se stlačeným vzduchem

Obr. 2.3 ukazuje princip vylepšeného klasického systému se stlačeným vzduchem z Obr. 2.2. V kompresním cyklu jsou instalovány chladiče a mezichladiče, přehřívák je instalován mezi turbínovými stupni a regenerátor je využíván k předehřívání stlačeného vzduchu odpadním teplem. Dochází tak k nižší spotřebě paliva o zhruba 25%. [1]



Obr. 2.3 Principiální znázornění vylepšeného akumulčního systému se stlačeným vzduchem (1 vzduch, 2 a 5 kompresor, 3 a 6 tepelný výměník, 4 a 7 teplo, 8 tlaková nádoba, 9 stlačený vzduch, 10 a 13 spalovací komora, 11 a 14 palivo, 12 a 15 plynová turbína, 16 výfuk spalin, 17 motor/generátor, 18 elektrická energie, 19 a 20 spojka, 21 rekuperátor) [1]

Další způsob vylepšení klasického systému se stlačeným vzduchem je znázorněn na Obr. 2.4. V době nízké poptávky po elektrické energii je vyráběn a ukládán stlačený vzduch. V době vysoké poptávky pracuje systém se stlačeným vzduchem současně se systémem s klasickou plynovou turbínou (Obr. 2.1). Stlačený vzduch je ohříván odpadním teplem ze systému s klasickou plynovou turbínou, následně expanduje ve vysokotlaké plynové turbíně a poté je tlačén do spalovací komory systému s klasickou plynovou turbínou. Tento systém může znovu využít až 70% kompresní energie. [1]



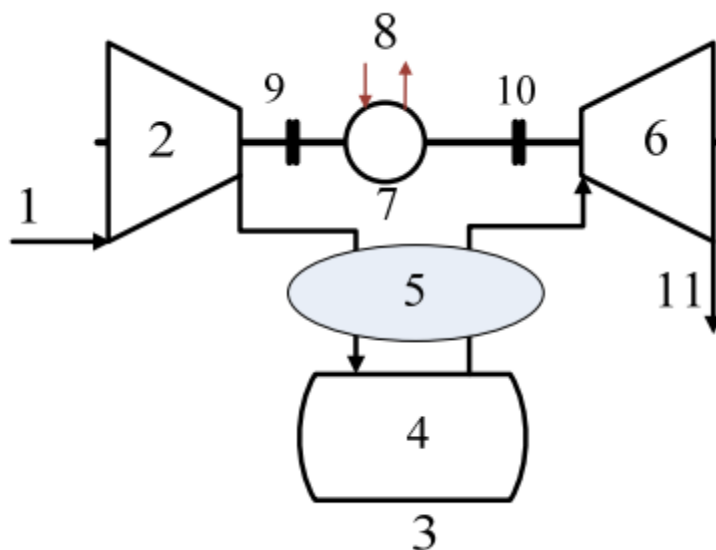
Obr. 2.4 Principiální znázornění vylepšeného akumulčního systému se stlačeným vzduchem a klasickou plynovou turbínou (1, 15 a 24 elektrická energie, 2 motor, 3 a 16 vzduch, 4 a 17 filtr, 5 a 18 kompresor, 6 mezichladič, 7, 8, 11 a 25 ventil, 9 tlaková nádoba, 10 stlačený vzduch, 12 rekuperátor, 13 a 21 plynová turbína, 14 a 23 generátor, 19 spalovací komora, 20 palivo, 22 výfuk spalin) [1]

2.1.5.2 Pokročilý adiabatický systém se stlačeným vzduchem

Tento systém uchovává potenciální a tepelnou energii stlačeného vzduchu odděleně a využívá je během expanzního cyklu (Obr. 2.5). Investiční náklady tohoto systému jsou o 20-30 % vyšší než u akumulčního systému se stlačeným vzduchem, ale dochází k eliminaci spalovací komory a tím k eliminaci spalování fosilních paliv. [1]

Celý systém je výhodný kvůli značnému množství tepelné energie produkované kompresorem, která se v klasických systémech ztrácí v podzemním úložišti stlačeného vzduchu. Při jejím uložení do tepelného akumulčního systému je energetická bilance vylepšena do takové míry, že pro provoz není třeba spalování plynu. Teoretická účinnost může být až 100 %, avšak v praxi za použití velmi kvalitních izolací se pohybuje kolem 70 %. [1]

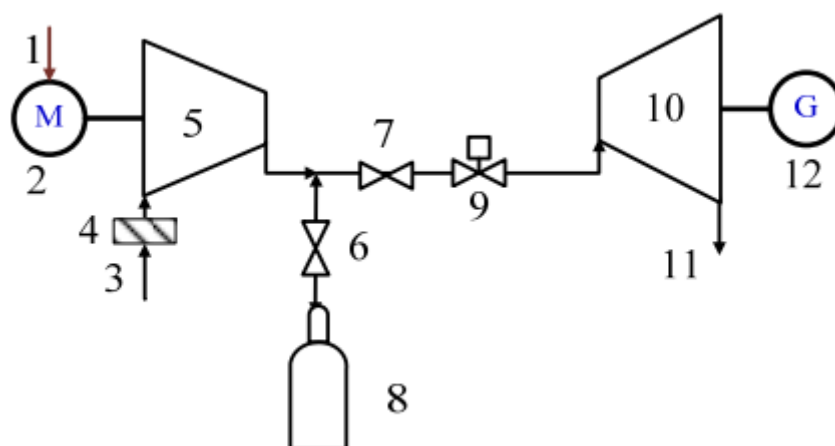
Komerční životaschopnost může být dosažena vylepšením technologie turbín, kompresorů a skladování tepelné energie. [1]



Obr. 2.5 Principiální znázornění pokročilého adiabatického systému se stlačeným vzduchem (1 vzduch, 2 kompresor, 3 úložiště, 4 tlaková nádoba se stlačeným vzduchem, 5 úložiště tepelné energie, 6 plynová turbína, 7 motor/generátor, 8 elektrická energie, 9 a 10 spojka, 11 výfuk spalin) [1]

2.1.5.3 Malý systém se stlačeným vzduchem

Malý systém se stlačeným vzduchem (výkon nižší než 10 MW) se vyznačuje uměle vyrobenými tlakovými nádobami na stlačený vzduch. Jedná se o adaptabilnější řešení bez nutnosti příznivé geografie a s možností širokého využití v přenosových a distribučních soustavách. Obr. 2.6 znázorňuje malý systém se stlačeným vzduchem pro zajištění pohotovostního napájení, který by mohl nahradit baterie zejména díky technické jednoduchosti, nízké časové degradaci komponent, vysoké spolehlivosti, snadné údržbě a nižšími provozními náklady. Vysokotlaké malé systémy se stlačeným vzduchem mohou využívat pracovní tlaky až do 20 MPa, přičemž dosahují energetické účinnosti 11-17 % zejména díky velké produkci nevyužitého tepla kompresorem. Při využití tohoto tepla produkovaného kompresorem se celková účinnost může dostat až na 70 %. [1]



Obr. 2.6 Principiální znázornění malého systému se stlačeným vzduchem (1 elektrická energie, 2 motor, 3 vzduch, 4 filtr, 5 kompresor, 6, 7 a 9 ventil, 8 tlaková nádoba, 10 turbína, 11 výfuk spalin, 12 generátor) [1]

2.1.6 Shrnutí systémů s akumulací stlačeného vzduchu

Systémy s akumulací stlačeného vzduchu jsou jediná komerčně dostupná technologie (kromě přečerpávacích vodních elektráren), která je schopná poskytnout velkokapacitní a vysokovýkonové úložiště (nad 100 MW). Májí možnost dlouhé doby skladování, nízké investiční náklady, ale relativně nízkou účinnost oproti ostatním systémům ukládání energie. Mohou být využity pro vykrývání špiček, vyrovnávání zátěží, energetickému řízení, kompenzaci OZE, nebo pohotovostnímu režimu napájení. Existují 2 hlavní překážky v realizaci, jimiž je nutnost příznivé geografie (přírodní, nebo umělé podzemní jeskyně, klasické tlakové nádoby značně omezují velikost kapacity a tím i výkonu) a nutnost využití fosilních paliv (kromě malého systému s akumulací stlačeného vzduchu a adiabatického systému se stlačeným vzduchem). Pro zmírňování těchto nedostatků jsou předmětem výzkumu mnohá vylepšení popsána v kapitole 2.1.5. [\[1\]](#)

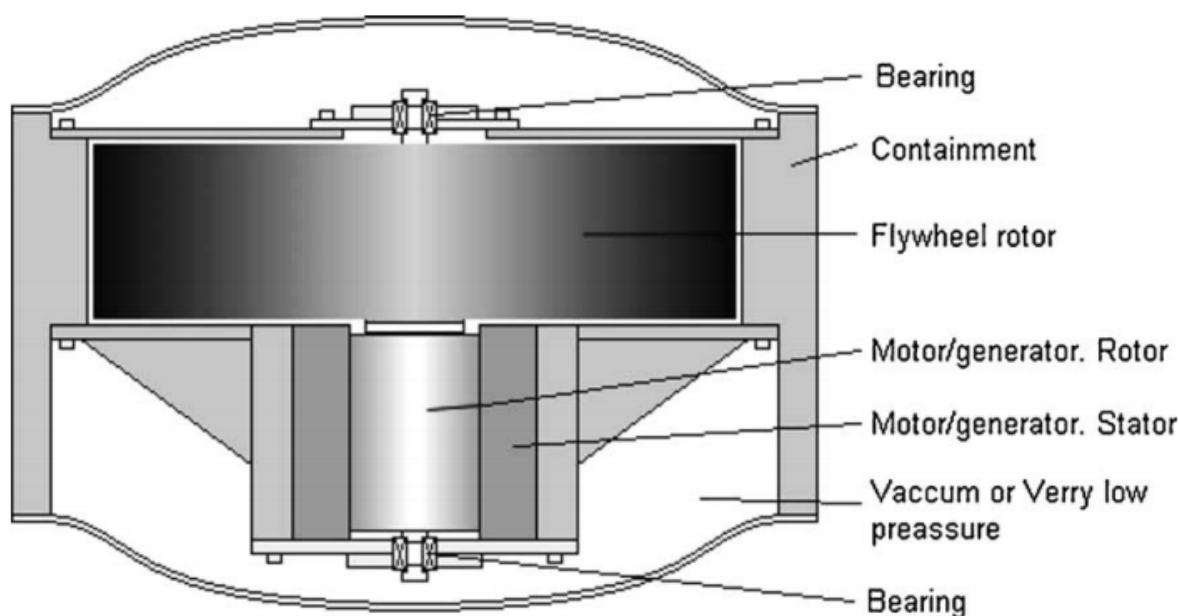
2.2 Setrvačníky

2.2.1 Základní popis funkce

Setrvačnick je hmotné těleso, které se otáčí kolem své osy, čímž ukládá mechanickou energii ve formě kinetické energie. Je nutné setrvačnicku dodat energii, aby se roztočil. To se obvykle realizuje elektromotorem. Jakmile jednou dojde k roztočení, chová se celý systém v podstatě jako mechanická baterie s určitým množstvím energie, které může akumulovat závislým na rychlosti otáčení a setrvačnosti. Čím rychleji se setrvačnick otáčí, tím více energie ukládá. Uložená energie může být získána zpomalením setrvačnicku pomocí brzděného momentu elektromotoru, který se tak využije jako generátor. [2]

Kromě rotujícího setrvačnicku jsou další hlavní komponenty (Obr. 2.7):

- Rotorová ložiska
- Motor/generátor
- Vakuové uložení
- Ovládací a regulační zařízení pro vyvedení výkonu [2]



Obr. 2.7 Hlavní komponenty setrvačnickového úložiště energie (vysokorychlostní)

2.2.2 Technická charakteristika a parametry

Elektrické rozhraní zahrnuje motor/generátor výkonovou elektroniku pro převádění proměnných otáček a regulátor výkonu kvůli proměnnému zatížení. Motor/generátor je obvykle realizován jako vysokootáčkový stroj s permanentními magnety s integrovanou funkcí rotoru pracovat jako synchronní generátor. Převodník je obvykle pulzně-šířkově modulovaný obousměrný převodník, který může být jedноступňový (ze střídavého do stejnosměrného napětí), nebo dvoustupňový (ze střídavého do stejnosměrného do střídavého napětí) v závislosti na aplikaci. [2]

Hlavní výhody systémů ukládání energie setrvačnickou jsou možnosti vysokého nabíjení a hlubokého vybíjení po mnoho cyklů. Vysoká schopnost cyklování bez závislosti na nabíjení/vybíjení je tak jedna z klíčových vlastností. Rozsah životnosti pro plné cykly nabíjení/vybíjení je od 10^5 do 10^7 cyklů. Limitujícím faktorem u mnoha aplikací je tak spíše

životnost typicky uváděná na 20 let. Setrvačníky se roztočí na plné otáčky do několika minut, a ještě rychleji jsou schopny poskytovat plný výkon pro maximální zátěž. [2]

Hlavními nevýhodami jsou vysoké provozní ztráty, pro celý setrvačnickový systém minimálně 20 % uložené energie za hodinu. Důsledkem těchto vysokých provozních ztrát dochází k zhoršení energetické účinnosti, když cyklování není kontinuální (např. když je uložena energie po celý cyklus mezi nabitím a vybitím). Díky těmto vlastnostem se setrvačníky nehodí pro dlouhodobé uchovávání energie, ale spíše k zajištění spolehlivého pohotovostního výkonu. [2]

Cycle efficiency (%)	Power rating (MW)	Rated energy capacity (MWh)	Response time	Charge/discharge transient time	Technology
90-95	0.1-20	<5	Seconds	Up to minute	Flywheel

Tab. 2.2 Základní technické charakteristiky setrvačnicků [5]

2.2.2.1 Nízkorychlostní setrvačníky

Dosahují provozních rychlostí až 6000 ot/min. Obvykle jsou vyrobeny z ocelových rotorů a běžných ložisek. Typická hodnota akumulované energie 5 Wh/kg hmotnosti setrvačnicku. Slouží k dodávání vysokých výkonů (až 1 MW po kratší časové intervaly v řádech sekund). [2]

2.2.2.2 Vysokorychlostní setrvačníky

Dosahují provozních rychlostí až 50 000 ot/min. Jsou vyrobeny z pokročilých kompozitních materiálů a ložisek s velmi nízkým třením. Hodnota akumulované energie je až 100 Wh/kg hmotnosti setrvačnicku. Uložení setrvačnicku je realizováno ve vakuové, nebo heliem plněné komoře, kvůli omezení aerodynamických ztrát a namáhání rotoru. Typická energetická účinnost je kolem 90 % při jmenovitém výkonu. Slouží k dodávání nižších výkonů (až 100 kW po delší časové intervaly v řádech desítek minut). [2]

2.2.3 Funkce

Systémy s akumulací energie v setrvačnicku jsou navrženy pro rychlé cyklování nabíjení a vybíjení, nejsou vhodné pro delší skladování energie. Během několika minut mohou dosáhnout plného nabití, stejně tak během několika minut jsou schopny uvolnit všechnu svou energii. [2]

Díky těmto vlastnostem je lze využít pro:

- Vykrytování větších, ale krátkých výkonových špiček
- Vyrovnávání zatížení
- Kompenzaci OZE [2]

2.2.4 Výzkum a vývoj

V současné době jsou hlavními objekty výzkumu a vývoje vysokorychlostní setrvačníky, díky nižším provozním ztrátám a značně vyšším hodnotám akumulované energie. [3]

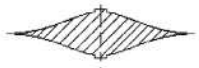
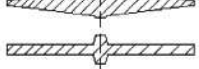
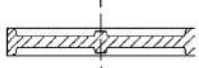
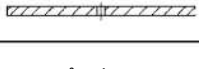
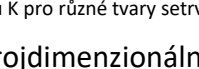
2.2.4.1 Optimalizace tvaru a materiálu setrvačnicku

Nejúčinnější způsob pro zvýšení uložené energie je urychlení setrvačnicku. Rychlostní limit je stanoven v důsledku vnitřního namáhání setrvačnicku vzhledem k setrvačnosti zatížení (tzv. pevnost v tahu). Lehčí materiály vytváří nižší zatížení při stejných rychlostech, proto je ideální použití kompozitních materiálů s nízkou hustotou a vysokou pevností v tahu. [3]

Maximální hodnota akumulované energie vzhledem k objemu a hustotě setrvačnicku je rovna:

$$e_v = K\sigma \quad e_m = K \cdot \sigma/\rho \quad (1)$$

Kde e_v a e_m je kinetická energie na jednotku objemu nebo hustoty. K je činitel tvaru rotoru, σ je maximální namáhání v setrvačnicku a ρ je hustota materiálu setrvačnicku. V případě rovinného namáhání je výška disku v porovnání s průměrem malá a je výhodné použít homogenní izotropní materiál jako např. ocel. Příklady činitelů tvaru K jsou uvedeny v Tab. 2.3. [3]

Fly wheel geometry	Cross section	Shape factor K
Disc		1.000
Modified constant stress disc		0.931
Conical disc		0.806
Flat unpierced disc		0.606
Thin firm		0.500
Shaped bar		0.500
Rim with web		0.400
Single bar		0.333
Flat pierced bar		0.305

Tab. 2.3 Příklady činitelů tvaru K pro různé tvary setrvačníků

Avšak trojdimenzionální objekty jsou vždy trojdimenzionálně materiálově namáhány. Pro rotor konstruovaný z neizotropního materiálu (jako kompozitní materiály) tak namáhání omezuje praktické rozměry. V důsledku těchto problémů je výsledný návrh setrvačnicku založen na dutém válci, ve kterém je materiálové namáhání vyvolané trojrozměrnými účinky minimalizované. [3]

2.2.4.2 Optimalizace magnetických ložisek

Mechanická ložiska nemohou být kvůli vysokému tření a krátké životnosti přizpůsobená vysokorychlostním setrvačnickům. Místo toho je využít permanentní, nebo elektro permanentní magnetický systém ložisek. Tato ložiska se nemají žádný mechanický kontakt s hřídelí, nemají pohyblivé části, vykazují malé opotřebení a nepotřebují žádné mazání. [3]

Skládají se z permanentních magnetů, které odpudivými silami drží hmotnost setrvačnicku a elektromagnety jsou použity ke stabilizaci setrvačnicku, což vyžaduje komplexní řídicí systém. Druhým a snadnějším způsobem stabilizace setrvačnicku je použití mechanických ložisek na konec osy setrvačnicku. [3]

Nejvýhodnější je použít vysokoteplotní supravodivé magnetické ložisko, které umí stabilizovat setrvačnick automaticky bez nutnosti elektrického, nebo polohového ovládání. Vyžadují však vysokoteplotní supravodivé magnety a kryogenní chlazení tekutým dusíkem. [3]

2.2.4.3 Optimalizace pro konkrétní použití

V důsledku rozličných aplikací setrvačnickových akumulačních systémů je třeba systém upravit pro konkrétní použití, a to jak z hlediska řídicí výkonové elektroniky, pohonů, tak návrhu samotného setrvačnicku. [3]

Možná využití jsou:

- Elektromobilita (jako kombinace s bateriovým systémem pro prodloužení životnosti)
- Větro-dieselové generátory (kde dieselový generátor a setrvačnický slouží ke krytí větrných špiček)
- Kompenzace špiček fotovoltaických systémů
- Kompenzace vyšších harmonických v nn distribuční síti
- Průmyslová uplatnění (např. energie pro plazmové experimenty)
- Vylepšení kvality elektrické energie (v přenosové síti v typické kombinaci s dieselgenerátorem) [\[3\]](#)

2.2.5 Shrnutí akumulčních systémů se setrvačníky

Tyto systémy jsou vhodné pro dodávání relativně nízkých výkonů (vysokorychlostní setrvačníky do 100 kW, nízkorychlostní setrvačníky do 1 MW) po krátké časové intervaly, kvůli vysokým provozním ztrátám v nabitém stavu. Vyznačují se vysokou provozní spolehlivostí, rychlou možností plného nabití i vybití bez ovlivnění životnosti a relativně vysokou účinností při krátkých akumulčních intervalech. Hlavními nedostatky jsou vysoké provozní ztráty a u vysokorychlostních setrvačnicků také vysoké investiční náklady. Možnosti použití byly popsány v kapitole 2.2.3, výzkum a vývoj v kapitole 2.2.4. [\[3\]](#)

2.3 Tepelné akumulční systémy

2.3.1 Základní popis funkce

Mezi tepelné akumulční systémy je zahrnuta celá řada různých technologií pro akumulaci a následné využití tepla v izolovaných úložištích. [\[4\]](#)

Takový systém se obvykle skládá z:

- Akumulačního média v nádrži/zásobníku
- Zabudovaného chladiče, nebo chladicího systému

- Potrubí, čerpadel, ovládacích a řídicích systémů [4]

Podle rozsahu provozních teplot mohou být systémy rozděleny na vysokoteplotní a nízkoteplotní, speciální kategorii nízkoteplotních systémů pak tvoří systémy s kapalným vzduchem. [4]

2.3.1.1 Vysokoteplotní tepelné akumulční systémy

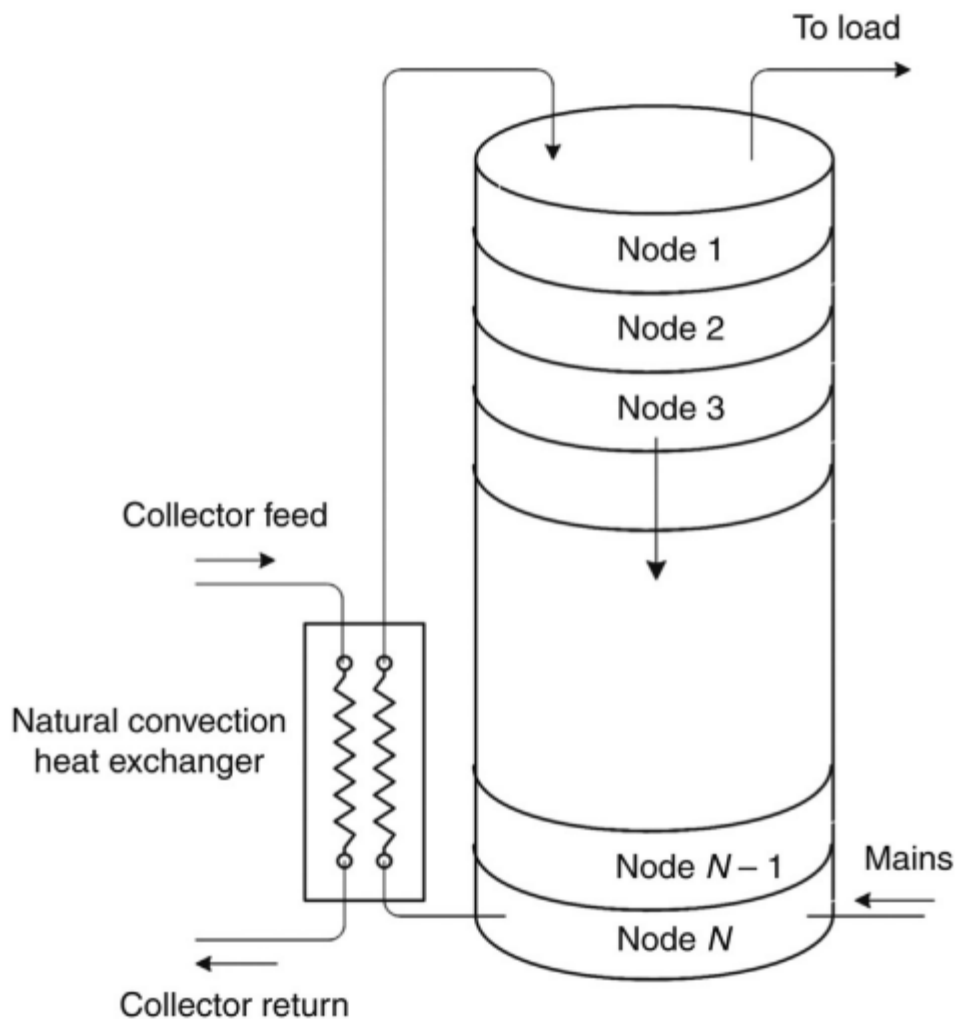
Do této kategorie patří 2 hlavní typy technologií. Do první kategorie se řadí systémy se stálým skupenstvím akumulčního média a systémy s proměnným skupenstvím akumulčního média. Se zvyšováním teploty akumulčního média se zvyšuje množství akumulované energie, pro systémy s proměnným skupenstvím akumulčního média je vyžadováno skupenské teplo pro zkapalnění, nebo vypaření tohoto média. [5]

