

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení:

Bytem:

Narozen/a (datum a místo):

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství

se sídlem Technická 2896/2, 616 69, Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

.....

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
 - ☐ diplomová práce
 - ☐ bakalářská práce
 - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:	
Vedoucí/ školitel VŠKP:	
Ústav:	
Datum obhajoby VŠKP:	

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

- ☐ tištěné formě – počet exemplářů
- ☐ elektronické formě – počet exemplářů

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☐ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Anotace:

V bakalářské práci jsou uvedeny různé možnosti akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Akumulace je u obnovitelných zdrojů energie důležitá, protože podmínky pro výrobu energie z obnovitelných zdrojů energie nejsou celodenní (bezvětří, nesvítí slunce atd.). Zhodnocení různých druhů akumulace a jejich ekonomické srovnání bude cílem této práce.

Annotation:

This bachelor work contains several types of accumulation of electric energy from renewable energy sources. The accumulation from the renewable energy sources is important, because its conditions for production of energy from renewable energy sources are not day long (windlessness, the sun is not shining, etc.). The classification of several types of accumulation and its economic confrontation will be the goal of this work.

Klíčová slova:

Akumulace energie, superkondenzátory, malá větrná elektrárna, akumulátory

Key words

Accumulation energy, supercondensator, small-wind-power plant, accumulator

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně bez cizí pomoci. Vycházel jsem při tom ze svých znalostí, odborných konzultací a doporučené literatury uvedené v seznamu.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto za cenné rady, připomínky a věnovaný čas odborným konzultacím při vypracování mé bakalářské práce Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D.

V Brně dne 25. května 2007

.....
podpis

OBSAH:

1. Úvod.....	9
2 Způsoby akumulace.....	10
2.1 Olověné akumulátory.....	10
2.2 Pokročilé elektrochemické akumulátory.....	10
2.3 Setrvačnickové akumulátory.....	11
2.4 Tlakovzdušné akumulační elektrárny.....	12
2.5 Přečerpávací elektrárny.....	13
2.6 Supravodivé indukční akumulátory.....	14
2.7 Elektrická akumulace.....	16
2.7.1 Superkondenzátory.....	16
2.7.1.1 Vlastnosti a parametry superkondenzátoru.....	19
2.7.1.2 Nabíjení a vybíjení superkondenzátoru.....	19
3. Všeobecné hodnocení akumulátoru el. energie.....	22
4. Užití akumulátoru s malou větrnou elektrárnou.....	24
4.1 Návrh akumulátoru s malou větrnou elektrárnou.....	26
5. Ekonomické hodnocení.....	28
6. Závěr.....	29
7. Použitá a doporučená literatura.....	30

1. Úvod:

Největší odběr elektřiny nastává ve střední Evropě třikrát denně: ráno po šesté hodině, když se spouštějí stroje v továrnách, kolem osmnácté hodiny večer, kdy vzroste nápor na elektrickou hromadnou dopravu a rozsvěcí se světla a okolo dvaadvacáté hodiny večer, kdy se automaticky zapínají ohřívače vody a v zimě akumulární kamna. Mezi půlnocí a pátou hodinou ranní je naopak spotřeba elektřiny nízká. V zájmu nejvyšší hospodárnosti provozu se krytí základního zatížení svěřuje velkým tepelným a jaderným elektrárnám a průtočným hydroelektrárnám. Vzroste-li odběr nad jejich okamžitou kapacitu, připojují se k nim i tzv. závodní elektrárny patřící velkým podnikům a spouští se akumulární a přečerpávací vodní elektrárny. Elektroenergetické sítě na všech kontinentech se rozrůstají, navzájem propojují a to umožňuje vzájemnou výpomoc při překonávání špiček odběru nebo při výpadku některých velkých zdrojů energie.

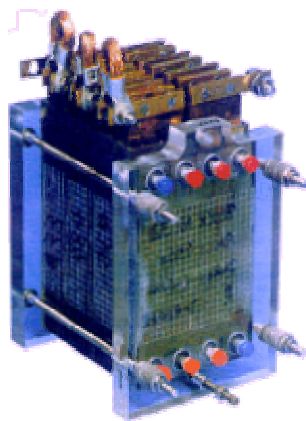
Jelikož cena každé kilowatthodiny z dovozu ve chvíli špiček mnohonásobně vzrůstá, tak energetici léta hledají, vyvíjejí a ověřují způsoby, jak přece jen elektrické výkony hospodárně akumulovat buď v rámci energetické soustavy (v našich poměrech jde o výkony řádově gigawattů), nebo u velkých odběratelů. Z několika desítek teoretických možností v oblasti "malé energetiky" (u malospotřebitelů) jsou nejvíce rozšířeny olověné a ocelové akumulátory. "Velká energetika" se zase opírá o přečerpávací vodní elektrárny. Představím vám však ještě šest dalších, teprve prověřované nové principy akumulace elektrického výkonu. Reálná kapacita jednotlivých způsobů v MW nebo MWh předurčuje jejich uplatnění u maloodběratelů v dopravě nebo ve velké energetice. Nejdůležitějšími dalšími parametry jsou:

- Celková účinnost, ukazující jaký výkon nebo kolik energie nám vrátí z toho, co jsme do nich museli předtím vložit,
- objemová energetická kapacita v joulech na m^3 hovoří o jejich rozměrech,
- doba přepnutí prozrazuje, jak pohotově (za kolik sekund či minut po "nabití") z nich můžeme energii odebírat. A podobně jako u elektrických baterií nás zajímá doba akumulace, čas, po který náboj energie dokáže udržet.

