



**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV ENERGETIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2024

Hryhorii Lipeikin



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Problematika akumulace energie ve fúzních elektrárnách

Issues of energy storage in fusion power plants

Bakalářská práce

Studijní program: Strojírenství

Studijní obor: Energetika a procesní technika

Autor bakalářské práce: Hryhorii Lipeikin

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Štěpánek, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lipeikin** Jméno: **Hryhorii** Osobní číslo: **494625**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Strojirenství**
Studijní obor: **Energetika a procesní technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Akumulace energie ve fúzních elektrárnách

Název bakalářské práce anglicky:

Energy storage in fusion power plants

Pokyny pro vypracování:

Plánované demonstrační fúzní elektrárny budou pracovat v pulzním režimu. Je tedy u nich nutné vyřešit problematiku akumulace energie, aby byl překlenut výpadek (snížení) produkce tepla v reaktoru. Práce bude obsahovat rešerši možných způsobů akumulace energie, jejich výhody a nevýhody pro danou aplikaci.

Seznam doporučené literatury:

Entler, S., Energetické využití jadené fúze, Disertační práce, ČVUT v Praze, 2018

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Štěpánek, Ph.D. ústav energetiky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **12.04.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **03.06.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2025**

Anotační list

Jméno autora:	Hryhorii Lipeikin
Název DP:	Problematika akumulace energie ve fúzních elektrárnách
Anglický název:	Issues of energy storage in fusion power plants
Akademický rok:	2023/2024
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky/ Energetika a procesní technika
Vedoucí DP:	Ing. Jan Štěpánek, Ph.D.
Konzultant:	
Bibliografické údaje:	Počet stran: 50 Počet obrázků: 8 Počet tabulek: 7 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	Ukládání energie fúze, Pulzní zdroj energie, Skladování energie v roztavených solích, Pevné akumulátory, Elektrochemické baterie, Gravitační baterie, Reaktor DEMO
Keywords:	Fusion energy storage, Pulsed power supply, Molten salt energy storage, Solid-state accumulators, Electrochemical batteries, Gravitational batteries, DEMO reactor
Anotace:	Cílem této práce je prozkoumat různé metody akumulace energie v kontextu provozu fúzního reaktoru v pulzním režimu, jako je DEMO. Studie analyzuje současné a perspektivní technologie ukládání energie, včetně využití roztavených solí, pevných akumulátorů, elektrochemických baterií a mechanických systémů, jako jsou gravitační baterie.
Abstract:	The objective of this work is to explore various energy storage methods in the context of operating a fusion reactor in pulse mode. The study analyzes current and prospective energy storage technologies, including the use of molten salts, solid accumulators, electrochemical batteries, and mechanical systems such as gravitational batteries.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „Problematika akumulace energie ve fúzních elektrárnách“ vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V Praze, datum 07.05.2024

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Janu Štěpánkovi za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

ABSTRAKT

Cílem této práce je prozkoumat různé metody akumulace energie v kontextu provozu pulzních fúzních reaktorů, jako je DEMO. Studie analyzuje současné a perspektivní technologie ukládání energie, včetně využití roztavených solí, pevných akumulátorů, elektrochemických baterií a mechanických systémů, jako jsou gravitační baterie. Hlavní pozornost je věnována efektivitě a proveditelnosti každé metody v podmínkách vysokých teplot, kolísání zátěže a požadavků na dlouhodobou stabilitu.

Práce prezentuje výpočty tepelné a energetické efektivity různých akumulačních zařízení. Analyzovány jsou parametry jako energetická kapacita, rychlost akumulace a uvolňování energie, a také ekonomická efektivita implementace těchto technologií do fúzních elektráren. Zvláštní pozornost je věnována optimalizaci systémů pro akumulaci energie za účelem zajištění nepřetržitého provozu energetického systému, který čelí přerušované povaze výroby energie fúzními reaktory.

Klíčová slova

Ukládání energie fúze, Pulzní zdroj energie, Skladování energie v roztavených solích, Pevné akumulátory, Elektrochemické baterie, Gravitační baterie, Reaktor DEMO

ABSTRACT

The objective of this work is to explore various energy storage methods in the context of operating pulsed fusion reactors such as DEMO. The study analyzes current and prospective energy storage technologies, including the use of molten salts, solid accumulators, electrochemical batteries, and mechanical systems such as gravitational batteries. The main focus is on the efficiency and feasibility of each method under conditions of high temperatures, load fluctuations, and requirements for long-term stability.

This study presents calculations of thermal and energy efficiency for various storage devices. Parameters such as energy capacity, rate of energy accumulation and release, as well as the economic viability of implementing these technologies in fusion power plants are analyzed. Special attention is given to optimizing energy storage systems to ensure continuous operation of the power system, which faces the intermittent nature of energy production by fusion reactors.

Keywords

Fusion energy storage, Pulsed power supply, Molten salt energy storage, Solid-state accumulators, Electrochemical batteries, Gravitational batteries, DEMO reactor

OBSAH

Seznam symbolů a zkratek.....	5
1 Úvod.....	6
2 Energetické využití jaderné fúze.....	7
2.1 Popis fúzních reaktorů se zaměřením na Tokamak.....	7
2.1.1 Jaderná fúze.....	7
2.1.2 Tokamak a představitelé	7
2.1.3 Elektrárna DEMO	8
2.1.4 Pulzní provoz.....	8
2.2 Možnosti ukládání energie	9
2.2.1 Soli	9
2.2.2 Pevné látky	10
2.2.3 Baterie	10
2.2.4 Gravitační baterie	12
2.2.5 Přečerpávací vodní elektrárna.....	13
2.3 Technologie chlazení HCPB a WCLL	14
2.3.1 HCPB	14
2.3.2 WCLL	15
3 Technicko-ekonomická analýza úložišť energie vhodných pro fúzní elektrárny.....	18
3.1 Cíl výpočtů	18
3.2 Vstupní hodnoty pro výpočty k HCPB, WCLL	19
3.2.1 HCPB	20
3.2.2 WCLL	20
3.3 HCPB – výpočty a komentáře	21
3.3.1 Výpočty pro HCPB (Helium Cooled Pebble Bed):	21
3.3.2 Porovnání průtoku a cen s jinými vhodnými solemi.....	24
3.3.3 Dílčí závěr	25
3.4 WCLL – výpočty a komentáře	26
3.4.1 Výpočty pro WCLL (Water-Cooled Lithium Lead)	26
3.4.2 Porovnání průtoku s jinými vhodnými solemi	29
3.4.3 Dílčí závěr	30
3.5 Pevnolátkové zásobníky	31
3.5.1 Charakteristiky	31
3.5.2 Výpočty	31
3.5.3 Dílčí závěr:	33

3.6	Baterie.....	34
3.6.1	Ni-Cd	34
3.6.1.1	Charakteristiky [27]	34
3.6.1.2	Výpočet objemu a ceny	34
3.6.1.3	Dílčí závěr:	34
3.6.2	Ni-MH	35
3.6.2.1	Charakteristiky [27]	35
3.6.2.2	Výpočet objemu a ceny	35
3.6.2.2	Dílčí závěr:	35
3.6.3	Li-ion baterie.....	36
3.6.3.1	Charakteristiky [27]	36
3.6.3.2	Výpočet objemu a ceny	36
3.6.3.3	Dílčí závěr:	36
3.6.4	Olověné akumulátory.....	37
3.6.4.1	Charakteristiky [27]	37
3.6.4.2	Výpočet objemu a ceny	37
3.6.4.3	Dílčí závěr:	37
3.6.5	Dílčí závěr:	38
3.7	Gravitační uložení	39
3.7.1	Technické charakteristiky	39
3.7.2	Výpočty	39
3.7.3	Dílčí závěr:	40
3.8	Přečerpávací stanici.....	41
3.8.1	Technické charakteristiky	41
3.8.2	Výpočty	41
3.8.3	Porovnání s PVE Dlouhé Stráně	42
3.8.4	Dílčí závěr:	42
3.9	Celkové porovnání	43
4	Závěr	46
	Seznam literatury	47
	Seznam obrázků.....	50
	Seznam tabulek.....	50

Seznam symbolů a zkratk

Seznam zkratk

Zkratka	Význam
DEMO	Demonstrační elektrárna, demonstration fusion power plant
JET	Joint european torus
ITER	International thermonuclear experimental reactor
HCPB	Helium cooled pebble bed
WCLL	Water cooled lithium lead
PVE	Přečerpávací vodní elektrárna
BB	Množivý blanket, breeding blanket
VV	Vakuová nádoba, vacuum vessel
IHTS	Vložený okruh přenosu tepla, intermediate heat transfer system
PHTS	Primární okruh přenosu tepla, primary heat transfer system
PCS	Systém přeměny energie, power conversion system
BoP	Bilance zařízení, balance of plant
DCD	Detailní konceptuální návrh, detailed concept design
BZ	Zóna štěpení, breeding zone
FW	První stěna, first wall
ESS	Systém skladování energie, energy storage system
OTSGs	Průtokové parogenerátory, once through steam generators
Div	Divertor
Div_cas	Divertorová kazeta, divertor cassette

1 Úvod

V současné energetické situaci hraje fúze významnou roli jako potenciální řešení některých největších problémů, kterým čelí naše společnost. Fúzní energie, často označovaná jako „energie budoucnosti“, nabízí slib neomezeného, čistého a bezpečného zdroje energie. Oproti tradičním fosilním palivům a existujícím jaderným technologiím má fúze potenciál výrazně snížit závislost na nestabilních energetických zdrojích a zmenšit dopady na životní prostředí díky minimálním emisím skleníkových plynů.

Na Zemi se pokoušíme napodobit tento proces, kde lehká atomová jádra spojují za vzniku těžších jader a uvolňují přitom energii. Na rozdíl od jaderného štěpení, fúzní reakce nabízí výhody jako je absence dlouhodobě radioaktivních odpadů a velká energetická návratnost ve srovnání s množstvím vstupní energie. Projekt ITER a další mezinárodní snahy ukazují na rostoucí globální shodu o potenciálu této technologie.

Hlavní výzvou pro komerční využití fúzní energie je vývoj efektivních a ekonomicky proveditelných metod pro ukládání energie generované fúzními reaktory. Tyto reaktory produkují energii pulzně, což vyžaduje sofistikované systémy pro akumulaci a regulaci dodávek energie, aby bylo možné vyrovnat kolísání a zajistit stálý tok energie do sítě. Pulzní charakter fúzních reaktorů představuje značné technické komplikace, které vyžadují novátorský přístup k akumulaci energie.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na analytické posouzení a porovnání různých technologií ukládání energie vhodných pro integraci s fúzními elektrárnami. Specificky se práce soustředí na termální akumulátory, elektrochemické baterie a mechanické systémy akumulace. Hlavním cílem je identifikovat nejperspektivnější technologie schopné efektivně zvládnout výzvy spojené s pulzním provozem fúzních reaktorů.

Po úvodních kapitolách, které nastiňují teoretické pozadí a aktuální stav technologie fúze, následuje hlubší analýza systémů ukládání energie. Práce hodnotí jejich technickou a ekonomickou proveditelnost, přičemž klade důraz na nové přístupy a materiály, které by mohly v budoucnu hrát rozhodující roli.

2 Energetické využití jaderné fúze

2.1 Popis fúzních reaktorů se zaměřením na Tokamak

2.1.1 Jaderná fúze

Jaderná fúze je fundamentální fyzikální proces ve vesmíru, který formuje vesmír, jak ho známe, a je základním zdrojem energie pro všechny hvězdy, včetně našeho Slunce. Po Velkém třesku fúze vodíku a helia vedla k vytvoření těžších prvků, s uvolněním obrovského množství energie. Na Zemi je fúze vnímána jako čistý zdroj energie s minimálními emisemi a odpady, což nabízí alternativu k tradičním energetickým zdrojům, s vysokým výkonem a bez závislosti na počasí.

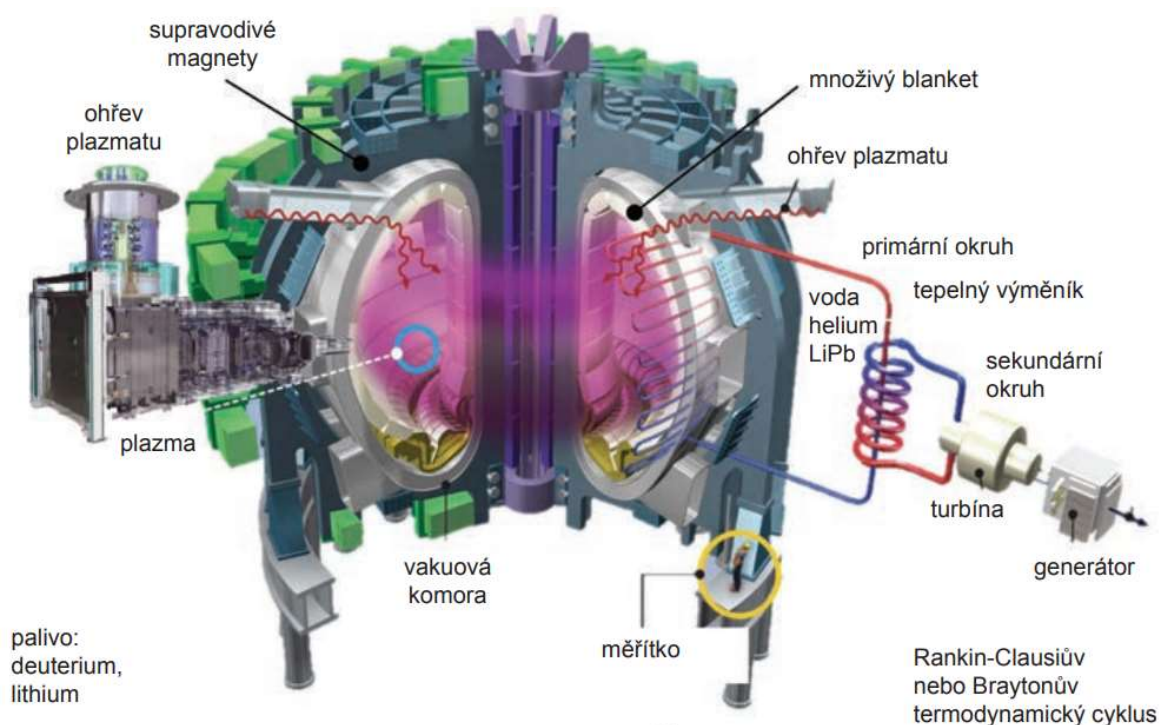
V pozemských aplikacích je nejefektivnější fúze jader deuteria a tritia, přičemž deuterium se nachází ve vodě a tritium se uměle vyrábí v reaktorech. Fúzní elektrárny, srovnatelné s výkonem jaderné elektrárny Temelín, spotřebují méně než 2 kg paliva denně, což je méně než u jiných palivově závislých zdrojů energie. [1]

2.1.2 Tokamak a představitelé

Tokamak je zkratka pro "toroidální komoru s magnetickými cívkami" (Obrázek 1) a jeho účelem je vytvoření magnetického pole pro průběh reakce termojaderné syntézy. Tato reakce probíhá za extrémních teplot, v řádu desítek až stovek milionů stupňů Celsia, při kterých se materiál uvnitř tokamaku nachází ve stavu plazmatu.

