



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

HYBRIDNÍ SYSTÉMY AKUMULACE ENERGIE

HYBRID SYSTEMS FOR ENERGY STORAGE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ladislav Tománek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Ladislav Tománek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Hybridní systémy akumulace energie

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Změny v energetice vyvolané především nárůstem podílu obnovitelných zdrojů (fotovoltaika, větrné elektrárny) vyvolávají zvýšenou potřebu akumulace energie. Vhodná kombinace více typů technických řešení pro akumulaci energie umožňuje např. kombinaci rychlé odezvy (setrvačníky) s úložišti s pomalejší reakcí, ale vyšší kapacitou (přečerpávací vodní elektrárny).

Cíle bakalářské práce:

1. Úvod do problematiky ukládání elektrické energie, přehled dostupných technologií (přečerpávací elektrárny, baterie, setrvačníky, stlačený vzduch, ...) včetně stupně jejich současné praktické technické vyspělosti.
2. Přehled a návrh hybridních způsobů ukládání elektrické energie. Důvod, možnosti, výhody a nevýhody jednotlivých kombinací.
3. Zhodnocení, závěr.

Seznam doporučené literatury:

CHONG, Lee Wai, Yee Wan WONG, Rajprasad Kumar RAJKUMAR, Rajpartban Kumar RAJKUMAR a Dino ISA. Hybrid energy storage systems and control strategies for stand-alone renewable energy power systems. Renewable and sustainable energy reviews. 2016, 66, 174-189.

BOCKLISCH, Thilo. Hybrid energy storage systems for renewable energy applications. Energy Procedia. 2011, 73, 103-111.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cíl této práce je popsat problémy spojené s akumulací elektrické energie se zaměřením na hybridní systémy akumulace energie. V první části jsou systémy ukládání energie rozděleny do dvou skupin podle jejich funkce v hybridním systému. V druhé části je rešerše podrobněji popisující jednotlivé systémy akumulace energie, včetně jejich vlastností a technické vyspělosti. Poslední část se zaměřuje na popis jednotlivých vybraných hybridních systému akumulace energie a výhod, které z hybridizace plynou.

Klíčová slova

Hybridní systémy akumulace energie, systémy akumulace energie, obnovitelné zdroje energie

ABSTRACT

The aim of this paper is to describe problems of energy storage systems focusing on hybrid energy storage systems. In the first part, the systems of storage energy are divided into two basic groups based on their role in hybrid energy storage system. The second part is research describing each system of accumulation of energy in details, including their properties and technical maturity. The last part is focused on selected cases of hybrid energy systems and their benefits.

Key words

Hybrid energy storage system, energy storage system, renewable energy sources

Bibliografická citace

TOMÁNEK, L. *Hybridní systémy akumulace energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 53 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci **Hybridní systémy akumulace energie** vypracoval samostatně, pod vedením doc. Ing. Pavla Rudolfa, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Olomouci dne 15.května 2018

.....

Ladislav Tománek

Poděkování

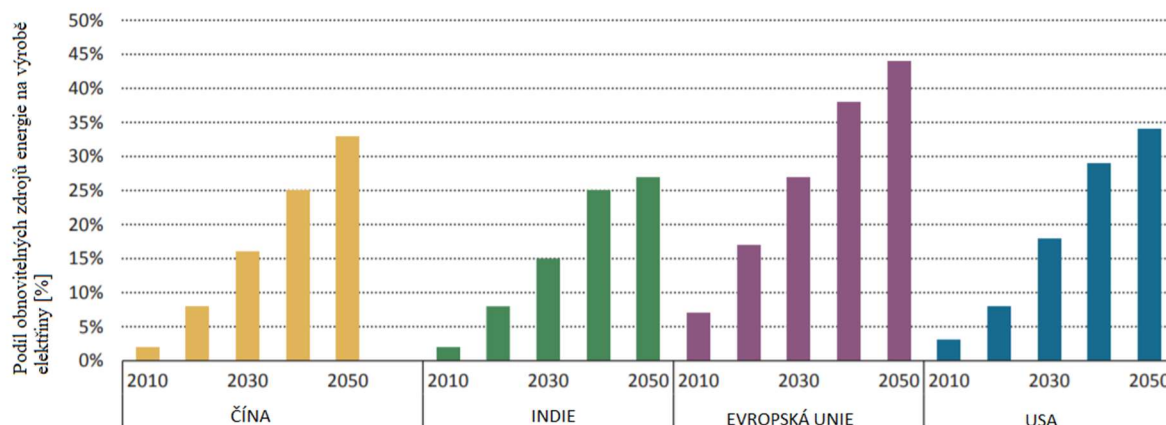
Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Pavlu Rudolfovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky, které mi poskytl při vypracování mé bakalářské práce.

Obsah

Úvod	11
Hlavní části hybridních systémů akumulace energie	13
Charakteristiky jednotlivých ESS	14
<i>Baterie</i>	16
<i>Superkapacitor</i>	18
<i>Akumulace energie do magnetického pole supravodivé cívky</i>	20
<i>Setrvačnick</i>	21
<i>Akumulace energie do stlačeného vzduchu</i>	23
<i>Systém akumulace energie do vodíku</i>	27
<i>Přečerpávací vodní elektrárna</i>	29
Hybridní systémy akumulace energie s baterií	32
<i>Baterie-Superkapacitor</i>	32
<i>Baterie-SMES</i>	34
<i>Baterie-setrvačnick</i>	36
Hybridní systémy akumulace energie s CAES	38
<i>CAES-SC</i>	38
<i>CAES-SMES</i>	38
<i>CAES-baterie</i>	38
<i>CAES-setrvačnick</i>	39
Hybridizace akumulace energie do vodíku	41
<i>Palivový článek-SC</i>	41
<i>Systém akumulace energie do vodíku-baterie</i>	42
Hybridizace PHES	45
Závěr	47
Seznam použitých zdrojů	49
Seznam použitých zkratk	53

Úvod

V dnešní době se čím dál více dbá na zlepšování kvality životního prostředí a na zvyšování účinnosti využití energie. S tímto trendem se začíná i více využívat obnovitelných zdrojů energie (viz obrázek 1). Jsou to například větrné, přílivové, vlnové, vodní, geotermální, či solární elektrárny, které ale mají kromě výhody „čisté energie“ jednu velkou nevýhodu. Tato nevýhoda je nestabilní výkon, který je závislý na mnoha přírodních faktorech. Například to může být počasí, denní doba, nebo roční období. Jedním z nejrozšířenějších zdrojů obnovitelné energie je fotovoltaická elektrárna (PV), která má svůj nejvyšší výkon přes den a zanedbatelný výkon v noci. Tento výkon se ještě snižuje s nástupem zimy nebo změny oblačnosti. Do roku 2030 má být v EU 27 % energie generováno z obnovitelných zdrojů energie. S přibývajícím počtem těchto obnovitelných zdrojů energie se zvyšuje i potřeba nějakým způsobem kompenzovat jejich negativní vlastnosti při připojení do elektrické rozvodné sítě. Navíc společně s počtem obnovitelných zdrojů energie roste i jejich decentralizace. [17] [3] [18] [21] [8]



Obrázek 1 Procentuální předpověď podílu obnovitelných zdrojů energie na výrobě elektřiny ve vybraných regionech [5]

Naopak tepelné elektrárny nejsou závislé na denní době, nebo ročním období. Jejich nevýhodou je však velký reakční čas a nedokáží dostatečně rychle reagovat na nárazovou poptávku nebo přebytek energie. Na druhou stranu poptávka po elektrické energii, která neustále roste, je závislá mimo jiné na ročním období, jako je zima nebo léto. V zimě je využívána na vytápění domácností a ohřev vody a v létě naopak na provoz klimatizací. Dalším příkladem může být víkend, kdy se v továrnách tolik nepracuje a energetická poptávka je menší. V neposlední řadě záleží na denní době. Přes noc je poptávka po energii mnohem menší než ve dne. Navíc, v období celého dne se vyskytují takzvané špičky, kdy poptávka po energii velice strmě stoupá, například ráno, se začátkem pracovní doby, v poledne, s přestávkou na oběd a večer se zapínáním domácích spotřebičů. [3] [25]

Na pokrytí a kompenzaci těchto energetických fluktuací je výhodné použít energetické akumulátory energie dále už jen ESS (energy storage system), ve kterých se, je-li potřeba, transformuje elektrická energie na jiné formy energie, jako potenciální, chemická, kinetická, tepelná, energie magnetického pole, nebo kombinace těchto energií. Energie je v ESS uložena a v případě potřeby je transformována zpět na energii elektrickou. Tyto energetické úložiště mají mnoho vlastností, které při dobrém návrhu mohou systém udělat mnohem více flexibilní

a stabilnější. Systém s ESS získá schopnost akumulovat přebytky v době nadbytečné výroby energie, a naopak tuto energii distribuovat v době jejího nedostatku a pokrývat tím nárazovou poptávku či přebytek energie v síti. ESS by měl být vhodně navržen a optimalizován tak, aby celkový systém měl dobrou energetickou účinnost, vhodnou velikost, hmotnost, životnost a s ní úzce spojenou finanční návratnost. Ke zlepšení vlastností jednotlivých systémů se používá jejich hybridizace, která spočívá ve vhodné kombinaci dvou i více ESS, kde tento hybridní systém akumulace energie (HESS) je ve vhodně navržené architektuře zapojen do sítě. Může být elektronicky řízen tak, aby pomáhal ke zlepšení celkové stability sítě. Využití HESS je také velice výhodné použít v oblastech, které nejsou vůbec, nebo jen částečně, připojeny do rozvodné sítě. Jednou z těchto oblastí je využití HESS v dopravních prostředcích od kolejových vozidel až po jednostopá vozidla. HESS také nachází velké využití v tzv. ostrovních systémech. To jsou oblasti, které jsou svou polohou odříznuty od rozvodné sítě. [6][4] [8]

V této práci shrnu poznatky vybraných HESS a podrobněji zde popíši úskalí a problémy, které jsou s jednotlivými HESS spojeny.

Hlavní části hybridních systémů akumulace energie

Hybridní systém akumulace energií se skládá ze dvou odlišných typů úložišť. První úložiště (ES1) vysokým výkonem rychle reaguje na krátkodobou fluktuaci energetického nadbytku a přebytku a zmenšuje dynamické namáhání druhého úložiště (ES2). Druhé úložiště (ES2) plní funkci zásobníku energie a je v něm uložena většinová část z uskladněné energie. Výkon ES2 je průměrný výkon celé soustavy za relativně delší čas. Kombinacemi těchto dvou typů úložišť můžeme dostat systém kombinující kladné vlastnosti obou těchto skupin. [4]

První skupina úložišť (ES1) je schopna dodávat velké množství energie za krátký čas s poměrně krátkým reakčním časem, vysokou účinností a vysokou životností opakovaného nabíjení a vybíjení. Tato skupina je charakterizována také vysokými energetickými ztrátami při dlouhodobém uchovávání energie a vysokým poměrem pořizovací ceny a množství uložené energie. Tuto skupinu můžeme nazývat vysoce výkonná úložiště. Hlavními představiteli první skupiny jsou setrvačníky, superkapacitor (SC) a systém ukládání energie do magnetického pole supravodivé cívky (SMES). Obvykle ES1 kompenzuje krátkodobou fluktuaci energie a stabilizuje napětí, proud, nebo frekvenci. [4] [22] [8]

Druhá skupina (ES2) je považována za hlavní zdroj uložené energie v systému. Hlavními charakteristickými znaky těchto ESS je relativně malý poměr pořizovací ceny a úložné energie, velká úložná kapacita oproti první skupině, nízké ztráty při delší době skladování. Typickými příklady této skupiny jsou vodní přečerpávací elektrárny, akumulace energie do stlačeného vzduchu (CAES) a akumulace energie do vodíku pomocí elektrolýzy. [4]

Charakteristiky jednotlivých ESS

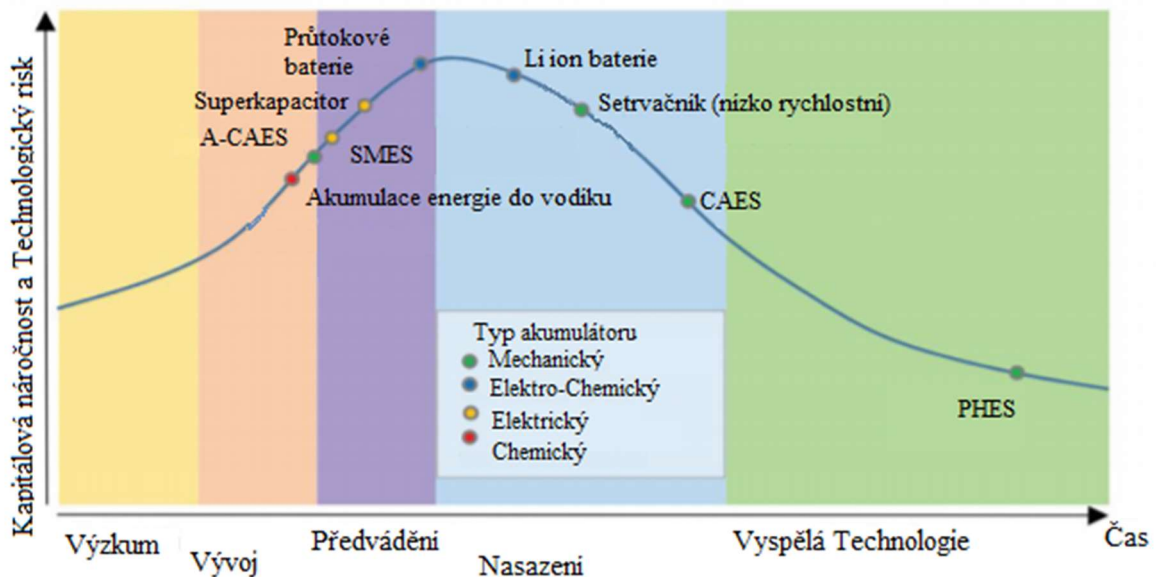
Uložení energie do ESS spočívá v přeměně elektrické energie na energii kinetickou, potenciální, chemickou, magnetickou a v neposlední řadě tepelnou (viz obrázek 4). V některých případech je energie akumulována do kombinace těchto energií, například adiabatické stlačování vzduchu (A-CAES), kde se ukládá část energie do potenciální (tlakové) energie stlačeného vzduchu a část do energie tepelné v tepelném zásobníku. [4] [8]

Vhodnost ESS pro konkrétní případ je dána především jeho vlastnostmi (viz Obrázek 2), které jsou klíčové pro každý konkrétní systém. Jak již bylo zmíněno, můžeme ESS rozdělit do dvou základních skupin. První skupina ES1 jsou ESS schopné dodávat vysoký výkon po krátký čas a jsou charakteristické vysokou hustotou výkonu (na obrázku 2 z levé strany). Většinou se tyto ESS používají na kompenzaci krátkodobé energetické fluktuace. Do této skupiny spadá superkapacitor (SC), ukládání energie do magnetického pole (SMES) a setrvačnick. Ve druhé skupině (ES2) jsou řazeny takové ESS, které dokážou ekonomicky výhodně uchovat velké množství energie po relativně dlouhou dobu beze ztrát. Je vhodné, použít je na kompenzaci dlouhodobější energetické fluktuace, protože mají dlouhý reakční čas nebo nízkou cyklovou životnost, tudíž nejsou na tyto aplikace příliš vhodné. Základní představitele skupiny ES2 (na obrázku 2 z pravé strany) reprezentuje především akumulace do stlačeného vzduchu (CAES), přečerpávací nádrže (PHES), akumulace energie do vodíku a baterie. Baterie v některých případech mohou zastávat funkci ES1. [4] [19]