2. Způsoby akumulace

2.1 Olověné akumulátory

Důvěrně je zná každý motorista, protože jejich energií spouští motor svého automobilu. Akumulují proud z dynam na podvozcích vagónů, pohánějí elektrovozíky a nakládače a v moderním kompaktním provedení s nimi počítají i elektromobily. Olověný akumulátor vynalezl roku 1859 francouzský fyzik G. R. Planté. Sestává z párů olověných desek, ponořených do nádoby s roztokem kyseliny sírové. Na deskách nenabitého akumulátoru se usadí účinkem kyseliny síran olovnatý PbSO_4 . Připojením stejnosměrného napětí při nabíjení se na kladné elektrodě vytváří červenohnědý oxid olovičitý PbO_2 , záporná elektroda se pokryje tmavě šedou vrstvou houbovitého olova. Tím se nabitý akumulátor přemění v galvanický článek. Elektrolyt zhoustne a na svorkách páru elektrod změříme napětí 2,1 V. Při vybíjení, po spojení svorek elektrod přes zátěž, začne probíhat opačná chemická reakce než při nabíjení. Prakticky nesmí napětí článků klesnout pod 1,8 V. V "prehistorické době" prvních stejnosměrných elektráren (1870-1890) se proud z dynam hnaných parními stroji nebo vodními turbínami střádal k dennímu napájení sítě ve velkých akumulátorovnách s olověnými deskami zavěšenými do van s kyselinou. Současné hromadně vyráběné akumulátory jsou kompaktní. Nádobky mají vyplněny větším počtem párů destiček oddělených pórovitými separátory. Podle počtu olověnými spojkami propojených článků na uzavřeném povrchu dávají napětí 6, 12, 24 nebo 48 V. Dosahují vynikající účinnosti okolo 80 %. Nejrozšířenější automobilové akumulátory 12 V mají kapacitu 50 Ah (ampérhodin) a snesou až 500 nabíjecích cyklů. Ovšem k tomu, aby do jimi vyzbrojené akumulátorovny mohl průmysl akumulovat pouhých 1000 kWh, by bylo nutné instalovat a zapojit 25 tun akumulátorů...



Obr. 1: Olověné desky průmyslového akumulátoru s kapacitou 400 W

2.2 Pokročilé elektrochemické akumulátory

Na otřesy jsou méně choulostivé nikl-ocelové akumulátory (NiFe), vynalezené před sto lety T. A. Edisonem. Jejich ocelové a niklové destičky, vzájemně vystřídané, jsou ponořeny do elektrolytu na bázi hydroxidu draselného KOH. Články mají napětí jen 1,4 V a pro snazší údržbu je nejvíce využívá železnice.

Pro elektromobily a elektrobusy slibující ekologický provoz, dále k napájení

akumulátorového nářadí, záznamových kamer, mobilních telefonů, počítačů a bouřlivě se rozvíjejících přenosných elektronických přístrojů se vyrábí nebo vyvíjí řada pokročilých akumulátorů, které by měly v kilogramu své hmotnosti akumulovat nejméně 150 Wh energie - přibližně trojnásobek toho, co nabízejí akumulátory olověné. Ty nejlepší, které se k tomuto parametru blíží, jsou však příliš drahé, neboť využívají převážně vzácné kovy.

Pro akumulátorové nářadí a mobilní elektroniku to jsou např. akumulátory nikl-kadmiové (NiCd), sestavované z článků o napětí 1,2 V. Nabízejí se s kapacitou od 0,3 do 8 Ah, snášejí tři tisíce nabíjecích cyklů a ultrarychlé nabíjení (pod 1 hodinu). Trpí však tzv. paměťovým efektem, snižujícím výrazně jejich kapacitu, pokud je před nabitím zcela nevybijeme. Kvůli výhradám ekologů vůči obsahu kadmia jsou nově nahrazovány akumulátory nikl-metalhydridovými (NiMH) a lithiumiontovými (Li-Ion), vykazujícími třikrát vyšší měrnou kapacitu než akumulátory NiCd. Zejména poslední netrpí paměťovým efektem ani samovybitím, jsou však podstatně dražší.

Pro vyšší výkony, např. pro pohon elektromobilů, se ověřují zinko-vzdušné akumulátory, v nichž probíhá elektrochemická reakce na porézních elektrodách, oddělujících vzduch od zinku, nebo sodíko-sírové akumulátory, pracující při teplotě okolo 300 °C, potřebné k roztavení sodíku a síry. Měrným výkonem až 300 W/kg překonávají trojnásobně výkon stejné těžkých akumulátorů olověných.