Pro zachování plazmatu v tokamaku je nutné vytvořit toroidální magnetické pole pomocí cívek umístěných kolem komory. Před zahájením provozu se z komory odsaje vzduch a naplní se směsí deuteria a tritia, izotopů vodíku. Po naplnění komory se vytvoří elektromagnetické pole, které udržuje plazma stabilní a postupně ji ohřívá k dosažení potřebných teplot pro syntézu. V současnosti je však plazma v tokamacích stabilní jen několik sekund, což ztěžuje jejich využití jako průmyslových zdrojů energie.

V roce 2024 evropský tokamak JET uvolnil 69 MJ fúzní energie, což je rekord mezi všemi fúzními zařízeními na světě. Úspěch tokamaků inspiroval k rozšíření jejich výzkumu a vývoje po celém světě. Mezi tokamaky, které jsou aktuálně ve výstavbě, patří mezinárodní fúzní reaktor ITER s výkonem 500 MW a tokamak COMPASS-U s vysokým magnetickým polem, umístěný v Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd ČR. [1]



Obrázek 1: Fúzní reaktor typu TOKAMAK. Převzato z [2]

2.1.3 Elektrárna DEMO

V uplynulých letech byla v řadě zemí zahájena intenzivní koncepční příprava prvních prototypových fúzních elektráren obecně označovaných jako DEMO. Projekt DEMO, jehož cílem je dořešit fyzikální a technologické otázky energetického fúzního reaktoru a demonstrovat výrobu několika set MW elektrického výkonu. Projekt navazuje na probíhající projekt ITER a dále jej rozvíjí směrem k průmyslové aplikaci výsledků fúzního výzkumu a vývoje. Mezi stěžejní části projektu patří nalezení stabilních provozních scénářů, snížení zátěže komponent vystavených plazmatu, odvod uvolněného výkonu, vývoj radiačně a tepelně odolných materiálů. [2]

2.1.4 Pulzní provoz

Elektrický proud v plazmatu vzniká pouze při neustálém zvyšování proudu v primárním vinutí transformátoru. Nicméně tento proud nakonec dosáhne maxima, což vyžaduje zahájení nového cyklu.

S každým pulsem se v tokamaku vytvoří nové plazma, které se ohřeje na vysoké teploty. Jakmile plazma dosáhne požadované teploty, začne uvolňovat energii prostřednictvím fúzních reakcí a udržuje proud, dokud se nevyčerpá měnící se magnetický tok od cívek. Poté proud klesne, plazma se ochladí a rozpadne. [3]

2.2 Možnosti ukládání energie

Jedním z hlavních důvodů pro zabývání se problematikou skladování energie ve spojení s elektrárnou DEMO je potřeba zajistit spolehlivý a efektivní provoz této nové generace jaderných elektráren. Vzhledem k pulzující povaze energie vyprodukované fúzními reakcemi je důležité mít k dispozici účinné systémy skladování, které umožní vyrovnávat výkyvy v produkci energie a zároveň zajistit její dostatečnou dostupnost pro spotřebitele.

V současné době existuje několik metod skladování energie, z nichž každá je optimalizována pro určité podmínky a aplikace. Tyto systémy se liší v tom, jak ukládají energii a jakou formu energie využívají. V rámci fúzních elektráren jsou Helium Cooled Pebble Bed (HCPB) a Water Cooled Lithium Lead (WCLL) hlavními technologiemi chlazení a skladování energie v roztavených solích [4]. Vedle těchto metod je důležité zkoumat i další přístupy ke skladování energie, jako jsou klasické akumulátory, které ukládají energii v elektrochemické formě. Dalšími systémy jsou ty, které energii ukládají v mechanické formě, jako jsou přečerpávací elektrárny nebo gravitační baterie.

2.2.1 Soli

Roztavené soli mohou sloužit jako efektivní médium pro ukládání tepelné energie díky jejich vysoké tepelné kapacitě a schopnosti dosáhnout vysokých teplot bez změny skupenství. Teplo je akumulováno zahříváním soli během období vysoké dostupnosti energie, například během pulsu v DEMO reaktoru. V těchto systémech se používají dvě nádrže: jedna pro horkou sůl a druhá pro studenou. Teplo je přeneseno do horké soli a uchováno, dokud není potřeba, poté je odvedeno zpět do systému, obvykle pro výrobu páry, která pohání turbíny.

Tato práce se zaměřuje na využití tří typů solí pro ukládání energie: HITEC, Solar Salt a HITEC XL. Každá z těchto solí byla vybrána na základě jejích unikátních vlastností, které se hodí pro specifické požadavky systému tepelného ukládání energie.

- HITEC: Tato sůl je vybrána pro svou vysokou tepelnou kapacitu a nízkou teplotu tání, což ji činí ideální pro uchování velkého množství tepelné energie a její následné uvolňování, když je to potřeba.
- Solar Salt: Tato sůl, kombinace nitrátu sodného a nitrátu draselného, je známá svou schopností dosáhnout a udržet vysoké teploty.
- HITEC XL: Tato modifikovaná verze HITEC soli se odlišuje od původní směsi svými vlastnostmi a cenou. I když je oběma solím společná vysoká tepelná kapacita, HITEC XL přináší jiné parametry, které mohou být v určitých aplikacích přínosné.

2.2.2 Pevné látky

Princip fungování pevnolátkových zásobníků tepla spočívá ve schopnosti materiálu (v tomto případě betonu nebo oceli) akumulovat a ukládat tepelnou energii. Během provozu tepelná baterie přijímá přebytečné teplo, které vzniká v důsledku jaderných reakcí ve fúzní elektrárně a ukládá ho ve své struktuře.

Když je potřeba další energie, tepelná baterie může uvolňovat tuto nahromaděnou tepelnou energii, což zajišťuje stabilní a neustálé dodávky energie. Tento proces umožňuje efektivní správu změn zátěže na elektrárně a poskytuje stabilitu v energetickém systému.

- **Beton:** Jako materiál pro ukládání energie má významné přednosti. Beton je také cenově dostupný a má dobrou odolnost vůči vysokým teplotám, což umožňuje jeho dlouhodobé využití bez ztráty efektivity.
- **Ocel:** Tento materiál je zvolen pro svou vysokou tepelnou vodivost a měrnou tepelnou kapacitu, což umožňuje rychlé akumulování a uvolňování tepla. Ocel má navíc vysokou odolnost proti mechanickému opotřebení a korozivním vlivům.

2.2.3 Baterie

Základní princip fungování elektrické baterie spočívá v chemických reakcích mezi elektrodami a elektrolytem, které generují elektrický proud. Baterie se skládá z jedné či více galvanických článků, což jsou chemické zdroje elektrického napětí. Každý článek obsahuje anodu, katodu a elektrolyt (prostředek pro přenos iontů). Při vybíjení baterie probíhají chemické reakce, které uvolňují elektrony a vytvářejí elektrický proud, zatímco při nabíjení se tyto reakce obrací. Elektrický proud pak může být využit k napájení různých zařízení nebo může být uchován pro pozdější použití.

„Kromě charakteru galvanického článku (primární nebo sekundární) a elektrického napětí se u galvanických článků sledují z hlediska jejich praktického využití i mnohé další parametry a vlastnosti, například

- *měrná energie – podíl kapacity uložené energie a hmotnosti článku,*
- *hustota energie – podíl kapacity uložené energie a objemu článku,*
- *míra samovybíjení – u primárních článků určuje dobu skladovatelnosti,*
- *nabíjecí proud a nabíjecí doba – pro akumulátory,*
- *účinnost – podíl vydané a dodané energie u akumulátorů,*
- *počet cyklů nabití/vybití akumulátoru do konce životnosti,*

Pro běžné porovnání kapacity různých baterií je důležitý zejména ukazatel hustoty energie vzhledem k tomu, že jejich rozměry – a tedy objem – jsou standardizované.[5]“

Jako představitelé bateriových úložišť byly v této práci zvoleny čtyři typy baterií: Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion, olověné.

Ni-Cd

Jedním z představitelů alkalických akumulátorů je akumulátor nikel-kadmiový, označovaný NiCd. Elektrolyt těchto akumulátorů je tvořen roztokem hydroxidu draselného, přičemž kladná elektroda obsahuje nikel a záporná elektroda je složena z kadmia. Díky své robustnosti, spolehlivosti a širokému rozsahu pracovních teplot jsou tyto akumulátory využívány v různých aplikacích.

Zásadní nevýhodou těchto akumulátorů je paměťový efekt, který vzniká při opakovaném neúplném vybíjení a způsobuje snížení jejich kapacity. Další významnou nevýhodou je použití kadmia, které je toxické a vyžaduje řádnou recyklaci. [6]

Ni-MH

Nikel-metalhydridové (Ni-MH) akumulátory se liší od nikel-kadmiových (Ni-Cd) tím, že mají anodu ze slitiny, která absorbuje vodík. Neobsahují rtuť ani kadmium a považují se za ekologicky čisté. Ni-MH akumulátory mají podobné napětí a rozměry jako Ni-Cd, mají o 30-50 % vyšší kapacitu, ale také jsou náchylné k paměťovému efektu. Používají se v digitálních fotoaparátech, hračkách na dálkové ovládání a MP3 přehrávačích.

Ni-MH akumulátory mohou být prismatické nebo cylindrické. Uvnitř cylindru jsou elektrody oddělené separátorem a stočené do rolu. V prismatických akumulátorech jsou elektrody oddělené separátorem a umístěné střídavě za sebou. V krytu je ventil, který se otevře při nebezpečném nárůstu tlaku. Ni-MH akumulátory jsou navrženy pro provoz v teplotách od -40 °C do 60 °C.

Li-ion

V posledních letech dochází k výraznému posunu od tradičních nikel-kadmiových (Ni-Cd) a nikel-metal hydridových (Ni-MH) akumulátorů směrem k lithiovým variantám. Tyto lithiové akumulátory nabízejí výrazně vyšší energetickou hustotu a nižší samovybíjení, což je činí atraktivními alternativami. Jejich nabíjení je flexibilní a lze jej provádět bez negativního dopadu na výkonnost.

Lithiové akumulátory využívají škálu různých materiálů pro elektrody a elektrolyt. Jejich princip fungování je založen na interkalaci iontů lithia do struktury záporné elektrody, což umožňuje dlouhou životnost bez výrazných změn ve výkonu. Navíc mají vyšší jmenovité napětí a energetickou hustotu než jiné typy akumulátorů. [7][8]

Mezi nevýhody lithiových akumulátorů patří jejich citlivost na prostředí, zejména na vlhkost, a riziko požáru při mechanickém poškození. Postupná ztráta kapacity a pokles výkonu s klesající teplotou jsou dalšími omezeními.

Olověné akumulátory

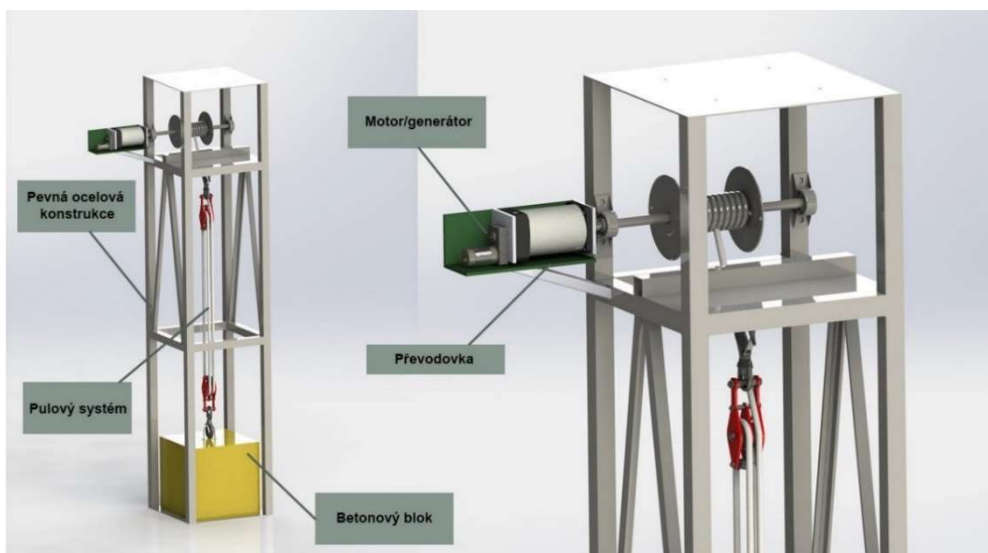
Olověné akumulátory mají dlouhou historii a jsou široce využívány pro svou spolehlivost a nízkou cenu. Konstrukce těchto baterií zahrnuje páry olověných desek, nazývaných elektrody, ponořených do elektrolytu složeného z kyseliny sírové a vody. Při nabíjení se na kladné elektrodě tvoří oxid olovičitý, zatímco na záporné elektrodě dochází ke konverzi síranu olovnatého zpět na olovo. [9]

Mezi výhody patří jejich nízká cena, možnost opakovaného nabíjení a vysoká spolehlivost s účinností kolem 80 %. Na druhou stranu jsou citlivé na hluboké vybití, což může snížit jejich kapacitu, a mají relativně nízkou hustotu uložené energie ve srovnání s jinými typy akumulátorů. Je však důležité poznamenat, že jejich dlouhá dobíjecí doba, obvykle kolem 12 hodin, není ideální pro DEMO aplikace, kde je rychlost nabíjení klíčovým faktorem. [10]

2.2.4 Gravitační baterie

Princip fungování gravitační baterie, viz Obrázek 2, spočívá v využití potenciální energie uložené v hmotě, která se uvolňuje při jejím sestupu. Při potřebě elektrické energie spouštíme hmotu dolů, čímž poháníme generátor a vytváříme elektrický proud. Tento proces je opakovatelný až několikrát denně. Poté, kdy je potřeba doplnit zásoby energie, závaží je vytaženo nahoru pomocí vyrobené elektřiny. Tímto způsobem se potenciální energie hmoty přeměňuje na elektrickou energii, která je následně využita.