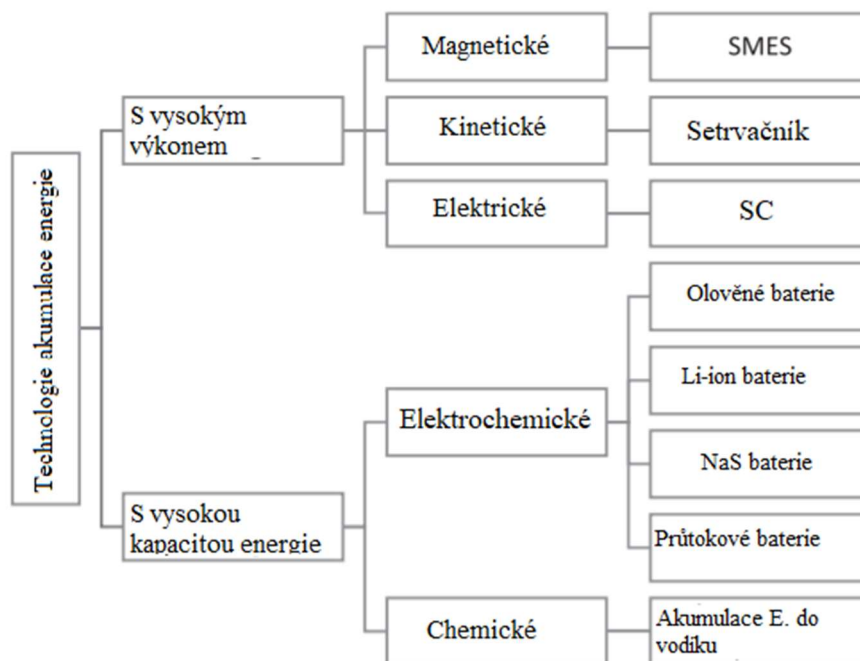
	SC	SMES	setrvačnick	Pb baterie	li-ion baterie	NaS Baterie	Redoxní průtoková B.	Akumulace do vodíku	PHES	CAES
Hustota energie [Wh/l]	2-10	0,5-10	80-200	50-100	200-350	150-250	20-70	750(250bar) 2400/tekutý	0,27-1,5	3-6
Instalační cena [€/kW]	150-200	Vysoká	300	150-200	150-200	150-200	1000-1500	1500-2000	500-1000	700-1000
Instalační cena [€/kWh]	10000-20000	Vysoká	1000	100-250	300-800	500-700	300-500	0,3-0,6	5-20	40-80
Reakční čas	<10ms	1-10ms	>10ms	3-5ms	3-5ms	3-5ms	>1s	10min	>3min	3-10min
Samovolné vybíjení	až 25% v prvních 48h	10-15%/den	5-15%/h	0,1-0,4%/den	5%/měsíc	10%/den	0,1-0,4%/den	0,003-0,03%/den	0,005-0,02%/den	0,5-1%/den
Životnost cyklů	>1mil.	>1mil.	>1mil.	500-2000	2000-7000	5000-10000	>10000	>5000		
Životnost [roky]	15	20	15	5-15	5-20	15-20	10-15	20	80	25
účinnost	77-83	80-90	80-95	70-75	80-85	68-75	70-80	34-40	75-82	60-70
Krátká doba (<1min)	Velice vhodné	Velice vhodné	Velice vhodné		Méně vhodné		Méně vhodné			
Střední doba (<1min<2d)			Méně vhodné	Velice vhodné	Velice vhodné	Vhodné	Vhodné	Méně vhodné	Vhodné	Vhodné
Dlouhá doba (>2d)				Méně vhodné		Méně vhodné	Vhodné	Velice vhodné	Velice vhodné	Vhodné

Obrázek 2 Vybrané systémy akumulace energie a jejich vlastnosti [4]

Další faktor ovlivňující možné použití ESS je jejich technologická vyspělost. Na obrázku 3 jsou ukázány technologické vyspělosti jednotlivých vybraných ESS. [25]



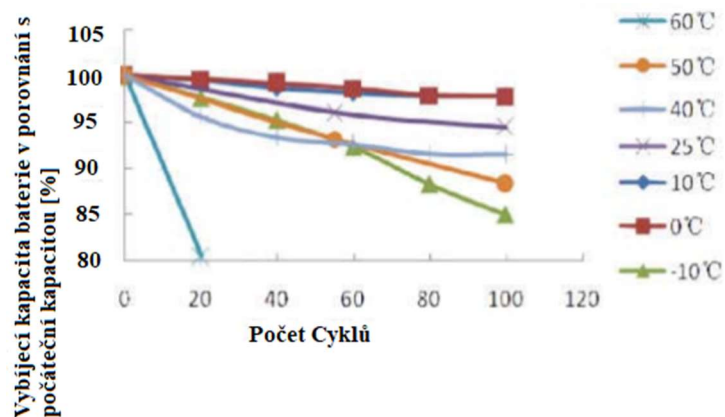
Obrázek 3 Technologická vyspělost vybraných ESS [25]



Obrázek 4 Rozdělení vybraných ESS podle jejich výkonosti, kapacity a formy do které elektrickou energii transformují [8]

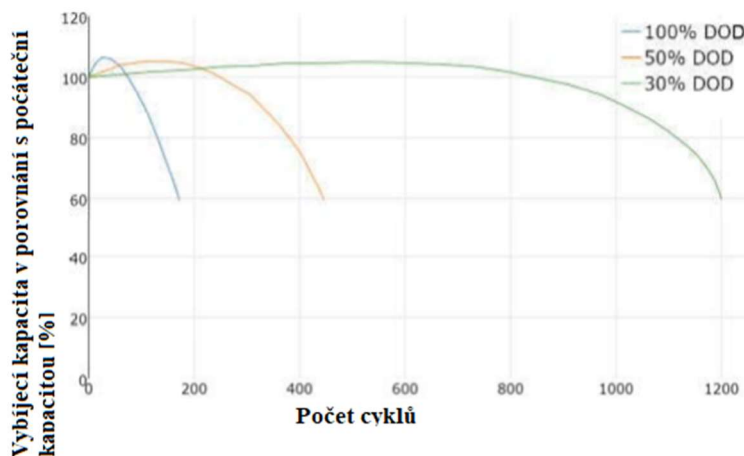
Baterie

Existuje mnoho druhů baterií, které mají různé vlastnosti. V konkrétních příkladech HESS jsou nejčastěji použity olovené a lithium iontové akumulátory. Baterie jsou v podstatě dvě elektrody ponořené do elektrolytu, který umožní výměnu iontů. V posledních letech jsme mohli vidět neustálý vývoj baterií v oblasti bezpečnosti, kapacity, výkonu, účinnosti, ceny a životnosti. Baterie disponují skvělými vlastnostmi. Vyznačují se relativně malým specifickým výkonem a relativně vysokým množstvím uskladněné energie. Značně výhodný nízký poměr ceny a uskladněné energie je jeden z důvodů jejího velkého využívání. Baterie je dlouhou dobu komerčně využívaný ESS. Na druhou stranu, baterie jsou vhodné pro stálý, příliš nekolisavý odběr nebo příjem energie. Největší nevýhodou baterií je jejich životnost, kterou ovlivňuje mnoho faktorů. Hlavním faktorem ovlivňujícím tuto vlastnost baterie je počet nabíjecích a vybíjecích cyklů (cyklová životnost), teplota a pracovní rozsah, ve kterém baterie pracuje (viz Obrázek 5). Cyklová životnost je počet nabíjecích a vybíjecích cyklů, který baterie provede, dokud kapacita baterie neklesne pod 80 % původní kapacity. [2] [1] [23]



Obrázek 5 Vliv pracovní teploty na životnost li-iontové baterie [23]

Jednou z hodnot charakterizující pracovní rozsah baterie je hloubka vybití (DOD). DOD je značena v procentech. Je-li DOD 100 %, je baterie na minimální hranici pracovní kapacity. Baterie pracuje obvykle v určeném rozsahu DOD, který má vliv na její cyklovou životnost (viz Obrázek 6). Vybíjením baterie nad 100 % DOD (hluboké vybíjení) také dochází ke značnému snížení její životnosti. Další veličinou je stav nabití (SoC), který se uvádí také v procentech. SoC 100 % je horní hranice nabití a 0 % spodní hranice (baterie je vybita). [2]



Obrázek 6 Závislost kapacity olovené baterie na jejím pracovním rozsahu [23]

Olověné baterie jsou starší technologií a jsou již dlouhodobě používány. Jejich instalační cena a cena potřebná pro údržbu je poměrně nízká. Životnost a s ní spojené vlastnosti jsou závislé na provozní teplotě a míře vybíjení baterie. Olověná baterie se skládá z jedné elektrody, která je vyrobena z olova a druhé elektrody, která je z oxidu olovičitého. Obě tyto elektrody jsou ponořeny v elektrolytu, kterým je roztok kyseliny sírové ve vodě. Probíhá-li vybíjení baterie, elektrody se mění na síran olovnatý a elektrolyt se mění především na vodu. Jediný článek olověné baterie je schopen produkovat 2,15 V. Životnost olověné baterie závisí kromě počtu cyklů také na okolní teplotě. Pro představu, správně udržovaná a nepřilíš zatěžovaná olověná baterie vydrží při teplotě 25 °C 10 let. Tato životnost bude méně než poloviční, bude-li pracovní teplota 35 °C a vyšší. Životnost se také snižuje, je-li baterie přebíjena, nebo naopak vybíjena nad 100 % DOD. [23] [2]

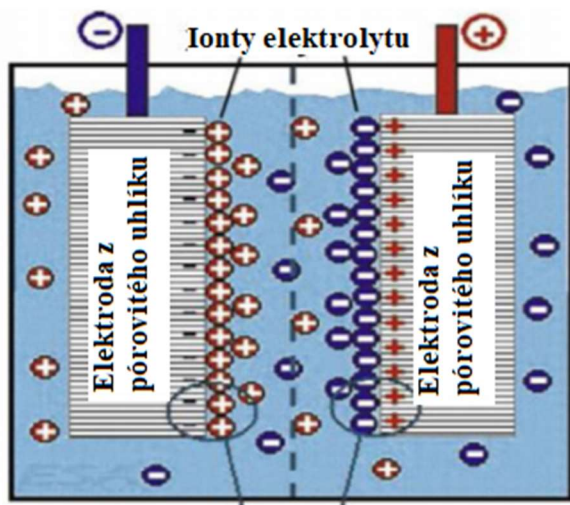
Lithium iontové baterie (li ion) mají oproti olověným bateriím vyšší hustotu energie a vyšší cyklovou životnost. Proto se často využívají v přenosných zařízeních jako například notebooky, telefony a podobně. Tyto vlastnosti jsou ale vyváženy vyšší pořizovací cenou. Pořizovací cena li ion baterie oproti olověné baterii se stejnou kapacitou, je minimálně dvakrát taková. Tato baterie při nabíjení využívá transfer lithiových iontů, které jdou od anody ke katodě. Naopak, při vybíjení přecházejí ionty z katody do anody. [23]

Pro zlepšení životnosti baterie ji můžeme zapojit do hybridního systému společně s jiným ESS. [21]

Superkapacitor

Superkapacitor, (SC) též známý jako ultrakapacitor, nebo dvouvrstvý kondenzátor má hustotu možné uložené energie o dva řády vyšší oproti tradičním elektrolytickým kondenzátorům. Na druhou stranu v porovnání hustot maximální uskladněné energie baterie a SC, má SC tuto hodnotu nižší. Disponuje ale vysokou cyklovou životností, nízkým reakčním časem a vysokým výkonem. S těmito vlastnostmi ho je výhodné v HESS použít jako ES1. [4] [15] [1]

Oproti baterii, která ukládá energii do chemické energie, SC ukládá energii do statického náboje. Zvýšení kapacity kondenzátoru lze docílit několika způsoby: zvýšením napětí, zvětšením povrchu elektrod, nebo zmenšením vzdálenosti mezi nimi. K dosažení vysoké kapacity SC je využíváno velkého povrchu elektrod a organického elektrolytu, který obě tyto elektrody odděluje (viz obrázek 7). Na rozdíl od konvenčních kondenzátorů, kde je náboj vázán polarizací dielektrika, u SC dochází k přesunu nabitých částic elektrolytu. Tímto se dosahuje velmi malé vzdálenosti nabitých nábojů okolo 1 nm. Toto je další fakt zvyšující kapacitu SC. Materiály, ze kterých jsou elektrody tvořeny, jsou pórovité s povrchem několik set až několik tisíc čtverečních metrů na jeden gram materiálu například Raneyovy kovy, nebo materiály na bázi uhlíku, jako saze. Saze dávají SC vyšší energetickou hustotu, ale zároveň svou rezistivitou snižují hustotu výkonu. Na druhou stranu Raneyovy kovy jsou charakteristické svou nízkou rezistivitou a malým povrchem, díky němuž SC nemá energetickou kapacitu jako u sazí. S pomocí kompromisu, při kterém se smíchají saze a kovy může být dosaženo vysoké kapacity i výkonu zároveň. SC díky využití nových materiálů dosahuje desetinové hustoty energie baterie. [15] [27]



Dvouvrstvý Kapacitor (obsahující vrstvy iontů a solvatovaných iontů)

Obrázek 7 Superkapacitor [23]

Výzkum materiálu elektrod se soustředí na vývoj uhlíkových nano materiálů. Nano částice typu aktivní uhlí, grafen a karbonové nano trubice mohou být vyráběny z odpadu při výrobě palmového oleje. Využívá se zde pyrolýzy. Aktivní uhlík a grafen jsou produkovány z palmové biomasy. Takto vyprodukovaný pórovitý grafen má plochu 401,17 m²/g a aktivní uhlí má plochu 383,748 m²/g. [16]

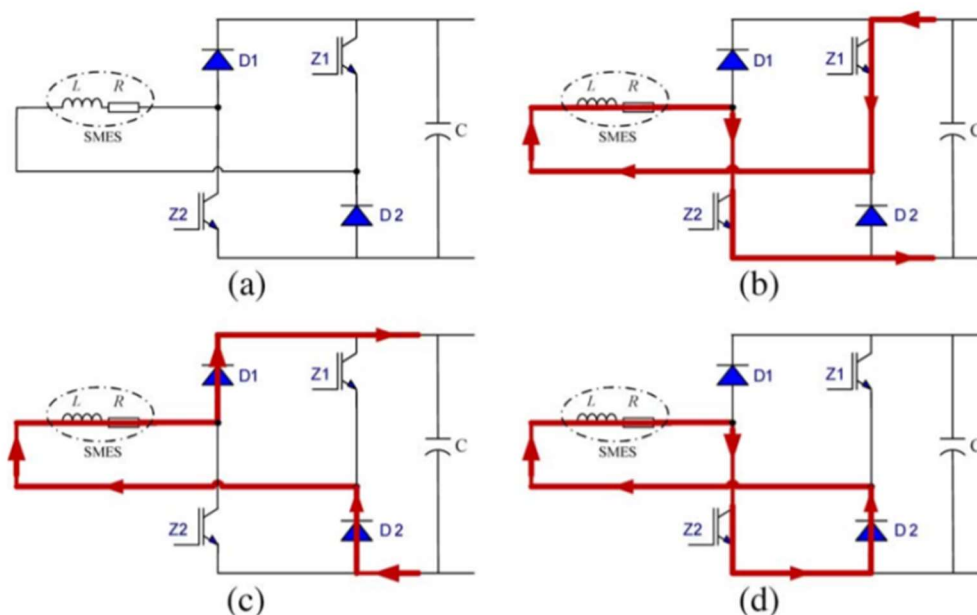
V posledních letech dochází ke snižování cen SC díky neustálému vývoji technologie nových materiálů a metod. Snížení cen se v budoucnu očekává, kvůli rostoucí celkové produkci SC.
[27]

Akumulace energie do magnetického pole supravodivé cívky

Akumulace energie do supravodivé cívky (SMES) má některé vlastnosti podobné jako SC, například vysokou hustotu výkonu, vysoce cyklovou životnost a rychlý reakční čas. [32]

Oproti SC, má SMES v hybridním systému mnoho výhod. Jmenovité napětí SC se pohybuje od 2,5 V do 3 V a je závislé na stavu jeho nabití. Je-li SC plně nabit, jeho výstupní napětí je maximální. Na druhou stranu je-li SC vybit, je jeho výstupní napětí slabé. K dosažení vyššího pracovního napětí se SC zapojují do série. Při sériovém zapojení se ale redukuje jejich celková kapacita. Navíc je potřeba SC doplnit ochranou proti přepětí. SC tedy pro připojení do systému vyžaduje regulaci napětí, ke kterému slouží step-up, nebo step-down regulátory. SMES, na rozdíl od SC, step-up nebo step-down regulátory nevyžaduje. Jeho řízení je relativně jednoduché a může být plně zapojen do sítě. SMES je velice výhodné použít jako ES1 kvůli jeho vysokému výkonu, vysoké účinnosti a krátkému reakčnímu času. [6][7] [32]

SMES akumuluje energii ve formě magnetického pole supravodivé cívky. Obrázek 8 ukazuje zapojení SMES a způsob jeho nabíjení a vybíjení. Pro dosažení vysoké energetické kapacity by musela být tato cívka obrovská. Navíc supravodivá cívka vyžaduje i relativně drahé materiály a hluboké podchlazení. Z tohoto důvodu je tato technologie velice nákladná. [4] [6] [32]

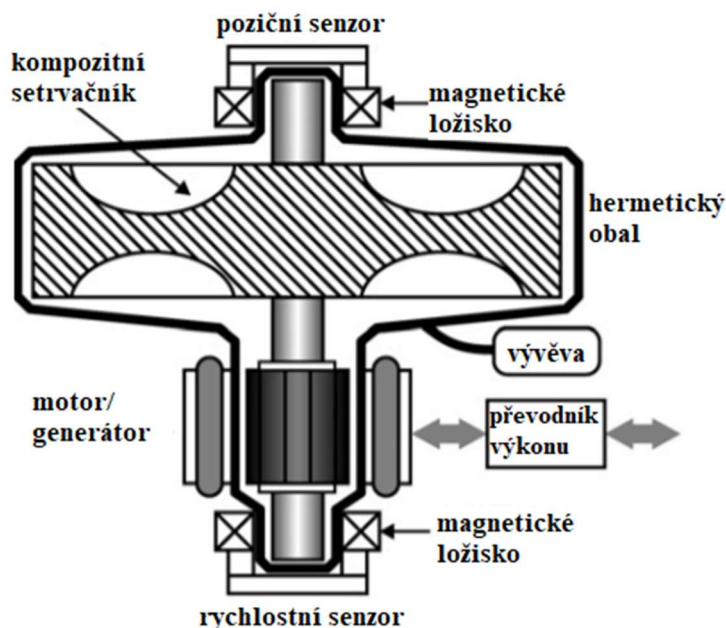


Obrázek 8 Rozhraní obvodu SMES a jeho zapojení při rozdílných stavech. (a) zapojení (b) nabíjení (c) vybíjení (d) záloha [32]