Do druhé kategorie patří systémy využívající reverzibilní endotermické chemické reakce. Chemické teplo využívané v těchto reverzibilních chemických reakcích je potřebné pro oddělení chemických produktů. Všechno toto teplo (nebo téměř všechno) je později rekuperováno, když dojde k syntéze chemických produktů. [5]

2.3.1.1.1 Systémy se stálým skupenstvím akumulčního média

Tepelná energie je ukládána ve změně teploty akumulční látky, tedy ve změně její vnitřní energie. Systém musí kromě akumulčního média obsahovat také zásobník (obvykle nádrž) a vstupní/výstupní zařízení. Nádrž musí udržet akumulční médium a zabránit tepelným ztrátám. Může být využito jak tekutých, tak pevných (vysokoteplotní beton a litinová keramika) médií. Pokud je akumulční médium pevná látka, je umístěna do jednotlivých bloků, jimiž proudí tekutina kvůli přenosu tepla. Pokud je tekutinou kapalina a její tepelná kapacita nelze zanedbat, nazýváme systém systémem dvojího ukládání. Bloky jsou výhodné pro víceteplotní ukládání. [5]

Kapalná akumulční média (tekuté soli, minerální oleje a syntetické oleje) udržují přirozené teplotní oddělení díky rozdílu hustoty mezi teplou a studenou kapalinou. Charakteristickým rysem je tedy přivádění horké kapaliny do horní části nádrže během nabíjení a studená kapalina je extrahována ze spodní části během vybíjení, nebo je pomocí jiného mechanismu zajištěno, aby byla kapalina přiváděna do nádrže na příslušné úrovni podle její teploty a zabránilo se tak míchání (může zajišťovat např. plovoucí vstup). [5]



Obr. 2.8 Principiální znázornění tepelného úložiště se stálým skupenstvím akumulčního média se znázorněním vstupů/výstupů a jednotlivých teplotních vrstev [6]

2.3.1.1.2 Systémy s proměnným skupenstvím akumulčního média

Tepelná energie může být v některých látkách uložena téměř izotermicky jen jako latentní teplo potřebné pro změnu skupenství. V současnosti jsou hlavně využívány látky se změnou skupenství pevná látka-kapalina. Problémová může být volba vhodných akumulčních materiálů, nízkoteplotní soli mohou degradovat po několika opakováních cyklu tuhnutí-kapalnění. Výhodou těchto systémů je skladování velkého množství tepelné energie v relativně malých objemech, což vede k nízké ceně akumulčních médií. [5]

2.3.1.1.3 Systémy s chemickými změnami akumulčního média

U tohoto systému je nutné, aby všechny probíhající chemické reakce byly naprosto reverzibilní. Dodané teplo je využito k excitaci endotermické chemické reakce. Pokud je tato reakce zcela reverzibilní, tepelná energie může být zcela zpětně získána reverzní reakcí. Výhodami tedy jsou vysoká hustota skladované energie, neomezeně dlouhá doba skladování při téměř teplotě okolí a schopnost čerpání tepla. Nicméně je vývoj těchto reakcí zatím v rané fázi. [5]

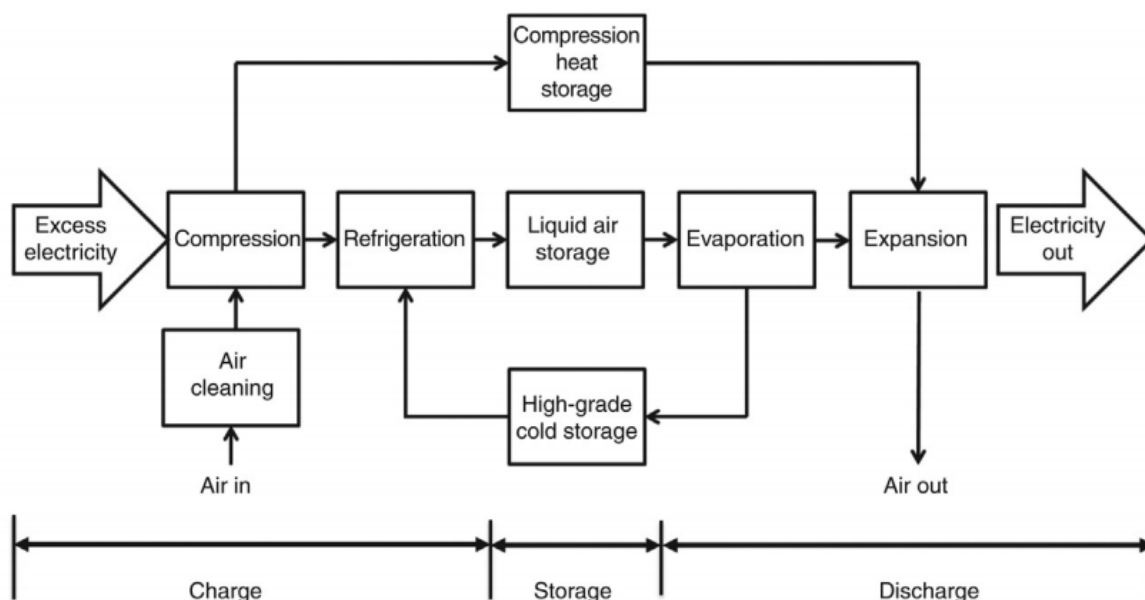
2.3.1.2 Nízkoteplotní tepelné akumulční systémy

Ačkoli jsou vysokoteplotní systémy dominantní, nízkoteplotní systémy začínají být relativně běžné. Jsou téměř výlučně používány v komerčních a průmyslových aplikacích jako způsob pro chlazení prostor, kdy ke spotřebě energie dochází v noci. Pro nízkoteplotní tepelné skladování se téměř výhradně používá voda, nebo vodo-glykolové roztoky kvůli snadné dostupnosti a nízkým investičním nákladům. Kromě toho se snadno implementují do téměř všech standardních chladičů, takže speciální jednotky nejsou třeba.

Hlavní rozhodnutí při návrhu a specifikaci nízkoteplotního tepelného úložiště je zda použít akumulční médium se stálým skupenstvím, nebo proměnným skupenstvím. V podstatě bude tepelné úložiště obsahovat pouze akumulční médium jako tekutinu, nebo bude realizována tvorba specifikovaného množství ledu. [6]

2.3.1.2.1 Systémy s kapalným vzduchem

Jak bylo naznačeno v kapitole 2.3.1, jedná se o speciální kategorii nízkoteplotních akumulčních systémů. Tato technologie využívá zkapalněný vzduch, nebo dusík jako akumulční médium. Princip technologie je schematicky znázorněn na Obr. 2.9.



Obr. 2.9 Schématické znázornění funkce systému s kapalným vzduchem [6]

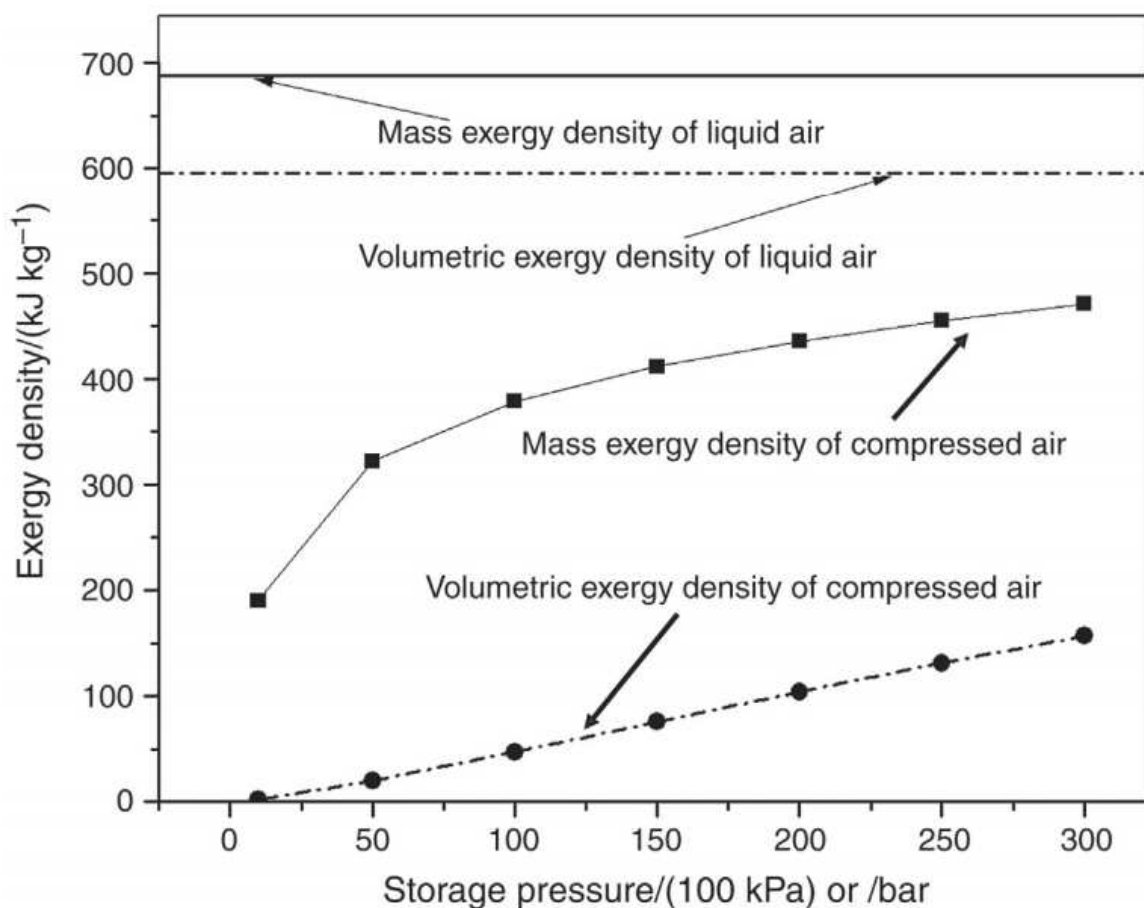
Typický systém funguje ve třech krocích:

- Nabíjení (čištění, komprese a zkapalňování vzduchu)
- Skladování (uskladnění kapalného vzduchu při teplotě kolem $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ o zhruba atmosférickém tlaku)
- Vybíjení (získání energie čerpáním, ohříváním a vypařováním)

Skladování také zahrnuje skladování tepla vytvořeného během stlačování vzduchu při nabíjení a skladování chladu vytvořeného během opětovného ohřevu při vybíjení. Uložené teplo a chlad se mohou použít během vybíjení a nabíjení ke zvýšení výkonu a snížení spotřeby energie během procesu zkapalňování. [6]

Obr. 2.10 znázorňuje množství akumulované energie vzduchu jako funkci tlaku. Pro porovnání jsou také zahrnuty výsledky pro stlačený vzduch. Množství akumulované energie kapalného

vzduchu je téměř nezávislé na okolním tlaku, protože stlačitelnost kapaliny je velmi malá. Obr. 2.10 naznačuje, že ačkoli hmotnostní množství akumulované energie kapalného vzduchu je pouze asi 1,5-3 krát větší než u stlačeného vzduchu, objemové množství akumulované energie kapalného vzduchu je nejméně 10 krát větší, než u stlačeného vzduchu, pokud je tlak v tlakové nádobě nižší než 10 MPa. Taková možnost skladování energie v relativně malých objemech dělá ze systému s kapalným vzduchem atraktivní technologii. [6]



Obr. 2.10 Grafické znázornění množství akumulované energie ve vzduchu v závislosti na tlaku v úložišti [6]

2.3.2 Technická charakteristika a parametry

Při návrhu tepelného úložiště hraje roli celá řada aspektů, které je nutno brát v úvahu. Výsledný návrh je formulován na základě technických a provozních požadavků. [6]

Technické požadavky:

- Celková tepelná kapacita
- Velikost, tvar a objem
- Tepelné ztráty
- Účinnost při nabíjení a vybíjení (ukládání a odebírání tepla) [5]

Provozní požadavky:

- Distribuce a teplota tepelného zásobování
- Velikost a rozložení zátěže v průběhu dne, nebo roku
- Požadované rychlosti nabíjení a vybíjení [5]

Proto optimální volba tepelného úložiště, jeho velikosti a velikosti s tím souvisejících investičních nákladů bude záviset na mnoha okolnostech. [6]

Obecně lze říci, že tepelné akumulační systémy mohou ukládat velká množství energie bez zásadních rizik (dopad na životní prostředí apod.) a jejich provozní ztráty jsou velmi nízké (0,05-1 % denně). Akumulační médium nabízí relativně vysokou schopnost ukládání energie (80-500 Wh/l, 80-250 Wh/kg) a celý systém lze vybudovat s relativně nízkými investičními náklady (3-60 USD/kWh), ačkoli je účinnost tepelného cyklu relativně nízká (30-60 %) a pokud by byl takový systém spojený s parním okruhem pro výrobu elektrické energie, jeho najetí na plný výkon bude relativně pomalé (desítky minut až hodiny). [5]

Oproti tomu systémy s kapalným vzduchem dosahovaly v laboratorních podmínkách vyšších účinností (až 70 %) a jejich největší výhodou je vysoké množství energie akumulované v malých objemech vzduchu. Ve spojení s Braytonovým plynovým oběhem, nebo vzduchovými turbínami může celý systém najet na plný výkon relativně rychle (několik minut). [6]

Cycle efficiency (%)	Power rating (MW)	Rated energy capacity (MWh)	Response time	Charge/discharge transient time	Technology
55-80	0.1-300		Minutes-hours	Minutes-hours	Thermal energy storage
	10-200	2.5	Minutes	Minutes	Liquid air storage

Tab. 2.4 Základní technické charakteristiky tepelných akumulačních systémů [5]

2.3.3 Funkce

Tepelné akumulační systémy mohou akumulovat velké množství energie, avšak s pomalejším výkonovým nájžděním, přičemž výjimku tvoří systémy s kapalným vzduchem, které mohou nájždět značně rychleji. [6]

Díky těmto vlastnostem lze systém využít pro:

- Vykrytování špiček
- Vyrovnávání zatížení (pouze systémy s kapalným vzduchem)
- Energetické řízení
- Kompenzace OZE (pouze systémy s kapalným vzduchem, ostatní tepelné akumulační systémy pouze u solární termické přeměny)
- Pohotovostní režim [6]

2.3.4 Nasazení

2.3.4.1 Systémy s proměnným skupenstvím akumulačního média

Pro příklad implementace těchto systémů může posloužit solární elektrárna Andasol Solar v Andalusii (Španělsko). Skládá se ze tří bloků (každý o výkonu 50 MW), přičemž každý produkuje ročně zhruba 165 GWh energie. Pracovní teplota akumulačního média je kolem 400 °C. Při této konfiguraci soustředí parabolická zrcadla solární záření na trubkový systém obsahující směs bifenilu a difenylového oxidu jako kapalinu pro přenos tepla, která přenáší teplo do parogenerátoru a nádrží s roztavenými solemi pro skladování. První blok má 2 nádrže na skladování tepelné energie s 28 500 tunami soli (směs 60% NaNO₃ a 40% KNO₃). To umožňuje skladovat 1000 MWh energie při teplotě 300-400 °C s možností napájení turbíny po 7,5 h, což umožňuje elektrárně vyrábět elektřinu přes noc, nebo oblačné/deštivé dny. [6]

2.3.4.2 Systémy s kapalným vzduchem

Koncept vznikl v roce 1977, avšak první plně integrovaný systém s kapalným vzduchem byl uveden do provozu až v roce 2011 (Slough, UK) s výkonem 350 kW a byl propojený s elektrárnou na biomasu. Aktuálně je ve výstavbě systém s výkonem 5 MW (Manchester, UK), který bude propojený s klasickou plynovou elektrárnou. [6]

2.3.5 Výzkum a vývoj

2.3.5.1 Systémy se stálým skupenstvím akumulčního média

2.3.5.1.1 Omezení mísení

Jak bylo naznačeno v kapitole 2.3.1.1.1, je mísení akumulčního média s různou teplotou v nádrži nežádoucí. Oddělení teplotních vrstev akumulčního média může být narušeno různými fyzikálními procesy, jako je např. mísení způsobené prouděním přívodní kapaliny během nabíjení a vybíjení, nebo vysoká tepelná vodivost teplotnosné kapaliny, která bude mít tendenci podporovat mísení přenosem tepla akumulčnímu médiu, nebo tepelná ztráty (a tepelná vodivost) skrze stěny akumulční nádoby. [6]

Tyto procesy jsou způsobeny několika faktory:

- Kinetickou energií tekutiny proudící do nádrže
- Vedením tepla součástmi nádrže
- Inverzními teplotními gradienty (tok vyvolaný vztlakem) [6]

2.3.5.2 Systémy s proměnným skupenstvím akumulčního média

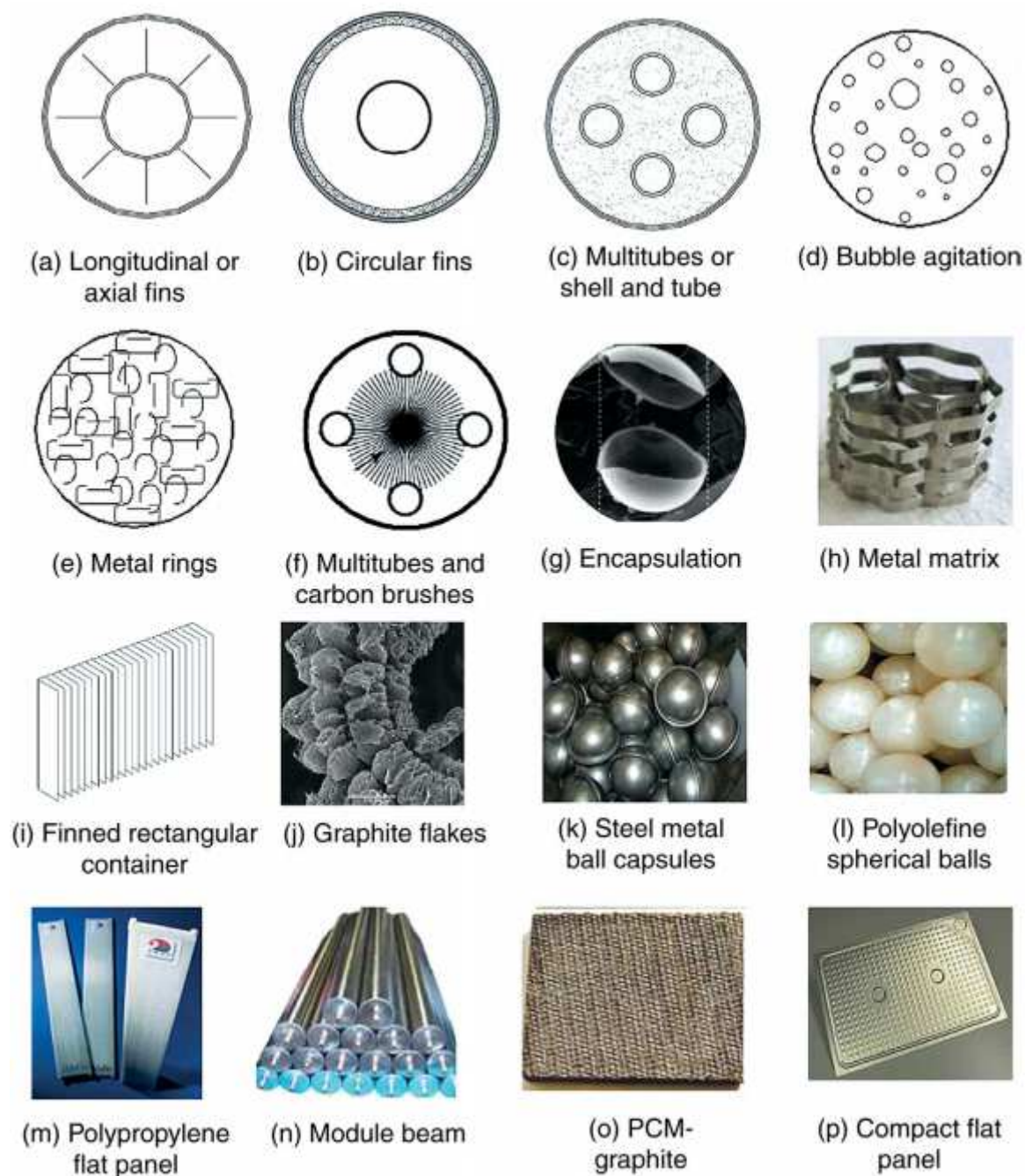
2.3.5.2.1 Optimalizace materiálů a teplotních přenosů

Pro vysokoteplotní skladování tepla v rozsahu několika stovek až více než 1000 °C se používají kovy a bezvodé soli. Přičemž se konkrétně používají různé uhličitany, chloridy, sulfáty, dusičnany a dusitany, stejně jako jejich směsi. Dusičnany a dusitany se typicky taví v rozmezí 300-550 °C, ale mají relativně nízké latentní teplo (100-175 J/g). Uhličitany a chloridy netají až do teplot nad 700 °C, ale mají vyšší latentní teplo (nad 200 J/g). Fluoridové soli nabízejí velmi vysoké latentní teplo (790 J/g), ale obvykle se nepoužívají kvůli nákladové a materiálové kompatibilitě. Zásobník roztavených solí při vysokých teplotách přináší výzvy související s materiály a roztavené soli mají také vysoká bezpečnostní rizika (jsou pro mnoho ocelí korozivní, jejich výpary jsou často reaktivní) a proto jsou pro dosažení přijatelné životnosti systému vyžadovány drahé slitiny a povlaky. Soli mají také nízkou tepelnou vodivost, takže pro přenos tepla jsou potřeba kovové, nebo grafitové tyče, nebo žebrovaní. Ačkoli kovy jsou dražší než většina solí a typicky mají nižší latentní teplo, roztavené kovy jsou méně korozivní a mají vysokou tepelnou vodivost, takže v některých případech jsou kovy konkurenceschopné solím. [6]

Největším problémem je přenos tepla během nabíjení a vybíjení. Když je energie předávána plně tuhému médiu buďto přenosem teplotnosnou tekutinou skrze stěny nádoby, nebo teplem generovaným uvnitř média (Joulův ohřev) je tepelný přenos realizován nejdříve vedením, což vede k tavení prvních vrstev média. Většina energie je uložena jako latentní teplo a zbývající energie zvyšuje teplotu média. Po roztavení dostatečného množství média se hlavní způsob přenosu tepla změní z vedení na přirozené proudění, což vede k vyšší teplotě kapalného média, které se tak pohybuje vzhůru a taví horní vrstvy rychleji, dokud nedojde k roztavení celého objemu média. Vyšší teplotní rozdíly mezi teplotnosnou tekutinou a akumulčním médiem umožňují rychlejší tavení a tím rychlejší ukládání energie. Při odebírání energie např.

chladnou tekutinou je celý proces tuhnutí akumulčního média realizován přenosem tepla vedením, což vede k tomu, že odebrání energie je typicky pomalejší než ukládání i přes stejnou geometrii systému. [6]

Obr. 2.11 ukazuje různé způsoby realizování tepelného přenosu z/do akumulčního média.