Gravitační baterie dosahují účinnosti mezi 80 až 90 % a s dobou rozběhu na maximální výkon do 1 sekundy. Jsou to jednoduchá, avšak efektivní řešení s extrémně dlouhou životností ve srovnání s bateriemi na bázi lithia a jinými technologiemi. Jejich provoz však vyžaduje poměrně velký prostor kvůli potřebě manipulace s velkou hmotností. Nicméně, při vhodném umístění a plánování mohou být účinným a spolehlivým způsobem skladování energie. [11]



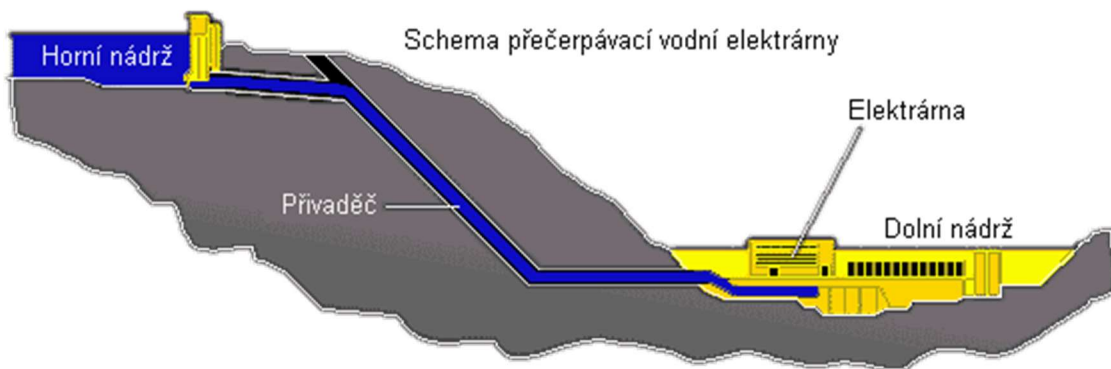
Obrázek 2: Schéma Gravitační baterii. Převzato z [12]

2.2.5 Přečerpávací vodní elektrárna

PVE využívá principu dvou vodních nádrží, umístěných ve dvou různých výškách, které vytvářejí spád nezbytný pro provoz. Tyto nádrže jsou propojeny potrubím vybaveným hnacím mechanismem s reverzní turbínou, která může pracovat jako čerpadlo i turbína.

Když je v síti nadbytek elektrické energie, turbína funguje jako čerpadlo, přečerpává vodu z dolní nádrže do horní. V horní nádrži se voda ukládá a čeká na zvýšenou poptávku po elektřině. Když je zapotřebí generovat elektrický proud, voda je propuštěna z horní nádrže zpět do potrubí, kde při sestupu získává energii a roztáčí turbínu s alternátorem generující elektrický proud.

Schéma přečerpávací vodní elektrárny je znázorněno na obrázku 3.



Obrázek 3: Schéma uspořádání PVE v terénu. Převzato z [13]

2.3 Technologie chlazení HCPB a WCLL

2.3.1 HCPB

Helium Cooled Pebble Bed je chladicí systém (Obrázek 4), který využívá helia jako chladicího média a keramických kuliček (pebble bed) jako tepelného akumulátoru. Tento systém je navržen tak, aby optimalizoval tepelné vlastnosti a minimalizoval radiační poškození materiálů. [4]

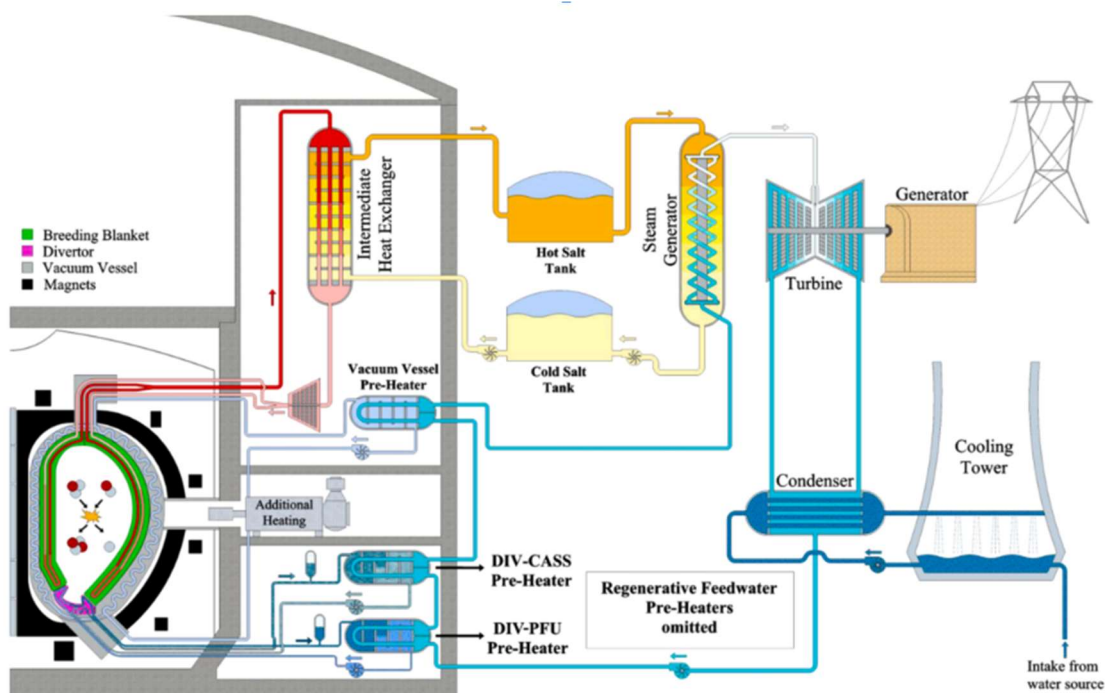
V rámci konsorcia EUROfusion se vyvíjí heliem chlazený pebble bed (HCPB) množivý blanket (BB). Je také ve vývoji systém připojení blanketu, který umožňuje integrovat BB do tokamaku EU DEMO. Systém připojení blanketu je tak zodpovědný za mechanické spojení BB s vakuovou nádobou (VV) DEMO. Přenáší mechanické zatížení mezi BB a VV. Vysoká mechanická a tepelná zatížení na segmentech blanketu během normálních a mimořádných podmínek zejména kladou silné požadavky na systém připojení blanketu. [14]

Princip fungování: Helium je cirkulováno skrze pebble bed, kde dochází k absorpci tepla z reaktoru. Následně je teplo převedeno do sekundárního chladicího systému, kde je využito pro výrobu páry a následně elektrické energie.

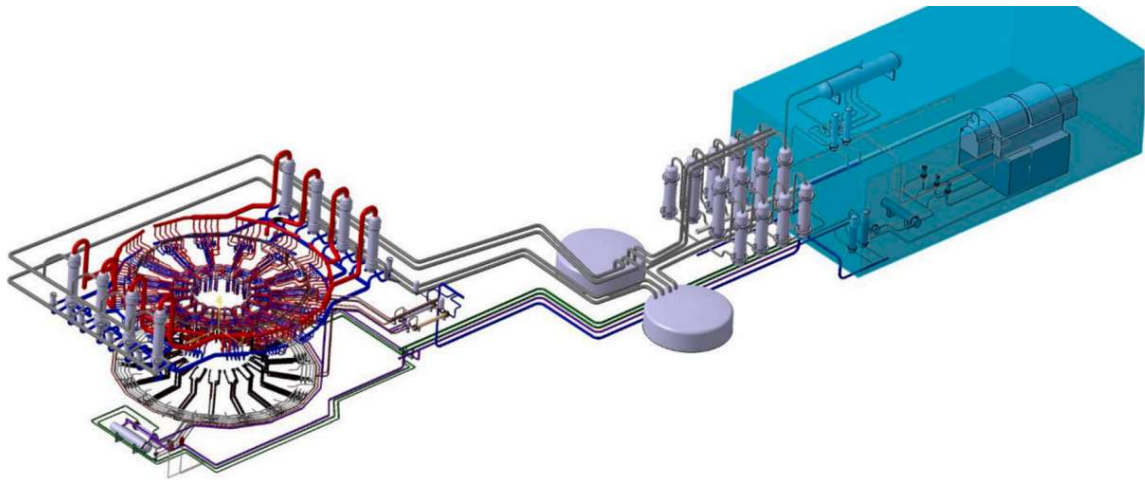
IHTS (Vložený okruh přenosu tepla)

- Sbírá energii z BB PHTS (Primárního systému přenosu tepla z množivého obalu) během pulzního režimu. [15]

- Kontroluje teplotu na vstupu do BB prostřednictvím teploty vstupní strany sekundárního výměníku tepla a přenáší teplo na generátor páry/přehřívák páry dle požadavků PCS. [16][17]



Obrázek 4 System HPCB [18]



Obrázek 5 3D CAD model HCPB [18]

2.3.2 WCLL

Water Cooled Lithium Lead je chladicí systém využívající kombinaci vody a lithno-olověného roztoku jako chladicího média (Obrázek 6). [4]

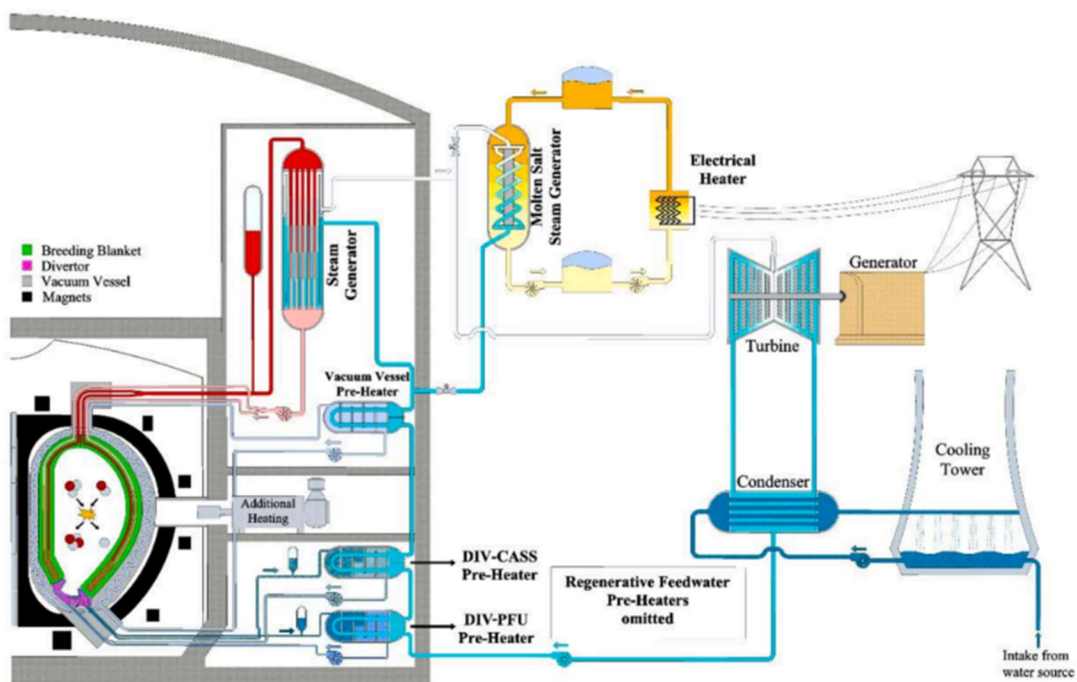
Princip fungování: referenční varianta DEMO WCLL je design s přímým spojením (WCLL DCD BoP) s malým ESS. V této konfiguraci se energie přenášená z BB PHTS (BZ a FW) na PCS přes parogenerátory používá k výrobě páry za podmínek vhodných k napájení turbíny. Energie z divertoru a VV PHTS se používá k přehřívání napájecí vody do PCS. Integrace výměníků tepla divertoru a VV do řetězce přehřívání vody umožňuje zlepšit celkovou účinnost elektrárny. WCLL DCD BoP se ukazuje jako nejvíce slibná varianta, protože je navržena tak, aby maximalizovala výrobu elektrické energie během pulzu a udržovala synchronizovaný generátor s rozvodnou sítí během období zastavení. K tomu dochází implementací malého ESS na bázi roztavené soli (asi 200 GJ tepelné energie uložené v horkém zásobníku o objemu asi 1500 m³), který je nezbytný k produkci dostatečného průtoku páry k pohonu turbíny na páru a udržení hlavních komponent PCS v teple. Kompenzace výkonu během období odstávky probíhá po parogenerátorech. Tato konfigurace byla vybrána s cílem omezit složitost (a tím i bezpečnostní a integrační výzvy) BB PHTS. Návrh uspořádání WCLL DCD BoP je uveden na obrázku 3. 3D CAD model celé varianty BoP je uveden na obrázku 7.