Kvůli potřebě chladicího zařízení je použití SMES limitováno na převážně stacionární systémy, jako jsou například rozvodny pro kolejová vozidla. Byly již navrženy i systémy pro akumulaci energie při brzdění automobilů, ale zatím SMES není na takové úrovni vyspělosti, aby byl tento systém prakticky vyzkoušen. [6]

Setrvačnick

Předností setrvačnicku je vysoká cyklová životnost, účinnost, krátký reakční čas, schopnost akumulovat a distribuovat energii vysokým výkonem po mnoho cyklů beze změny úložné kapacity, nebo účinnosti. Podobně jako SMES, má setrvačnick vlastnosti v hybridním systému charakteristické pro ES1. Na rozdíl od SMES, baterií, nebo SC setrvačnick nevyžaduje chemikálie a může být ekologičtější řešením. Dokáže rychle akumulovat, nebo generovat uloženou energii a tím stabilizovat napětí a frekvenci v síti [6] [22]



Obrázek 9 Základní uspořádání moderního integrovaného vysoce rychlostního setrvačnicku [9]

Využití setrvačnicků je vhodné pro aplikace s vysokými výkony a krátkou dobou uložení energie. S použitím magnetických levitačních ložisek může doba vybíjení dosáhnout i desítek minut. [6]

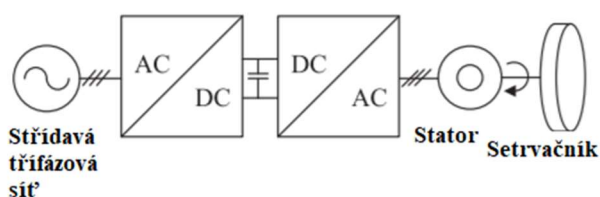
Setrvačnick (viz obrázek 9) uchovává svou energii ve formě kinetické energie v rotujícím setrvačnicku na hřídeli s rotorem motoru/generátoru. Hřídel je uložena v ložiscích, která pro snížení ztrát třením mohou být magnetická. Ložiska jsou jednou z velice důležitých součástí setrvačnicku. Podle rychlosti otáčení se setrvačnicky dělí na vysoce rychlostní (až 100 000 ot/min) a nízko rychlostní (méně než 6 000 ot/min). [10]

Požizovací cena vysokorychlostních setrvačnicků je až pět krát vyšší oproti nízko rychlostním. Rotory těchto setrvačnicků jsou z důvodů vysokého namáhání vyrobeny z kompozitních materiálů, což má za následek i snížení hmotnosti. Nízko rychlostní setrvačnick je charakteristický svými vyššími výkony oproti vysokorychlostnímu. Na druhou stranu vysoce rychlostní setrvačnick disponují vyšší hustotou uchované energie. [10]

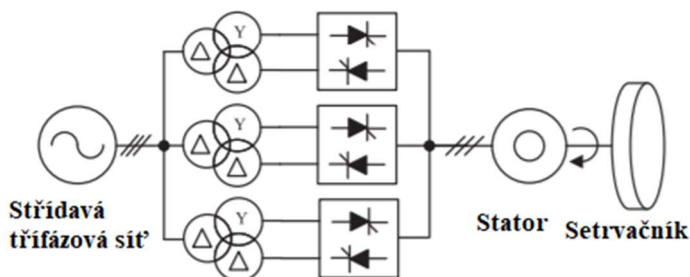
Velice důležitou součástí setrvačnicku jsou jeho ložiska. Mechanická ložiska při takto vysokých rychlostech mají relativně nízkou životnost, vyžadují mazání a také častou údržbu. Navíc tření

v nich způsobuje nežádoucí ztráty. Z těchto důvodů jsou zde proto často využívána permanentní, či aktivní magnetická ložiska. Přednost permanentních magnetických ložisek spočívá ve velice nízkých ztrátách a nízké pořizovací ceně. Postrádají však schopnost dostatečného tlumení, a proto jsou často použity jako pomocná ložiska v kombinaci s jiným typem ložisek. Aktivní magnetická ložiska jsou používána taky jako pomocná ložiska, kdy je využíváno jejich vlastností k redukci vibrací rotoru. Tato ložiska obsahují cívky měnící elektromagnetické síly působící na hřídel. Síly na hřídel jsou aktivně řízeny řídicí jednotkou na základě zpětné vazby a dokáží aktivně tlumit a polohovat hřídel. Jsou zde ale ztráty v cívkách. Naskytá se zde uplatnění supravodivých magnetických ložisek, která mají velice nízké ztráty, ale jejich pořizovací cena, díky potřebnému chladicímu systému je vysoká. Progres v oblasti vývoje supravodivých materiálů může v budoucnu přinést snížení ceny a velikosti potřebného chladicího zařízení. [10]

K třífázovému propojení sítě a generátoru/motoru setrvačnicku může být použit cyklokonvertor (viz obrázek 11), který jako spínače většinou používá tyristory. Nevýhodou cyklokonvertoru je celkové harmonické zkreslení, složité řízení a vhodnost pro nižší výkony. Mnohem používanějším propojení je AC-DC-AC zapojení konvertorů (viz obrázek 10), také známo jako topologie „back-to-back“. Třífázový střídavý proud je zde převeden na stejnosměrný a pak je tento stejnosměrný proud převeden na střídavý třífázový proud libovolného napětí a frekvence. Pro zlepšení vlastností je možné použít vícestupňový konvertor a dosáhnout tak menšího harmonického zkreslení napětí a proudu a vyšší účinnosti. [10]



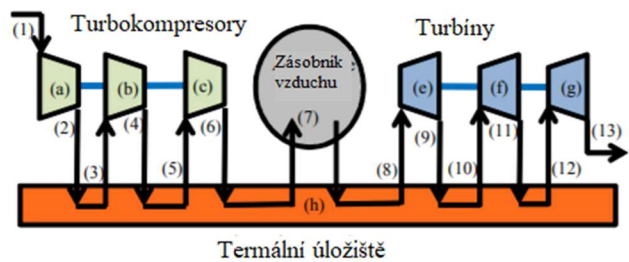
Obrázek 10 zapojení AC-DC-AC [10]



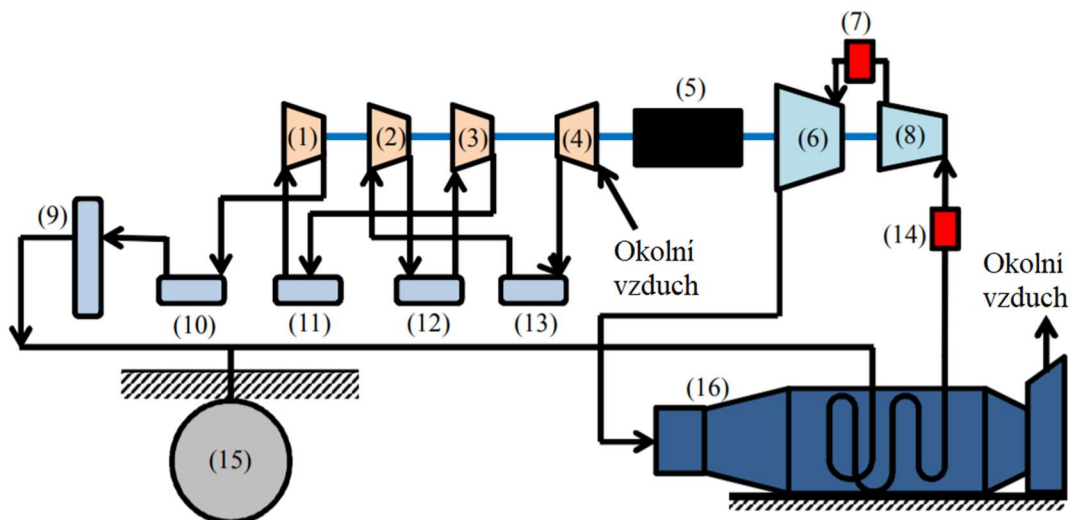
Obrázek 11 Schéma cyklokonvertoru [10]

Akumulace energie do stlačeného vzduchu

Akumulace energie do stlačeného vzduchu (CAES) ukládá elektrickou energii ve formě energie stlačeného vzduchu. Tento ESS se kapacitně a výkonnostně blíží přečerpávací nádrži. CAES na rozdíl od přečerpávací nádrže není v takové míře limitován geografickou polohou, a proto nejsou potřeba dělat úpravy prostředí v takové rozsahu, což je velkou výhodou. Princip spočívá ve stlačení vzduchu do zásobníku kompresorem v době přebytku energie v síti. Nastane-li poptávka po energii, uložený vzduch se ze zásobníku vpustí do turbíny, která je na společné hřídeli s generátorem/motorem a kompresorem. Hřídel je také opatřena spojkami, aby bylo možné oddělit generátor od kompresoru v době generování energie do sítě a naopak při akumulaci by byla turbína odpojena. Pro zvýšení účinnosti ESS se používají kompresory vícestupňové, vybavené mezichladiči. Před turbínou může být v systému i spalovací komora spalující fosilní paliva (viz obrázek 13). Adiabatická akumulace energie do stlačeného vzduchu (A-CAES), už jak název napovídá, navíc ukládá teplo z mezichladičů, kterým je později ohříván vzduch před vstupem do turbíny a tím zvyšuje účinnost ESS (viz obrázek 12). Tepelné úložiště, ve kterém se uchovává teplo z mezichladičů je tvořeno vysokoteplotním betonem, nebo roztavenými solemi. Jsou používány i keramické, šterkové nebo vodní atmosférické zásobníky. Reakční doba CAES je poměrně dlouhá a může dosahovat i 10 minut. Na druhou stranu, CAES může disponovat vysokým výkonem a obrovskou kapacitou potenciální uložené energie. V potenciálním hybridním systému zastává CAES funkci ES2. Stejně jako přečerpávací nádrže, může hrát CAES velkou roli v energetické stabilizaci rozvodné sítě. [4] [13] [11]



Obrázek 12 A-CAES



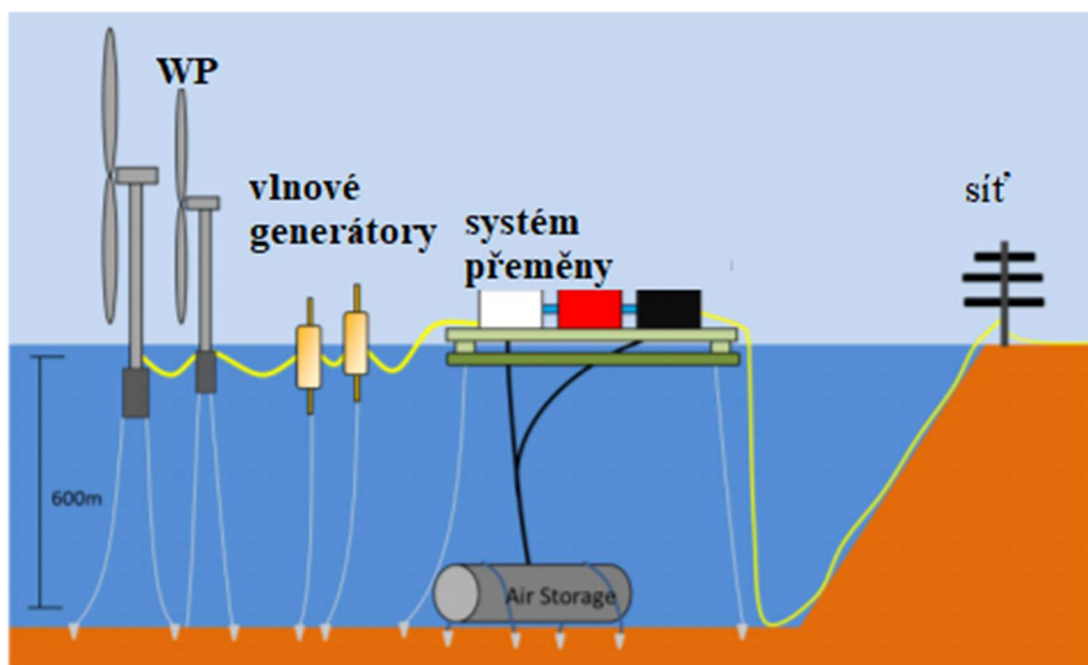
Obrázek 13 Schéma CAES (1-4): kompresory; (5): motor/generátor; (6), (8): turbíny; (7), (14): spalovací komory; (9-13): mezichladiče; (15) zásobník vzduchu; (16): rekuperace [11]

Velikost vzduchového zásobníku musí být dostatečně velká s ohledem na maximální úložnou kapacitu energie a výkon generátoru, respektive motoru. Doba nepřetržité akumulace, respektive uvolňování energie, se může pohybovat až v řádech dnů s výkonem i desítek MW. K uložení takto velkého množství energie je potřeba obrovských zásobníků, které musí být vzduchotěsné. Jednou z možností je využít podzemních dutin přírodního původu, jako například solné jeskyně. Vhodné jsou i k tomuto účelu upravené nepoužívané doly, uměle vytvořené skalní dutiny, nebo zásobníky vzduchu na zemi. Pozemní zásobník vzduchu je ale velice nákladný a jeho kapacita limitována v porovnání s podzemními útvary. [6]

V pobřežních oblastech Severní Karolíny je zkoumána technologie uskladnění vzduchu ve vzduchových vacích (viz obrázek 14) na dně moře (viz obrázek 15). V hloubce několikaset metrů působí na vaky tlak okolí, který je stejný jako má vzduch ve vaku. Tlak ve vacích je v tomto případě 6 MPa, navíc se dá považovat za konstantní oproti konvenčním úložištím. Konstantní tlak je přímo úměrný hloubce, ve které se vak nachází. Toto řešení má vysoký potenciál pro obnovitelné zdroje energie v přímořských, nebo mořských oblastech. Mezi pobřežní zdroje obnovitelné energie se řadí například větrné, vlnové, přílivové elektrárny, ale také zdroje energie využívající podmořských proudů. Tento konkrétní ESS využívá A-CAES s výkonem 230 MW s nepřerušovanou dodávkou po dobu 10 hodin. ESS s kapacitou 1 GWh dosahuje celkové účinnosti systému 65,9 %. [11]



Obrázek 14 Podvodní zásobníky vzduchu [11]



Obrázek 15 Schéma CAES aplikovaného mimo pevninu [11]

V tabulce (viz Obrázek 16) jsou ukázány dva příklady CAES, z níž jedna je vybavená rekuperací. CAES McIntosh, který je vybaven rekuperací vzduchu, má díky ní o 25 % nižší spotřebu paliva. [11]

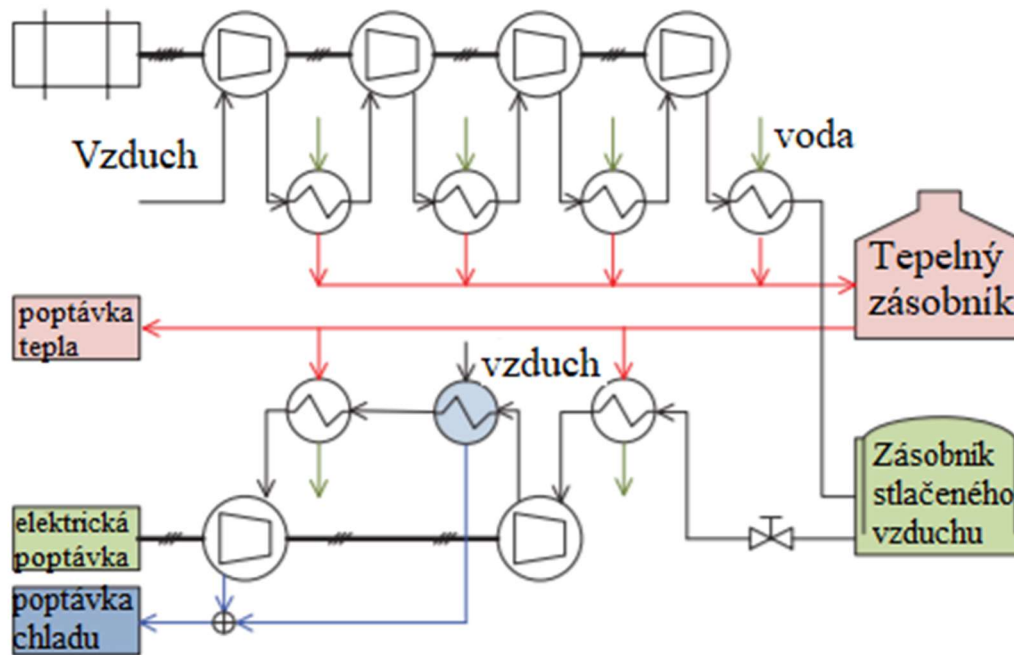
Parametry	Huntorf (Germany)	McIntosh AL (USA)
rok výstavby	1978	1991
Výkony		
Turbína	290 MW (2 hodiny)	110 MW (26 hodin)
Kompresor	62 MW (12 hodin)	53 MW (41 hodin)
Zásobník vzduchu	310,000 m ³	560,000 m ³
Hmotnostní průtoky		
Turbína	417 kg/s	157 kg/s
Kompresor	108 kg/s	94 kg/s
Tlak zásobníku		
(Min)	50 bar	46 bar
(Max)	70 bar	74 bar
Vysocetlaká turbína		
tlak	43 bar	44 bar
teplota vzduchu	550 °C	540 °C
Nízkotlaká turbína		
tlak	12 bar	16 bar
teplota vzduchu	830 °C	870 °C
Palivo	Plyn	Plyn/ropa
Rekuperace	ne	ano
Zhodnocení paliva	5,800 kJ/kWh	4,300 kJ/kWh
Celková účinnost	42%	54%