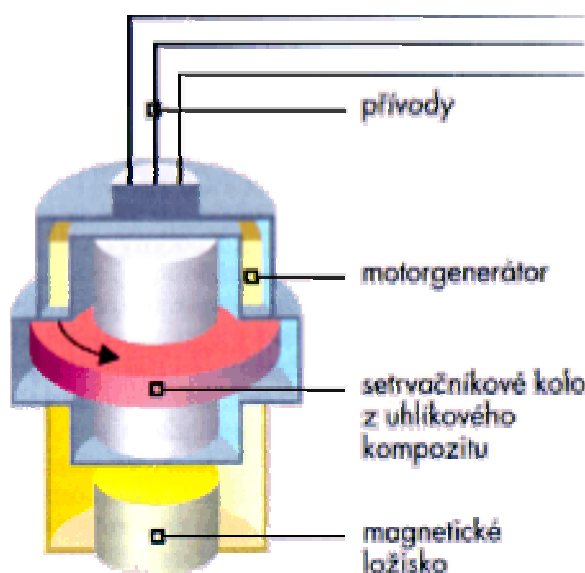
2.3 Setrvačnickové akumulátory

Setrvačnický je historicky prvním akumulátorem energie, protože setrvačností rotující hmoty kotouče poháněného nohou využívali hrnčíři již tisíce let př. Kr. Ve století páry pomáhal svou kinetickou energii překonávat mrtvé body mechanismu parních strojů a dnes je samozřejmou součástí vyrovnávající chod všech druhů pístových spalovacích motorů, mechanických lisů a jiných strojů. energii na úkor svých otáček dokáže odevzdat se zpožděním pouhých zlomků sekundy. K akumulaci elektrického výkonu se dá nejjednodušeji využít tím způsobem, že co nejtěžší setrvačnický upevníme na hřídel elektromotoru, poháněného elektrickým proudem, jehož "dávku" potřebujeme akumulovat. Při odběru energie se elektromotor chová jako dynamo či alternátor a akumulovanou energii vrátí!

Například švýcarsko zavedlo již před čtyřiceti roky na zkoušku elektrické gyrobusey - upravené trolejbusy s jeden a půl tunovým setrvačnickem pod podlahou na hřídeli elektrického stroje – motoru a generátoru. Po zastavení ve stanici vozidlo vysunulo sběrače k napájecímu stožáru. Proud ze sítě během jeden a půl minuty urychlil setrvačnický a do jeho vyšších otáček akumuloval asi 10 kWh energie. Ta po stažení sběrače vystačila trolejbusu se staženým sběračem k jízdě na další zastávku s nabíjením. Deset "nabitých" kWh dovoluje obsazenému elektrobuse ujet v městském provozu nejméně dva kilometry i se zastávkami na křižovatkách. Kvůli gyroskopickému momentu (roztočený setrvačnický nerad mění rovinu svojí rotace), ovlivňujícímu dynamiku a stabilitu jízdy, se však ani lehčí typy vysokootáčkových gyroskopů u elektromobilů neuplatnily, přestože mohou navíc akumulovat i část jinak brzděním mařenou energii.

Vývojáři už dávno upustili od těžkých litinových kol a nahrazují je mnohem lehčími a menšími čokovitými setrvačnickými z vyztužených plastů, které ve speciálních ložiskách a ve vakuové nebo heliem plněné skříni nechávají otáčet až desettisíckrát za minutu. Rekord drží supersetrvačnický s hmotností jen 0,6 kg, který jako rotor otáčející se v prstenci indukčních cívek v magnetickém závěsu koná 1 milion otáček za minutu!

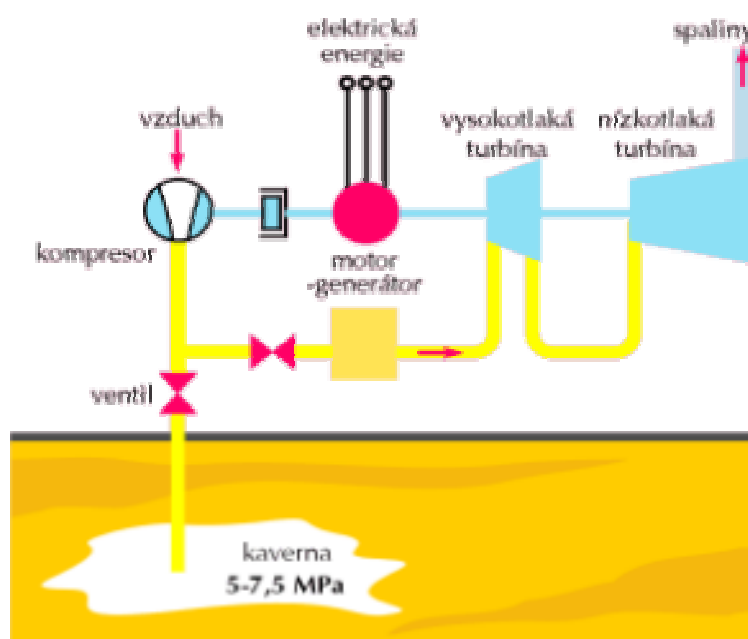
Na tomto principu založené setrvačnickové zásobníky energie začíná využívat i průmysl pro překonání krátkodobého výpadku sítě, který může způsobit pohromu řídicím a počítačovým systémům ve výrobě. Setrvačnickový akumulátor DYBAT, který dokáže po dobu 30 s dodávat výkon 70 kW, má i s pláštěm hmotnost jen 70 kg. Setrvačnick z kompozita s uhlíkovými vlákny koná ve vakuu 20 tisíc otáček za minutu. Kombinovaná magnetická a mechanická ložiska zaručují životnost nepřetržitého otáčení po dobu deseti let. Tím a také vysokou energetickou účinností (lepší než 80 %) překonávají po všech stránkách tradiční zálohovací akumulátorovny a mohou se zapojit paralelně do baterií, schopných krátkodobě vydat akumulovaný elektrický výkon až do několika MW.



Obr. 2: Setrvačnickový akumulátor s rotorem z uhlíkového kompozitu zavěšeného v magnetických ložiskách, otáčejícím se rychlostí 100 000 otáček za minutu.