Komponenty:

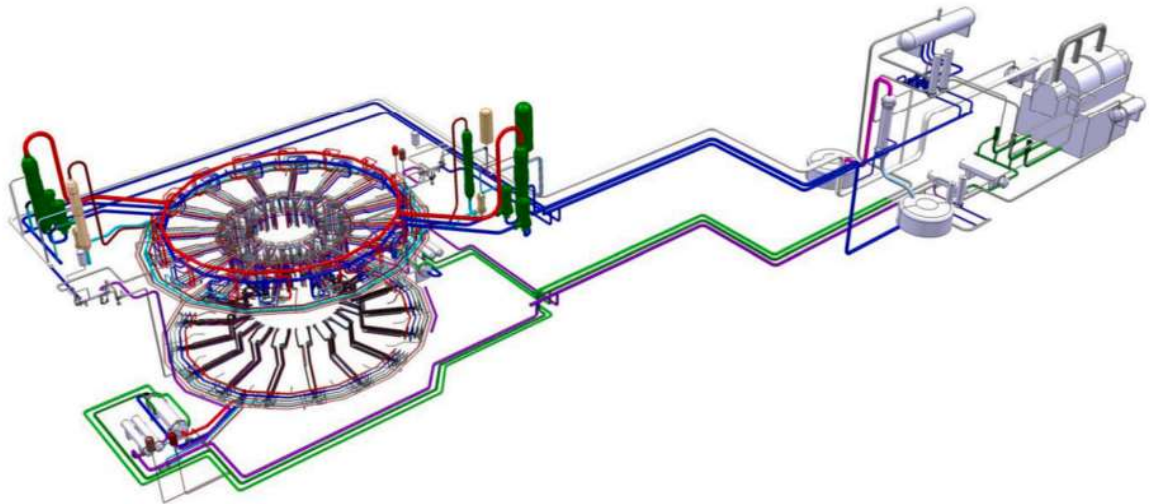
- **Malý ESS okruh:** Zahrnuje čerpadla a nádrže na roztavenou sůl, elektrické ohřivače a parogenerátor. Nádrže mají objem přibližně 1500 m³ a mohou skladovat přibližně 200 GJ tepelné energie. [19]
- **PCS:** Zahrnuje parní turbínu, kondenzátor, ohřivače napájecí vody a další standardní komponenty Rankinova cyklu. Termodynamický cyklus je optimalizován pro přehřátou páru za konkrétních podmínek. [16]
- **Elektrický generátor:** Není součástí designu WPBoP, ale je zahrnut v PCS.

Provozní úvahy:

- **Stabilní přechod:** Systém může hladce přecházet mezi pulzními a dočasnými fázemi bez významných narušení provozních parametrů.
- **Tepelné napětí:** I když BB sbírá více než 80 % celkové tepelné energie tokamaku a jeho teplo je dostupné na nejvyšší úrovni teploty, v souladu s limity odolnosti materiálu, obnova "nízkoteplotních zdrojů" může zlepšit celkový výkon elektrárny významnou měrou. [20]



Obrázek 6 System WCLL [18]



Obrázek 7 3D CAD model WCLL [18]

Helium-Cooled Pebble Bed (HCPB) Breeding Blanket PHTS:

Funkce: HCPB BB PHTS je navržen tak, aby odebíral tepelnou energii z komponentů breeding blanket a přenášel ji do vloženého systému přenosu tepla (IHTS) prostřednictvím mezilehlých výměníků tepla (IHX).

Konfigurace: HCPB BB PHTS je rozdělen do osmi samostatných chladicích okruhů, z nichž každý slouží dvěma sektorům tokamaku.

Komponenty: Každý okruh zahrnuje segmenty blanket, IHX, cirkulátory a spojovací potrubí.

Water-Cooled Lithium Lead (WCLL) Breeding Blanket PHTS:

Funkce: Podobně jako HCPB je hlavní funkcí WCLL BB PHTS odstranění tepelné energie z komponent blanketu. Jedinečností je existence dvou oddělených chladicích okruhů: jeden pro Breeding Zone (BZ) a druhý pro First Wall (FW), každý dodává energii do PCS prostřednictvím průtočných parogenerátorů (OTSGs).

Konfigurace: Pro každý obvod existují dva chladicí okruhy, které obsluhují různé sektory tokamaku.

3 Technicko-ekonomická analýza úložišť energie vhodných pro fúzní elektrárny

3.1 Cíl výpočtů

Analýza následujících metod ukládání energie:

1. Roztavené soli: zkoumání využití solí jako HITEC, Solar Salt a HITEC XL v kontextu tepelného ukládání energie.
2. Tepelné baterie: posouzení potenciálu betonu a oceli jako materiálů pro akumulaci tepelné energie.
3. Elektrické baterie: provádím analýzu různých typů baterií, včetně Li-ion, Ni-Cd, Ni-MH a olověných akumulátorů, z hlediska jejich technických charakteristik, nákladů a objemu.
4. Gravitační ukládání: zkoumány možnosti využití gravitačních baterií a vodních nádrží pro ukládání energie.

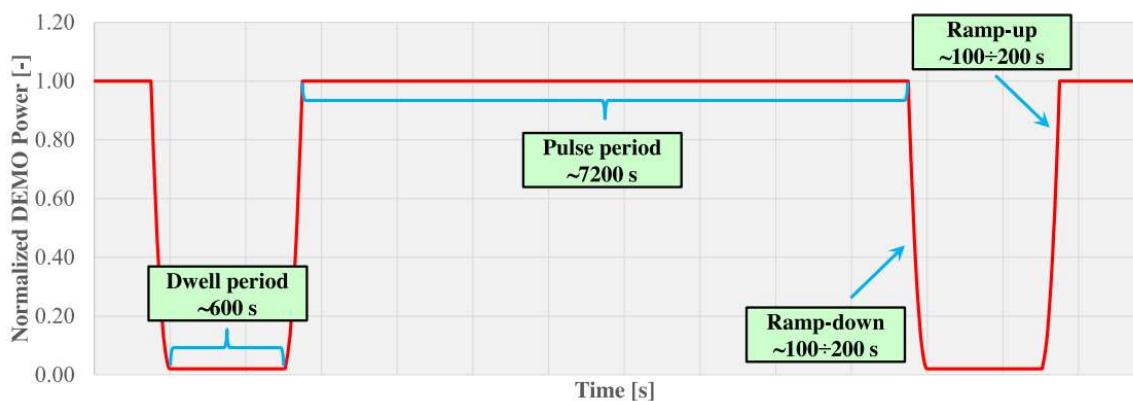
Cílem těchto výpočtů a analýz není určit, který ze systémů je nejlepší, ale poskytnout srovnání, které ukáže jejich přednosti a omezení v kontextu specifických potřeb elektrárny DEMO. Toto srovnání nám umožní lépe pochopit, jaké metody ukládání energie by mohly být nejvhodnější pro zajištění stabilní a efektivní dodávky energie z pulzní fúzní elektrárny.

3.2 Vstupní hodnoty pro výpočty k HCPB, WCLL

Základní charakteristiky:

Pracovní cyklus

Konkrétně pracovní cyklus DEMO zahrnuje střídání 2 hlavních fází, kdy výkon reaktoru kolísá od jeho nominální hodnoty, nazývané pulzní doba, na minimální hodnotu, nazývanou dwell doba (prodleva), přičemž výkon je kolem 1÷2% nominální hodnoty z tepla uloženého v strukturách tokamaku. Pulzní a doba prodlevy jsou předpokládány být 2 hodiny a přibližně 10 minut, přičemž přechod z jedné fáze do druhé je proveden pomocí 2 přechodných fází, trvající přibližně 100÷200 s každá. Příklad pracovního cyklu výkonu DEMO je znázorněn na obrázku 8.



Obrázek 8 DEMO pracovní cyklus

- Délka pulsu: 7 200 s
- Délka dwell: 600 s
- Průměrná doba přechodu: 200 s

Parametry roztavených solí (Molten salt IHTS) [21]

- Médium: HITEC
- Specifická tepelná kapacita: 1 518 J/kg/K
- Hustota 1 850 kg/m³
- Počet nádrží: 1 horká / 1 studená
- Objem jedné nádrže: 1 500 m³
- Cena 930 €/t
- Teplota vstupu do studené nádrže: 270 °C
- Teplota vstupu z horke nádrže: 465 °C

3.2.1 HCPB

V níže uvedené tabulce 1 jsou shrnuty technické parametry různých energetických zdrojů, včetně jejich výkonu vyjádřeného v megawatttech (MW), typu použitého chladicího média, vstupní a výstupní teploty v stupních Celsia a tlaku v megapascalch (MPa). Jako příklad, zdroj BB má výkon 2 029 MW, chladicí médium helium, vstupní teplotu 300 °C, výstupní teplotu 520 °C a tlak 8 MPa. V tabulce 2 jsou prezentovány údaje o výkonu čerpadel.

Zdroj	Výkon (MW)	Chladicí médium	Teplota vstupu (°C)	Teplota výstupu (°C)	Tlak (MPa)
BB	2 029	He	300	520	8
Div	136	H2O	130	136	5
Div_cas	115,2	H2O	180	210	3,5
VV	86	H2O	190	200	3,1

Tabulka 1 - Zdroje tepla HCPB [22]

Zdroj	Výkon čerpadla (MW)
BB	83
Div	14
VV	2

Tabulka 2 - Výkon čerpadla HCPB [23]

3.2.2 WCLL

Zdroj	Výkon (MW)	Chladicí médium	Teplota vstupu (°C)	Teplota výstupu (°C)	Tlak (MPa)
BB	1 923	H2O	295	328	15,5
Div	136	H2O	130	136	5
Div_cas	115,2	H2O	180	210	3,5
VV	86	H2O	190	200	3,1

Tabulka 3 - Zdroje tepla WCLL [22]

Zdroj	Výkon čerpadla (MW)
BB	16
Div	14
VV	2

Tabulka 4 - Výkon čerpadla WCLL [23]

3.3 HCPB – výpočty a komentáře

3.3.1 Výpočty pro HCPB (Helium Cooled Pebble Bed):

Tato sada bilančních výpočtů se zabývá různými aspekty energetického systému, zahrnujícími celkový a průměrný výkon, potřebu energie v různých fázích, průtok helia v primárním okruhu pro HCPB (Helium-Cooled Pebble Bed) a další parametry spojené s průtokem tepla a soli.

Celkový výkon

Celkový výkon během pulsu (P_{pulse}) je součtem základního výkonu (P_{BB}) a výkonu komprese (P_{kompr})

během pulsu:

$$P_{pulse} = P_{BB} + P_{kompr} = 2\,029 + 83 = 2\,112 \text{ [MW]}$$

Během fáze dwell je výkon (P_{dwell}) 1% celkového pulzního výkonu.

během dwell:

$$P_{dwell} = P_{pulse} \cdot 1\% = 2\,112 \cdot 0,01 = 21,1 \text{ [MW]}$$

Průměrný výkon

Průměrný výkon (P_{mean}) je určen jako vážený průměr výkonů během pulsu, dwell a ramp.

$$P_{mean} = \frac{(P_{pulse} \cdot T_{pulse}) + (P_{pulse} \cdot 0,01 \cdot T_{dwell}) + 2 \cdot T_{ramp} \cdot 0,5 \cdot (P_{pulse} + P_{dwell})}{T_{pulse} + T_{dwell} + 2 \cdot T_{ramp}}$$

$$P_{mean} = \frac{(2\,112 \cdot 7\,200) + (2\,112 \cdot 0,01 \cdot 600) + 2 \cdot 200 \cdot 0,5 \cdot (2\,112 + 21,1)}{7\,200 + 600 + 2 \cdot 200}$$

$$P_{mean} = 1\,906,4 \text{ [MW]}$$

Potřeba energie během dwell

Potřeba energie během fáze dwell (Q_{dwell}) je definována jako rozdíl průměrného výkonu (P_{mean}) a výkonu během fáze dwell (P_{dwell}), násobený dobou trvání fáze dwell, a to vše vydělené 3600 pro převod z wattů na megawatthodiny.

$$Q_{dwell} = (P_{mean} - P_{dwell}) \cdot \frac{T_{dwell}}{3\,600} = (1\,906,4 - 21,1) \cdot \frac{600}{3\,600} = 314,2 \text{ [MWh]}$$

Potřeba energie během přechodové fáze

Potřeba energie během přechodové fáze (Q_{ramp}) se počítá jako rozdíl mezi průměrným výkonem (P_{mean}) a výkonem během fáze dwell (P_{dwell}), násobený časem trvání přechodové fáze (T_{ramp}). Tento výraz je dále upraven v závislosti na tom, jak se výkon mění během přechodové fáze.

$$Q_{ramp} = (P_{mean} - P_{dwell}) \cdot \frac{2 \cdot T_{ramp} \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{P_{pulse} - P_{mean}}{P_{pulse} - P_{dwell}}\right)}{3\,600}$$

$$Q_{ramp} = (1906,4 - 21,1) \cdot \frac{2 \cdot 200 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{2\,112 - 1\,906,4}{2\,112 - 21,1}\right)}{3\,600} = 94,4 \text{ [MWh]}$$

Výpočet energie nutné k uložení

Celková energie potřebná k uložení (Q_{celk}) je součtem energie potřebné během fáze dwell a energie potřebné během přechodové fáze ramp.

$$Q_{celk} = Q_{dwell} + Q_{ramp}$$

$$Q_{celk} = 314,2 + 94,4 = 408,6 \text{ [MWh]}$$

Průtok helia v primárním okruhu pro HCPB

Teploty pro průtok helia, $t_1 = 520 \text{ °C}$ na vstupu do výměníku tepla a $t_2 = 291 \text{ °C}$ na výstupu, známe také tlak $p = 7,8 \text{ MPa}$. Při těchto parametrech je tepelná kapacita helia $c_p = 5\,188 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$

Průtok helia ve fázi pulse

Průtok helia během fáze pulsu (\dot{m}_{pulse}) je vypočten jako podíl celkového výkonu během pulsu a tepelné kapacity helia, vynásobený rozdílem teplot na vstupu a výstupu.

$$\dot{m}_{pulse} = \frac{P_{pulse} \cdot 10^6}{c_p \cdot (t_1 - t_2)}$$

$$\dot{m}_{pulse} = \frac{2\,112 \cdot 10^6}{5\,188 \cdot (520 - 291)} = 1\,777,7 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$$

Průtok helia ve fázi dwell

Průtok helia ve fázi dwell (\dot{m}_{dwell}) je určen jako 1% průtoku helia během pulsu. Jedná se pouze o přibližný výpočet, založený na stejném poměru výkonu k průtoku.

$$\dot{m}_{dwell} = \dot{m}_{pulse} \cdot 1\%$$

$$\dot{m}_{dwell} = 1\,777,7 \cdot 0,01 = 17,8 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$$