Obrázek 16 Porovnání CAES s rekuperací a bez rekuperace [11]

Technické veřejnosti jsou známa řešení s reverzními stroji, které mohou pracovat jak v motorickém, tak i generátorickém režimu. K neznámějším, kromě elektrických (motor/generátor), patří třeba reverzní vodní turbíny. Díky svým schopnostem pracovat jak v turbinovém, tak i v čerpadlovém režimu, získala svoje nezastupitelné místo v oblasti akumulacích přečerpávacích vodních elektráren. Podobné vlastnosti jako reverzní turbína má v oblasti plynů reverzní turbokompresor, který byl patentován v brněnském Siemensu. Jeho průtočné části jsou navrženy tak, že v jednom směru otáčení mohou pracovat jako kompresor, kdy spotřebovávají energii na stlačování plynu a při změně smyslu otáčení mohou pracovat i jako turbína. [30]

Pokročilá adiabatická akumulace energie do stlačeného vzduchu (AA-CAES) slouží nejen k akumulaci energie, ale i k využití vysokých teplot vznikajících při kompresi, respektive chladu při expanzi v turbíně k úpravě prostředí. Využívá vícestupňovou kompresi s tepelným úložištěm tepla odebraného v mezichladičích (viz obrázek 17). Tepelné úložiště je navrženo

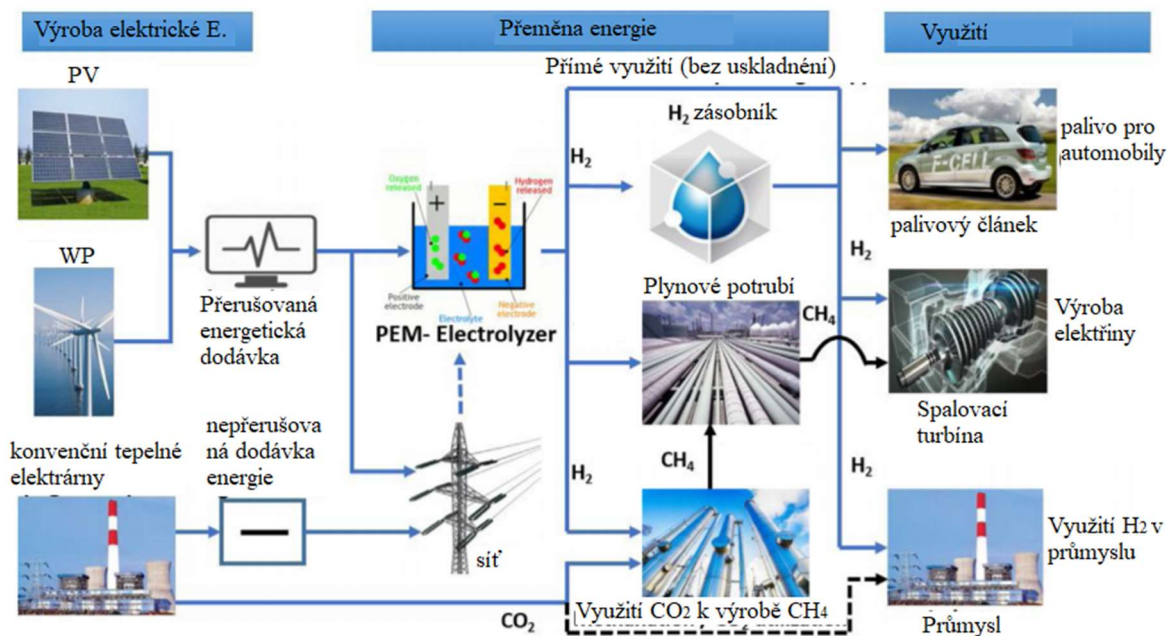
pro teploty nepřesahující 100 °C a teplo je zde ukládáno do vody při atmosférickém tlaku. Tento systém navíc odvádí své médium a uspokojuje poptávku po teplém, nebo studeném vzduchu, kterým snižuje spotřebu elektrické energie klimatizací. Je-li potřeba ochladit prostředí, vzduch jdoucí z turbíny projde přes výměník s okolním prostředím, kde dané prostředí ochladí a následně před vstupem do druhé turbíny je zvýšena jeho teplota teplou vodou z tepelného úložiště. [12]



Obrázek 17 Schéma navrženého více stupňového AA-CAES systému. [12]

System akumulace energie do vodíku

Princip akumulace energie do vodíku spočívá v elektrolýze vody, kde je voda rozdělena na vodík a kyslík. Tento vodík se může použít pro pohon vozidla, nebo se z něj může vytvářet elektrická energie jeho spalováním. Dalším využitím je ho využít k jinému zpracování v průmyslu (viz obrázek 18), jako například v k výrobě syntetického zemního plynu. Elektrolýza je prováděna energií, která je v síti nadbytečná. Vodík je po elektrolýze skladován v zásobnících. Je-li energie potřeba, může být z chemické energie plynů přeměněna zpět na elektrickou energii v palivových článcích, nebo ve spalovací turbíně s generátorem. V palivových článcích je z atomů vodíku a kyslíku vytvořena molekula vody a elektrická energie společně s teplem. Množství uložené energie může být několikanásobně vyšší než při ukládání energie do přečerpávacích elektráren, nebo CAES. Tento systém ale má mnoho nevýhod. Jednou z nevýhod je technologická nevypěstlost celého konceptu, který v této době není vhodný pro širší komerční využití. S tímto faktem jsou spojené také vysoké ztráty při jednom cyklu, kdy se voda přemění na vodík a kyslík a následně zpět na vodu v palivovém článku. Při tomto cyklu vzniká značné množství nevyužitého tepla. Vyšší účinnosti lze dosáhnout spalováním vodíku v turbíně, ale v tomto případě se objeví nevýhoda delšího reakčního času, který může být i 10 minut. Účinnost elektrolyzáru může v dnešní době dosahovat až 60 % a účinnost palivového článku je okolo 41 %, tato hodnota se může zvýšit, bude-li využito i odpadní teplo. Účinnost celého cyklu se spalovací turbínou a využitím odpadního tepla dosahuje 34-40 %. Velký potenciál má vodík a palivové články v automobilním průmyslu, kde by vodík vytvořený přebytečnou energií mohl pohánět auta. Vodík může být v autech spalován podobně, jako zemní plyn v motoru s vnitřním spalováním, nebo může vyrábět elektrickou energii v palivových článcích a napájet elektromotory. Další potenciální využití tohoto ESS je v akumulaci energie na velice dlouhou dobu, v řádech týdnů. [4] [24] [25] [26] [28] [31]

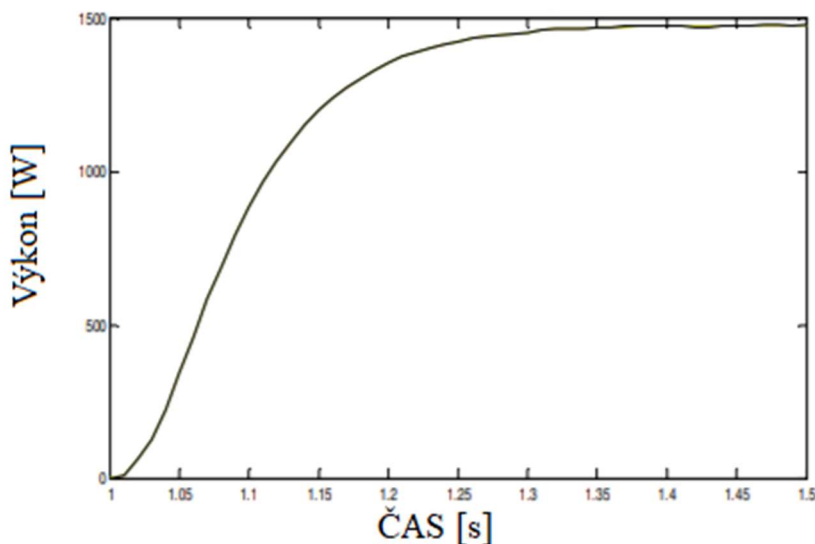


Obrázek 18 Celkový koncept pro využití Vodíku a Syntetického Přírodního Plynu jako nosiče energie. [25]

Pro nestacionární zařízení může palivový článek společně s palivovou nádrží dosáhnout vyšší hustoty energie než baterie. V aplikacích pro silniční vozidla nabízí palivový článek vyšší účinnost v porovnání se spalovacím motorem společně s elektrickým generátorem. Velký problém je ale dosud nevyřešená technologie bezpečného a levného skladování vodíku ve vozidle. Navíc velikost vodíkových molekul způsobuje samovolné ztráty stěnami nádoby. Pro stacionární aplikace, jako například palivové články připojené k budovám, mohou palivové články poskytovat elektrický výkon i teplo a dosáhnout tak vyšší celkové účinnosti. [24] [25]

Elektrolyzátor, ve kterém elektrolýza probíhá je tvořen anodou a katodou, ke kterým je připojeno stejnosměrné napětí. Anoda i katoda jsou ponořeny ve vodě. Začne-li procházet obvodem proud, začnou se u anody tvořit atomy kyslíku a u katody atomy vodíku. Oba tyto plyny vznikly rozpadem molekuly vody, ve které jsou elektrody ponořené. Plyny jsou odděleně zachytávány a uchovávány v zásobících. Způsobů uchovávání vodíku je hned několik: pozemní nádoby, ve kterých je tlak až 900 barů, podzemní solné jeskyně podobné jako u CAES, nebo může být plyn uchováván při nízké teplotě v kapalném stavu. [25]

Palivový článek se obvykle skládá z elektrolytu, který odděluje dvě nebo více elektrod. V transportních aplikacích se nejvíce využívají palivové články s polymerní membránou (PEMFC), které jsou charakteristické vysokou hustotou výkonu, vyšší účinností, nízkou pracovní teplotou, vysokou cenou a malými rozměry. U PEMFC odděluje elektrody membrána, kterou projdou jen atomy vodíku, přičemž jejich elektrony membránou neprocházejí a jsou vedeny elektrickým obvodem z katody na anodu, čímž vytváří elektrický proud. Atomy vodíku a kyslíku se u anody sloučí a vznikne teplo a voda. Reakční čas PEMFC je v jednotkách sekund (viz obrázek 19). K hybridizaci se PEMFC především využívá z důvodu zvýšení výkonu a snížení ceny. [24] [26]



Obrázek 19 Reakční čas PEMFC [26]

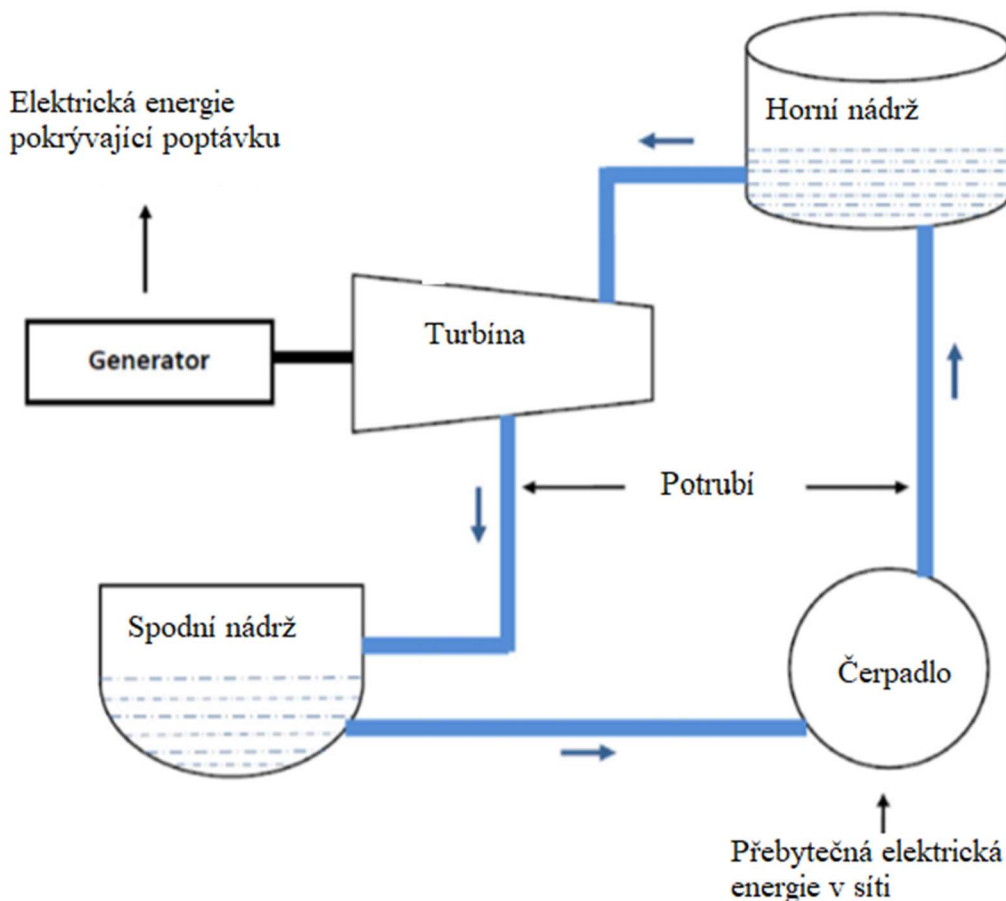
Přečerpávací vodní elektrárna

Přečerpávací vodní elektrárna (PHES) je již vyspělý a dlouhou dobu používaný ESS. Vodní elektrárna, která je udržitelný a obnovitelný zdroj energie, navíc je-li vybavena nádrží, dokáže v této nádrži značnou energii akumulovat a dodat ji do sítě v době, kdy je v ní potřeba. Tato schopnost obnovitelným zdrojům energie, jako například PV a WP, chybí. Díky této vlastnosti je vodní elektrárna schopna zlepšit stabilitu rozvodné sítě, a navíc dokáže kompenzovat případný výpadek jiných obnovitelných zdrojů energie. Počátkem 21. století se technologie PHES stala ekonomicky a technologicky přijatelným řešením pro zlepšení stability rozvodné sítě v době energetických špiček a pro zajištění kvality výkonu PV a WP při připojení do sítě. Příkladem takového systému je PHES systém na španělském ostrově El Hierro (Kanárské ostrovy), kde pomáhá ke stabilitě sítě při integraci WP (viz obrázek 20). Obnovitelné zdroje energie kvůli jejich nestabilnímu a přerušovanému výkonu potřebují dostatečně velké energetické úložiště. K tomuto účelu se nabízí použít PHES. PHES je vhodný nejen pro masivní ukládání energie, ale i pro malé autonomní ostrovní sítě například jen s několika domy. Efektivita PHES se uvádí od 70 do 80 %, některé zdroje uvádí až 87 %. Výkonnostně se tyto ESS ve světě většinou pohybují v rozmezí mezi 1000 až 1500 MW. PHES je největší ESS použitý v rozvodné síti z hlediska energetické kapacity (údaje jsou aktuální k březnu 2012). V Evropě je instalovaný výkon PHES okolo 45 GW (údaje jsou aktuální k březnu 2015). [17] [6] [18] [21]



Obrázek 20 Horní nádrž PHES na Španělském ostrově El Hierro společně s WP. [21]

PHES akumuluje energii ve formě potenciální energie vody, která je přečerpána z nižší nádrže do vyšší nádrže (viz obrázek 21). V době mimo špičku je nevyužitá přebytečná energie použita k pohonu čerpadel, které čerpají vodu ze spodní nádrže do horní. V době energetické špičky, kdy je po energii velká poptávka, je tato voda vypuštěna z horní nádrže přes turbínu zpět do spodní nádrže. Tato turbína roztáčí generátor, který generuje elektrickou energii. Funkci turbíny i čerpadla zastává většinou reverzní turbína, která je schopna vykonávat funkci jak čerpadla, tak i turbíny. Také v motorickém, nebo generátorickém režimu pracuje i motor/generátor, který je s reverzní turbínou spojen hřídelí. [17]