Obr. 2.11 Různé způsoby realizování tepelného přenosu z/do akumulčního média [6]

2.3.5.2.2 Propojení se systémem solárně termické přeměny

Systémy solárně termické přeměny používají velké množství soli pro skladování tepelné energie. Použití tohoto tepelného skladování odděluje výrobu elektrické energie od dostupnosti solárního záření. Je možné vyrábět elektrickou energii v noci a snižuje se pokles výroby ve dnech se špatnými slunečními podmínkami. Ve většině solárně termických

elektráren se ke skladování tepla používá akumulční médium se stálým skupenstvím, avšak na světě je několik výjimek (kapitola 2.3.4.1). [6]

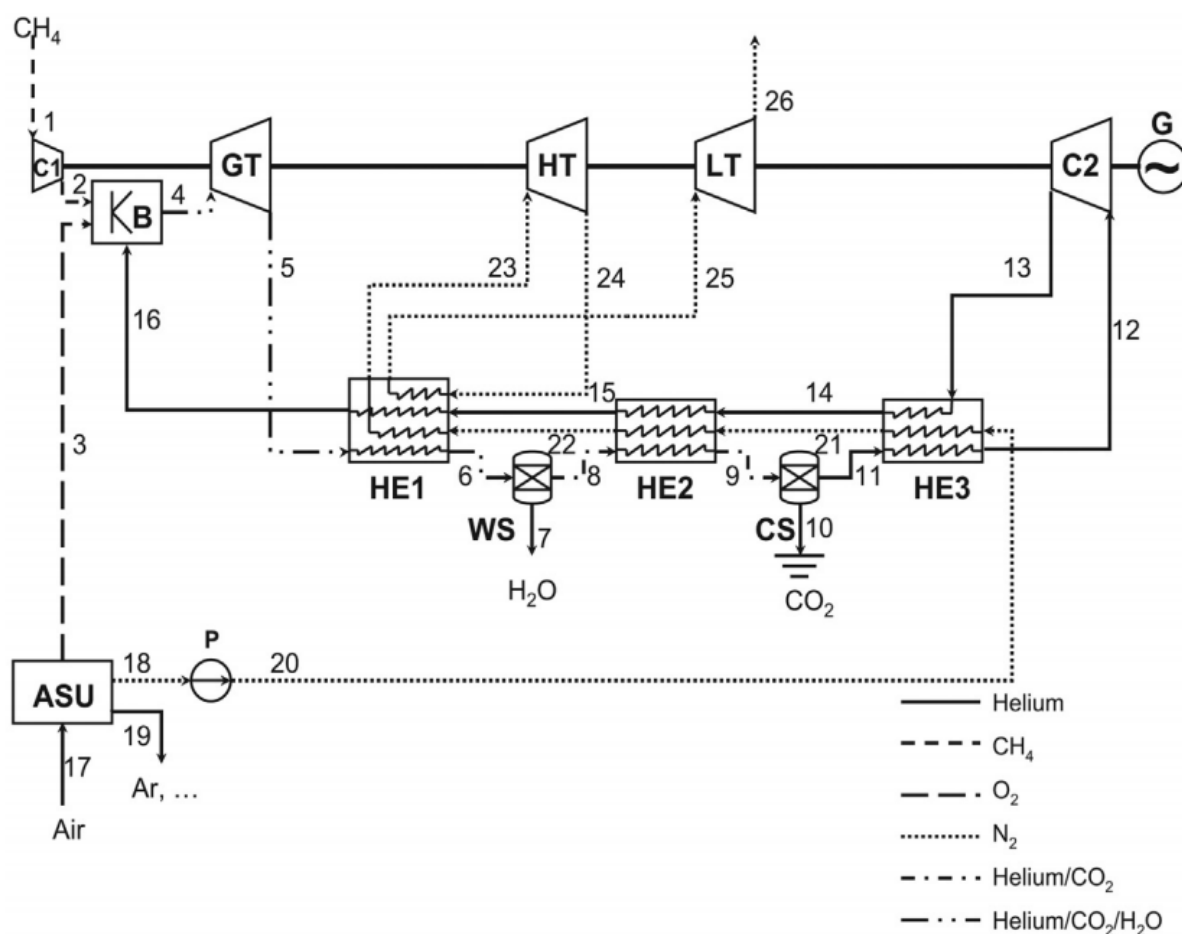
2.3.5.3 Systémy s chemickými změnami akumulčního média

Klíčovým objektem výzkumu je nalezení vhodné plně reverzibilní chemické reakce akumulčního média. [6]

2.3.5.4 Systémy s kapalným vzduchem

2.3.5.4.1 Propojení s klasickou plynovou elektrárnou

Tento koncept představuje příležitost k využití odpadního tepla z procesu výroby elektrické energie v plynové elektrárně vedoucím k lepší možnosti pokrývání výkonových špiček a zvýšení celkové účinnosti. Systém takové může zachytávat CO_2 a vyrábět z něj suchý led bez dodatečného snížení účinnosti. Na Obr. 2.12 je znázorněno procesní schéma tohoto cyklu. [6]



Obr. 2.12 Procesní schéma systému s kapalným vzduchem propojeným s klasickou plynovou elektrárnou (ASU – jednotka pro oddělení vzduchu, B – spalovací komora, CS – CO_2 separátor, G – generátor, GT – plynová turbína, HE – tepelný výměník, HT – vysokotlaký díl turbíny, LT – nízkotlaký díl turbíny, P – kryogenní čerpadlo, WS – vodní separátor) [6]

Během hodin mimo špičku je přebytečná elektrická energie generovaná v základním zatížení použita pro nabíjení (separaci a zkapalňování vzduchu, ASU blok), čímž se produkuje kyslík a tekutý dusík, zatímco je zbytek systému vypnutý. Vyrobený kyslík a tekutý dusík jsou uloženy v tlakové nádobě a kryogenní nádrži pro generování výkonu prostřednictvím vysokotlakého (HT) a nízkotlakého (NT) dílu turbíny a při spalování ve spalovací komoře (B) během špiček. Vyrobený tekutý dusík také slouží jako akumulční médium. [6]

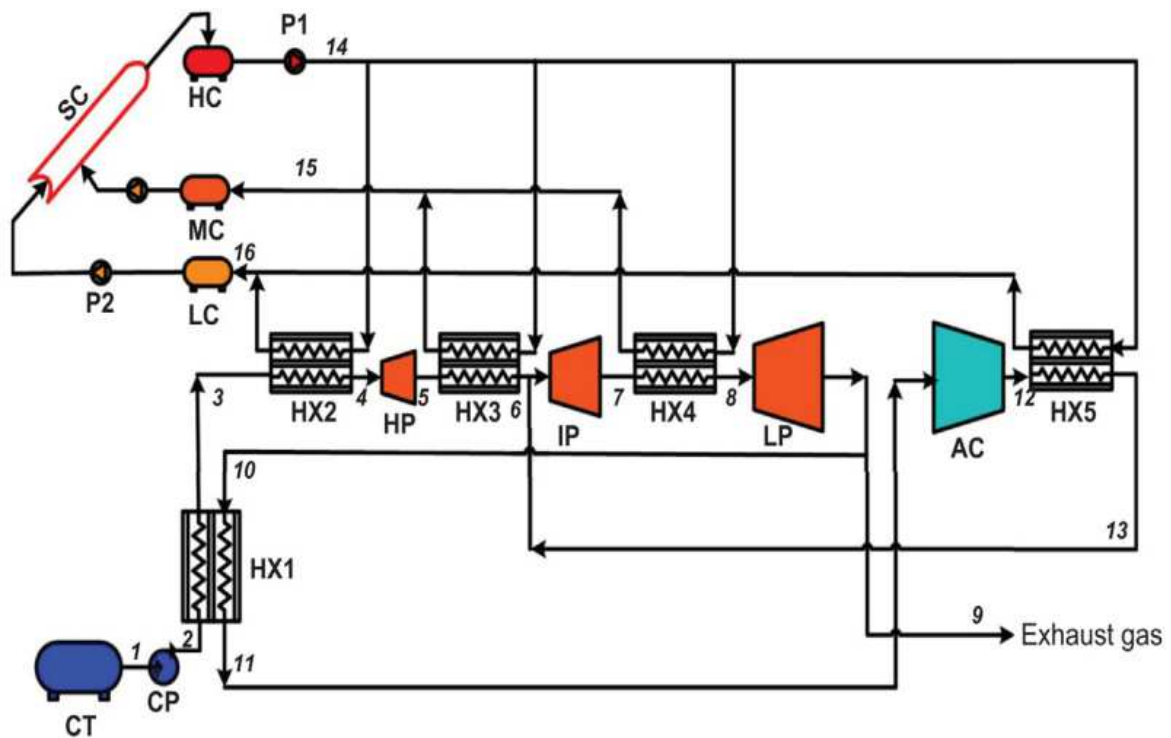
Během špiček je zemní plyn stlačen kompresorem (C1) na pracovní tlak. Pracovní tekutina se pak smísí s kyslíkem ve spalovací komoře (B), kde vznikají vysokoteplotní a vysokotlaké plynové spaliny obsahující CO_2 a H_2O . Spalování zemního plynu za přítomnosti kyslíku může dosáhnout teploty příliš vysoké pro plynovou turbínu (GT). Pro kontrolu bezpečné teploty je tak přivedeno odpovídající množství helia, které se smísí se spaliny před vstupem do plynové turbíny. Heliový plyn není spotřebováván, ale cirkuluje v systému. Odpadní plyn obsahující helium (po průchodu plynovou turbínou) prochází řadou tepelných výměníků (HE1, HE2 a HE3) pro rekuperaci odpadního tepla tím, že se toto teplo předá dusíkovému plynu ze skladovací nádrže na tekutý dusík. Během rekuperace tepla je pára ze spalin odstraněna v kondenzátoru (WS), zatímco CO_2 je odstraněn ve formě suchého ledu v průběhu procesu tuhnutí v separátoru (CS). Výsledkem je proud spalin, který po odstranění CO_2 obsahuje pouze helium. Helium se nakonec ochladí v HE3 a stlačí na pracovní tlak v kompresoru (C2), dále projde výměníky HE2 a HE1, než proudí zpět ke spalovací komoře. [6]

Okruh dusíku začíná z kryogenní skladovací nádrže, kde je tekutý dusík čerpán do pracovního tlaku pomocí kryogenního čerpadla (P). Dusík se následně ohřívá v HE3, HE2 a HE1 a expanduje ve vysokotlakém (HT) a nízkotlakém (NT) dílu turbíny. [6]

Je tedy patrné, že tento integrovaný systém se skládá z Braytonova cyklu s otevřenou smyčkou s $\text{He}/\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ jako pracovním médiem. A přímého otevřeného dusíkového expanzního cyklu. Braytonův cyklus otevřenou smyčkou probíhá v bodech $4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 8 \rightarrow 9 \rightarrow 11 \rightarrow 12 \rightarrow 13 \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow 4$, zatímco přímý otevřený dusíkový expanzní cykl v bodech $18 \rightarrow 20 \rightarrow 21 \rightarrow 22 \rightarrow 23 \rightarrow 24 \rightarrow 25 \rightarrow 26$. Tato kombinace dvou cyklů produkuje elektrickou energii ve špičkách. Braytonův cyklus využívá zemní plyn, který je spalován v čistém kyslíku produkovaném ASU mimo špičku. Helium se používá pouze pro řízení vstupní teploty turbíny a recirkulace. Pracovní médium otevřeného cyklu (dusík) je skutečným nositelem energie mimo špičky. Jakmile je CO_2 zachycen, z cyklu je vypouštěna pouze voda a dusík. Optimální energetická účinnost takového integrovaného úložiště je kolem 70 % a všechny CO_2 je zachycen. [6]

2.3.5.4.2 Propojení se systémem solárně termické přeměny

Dodatečné zdroje tepla mohou zvyšovat oběhovou účinnost systému s kapalným vzduchem. Takové zdroje tepla mohou pocházet z průmyslových procesů, nebo obnovitelného solárního záření. Obr. 2.13 ukazuje integrovaný systém se stlačeným vzduchem do elektrárny se solárně termickou přeměnou. V systému není zahrnut žádný proces zkapalňování, takže je zapotřebí externí přívod kapalného vzduchu/dusíku. To je výhodné, pokud je v rozumné vzdálenosti dostatečně velké zařízení na zkapalňování. Systém na Obr. 2.12 se skládá z přímé expanze (otevřeného cyklu) kapalného vzduchu/dusíku za zvýšeného tlaku a Braytonova cyklu s uzavřenou smyčkou provozovaném při nízkém až středním tlaku. Použití Braytonova cyklu namísto konvenčního RC cyklu poskytuje lepší účinnost přenosu tepla a mnohem nižší pracovní tlak. Expanze probíhá postupně v třech částech turbíny (vysokotlaká, středotlaká a nízkotlaká) a solární teplo se používá k přehřátí pracovního média. Simulace ukazují, že takový systém poskytuje o 30% vyšší výkon než součet systému se solárně termickou přeměnou a systému poháněného pouze kapalným vzduchem. [6]



Obr. 2.13 Procesní schéma systému s kapalným vzduchem propojeným se systémem solárně termické přeměny (AC – adiabatický kompresor, CT – kryogenní zásobník, CP- kryogenní čerpadlo, HC – vysokoteplotní ochranný zásobník, HP – vysokotlaký díl turbíny, HX - tepelný výměník, IP – středotlaký díl turbíny, LC – nízkoteplotní ochranný zásobník, LP – nízkotlaký díl turbíny, MP – středoteplotní ochranný zásobník, P – čerpadlo, SC – solární kolektor) [6]

2.3.5.4.3 Propojení s jadernou elektrárnou

Provoz jaderné elektrárny v částečném zatížení nejen zvyšuje náklady na elektrickou energii, ale mají také negativní dopad na bezpečnost a životnost elektrárny. Propojení jaderné elektrárny a systému s kapalným vzduchem by mohlo poskytnout efektivní řešení pokrývání proměnných výkonových požadavků. Na Obr. 2.14 je znázorněno takové propojení. [6]

Jaderná elektrárna v propojení systému se je podobná klasické parní elektrárně. Hlavní rozdíl spočívá v sekundárním okruhu, kde jsou dva třícestné ventily, které umožňují pracovní látku přivádět buď na parní turbínu k výrobě elektřiny, nebo do tepelného výměníku 4 pro přehřátí vysokotlakého vzduchu v systému s kapalným vzduchem. [6]

Systém s kapalným vzduchem se skládá z jednotky pro zkapalnění vzduchu v levé části a jednotky pro extrakci energie v pravé dolní části Obr. 2.14. [6]

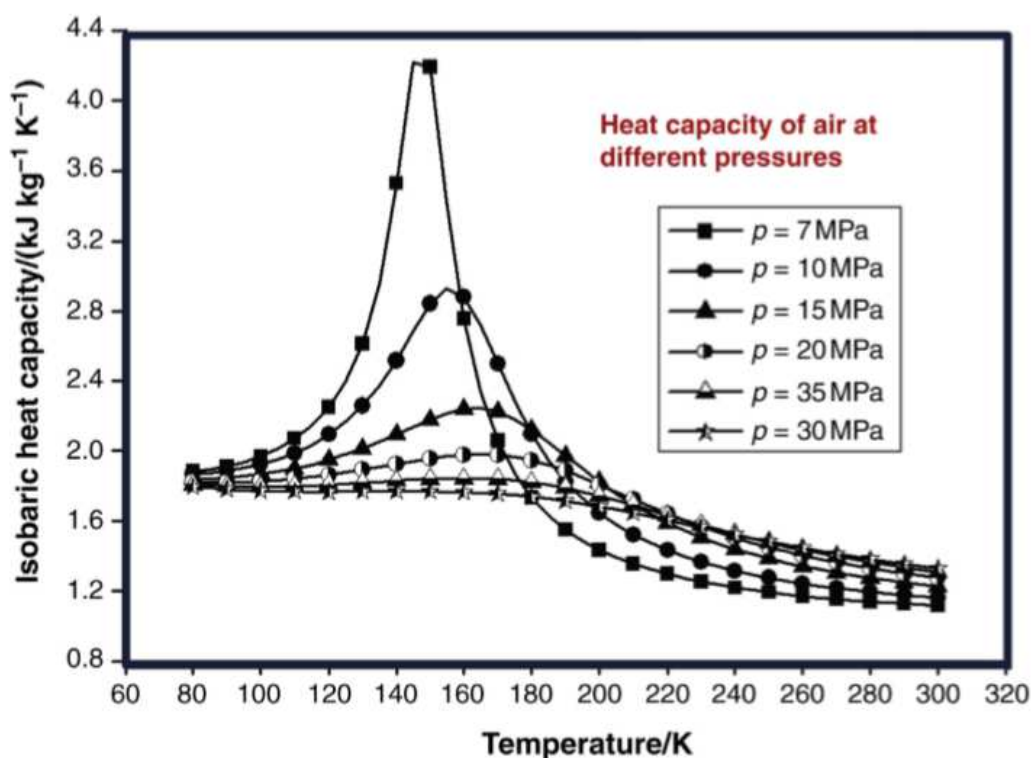
Propojený systém může být provozován ve třech režimech v závislosti na koncových požadavcích, jimiž jsou:

- Nabíjení úložiště (během hodin mimo špičku, kdy je poptávka po elektrické energii mnohem nižší než jmenovitý výkon jaderné elektrárny, přičemž jaderná elektrárna pracuje v klasickém režimu produkce páry pro pohánění turbíny a přebytečný výkon je využit pro pohon jednotky pro zkapalnění vzduchu)
- Vybíjení úložiště (během špičkových hodin, kdy je poptávka po elektrické energii vyšší než jmenovitý výkon elektrárny, je zapnuta jednotka pro extrakci energie a produkuje další elektrickou energii)

- Vyrovnaný provoz (když je výroba a poptávka po elektrické energii vyrovnaná, jednotka pro zkapalňování vzduchu i jednotka pro extrakci energie jsou vypnuty a jaderná elektrárna pracuje konvenčním způsobem) [6]

Systém s kapalným vzduchem pracuje stejným způsobem jako nejjednodušší Linde-Hampsonův zkapalňovač s výjimkou použití externí energie chladu v tepelném výměníku 6 (Obr. 2.14). Je třeba zmínit, že ve zkapalňovací jednotce vzduchu je použita kryoturbína pro výrobu kapalného produktu místo použití jako škrtícího prvku v konvenčním uspořádání. Pracovní tekutina se rozpíná téměř isoentropickým způsobem v kryoturbíně se snižující se teplotou a entalpií, tudíž generuje více kapalného produktu a současně další výkon na hřídeli. [6]

Stupně rekuperace fungují jako most mezi jednotkou pro zkapalňování vzduchu a kryogenní jednotkou extrakce energie. Takové uspořádání umožňuje rekuperovat energii chladu uvolněnou v procesu přehřívání kapalného vzduchu. Obr. 2.15 znázorňuje tepelnou kapacitu vzduchu jako funkci teploty při různých tlacích. Je zřejmé, že se tepelná kapacita vzduchu při ohřevu mění jen mírně, zvláště při velmi vysokých tlacích. [6]

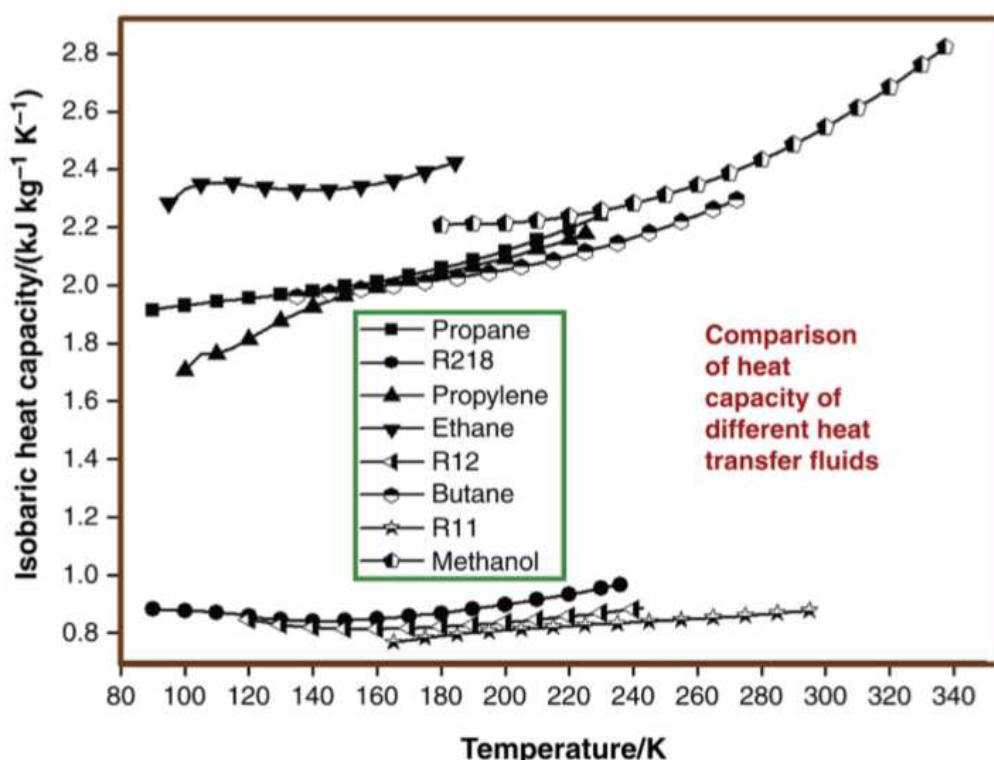


Obr. 2.15 Tepelná kapacita vzduchu při různých tlacích [6]

Je to stejné jako použití kapalin jako akumulačního média v tepelných úložištích. Ve skutečnosti může být energie chladu také uložena v akumulačních kapalinách a takové kapaliny mohou poskytnout dobrý gradient tepelné výměny a tak umožnit účinnější rekuperaci chladu. V tomto procesu nejsou akumulační kapaliny použity pouze jako pracovní kapalina, ale také jako akumulační médium pro ukládání chladu. [6]

Obr. 2.16 znázorňuje tepelné kapacity některých běžně užívaných kapalin, které mohou být použity jako akumulační médium. Žádná kapalina nemůže zcela pokrýt rozsah pracovních teplot během procesu přehřívání kapalného vzduchu. Ačkoli, kombinace propanu a metanolu může pracovat jednak jako kapalina pro ukládání chladu, tak jako pracovní kapalina

pro tepelný přenos. Tato kombinace pokryje požadovaný rozsah teplot a má vysokou tepelnou kapacitu. Pro každou z těchto dvou kapalin je navržena konfigurace dvou nádrží pro skladování a rekuperaci chladu. Obě kapaliny jsou čerpány z teplých nádrží do studených nádrží během procesu ukládání chladu (provoz nabíjení úložiště) a zpět během procesu rekuperace chladu (provoz vybíjení úložiště). Použití akumulčních kapalin jako přenosového a akumulčních média může velmi zjednodušit uspořádání systému, kde nebudou třeba žádné další tepelné výměníky. Navíc může provozní strategie mnohem přímější – množství energie chladu a objektivní teplotu lze snadno upravit nastavením průtoku kapalin, čehož je velmi obtížné dosáhnout použitím konvenčního způsobu skladování chladu v úložištích s pevnými akumulčními médii. [6]