Průtok tepla během dwell a přechodové fáze ze zásobníku soli

Průtok tepla během fáze dwell a přechodové fáze ze zásobníku soli (\dot{Q}_{sul}) je spočítán podle celkové energie potřebné k uložení (Q_{celk}) po dobu trvání fáze dwell a dvojnásobku doby trvání fáze ramp.

$$\dot{Q}_{sul} = \frac{Q_{celk} \cdot 3\,600 \cdot 10^6}{T_{dwell} + 2 \cdot 0,5 \cdot T_{ramp}}$$
$$\dot{Q}_{sul} = \frac{408,6 \cdot 3\,600 \cdot 10^6}{600 + 2 \cdot 0,5 \cdot 200} = 1\,838,7 \text{ [MW]}$$

Průtok vody a pary během dwell a přechodové fáze z parogenerátoru

Teploty pro průtok vody, $t_1 = 255 \text{ °C}$ a $p = 5,8 \text{ MPa}$ na vstupu do parogenerátoru a $t_2 = 446 \text{ °C}$ a $p = 12,1 \text{ MPa}$ na výstupu.[24] Při těchto parametrech je entalpie vody a páry $h_{vody} = 1\,110 \text{ [}\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\text{]}$, $h_{pary} = 3\,196,3 \text{ [}\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\text{]}$

Průtok vody (\dot{m}_{vody}) je spočítán jako podíl průtoku tepla během fáze dwell a přechodové fáze ze zásobníku soli a rozdílu specifické entalpie páry a vody.

$$\dot{m}_{vody} = \frac{\dot{Q}_{sul}}{h_{pary} - h_{vody}}$$
$$\dot{m}_{vody} = \frac{1\,838,7 \cdot 10^3}{3\,196,3 - 1\,110} = 881,3 \text{ [}\frac{\text{kg}}{\text{s}}\text{]}$$

Průtok soli během dwell a přechodové fáze

Průtok soli během fáze dwell a přechodové fáze (\dot{m}_{sul}) je spočítán pomocí vypočteného průtoku tepla a rozdílu teplot mezi horkou a studenou solí, a to vzhledem k tepelné kapacitě soli.

$$\dot{m}_{sul} = \frac{\dot{Q}_{sul}}{c_p \cdot (t_{hork} - t_{stud})}$$
$$\dot{m}_{sul} = \frac{1\,838,7 \cdot 10^6}{1\,518 \cdot (465 - 270)} = 6\,211,6 \text{ [}\frac{\text{kg}}{\text{s}}\text{]}$$

Objemový průtok soli během fáze dwell a přechodové fáze (V) je spočítán jako podíl hmotnostního průtoku soli a hustoty soli.

$$V = \frac{\dot{m}_{sul}}{\rho_{sul}}$$
$$V = \frac{6\,211,6}{1\,850} = 3,35 \text{ [}\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\text{]}$$

Hmotnost soli ve 2 nádrži

Celková hmotnost soli ve dvou nádržích ($m_{sul,celk}$) je spočítána jako dvojnásobek objemu nádrže, vynásobený hustotou soli.

$$m_{sul,celk} = V_{nadrze} \cdot 2 \cdot \rho_{sul}$$

$$m_{sul,celk} = 1\,500 \cdot 2 \cdot 1\,850 = 5\,550\,000 \text{ [kg]}$$

Náklady na sůl

Náklady na sůl ($cena_{sul,celk}$) jsou spočítány jako součin celkové hmotnosti soli ve dvou nádržích a ceny soli za kilogram.

$$cena_{sul,celk} = \frac{m_{sul,celk} \cdot cena_{sul}}{1\,000}$$

$$cena_{sul,celk} = \frac{5\,550\,000 \cdot 930}{1\,000} = 5\,161\,500 \text{ [€]}$$

3.3.2 Porovnání průtoku a cen s jinými vhodnými solemi

V tabulce 5 jsou uvedeny dva druhy solí, Solar salt a HITEC XL, s informacemi o jejich tepelné kapacitě a ceně za tunu v eurech. Detaily tabulky slouží k porovnání fyzikálních vlastností a nákladové efektivity obou typů solí.

Sůl	Tepelná kapacita [J/kg/K]	Cena [€/t]
Solar salt	1 460	490
HITEC XL	1 450	1 190

Tabulka 5 - Charakteristika soli [21]

1) Solar salt ($\text{NaNO}_3 - 60\%$, $\text{KNO}_3 - 40\%$)

$$t_{hork} = 465 \text{ [°C]}$$

$$t_{stud} = 270 \text{ [°C]}$$

Průtok soli (\dot{m}_{sul}) je spočítán pomocí zadaného průtoku tepla a tepelné kapacity soli.

$$\dot{m}_{sul} = \frac{\dot{Q}_{sul}}{c_p \cdot (t_{hork} - t_{stud})}$$

$$\dot{m}_{sul} = \frac{1\,838,7 \times 10^6}{1\,460 \cdot (465 - 270)} = 6\,458,4 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

Celkové náklady na sůl jsou spočítány jako součin celkové hmotnosti soli ve dvou nádržích a ceny soli za kilogram.

$$cena_{sul,celk} = \frac{m_{sul,celk} \cdot cena_{sul}}{1\,000}$$

$$cena_{sul,celk} = \frac{5\,550\,000 \cdot 490}{1\,000} = 2\,719\,500 \text{ [€]}$$

2) HITEC XL (NaNO_3 – 7%, KNO_3 – 45%, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ – 48%)

Průtok soli (\dot{m}_{sul}) a náklady na sůl jsou spočítány stejným způsobem jako v předchozím případě, pouze s použitím tepelné kapacity a ceny HITEC XL.

$$\dot{m}_{sul} = \frac{\dot{Q}_{sul}}{c_p \cdot (t_{hork} - t_{stud})}$$

$$\dot{m}_{sul} = \frac{1\,838,7 \cdot 10^6}{1\,450 \cdot (465 - 270)} = 6\,502,9 \left[\frac{kg}{s}\right]$$

$$cena_{sul,celk} = \frac{m_{sul,celk} \cdot cena_{sul}}{1000}$$

$$cena_{sul,celk} = \frac{5\,550\,000 \cdot 1\,190}{1000} = 6\,545\,000 \text{ [€]}$$

3.3.3 Dílčí závěr

V systému HCPB byl celkový výkon během pulsu spočten na 2 112 MW, zatímco během fáze dwell to bylo 21,1 MW. Průměrný výkon dosáhl 1 906,4 MW. Tyto hodnoty reflektují dynamiku systému a jeho schopnost reagovat na požadavky na výkon v různých fázích.

Byla vypočtena potřeba energie během fáze dwell a přechodové fáze, kde celková potřebná energie pro tyto fáze dosáhla 408,6 MWh. Tento výpočet ukazuje na potřebu akumulace energie pro udržení kontinuálního výkonu systému.

Průtok helia ve fázi pulse byl vypočten na 1 777,7 kg/s pro efektivní odvod tepla z reaktoru. Během fáze dwell byl průtok helia mnohem nižší, na úrovni 17,8 kg/s, což reflektuje sníženou potřebu chlazení v této fázi.

3.4 WCLL – výpočty a komentáře

3.4.1 Výpočty pro WCLL (Water-Cooled Lithium Lead)

Celkový výkon

Celkový výkon během pulsu (P_{pulse}) je součtem základního výkonu (P_{BB}) a výkonu komprese (P_{kompr}):

$$P_{pulse} = P_{BB} + P_{kompr} = 1\,923 + 16 = 1\,939 \text{ [MW]}$$

Během fáze dwell je výkon (P_{dwell}) 1% celkového pulzního výkonu:

$$P_{dwell} = P_{pulse} \cdot 1\% = 1\,939 \cdot 0,01 = 19,4 \text{ [MW]}$$

Průměrný výkon

Průměrný výkon (P_{mean}) je určen jako vážený průměr výkonů během pulsu, dwell a ramp.

$$P_{mean} = \frac{(P_{pulse} \cdot T_{pulse}) + (P_{pulse} \cdot 0,01 \cdot T_{dwell}) + 2 \cdot T_{ramp} \cdot 0,5 \cdot (P_{pulse} + P_{dwell})}{T_{pulse} + T_{dwell} + 2 \cdot T_{ramp}}$$

$$P_{mean} = \frac{(1\,939 \cdot 7\,200) + (1\,939 \cdot 0,01 \cdot 600) + 2 \cdot 200 \cdot 0,5 \cdot (1\,939 + 19,4)}{7\,200 + 600 + 2 \cdot 200}$$

$$P_{mean} = 1\,751,7 \text{ [MW]}$$

Potřeba energie během dwell

Potřeba energie během fáze dwell (Q_{dwell}) je definována jako rozdíl průměrného výkonu (P_{mean}) a výkonu během fáze dwell (P_{dwell}), násobený dobu trvání fáze dwell, a to vše vydělené 3600 pro převod z wattů na megawatthodiny.

$$Q_{dwell} = (P_{mean} - P_{dwell}) \cdot \frac{T_{dwell}}{3\,600} = (1\,751,7 - 19,4) \cdot \frac{600}{3\,600} = 288,7 \text{ [MWh]}$$

Potřeba energie během přechodové fáze

Potřeba energie během přechodové fáze (Q_{ramp}) se počítá jako rozdíl mezi průměrným výkonem (P_{mean}) a výkonem během fáze dwell (P_{dwell}), násobený časem trvání přechodové fáze (T_{ramp}). Tento výraz je dále upraven v závislosti na tom, jak se výkon mění během přechodové fáze.

$$Q_{ramp} = (P_{mean} - P_{dwell}) \cdot \frac{2 \cdot T_{ramp} \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{P_{pulse} - P_{mean}}{P_{pulse} - P_{dwell}}\right)}{3\,600}$$

$$Q_{ramp} = (1\,751,7 - 19,4) \cdot \frac{2 \cdot 200 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{1\,939 - 1\,751,7}{1\,939 - 19,4}\right)}{3\,600} = 86,9 \text{ [MWh]}$$

Výpočet energie nutné k uložení

Celková energie potřebná k uložení (Q_{celk}) je součtem energie potřebné během fáze dwell a energie potřebné během přechodové fáze ramp.

$$Q_{celk} = Q_{dwell} + Q_{ramp}$$

$$Q_{celk} = 288,7 + 86,9 = 375,6 \text{ [MWh]}$$

Průtok vody z parogenerátoru pro WCLL

Při zadanych hodnotach teploty pro průtok vody $t_{nap,vody} = 238 \text{ [°C]}$ a $t_{pary} = 300 \text{ [°C]}$ a tlaku $p = 6,4 \text{ MPa}$ při těchto parametrech najdeme entalpie vody a páry $h_{vody} = 1\,028 \text{ [} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{]}$ a $h_{pary} = 2\,867,5 \text{ [} \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{]}$

Průtok vody během pulsu

Průtok vody během pulsu (\dot{m}_{pulse}) je spočítán jako podíl celkového výkonu pulsu a rozdílu specifické entalpie páry a vody.

$$\dot{m}_{pulse} = \frac{P_{pulse}}{h_{pary} - h_{vody}}$$

$$\dot{m}_{pulse} = \frac{1\,939 \cdot 10^3}{2\,867,5 - 1\,028} = 1\,054,1 \text{ [} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \text{]}$$

Průtok tepla během dwell a přechodové fáze ze zásobníku se solí

Průtok tepla během fáze dwell ze zásobníku soli (\dot{Q}_{sul}) je spočítán podle celkové energie potřebné k uložení (Q_{celk}) po dobu trvání fáze dwell a dvojnásobku doby trvání fáze ramp.

$$\dot{Q}_{sul} = \frac{Q_{celk} \cdot 3\,600 \cdot 10^6}{T_{dwell} + T_{ramp}}$$

$$\dot{Q}_{sul} = \frac{375,6 \cdot 3\,600 \cdot 10^6}{600 + 200} = 1\,690,2 \text{ [MW]}$$

Průtok vody během dwell a přechodové fáze z parogenerátoru rozroztavených solí

Průtok vody během fáze dwell a přechodové fáze z parogenerátoru rozroztavených solí ($\dot{m}_{dwell,ramp}$) je spočítán jako podíl tepelného toku z parogenerátoru a rozdílu specifické entalpie páry a vody.

$$\dot{m}_{dwell,ramp} = \frac{\dot{Q}_{sul}}{h_{pary} - h_{vody}}$$
$$\dot{m}_{dwell,ramp} = \frac{1\,690,2 \cdot 10^6}{(2\,867,5 - 1\,028) \cdot 10^3} = 918,8 \left[\frac{kg}{s}\right]$$

Průtok soli během dwell a přechodové fáze

Průtok soli během fáze dwell a přechodové fáze (\dot{m}_{sul}) je spočítán pomocí vypočteného průtoku tepla a rozdílu teplot mezi horkou a studenou solí, a to vzhledem k tepelné kapacitě solí.

$$\dot{m}_{sul} = \frac{\dot{Q}_{sul}}{c_p \cdot (t_{hork} - t_{stud})}$$
$$\dot{m}_{sul} = \frac{1\,690,2 \cdot 10^6}{1\,518 \cdot (320 - 280)} = 27\,836 \left[\frac{kg}{s}\right]$$

Objemový průtok soli během fáze dwell a přechodové fáze (V) je spočítán jako podíl hmotnostního průtoku soli a hustoty soli.

$$V = \frac{\dot{m}_{sul}}{\rho_{sul}}$$
$$V = \frac{27\,836}{1\,850} = 15 \left[\frac{m^3}{s}\right]$$

Hmotnost soli ve 2 nádrži

Celková hmotnost soli ve dvou nádržích ($m_{sul,celk}$) je spočítána jako dvojnásobek objemu nádrže, vynásobený hustotou soli.

$$m_{sul,celk} = V_{nadrze} \cdot 2 \cdot \rho_{sul}$$
$$m_{sul,celk} = 1\,500 \cdot 2 \cdot 1\,850 = 5\,550\,000 \text{ [kg]}$$

Náklady na sůl

Náklady na sůl ($cena_{sul,celk}$) jsou spočítány jako součin celkové hmotnosti soli ve dvou nádržích a ceny soli za kilogram.

$$cena_{sul,celk} = \frac{m_{sul,celk} \cdot cena_{sul}}{1\,000}$$

$$cena_{sul,celk} = \frac{5\,550\,000 \cdot 930}{1\,000} = 5\,161\,500 \text{ [€]}$$

Příkon elektrické sítě nutný k uložení energie v soli

Příkon elektrické sítě nutný k uložení energie v soli (P_{el}) je spočítán jako podíl celkové energie potřebné k uložení energie v soli a doby trvání pulzu a dvakrát poloviny doby trvání přechodové fáze.

$$P_{el} = \frac{Q_{celk}}{T_{pulse} + 2 \cdot 0,5 \cdot T_{ramp}}$$

$$P_{el} = \frac{375,6}{7\,200 + 2 \cdot 0,5 \cdot 200} = 182,7 \text{ [MW]}$$

Cena elektriny za 1 provozní cykl

Cena elektriny za jeden provozní cykl ($cena_{cykl}$) je spočítána jako součin celkové energie potřebné k uložení (Q_{celk}) a ceny za 1 MWh.