2.4 Tlakovzdušné akumulační elektrárny

Jsou variantou elektráren s plynovými turbinami, které mohou přebytečný noční elektrický výkon akumulovat do vzduchu vhněného pod vysokým tlakem do utěsněných podzemních jeskyní nebo důlních kaveren. Při pohonu alternátorů plynovou turbínou se až 2/3 energie uvolněné spalováním plynu spotřebovávají k pohonu kompresoru a jen jedna třetina se mění v energii elektrickou. Proto bylo už před čtyřiceti lety navrženo oddělit mechanicky i časově provoz turbíny a kompresoru, aby se v případě potřeby mohl pro výrobu elektřiny využít plný výkon turbíny bez zátěže kompresorem, jehož funkci může po dobu několika hodin nahrazovat stlačený vzduch odebíraný z podzemního zásobníku. Kompresor lze pohánět elektromotorem, odebírajícím levný noční přebytečný elektrický výkon. Takové zařízení, jež je obdobou přečerpávací vodní elektrárny, bylo poprvé uvedeno do provozu roku 1974 v německém Huntorfu (obr.3). Plynová turbína tu v tříhodinové špičce dodává do sítě výkon 290 MW. Tlak vzduchu skladovaného ve dvou solných jeskyních s jímacím prostorem 150 000 m³ se pohybuje od 5 do 7,5 MPa.



obr. 3: Zjednodušený princip tlakovzdušné akumulace elektrického výkonu v akumulární elektrárně se spalovacími turbínami v Hunterfu (SRN).

2.5 Přečerpávací vodní elektrárny (PVE)

Princip PVE je prajednoduchý. Mají svou dolní a horní vodní nádrž propojenou potrubím, v němž jsou zařazeny vodní turbíny a čerpadla. Při přebytku el.energie v síti čerpají čerpadla vodu z dolní nádrže do vysoko položené horní nádrže. Elektrická energie se tak mění v hnacím elektromotoru nejprve v kinetickou energii proudící vody a potom v její energii potenciální v horní nádrži. Tam je připravena, aby v případě potřeby zpětným průtokem poskytla vysoký výkon vodním turbínám, jejichž alternátory ji vracejí v podobě elektrické energie do sítě.

Mohou mít několik variant: dolní nádrž je obvykle zřízena za hrází průtočné vodní elektrárny na říčním toku a horní nádrž, se kterou je spojena několika tlakovými potrubími, je vybudována na některém blízkém vrcholu. Spády se pohybují od 100 do 500 m. Dolní nádrž může s výhodou sloužit i jako zásobník chladicí vody pro chladicí věže nedalekých tepelných nebo jaderných elektráren. Ve vysokých horách je možné využít v roli nádrží i odlehlejší vysokohorská jezera s velkým výškovým rozdílem, která se propojují tunelovými šachtami.

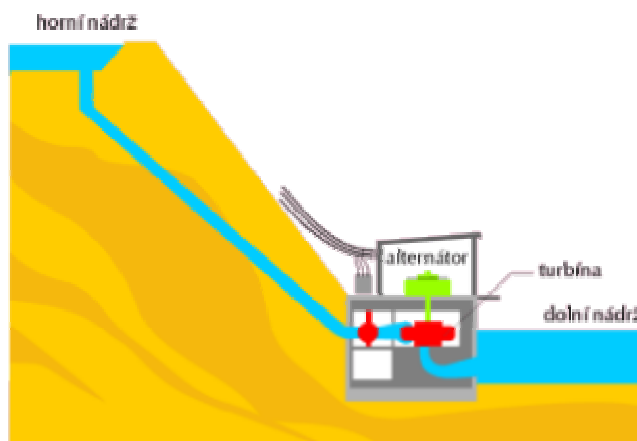
Větší PVE, stavěné od třicátých let, používají třístrojová soustrojí. Motorgenerátor je umístěn v betonové šachtě elektrárny zcela nahoře v úrovni podlaží strojovny. Jeho hřídel, zavěšený na speciálním ložisku, nese oběžné kolo vodní turbíny a zcela dole, pod úrovní spodní hladiny, je uloženo oběžné kolo odstředivého čerpadla. Při čerpání vody se spirálová komora turbíny zavzdušní a alternátor v roli elektromotoru pohání přes hřídelovou spojku čerpadlo. Při elektrárenském provozu se zavzdušní komora čerpadla (nebo se rozpojí jeho hřídelová spojka) a voda pod vysokým tlakem pohání turbínu s alternátorem.

Dnes se používají většinou dvoustrojová soustrojí, v nichž oběžné kolo turbíny

vykonává v čerpacím režimu funkci čerpadla. Jestliže účinnost přečerpávacího cyklu se u starších jednotek pohybovala kolem 50 %, současná soustrojí umožňují akumulaci s účinností až 75 %. To znamená, že na "uskladnění" každé kWh je nutné v čerpacím režimu vynaložit jen asi 1,3 kWh. Velmi levné noční kilowatthodiny se tímto způsobem promění v špičkové kWh, mající pro energetiku cenu zlata. Plný výkon jsou některé moderní PVE schopné dodávat už za 1,5 min. po spouštěcím povelu.

Největší PVE s jednotkami po 300 MW na přelomu století zvládnou akumulační výkony až 3 000 MW. Současnou tabulku největších přečerpávacích elektráren světa vede PVE Dinorwic v britském Walesu. Disponuje akumulačním výkonem 1800 MW, který začne dodávat 15 vteřin po spuštění, takže by dokázala zabránit i rozpadu elektroenergetické sítě při katastrofálním výpadku velké elektrárny v síti. Kvůli nenarušení krajiny, nebo tam, kde není k dispozici potřebný spád, se budují PVE, které využívají jako horní nádrž přírodní jezero, spodní nádrž a strojovna však jsou vybudovány hluboko pod zemí. Když se zvýší např. dnes obvyklé stometrové spády PVE až na 1000 m, klesne při stejném výkonu množství obíhající vody na desetinu a tím se zmenší i rozměry nádrží a stavební náklady.