Obr. 2.16 Tepelná kapacita různých akumulčních kapalin [6]

Kryogenní jednotka extrakce energie je propojena s jadernou elektrárnou prostřednictvím přenosu tepelné energie v tepelném výměníku 4 (Obr. 2.14). Je zřejmé, že v procesu chlazení nedochází k plývání tepelnou energií a zároveň se výstupní výkon značně zvýší. [6]

Spojením se systémem s kapalným vzduchem může reaktor a primární okruh jaderných elektráren stále pracovat na plném výkonu za všech okolností, zatímco čistý výstupní výkon je nastaven pouze systémem s kapalným vzduchem. Vzhledem k tomu, že proces extrakce energie je podobný výrobě elektrické energie plynovou turbínou, bylo by možné dosáhnout mnohem rychlejší změny výkonu v porovnání s konvenční regulací jaderných elektráren. [6]

Toto propojení umožňuje použití kryogenu místo páry jako pracovní tekutiny v procesu výroby energie. Výsledkem je efektivní způsob využívání tepelné energie jaderných elektráren, který umožňuje připojení zhruba trojnásobného elektrického výkonu během špiček. Na tomto procesu byly provedeny simulace, které ukazují, že účinnost systému s kapalným vzduchem je v tomto propojení vyšší než 70 %, díky zvýšené teplotě během procesu přehřívání. [6]

2.3.5.4.4 Propojení s procesem regasifikace zkapalněného zemního plynu

Systémy s kapalným vzduchem mohou být také integrovány do zařízení na regasifikaci zkapalněného zemního plynu, kdy dojde k využití odpadního chladu v procesu zkapalňování vzduchu. Odpadní chlad v terminálech pro import tekutého zemního plynu je významný kvůli velkokapacitnímu skladování kapalného zemního plynu. Tekutý zemní plyn se zpravidla regasifikuje ohřátím mořskou vodou a spalováním dalšího zemního plynu. To vede k plýtvání chladem obsaženým v kapalném zemním plynu a spalovaným zemním plynem. Pokud by se systém s kapalným vzduchem přesunul k terminálu zkapalněného zemního plynu a pro poskytnutí tepla k regasifikaci byl místo mořské vody použit vzduch, výsledný studený vzduch by mohl být přiveden do zkapalňovače a potenciálně tak snížit jeho spotřebu elektrické energie až o dvě třetiny. V současné době je v Japonsku a Jižní Korei v provozu řada zkapalňovacích systémů dusíku, které využívají toho chlazení ke snížení spotřeby energie. Poslední výzvou tak zůstává snížit investiční náklady celého systému. [6]

2.3.6 Shrnutí tepelných akumulčních systémů

Tepelné akumulční systémy mají velmi široké možnosti využití. V energetickém sektoru se hodí pro dodávání velkých i malých výkonů. Jejich největšími výhodami jsou relativně jednoduchá konstrukce a nízké investiční náklady, avšak je třeba si uvědomit, že časové konstanty pro využití uložené energie budou relativně delší (u systémů s proměnným skupenstvím akumulčního média nejdelší, přičemž ještě delší při ukládání energie s tuhnutím média). Každý tepelný akumulční systém musí být spojen s dalším okruhem (obvykle RC) pro výrobu elektrické energie, čímž ještě klesá už tak nízká účinnost pro samotný tepelný přenos, oproti tomu jsou velmi nízké akumulční ztráty, takže se systémy hodí i pro dlouhodobé tepelné skladování. [6]

Z vysokoteplotních akumulčních systémů jsou nejlépe technologicky zvládnuté systémy se stálým skupenstvím akumulčního média (jsou komerčně dostupné i pro vysokoteplotní aplikace), systémy s proměnným skupenstvím akumulčního média jsou také dobře technologicky zvládnuté, ačkoli mají delší časové konstanty kvůli tepelným přenosům kapalina/pevná látka a obráceně, navíc stále probíhá hledání a testování vhodných materiálů pro vysokoteplotní aplikace. U systémů s chemickou změnou akumulčního média nebyla dosud nalezena vhodná reverzibilní chemická reakce. [6]

Zvláštní skupinu tvoří systémy s kapalným vzduchem, které se jeví jako mnohem lepší alternativa systémů se stlačeným vzduchem, protože mají značně lepší objemové akumulční schopnosti, díky nimž je možné i pro velké výkony eliminovat podmínku příhodné geografie. Mají krátké časové konstanty využití uložené energie, nízké skladovací ztráty, příznivé investiční náklady a vysokou účinnost. Ačkoli jsou technologicky zvládnuté a komerčně dostupné, nejsou příliš využívány a stále jsou objektem výzkumu. [6]

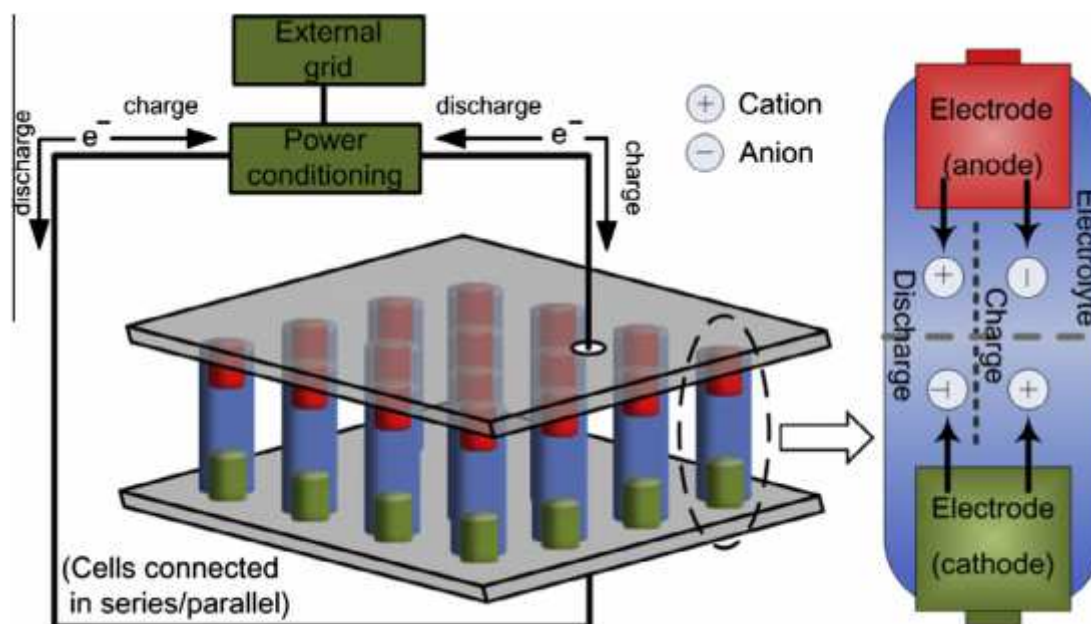
Technické charakteristiky byly popsány v kapitole 2.3.2, možnosti výzkumu včetně propojování s dalšími systémy v kapitole 2.3.5.

2.4 Bateriové systémy pro akumulaci energie

2.4.1 Základní popis funkce

2.4.1.1 Statické bateriové úložiště

Dobíjecí baterie jsou jedním z nejvíce využívaných energetických úložišť jak v průmyslu, tak každodenním životě. Typické bateriové energetické úložiště (Obr. 2.17) se skládá z řady elektrochemických článků zapojených sériově, nebo paralelně, které dodávají elektrickou energii s požadovaným napětím díky elektrochemické reakci. Každá buňka obsahuje 2 elektrody (anoda a katoda) umístěné v elektrolytu, který může být buď v pevném, kapalném, nebo rozně-viskózním stavu. V buňce se může přeměňovat energie z elektrické na chemickou a obráceně. Během vybíjení se elektrochemické reakce vyskytují u anod i katod současně. Vnějšímu obvodu jsou tak poskytovány elektrony anodami a shromažďovány v katodách. Během nabíjení vznikají reverzní reakce a baterie se tak dobije připojením externího napětí k oběma elektrodám. [5]



Obr. 2.17 Znárodnění zjednodušeného provozního principu typického bateriového energetického úložiště [5]

Existuje mnoho typů dobíjecích baterií. Stále nejpopulárnějšími jsou olověné baterie, avšak nejsou příliš vhodné pro použití v energetice k akumulaci větších výkonů. Oproti tomu lithium-iontové baterie nabízejí specifické charakteristiky, které jsou vhodné právě pro použití ve statických úložištích. [6]

2.4.1.2 Průtokové bateriové úložiště

Průtokové bateriové úložiště uchovává energii ve dvou tekutých redoxně párovaných elektrolytech uchovaných v externích zásobnících. Tyto elektrolyty mohou být čerpány ze zásobníků do buněk, které se skládají ze dvou elektrolytových průtokových komor oddělených iontově selektivními membránami. Funkce je založena na redukčně-oxidačních reakcích elektrolytových roztoků. Během nabíjecí fáze na anodě oxiduje jeden elektrolyt a další elektrolyt redukuje na katodě a elektrická energie se tak přemění na chemickou energii elektrolytu. Během vybíjení je celý proces probíhá reverzně. [5]

Klíčovou výhodou průtokových bateriových úložišť je výkonová nezávislost na kapacitě úložiště. Výkon průtokového bateriového úložiště je určen pouze velikostí elektrod a počtem

propojených buněk (podobné konstrukční schéma jako Obr. 2.14), přičemž kapacita je určena koncentrací a množstvím elektrolytu. Další výhodou jsou velmi malé ztráty v nabitém stavu, protože elektrolyty jsou ukládány v oddělených uzavřených zásobnících. [5]

Nevýhodami průtokových bateriových úložišť jsou nízký výkon v důsledku nehomogenních tlakových poklesů a omezení přenosu hmoty reaktantů, relativně vysoké výrobní náklady a složitější systémová koncepce oproti statickým bateriím. [5]

Průtokové baterie lze rozdělit do kategorií redoxního průtoku a hybridního průtoku v závislosti na tom, zda mohou být všechny elektroaktivní složky rozpuštěny v elektrolytu. [5]

2.4.2 Technická charakteristika a parametry

2.4.2.1 Statické baterie

2.4.2.1.1 Olověné baterie

Katoda této baterie je vyrobena z PbO_2 , anoda z olova a elektrolytem je kyselina sírová. Ve vybitém stavu dochází na olověných destičkách k tzv. sulfataci a elektrolyt tak ztrácí většinu rozpuštěné kyseliny sírové. Tekutý elektrolyt tak omezil jejich aplikaci až do zavedení gelového elektrolytu ve třicátých letech, díky čemuž se zamezilo také jeho únikům. Další vylepšení zavedlo v sedmdesátých letech ventilem regulované olověné baterie (často označované jako uzavřené), díky čemuž už akumulátor nemusel být umístěn ve svislé poloze. [6]

Olověné baterie mají rychlou odezvu (a jsou schopny dodávat vysoké proudy), nízké ztráty v nabitém stavu (<0,3 % denně), relativně vysokou efektivitu cyklu nabíjení-vybíjení (63-90 %) a nízké investiční náklady (50-600 USD/kWh). [5]

Typické použití je ve statických zařízeních jako záložní zdroje datových a telekomunikačních systémů a systémech energetického řízení. Ačkoli jejich nasazení z hlediska energetických úložišť je značně omezené, zejména kvůli relativně nízkému počtu cyklů nabití-vybití (do 2000), nízké hustotě akumulované energie objemové (50-90 Wh/l) a hmotnostní (25-50 Wh/kg). Také mohou pracovat špatně při nízkých teplotách, což vyžaduje použití tepelného řídicího systému, což zvyšuje investiční náklady. [5]

Cycle efficiency (%)	Power rating (MW)	Rated energy capacity (MWh)	Response time	Charge/discharge transient time	Technology
70-80	0-40	0.001-40	Miliseconds	Miliseconds	Lead-acid

Tab. 2.5 Základní technické charakteristiky olověných baterií [5]

2.4.2.1.2 Lithium-iontové baterie

Katoda v této baterii je vyrobena z oxidu lithného jako je LiCoO_2 , nebo LiMO_2 a anoda je vyrobena z grafitového uhlíku. Elektrolyt je obvykle nevodivá organická kapalina obsahující soli lithia, jako např. LiClO_4 . Termín lithium-iontová se používá, protože v baterii není samostatné lithium, jelikož se ionty lithia pohybují z jednoho hostitele na druhého. [5]

Baterie jsou vhodné pro aplikace, kde je požadována rychlá odezva (jednotky milisekund), malé rozměry (1 500-10 000 W/l) a/nebo nízká hmotnost (75-200 Wh/kg, 150-2000 W/kg). Také mají vysokou efektivitu cyklu nabití-vybití (až 97 %). [5]

Mezi hlavní nevýhody patří, že cyklické hluboké vybíjení může ovlivnit životnost baterie, navíc bateriový systém obvykle vyžaduje zabudovaný počítač k řízení jeho provozu, což zvyšuje celkové investiční náklady. [5]

Cycle efficiency (%)	Power rating (MW)	Rated energy capacity (MWh)	Response time	Charge/discharge transient time	Technology
90-97	0-100	0.004-10	Miliseconds	Miliseconds	Li-ion

Tab. 2.6 Základní technické charakteristiky lithium-iontových baterií [5]

2.4.2.1.3 Sodíkovo-sírové baterie

Tento typ baterií využívá roztavený sodík a roztavenou síru jako elektrody a oxid hlinitý jako pevný elektrolyt. Reakce obvykle vyžadují teplotu 300-350 °C k zajištění roztavení elektrod, což vede k vysoké reaktivitě. Výhody sodíkovo-sírových baterií jsou poměrně vysoká hustota akumulované energie (150-300 Wh/l), téměř nulové ztráty v nabitěm stavu, vyšší jmenovitá kapacita než u ostatních typů baterií (až 244,8 MWh), schopnost podávat značně pulzní výkon a mohou být využívány v celém rozsahu kapacity bez ovlivnění životnosti. Využívají se netoxické, relativně levné materiály, což vede k vysoké recyklovatelnosti (až 99 %). Nicméně značným omezením jsou vysoké provozní náklady (80 USD/kWrok) a investice do dalšího systému potřebného pro zajištění provozní teploty. [5]

Sodíkovo-sírové baterie jsou považovány za jedny z hlavních kandidátů na energetická úložiště o vysokých výkonech. [5]

Cycle efficiency (%)	Power rating (MW)	Rated energy capacity (MWh)	Response time	Charge/discharge transient time	Technology
75-90	<34	0.4-244.8	Miliseconds	Miliseconds	NaS

Tab. 2.7 Základní technické charakteristiky sodíkovo-sírových baterií [5]

2.4.2.1.4 Nikl-kadmiové baterie

Pro materiály elektrod se využívá hydroxid niklu a kovové kadmium a jako elektrolyt vodný alkalický roztok. Obvykle jsou nikl-kadmiové baterie značně spolehlivé a nevyžadují náročnou údržbu. Avšak kadmium a nikl jsou toxické těžké kovy, což vede k environmentálním rizikům, baterie trpí paměťovým efektem (její maximální kapacita se může značně snižovat, pokud je baterie opakovaně dobíjena pouze po částečném vybití). [5]

Cycle efficiency (%)	Power rating (MW)	Rated energy capacity (MWh)	Response time	Charge/discharge transient time	Technology
60-83	0-40	6.75	Miliseconds	Miliseconds	NiCd

Tab. 2.8 Základní technické charakteristiky nikl-kadmiových baterií [5]

2.4.2.1.5 Další možné typy statických baterií

Nikl-metal hydridová baterie je podobná nikl-kadmiové, avšak s výjimkou použití slitiny absorbující vodík jako elektrody místo kadmia. Má střední hustotu akumulované energie (70-100 Wh/kg a 170-420 Wh/l), což je výrazně lepší než u nikl-kadmiových baterií. Dalšími výhodami jsou značně snížený paměťový efekt a větší šetrnost k životnímu prostředí, delší životnost oproti lithium-iontovým bateriím. Významnou překážkou pro použití v energetických úložištích zůstávají vysoké ztráty v nabitěm stavu (5-20 % denně při úplném nabití), také jsou citlivé na cyklování nabití a hlubokého vybití (výkon se snižuje po několika stovkách plných cyklů). [5]

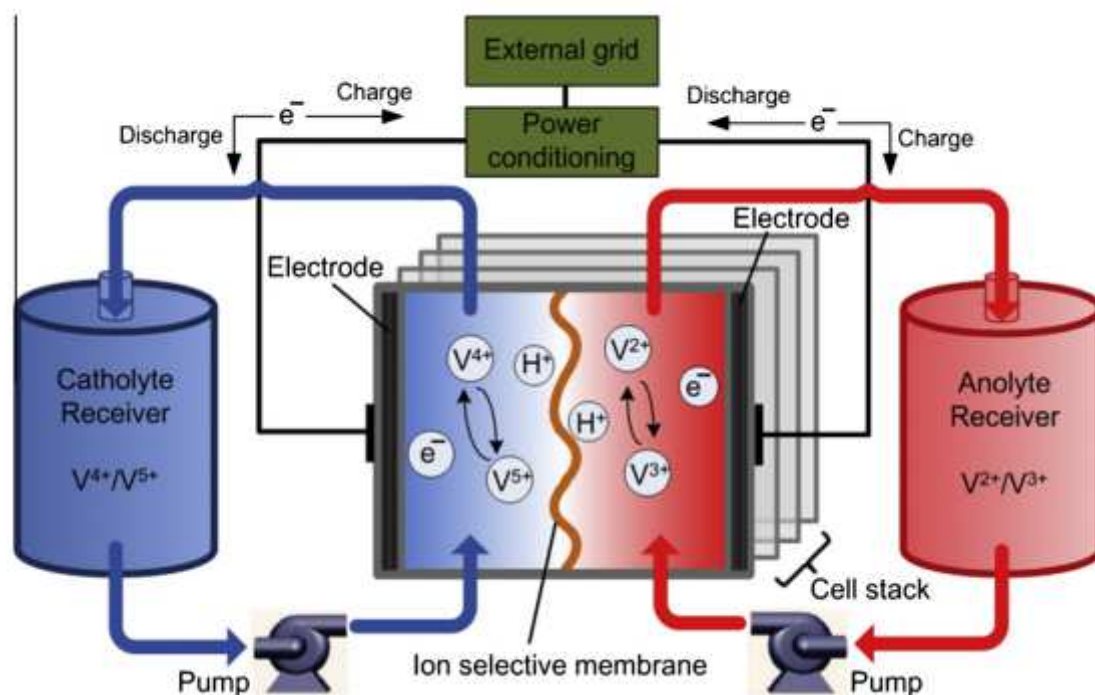
Sodíkovo-chlorid nikelnaté baterie jsou podobné sodíkovo-sírovým, avšak mají vyšší hustotu akumulované energie (94-120 Wh/kg a asi 150 Wh/l), specifický výkon (150-170 W/kg) a vysokou operační teplotu (250-350 °C). Dalšími výhodami jsou schopnost podávat pulzní

výkon, bezúdržbovost, velmi malá ztráty v nabitém stavu a relativně vysoký počet cyklů nabití-vybití. [5]

2.4.2.2 Průtokové baterie

2.4.2.2.1 Vanadové redoxní baterie

Jedná se o jeden z nejpokročilejších průtokových bateriových systémů. Energie je uchovávána pomocí vanadových redoxních párů (V^{2+}/V^{3+} a V^{4+}/V^{5+}) ve dvou elektrolytových nádržích (Obr. 2.18). V těchto čtyřech oxidačních stavech je využíván vanad, díky čemuž má průtoková baterie pouze jeden aktivní prvek v anolytu i katolytu. Během nabíjení/vybíjení jsou ionty H^+ vyměňovány skrz iontově selektivní membránu. [5]



Obr. 2.18 Znáznornění principu funkce průtokové vanadové redoxní baterie [5]

Vanadové redoxní baterie mají krátkou dobu odezvy (rychlejší než 1 ms) a mohou fungovat po deset až šestnáct tisíc cyklů. Dosahují relativně vysoké účinnosti (až 85 %), přičemž mohou být navrženy pro poskytování plynulého výkonu (čas vybití vyšší než 24 hodin). Avšak značným problémem stále zůstávají vysoké provozní náklady způsobené zejména údržbou čerpadel elektrolytu, regulací teploty, průtoku a chemického složení elektrolytu, případně výměnami membrány. Následující Tab. 2.9 uvádí množství materiálu, které je potřebné pro provoz 50 kW článku za určitých definovaných podmínek, popsanych v [8]. Jelikož se jedná o starší studii, je výměna membrány uvažovaná po každých pěti letech. V současnosti došlo ve vývoji membrán ke značným pokrokům, při užití pokročilejších membrán může být jejich životnost i 15 let. Avšak ostatní provozní náklady zůstávají téměř totožné. [5]

Material	Component	Mass (kg)	Wt. %
Water	Electrolytes (1.8 M V, 4.2 M H ₂ SO ₄)	11 251	47.7
Sulphuric acid (pure)	Electrolytes	6103	25.9
Vanadium pentoxide	Electrolytes	2369	10.0
Steel	Pumps, motors, racks, bolts	2516	10.6
Polypropylene	Electrolyte containers	600	2.5
Polypropylene, rubber, carbon black	Flow frames, bipolar plates	328	1.4
Copper	Connectors, end electrodes	184	0.8
Polysulphone and fluoride	Ionic membranes	104	0.4
Carbon felt, graphite	Electrodes	60	0.3
Others		86	0.4
Total		23 601	100.0

Tab. 2.9 Materiál potřebný pro provoz 50 kW vanadového redoxního článku po dobu 20 let [8]

Také aktuálně dostupné elektrolyty akumulují energii v relativně nízkých hustotách, což zvyšuje nároky na objem elektrolytu. [5]

Cycle efficiency (%)	Power rating (MW)	Rated energy capacity (MWh)	Response time	Charge/discharge transient time	Technology
65-85	0.03-50	<60	Miliseconds	Miliseconds	VRB

Tab. 2.10 Základní technické charakteristiky vanadových redoxních baterií [5]

2.4.2.2.2 Zinko-bromové baterie

Zinko-bromové baterie patří do kategorie hybridních průtokových baterií. Dva vodné elektrolyty obsahují reaktivní komponenty na bázi zinku a bromu, skladovány ve dvou oddělených nádržích. Během nabíjení/vybíjení tyto dva elektrolytové roztoky protékají skrze buněčnou membránu skládající se z uhlíkových kompozitních elektrod s komorami. V těchto elektrolytických buňkách se tak objevují reverzibilní elektrochemické reakce. [5]

Výhodami jsou relativně vysoká hustota akumulované energie (30-65 Wh/l) a možnost hlubokého vybití. Výkon buněk je v rozmezí 3-500 kW s předpokládanou životností 10-20 let a možností podávat plynulý výkon až po 10 hodin. [5]

Nevýhodami jsou problémy s materiálovou korozí, tvorba dendritů a relativně nízká účinnost cyklu (65-75 %), navíc vyžadují úzký rozsah provozních teplot. [5]

Cycle efficiency (%)	Power rating (MW)	Rated energy capacity (MWh)	Response time	Charge/discharge transient time	Technology
65-80	0.05-10	0.05-3	Miliseconds	Miliseconds	ZnBr

Tab. 2.11 Základní technické charakteristiky zinko-bromových baterií [5]

2.4.2.2.3 Polysulfid-bromové baterie

Je využit bromid sodný a polysulfid sodný jako elektrolyty solného roztoku. Jako hlavní výhodu polysulfid-bromových baterií můžeme označit snadnou dostupnost a rozpustnost materiálů pro výrobu elektrolytů, což vede k nízkým investičním nákladům. Také mají velmi krátkou dobu odezvy (do 20 ms). Protože při chemických reakcích dochází k vytváření bromu a síranu sodného, zvyšují se environmentální rizika. [5]