Obrázek 21 Schéma PHES [17]

Použití PHES velice závisí na prostředí, ve kterém má být postaven. Hlavním faktorem je geografická a topografická vhodnost krajiny, především pro vytvoření nádrží s dostatečně rozdílnou výškou hladin a také dostatečným zdrojem vody. Relativně nízkou energetickou hustotu vynahrazuje PHES nízkým poměrem pořizovací ceny a kapacity možné akumulované energie. Zvýšení energetické kapacity lze dosáhnout buď: zvětšením výškového rozdílu nádrží, nebo zvětšením objemu těchto nádrží a tím objemu přečerpávané vody. [17]

PHES lze rozdělit podle výkonosti na velké, malé, mikro a piko. Výkon malé PHES může být až do 10 MW. Mikro jsou považovány PHES do výkonu 100 kW. Můžou poskytnout výkon izolovaným, nebo malým komunitám většinou v menších sítích s PV nebo WP. Pojem piko PHES je používán tam kde je výkon menší než 5 kW. Toto měřítko bývá často použito v kombinaci s PV nebo WP ve vzdálených komunitách, ve kterých není vysoká energetická spotřeba. [17]

V současné době roste trend decentralizace elektrických zdrojů, jako jsou například malé PV na střechách domácností a podobně. S tímto rostoucím trendem se nabízí i využití PHES menších rozměrů například pro jednotlivé budovy, nebo komplexy. Byl zkoumán a navržen PHES o kapacitě 85 kWh pro potřeby pěti budov v Caracasu s komunitou 3000 lidí. Tento systém využíval nádrží, které byly rozděleny do jednotlivých pater budov tak, aby jejich hmotnost nepřesahovala jejich dovolené zatížení. Použití PHES v tomto konkrétním případě bylo více finančně nákladnější než použití olověných baterií. Tento fakt je podle autorů ale vyvážen mnoha výhodami, které PHES přináší. Tato výhoda je například rezervní zásoba vody, jednoduchost celého systému, nebo jeho životnost. [19]

Hybridní systémy akumulace energie s baterií

Baterie-Superkapacitor

Tato kombinace nachází značné využití v izolovaných oblastech, do kterých je drahé a neefektivní stavět vysokonapěťové vedení, ale také v domácnostech a dopravních prostředcích. [6] [3] [8]

Baterie v tomto systému má roli ES2 a uchovává největší část energie, která je využívána na kompenzaci fluktuace energie v dlouhodobějším horizontu. [1]

Pro stále rostoucí počet fotovoltaických (PV) a větrných (WP) elektráren, které tvoří mikro sítě částečně nezávislé, nebo úplně nezávislé na rozvodné síti, se ve velké míře jako jejich úložiště energie používá baterií. PV a WP mají nestálý výkon což v kombinaci s rychlými výkyvy v síti má velký vliv na jejich životnost. [1] [8]

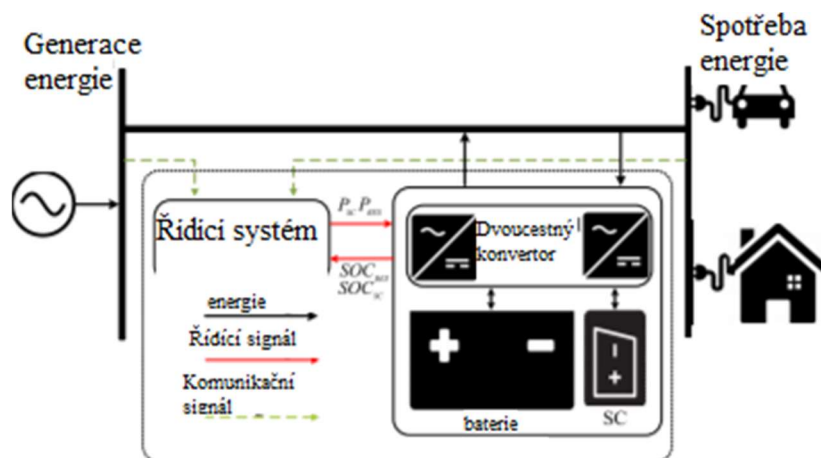
SC na rozdíl od baterie má relativně velkou cyklovou životnost. Nevýhodou jsou samovolné ztráty, které se vyskytují při dlouhodobějším uchovávání energie. Hlavním nedostatkem oproti bateriím je nízká hustota energie společně s vysokým poměrem pořizovací ceny a jejich kapacitou. SC není schopný akumulovat velké množství energie, jako baterie, na druhou stranu je schopen velké množství energie poskytnout za velice krátký čas, což je pro baterii obtížné. S těmito vlastnostmi se SC skvěle doplňuje s bateriemi. Potenciální hybridní systém těchto dvou ESS může vytvořit ideální HESS pro nahrazení baterií jako jediného ESS. [1][6]

Takto vytvořené HESS musí mít vysokou hustotu výkonu na pokrývání a kompenzaci rychlých výkyvů v síti a vysokou hustotu uskladněné energie, která zaručuje dlouhodobější nezávislost na rozvodné síti. V hybridizaci SC-baterie, jak již bylo řečeno, je baterie ES2 úložiště většiny energie a SC je ES1. SC svým vysokým výkonem a rychlou reakcí pokrývá vysokofrekvenční a náhlé výkyvy v síti. Tato schopnost SC snižuje dynamické namáhání baterie rychlými fluktuacemi poptávky, nebo přebytku energie v systému. [1][4]

Vznikla silná potřeba pro navržení levného, vysoce kapacitního a dlouhodobě fungujícího úložiště energie pro ukládání energie vytvořené PV a WP. Hlavním cílem navržení HESS baterie-SC je snížit na minimum počáteční náklady optimalizací kapacit baterie a SC. Při navrhování je třeba dbát na to, aby celková účinnost systému byla co nejvyšší a nevznikaly zde zbytečné ztráty v měničích napětí. Cena SC se pohybuje okolo €15000/kWh s počtem životních cyklů 500000. Pro představu, při maximálním 40 % DOD vybíjení se cena olověné baterie pohybuje okolo \$100/kWh s počtem životních cyklů 1475 a li-ion baterie okolo \$400/kWh s počtem životních cyklů 7000.[2] [4]

Ve zkoumaném případě je soustava baterie a superkapacitoru zapojena paralelně do sítě s PV a WP (viz obrázek 22). V tomto případě je v síti střídavé napětí. Z tohoto důvodu je potřeba baterii i superkapacitor připojit pomocí obousměrného AC-DC konvertoru. Tyto konvertory jsou řízeny řídicí jednotkou na základě informací o stavu systému. Jednou z informací je stav nabití baterie a SC. Další proměnou je pak poptávka nebo přebytek energie v síti. Vznikne-li v síti náhlý energetický deficit, klesne napětí v síti. Řídicí systém se jej bude snažit nejprve vyrovnat vysokým výkonem SC tak, aby v prvotní fázi výkon baterie byl minimální a zbytečně se tak nezvyšovalo její namáhání. Výkon baterie by byl plynulejší a jeho hodnota byla rovna

průměrnému výkonu HESS za delší časový úsek. To má za následek zvýšení životnosti baterie. [1]



Obrázek 22 Topologie zapojení SC a baterie do systému s WP a PV [1]

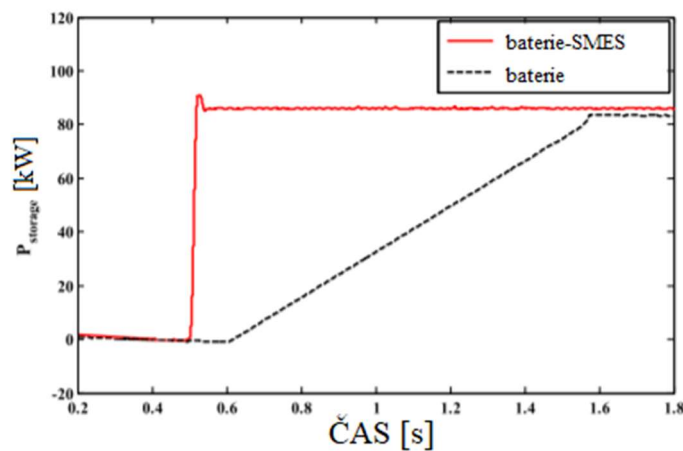
Baterie-SMES

Hybridní kombinace SMES a baterie nabízí dobré předpoklady pro energetické vyrovnávání zapojení PV do sítě. Má potenciál zajistit stabilní připojení WP do rozvodné sítě, nebo rychlé nabíjení elektrických dopravních prostředků. SMES se svými charakteristikami má potenciál být používán pro primární řízení frekvence mikro sítí a ostrovních systémů. Podle popisu v literatuře má schopnost významně ovlivňovat výkyvy v síti a dokáže značně stabilizovat napětí a frekvenci v ní. [7]

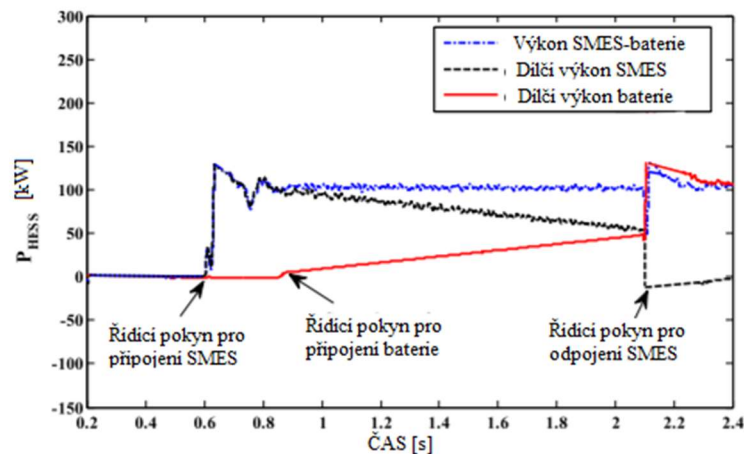
První HESS tohoto typu byl navržen pro rozvodnu vlaků Shinkansen, kde SMES plnil úlohu ES1 a pokrýval krátkodobou fluktuaci energie. Roli ES2 plnila průtoková baterie, která pokrývala dlouhodobější energetické výkyvy v systému. [6]

Byly vytvořené simulace kompenzace energetické fluktuace železnice společně s PV pomocí SMES-baterie. Výsledek těchto simulací ukázal zvýšení životnosti a účinnosti baterie díky zmenšení vybíjecích a nabíjecích cyklů a také snížení zatěžování baterie. [6]

Simulace systému se dvěma PV a SMES-baterie vytvořené v Matlabu simulují přechodové chování sítě při vzniku různých chyb. Ukázaly, že v počáteční fázi reakce na chybu je kombinace SMES-baterie lepší než samotná baterie a dokáže rychleji poskytnout potřebný výkon do mikro sítě (viz obrázek 23). Jednotlivé výkony baterie a SMES v HESS v reakci na tuto chybu jsou ukázány na obrázku 24. [7]

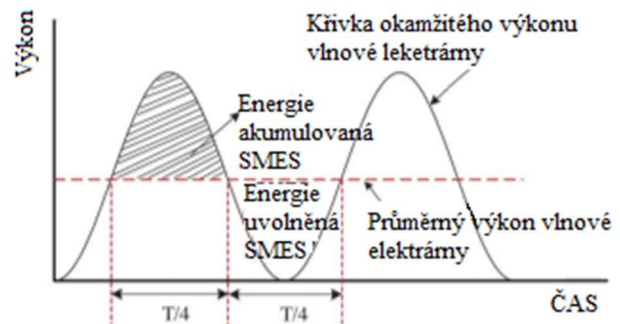


Obrázek 23 Porovnání reakce SMES-baterie a samotné baterie na vzniklou chybu v systému [7]

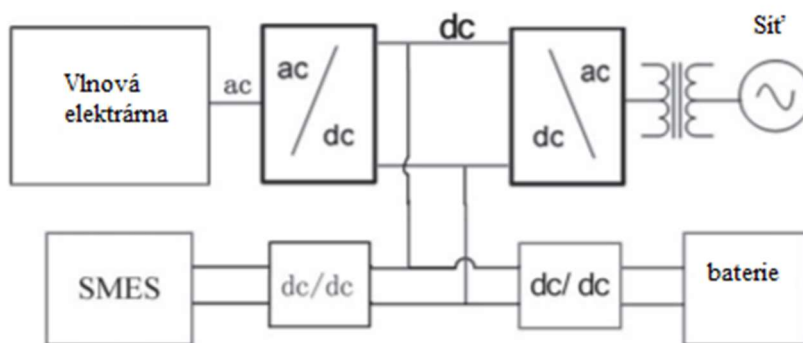


Obrázek 24 Dílčí výkony baterie a SMES v HESS v reakci na vzniklou chybu v systému [7]

Potenciální využití hybridního systému SMES-baterie v budoucnu je jako součást vlnových elektráren. Vlnové elektrárny jsou považovány za méně kvalitní zdroj energie, kvůli přerušovaným dodávkám energie a energetické fluktuaci způsobené vlnami. Simulace zapojení SMES a vlnových elektráren ukázaly schopnost SMES pokrývat vysokofrekvenční, ale i pomalejší energetické fluktuace, které jsou způsobeny periodou vln na hladině (viz obrázek 25). Perioda vln se pohybuje od jednotek po desítky sekund. Vhodně navržený systém, který je složen kombinací SMES a baterie (viz obrázek 26) je schopen zajistit stabilní a plynulou dodávku energie do sítě. [6] [32]



Obrázek 25 Využití SMES pro stabilizaci výkonu vlnových elektráren. [32]



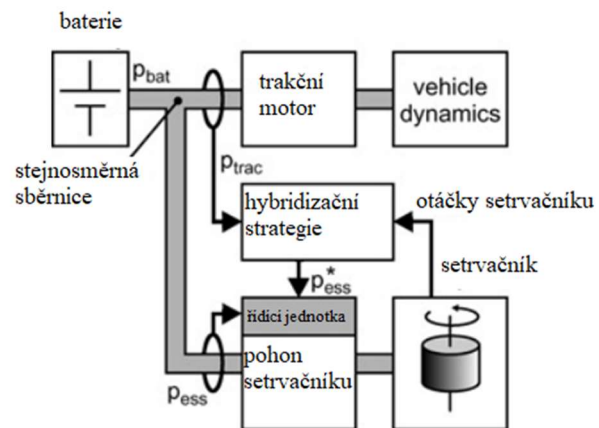
Obrázek 26 Topologie připojení vlnové elektrárny do sítě za pomoci SMES-baterie [32]

Baterie-setrvačnick

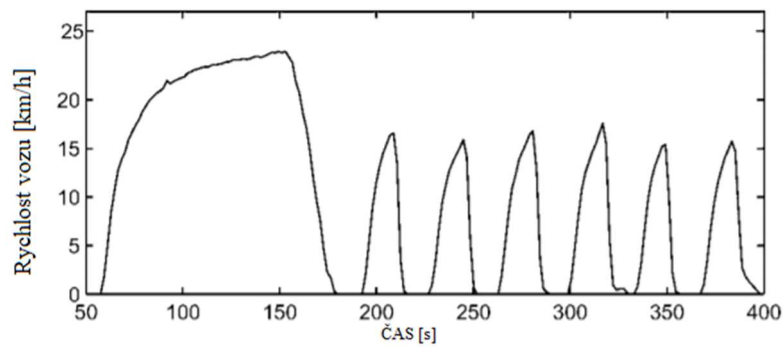
Potenciální využití kombinace setrvačnick-baterie se může nacházet v aplikacích pro vesmírný průmysl. Nedávný vývoj vytvořil setrvačnick pro uchovávání energie satelitu. Navíc lze využít gyroskopických momentů setrvačnicků k polohování satelitu. Vlastnosti systému, jako nabíjení baterie pomocí PV na vesmírné lodi doplněné o setrvačnick mohou být zlepšeny, což může mít za následek zmenšení satelitu a snížení hmotnosti. Rozdíl mezi baterií NiH₂ a systémem se setrvačnickem pro družici EOS-AMI je 55 % úspora prostoru, 35 % úspora hmotnosti a zmenšení plochy solárních panelů o 6,7 %. [6] [10]

V Irsku firma Schwungrad Energie nainstalovala HESS baterie-setrvačnick, aby pomohl připojit obnovitelné zdroje energie do sítě. Jako ES1 byly použity dva 160 kW setrvačnicků od firmy Beacon, které přispějí ke stabilitě sítě, přesněji pomůžou se stabilizací frekvence a napětí. Olověné baterie, které tvoří ES2, disponují výkonem 160 kW a kapacitou 576 kWh. Baterie poskytují energii po dlouhý časový úsek, ale vysoké cyklové zatížení po delší době snižuje jejich schopnosti. Tato kombinace setrvačnick a baterie nabízí ideální ESS pro stabilizování sítě, do které jsou připojeny obnovitelné zdroje energie ve velké míře. [22]