Cena za 1 MWh 117 € [25]

$$cena_{cykl} = Q_{celk} \cdot cena$$

$$cena_{cykl} = 375,6 \cdot 117 = 42\,942,1 \text{ [€]}$$

3.4.2 Porovnání průtoku s jinými vhodnými solemi

1) Solar salt ($\text{NaNO}_3 - 60\%$, $\text{KNO}_3 - 40\%$)

$$c_p = 1\,460 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

$$t_{hork} = 465 \text{ [°C]}$$

$$t_{stud} = 270 \text{ [°C]}$$

Průtok soli (\dot{m}_{sul}) je spočítán pomocí zadaného průtoku tepla a tepelné kapacity soli.

$$\dot{m}_{sul} = \frac{\dot{Q}_{sul}}{c_p \cdot (t_{hork} - t_{stud})}$$

$$\dot{m}_{sul} = \frac{1\,690 \cdot 10^6}{1\,460 \cdot (320 - 280)} = 28\,939,7 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

2) HITEC XL ($\text{NaNO}_3 - 7\%$, $\text{KNO}_3 - 45\%$, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 - 48\%$)

$$c_p = 1450 \left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

$$t_{\text{hork}} = 465 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_{\text{stud}} = 270 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Průtok soli (\dot{m}_{sul}) je spočítány stejným způsobem jako v předchozím případě, pouze s použitím tepelné kapacity HITEC XL.

$$\dot{m}_{\text{sul}} = \frac{\dot{Q}_{\text{sul}}}{c_p \cdot (t_{\text{hork}} - t_{\text{stud}})}$$

$$\dot{m}_{\text{sul}} = \frac{1690 \cdot 10^6}{1450 \cdot (320 - 280)} = 29193,3 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

3.4.3 Dílčí závěr

Systém WCLL ukazuje, jak tento systém využívá vodu jako chladivo pro odvod tepla z fúzního reaktoru. Celkový výkon během pulsu byl vypočten na 1 939 MW, zatímco během fáze dwell dosáhl 19,4 MW. Průměrný výkon byl určen na 1 751,7 MW.

Energie potřebná během fáze dwell byla vypočtena na 288,7 MWh a během přechodové fáze na 86,9 MWh, což dohromady dává celkovou potřebu energie k uložení 375,6 MWh.

Průtok vody během pulsu byl spočten na 1 054,1 kg/s pro chlazení systému. Navíc byl vypočten průtok tepla ze zásobníku se solí během fáze dwell a přechodové fáze, který dosáhl 1 690,2 MW.

Výhody systému WCLL zahrnují přímé spojení parních generátorů s parní turbínou, což zjednodušuje design, a využití tepla z divertoru a vakuové nádoby pro předehřátí napájecí vody, což zvyšuje termodynamickou efektivitu. Na druhé straně, mezi nevýhody patří nižší tepelná kapacita a vyšší náklady na vytápění, což může být méně vhodné pro dlouhodobý provoz.

3.5 Pevnolátkové zásobníky

V této části jsou uvedeny pevnolátkové zásobníky energie a jejich charakteristiky, jako jsou tepelná kapacita a hustota betonu a oceli. Dále jsou prováděny výpočty spojené s ukládáním energie v těchto zásobnících, což zahrnuje výpočet středované teploty v parogenerátoru systému HCPB a další výpočty týkající se hmotnosti a objemu potřebného materiálu, a nákladů na tyto materiály.

3.5.1 Charakteristiky

Tepelná kapacita [26]:

Beton: $c_{p,b} = 880,0 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

Ocel: $c_{p,oc} = 420,0 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

Hustota:

Beton: $\rho_b = 2\,400,0 \text{ kg/m}^3$

Ocel: $\rho_{oc} = 7\,800,0 \text{ kg/m}^3$

Cena:

Beton: 80 €/m^3

Ocel: 700 €/t

3.5.2 Výpočty

Parogenerátor systému HCPB – parametry [19]

1. stupeň

$$t_{1pulse} = 291,3 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_{1dwell} = 293,0 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

2. stupeň

$$t_{2pu} = 446,0 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_{2dwell} = 442,0 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Výpočet středované teploty

Průměrná teplota (t_{str}) je spočítána jako vážený průměr teplotních hodnot v prvním a druhém stupni parogenerátoru v průběhu pulsu a dwell time.

$$t_{str} = \frac{t_{1pulse} \cdot T_{pulse} + t_{2puls} \cdot T_{pulse} + t_{1dwell} \cdot T_{dwell} + t_{2dwell} \cdot T_{dwell}}{2 \cdot (T_{dwell} + T_{pulse})}$$

$$t_{str} = \frac{291,3 \cdot 7\,200 + 446 \cdot 7\,200 + 293 \cdot 600 + 442 \cdot 600}{2 \cdot (600 + 7\,200)}$$

$$t_{str} = 368,6 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Výpočet hmotnosti betonu nutné k uložení energie

Hmotnost betonu (m_b) potřebná k uložení energie se vypočítá pomocí tepelné kapacity betonu ($c_{p,b}$) a rozdílu teploty mezi středovanou teplotou (t_{str}) a teplotou studené soli (t_{stud}).

$$m_b = \frac{Q_{celk}}{c_{p,b} \cdot (t_{2puls} - t_{str})}$$

$$m_b = \frac{408,6 \cdot 3\,600 \cdot 10^6}{880 \cdot (446 - 386,6)} = 28\,140\,500 \text{ [kg]}$$

Výpočet objemu betonu

Pro výpočet objemu betonu (V_b) potřebného k uložení energie je použita hmotnost betonu (m_b) a hustota betonu (ρ_b)

$$V_b = \frac{m_b}{\rho_b}$$

$$V_b = \frac{28\,140\,500}{2\,400} = 11\,725,2 \text{ [m}^3\text{]}$$

Výpočet nákladů na beton

Pro výpočet nákladů na beton ($cena_{b,celk}$) je použit objem betonu (V_b) a cena betonu za jednotku objemu ($cena_b$)

$$cena_{b,celk} = V_b \cdot cena_b$$

$$cena_{b,celk} = 11\,725,2 \cdot 80 = 938\,017 \text{ [€]}$$

Výpočet hmotnosti oceli potřebné k uložení energie

Hmotnost oceli (m_{oc}) je získána dělením celkové energie k uložení (Q_{celk}) tepelnou kapacitou oceli ($c_{p,oc}$) a rozdílem teplot ($(t_{str} - t_{stud})$), kde (t_{str}) je středovaná teplota a (t_{stud}) je teplota prostředí, do kterého je energie ukládána.

$$m_{oc} = \frac{Q_{celk}}{c_{p,oc} \cdot (t_{2pul} - t_{str})}$$

$$m_{oc} = \frac{408,6 \cdot 3\,600 \cdot 10^6}{420 \cdot (446 - 386,6)} = 58\,961\,038 \text{ [kg]}$$

Výpočet objemu oceli

Objem oceli (V_{oc}) je získán dělením hmotnosti oceli (m_{oc}) hustotou oceli (ρ_{oc}).

$$V_{oc} = \frac{m_{oc}}{\rho_{oc}}$$

$$V_{oc} = \frac{58\,961\,038}{7\,800} = 7\,559,1 \text{ [m}^3\text{]}$$

Výpočet nákladů na ocel

Náklady na ocel ($cena_{oc,celk}$) jsou získány násobením hmotnosti oceli (m_{oc}) cenou oceli za jednotku hmotnosti ($cena_{oc}$).

$$cena_{oc,celk} = m_{oc} \cdot cena_{oc}$$

$$cena_{oc,celk} = \frac{58\,961\,038 \cdot 700}{1\,000} = 41\,272\,727 \text{ [€]}$$

3.5.3 Dílčí závěr:

Pevnolátkové zásobníky tepla, jako jsou založené na betonu a oceli, představují zajímavou alternativu pro ukládání energie s ohledem na jejich fyzikální vlastnosti a náklady. Výpočty ukázaly, že pro ukládání celkové energie 408,6 MWh je zapotřebí 11 725,2 m³ betonu s celkovými náklady 938 017 € a 7 559,1 m³ oceli s celkovými náklady 41 272 727 €.

Beton je cenově efektivnější, ale vyžaduje větší objem pro uložení stejného množství energie ve srovnání s ocelí, která je drahá, ale efektivnější z hlediska objemu. Oba materiály nabízejí potenciální výhody v podobě dlouhé životnosti a nízkých nákladů na ukládání energie ve srovnání s některými dalšími technologiemi.

Vzhledem k tomu, že se jedná o tepelné baterie, efektivita jejich využití může být omezená kvůli tepelným ztrátám a mohou být potřeba další systémy pro optimalizaci využití nahromaděné energie. Navíc, velký objem potřebný pro betonové baterie může představovat výzvu pro jejich implementaci v některých aplikacích.

3.6 Baterie

V této části je provedena analýza a srovnání charakteristik různých typů baterií. Na začátku je ukázána jejich energetická hustota, cena za jednotku energie, životnost a čas nabíjení. Dále jsou provedeny výpočty objemu a celkové ceny za určitý počet cyklů, aby bylo možné lépe porozumět ekonomické efektivitě každého typu.

3.6.1 Ni-Cd

3.6.1.1 Charakteristiky [27]

1. **Hustota energie:** 100 Wh/l, 50 Wh/kg
2. **Cena za Wh:** 0,33 €
3. **Životnost za účinnosti 80%:** 2 000 cyklů
4. **Čas nabíjení:** 1,5 h

3.6.1.2 Výpočet objemu a ceny

Objem

Objem baterie (V) je vypočítán jako podíl celkové energie (Q_{celk}), účinnosti (η) a hustoty energie (u) v litrech.

$$V = \frac{Q_{celk}}{\eta \cdot u}$$
$$V = \frac{408,6 \cdot 10^6}{0,8 \cdot 100 \cdot 1000} = 5\,107,5 \text{ [m}^3\text{]}$$

Cena za 2 000 cyklů

Cena za 1 500 cyklů ($cena_{1500}$) se vypočítá jako součin celkové energie (Q_{celk}), ceny za jednotku energie ($cena$) a inverzní hodnoty účinnosti (η).

$$cena_{2000} = \frac{Q_{celk} \cdot cena}{\eta}$$
$$cena_{2000} = \frac{408,6 \cdot 10^6 \cdot 0,33}{0,8} = 168\,547\,500 \text{ [€]}$$

Cena za 100 cyklů pro porovnání

Cena za 100 cyklů se vypočítá jako 1/20 část ceny za 2 000 cyklů.

$$cena_{100} = cena_{1500} \cdot \frac{100}{2\,000}$$
$$cena_{100} = 168\,547\,500 \cdot \frac{100}{2\,000} = 8\,427\,375 \text{ [€]}$$

3.6.1.3 Dílčí závěr:

Ni-Cd baterie nabízejí střední hustotu energie a životnost. Cena za Wh je vyšší ve srovnání s Ni-MH a olověnými akumulátory.

3.6.2 Ni-MH

3.6.2.1 Charakteristiky [27]

1. **Hustota energie:** 220 Wh/l, 90 Wh/kg
2. **Cena za Wh:** 0,11 €
3. **Životnost za účinnosti 80%:** 400 cyklů
4. **Čas nabíjení:** 2,0 h

3.6.2.2 Výpočet objemu a ceny

Objem

Objem baterie (V) je vypočítán jako podíl celkové energie (Q_{celk}), účinnosti (η) a hustoty energie (u) v litrech.

$$V = \frac{Q_{celk}}{\eta \cdot u}$$

$$V = \frac{408,6 \cdot 10^6}{0,8 \cdot 220 \cdot 1\,000} = 2\,321,6 [m^3]$$

Cena za 400 cyklů

Cena za 400 cyklů ($cena_{400}$) se vypočítá jako součin celkové energie (Q_{celk}), ceny za jednotku energie ($cena$) a inverzní hodnoty účinnosti (η).

$$cena_{400} = \frac{Q_{celk} \cdot cena}{\eta}$$

$$cena_{400} = \frac{408,6 \cdot 10^6 \cdot 0,11}{0,8} = 56\,182\,500 [€]$$

Cena za 100 cyklů pro porovnání

Cena za 100 cyklů se vypočítá jako 1/4 část ceny za 400 cyklů.

$$cena_{100} = cena_{400} \cdot \frac{100}{400}$$

$$cena_{100} = 56\,182\,500 \cdot \frac{100}{400} = 14\,045\,625 [€]$$

3.6.2.2 Dílčí závěr:

Ni-MH baterie se vyznačují vyšší hustotou energie než Ni-Cd a Li-ion baterie, ale jejich životnost je nejnižší a cena za Wh je nejnižší ze všech zkoumaných typů.