Zcela novou cestu k budování přečerpávacích vodních elektráren hodlá prosadit Japonsko, které má již dnes v provozu 41 PVE s úhrnným výkonem 22 000 MW. Na ostrově Okinawa buduje přečerpávací mořskou elektrárnu, která jako první na světě bude od roku 1998 přečerpávat slanou vodu do umělé nádrže ve výši 150 m nad mořem. Její soustrojí, potrubí a uzávěry však budou muset odolávat korozi v důsledku agresivního účinku slané vody. Pokud se experiment zdaří, otevře se přečerpávacím elektrárnám nové uplatnění na mořských pobřežích všech kontinentů.



Obr. 4: Uspořádání přečerpávacích vodních elektráren

2.6 Supravodivé indukční akumulátory

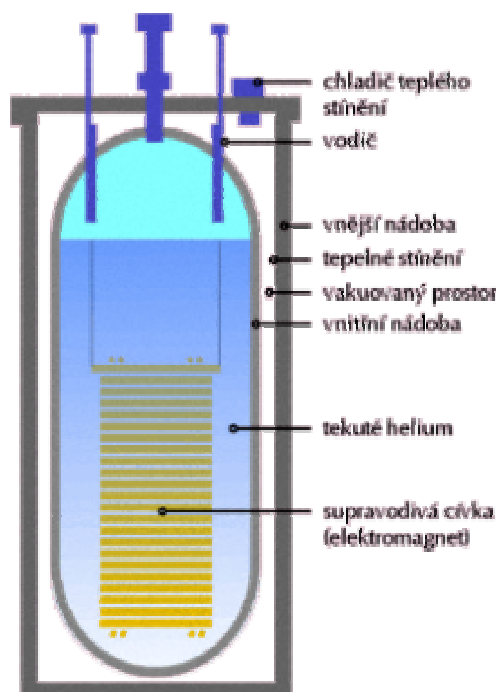
Podnět ke zcela revolučnímu způsobu akumulace elektrické energie dal vlastně nizozemský fyzik Kammerlingh Onnes již roku 1911. Ve smyčce ze rtuti vymražené v kapalném heliu indukoval elektrický proud a ten v ní k úžasu přivolaných svědků obíhal bez přerušení hodiny, dny a týdny i poté, co induktor odpojil. Stav, při kterém v látkách prakticky zcela vymizí elektrický odpor nazvali vědci supravodivostí. Onnesův sen o

tom, že jednou bude možné elektřinu beze ztrát přenášet po supravodičích, se teprve naplňuje. Supravodivost umíme vyvolat i v řadě kovů, slitin, a dokonce ve speciální keramice už nejen při teplotách kapalného helia, ale i v kapalném dusíku a vodíku. Experimenty s motory a generátory se supravodivým vinutím zdárně pokračují, stejně tak i s téměř bezdrátovým přenosem elektrického proudu po supravodivých kabelech.

Zatím bylo realizováno několik menších supravodivých akumulátorů, určených k překonání krátkodobých výpadků proudu v závodech na výrobu polovodičů, čipů a filmů, kde i výpadek pouhé desetiny sekundy může způsobit velké škody a ochromit výrobu. První malé supravodivé akumulátory UPS (Uninterruptible Power Supplies) z USA pracují se supravodivou cívku ponořenou do kapalného helia, která je nabíjena přes usměrňovač. Proud v ní cirkuluje s minimální ztrátou 0,3 kWh za 24 hodin. Už na první hlubší pokles napětí sítě na začátku výpadku reaguje akumulátor během 0,2 mikrosekundy tím, že proud z cívky indukci převede přes kondenzátor do invertoru, který je schopen po překlenovací dobu dodávat nejchoulostivějšímu uzlu tovární sítě výkon kolem 1 MW.

Větší supravodivý akumulátor SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) o kapacitě 800 Wh stabilizuje spojovací vedení společnosti Bonneville Power v Oregonu (USA). Obstál při několika milionech cyklů nabití-vybití. Doba nabíjení i vybíjení je extrémně krátká a účinnost lepší než 95 %.

Zveřejněné studie mluví o energetických supravodivých akumulátorech s kapacitou až 4 000 MW, schopných nahradit přečerpávací akumulární elektrárny. Mají mít podobu prstence (případně umístěného v podzemí), v němž je v kapalném heliu ponořena smyčka z tlustého měděného vodiče. Ztráty se započtením příkonu kryogenní stanice udržující helium na teplotě pod minus 269 °C nemají být menší než 1 %!



Obr. 5: Malý supravodivý akumulátor UPS

2.7 Elektrická akumulace

Jako elektrický akumulátor může sloužit kondenzátor nebo cívka. Na rozdíl od malé kapacity kondenzátoru je kapacita soustav na principu cívky velká. Jejich nevýhodou jsou nákladné investice a to, že se nedají ekonomicky vyrobit v menších jednotkách. Jsou prostorově náročné, řádově více než převážná většina ostatních způsobů. Do budoucna by se, ale dali využít tzv. superkondenzátory (supercapacitors), někdy označovány i jako ultrakondenzátory (ultracapacitors) nebo EDLC (electric Double Layer Capacitor).