Cycle efficiency (%)	Power rating (MW)	Rated energy capacity (MWh)	Response time	Charge/discharge transient time	Technology
60-75	1-15	<120	Miliseconds	Miliseconds	PSB

Tab. 2.12 Základní technické charakteristiky olověných baterií [5]

2.4.3 Funkce

Bateriové akumulční systémy mohou dosahovat relativně vysokých výkonů, což je závislé hlavně na množství propojených buněk (přímá úměra s investičními náklady), avšak relativně nízkých kapacit. Konkrétní specifikace jsou závislé na konkrétních typech baterií, takže nelze říci, že by každý typ byl vhodný pro všechna uvažovaná použití. [6]

Díky těmto vlastnostem lze systém využít pro:

- Vykrývání špiček
- Vyrovnávání zatížení
- Energetické řízení
- Kompenzace OZE
- Pohotovostní režim [6]

2.4.4 Nasazení

2.4.4.1 Olověné baterie

Tab. 2.13 uvádí některé konkrétní příklady nasazení olověných baterií jako energetických úložišť, jsou přitom patrné relativně vyšší výkony systémů, avšak relativně nízká kapacita. [5]

Name/locations	Characteristics	Application area
BEWAG, Berlin	8.5 MW/8.5 MW h	Spinning reserve, frequency control
Chino, California	10 MW/40 MW h	Spinning reserve, load leveling
PREPA, Puerto Rico	20MW/14 MW h	Spinning reserve, frequency control
Metlakatla, Alaska	1 MW/1.4 MW h	Enhancing stabilization of island grid
Kahuku Wind Farm, Hawaii	15 MW/ 3.75 MW h	Power management, load firming, grid integration
Notrees EES project, U.S.	36 MW/24 MW h	Solving intermittency issues of wind energy

Tab. 2.13 Příklady použití olověných baterií jako energetických úložišť [5]

2.4.4.2 Lithium-iontové baterie

Jako příklad lze uvést úložiště AES Energy Storage (USA), které komerčně provozuje systém lithium-iontových bateriových akumulčních systémů (8 MW, 2 MWh), která se v roce 2011 rozšířila o dalších 16 MW. [5]

AES také instaloval bateriový akumulční systém (32 MW, 8 MWh) v Laurel Mountain, USA pro podporu větrné farmy o výkonu 98 MW v roce 2011. [5]

V současnosti největší evropský lithium-iontový akumulční systém (UK) má výkon 6 MW, 10 MWh, jedná se především o výzkumný projekt pro zhodnocení efektivity energetických úložišť jako součásti uhelné koncepce Spojeného království. [5]

2.4.4.3 Sodíkovo-sírové baterie

Tab. 2.14 uvádí některé konkrétní příklady nasazení sodíkovo-sírových baterií jako energetických úložišť, jsou přitom patrné relativně vysoké kapacity vzhledem k jmenovitým výkonům. [5]

Name/locations	Rated power/capacity	Application area
Kawasaki EES test facility, Japan	0.05 MW	The 1st large-scale, proof principle, operated in 1992
Long Island Bus's BES System, New York, US	1 MW/7 MW h	Refueling the fixed route vehicles
Rokkasho Wind Farm ES project, Japan	34 MW/244.8 MW h	Wind power fluctuation mitigation
Saint Andre, La reunion, France	1 MW	Wind power on an island
Graciosa Island, Younicos, Germany	3 MW/18 MW h	Wind & solar power EES for islands, commissioning 2013
Abu Dhabi Island, UAE	40 MW	Load levelling

Tab. 2.14 Příklady použití sodíkovo-sírových baterií jako energetických úložišť [5]

2.4.4.4 Nikl-kadmiové baterie

Pro energetická úložiště se v současnosti využívají jen velmi zřídka. Jenom příkladem využití je energetické úložiště v Golden Valley (Aljaška, USA). Oficiálně bylo uvedeno do provozu v roce 2003 s jmenovitým výkonem 27 MW schopným dodávat 15 minut, nebo 40 MW schopným dodávat 7 minut s účinností 72-78%. Provozní teplota zařízení je od -40 do +50 °C a právě místní značně chladné zimy byly hlavním důvodem pro volbu nikl-kadmiových baterií. Rozsáhlejší využití tohoto typu baterií pro energetická úložiště není v současnosti pravděpodobné. [5]

2.4.4.5 Vanadové redoxní baterie

Ačkoli je třeba vyřešit ještě několik technických výzev, Tab. 2.15 uvádí některá aktuálně funkční energetická úložiště s vanadovými redoxními bateriemi. [5]

Name/locations	Power/capacity	Application area
Edison VRB EES facility, Italy	5 kW, 25 kW h	Telecommunications back-up application
Wind power EES facility King Island, Australia	200 kW, 800 kW h	Integrated wind power, foil fuel energy with EES
Wind Farm EES project, Ireland	2 MW, 12 MW h	Wind power fluctuation mitigation, grid integration
VRB EES facility installed by SEL, Japan	1.5 MW, 3 MW h	Power quality application
VRB facility by PacifiCorp, Utah, U.S.	250 kW, 2 MW h	Peak power, voltage support, load shifting
VRB EES system build by SEL, Japan	500 kW, 5 MW h	Peak shaving, voltage support

Tab. 2.15 Příklady použití vanadových redoxních baterií jako energetických úložišť [5]

2.4.4.6 Zinko-bromové baterie

V současnosti všechny dokončené a provozované projekty slouží pouze v výzkumným a zkušebním účelům, aktuálně není dokončeno žádné komerční energetické úložiště využívající tento typ průtokových baterií. [5]

2.4.5 Výzkum a vývoj

2.4.5.1 Olověné baterie

2.4.5.1.1 Inovace materiálů pro zlepšení výkonu

Jedná se zejména o prodlužování počtu cyklů nabití-vybití a schopnosti baterií lépe odolávat hlubokému vybití. [5]

2.4.5.1.2 Implementace do aplikací s OZE

Z hlediska nízké ceny tohoto typu baterií probíhá aktuálně snaha o jejich začlenění do systémů solárních a větrných elektráren. [5]

2.4.5.2 Lithium-iontové baterie

2.4.5.2.1 Zvyšování výkonu baterie za použití nanomateriálů

Toho lze docílit změnou struktury elektrod a zvětšením jejich povrchu. [5]

2.4.5.2.2 Zvyšování hustoty akumulované energie použitím pokročilých elektrodových materiálů a elektrolytových roztoků

Aktuální výzkum se soustředí na materiály použitelné pro elektrody a elektrolyty, případně optimalizuje stávající technologie (metodika nabíjení a vybíjení různých typů, atp.) [5]

2.4.5.3 Sodíkovo-sírové baterie

2.4.5.3.1 Zvýšení indexů výkonosti článků

Podobně jako u lithium-iontových baterií se aktuálně zkoumá optimalizace provozu a zvětšování povrchu elektrod. [5]

2.4.5.3.2 Snížení/odstranění provozních omezení při vysokých teplotách

Vývoj baterií s nízkoteplotní sodíkovou směsí, kterou stačí zahřát zhruba na 55 °C pro roztavení, v laboratorních podmínkách dosahovala hustoty energie až 290 Wh/l. [5]

2.4.5.4 Vanadové redoxní baterie

2.4.5.4.1 Zvýšení nízké elektrolytové stability a rozpustnosti

Díky nízké elektrolytové stabilitě a rozpustnosti se snižuje hustota a kvalita akumulované energie a v elektrolytu vznikají místa s různým potenciálem. [5]

2.4.6 Shrnutí bateriových systémů pro akumulaci energie

Pro použití v energetickém úložišti se jeví nejvýhodněji statické lithium-iontové a sodíkovo-sírové baterie a průtokové vanadové redoxní baterie, avšak u průtokových vanadových redoxních baterií jsou aktuálně překážkou technická omezení (nízké hustoty akumulované energie). [6]

Hlavními výhodami lithium-iontových a sodíkovo-sírových baterií jsou vysoká hustota akumulované energie, dlouhá doba provozu, rychlé a účinné nabíjení, snadná údržba a malý úbytek napětí. Tyto vlastnosti vedly k rozsáhlému výzkumu a vývoji v oblasti ochranných obvodů a řídicích postupů pro jejich další zlepšení. Avšak u lithium-iontových baterií zůstává překážkou provozní omezení kapacity (20-80 %) a u sodíkovo-sírových baterií nižší účinnost cyklu způsobená pomocným systémem pro udržování vysoké teploty. [6]

Aktuální výzkum se soustředí na lithium-železo-fosfátové baterie a jejich provozní podmínky. Technické charakteristiky baterií výhodných pro energetická úložiště jsou uvedeny v Tab. 2.16. [6]

Výhodou bateriových systémů pro akumulaci energie jsou obecně velmi rychlé časové konstanty baterií (ms), což se dá výhodně využít pro kombinaci se systémy s vyššími výkony, ale kratšími časovými konstantami. [6]

	Lead acid	NiMh	Li NMC/ graphite	LiFePO ₄ / graphite	Vanadium redox-flow
Energy density/ (Wh kg ⁻¹)	40	75	160	110	45
Power density/ (W kg ⁻¹)	350	600	1 300	4 000	120
Cycle lifetime	600	900	2 500	5 000	12 000
Calendar lifetime/a	7	5	7	14	15
Efficiency/%	85	75	93	94	80
Monthly self- discharge/%	8	20	3	3	5
Cost/€ (kW h) ⁻¹	60–300	400–600	200–2 000	200–2 000	150–800

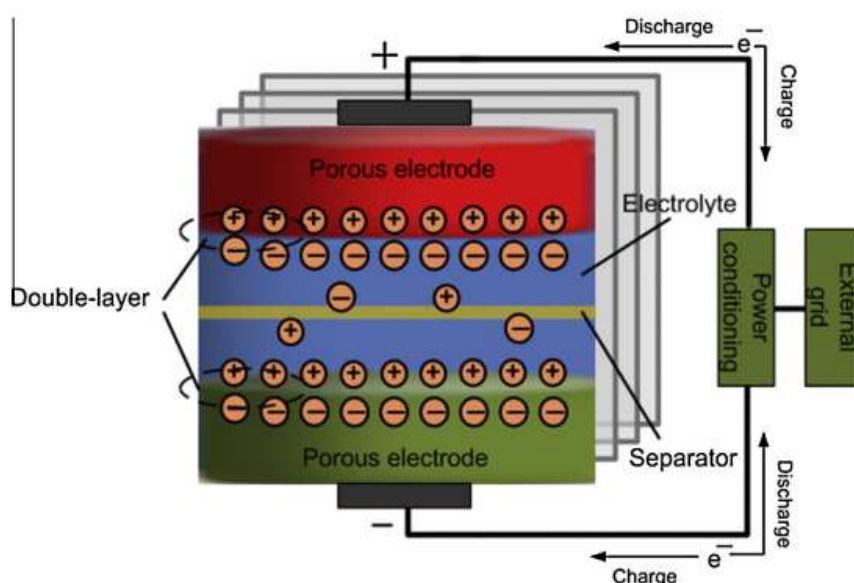
Tab. 2.16 Technické charakteristiky baterií vhodných pro energetická úložiště [6]

2.5 Kondenzátory a Superkondenzátory

2.5.1 Základní popis funkce

Kondenzátor se obvykle skládá alespoň ze dvou elektrických vodičů (obvykle z kovových fólií), oddělených tenkou vrstvou izolantu (obvykle z keramického, skleněného, nebo plastového filmu). Při nabití kondenzátoru se v dielektrickém materiálu uchovává energie prostřednictvím elektrostatického pole. Jeho maximální provozní napětí závisí na charakteristikách rozložení dielektrického materiálu. Kondenzátory jsou vhodné pro ukládání malého množství elektrické energie a vedení proměnného napětí. [5]

Superkondenzátory obsahují dvě vodivé elektrody, elektrolyt a porézní membránový separátor (Obr. 2.19), díky čemuž mohou mít vlastnosti jak klasických kondenzátorů, tak elektrochemických baterií. Energie je uložena ve formě statického náboje na povrchu mezi elektrodami a elektrolytem. [5]



Obr. 2.19 Znáznornění principu funkce superkondenzátoru [5]

2.5.2 Technická charakteristika a parametry

Superkondenzátory s vysokým výkonem jsou založeny na nanomateriálech, které zvětšují plochu elektrod a tím i kapacitu. Výkon a hustota akumulované energie jsou svojí velikostí mezi klasickými kondenzátory a statickými bateriemi. [5]

Hlavními výhodami superkondenzátorů jsou vysoké počty cyklů nabití-vybití (více než 100 000) a vysoká účinnost (84-97 %). Avšak ztráty v nabitěm stavu jsou značně vysoké (5-40 % denně), podobně jako investiční náklady (vyšší než 6000 USD/kWh). Časové konstanty budou podobně jako u baterií a kondenzátorů velmi nízké (ms). [5]

Cycle efficiency (%)	Power rating (MW)	Rated energy capacity (MWh)	Response time	Charge/discharge transient time	Technology
60-70	0-0.05		Miliseconds	Miliseconds	Capacitor
90-97	0-0.3	0.0005	Miliseconds	Miliseconds	Super-capacitor

Tab. 2.17 Základní technické charakteristiky kondenzátorů a superkondenzátorů [5]

2.5.3 Funkce

Díky vysokým ztrátám v nabitém stavu, a ne příliš vysoké kapacitě jsou vhodné zejména pro krátkodobé skladování, nikoliv pro širokopásmové a dlouhodobé skladování. [5]

Typická použití tedy jsou:

- Rychlé vykrývání malých špiček
- Vyrovnávání zatížení [5]

Což je nejvíce vhodné zejména pro zlepšování kvality energie díky schopnosti podávat značně pulzní výkon. [5]

2.5.4 Nasazení

Superkondenzátory jsou v posledních letech hojně vyráběny a používány. Tab. 2.18 ukazuje některé jejich konkrétní aplikace. [5]

Device/Company name	Country	Technical information
Super capacitor, CAP-XX	Australia	Single cell 2.3–2.9 V, up to ~2.4 F, 233–358 K
Gold capacitor, Panasonic	Japan	Single cell 2.3–5.5 V, 0.1–2000 F
Ultracapacitor/Boostcap, Maxwell	U.S.	Single cell 2.2–2.7 V, 1–3000 F, UPS, pulse, transportation
Supercapacitor, NEC	Japan	3.5–12 V, 0.01–6.5 F, power quality application
Supercapacitor, Siemens	Germany	21 MJ/5.7 W h, 2600 F, metro distribution net application
Supercapacitor, TVA company	U.S.	200 kW, supporting the start of high power dc machines

Tab. 2.18 Příklady konkrétních použití superkondenzátorů [5]

2.5.5 Výzkum a vývoj

2.5.5.1 Inovace materiálů pro elektrody

Jak bylo naznačeno v kapitole 2.5.2, jsou pro superkondenzátory s vyššími výkony použity nanomateriály. Aktuálně se zkoumají různé konstrukční uspořádání elektrod založených na grafenové bázi. [5]

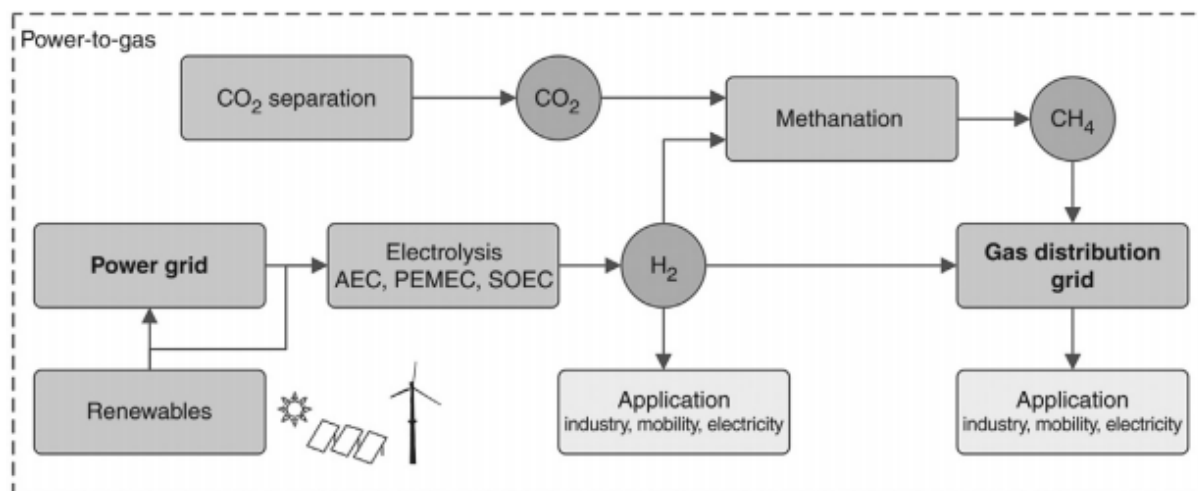
2.5.6 Shrnutí akumulačních systémů se superkondenzátory

Superkondenzátory mohou být efektivní k vykrývání malých a rychlých výkonových špiček a to zejména díky svým krátkým časovým konstantám (podobně jako baterie, nebo setrvačníky), avšak příliš se nehodí pro dlouhodobější ukládání, kvůli vysokým ztrátám v nabitém stavu. Širší nasazení jakožto konvenčních energetických úložišť se však nepředpokládá zejména kvůli značně vysokým investičním nákladům, je tedy předpoklad použití superkondenzátorů pouze pro speciální aplikace. [5]

2.6 Systémy na bázi power to gas

2.6.1 Základní popis funkce

Systémy pro akumulaci energie na bázi power to gas spočívají v chemickém ukládání elektrické energie ve formě plyné látky, jako je metan nebo vodík (Obr. 2.20). Přičemž vodík je získán přímo elektrolýzou vody a může být následně přímo využit, ukládán, nebo pomocí metanace za dodání oxidu uhličitého přeměněn na metan a následně dále využit. [6]



Obr. 2.20 Znáznornění procesního řetězce systémů na bázi power to gas [6]

2.6.1.1 Vodík získaný elektrolýzou vody

Hlavním technologickým komponentem je elektrolýzá, který využívá elektrické energie k rozdělení atomu vody na vodík a kyslík. Podle následující chemické reakce:



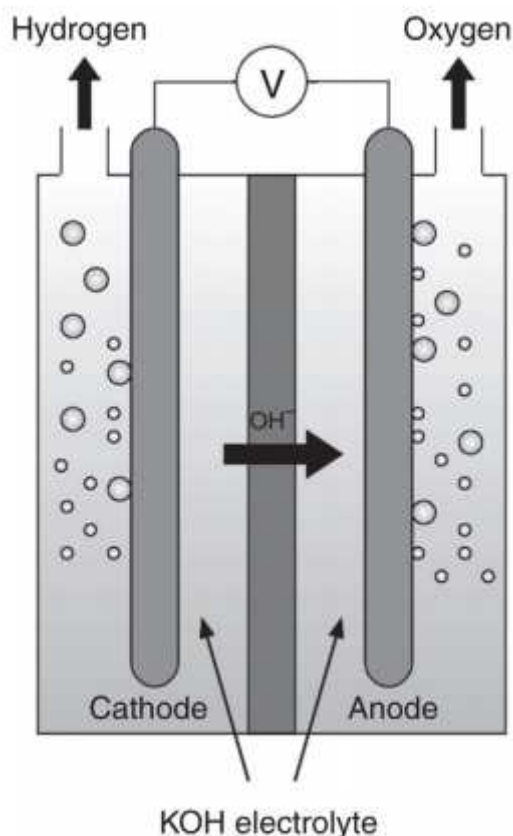
V závislosti na elektrolytu je rozdíl mezi alkalickými elektrolýzami, elektrolýzami s protonovou membránou a pevnými oxidačními elektrolýzami. [6]

2.6.1.1.1 Alkalické elektrolýzery

Využívá se vodný alkalický elektrolyt. Jedná se o nejrozšířenější technologii s nejnižšími investičními náklady a je aktuálně k dispozici i pro vysoké výkony. [6]

Anoda i katoda je obvykle vyrobena z niklu a separátor mezi anodovou a katodovou komorou je polymer, který je propustný pro hydroxidové ionty a vodní molekuly. Princip znázorněn na Obr. 2.21. [6]

Celý systém má řadu nevýhod jako nízkou proudovou hustotu, omezenou schopnost pracovat při nízkých zatíženích a neschopnost pracovat při vysokém tlaku. Poslední dvě omezení jsou způsobena schopností přechodu plynu přes separátor, důsledkem je nižší rychlost výroby kyslíku a rostoucí koncentrace vodíku v kyslíku (může dosáhnout až nebezpečné úrovně s rizikem výbuchu $\text{H}_2 > 4\%$). Dalším problémem může být únik v systému, kdy může docházet k vypouštění korozivních elektrolytů. [6]



Obr. 2.21 Konstrukční znázornění alkalického elektrolyzátoru [6]

2.6.1.1.2 Elektrolyzéry s protonovou membránou

Hlavním konstrukčním prvkem je protonově vodivá membrána, která je vyrobena ze suflovaného fluorovaného polymeru. Nejčastěji používané membrány mají tloušťku 25-250 mm. Přesná tloušťka membrány potřebná pro elektrolyzátor se určí podle podmínek jeho použití. K degradaci membrány může docházet z několika důvodů jako vyšší tlaky, nízké zatížení a časté zastavování. V takových případech je třeba použít tlustší membránu, aby odolala vysokému tlakovému rozdílu a minimalizovala přechod plynu, nebo aby zajistila vhodnou délku životnosti vzhledem k materiálové degradaci. Ačkoli čím tenčí je membrána, tím vyšší je účinnost elektrolýzy, což je způsobeno snížením jejího odporu s klesající tloušťkou. Musí být tedy dosaženo optimální rovnováhy mezi elektrochemickými vlastnostmi membrány a její vhodností pro daný soubor provozních podmínek. [6]

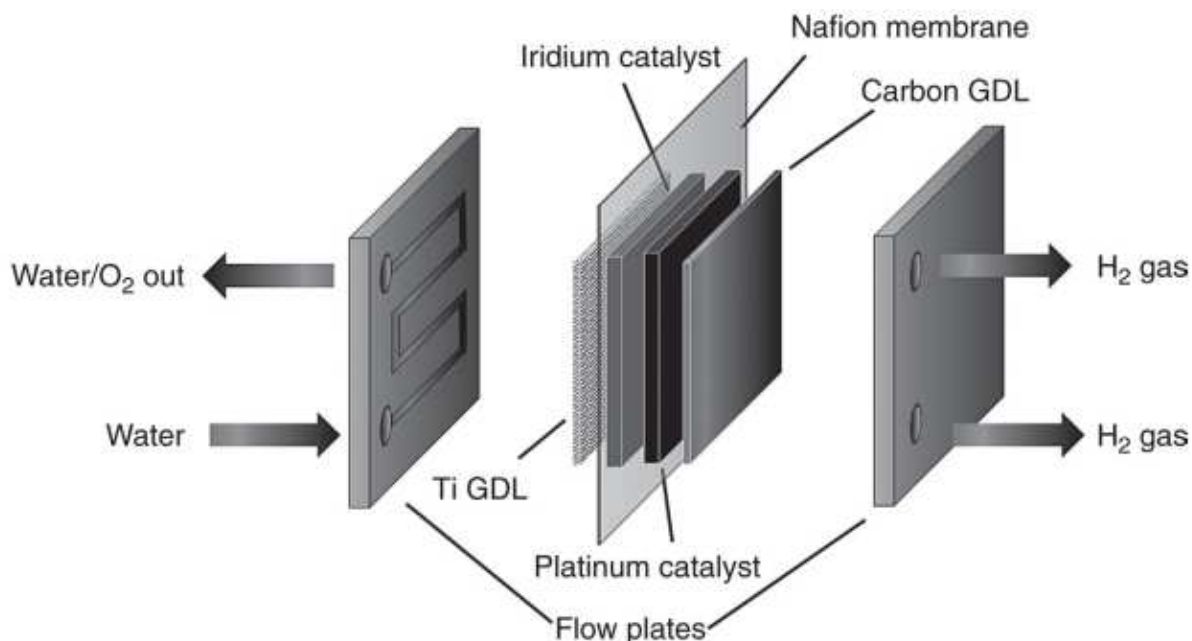
Kinetika oxidace vody je velmi pomalá bez přidání vhodných elektrokatalyzátorů. Kvůli velmi kyselé povaze tohoto typu elektrolýzy je výběr katalyzátorů omezen na vzácné přechodové kovy, které jsou stabilní v kyselých prostředích (rhodium, ruthenium, platina, iridium a jejich oxidy). [6]