3.6.3 Li-ion baterie

3.6.3.1 Charakteristiky [27]

1. **Hustota energie:** 200 Wh/l, 105 Wh/kg
2. **Cena za Wh:** 0,33 €
3. **Životnost za účinnosti 80%:** 1 500 cyklů
4. **Čas nabíjení:** 2,0 h

3.6.3.2 Výpočet objemu a ceny

Objem

Objem baterie (V) je vypočítán jako podíl celkové energie (Q_{celk}), účinnosti (η) a hustoty energie (u) v litrech.

$$V = \frac{Q_{celk}}{\eta \cdot u}$$

$$V = \frac{408,6 \cdot 10^6}{0,8 \cdot 200 \cdot 1\,000} = 2\,553,7 \text{ [m}^3\text{]}$$

Cena za 1 500 cyklů

Cena za 1 500 cyklů ($cena_{1500}$) se vypočítá jako součin celkové energie (Q_{celk}), ceny za jednotku energie ($cena$) a inverzní hodnoty účinnosti (η).

$$cena_{1500} = \frac{Q_{celk} \cdot cena}{\eta}$$

$$cena_{1500} = \frac{408,6 \cdot 10^6 \cdot 0,33}{0,8} = 168\,547\,500 \text{ [€]}$$

Cena za 100 cyklů pro porovnání

Cena za 100 cyklů se vypočítá jako 1/15 část ceny za 1500 cyklů.

$$cena_{100} = cena_{1500} \cdot \frac{100}{1\,500}$$

$$cena_{100} = 168\,547\,500 \cdot \frac{100}{1\,500} = 11\,236\,500 \text{ [€]}$$

3.6.3.3 Dílčí závěr:

Li-ion baterie představují dobrý kompromis mezi hustotou energie, životností a dobou nabíjení, ale jejich cena za Wh je srovnatelná s Ni-Cd bateriemi, což z ní činí nákladnější variantu.

3.6.4 Olověné akumulátory

3.6.4.1 Charakteristiky [27]

1. **Hustota energie:** 35 Wh/l, 40 Wh/kg
2. **Cena za Wh:** 0,11 €
3. **Životnost za účinnosti 80%:** 450 cyklů
4. **Čas nabíjení:** 12,0 h

3.6.4.2 Výpočet objemu a ceny

Objem

Objem baterie (V) je vypočítán jako podíl celkové energie (Q_{celk}), účinnosti (η) a hustoty energie (u) v litrech.

$$V = \frac{Q_{celk}}{\eta \cdot u}$$
$$V = \frac{408,6 \cdot 10^6}{0,8 \cdot 35 \cdot 1\,000} = 14\,592,8 [m^3]$$

Cena za 450 cyklů

Cena za 450 cyklů ($cena_{450}$) se vypočítá jako součin celkové energie (Q_{celk}), ceny za jednotku energie ($cena$) a inverzní hodnoty účinnosti (η).

$$cena_{450} = \frac{Q_{celk} \cdot cena}{\eta}$$
$$cena_{450} = \frac{408,6 \cdot 10^6 \cdot 0,11}{0,8} = 56\,182\,500 [€]$$

Cena za 100 cyklů pro porovnání

Cena za 100 cyklů se vypočítá jako 2/9 část ceny za 450 cyklů.

$$cena_{100} = cena_{450} \cdot \frac{100}{450}$$
$$cena_{100} = 56\,182\,500 \cdot \frac{450}{1\,500} = 16\,854\,750 [€]$$

3.6.4.3 Dílčí závěr:

Olověné akumulátory mají nejnižší hustotu energie a životnost je lepší než u Ni-MH, ale horší než u Ni-Cd a Li-ion baterií. I přes nízkou cenu za Wh jsou jejich dlouhá doba nabíjení a nízká hustota energie významnými nevýhodami.

3.6.5 Dílčí závěr:

Celkově každý typ baterie nabízí odlišný balíček vlastností a volba mezi nimi by měla být založena na specifických požadavcích aplikace, zvažující faktory jako jsou cena, hustota energie, životnost a doba nabíjení. Li-ion baterie se zdají být vyváženou volbou pro širokou škálu aplikací, zatímco Ni-MH a olověné akumulátory mohou být vhodnější, kde jsou náklady nebo hustota energie klíčovými faktory. Ni-Cd baterie mohou být preferovány tam, kde je požadována rychlejší nabíjecí doba a dlouhá životnost. Při využití systému WCLL s celkovou energií k uložení 375,6 MWh se objem a cena u elektrických baterií snížily o 8%.

3.7 Gravitační uložení

3.7.1 Technické charakteristiky

Zvolíme vhodnou hmotnost závaží 50 000 kg a výšku 15 m. Energie nutná k uložení je 408,6 MWh pro systém HCPB. Do závorek budou dávány výsledky pro systém WCLL s 375,6 MWh energie, která je nutná k uložení.

3.7.2 Výpočty

Výpočet potenciální energie jednoho závaží

Potenciální energie jednoho závaží (E_z) je vypočtena jako součin gravitačního zrychlení (g), výšky (h) a hmotnosti (m_z) závaží, přičemž výsledek je vyjádřen ve watt-hodinách (Wh).

$$E_z = \frac{g \cdot h \cdot m_z}{3\,600}$$
$$E_z = \frac{9,81 \cdot 15 \cdot 50\,000}{3\,600} = 2\,043,8 \text{ [Wh]}$$

Počet závaží pro uložení energie

Počet závaží (n), které je potřeba pro uložení celkové energie (Q_{celk}), se spočítá jako podíl celkové energie a energie jednoho závaží.

$$n = \frac{Q_{celk}}{E_z}$$
$$n = \frac{408,6 \cdot 10^6}{2\,043,8} = 199\,922 \text{ (183\,775) [-]}$$

Objem

Objem závaží pro uložení energie lze spočítat jako součin celkové hmotnosti a počtu závaží, vydělený hustotou betonu.

$$V = \frac{m_z}{\rho_b} \cdot n$$
$$V = \frac{50\,000}{2400} \cdot 199\,922 = 4\,165\,041 \text{ (3\,828\,650) [m}^3\text{]}$$

Příkon potřebný na zdvih závaží

Příkon ($P_{0,z}$) je vypočten jako podíl energie jednoho závaží (E_z) a doby trvání impulsu (T_{pulse}) s dobou přechodové fáze (T_{ramp}).

$$P_{0,z} = \frac{E_z}{T_{pulse} + 2 \cdot 0,5 \cdot T_{ramp}}$$
$$P_{0,z} = \frac{2\,043,8 \cdot 3\,600}{7\,200 + 2 \cdot 0,5 \cdot 200} = 994,3 \text{ [W]}$$

Celkový příkon ($P_{0,celk}$) se vypočte jako součin příkonu jednoho závaží a počtu závaží.

$$P_{0,celk} = P_{0,z} \cdot n$$

$$P_{0,celk} = 994,3 \cdot 199\,922 = 198,78 \text{ (182,72) [MW]}$$

Výkon potřebný na zdvih závaží

Výkon (P_{1z}) je vypočten podobně jako příkon závaží, ale s ohledem na dobu dwell (T_{dwell}).

$$P_{1z} = \frac{E_z}{T_{dwell} + 2 \cdot 0,5 \cdot T_{ramp}}$$

$$P_{1z} = \frac{2\,043,8 \cdot 3\,600}{600 + 2 \cdot 0,5 \cdot 200} = 9\,196,9 \text{ [W]}$$

Celkový výkon (P_{celk}) se vypočte jako součin výkonu jednoho závaží a počtu závaží.

$$P_{celk} = P_{1z} \cdot n$$

$$P_{celk} = 9\,196,9 \cdot 199\,922 = 1\,838,7 \text{ (1\,690,2) [MW]}$$

3.7.3 Dílčí závěr:

V rámci posouzení gravitačního systému pro ukládání energie byla vybrána hmotnost závaží 50 000 kg a výška 15 m, aby bylo dosaženo potenciální energie 408,6 MWh. Výpočet ukázal, že potenciální energie jednoho závaží je 2 043,8 Wh. Pro uložení celkové energie 408,6 MWh je tedy nutný počet závaží přibližně 199 922.

Z hlediska objemu je pro uložení energie zapotřebí 4 165 041 m³, pokud předpokládáme, že závaží jsou vyrobená z betonu s hustotou 2400 kg/m³. Příkon a výkon systému byly také spočítány, kde celkový příkon dosahuje 198,78 MW a celkový výkon je 1 838,7 MW při zohlednění doby dwell.

Tento výpočet demonstruje potenciál gravitačního ukládání energie jako efektivního způsobu akumulace velkého množství energie s poměrně vysokým výkonem v rámci obnovitelných zdrojů energie. Avšak velký počet závaží a potřebný objem naznačují, že praktická realizace takového systému vyžaduje rozsáhlé prostory a pečlivé inženýrské plánování.

3.8 Přečerpávací stanici

3.8.1 Technické charakteristiky

Navrhujeme vodní přečerpávací stanici s parametry srovnatelnými s Dlouhými Stráněmi. [28]

$$Q_{celk} = 408,6 [MWh] - HCPB$$

$$Q_{celk} = 375,6 [MWh] - WCLL, \text{ výsledky budou dány do závorek}$$

$$\rho_{vody} = 1\,000 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\Delta H = 510 [m]$$

Potřebný příkon a výkon známý z gravitačních baterií

$$P_{0,celk} = 199 [MW]$$

$$P_{celk} = 1\,840,9 [MW]$$

3.8.2 Výpočty

Průtok během pulsu

Průtok vody během pulsu (\dot{m}_{pulse}) je určen jako podíl celkového příkonu ($P_{0,celk}$) a hustoty vody (ρ_{vody}) vynásobený gravitačním zrychlením (g) a změnou výšky (ΔH).

$$\dot{m}_{pulse} = \frac{P_{0,celk}}{\rho_{vody} \cdot g \cdot \Delta H}$$

$$\dot{m}_{pulse} = \frac{198,78 \cdot 10^6}{1\,000 \cdot 9,81 \cdot 510} = 39,7 (36,5) \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Průtok během dwell

Průtok vody během dwell (\dot{m}_{dwell}) je určen jako podíl celkového výkonu (P_{celk}) a hustoty vody (ρ_{vody}) vynásobený gravitačním zrychlením (g) a změnou výšky (ΔH).

$$\dot{m}_{dwell} = \frac{P_{celk}}{\rho_{vody} \cdot g \cdot \Delta H}$$

$$\dot{m}_{dwell} = \frac{1\,838,7 \cdot 10^6}{1\,000 \cdot 9,81 \cdot 510} = 367,5 (337,8) \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Objem horní nádrže

Objem horní nádrže (V_{nadrze}) je určen jako součin průtoku během pulsu (\dot{m}_{pulse}) a doby trvání impulsu (T_{pulse}) a přechodové fáze (T_{ramp}).

$$V_{nadrze} = \dot{m}_{pulse} \cdot (T_{pulse} + 0,5 \cdot 2 \cdot T_{ramp})$$

$$V_{nadrze} = 39,7 \cdot (7\,200 + 0,5 \cdot 2 \cdot 200) = 293\,780 \text{ (270\,100) } [m^3]$$

3.8.3 Porovnání s PVE Dlouhé Stráně

V tabulce 6 je porovnání parametrů mezi DEMO a PVE Dlouhé Stráně. Parametry zahrnují objem horní nádrže, výšku nádrže, příkon a výkon obou zařízení.

	Objem horní nádrže [m ³]	Výška [m]	Příkon [MW]	Výkon [MW]
DEMO	293 780	510	198,8	1 838,7
PVE Dlouhé stráně	2 580 000,00	510,7	2x312	2x325

Tabulka 6 – Charakteristika PVE

3.8.4 Dílčí závěr:

Navržená vodní přečerpávací stanice vychází z principu podobného stanici Dlouhá Stráně s výškovým rozdílem 510 metrů. S celkovou potřebnou energií 408,6 MWh a známými hodnotami příkonu a výkonu z gravitačních baterií (199 MW příkon a 1 840,9 MW výkon), byly spočteny průtoky vody během různých fází operace stanice.

Průtok vody během pulsu byl vypočten na 39,7 kg/s, což ukazuje na to, kolik vody je potřeba přečrpat za sekundu, aby se dosáhlo potřebného příkonu. Na druhé straně, průtok v době dwell je výrazně vyšší, a to 367,5 kg/s, což odpovídá potřebě výkonu v této fázi.

Pro určení objemu horní nádrže, zásadního pro kapacitu celého systému, bylo zjištěno, že je potřeba nádrží o objemu 293 780 m³, aby se uchovala voda nutná pro fázi dwell.

Tento výpočet ukazuje na komplexnost a velikost infrastruktury potřebné pro vodní přečerpávací elektrárnu tohoto typu a zároveň zdůrazňuje její potenciál pro ukládání a generování značného množství energie v reakci na potřeby sítě, čímž přispívá k stabilizaci a flexibilitě energetického systému.

3.9 Celkové porovnání

Celkové porovnání různých řešení pro ukládání energie, viz tabulka 7, ukazuje výrazné rozdíly v objemu potřebném pro skladování a v nákladech na jednotlivé systémy.

1. Solné baterie:

- "HITEC": S objemem 3 000 m³ a cenou 5 161 500 €.
- "HITEC XL": Stejný objem, ale vyšší cena 6 545 000 €.
- "Solar Salt": Nejnižší cena mezi solnými bateriemi, 2 695 000 €, což by mohlo značit výhodnější řešení z hlediska nákladů.

2. Pevnolátkové zásobníky tepla

- Beton: Vysoký objem 11 725 m³ s relativně nízkou cenou 938 017 €, ukazuje na cenově efektivní, ale objemně náročné řešení.
- Ocel: Menší objem 7 559 m³, ale výrazně vyšší cena 41 272 727 €, naznačuje vysoké náklady na materiál nebo zpracování.

3. Baterie:

- Li-iontová: 2 553 m³ za 11 236 500 €, ukazující na vyšší cenu, ale dobré energetické hustoty.
- Olověné: Velký objem 14 592 m³ s cenou 16 854 750 €, naznačuje nižší energetickou hustotu.
- Ni-MH a Ni-Cd: Obě mají střední objem a cenu, což je kompromis mezi kapacitou a náklady.