Byla vytvořena simulace zkoumající využití HESS baterie-setrvačnick pro hnací ústrojí těžkých městských vozidel s každodenním provozem. Typickým příkladem jsou popelářské vozy. Popelářské vozy se v městském prostředí často rozjíždí a zastavují, přičemž se tento cyklus mnohokrát opakuje (viz obrázek 28). Takto vzniklé mikro-cykly by značně snižovaly životnost baterie, a proto by popelářský vůz čistě s baterií nebyl vhodný řešením. Pro simulaci byl zvolen vůz o celkové hmotnosti 16 tun s HESS, s kombinací olověné baterie a kompozitního, vysoceotáčkového setrvačnicku s magnetickými ložisky. Baterie i setrvačnick jsou paralelně zapojené k hnacímu ústrojí (viz obrázek 27). Funkcí setrvačnicku je předat svoji energii popelářskému vozu především při akceleraci, respektive odebrat při brzdění vozidla a tím snížit zátěž na baterii. Olověná baterie, která je hlavním zdrojem energie vozu, má hmotnost v tomto případě 4 tuny. Kapacita energie setrvačnicku byla konstruována tak, aby akumulovala energii vozidla jedoucí 25 km/h. Simulace byla vytvořena v Simulinku. K ověření a porovnání výsledků autoři také vytvořili experimentální stolicí, která svými parametry napodobuje podmínky v reálném popelářském voze. [9]



Obrázek 27 Topologie setrvačnick-baterie pro pohon nápravy popelářského vozu. [9]



Obrázek 28 Opakující se cykly způsobené akcelerací a následným zastavením popelářského vozu. [9]

Výsledek zkoumání problému ukázal, že energie uložená v setrvačnicku je dostatečná k zajištění potřebné akcelerace a setrvačnick může být optimálně navržen podle pracovního profilu daného vozu. [9]

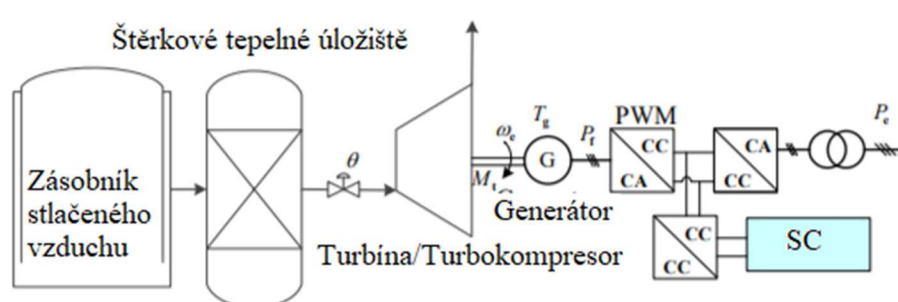
Dynamické zatěžování baterie při akceleraci, nebo brzdění je díky zapojení výkonu setrvačnicku snižen. Experiment tedy prokázal vhodnost tohoto HESS pro využití u hybridizace městských vozů jako popelářské vozy, autobusy, tramvaje apod. [9]

Hybridní systémy akumulace energie s CAES

CAES-SC

V této kombinaci CAES s dlouhým reakčním časem, vysokým výkonem a energetickou kapacitou zastává roli ES2 a je úložištěm většiny energie. CAES je srdcem celého akumulačního systému a SC, které v tomto hybridním systému je na pozici ES1, filtruje a zjemňuje výstupní výkon. Výsledný navržený HESS má teoreticky vysokou úložnou kapacitu s nepřerušovaným vysokým výkonem díky CAES a nízký reakční čas díky SC [6] [13]

Byla vytvořena simulace zkoumající HESS CAES-SC. Systém tvořený A-CAES se šterkovým tepelným úložištěm, SC a zásobníkem stlačeného vzduchu (viz obrázek 29). Zapojení systému do sítě je řešeno pomocí PVM usměrňovače a několika převodníků. Stlačený vzduch mířící ze zásobníku se ohřeje při průchodu tepelným úložištěm. Následně vzduch s vysokým tlakem a teplotou pohání turbínu, která je připojena ke generátoru. Vysokofrekvenční střídavý proud je usměrněn na proud jednosměrný pomocí třífázového usměrňovače. Poté je stejnosměrný proud opět převeden na proud třífázový střídavý v třífázovém invertoru. [13]



Obrázek 29 Schématický diagram A-CAES-SC [13]

CAES-SMES

Teoreticky může být CAES hybridizován společně s SMES pro zlepšení vlastností a flexibility. V takovém HESS CAES disponuje schopností dlouhodobého uchování energie s velkým reakčním časem a SMES s krátkým reakčním časem a vysokým výkonem kompenzuje krátkodobější fluktuaci energie. Tato technologie podle literatury ještě nikdy nebyla navržena. [6]

CAES-baterie

CAES se svým dlouhým reakčním časem a nízkou hustotou výkonu může teoreticky nabídnout vynikající charakteristiky, bude-li zapojen v systému společně s baterií, která disponuje mnohem menším reakčním časem a poměrně vysokým výkonem vzhledem k její velikosti. Nicméně tento HESS podobně jako CAES-SMES ještě nebyl navržen. [6]

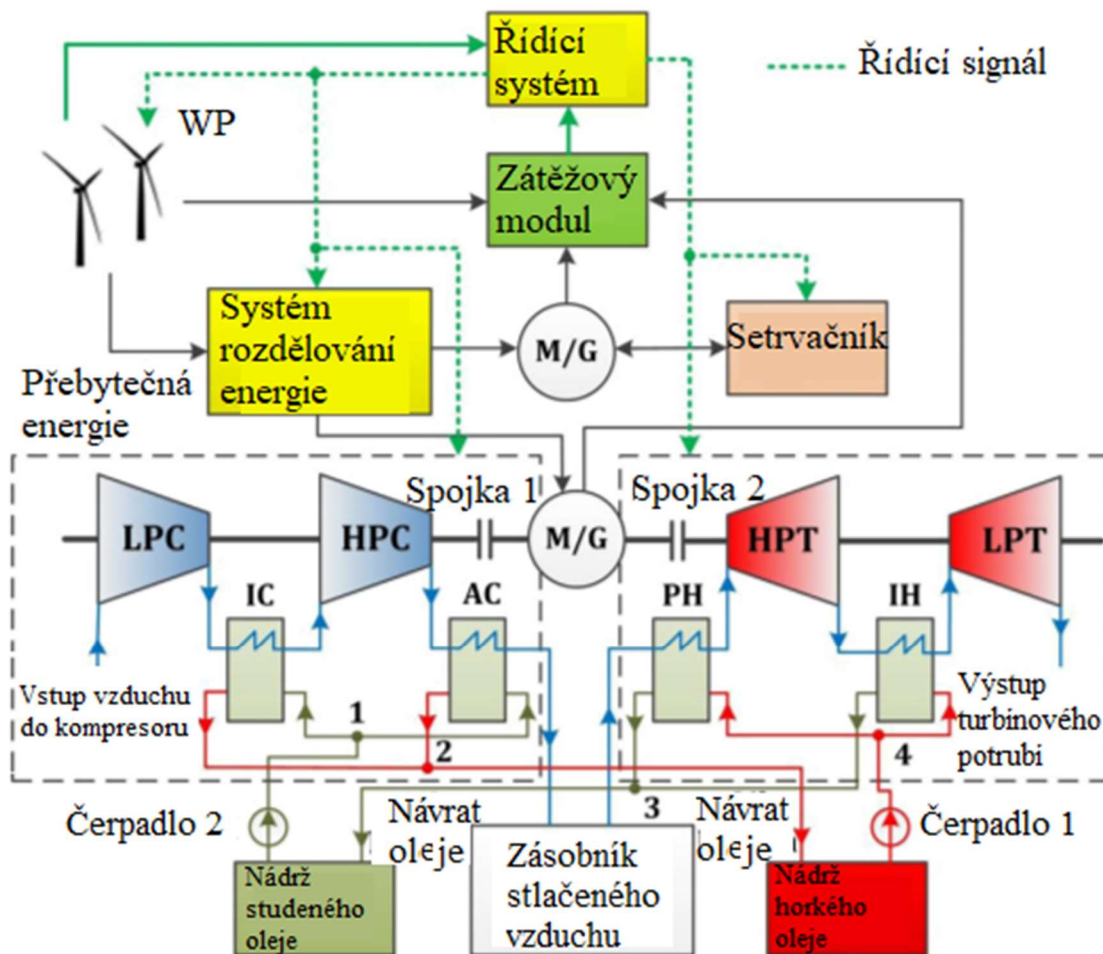
CAES-setrvačnick

Kombinace CAES-setrvačnick byla zatím hlouběji zkoumána jen v jediné studii. Tato studie se zabývá připojením WP do sítě. [6]

WP je považován za kolísavý zdroj energie. Tato kolísavost je způsobená rychlostí větru, která se může často měnit, nebo i úplně zastavit. Pro stabilizaci potřebného výstupního výkonu, nebo pro akumulaci vyrobené energie v době, kdy není zrovna potřebná, se nabízí použít vhodný ESS. Byla zkoumaná kombinace A-CAES a setrvačnicku právě pro tento účel. Účelem HESS bylo pomoci zmírnit negativní vlastnosti WP při připojení do sítě. A-CAES disponuje vysokým výkonem s obrovskou kapacitou možné uložené energie. Na druhou stranu tento vysoký výkon není možno dostatečně rychle měnit a nelze reagovat v potřebné době na energetický stav sítě. Setrvačnick oproti A-CAES postrádá vysokou úložnou kapacitu, ale kompenzuje tuto nevýhodu krátkým reakčním časem. Strategie tohoto HESS využívala setrvačnicku k pokrývání krátkodobější fluktuace a zajištění relativně konstantního a nekolísavého výkonu A-CAES. A-CAES by sloužila k ukládání energii, která by byla vygenerována WP a nebyla zrovna v síti potřeba, respektive k dodávání energie do sítě v době jejího nedostatku. A-CAES tedy zastává funkci ES2 a setrvačnick funkci ES1. [14]

Simulovaný navržený systém (viz obrázek 30) obsahuje WP, HESS, zátěžový modul, řídicí systém a systém rozdělování elektrické energie. A-CAES je oproti setrvačnicku v tomto HESS mnohem více složitější. Obsahuje krom kompresorů a turbín i kompresorové a turbínové potrubí, zásobník stlačeného vzduchu, tepelné výměníky, nádrže horkého a studeného oleje, spojky a systém rozvodu oleje. [14]

Výkon generovaný WP je přímo připojen k zátěži systému. Je-li generováno větší množství energie, nežli dokáže zátěž přijmout, je tato energie v systému rozdělování elektrické energie rozdělena do dvou větví. První větev přebytečnou energii roztáčí setrvačnick, kde je přeměněna na energii kinetickou. Druhá větev energii akumuluje do A-CAES, kde je vzduch atmosférického tlaku stlačován na vysoký tlak v kompresorech. Mezitím teplo vzniklé touto kompresí je v mezichladičích absorbováno a uloženo do oleje. Na druhou stranu, pokud WP nedokáže dostatečně energeticky pokrýt energetickou zátěž, bude tento deficit kompenzován energií z CAES a setrvačnicku. Setrvačnick bude využíván primárně, aby změna výkonu A-CAES byla minimální. [14]



Obrázek 30 Topologie navrženého hybridního systému A-CAES-setrvačnick [14]

A-CAES použitý v simulaci dokáže akumulovat energii po dobu 16,75 hodin s maximálním výkonem 25,2 MW. Použitý zásobník stlačeného vzduchu má objemu 64850 m³ a pracuje při tlaku od 7 do 10MPa. Kapacita setrvačnicku umožňovala maximálním výkonem 3,2MW akumulovat/distribuovat energii po dobu půl hodiny. Setrvačnick pracoval v rozsahu od 4000 do 20000 ot/min s momentem setrvačnosti 2736 kg m². [14]

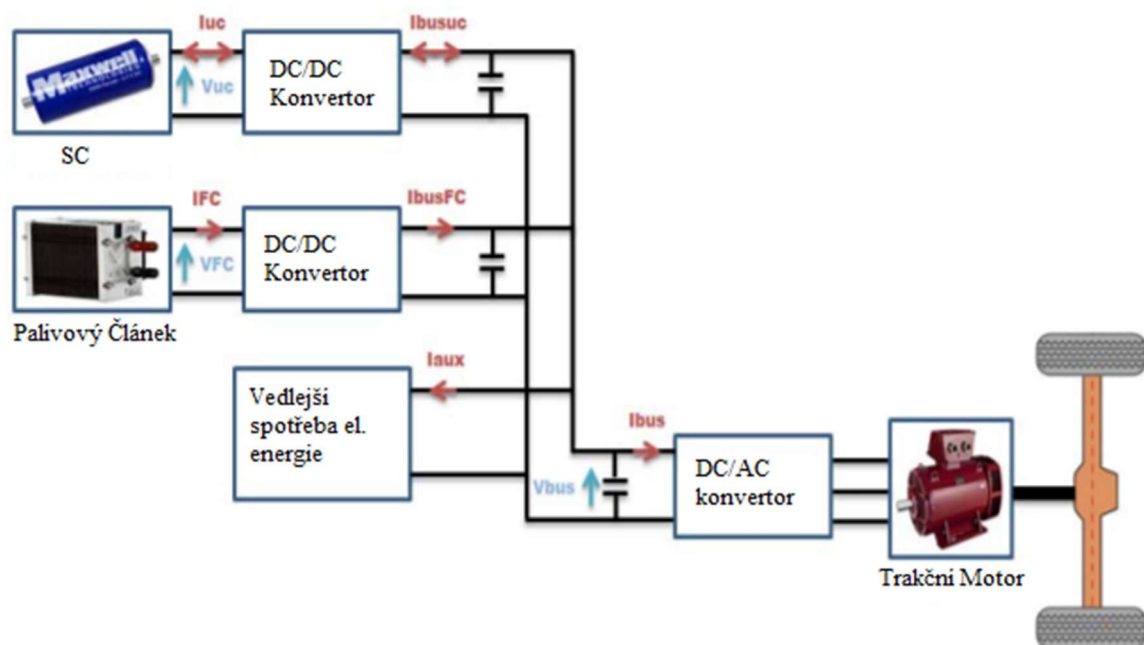
Výsledky studie prokázaly, že WP doplněný o optimálně navržený HESS tohoto typu má excelentní vlastnosti, které stabilizují kolísavý výkon WP mnohem lépe, v porovnání se samotným nehybridním ESS. [14]

Hybridizace akumulace energie do vodíku

Palivový článek-SC

Použití hybridizace palivového článku a SC bylo navrženo v mnoha odvětvích, od dopravních prostředků po zapojení obnovitelného zdroje energie do sítě. Jsou vypracovány i studie baterie-SC-palivový článek. Hybridizací je možné snížit cenu systému, protože ceny výkonných palivových článků jsou vysoké a to až 2000 €/kW. [4] [6]

Jeden z příkladů je HESS kombinující PEMFC a SC. Tento HESS byl navržen pro pohon elektrického vozidla. Tato studie zkoumala energetický management systému vozidla. PEMFC je považován za ESS s vysokou hustotou energie, ale pro nahrazení motoru spalujícího fosilní paliva nemá dostatečný výkon. Takový PEMFC s výkonem srovnatelným s motorem s vnitřním spalováním by byl velice drahý. Na druhou stranu SC je znám díky svému vysokému výkonu. Vysokého výkonu a zároveň vysoké hustoty energie může tedy být dosaženo kombinací dvou nebo i více ESS. V tomto případě je to kombinace SC a palivového článku (viz obrázek 31). Navržený HESS pro vozidlo se skládá z SC připojeného obousměrným DC/DC konvertorem a PEMFC, který byl připojen do systému jednosměrným DC/DC konvertorem. Jako trakční motor je použit synchronní motor s permanentními magnety. Tento motor je do systému vozidla připojen DC/AC konvertorem. Nejvyšší zatížení systému trakčním motorem a vedlejšími systémy je 5 kW. SC je tvořen 16 sériově zapojenými SC s maximálním napětím 44 V a kapacitou 257 F. Výkon, který produkuje PEMFC, je v tomto případě 1790 W. Byla také vytvořena experimentální stolice, která simulovala vlastnosti takového auta v provozu. [24]