V aktuálním technickém stavu se využívá platinový povlak na katodě pro redukci protonů a povlak oxidu iridia na anodě pro oxidaci vody. [6]

Voda je přiváděna do anody elektrolyzátoru a produkované plyny jsou vedeny mimo reaktivní místa přes průtokové kanály bipolárních průtokových desek (Obr. 2.22). Tyto desky jsou typicky vyrobeny z titanu, protože poskytuje dostatečnou mechanickou pevnost a odolnost proti korozi. V některých případech je používána i nerezová ocel a grafit, ačkoli jejich aplikace je značně omezena relativně špatnými korozivními vlastnostmi a špatnou mechanickou

pevností grafitu ve srovnání s titanem. I přes téměř výhradní použití titanu se nejedná o dokonalý materiál pro bipolární desky, jelikož podléhá oxidaci, je velmi obtížně opracovatelný a značně finančně nákladný. [6]

Mezi průtoková pole bipolárních desek je přidána vodivá vrstva. Tato vrstva je známá jako plynová difúzní vrstva (GDL) a zlepšuje jak elektrické spojení mezi bipolárními deskami, tak zajišťuje účinný transport vody i plynových produktů. Katodická plynová difúzní vrstva je obvykle vyrobena z uhlíkového papíru, avšak tento materiál není vhodný pro použití na anodě kvůli vysoce oxidativnímu prostředí, které by papír velmi rychle rozložilo. Namísto uhlíkového papíru je mezi průtoková pole vložena titanová, nebo podobná inertní kovová síť. [6]



Obr. 2.22 Konstrukční znázornění elektrolyzéru s protonovou membránou [6]

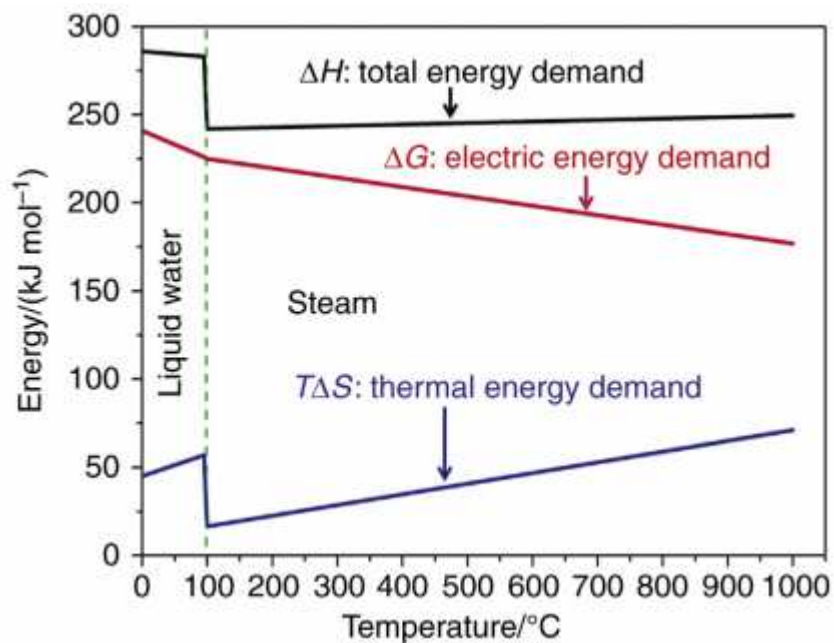
2.6.1.1.3 Pevné oxidační elektrolyzéry

Tento typ elektrolyzéru se liší od předešlých typů především řádově vyšší provozní teplotou (800-1000 °C), je tedy zřejmé, že napájen není vodou, ale její párou. Vysoká teplota by mohla naznačovat nízkou provozní účinnost, avšak tomu tak není. Zvýšení potřeby tepelné energie je do značné míry kompenzováno snížením potřeby elektrické energie a celková energetická náročnost je do značné míry necitlivá vůči zvýšení teploty (Obr. 2.23). [6]

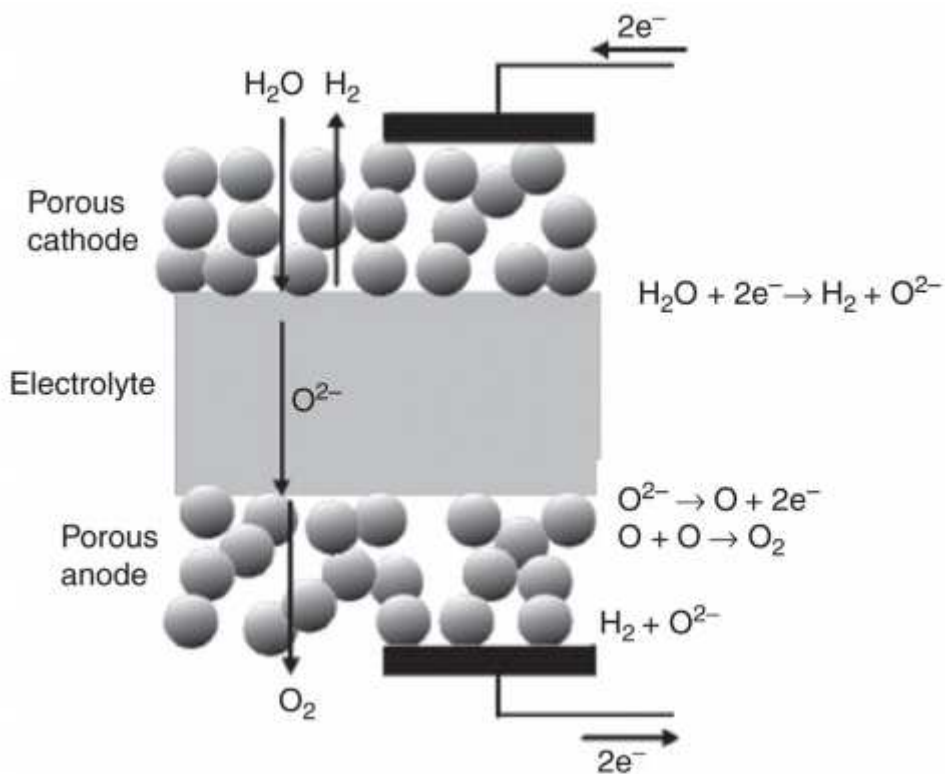
Během procesu elektrolýzy dochází k redukci vody (ve formě vysokotlaké páry) na katodě, za vzniku vodíkového plynu a kyslíkových aniontů. Tyto anionty procházejí skrz pevný oxidový elektrolyt a oxidují na anodě za vzniku plynného kyslíku. Elektrony vznikají oxidační cestou kolem externího obvodu a jsou dodávány pro redukci vody. Produkované plyny následně difundují porézními elektrodami. Princip funkce je znázorněn na Obr. 2.24. [6]

Je využíván pevný elektrolyt, který odděluje anodu od katody (podobně jako systém s protonovou membránou). V současnosti nejpokročilejším elektrolytem je yttriem stabilizovaný zirkon. Tento materiál má při vysokých teplotách dostatečnou iontovou vodivost, optimální provozní teplota se tedy blíží 1000 °C. Při této vysoké teplotě existuje řada problémů s mechanickou pevností buněk, včetně jejich nízké dlouhodobé stability, mezivrstevní difúze a výrobních a materiálových potíží. Vedle vodivosti kyslíkového aniontu je také možné provozovat systém na principu protonové vodivosti (podobný způsob jako u

elektrolyzáru s protonovou membránou), avšak musí být použit jiný elektrolyt (BaCeO_3 se v laboratorních podmínkách jeví optimálně). [6]



Obr. 2.23 Grafické znázornění energetické potřeby pevného oxidačního elektrolyzáru [6]



Obr. 2.24 Konstrukční znázornění pevného oxidačního elektrolyzáru [6]

2.6.1.2 Metan získaný metanací vodíku

Jak již bylo zmíněno, vyrobený vodík může být použit pro výrobu metanu redukcí oxidu uhličitého. Obecně existuje řada zdrojů a separačních technologií pro získání oxidu uhličitého (např. post-spalování, pre-spalování a chemické cyklení). V závislosti na typu separační technologie je třeba určitého množství tepla dodaného nejčastěji elektrárnou (největším zdrojem oxidu uhličitého jsou elektrárny na fosilní paliva a biomasu), čímž se zvýší spotřeba primární energie. To vede k celkovému snížení účinnosti elektrárny o 7-10 %. Navíc je třeba o 20-40 % více primární energie pro vyrobení 1 kWh. [6]

Oxid uhličitý může být také získáván přímo z atmosféry, ale jeho velmi nízká koncentrace vede ke značné spotřebě energie, což vede k vysokým provozním nákladům (aktuálně kolem 600 USD/t CO₂). [6]

Jakmile je výrobní řetězec aktivní a dochází k přebytku vodíku, nemusí být použit pouze k výrobě metanu, ale také k výrobě syntetického plynu a následně kapalných uhlovodíků (proces označovaný jako power to liquid). Pro konverzi syntetických plynů do kapalných uhlovodíků existují různé metody (např. metanolová syntéza, oxosyntéza a fermentace). Kromě výroby syntetického plynu jako suroviny pro kapalně uhlovodíky lze syntetizovat kapalně uhlovodíky přímo z oxidu uhličitého a vodíku (nebo vody). [6]

Typická metanace je následující chemická reakce:



2.6.1.3 Výroba elektrické energie

K využití uskladněného vodíku pro výrobu elektrické energie je třeba palivový článek (nebo také označovaný jako regenerativní palivový článek). Palivový článek může přeměňovat chemickou energii vodíku a kyslíku (ze vzduchu) na elektrickou energii. [5]

Výsledná chemická reakce bude následující:



Během procesu dojde k uvolnění tepelné i elektrické energie. [5]

Dle volby elektrolytu je aktuálně dostupných 6 hlavních typů palivových článků, jimiž jsou:

- alkalické palivové články
- palivové články s kyselinou fosforečnou
- pevné oxidační palivové články
- palivové články s roztavenými uhličitany
- palivové články s protonovou membránou
- přímé metanolové palivové články [5]

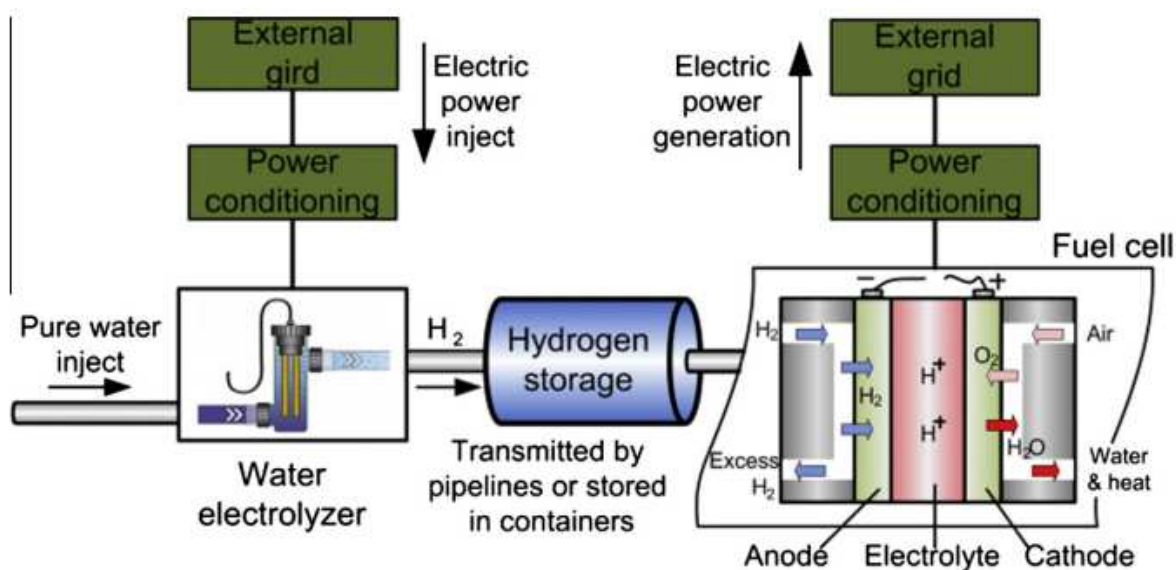
Probíhající chemické reakce v palivových člancích a možnosti jejich použití jsou uvedeny v Tab. 2.19). Pozn.: pořadí článků v tabulce je stejné jako v textu. [5]

Fuel cell Type	Chemical reactions at anodes and cathodes	Applications
AFC	$2\text{H}_2 + 4\text{OH}^- \rightarrow 4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$ $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$	Military, space applications
PAFC	$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	Distributed generation
SOFC	$\text{O}^{2-}(\text{s}) + \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + 2\text{e}^-$ $1/2\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}(\text{s})$	Utility EES, distributed generation
MCFC	$\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$ $2\text{H}_2 + 4\text{OH}^- \rightarrow 4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	Electric utility EES, distributed generation
PEMFC	$\text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ $1/2\text{O}_2(\text{g}) + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	Backup power, small distributed generation
DMFC	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$ $3/2\text{O}_2 + 6\text{e}^- + 6\text{H}^+ \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$	Transportation, portable devices

Tab. 2.19 Chemické reakce uvnitř jednotlivých palivových článků a možnosti jejich použití [5]

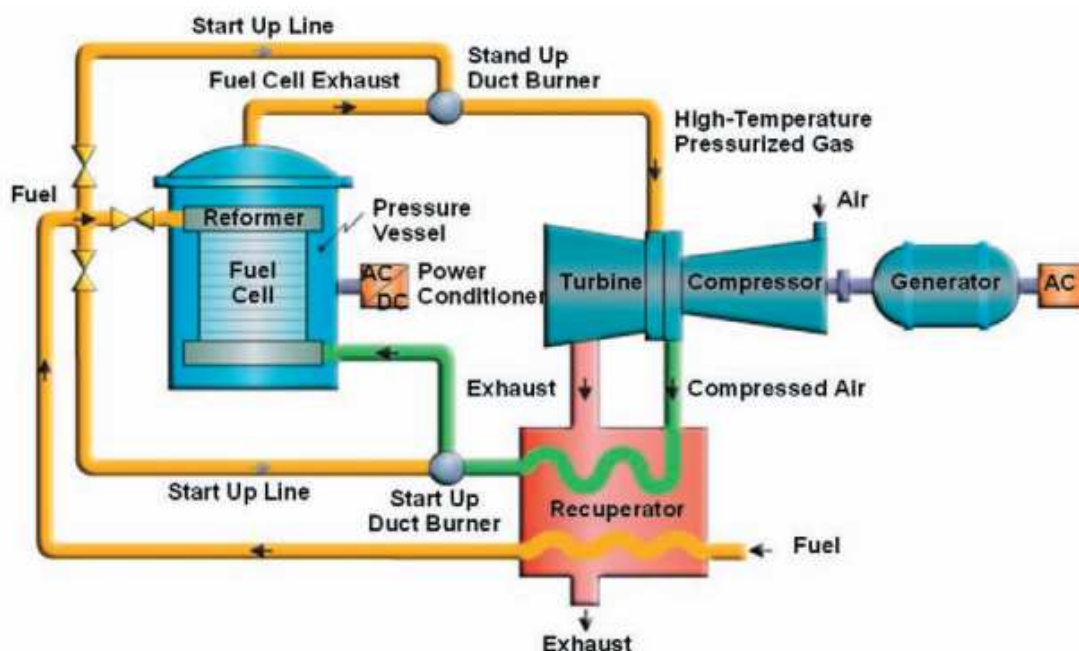
Z Tab. 2.19 je patrné, že nejvhodnější pro velká úložiště je pevný oxidační palivový článek, který pracuje na reverzním principu pevného oxidačního elektrolyzáru, avšak potýká se s podobnými technickými problémy. [5]

V podstatě je produkce elektrické energie palivovými články tišší a účinnější než spalování vodíku. Aktuálně jsou energetická úložiště na bázi power to gas ve vývojové a demonstrační fázi. Schématické znázornění energetického úložiště na bázi power to gas je na Obr. 2.25. [5]



Obr. 2.25 Konstrukční znázornění energetického úložiště na bázi power to gas [5]

Samozřejmě vyrobený vodík nemusí být přeměňován na elektrickou energii palivovým článkem (použití např. klasického plynového cyklu), ale je to nejvýhodnější pro dosažení nejvyšších účinností. Pokročilejším řešením může být hybridní systém s plynovou turbínou (kde může docházet i k spalování metanu) znázorněný na Obr. 2.26. V takovém systému pro dosažení vysokých účinností nemusí být vysokoteplotní palivový článek. [7]



Obr. 2.26 Konstrukční znázornění hybridního systému palivového článku a plynové turbíny [7]

2.6.1.4 Skladování vodíku

Při zvažování způsobu skladování vodíku je důležité znát jeho konečný účel použití a v souvislosti s tím zvolit vhodný tlak během ukládání. Udržování ukládacího tlaku vede ke spotřebě energie a snížení účinnosti. [6]

Způsoby ukládání vodíku jsou následující:

- Tlakové ukládání plynného vodíku
- Kryogenické ukládání kapalného vodíku
- Kryotlakové ukládání kapalného, nebo plynného vodíku
- Ukládání vodíku fyzickou adsorpcí
- Ukládání vodíku chemickou adsorpcí [6]

Přičemž každý způsob ukládání má jinou energetickou náročnost, jiný výsledný objem plynu, jiné investiční náklady a případně jiné skladovací ztráty, byť budou minimální (např. tlakové ukládání plynného vodíku se hodí hlavně pro čerpací stanice pro automobily s vodíkovým pohonem). [6]

2.6.2 Technická charakteristika a parametry

Alkalické elektrolyzéry i elektrolyzéry s protonovou membránou dosahují typických účinností 60-70 %. Elektrolyzéry s protonovou membránou reagují lépe na rychlé změny zatížení a jsou vhodné pro dynamické provoz, alkalické elektrolyzéry při dynamických provezech dosahují nižších účinností a horší kvality vodíku. Ačkoli alkalické tlakové elektrolyzéry mají lepší dynamické vlastnosti, problémy vznikají díky netěsnostem systému a následným únikům korozivních elektrolytů, ale na rozdíl od elektrolyzérů s protonovou membránou jsou aktuálně k dispozici pro mnohem vyšší výkony (Tab. 2.20). Avšak největší aktuální bariérou v masivnějším nasazování elektrolyzérů jsou značně vysoké investiční náklady. [6]

	AEC	PEMEC
Available nominal power/ MWel	Several	Up to 1
Performance range/%	20–100 of the available nominal power	0–100 of the available nominal power
Operating pressure/ 10^5 Pa (bar)	1–30	Up to 100
Operating temperature/ $^{\circ}\text{C}$	60–90	~80
Duration/a (years)	10–20	6–15
Space requirement	PEMEC are by a factor of 5–10 smaller than AEC	

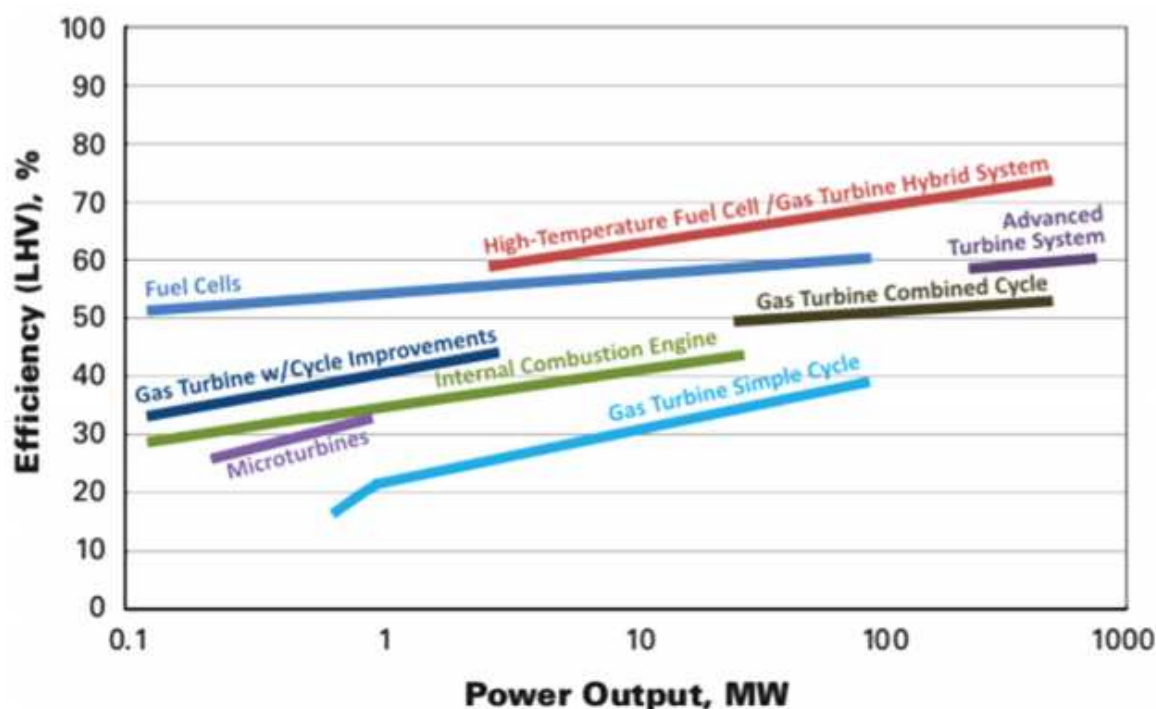
Tab. 2.20 Srovnání alkalických elektrolyzérů a elektrolyzérů s protonovou membránou [6]

Typické parametry metanace oxidu uhličitého jsou uvedeny v Tab. 2.21.