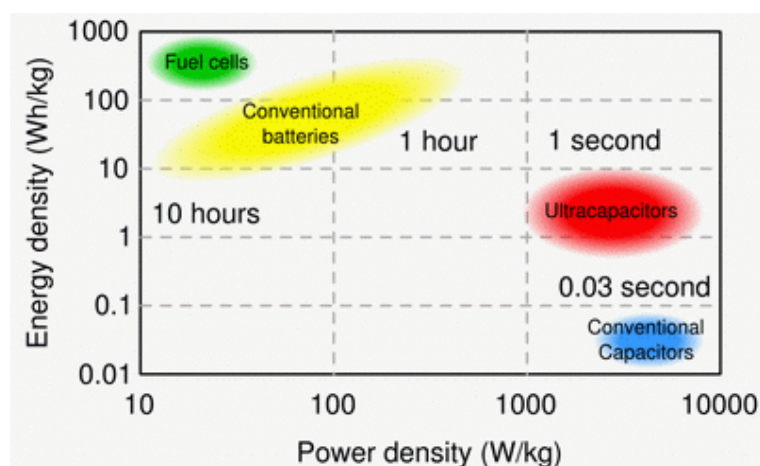
2.7.1 Superkondenzatory

U superkondenzátoru se energie uchovává ve formě elektrostatické energie, čímž mají blíže k "klasickým" kondenzátorům. Kondenzátor jako elektronickou součástku lze vyrobit mnoha různými technologiemi. Existují kondenzátory pro vysokofrekvenční aplikace na bázi keramiky, klasické svitkové nebo metalické kondenzátory s různým dielektrikem pro střední frekvence do řádu stovek kHz. Pro nízkofrekvenční a stejnosměrné aplikace je důležitý elektrolytický nebo tantalový kondenzátor. Uvedené typy kondenzátorů se běžně vyrábějí v rozsahu jednotek pF až mikroF. Náboj, který mohou zachytit tyto kondenzátory je proto relativně malý a pro dlouhodobější skladování energie mají jen malý význam. Nový typ kondenzátoru, tzv. superkondenzátor dosahuje běžně kapacit v pásmu jednotek až tisíců Faradů, a tak se již v tomto směru trochu blíží akumulátorům. Zvýšení měrné kapacity o mnoho řádů je dáno jejich principem, který je založen na využití vlastností elektrické dvouvrstvy.

Zatímco dnešní akumulátory ukládají elektřinu v podobě chemické vazby, kondenzátory ji umějí uložit v podobě elektrického náboje. Hlavní výhodou kondenzátorů oproti běžným akumulátorům, které pravidelně používáme, je vysoká účinnost, schopnost podat okamžitě plný výkon, odolnost proti přebíjení i extrémnímu vybíjení, životnost několik desítek let, mnohonásobně větší počet nabíjecích cyklů a především krátká doba nabíjení.

Superkondenzátor je tak předurčen k nasazení v automobilové technice, kde je schopen pojmout brzdnou energii, která je následně využitelná ke startu spalovacího motoru, nebo urychlení vozidla. Nejnovější vyvíjené superkondenzátory mají elektrody tvořené z pórovitého uhlíku, jehož vnitřní povrch má plochu až 2tis. metrů čtverečních v jednom gramu. Tím dochází k mnohonásobnému nárůstu kapacity, která může být ještě zvýšena umístěním velkého množství uhlíkových nanotrubic do jednoho celku. Výše uvedené výhody těchto superkondenzátorů se začínají využívat především v automobilovém průmyslu. Elektromobily s tímto zdrojem energie by byly schopné mít dostatečný výkon při stoupání v těžkém terénu díky schopnosti podat maximální výkon během okamžiku, což by se projevilo i na prudké akceleraci. To jsou oblasti, kde klasické baterie ztrácejí dech, což je handicap elektromobilů.

Velké využití těchto "malých baterií" však v budoucnu může být i v běžné spotřební elektronice, kde s rostoucí integrací obvodů klesá i napájecí napětí i spotřeba. Výdrž by sice byla nižší než chemických akumulátorů, ale schopnost neuvěřitelně rychlého nabití v řádu sekund je lákavá. Jen si například představte nabití mp3 přehrávače za několik sekund a pak jeho provoz po několik hodin.



Obr. 6: Porovnání hustoty energie (Energy density) na výkonové hustotě (Power density) pro různé zdroje el. energie

(palivové články = Fuel Cells, klasické baterie = Conventional batteries, Superkondenzátory = Ultracapacitors, klasické kondenzátory = Conventional Capacitors)

Zatímco na první pohled vypadají zapouzdřené superkondenzátory jako zvláštní baterie (viz obrázek vlevo - superkondenzátor Maxwell BOOSTCAP), jejich funkce se více podobá "klasickým" kondenzátorům založené na elektrostatickém principu uložení náboje. Hlavní rozdíl je však v použití vlastností elektrické dvouvrstvy. Jedná se o vytvoření elektrochemické dvouvrstvy po přiložení napětí na elektrody ponořené ve vodivé tekutině.