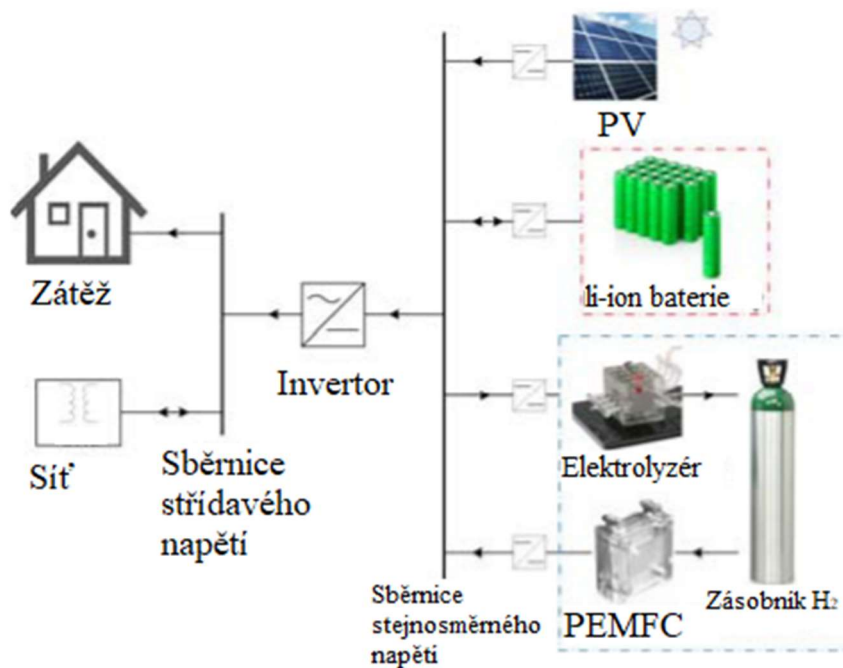


Obrázek 31 Schéma zapojení SC a palivového článku s trakčním motorem vozu. [24]

Systém akumulace energie do vodíku-baterie

HESS systém akumulace energie do vodíku a baterie je již dlouhodobě studovaná kombinace. V roce 1970 byl vytvořen HESS kombinující 30 W palivový článek a nikl-kadmiovou baterii. Tímto zdrojem byly napájeny lehká přenosná elektrická zařízení, například vojenské komunikační přístroje. Tato hybridizace měla za cíl snížit hmotnost přístroje. [6]

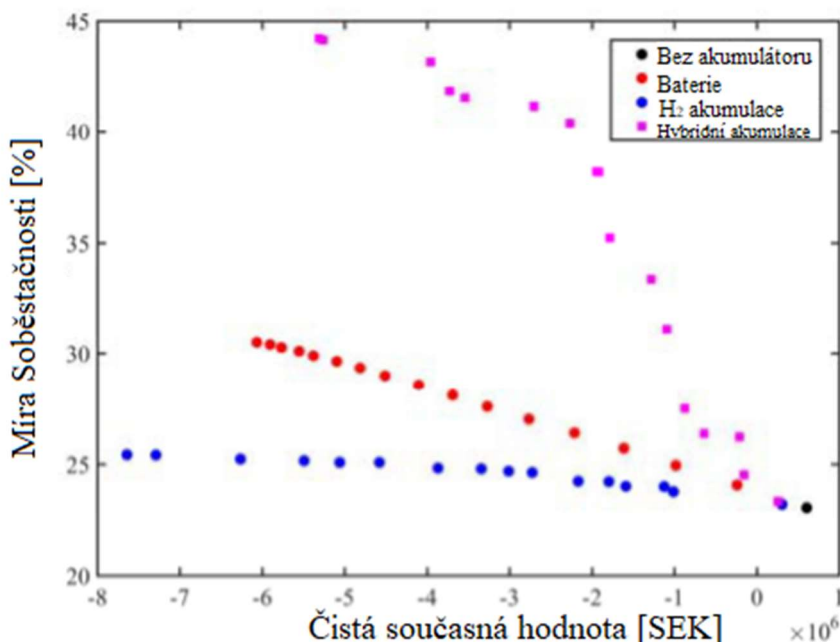
Studie zabývající se zapojením do sítě PV využívá HESS, který je tvořen systémem akumulací energie do vodíku a bateriemi. Koncept této akumulace spočívá v akumulaci energie na velice dlouhou dobu. Tato dlouhá doba je doba mezi sezónami, kdy je v jedné sezóně přebytek energie vygenerované PV, naopak v jiné sezóně vzniká energetický deficit. Baterie, která je považovaná za vyspělou technologii, není vhodná na takto dlouhodobé uchování energie, kvůli jejímu samovolnému vybíjení. Navíc baterie má oproti akumulaci energie do vodíku nízkou hustotu energie. Na druhou stranu akumulace energie ve formě vodíku má mnohem vyšší hustotu uložené energie a ztráty způsobené únikem vodíku jsou zanedbatelné. Je to vhodná metoda pro dlouhodobé skladování energie k vyřešení problému energetické nerovnováhy mezi těmito sezónami. Hlavní nevýhodou tohoto systému jsou ale vysoké pořizovací náklady a nízká účinnost celého cyklu (okolo 35%). PV je připojena do stejnosměrné sítě, do které jsou připojeny i baterie, elektrolyzátor a PEMFC. Stejnosměrná síť je připojena pomocí invertoru do sítě střídavého napětí (viz obrázek 32). [28]



Obrázek 32 Schéma hybridního systému akumulace energie do vodíku a li iontových baterií napájené PV a připojeného do rozvodné sítě [28]

Vznikla studie zaměřující se na HESS baterie a systém vodíkového úložiště pro obytné rezidence ve Švédsku. Cílem studie bylo posoudit míru soběstačnosti, vlastnosti a cenu různých kombinací těchto dvou ESS. Simulace byly vytvořeny v Matlabu. Baterie jako jediný ESS, jak již bylo zmíněno výše, není vhodné řešení pro akumulaci velkého množství energie na velice dlouhou dobu, kvůli vysoké pořizovací ceně a neschopnosti uchovávat energii po takto dlouhodobě beze ztrát. Systém akumulace energie do vodíku se skládá z elektrolyzátoru, zásobníku na vodík a palivového článku. Nízkou účinnost cyklu kompenzuje schopností

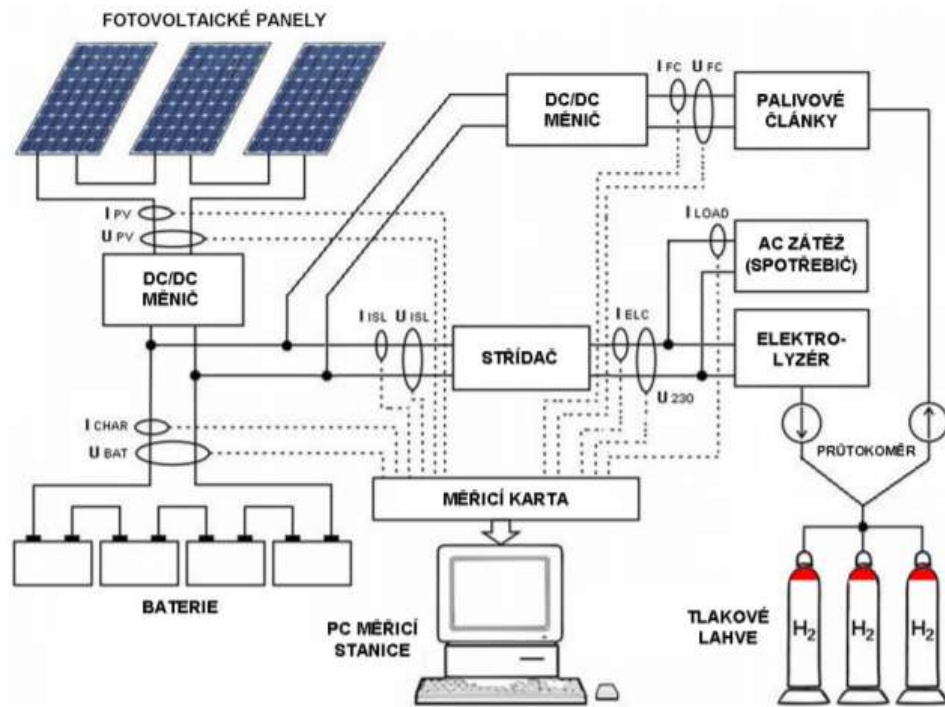
skladovat velké množství energie velice dlouhou dobu. Studie porovnávala hybridní systém, samotné baterie a samotné vodíkové úložiště. Hlavní porovnávané hodnoty byla míra soběstačnosti a cena. Roční energetická náročnost rezidence byla 644 MWh (za rok 2014). Tyto parametry byly použity pro simulaci. Výsledky simulací jsou na obrázku 33 a ukázaly, že hybridní systém má při stejné pořizovací ceně jako samotné ESS mnohem vyšší míru



soběstačnosti. [29]

Obrázek 33 Porovnání samotné baterie, samotné akumulace energie do vodíku a HESS v míře soběstačnosti v závislosti na pořizovacích nákladech [29]

V laboratoři palivových článků na Vysoké škole báňské v Ostravě byl vytvořen laboratorní ostrovní systém napájený PV, který jako HESS využíval kombinaci baterií a akumulace energie do vodíku (viz obrázek 34). Instalovaný výkon PV je 1980 W. PV napájí olověné baterie o celkové kapacitě 3,6 kW a přebytečnou energii vytváří vodík v elektrolyzáru, který je skladován v tlakových lahvích. PEMFC má instalovaný výkon 1200 W. Závěr ukázal, že celková účinnost dosáhla 7 %. Autoři také oponovali, že účinnost by dosahovala až 20 %, kdyby byl by v systému využit účinnější elektrolyzáru. [31]

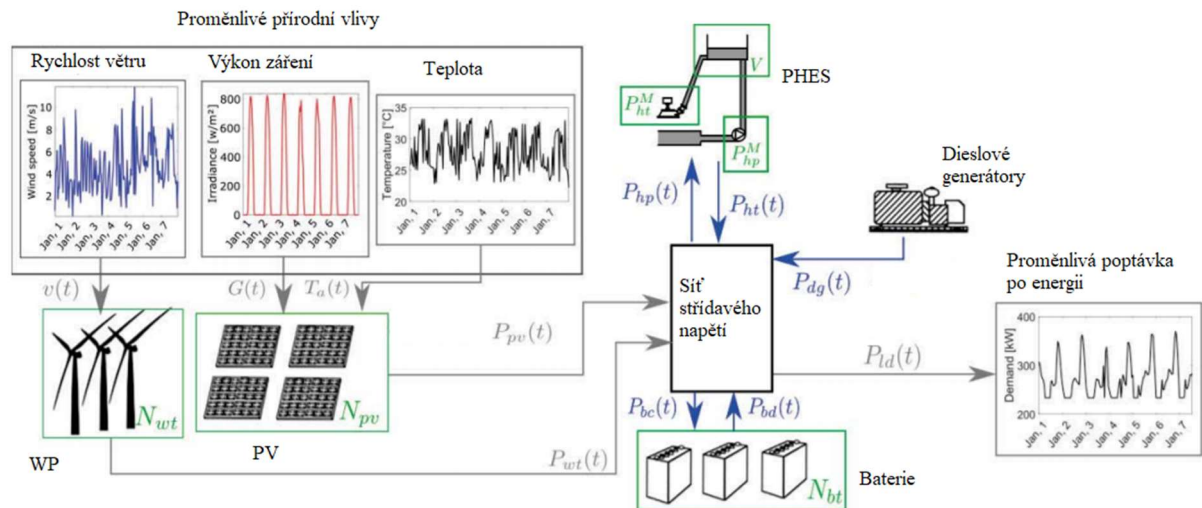


Obrázek 34 Vytvořený laboratorní systém s akumulací energie do vodíku společně s bateriemi napájený PV [31]

Hybridizace PHES

Velké hybridní systémy zahrnující PHES dosud nebyly podle literatury použity. Mnohem častější je využití menších PHES většinou v kombinaci s bateriemi pro odlehlé komunity, nebo ostrovy. [6] [20]

Jedna z mála studií, zahrnující HESS baterie-PHES, byla vytvořena pro izolovanou komunitu v oblasti Unguía v Kolumbii. Tato komunita je již vybavena malou rozvodnou sítí s dvěma dieslovými generátory. Cílem bylo navrhnout optimální počet WP, PV, baterií, ale také i výkon a kapacitu PHES tak, aby byly náklady a emise CO₂ minimální (viz obrázek 35). K optimalizaci bylo použito několik různých algoritmů, jejichž rozdílné výsledky byly nakonec porovnávány. Nejlepší design systému, který uspokojuje poptávku po energii a zároveň je nejméně nákladný, obsahuje PV s instalovaným výkonem 427 kW, WP s 300 kW, dva 475 kVA dieslové generátory, baterie s kapacitou 900 Ah a PHES. Nádrže PHES mají rozdíl hladin 233 m a jejich kapacita je 1475,2 m³. Optimální výkon turbíny je 16,35 kW a výkon čerpadla 45,3 kW. Dieslové generátory by v této konfiguraci generovaly 70,08 % celkové energetické produkce v tomto systému. [20]



Obrázek 35 Optimalizovaný systém s PHES a baterií napájený PV, WP a Dieslovými generátory [20]

Byl také simulován a optimalizován HESS baterie-PHES pro turistický resort v severní Itálii o ubytovací kapacitě 170 lidí. Systém se skládal z páru spalovacích motorů, PV, zásobníku na teplou vodu, olovených baterií a PHES systému. Horní a spodní nádrže PHES systému o kapacitě 175 m³ jsou z betonu a rozdíl jejich hladin je 50 m. Reverzní turbína je navržena pro optimální výkon 7 kW. Tento výkon dokáže poskytovat po dobu 3,5 hodiny, je-li horní nádrž v době spuštění plná. Kapacita PHES je tedy 24 kWh. Baterie v systému mají kapacitu 148 kWh. Účelem PHES v tomto systému je snížit zátěž při vybíjení baterie, snížit DOD baterie a tím zvýšit její životnost a snížit celkovou cenu. [19]

HESS baterie-PHES pro odlehlou komunitu 13 domů na řeckém ostrově je napájen PV o výkonu 18 kW. Baterie v tomto případě je olovená a má kapacitu 100 Ah. PHES se skládá ze dvou 150 m³ nádrží s rozdílem hladin 100 m s energetickou kapacitou 40 kWh. Jsou zde použity dvě vícestupňová čerpadla, kde jedno čerpá vodu, je-li v síti přebytek a druhé je v záloze a

pracuje jako turbína. Čerpadla jsou také využívána na zásobování domů vodou a zavlažování. Celková účinnost se odhaduje na 30 %. [19]

V experimentální rezidenci ve městě Arras ve Francii se nachází budova, která je vybavena systémem s PV, WP, baterií a PHES. Zdroje energie v tomto systému zajišťuje devět 240 W PV a dvě 500 W vertikální WP, všechny umístěné na střeše této budovy (viz obrázek 37). K ukládání energie jsou použity olověné baterie společně s PHES, která má horní nádrž umístěnou na střeše (viz obrázek 36). Baterie v tomto systému tvoří olověné akumulátory s kapacitou 2000 Ah a napětím 12 V. S maximálním DOD až 85 % dosahují cyklové životnosti 1000 cyklů. Horní nádrž PHES leží na 30 m vysoké střeše. Tato nádrž zaujímá na střeše plochu 200 m² s hloubkou až 30 cm. Tedy její kapacita je 60 m³. Horní nádrž je jen impregnovaná střecha, která je otevřená a nikdy se nevypustí úplně. Toto řešení bylo zvoleno kvůli rozložení hmotnosti a relativně konstantní výšce, do které je voda čerpána. Spodní nádrž je tvořena pěti plastovými nádobami o celkovém objemu 50 m³. Strategie řízení spočívá ve využívání PHES v jeho nejúčinnějším výkonu, který je řízen binárně, a tedy buď zapnuto, nebo vypnuto. Nevyužitý přebytek výkonu PHES v síti je využit k nabíjení olověné gelové baterie. Nedokážou-li PV a WP pokrýt lokální energetickou poptávku v budově a jejím okolí, začnou se baterie vybíjet a tím tento deficit vyrovnají. Jakmile baterie dosáhne předem stanovené DOD, spustí se PHES, který vyrovná energetický deficit a zároveň začne nabíjet baterie. Pokud naopak generovaná energie z PV a WP převyšuje spotřebu v síti, nabíjí se baterie. Jakmile baterie nedokážou akumulovat více energie, čerpadlo začne čerpat vodu do horní nádrže. Tedy funkci ES1 v tomto HESS zastávají baterie a funkce ES2 představuje PHES. Energetická kapacita PHES je 3,5 kWh. K čerpání je použito vícestupňové čerpadlo o výkonu 1,5 kW. V tomto případě není použita



Obrázek 36 Horní nádrž PHES umístěná na střeše budovy společně s PV a WP [19]



Obrázek 37 Experimentální rezidence ve městě Arras, která je vybavená PHES a bateriemi. [19]

reverzní turbína. K přeměně potenciální energie na mechanickou energii je použita Peltonova turbína o výkonu 450 W. Závěr tohoto zkoumání ukázal, že v takto malém měřítku není PHES ekonomicky výhodné. Poměr pořizovací ceny a maximální kapacity uložené energie je vysoký. Kapacita uložené energie je nízká a je limitována hlavně dovoleným zatížením střechy budovy. Navíc účinnost některých součástí je nízká, proto i celková účinnost systému není vysoká. [19]

Závěr

Se stále se zvyšujícím počtem zdrojů obnovitelné energie se zvyšuje i počet systémů, které takové zdroje pomáhají integrovat do sítě. Tyto systémy jsou tvořeny různými typy energetických akumulátorů. Z čehož vyplývá, že volba vhodného energetického akumulátoru bude mít značný vliv na účinnost, návratnost a s ní úzce spjatou životnost celého systému. Některé systémy akumulace energie mají také vlastnosti, kterými jsou schopny zlepšit charakteristiky sítě, jako například její frekvenční stabilitu, nebo rychlost reakce na vzniklou zátěž. V této práci jsou popsány jednotlivé systémy akumulace energie společně s jejich vlastnostmi a jejich technologickou vyspělostí. Jednotlivé akumulátory energie mají svůj největší potenciál jen pro určitý druh akumulace. Například superkapacitor je velice vhodný pro krátkodobé energetické fluktuace, díky jeho vysokému výkonu a malé kapacitě. Naopak, přečerpávací vodní elektrárna, se svým relativně dlouhým reakčním časem, není schopná na takto krátkodobou energetickou fluktuaci reagovat. Za účelem zlepšení vlastností akumulčních systémů začaly jednotlivé systémy obsahovat kombinaci více typů energetických úložišť. Strategie hybridizace spočívá ve využití jednoho typu energetického akumulátoru pro dlouhodobější fluktuaci energie a druhého typu pro krátkodobější fluktuaci tak, aby byly plně využity jejich kladné vlastnosti.