	CO ₂ Methanation
Performance range/%	80–110 of the available nominal power
Operating pressure/ 10^5 Pa (bar)	6–8
Operating temperature/ $^{\circ}\text{C}$	180–350
Efficiency/%	70–85
Space requirement	Depending on the plant size, a doubling of capacity is not accompanied by a double space requirement
Development status	Demonstration stage

Tab. 2.21 Typické parametry metanace oxidu uhličitého [6]

Co se týče výroby elektrické energie ze získaného vodíku, je možnost použít jak celou řadu plynových turbín, tak palivových článků (které dosahují značně vyšších účinností, vysokoteplotní ještě vyšší), nebo hybridního systému palivového článku (nemusí být vysokoteplotní) a plynové turbíny. Možností přeměny vodíku zpět na elektrickou energii je značné množství a celý proces je realizovatelný jen s drobnými úpravami již stávající plynové infrastruktury. Porovnání účinností výroby elektrické energie z vodíku je znázorněno na Obr. 2.27. [6]



Obr. 2.27 Porovnání účinností způsobů výroby elektrické energie z vodíku [7]

Stanovení celkové účinnosti systému je značně problematické a je třeba při něm brát ohled na dílčí účinnosti elektrolýzy, skladování vodíku a výroby elektrické energie. Ekvivalentní je to se stanovením investičních a provozních nákladů, pro většinu technologií aktuálně chybí ekonomické studie, nebo jsou pouze v demonstračních provozech a stále podléhají výzkumu. Časové charakteristiky za předpokladu již předvyrobeného vodíku budou v případě propojení s plynovou turbínou krátké (za několik minut je systém schopný najet na plný výkon) u palivových článků budou záviset na konkrétním typu článku (např. vysokoteplotní se musí přehřát, což najíždění prodlužuje). Skladování vodíku jako takové je vhodné pro dlouhodobé skladování s nízkými skladovacími ztrátami. [5]

Cycle efficiency (%)	Power rating (MW)	Rated energy capacity (MWh)	Response time	Charge/discharge transient time	Technology
20-66	<59	<39	Seconds		Hydrogen fuel cell

Tab. 2.22 Základní technické charakteristiky palivových článků [5]

2.6.3 Funkce

Při použití většího množství elektrolyzátorů současně lze dosáhnout i relativně vyšších výkonů (jednotky MW), avšak to vytváří velké skladovací nároky. Rozsah použití je relativně široký, díky spojení s velkým množstvím plynových turbín je značně usnadněna integrace a časové konstanty pro najíždění jsou krátké. Avšak největší perspektivita systému nejspíše spočívá ve využití jakožto kompenzačního mechanismu pro OZE. [6]

Díky těmto vlastnostem lze systém využít pro:

- Vykrytování špiček
- Vyrovnávání zatížení
- Energetické řízení
- Kompenzace OZE
- Pohotovostní režim [\[6\]](#)

2.6.4 Výzkum a vývoj

2.6.4.1 Vylepšování elektrolýzy

2.6.4.1.1 Alkalické elektrolýzy

Vývoj alkalických elektrolýzérů se soustředí zejména na vylepšení umožňující vyšší tlak plynu. [\[6\]](#)

2.6.4.1.2 Elektrolýzy s protonovou membránou

Výzkum a vývoj se soustředí na vytváření nových membrán s lepšími vlastnostmi, jako je vyšší protonová vodivost a lepší mechanická pevnost, což by mělo vést ke zvyšování účinnosti a snižování investičních nákladů. [\[6\]](#)

Dalším směrem výzkumu je vývoj nových bipolárních desek. Aktuálně se zkoumají možnosti použití 3D tisku, ačkoli zatím všechny tímto způsobem vytvořené desky nebyly komerčně použitelné. [\[6\]](#)

2.6.4.1.3 Pevné oxidační elektrolýzy

Pro tento typ elektrolýzéra je potřeba dodávat teplo z externího zdroje, což nabízí značné množství technologií k propojení. Další výzvy souvisejí s lepší odolností materiálů při vysokých teplotách a celkovém zmenšení systému. [\[6\]](#)

2.6.4.2 Optimalizace pro použití s obnovitelnými zdroji energie

Klíčové pro širší nasazení elektrolýzy s obnovitelnými zdroji energie se jeví vyřešení problémů s kolísavým příkonem, který v současnosti způsobuje nižší účinnost a horší kvalitu vodíku. [\[6\]](#)

2.6.4.3 Metanace

Zatímco metanace oxidu uhelnatého je již osvědčenou technologií využívanou při zplyňování uhlí, metanace oxidu uhličitého se stále rozvíjí. Současný výzkum se soustředí na metodiku tepelného řízení a dlouhodobou stabilitu katalyzátoru. [\[6\]](#)

2.6.4.4 Optimalizace palivových článků

2.6.4.5 Optimalizace cyklů pro přeměnu vodíku na elektrickou energii

2.6.5 Shrnutí akumulčních systémů na bázi power to gas

Větší pozornost byla věnována zejména výrobě samotného vodíku, jelikož se jedná o klíčovou část celého systému. Přeměna vodíku zpět na elektrickou energii už nepředstavuje zásadní technickou výzvu (vyjma optimalizace některých typů palivových článků). Nejeefektivnější se jeví výroba vodíku vysokoteplotním pevným oxidačním elektrolýzérem, avšak v současnosti čelí mnohým konstrukčním problémům. Pro vyšší výkony jsou aktuálně k dispozici pouze alkalické elektrolýzy, které však mají značně nižší účinnost při dynamickém zatížení. U jejich tlakové modifikace, která zlepšuje účinnost při dynamickém zatížení, se objevují nové problémy v souvislosti s úniky korozivních elektrolytů. Podrobnější srovnání elektrolýzérů je

uvedeno v kapitole **2.6.2**. Obecnou nevýhodou elektrolyzérů jsou aktuálně vysoké investiční náklady a potřeba dodávky čisté vody, což ještě zvyšuje tyto investiční a provozní náklady. [6]

Výhodou je, že vyrobený vodík se dá použít k celé řadě dalších technologických procesů, jako je metanace, nebo využít jinde v průmyslu, což značně zvyšuje atraktivitu celé technologie. Hlavním předpokládaným využitím je aktuálně kompenzace dynamické výroby obnovitelných zdrojů energie a to zejména díky značné technologické soběstačnosti. [6]

Dále je třeba zvolit metodu ukládání vyrobeného vodíku (případně jiného produktu). K tomu lze částečně využít již vybudovaná plynová infrastruktura včetně plynových potrubí, což opět zvyšuje atraktivitu celé technologie. U systémů pro vyšší výkony se objevují podobná omezení jako u systémů s akumulací tlakového vzduchu, jimiž jsou malé kapacity tlakových nádob, což by mohlo vést k potřebě rozsáhlejších podzemních úložišť a tím potřebě příhodné geografie. Avšak jistou výhodou jsou komplexnější možnosti skladování vodíku jako kryogenické ukládání kapalného vodíku, což ovšem vede k vyšší spotřebě energie, snižuje účinnost systému a prodlužuje časové konstanty, protože plyn musí být pro použití nejdříve opět gasifikován. [6]

Co se týče celkové účinnosti systému, je obtížně zjištělná, jelikož závisí na velkém množství použitých komponent (typ elektrolyzérů, metoda skladování, metoda přeměny vodíku na elektrickou energii) a také na režimu provozu. Pro celkovou účinnost je tedy nutné přihlédnout k jednotlivým dílčím účinnostem. V současnosti pro kompletní systémy nejsou dostupné ekonomické analýzy, jelikož většinou pracují pouze v demonstračním provozu. Je tedy obtížné odhadnout celkové investiční a provozní náklady podobně jako účinnosti. [6]

2.7 Supravodivé magnetické systémy

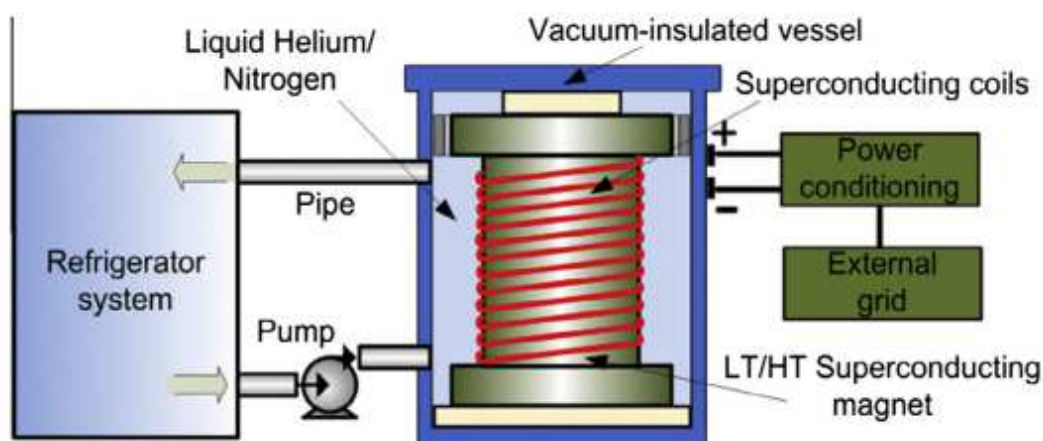
2.7.1 Základní popis technologie

Energie je ukládána v magnetickém poli vytvářeném stejnosměrným proudem v supravodivé cívkě, která byla kryogenicky ochlazená pod svou kritickou supravodivostní teplotu. Obecně platí, že cívka supravodivém stavu má nulový odpor a elektrická energie tak může být ukládána bez odporových ztrát. [5]

Typický systém se supravodivými magnety se skládá ze tří hlavních komponent:

- Supravodivá cívka a magnet
- Napájecí subsystém
- Subsystém chlazení a tvorby vakua [5]

Konstrukční princip úložiště energie se supravodivým magnetickým systémem je znázorněn na Obr. 2.28. Samotná supravodivá cívka a magnet chlazené tekutým heliem, nebo dusíkem jsou umístěny ve vakuové nádobě (kvůli minimálním ventilačním ztrátám). Supravodivý stav cívky je tedy udržován subsystémem chlazení a tvorby vakua, přičemž napájecí subsystém musí mít schopnost připojit velmi vysoký výkon (pokud je úložiště nabitě) a zajistit transformaci proudu na stejnosměrný (nabíjení), nebo střídavý (vybíjení). [5]



Obr. 2.28 Principiální znázornění úložiště se supravodivým magnetickým systémem [5]

2.7.2 Technická charakteristika a parametry

Množství uložené energie v magnetickém poli cívky je určeno její vlastní indukčností a velikostí procházejícího proudu. [5]

Materiály pro supravodivé cívky mohou být rozděleny do dvou skupin na:

- Nízkoteplotní (kritická supravodivostní teplota kolem 5 K)
- Vysokoteplotní (kritická supravodivostní teplota kolem 70 K) [5]

Nízkoteplotní supravodivé materiály jsou technologicky značně pokročilejší a komerčně dostupné, běžně používaným materiálem pro supravodivé cívky je tedy sloučenina niobu a titanu, která má kritickou supravodivostní teplotu 9,2 K. Vysokoteplotní supravodivé materiály jsou aktuálně ve stádiu vývoje. [5]

Výkonový rozsah komerčně dostupných úložišť se supravodivými magnety je 0,1-10 MW, avšak v následujících letech se očekává uvedení až desetinásobně výkonnějších systémů. Výhodami supravodivých magnetických systémů jsou vysoké hustoty akumulované energie (až

4000 W/l), velmi rychlá odezva (jednotky ms), velmi rychlá schopnost plného vybití (méně než 1 minuta), vysoká účinnost cyklu nabití-vybití (95-98 %) a dlouhá životnost (až 30 let). [5]

Na rozdíl od dobíjecích baterií jsou systémy se supravodivými magnety schopny téměř plného vybití po několik tisíc plných cyklů s minimální degradací. Avšak nevýhodami jsou vysoké investiční náklady (až 10 000 USD/kWh a 7 200 USD/kW), vysoké ztráty v nabitěm stavu (10-15 % denně) a negativní environmentální dopady způsobené silným magnetickým polem. Navíc je cívka velmi citlivá na malé změny teploty, které mohou ztrátu akumulované energie. [5]

Cycle efficiency (%)	Power rating (MW)	Rated energy capacity (MWh)	Response time	Charge/discharge transient time	Technology
95-97	1-10	0.0008-0.015	Miliseconds	Miliseconds	SMES

Tab. 2.23 Základní technické charakteristiky supravodivých magnetických systémů [5]

2.7.3 Funkce

Systémy se supravodivými magnety mají velmi krátké časové konstanty, schopnost hlubokého cyklování bez výrazného zkrácení životnosti, jsou komerčně dostupné pro relativně vysoké výkony a zároveň nejsou vhodné pro dlouhodobější skladování energie. [5]

Díky těmto vlastnostem lze systém využít pro:

- Vykrývání rychlých i velkých špiček
- Vyrovnávání zatížení
- Kompenzace OZE
- Pohotovostní režim [5]

Aktuálně předpokládaným využitím je kompenzace dynamické výroby obnovitelných zdrojů energie. Protože se jedná o relativně drahou technologii, avšak dostupnou i pro větší výkony, nabízí se možnost polocentrální kompenzace větších obnovitelných farem, přičemž částečně by se systémem mohly pokrývat energetické špičky. [5]

2.7.4 Nasazení

Některé aktuálně fungující systémy se supravodivými magnety a charakter jejich použití jsou uvedeny v Tab. 2.24. [5]

Locations/organizations	Technical data	Features/applications
Proof principle, tested in a grid in Germany	5 KJ, 2 s to max 100 A at 25 K	World first significant HTS-SMES, by ASC
Nosoo power station in Japan	10 MW	Improve system stability and power quality
Upper Wisconsin by American Transmission	3 MW/0.83 kW h, each 8 MV A	Power quality application reactive power support
Braker EST in Germany	2 MJ	High temperature superconductors
Korea Electric Power Corporation, Hyundai	3 MJ, 750 kV A	Improving power supply quality for sensitive loads
Chubu Electric Power Co. in Japan	7.3 MJ/5 MW and 1 MJ	Provide comparison to transient voltage
University of Houston, SuperPower & others	20 kW, up to 2 MJ class	UHF-SMES, voltage distribution

Tab. 2.24 Příklady konkrétních využití akumulačních systémů se supravodivými magnety [5]

2.7.5 Výzkum a vývoj

2.7.5.1 Snižování investičních nákladů supravodivých cívek a chladících systémů

Aktuálně se výzkum soustředí na zvyšování účinnosti chladících systémů, zmenšování jejich rozměrů a zvyšování jejich soběstačnosti. [5]

2.7.5.2 Zvyšování výkonu

Když je systém se supravodivými magnety plně nabitý a je dimenzovaný na vysoký výkon je největší problém s životností spínacích prvků a usměrňovačů, které nejsou schopny

dlouhodobě tyto značné výkonové rázy snášet. Aktuální výzkum se tedy soustředí na vylepšování spínacích a usměrňovacích systémů. [5]

2.7.5.3 Vývoj vysokoteplotních supravodivých materiálů

Vysokoteplotní materiály nejen zvyšují celkovou účinnost, jelikož vyžadují chlazení na značně vyšší teploty než nízkoteplotní supravodivé materiály, ale také jsou méně citlivé na malé změny teplot, které způsobují značné ztráty akumulované energie. Aktuálně se nejperspektivněji jeví vysokoteplotní supravodivé materiály YBaCuO. [5]

2.7.6 Shrnutí supravodivých magnetických akumulacních systémů

Jedná se o velmi perspektivní systém pro krátkodobé ukládání energie, avšak aktuálně jsou největší překážkou značné investiční náklady. Avšak je v následujících letech předpokládáno mnohonásobné zvyšování výkonu a snižování investičních nákladů. Díky dostupnosti systémů pro relativně vysoké výkony, jejich dlouhé životnosti, hluboké možnosti vybíjení a krátkým časovým konstantám se perfektně hodí pro nasazení v polocentrální kompenzaci dynamické výroby větších farem obnovitelných zdrojů energie a případně vykrývání výkonových špiček. Oproti tomu se díky značným ztrátám v nabitěm stavu nehodí pro dlouhodobější ukládání energie. Technické charakteristiky jsou popsány v kapitole 2.7.2 a možnosti výzkumu v kapitole 2.7.5. [5]

3 Vzájemné porovnání technologií

3.1 Metodika porovnávání

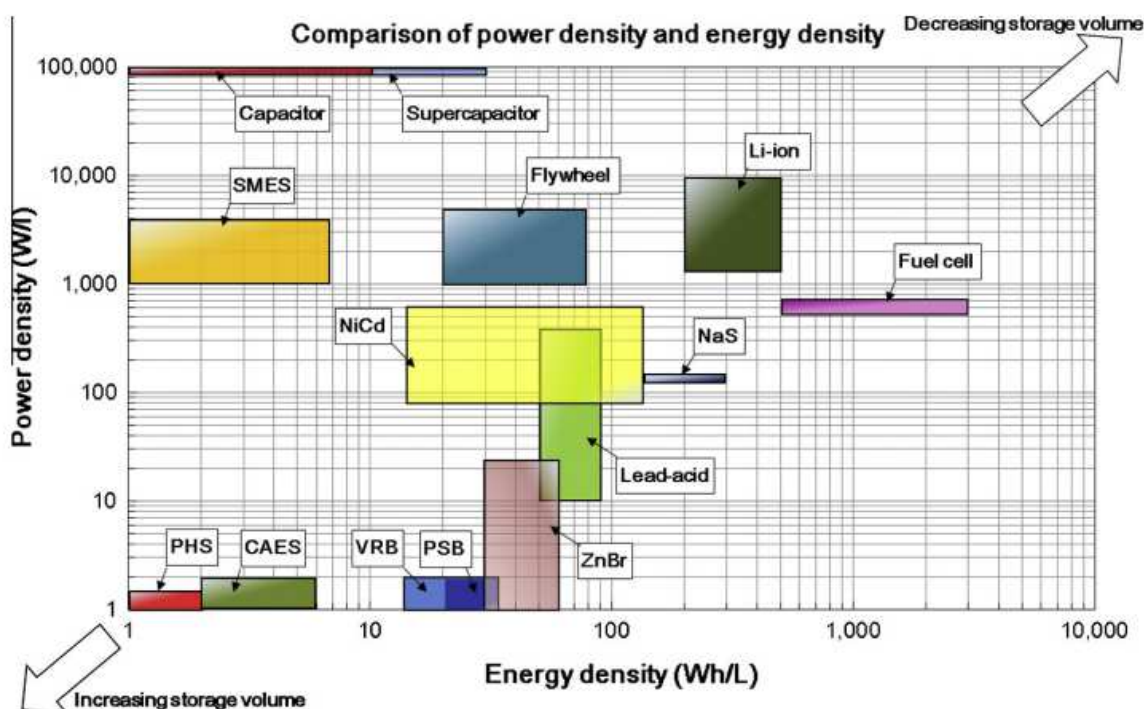
Každá z technologií popsaných v předešlé kapitole má své specifické parametry. Mezi základní patří:

- Objemová hustota výkonu (W/l)
- Objemová hustota energie (Wh/l)
- Hmotnostní hustota energie (Wh/kg)
- Instalovaný výkon (W)
- Celková akumulovaná energie (Wh)
- Časová konstanta uvedení do provozu na maximální výkon (s, min, hod)
- Celková účinnost cyklu nabití-vybití (%)
- Životnost (rok)
- Investiční náklady (USD/kWh) a provozní náklady (USD/kWrok)

Podle těchto parametrů lze stanovit vhodnost technologie pro konkrétní aplikaci. Je zřejmé, že každá technologie je vhodná pro jiné aplikace, přičemž pro dosažení optimálních vlastností lze technologie kombinovat (diskutováno v kapitole 4).

3.2 Porovnání objemové hustoty výkonu na objemové hustotě akumulované energie

V podstatě se jedná o srovnání akumulovaného výkonu na jednotku objemu systému vzhledem k objemové hustotě akumulované energie. Lze tedy stanovit, které technologie jsou schopny podávat nejvyšší výkony při největším množství objemového uložení energie. Nejlepší technologie je tedy ta s nejvyšším využitelným výkonem na co největší množství uložené energie.



Obr. 3.1 Porovnání objemové hustoty výkonu na objemové hustotě akumulované energie [5]

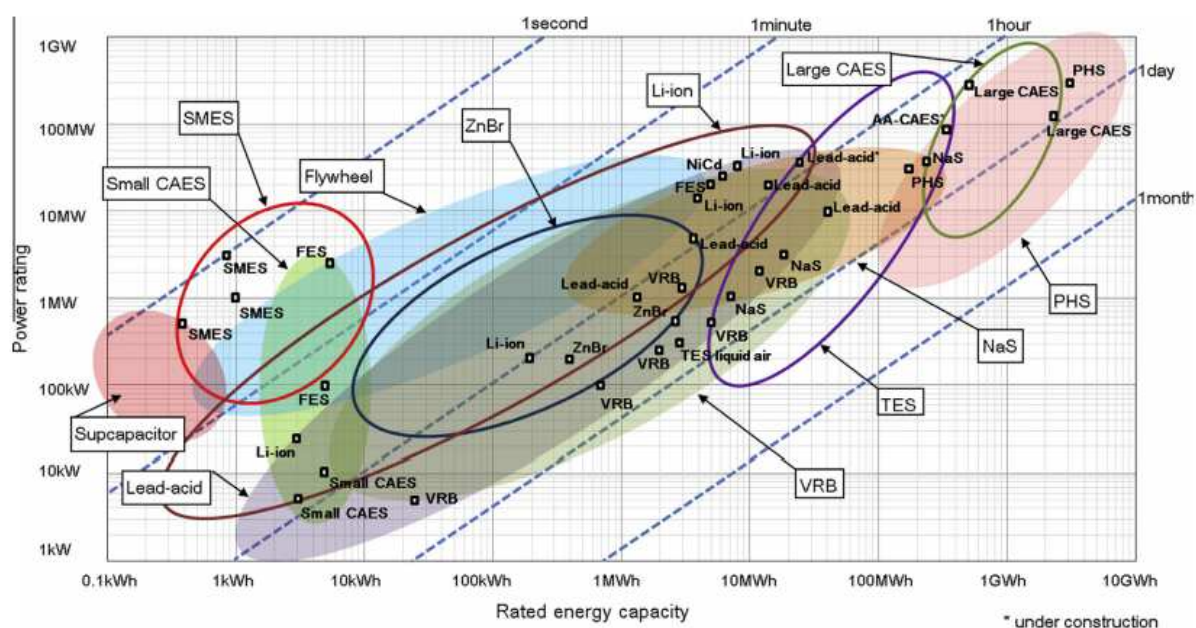
Z Obr. 3.1 je zřejmé, že nejlépe se jeví palivové články a lithium-iontové baterie. Je však důležité zmínit, že čelí konstrukčním omezením maximálních hodnot akumulované energie. Jedná se tedy o velmi kompaktní řešení, ale určené pro akumulaci relativně malých množství energií u samostatných článků (blíže analyzováno v kapitole 3.3).

Akumulační systémy se stlačeným vzduchem a přečerpávací elektrárny mají nižší objemové hustoty, proto se používají hlavně jako stacionární energetická úložiště a vyžadují velké zásobníky.

Superkondenzátory a kondenzátory mají velmi vysoké objemové hustoty výkonu, ale malé objemové hustoty energie. Průtokové baterie mají obvykle menší objemové hustoty než statické baterie.

3.3 Porovnání instalovaného výkonu na celkovém množství akumulované energie

Jedná se o srovnání, které se nezabývá vlastními rozměry systému, ale pouze jeho konstrukčními specifikacemi (omezeními) v absolutním měřítku. Zkoumána je závislost celkového instalovaného výkonu na maximálních hodnotách akumulované energie. Nejlepší technologie je teda ta, která je schopna podávat nejvyšší výkon a akumulovat co největší množství energie. Diskutována bude i délka nepřetržitého provozu na instalovaném výkonu (doba vybití).