4. Gravitační uložení

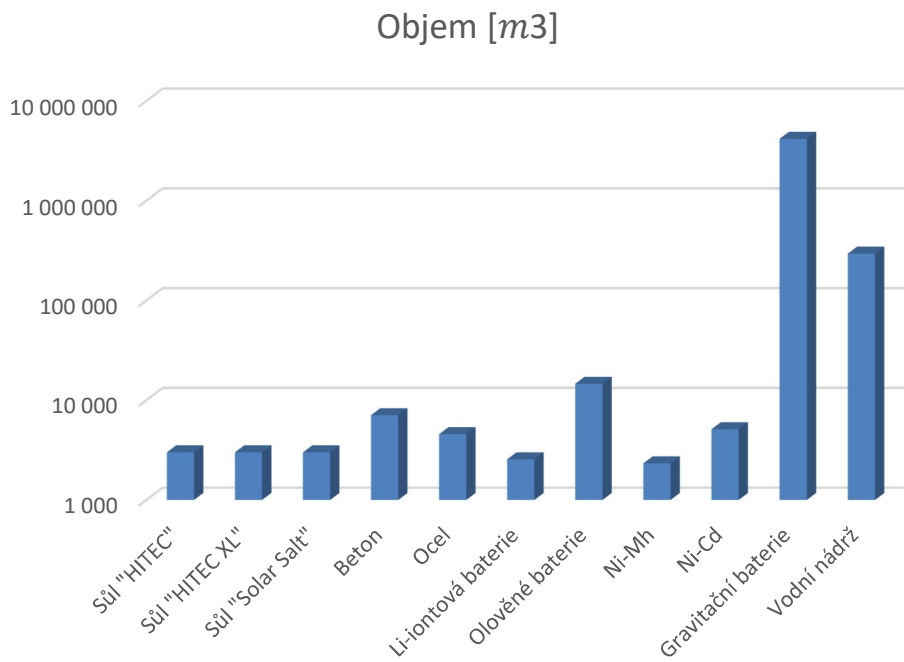
- Gravitační baterie: Obrovský objem 4 165 041 m³, ale bez uvedené ceny. Zřejmě velmi objemné a potenciálně nákladově efektivní, závislé na lokalitě a konstrukčních podmínkách.
- Vodní nádrž: 293 780 m³, bez uvedené ceny. Toto řešení může nabídnout velkou kapacitu pro ukládání energie, ale vyžaduje specifické geografické podmínky pro výstavbu.

Řešení	Objem nádrže/baterií [m3]	Cena [€]
Sůl "HITEC"	3 000	5 161 500
Sůl "HITEC XL"	3 000	6 545 000
Sůl "Solar Salt"	3 000	2 695 000
Beton	11 725	938 017
Ocel	7 559	41 272 727
Li-iontová baterie*	2 553	11 236 500
Olověné baterie*	14 592	16 854 750
Ni-MH*	2 321	14 045 625
Ni-Cd*	5 107	8 427 375
Gravitační baterie	4 165 041	-
Vodní nádrž	293 780	-

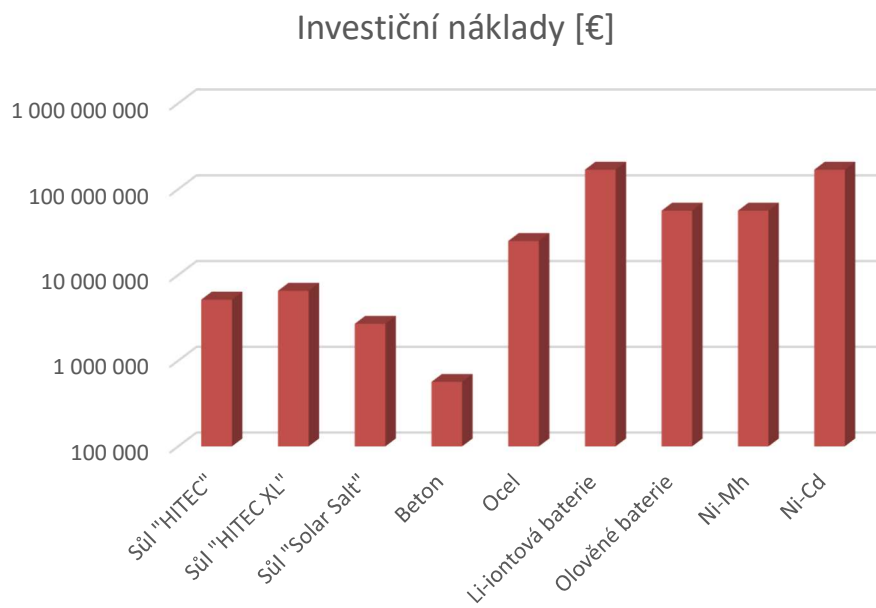
* - cena za 100 cyklů

Tabulka 7 - Srovnání technologií pro akumulaci energie: objem a cena

Grafy pro porovnání



Graf 1 – porovnání objemu



Graf 2 – porovnání nákladů

4 Závěr

V průběhu zkoumání různých systémů pro akumulaci energie, včetně HPCB, WCLL, elektrických baterií, tepelných baterií a gravitačního ukládání, jsme se setkali s řadou zajímavých zjištění, která ukazují na jedinečné výhody i omezení každé z těchto technologií.

HPCB a WCLL jsou oba varianty řešení, avšak HPCB vyžaduje větší skladovací kapacitu energie o 33 MWh ve srovnání s WCLL. Nicméně, WCLL nabízí kombinaci efektivity, jednoduchosti řízení a přímého spojení, avšak je dražší kvůli elektrickému ohřevu a má vyšší průtoky soli, což vede k většímu opotřebení materiálu. Oba tyto přístupy vynikají v oblasti termodynamické efektivity a robustního designu.

Elektrické baterie, jako jsou Li-ion, Ni-MH, a Ni-Cd, nabízejí rychlou odezvu a jsou efektivní pro krátkodobé vysoké zatížení, ale jejich vyšší cena a omezená kapacita činí je méně vhodnými pro projekty vyžadující masivní ukládání energie. Naproti tomu tepelné baterie, které mohou využívat různé materiály jako beton a ocel, poskytují větší kapacitu a potenciál pro dlouhodobé ukládání energie, ale s nižší účinností.

Gravitační uložení energie představuje slibný koncept využívající potenciální energii zvedaných závaží nebo čerpané vody. Mezi hlavní varianty patří gravitační baterie. Toto řešení je velmi objemné a potenciálně nákladově neefektivní, avšak jeho úspěch je závislý na konkrétní lokalitě a konstrukčních podmínkách. Alternativou je vodní nádrž, tato možnost poskytuje velkou kapacitu pro ukládání energie, ale vyžaduje specifické geografické podmínky pro výstavbu.

Každá zkoumaná technologie přináší specifické výhody, které mohou být aplikovány v závislosti na konkrétních potřebách a omezeních daného energetického projektu. Pro rozhodování o nejvhodnější technologii je zásadní zvážit faktory jako náklady, efektivita, kapacita, životnost a ekologický dopad.

V konečném důsledku, volba mezi těmito technologiemi by měla reflektovat strategickou vizi a technické požadavky projektu, aby bylo zajištěno, že vybrané řešení nejlépe vyhovuje dlouhodobým cílům udržitelného a efektivního energetického managementu.

Seznam literatury

- [1] AKADEMIE VĚD ČESKÉ REPUBLIKY. Nové cesty od obnovitelných zdrojů energie k bezfosilním palivům. *Nenalezený vydavatel* [online]. 2024 [cit. 2024-04-16]. Dostupné z: <https://www.avcr.cz/export/sites/avcr.cz/cs/veda-a-vyzkum/avex/files/2023-03.pdf>
- [2] ENTLER, Slavomír a Jan MLYNÁŘ. Věda kolem nás | Výzvy a otázky. [online]. 2016 [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: http://www.vedakolemnas.cz/miranda2/m2/sys/galerie-download/vkn_50_web.pdf
- [3] ŘÍPA, Milan. *Jaderná fyzika a energetika*. Online. 3 pól - Magazín plný pozitivní energie. 2020. [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/jaderna-fyzika-a-energetika/2499-jak-dosahnout-ustaleneho-stavu-hodinove-fuze-tokamaku-iter>
- [4] Cismondi, F. et al. Progress in EU Breeding Blanket design and integration. *Fusion Eng. Des.* 136 (2018), s. 782–792. [cit. 2023-12-27]
- [5] Proelektrotechniky [online]. 2021 [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.proelektrotechniky.cz/vzdelavani/17.php>
- [6] ŠPINA Martin. Technicky historické okénko: Ni-Cd baterie. In: *Oenergetice.cz* [online]. 23.7.2021 [cit. 2024-02-28]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulaceenergie/technicky-historicke-okenko-ni-cd-baterie>
- [7] Yoshino, A. (2012), The Birth of the Lithium-Ion Battery. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 51: 5798–5800. doi:10.1002/anie.201105006 [cit. 2024-02-28].
- [8] PETR, J. *Nové materiály pro Li-iontové baterie pracující na principu konverze*. Brno, 2013. [cit. 2024-02-28]
- [9] ZBOŽÍNEK, Štěpán. *Vliv pulzního nabíjení na vlastnosti olověných akumulátorů*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně
- [10] *Olověný akumulátor*. Tzbinfo [online]. [cit. 2024-01-23]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektřiny/16090-jak-funguje-oloveny-akumulator>
- [11] DASHÖFER, Verlag. *Gravitační skladování energie 03: Gravitační baterie*. Online. Normy a předpisy pro výrobce, distributory a prodejce energií. Teplárenství, plynárenství, elektroenergetika, obnovitelné zdroje. 2023. [cit. 2024-03-07]. Dostupné z: <https://www.energetikainfo.cz/33/gravitacni-skladovani-energie-03-gravitacni-baterie-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqWeX-UDwEJOJqh-zn1covprJfTGJxQrnQ/>
- [12] *Solar Gravity Battery*. Online. UMEarth. 2022. [cit. 2024-03-07]. Dostupné z: <https://www.umearth.ca/solar-gravity-battery>
- [13] Zápis z 16. schůze Podvýboru pro energetiku: Návštěva přečerpávací vodní elektrárny Dlouhé Stráně (PVE). In: *Senát Parlamentu České republiky* [online]. 22.11.2012 [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.senat.cz/doc2html/897604188/index.html>

- [14] ZHOU, Guangming. Transient thermal analysis and structural assessment of an ex-vessel LOCA event on the EU DEMO HCPB breeding blanket and the attachment system. *ResearchGate* [online]. [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/321861203_Transient_thermal_analysis_and_structural_assessment_of_an_ex-vessel_LOCA_event_on_the_EU_DEMO_HCPB_breeding_blanket_and_the_attachment_system
- [15] Gliss, C., Drumm, B. "KDII#6 summary report 2020 – Tokamak building and plant systems configuration, EFDA_D_2NV2SB," 2020. [cit. 2023-12-27].
- [16] Bubelis, E. a kol. "Conceptual designs of PHTS, ESS and PCS for DEMO BoP with helium cooled BB concept." *Fusion Engineering and Design*, roč. 136 (A), 2018, s. 367–371. [cit. 2023-12-27].
- [17] Malinowski, L. a kol. "Analysis of the secondary circuit of the DEMO fusion power plant using GateCycle." *Fusion Engineering and Design*, roč. 124, 2017, s. 1237–1240. [cit. 2023-12-27].
- [18] T. DONNÉ, S. CIATTAGLIA, G. FEDERICI a T. Donné P.A. DI MAIO. Pre-conceptual design of EU DEMO balance of plant systems: Objectives and challenges. *ScienceDirect* [online]. 2021 [cit. 2024-04-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379621002805>
- [19] Barucca, L. a kol. Status of EU DEMO heat transport and power conversion systems. *Fusion Engineering and Design*, 2018, sv. 136, s. 1557–1566. [online]. [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920379618304897>
- [20] M. Porton, E. Surrey a Z. Vizvary. Balance of plant challenges for a near-term EU demonstration power plant. *IEEE Xplore* [online]. [cit. 2024-04-04]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6635331>
- [21] D. Kearney, B. Kelly, R. Cable a N. Potrovitza. NREL Parabolic Trough Thermal Energy Storage. In: *NREL* [online]. 2003, s. 9 [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy03osti/40028.pdf>
- [22] FEDERICI, G. et al. Overview of the design approach and prioritization of R&D activities towards an EU DEMO. *Fusion Engineering and Design*, 2016, roč. 109-111, s. 1464–1474. ISSN 0920-3796. [cit. 2023-12-27].
- [23] DEL NEVO, A. et al. WCLL BB PHTS architecture description & BOM (Direct Coupling Option with Small ESS) - EFDA_D_2PC2N9. 2020. [cit. 2023-12-27].
- [24] G. KEECH, W. HERING. Industry supported improved design of DEMO BoP for HCPB BB concept with energy storage system. *ScienceDirect* [online]. 2019 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379619305162>
- [25] KURZY.CZ. *Elektrina - ceny a grafy elektriny, vývoj ceny elektriny 1 MWh - 1 rok - měna EUR*. Online. Kurzy.cz. [cit. 2024-04-04]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/komodity/cena-elektriny-graf-vyvoje-ceny>
- [26] E-konstrukter. Měrná tepelná kapacita, součinitel tepelné vodivosti látek. *Portál pro strojní konstruktéry* [online]. 2014 [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/merna-tepelna-kapacita-soucinitel-tepelne-vodivosti-latek>

- [27] Bateriové systémy. *KRAJlczech s.r.o* [online]. 2023 [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.krajiczech.cz/cs/content/7-bateriove-systemy>
- [28] Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně. In: *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. 2021 [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99e%C4%8Derp%C3%A1vac%C3%AD_vo_dn%C3%AD_elektr%C3%A1rna_Dlouh%C3%A9_str%C3%A1n%C4%9B

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Fúzní reaktor typu TOKAMAK. Převzato z [2]	8
Obrázek 2 – Schéma Gravitační baterii. Převzato z [12]	12
Obrázek 3 – Schéma uspořádání PVE v terénu. Převzato z [13]	13
Obrázek 4 – System HPCB [18]	14
Obrázek 5 – 3D CAD model HCPB [18]	15
Obrázek 6 – System WCLL [18]	16
Obrázek 7 – 3D CAD model WCLL [18]	16
Obrázek 8 – DEMO pracovní cyklus	19

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Zdroje tepla HCPB [22].	20
Tabulka 2 – Výkon čerpadla HCPB [23]	20
Tabulka 3 – Zdroje tepla WCLL [22]	20
Tabulka 4 – Výkon čerpadla WCLL [23]	20
Tabulka 5 – Charakteristika soli [21]	24
Tabulka 6 – Charakteristika PVE	42
Tabulka 7 – Srovnání technologií pro akumulaci energie: objem a cena	44