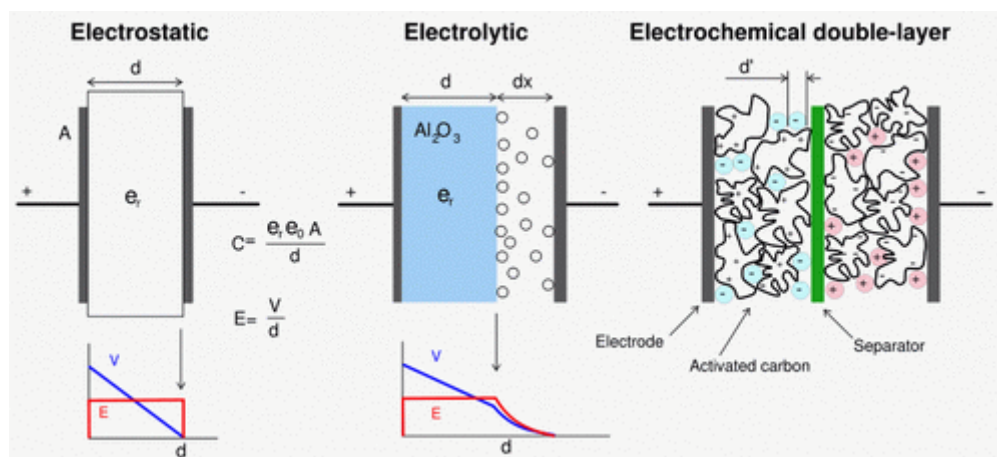
Typická dvouvrstvá struktura superkondenzátoru je složena z následujících částí:

- kladná elektroda tvořená hliníkovou fólií
- aktivní uhlík
- separátor
- aktivní uhlík
- záporná elektroda tvořená hliníkovou fólií



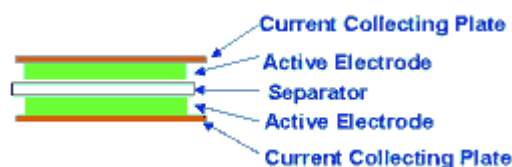
Obr. 7: Typická struktura (vrstvy) svitku superkondenzátoru

V nenabitém stavu jsou částice s nenulovým nábojem (ionty) rovnoměrně rozloženy ve vodivé tekutině, tekutém nebo gelovém elektrolytu, který se nachází mezi elektrodami. Po přiložení napětí na elektrody se začnou záporné ionty pohybovat ke kladné elektrodě a naopak kladné ionty k záporné elektrodě. Na obou elektrodách se tak vytvoří dvouvrstva se zrcadlovým rozložením elektrického náboje. Použitelné napětí je omezeno hodnotou disociačního napětí. Průrazné napětí elektrické dvouvrstvy je velmi nízké a tak typické provozní napětí superkondenzátorové buňky obvykle nepřesahuje 2.3 [V].



Obr. 8: Zjednodušené porovnání struktur elektrostatičkého kondenzátoru (vlevo), elektrolytického kondenzátoru (uprostřed) a superkondenzátoru (vpravo)

Vhodným materiálem pro aktivní elektrody (vnitřní strana hliníkových vnějších kontaktních elektrod) superkondenzátoru je aktivní uhlík. Důvodem je velká dosažitelná plocha skutečného povrchu (vysoká poréznost), chemická netečnost, elektrická vodivost a relativně nízká cena. Lze dosáhnout povrchu elektrod až 2000 m²/g, což při extrémně malé tloušťce dvouvrstvy (do 10 nm) znamená kapacitu řádově tisíců Farad ve velmi malém objemu. Současně také zaručuje velmi nízký odpor přívodních elektrod. Tato vlastnost zaručuje vysokou rychlost nabíjecího a vybíjecího procesu a nízké ohmické ztráty při provozu. Například superkondenzátor s parametry 600 F / 2.3 V má rozměry 4 x 6 x 9 cm a váží pouze 290 g. Jeho měrný výkon (vztahený k objemu i hmotnosti) je tak v porovnání s elektrolytickým kondenzátorem přibližně 100 x vyšší.



Obr. 9: Zjednodušeně základní aktivní struktura superkondenzátoru

Pod pojmem aktivní uhlík na vnitřní straně kontaktních elektrod se dnešní době obvykle skrývá jedna z následujících struktur:

- uhlíkový aerogel (Carbon aerogel) - aerogel je unikátní pevný materiál s nízkou hustotou vzniklý z normálního gelu náhradou kapalné složky vzduchem. Uhlíkový aerogel poskytuje extrémně velkou povrchovou plochu kolo 400-2000 m²/g. Malé

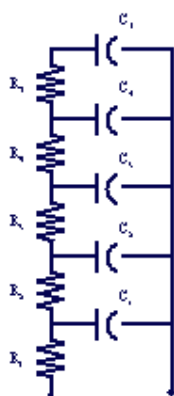
superkondenzátory s aerogelem jsou vhodné jako zálohovací baterie v nízkopříkonové mikroelektronice.

- uhlíkové polymery - polymery se vyznačují redukční-oxidační paměťovým mechanismem (reduction-oxidation storage mechanism) společně se velkou povrchovou oblastí.
- uhlíkové nanotrubic - jsou hlavní budoucností superkondenzátorů. Uhlíkové nanotrubic mají výbornou pórovitost s póry o velikosti několika nm. Navíc poskytují miniaturní prostory uvnitř trubic, které fungují jako dielektrikum.

V současných moderních superkondenzátorech z aerogelu jsou elektrody obvykle vyrobeny z netkaného papíru vyrobeného z uhlíkových vláken a pokrytý aerogelem pod nímž dochází k pyrolýze. Papír je kompozitní materiál, kde uhlíková vlákna poskytují strukturální integritu a aerogel poskytuje požadovaná velká povrch. Kapacita takového superkondenzátoru může být až $2.6 \text{ kF} = 2.6 \text{ kiloFaradů} \text{ !!!!}$

2.7.1.1 Vlastnosti a parametry superkondenzátoru

Jak již bylo zmíněno výše, maximální napětí superkondenzátoru závisí na druhu použitého elektrolytu a pohybuje se v rozmezí 1.2 - 3 V. Takové napětí je samozřejmě pro použití např. v automobilu, tedy obecně v oblasti výkonových zařízení, příliš nízké a tak je nutno spojovat více článků do série. Tím se dosáhne vyššího jmenovitého napětí superkondenzátoru za cenu snížení jeho celkové kapacity. Sériové spojení s sebou však přináší nutnost zajištění rovnoměrného rozložení napětí na jednotlivých člancích, jejichž kapacity se mohou mírně lišit. Řešením může být odporový dělič napětí (viz obrázek vedle), nebo aktivní elektronický dělič napětí. Nízký měrný odpor přívodů superkondenzátoru tak patří mezi zásadní sledované vlastnosti.