První hybridní systém, který je v této práci popsán, kombinuje baterii s výkonnými energetickými akumulátory s relativně malou kapacitou energie, krátkou reakční dobou a vysokou cyklovou životností. To jsou jmenovitě superkapacity, setrvačnický a systémy akumulace energie do magnetického pole supravodivé cívky. Tato hybridní kombinace má v porovnání se systémem se samotnou baterií vyšší životnost. Toho je dosaženo především snížením počtu krátkodobých zatěžovacích cyklů, které působily na baterii. Tento hybridní systém také zlepšuje stabilitu frekvence a napětí v síti. Vzhledem k technologické vyspělosti, pořizovací ceně a velikosti má tato kombinace potenciál najít uplatnění v dopravních prostředcích, nebo jako součást obnovitelných zdrojů energie. Kombinace superkapacitoru a baterie je již delší dobu používaná technologie, která je součástí například elektrických vozidel.

Další hybridní systémy jsou tvořeny kombinacemi systému akumulace energie do stlačeného vzduchu a akumulátory energie s krátkým reakčním časem. Systém akumulace energie do stlačeného vzduchu je velice složitý a není ještě úplně technologicky vyspělý. Energetickou kapacitou je srovnatelný s přečerpávacími nádržemi, oproti kterým ale dosahuje nižší účinnosti. Tyto hybridní kombinace mají v budoucnu vysoký potenciál v místech, kde nejsou geografické podmínky pro stavbu přečerpávacích nádrží. Akumulátor energie do stlačeného vzduchu poskytuje vysoký výkon a superkapacitor tento výkon filtruje a zjemňuje. Takový vhodně navržený a optimalizovaný hybridní systém může disponovat vysokým výkonem i krátkým reakčním časem, který systému akumulace energie do stlačeného vzduchu chybí.

Hybridizace přečerpávacích nádrží nachází velké využití v ostrovních, nebo odlehlých sítích. Tyto sítě jsou často napájeny větrnými a fotovoltaickými elektrárnami, které jsou považovány za nestálé a proměnlivé zdroje energie. Z tohoto důvodu zde vznikla potřeba pro systém akumulace s vysokou kapacitou energie, což přečerpávací nádrže splňují. Společně s bateriemi mohou na ostrově vytvořit relativně stabilní síť. Jako ekonomicky nevýhodné řešení se ukázala hybridizace baterie a přečerpávací nádrže pro obytnou budovu, kde horní nádrž byla umístěna na střeše budovy. Ekonomicky nevýhodná byla z důvodů nízké kapacity energie v porovnání s pořizovací cenou.

Poslední hybridní systémy, které jsou popsány v této práci, kombinují systémy akumulace energie do vodíku. Kombinace palivového článku a superkapacitoru nachází své využití jako zdroj energie elektrických vozidel. Palivové články s vysokým výkonem jsou velice drahé. Z tohoto důvodu byly hybridizovány společně se superkapacitorem, který poskytl svůj krátkodobý vysoký výkon například při akceleraci. Tento systém by podle autorů dosahoval vyšší účinnosti než vozidlo vybavené spalovacím motorem společně s elektrickým generátorem. Je zde navíc problematika skladování vodíku ve vozidle. Akumulace energie do vodíku dokáže akumulovat obrovské množství energie na velice dlouhou dobu se zanedbatelnými ztrátami. Tato technologie není ještě vyspělá, navíc má relativně nízkou účinnost celého cyklu. Možné využití této technologie je jako součást budov, kde by bylo využito i odpadní teplo a tím by se zvedla celková účinnost.

Se stále rostoucí spotřebou elektrické energie roste i počet obnovitelných zdrojů. V závislosti na tom stoupá i potřeba využívat levnější a účinnější systémy akumulace energie. Z tohoto důvodu má smysl se čím dál více zabývat vývojem a zdokonalováním systémů akumulace energie především jejich hybridizací.

Seznam použitých zdrojů

- [1] AKRAM, Umer, Muhammad KHALID a Saifullah SHAFIQ. An Innovative Hybrid Wind-Solar and Battery-Supercapacitor Microgrid System—Development and Optimization. IEEE Access [online]. 2017, 5, 25897-25912 [cit. 2018-02-26]. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2767618. ISSN 2169-3536. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8089345/>
- [2] ROY, Pranoy Kumar Singha, H. Bora KARAYAKA, Yanjun YAN a Yazan ALQUDAH. Size optimization of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for 1MW grid connected PV array. 2017 North American Power Symposium (NAPS) [online]. IEEE, 2017, 2017, , 1-6 [cit. 2018-02-26]. DOI: 10.1109/NAPS.2017.8107181. ISBN 978-1-5386-2699-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8107181/>
- [3] JING, Wenlong, Chean HUNG LAI, Shung Hui Wallace WONG a Mou Ling Dennis WONG. Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: a review. IET Renewable Power Generation [online]. 2017, 11(4), 461-469 [cit. 2018-02-26]. DOI: 10.1049/iet-rpg.2016.0500. ISSN 1752-1416. Dostupné z: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-rpg.2016.0500>
- [4] BOCKLISCH, Thilo. Hybrid Energy Storage Systems for Renewable Energy Applications. Energy Procedia [online]. 2015, 73, 103-111 [cit. 2018-02-26]. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.582. ISSN 18766102. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610215013508>
- [5] VAN DER HOEVEN, Maria. Technology Roadmap Energy storage [online]. , 64 [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapEnergyStorage.pdf>
- [6] HEMMATI, Reza a Hedayat SABOORI. *Emergence of hybrid energy storage systems in renewable energy and transport applications – A review* [online]. [cit. 2018-03-19]. DOI: 10.1016/j.rser.2016.06.029. ISBN 10.1016/j.rser.2016.06.029. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116302374>
- [7] CHEN, Lei, Hongkun CHEN, Yanhong LI, et al. SMES-Battery Energy Storage System for the Stabilization of a Photovoltaic-Based Microgrid [online]. [cit. 2018-03-20]. DOI: 10.1109/TASC.2018.2799544. ISBN 10.1109/TASC.2018.2799544. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8272391/>
- [8] CHONG, Lee Wai, Yee Wan WONG, Rajprasad Kumar RAJKUMAR, Rajpartiban Kumar RAJKUMAR a Dino ISA. Hybrid energy storage systems and control strategies for stand-alone renewable energy power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016, 66, 174-189 [cit. 2018-02-26]. DOI: 10.1016/j.rser.2016.07.059. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116303872>
- [9] BRIAT, O., J.M. VINASSA, W. LAJNEF, S. AZZOPARDI a E. WOIRGARD. *Principle, design and experimental validation of a flywheel-battery hybrid source for heavy-duty electric vehicles* [online]. [cit. 2018-03-31]. DOI: 10.1049/iet-epa:20060458. ISBN 10.1049/iet-epa:20060458. Dostupné z: http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-epa_20060458

- [10] MOUSAVI G, S.M., Faramarz FARAJI, Abbas MAJAZI a Kamal AL-HADDAD. *A comprehensive review of Flywheel Energy Storage System technology* [online]. [cit. 2018-04-03]. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.060. ISBN 10.1016/j.rser.2016.09.060. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116305597>
- [11] LIM, S. D., A. P. MAZZOLENI, J. PARK, P. I. RO a B. QUINLAN. *Conceptual design of ocean compressed air energy storage system* [online]. 2012 [cit. 2018-04-09]. DOI: 10.1109/OCEANS.2012.6404909. ISBN 10.1109/OCEANS.2012.6404909. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6404909/>
- [12] WANG, Haiyang, Chenghui ZHANG a Ke LI. *Study of cooling, heating and power characteristics of the improved multi-stage AA-CAES system* [online]. 2017 [cit. 2018-04-09]. DOI: 10.1109/CAC.2017.8243891. ISBN 10.1109/CAC.2017.8243891. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8243891/>
- [13] JIANG, Ping, Zhen-jia ZHAO a Hai-jian LV. *Optimal load tracking control of expansion generation with super capacitor in compressed air energy storage system* [online]. 2016 [cit. 2018-04-10]. DOI: 10.1109/ChiCC.2016.7554756. ISBN 10.1109/ChiCC.2016.7554756. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7554756/>
- [14] ZHAO, Pan, Yiping DAI a Jiangfeng WANG. Design and thermodynamic analysis of a hybrid energy storage system based on A-CAES (adiabatic compressed air energy storage) and FESS (flywheel energy storage system) for wind power application [online]. [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1016/j.energy.2014.04.055. ISBN 10.1016/j.energy.2014.04.055. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036054421400468X>
- [15] LAI, J.-S., S. LEVY a M.F. ROSE. *High energy density double-layer capacitors for energy storage applications* [online]. [cit. 2018-04-18]. DOI: 10.1109/62.143193. ISBN 10.1109/62.143193. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/143193/>
- [16] HENDRIANSYAH, Reza, Hary DEVIANTO, Tirto PRAKOSO, Pramujo WIDIATMOKO, Isdiriyani NURDIN, Sy SRIMURTI a Kanti Ria KUSUMA. *Nano carbon materials from palm oil wastes for supercapacitor applications* [online]. 2017 [cit. 2018-04-18]. DOI: 10.1109/ICEVT.2017.8323526. ISBN 10.1109/ICEVT.2017.8323526. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8323526/>
- [17] REHMAN, Shafiqur, Luai M. AL-HADHRAMI a Md. Mahbub ALAM. *Pumped hydro energy storage system: A technological review* [online]. [cit. 2018-04-25]. DOI: 10.1016/j.rser.2014.12.040. ISBN 10.1016/j.rser.2014.12.040. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115000106>
- [18] MORABITO, A, J STEIMES, o BONTEMS, G AL ZOHBI a P HENDRICK. *Set-up of a pump as turbine use in micro-pumped hydro energy storage: a case of study in Froyennes Belgium* [online]. [cit. 2018-05-02]. DOI: 10.1088/1742-6596/813/1/012033. ISBN 10.1088/1742-6596/813/1/012033. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1742-6596/813/i=1/a=012033?key=crossref.eadd717bde51992a54d0a2908050dc8a>
- [19] DE OLIVEIRA E SILVA, Guilherme a Patrick HENDRICK. *Pumped hydro energy storage in buildings* [online]. [cit. 2018-05-02]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.07.046. ISBN 10.1016/j.apenergy.2016.07.046. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261916309874>
- [20] ALVAREZ, Semaria Ruiz, Alejandro Marquez RUIZ a Jairo Espinosa OVIEDO. *Optimal design of a diesel-PV-wind system with batteries and hydro pumped storage in a Colombian*

community [online]. 2017 [cit. 2018-05-05]. DOI: 10.1109/ICRERA.2017.8191272. ISBN 10.1109/ICRERA.2017.8191272. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8191272/>

[21] CORWELL, Steve. Battery-based energy storage in Europe as a modern alternative to pumped hydro. *Energy Storage* [online]. London: Solar Media, 2018 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.energy-storage.news/blogs/battery-based-energy-storage-in-europe-as-a-modern-alternative-to-pumped-hy>

[22] PARNELL, John. Flywheel-battery hybrid system installed in Ireland. *Energy Storage* [online]. Londýn: Solar Media, 2018 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: <https://www.energy-storage.news/news/flywheel-battery-hybrid-system-installed-in-ireland>

[23] KESHAN, H., J. THORNBURG a T.S. USTUN. *Comparison of lead-acid and lithium ion batteries for stationary storage in off-grid energy systems* [online]. 2016 [cit. 2018-05-07]. DOI: 10.1049/cp.2016.1287. ISBN 10.1049/cp.2016.1287. Dostupné z: <http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2016.1287>

[24] OUKKACHA, Ismail, Mamadou Bailo CAMARA, Brayima DAKYO a Jean-Yves PARADE. *Onboard energy management for electric vehicles applications — Using fuel cell and ultracapacitors* [online]. 2017 [cit. 2018-05-08]. DOI: 10.1109/IECON.2017.8216881. ISBN 10.1109/IECON.2017.8216881. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8216881/>

[25] ROHIT, Amit Kumar, Ksh. Priyalakshmi DEVI a Saroj RANGNEKAR. *An overview of energy storage and its importance in Indian renewable energy sector* [online]. [cit. 2018-05-08]. DOI: 10.1016/j.est.2017.06.005. ISBN 10.1016/j.est.2017.06.005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352152X17300488>

[26] GEETHANJALI, R. a R. SIVAKUMAR. *Design of intelligent controller for PEM fuel cell* [online]. 2017 [cit. 2018-05-08]. DOI: 10.1109/ICONSTEM.2017.8261316. ISBN 10.1109/ICONSTEM.2017.8261316. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8261316/>

[27] KALINA, EMIL. *APLIKACE ULTRAKAPACITORŮ v DOPRAVNÍCH SYSTÉMECH*. Brno, 2008. DOKTORSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ v BRNĚ.

[28] ZHANG, Yang, Pietro Elia CAMPANA, Anders LUNDBLAD a Jinyue YAN. Comparative study of hydrogen storage and battery storage in grid connected photovoltaic system: Storage sizing and rule-based operation [online]. [cit. 2018-05-08]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.03.123. ISBN 10.1016/j.apenergy.2017.03.123. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261917303690>

[29] ZHANG, Yang, Anders LUNDBLAD, Pietro Elia CAMPANA a Jinyue YAN. Comparative Study of Battery Storage and Hydrogen Storage to Increase Photovoltaic Self-sufficiency in a Residential Building of Sweden [online]. [cit. 2018-05-09]. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.11.284. ISBN 10.1016/j.egypro.2016.11.284. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610216314941>

[30] KUBIŠ, Stanislav. *Reverzační turbokompresor*. 296284. Uděleno 02.01.2006.

[31] MOLDŘÍK, Petr a Roman CHVÁLEK. Akumulace energie z fotovoltaiiky do vodíku. *Elektrorevue* [online]. 2011, 2011(4), 6 [cit. 2018-05-10]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: www.elektrorevue.cz/cz/download/akumulace-energie-z-fotovoltaiiky-do-vodik

[32] ZANXIANG NIE, XI XIAO, QING KANG, R. AGGARWAL, HUIMING ZHANG a WEIJIA YUAN. SMES-Battery Energy Storage System for Conditioning Outputs From Direct Drive Linear Wave Energy Converters [online]. [cit. 2018-03-20]. DOI: 10.1109/TASC.2013.2246852. ISBN 10.1109/TASC.2013.2246852. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6461072/>

Seznam použitých zkratk

AA-CAES	Pokročilé adiabatické akumulace energie do stlačeného vzduchu (advanced adiabatic compress air energy storage system)
A-CAES	Adiabatické akumulace energie do stlačeného vzduchu (adiabatic compress air energy storage system)
AC	Střídavý proud (alternate current)
CAES	Akumulace energie do stlačeného vzduchu (compress air energy storage system)
DOD	Hloubka vybití (depth of discharge)
DC	stejnsměrný proud (direct current)
ESS	Systém akumulace energie (energy storage system)
ES1	První skupina systému energetických akumulátorů (energy storage 1)
ES2	Druhá skupina systému energetických akumulátorů (energy storage 2)
HESS	Hybridní systém akumulace energie (hybrid energy storage system)
Li ion	Lithium iontová baterie
PEMFC	Palivový článek s polymerní membránou (proton exchange membrane fuel cell)
PHES	Přečerpávací vodní elektrárna (pumped hydro storage system)
PV	Fotovoltaická elektrárna (photovoltaic)
SC	Superkapacitor
SMES	Systém akumulace energie do magnetického pole supravodivé cívky (superconducting magnetic energy storage)
SoC	Stav nabití (state of charge)
WP	Větrná elektrárna (wind powerplant)