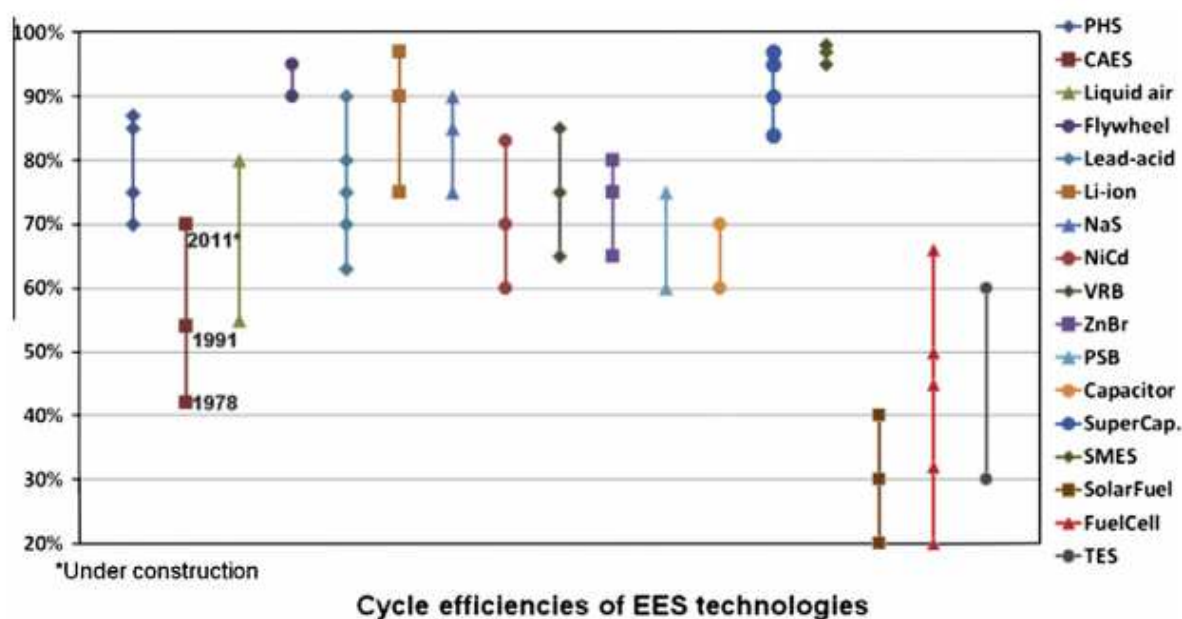
Obr. 3.2 Porovnání instalovaného výkonu na celkovém množství akumulované energie [5]

Jak je patrné z Obr. 3.2, nejlépe se jeví přečerpávací elektrárny, velká úložiště se stlačeným vzduchem a tepelné akumulační systémy. Mohou podávat velmi vysoké výkony a zároveň jsou schopny akumulovat velká množství energie, díky čemuž mohou být v konstantním provozu i několik dní. Avšak také čelí konstrukčním omezením jako pomalejší časové konstanty pro nabití na plný výkon (desítky sekund až desítky minut u tepelných akumulačních systémů), velké rozměry (prostorová náročnost), možná environmentální zátěž, nízké hodnoty akumulovaných energií na jednotku objemu.

Lithium-iontové baterie je možné spojovat, čímž lze z jednotlivých buněk vytvořit akumulací systém i o relativně vysokém výkonu (více než 10 MW), přičemž se následně plně projeví vysoké objemové hodnoty akumulovaných energií a celková akumulovaná energie může být relativně velká (více než 10 MWh). Podobné je to i u dalších typů baterií, což činí baterie obecně velmi variabilními.

3.4 Porovnání na základě účinnosti cyklu nabití-vybití

Hodnotícím kritériem je celková účinnost cyklu nabití-vybití, tedy kolik % energie lze získat z úložiště zpět z vynaložených 100 %. Nejlepší bude tedy systém s nejvyšší účinností cyklu.



Obr. 3.3 Porovnání na základě účinnosti cyklu nabití-vybití [5]

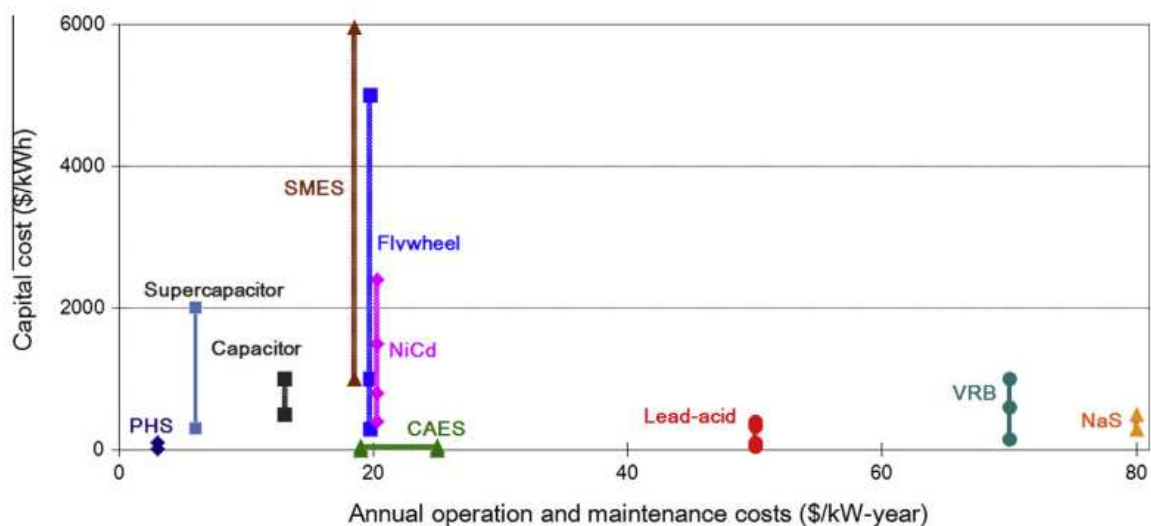
Na Obr. 3.3 dosahují nejvyšších účinností lithium-iontové baterie, superkondenzátory, systémy se supravodivými magnety, setrvačníky. Poměrně vysokých účinností také dosahují všechny ostatní typy baterií a z klasických úložišť přečerpávací elektrárny.

Samozřejmě je uvažováno nabití a okamžité vybití, jinak by účinnosti setrvačnicků, superkondenzátorů a systémů se supravodivými magnety byly značně nižší, protože se jedná u úložiště s uvažovanou krátkou akumulací dobou.

3.5 Porovnání na základě investičních a provozních nákladů

Investiční a provozní náklady tvoří klíčový faktor, na jehož základě volíme konkrétní technologie. I když jsou k dispozici obvykle vhodnější technologie, často je třeba udělat určitý kompromis vzhledem k ekonomické životaschopnosti celého projektu.

Hodnotícím kritériem je velikost investičních nákladů na jednotku akumulované energie vzhledem k velikosti provozních nákladů na jednotku instalovaného výkonu za jeden rok provozu. Nejlepší bude tedy technologie s nejnižšími investičními náklady a nejnižšími provozními náklady.



Obr. 3.4 Porovnání na základě investičních a provozních nákladů [5]

Z Obr. 3.4 vyplývá, že investičně nejméně náročným vzhledem k velikosti akumulované energie je systém přečerpávacích elektráren. Relativně výhodné jsou také kondenzátory a systémy se stlačeným vzduchem (byť s vyššími provozními náklady).

Bohužel nejsou dostupná data provozních nákladů pro lithium-iontové baterie. Dle dostupných dat a charakteristik z kapitoly 2.4.2.1.2 je předpoklad, že jejich provozní náklady budou poblíž 20 USD/kWrok, investiční náklady přitom mohou dosahovat až 3800 USD/kWh, což je nejvíce ze všech analyzovaných druhů baterií.

3.6 Shrnutí

Jak bylo naznačeno v kapitole 3.1, žádná technologie nemůže splnit požadavky na všechna použití energetických úložišť. Podrobný přehled parametrů každé technologie je uveden v Tab. 3.1, Tab. 3.2 a Tab. 3.3

Ztráty v nabitém stavu závisí na tepelných ztrátách u tepelných akumulačních systémů, únicích stlačeného vzduchu u systémů s akumulací stlačeného vzduchu, elektrochemických ztrátách v bateriích atp. Jedná se o jeden z hlavních faktorů při rozhodování o možné době skladování energie. Z Tab. 3.2 je patrné, že přečerpávací elektrárny, systémy s akumulací stlačeného vzduchu, sodíkovo-sírové baterie, průtokové baterie a palivové články mají velmi malé denní ztráty v nabitém stavu, takže jsou vhodné pro dlouhodobé skladování energie (měsíce). Většina konvenčních baterií (vyjma sodíkovo-sírových) dosahuje ztrát v nabitém stavu kolem 0,03-5 % denně, což je vhodné pro střednědobé skladování energie (dny). Systémy se supravodivými magnety, setrvačníky, kondenzátory a superkondenzátory mají velmi velké denní ztráty v nabitém stavu (10-100 %), tudíž se mohou během několika hodin kompletně vybit. Mohou být tedy použity pro krátkodobé ukládání energie (hodiny). Tepelné akumulační systémy mají mnoho technologických variací a jsou vhodné pro střednědobé a dlouhodobé ukládání energie.

Doba životnosti a počet cyklů nabití-vybití jsou dva hlavní faktory, které ovlivňují celkové investiční náklady. Nízká doba životnosti a nízký počet cyklů nabití-vybití náklady na údržbu a nahrazení. Porovnání doby životnosti a počtu cyklů nabití-vybití je uvedeno v Tab. 3.2. Víceméně je patrné, že tyto dva faktory souvisí s kategorií technologie, tedy v jaké formě je energie v systému ukládána. Systémy s ukládáním mechanické energie jako přečerpávací

elektrárny, systémy s akumulací stlačeného vzduchu a setrvačníky mají obvykle vysoké počty cyklů nabití-vybití (kolem 10 000 i více), což je hlavně závislé na mechanických součástkách. Systémy s ukládáním elektrické energie jako systémy se supravodivými magnety, kondenzátory a superkondenzátory mají obvykle počet cyklů nabití-vybití vyšší než 20 000. Je také patrné, že systémy s konvenčními bateriemi nedosahují tak vysokých počtů cyklů nabití-vybití jako ostatní akumulační systémy a to hlavně v důsledku chemické degradace během nabitého stavu.

Aktuální technický stav technologií je spojen s úrovní komercializace, technického rizika a souvisejících ekonomických benefitů. Tab. 3.3 porovnává úrovně aktuálního technického stavu jednotlivých technologií.

Z hlediska možnosti nasazení lze technologie rozdělit do pěti kategorií:

- Vývoj (pokročilé systémy s akumulací stlačeného vzduchu, polysulfid-bromové baterie)
- Demonstrace (systémy s kapalným vzduchem, lithium-iontové baterie, vanadové redoxní baterie, zinko-bromové baterie, superkondenzátory, systémy se supravodivými magnety, palivové články)
- Ranně komercializované (malé nadzemní akumulační systémy se stlačeným vzduchem a setrvačníky, tepelné akumulační systémy)
- Komercializované (systémy s akumulací stlačeného vzduchu, sodíkovo-sírové baterie, nikl-kadmiové baterie a kondenzátory)
- Technicky zvládnuté (přečerpávací elektrárny a olověné baterie)

Z Tab. 3.3 je také patrné, že u několika typů technologií dochází k vývoji z jedné kategorie do druhé. Technologie ve vývojové fázi jsou technicky možné a mají velký potenciál pro budoucí energetická úložiště.

Tab. 3.3 také uvádí také investiční a provozní náklady jednotlivých technologií. Je třeba zdůraznit, že kompletní ekonomická analýza vyžaduje uvažování nejen investičních a provozních nákladů, ale také životnosti vybavení. Ačkoli investiční náklady olověných baterií jsou poměrně nízké, nemusí to být nejlepší technologická alternativa pro velká energetická úložiště v důsledku jejich vysokých provozních nákladů a krátké životnosti. Náklady na energetická úložiště mají klesající tendenci díky neustálému výzkumu a vývoji, přičemž některé klíčové technologické průlomy mohou vést k dramatickým nákladovým poklesům. Mezi technicky zvládnutými a komercializovanými technologiemi mají nejnížší investiční náklady přečerpávací elektrárny a systémy s akumulací stlačeného vzduchu. Dobíjecí sodíkovo-sírové, vanadové redoxní a olověné baterie mají relativně vysoké provozní náklady. Tepelné akumulační systémy jsou v oblasti nejnižších investičních nákladů. Systémy se supravodivými magnety a setrvačníky jsou vhodné pro aplikace s potřebou vysokého výkonu, ale krátké doby nasazení, jelikož mají nízké investiční náklady na jednotku výkonu, ale vysoké náklady na jednotku akumulované energie. Je také důležité zmínit, že investiční náklady pro konkrétní energetické akumulační systémy se liší podle časového plánu výstavby, umístění zařízení a velikosti systému.

Technology	Energy density (Wh/l)	Power density (W/l)	Specific energy (Wh/kg)	Specific power (W/kg)	Power rating (MW)	Rated energy capacity (MWh)
PHS	0.5-2	0.5-1.5	0.5-1.5		100-5000	500-8000
Large-scale Compressed Air ES	2-6	0.5-2	30-60		110-1000	<2860
Small Compressed Air ES	Higher than large-scale CAES	Higher than large-scale CAES	140		0.003-10	0.01
Flywheel	20-80	1000-5000	5-100	400-1500	0.1-20	<5
Lead-acid	50-90	10-400	25-50	75-300	0-40	0.001-40
Li-ion	200-500	1500-10000	75-200	150-2000	0-100	0.004-10
NaS	150-300	140-180	150-240	90-230	<34	0.4-244.8
NiCd	60-150	80-600	45-80	150-300	0-40	6.75
VRB	16-35	2	10-30	166	0.03-50	<60
ZnBr	30-65	25	30-80	100	0.05-10	0.05-3
PSB	20-30	2	15-30		1-15	<120
Capacitor	2-10	100000+	0.05-5	100000	0-0.05	
Super-capacitor	10-30	100000+	2.5-15	500-10000	0-0.3	0.0005
SMES	0.2-6	1000-4000	0.5-75	500-2000	1-10	0.0008-0.015
Hydrogen fuel cell	500-3000	500+	800-100000	5-800	<59	<39
Thermal energy storage	80-500		80-250	10-30	0.1-300	
Liquid air storage	4-6 times than CAES		214		10-200	2.5

Tab. 3.1 Technické parametry všech technologií energetických úložišť [\[5\]](#)

Technology	Daily self-discharge (%)	Lifetime (years)	Cycling times (cycles · 10 ³)	Discharge efficiency (%)	Cycle efficiency (%)	Response time
PHS	Very small	40-60	10-30	87	70-85	Minutes
Large-scale Compressed Air ES	Small, almost zero	20-40	8-12	70-79	70	Minutes
Small Compressed Air ES	Very small	23+	30	75-90		Seconds-minutes
Flywheel	Up to 20% per hour	15-20	20+	90-93	90-95	Seconds
Lead-acid	0.1-0.3	5-15	0.5-1	85	70-80	Miliseconds
Li-ion	0.1-0.3	5-15	20	85	90-97	Miliseconds
NaS	Almost zero	10-20	2.5-4.5	85	75-90	Miliseconds
NiCd	0.2-0.6	10-20	3.5	85	60-83	Miliseconds
VRB	Small	5-20	12	75-82	65-85	Miliseconds
ZnBr	Small	5-10	2	60-70	65-80	Miliseconds
PSB	Small, almost zero	10-15			60-75	Miliseconds
Capacitor	Up to 50% in 15 minutes	1-10	50	75-90	60-70	Miliseconds
Super-capacitor	20-40	10-30	100+	98	90-97	Miliseconds
SMES	10-15	20-30	100+	95	95-97	Miliseconds
Hydrogen fuel cell	Almost zero	5-20	20+	59	20-66	Seconds
Thermal energy storage	0.05-1	10-30			55-80	Minutes-hours
Liquid air storage	Small	25+				Minutes

Tab. 3.2 Provozní parametry všech technologií energetických úložišť [\[5\]](#)

Technology	Suitable storage duration	Discharge time at power rating	Power capital cost (USD/kW)	Energy capital cost (USD/kWh)	Operating and maintenance cost	Maturity
PHS	Hours-months	1-24+ h	2000-4300	5-100	3 \$/kW/year, 0.004 \$/kWh	Mature
Large-scale Compressed Air ES	Hours-months	1-24+ h	400-1000	2-120	0.003 \$/kWh, 19-25 \$/kW/year	Commercialized, advanced developing
Small Compressed Air ES	Hours-months	0.5-180 min	500-1500	200-250	Very low	Early commercialized
Flywheel	Seconds-minutes	0.25-15 min	250-350	1000-14000	0.004 \$/kWh, 20 \$/kW/year	Early commercialized
Lead-acid	Minutes-days	Seconds-hours	200-600	50-400	50 \$/kW/year	Mature
Li-ion	Minutes-days	Minutes-hours	900-4000	600-3800		Demonstration
NaS	Hours-months	Seconds-hours	350-3000	300-500	80 \$/kW/year	Commercialized
NiCd	Minutes-days	Seconds-hours	500-1500	400-2400	20 \$/kW/year	Commercialized
VRB	Hours-months	Seconds-24+ h	600-1500	150-1000	70 \$/kW/year	Demo/early commercialized
ZnBr	Hours-months	Seconds-10+ h	200-2500	150-1000		Demonstration
PSB	Hours-months	Seconds-10+ h	700-2500	150-1000		Developing
Capacitor	Seconds-hours	Miliseconds-1 h	200-400	500-1000	13 \$/kW/year, 0.05 \$/kWh	Commercialized
Super-capacitor	Seconds-hours	Miliseconds-1 h	100-450	300-2000	6 \$/kW/year, 0.005 \$/kWh	Developing/demo
SMES	Minutes-hours	Miliseconds-30 min	200-500	1000-10000	0.001 \$/kWh, 18.5 \$/kW/year	Demo/early commercialized
Hydrogen fuel cell	Hours-months	Seconds-24+ h	500-3000	2-15	0.0019-0.0153 \$/kW	Developing/demo
Thermal energy storage	Minutes-months	1-24+ h	100-400	3-60		Demo/early commercialized
Liquid air storage	Hours-months	Hours	900-1900	260-530		Developing/demo

Tab. 3.3 Ekonomické parametry všech technologií energetických úložišť [5]

Literatura

- [1] <https://www.intechopen.com/books/energy-storage-technologies-and-applications/compressed-air-energy-storage>
- [2] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032108001664>
- [3] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032105000146>
- [4] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032107001402>
- [5] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914010290>
- [6] <https://www.sciencedirect.com/book/9780128034408/storing-energy#book-info>
- [7] <https://escholarship.org/uc/item/3k47s2tq>
- [8] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775398002493>

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Principiální znázornění systému s klasickou plynovou turbínou	8
Obr. 2.2 Principiální znázornění akumulčního systému se stlačeným vzduchem.....	8
Obr. 2.3 Principiální znázornění vylepšeného akumulčního systému se stlačeným vzduchem	10
Obr. 2.4 Principiální znázornění vylepšeného akumulčního systému se stlačeným vzduchem a klasickou plynovou turbínou	11
Obr. 2.5 Principiální znázornění pokročilého adiabatického systému se stlačeným vzduchem	12
Obr. 2.6 Principiální znázornění malého systému se stlačeným vzduchem	12
Obr. 2.7 Hlavní komponenty setrvačnickového úložiště energie (vysokorychlostní)	14
Obr. 2.8 Principiální znázornění tepelného úložiště se stálým skupenstvím akumulčního média.....	19
Obr. 2.9 Schématické znázornění funkce systému s kapalným vzduchem.....	20
Obr. 2.10 Grafické znázornění množství akumulované energie ve vzduchu v závislosti na tlaku v úložišti.....	21
Obr. 2.11 Různé způsoby realizování tepelného přenosu z/do akumulčního média	24
Obr. 2.12 Procesní schéma systému s kapalným vzduchem propojeným s klasickou plynovou elektrárnou.....	25
Obr. 2.13 Procesní schéma systému s kapalným vzduchem propojeným se systémem solárně termické přeměny	27
Obr. 2.14 Procesní uspořádání systému s kapalným vzduchem v kombinaci s jadernou elektrárnou.....	28
Obr. 2.15 Tepelná kapacita vzduchu při různých tlacích.....	29
Obr. 2.16 Tepelná kapacita různých akumulčních kapalin.....	30
Obr. 2.17 Znázornění zjednodušeného provozního principu typického bateriového energetického úložiště	32
Obr. 2.18 Znázornění principu funkce průtokové vanadové redoxní baterie.....	35
Obr. 2.19 Znázornění principu funkce superkondenzátoru	40
Obr. 2.20 Znázornění procesního řetězce systémů na bázi power to gas	42
Obr. 2.21 Konstrukční znázornění alkalického elektrolyzátoru.....	43
Obr. 2.22 Konstrukční znázornění elektrolyzátoru s protonovou membránou	44
Obr. 2.23 Grafické znázornění energetické potřeby pevného oxidačního elektrolyzátoru	45
Obr. 2.24 Konstrukční znázornění pevného oxidačního elektrolyzátoru	45
Obr. 2.25 Konstrukční znázornění energetického úložiště na bázi power to gas	47
Obr. 2.26 Konstrukční znázornění hybridního palivového článku a plynové turbíny	48
Obr. 2.27 Porovnání účinností způsobů výroby elektrické energie z vodíku	50
Obr. 2.28 Principiální znázornění úložiště se supravodivým magnetickým systémem	53
Obr. 3.1 Porovnání objemové hustoty výkonu a objemové hustoty akumulované energie ...	56
Obr. 3.2 Porovnání instalovaného výkonu na celkovém množství akumulované energie	57
Obr. 3.3 Porovnání na základě účinnosti cyklu nabití-vybití	58
Obr. 3.4 Porovnání na základě investičních a provozních nákladů	59

Seznam tabulek

Tab. 2.1 Základní technické charakteristiky systémů s akumulací stlačeného vzduchu	9
Tab. 2.2 Základní technické charakteristiky setrvačníků.....	15
Tab. 2.3 Příklady činitelů tvaru K pro různé tvary setrvačníků	16
Tab. 2.4 Základní technické charakteristiky tepelných akumulačních systémů	22
Tab. 2.5 Základní technické charakteristiky olověných baterií.....	33
Tab. 2.6 Základní technické charakteristiky lithium-iontových baterií.....	34
Tab. 2.7 Základní technické charakteristiky sodíkovo-sírových baterií.....	34
Tab. 2.8 Základní technické charakteristiky nikl-kadmiových baterií	34
Tab. 2.9 Materiál pro provoz 50 kW vanadového redoxního článku po dobu 20 let	36
Tab. 2.10 Základní technické charakteristiky vanadových redoxních baterií	36
Tab. 2.11 Základní technické charakteristiky zinko-bromových baterií.....	36
Tab. 2.12 Základní technické charakteristiky olověných baterií.....	36
Tab. 2.13 Příklady použití olověných baterií jako energetických úložišť	37
Tab. 2.14 Příklady použití sodíkovo-sírových baterií jako energetických úložišť.....	37
Tab. 2.15 Příklady použití vanadových redoxních baterií jako energetických úložišť.....	38
Tab. 2.16 Technické charakteristiky baterií vhodných pro energetická úložiště	39
Tab. 2.17 Základní technické charakteristiky kondenzátorů a superkondenzátorů	40
Tab. 2.18 Příklady konkrétních použití superkondenzátorů	41
Tab. 2.19 Chemické reakce uvnitř jednotlivých palivových článků a možnosti jejich použití .	47
Tab. 2.20 Srovnání alkalických elektrolyzérů a elektrolyzérů s protonovou membránou	49
Tab. 2.21 Typické parametry metanace oxidu uhličitého.....	49
Tab. 2.22 Základní technické charakteristiky palivových článků.....	50
Tab. 2.23 Základní technické charakteristiky supravodivých magnetických systémů	54
Tab. 2.24 Příklady konkrétních využití akumulačních systémů se supravodivými magnety ...	54
Tab. 3.1 Technické parametry všech technologií energetických úložišť.....	61
Tab. 3.2 Provozní parametry všech technologií energetických úložišť.....	62
Tab. 3.3 Ekonomické parametry všech technologií energetických úložišť	63

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
0	Všechny	Publikování dokumentu	18.10.2018	M.Vinš