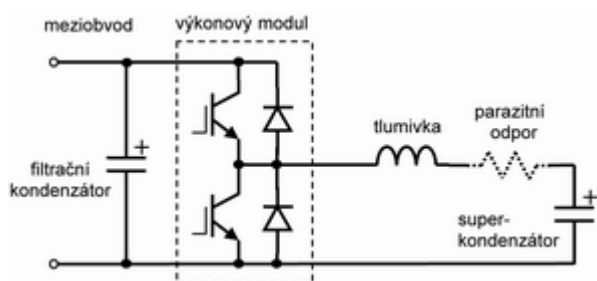


Obr. 10: Sériové zapojení superkondenzátoru

2.7.1.2 Nabíjení a vybíjení superkondenzátoru

Z hlediska nabíjení a vybíjení se s superkondenzátory pracuje spíše jako s klasickými kondenzátory než s bateriemi. V tomto směru splňují požadavků náročných

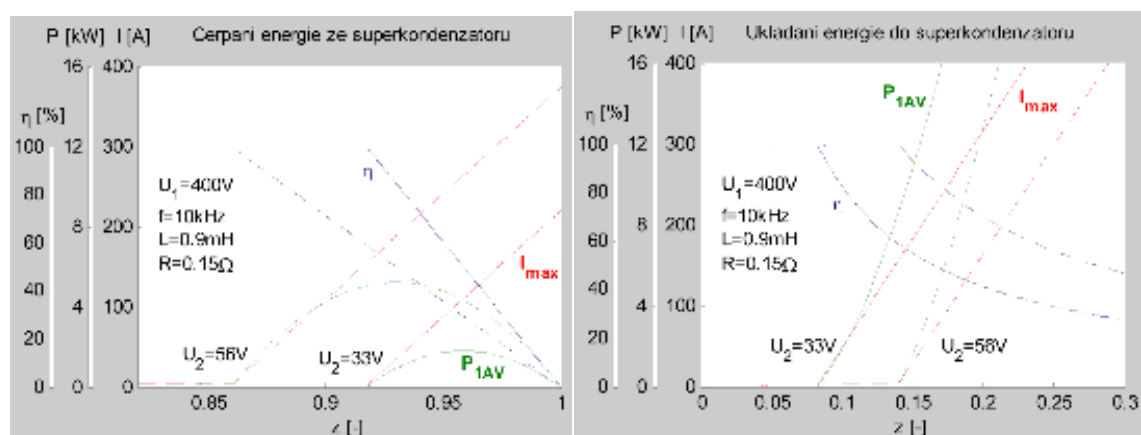
strojů a zařízení, kde se nejčastěji používají napěťové měniče řízené pulsně-šířkovou modulací (PWM). Charakteristickými hodnotami této metody řízení zdroje je spínací frekvence f resp. perioda spínání $T = 1 / f$ a střída řízení z , daná poměrem doby zapnutí spínacího prvku a periody spínání $z = t_z / T$.



Obr. 11: Základní obvod měniče s PWM řízením se zapojeným superkondenzátorem

Dle směru toku energie resp. proudu rozlišujeme dva režimy práce měniče:

- Snižovací režim - při snižovacím režimu přechází energie ze strany vyššího napětí na stranu nižšího napětí, neboli v našem případě teče proud ze ss obvodu do superkondenzátoru a ten se nabíjí.
- Zvyšovací režim - při zvyšovacím režimu je tok energie obvodem opačný a v našem případě dochází k vybíjení superkondenzátoru.



Obr. 12: Křivky superkondenzátoru - vliv střídavy z nabíjení (snížovacího měniče - vlevo) a vybíjení (zvyšovacího měniče - vpravo) na střední výkon ss obvodu P_{1AV} , špičku zvlněného proudu I_{max} a účinnost přenosu energie η , pro dvě různá napětí superkondenzátoru U_2

Ukládání el. energie do superkondenzátoru má tyto výhody:

- Velmi vysoké úrovně nabíjení a vybíjení
- Malou degradaci v průběhu stovek až tisíců nabíjecích a vybíjecích cyklů
- Dobrá reverzibilita
- Vysoká účinnost (95% a více)

Nevýhody:

- Množství energie uložené na jednotku váhy je nižší než u elektrochemických článků (3-5 W.h/kg pro superkondenzátory v porovnání s 30-40 W.h/kg pro klasické baterie).
- Napětí se mění v závislosti na množství uložené energie (podobně jako u kondenzátorů).
- Mají nejvyšší dielektrickou absorpci ze všech typů kondenzátorů.

	olověná baterie	superkondenzátor	běžný kondenzátor
nabíjecí doba	1 – 5 h	0.3 – 30 s	$10^{-3} - 10^{-6}$ s
vybíjecí doba	0.3 – 3 h	0.3 – 30 s	$10^{-3} - 10^{-6}$ s
měrná energie [Wh/kg]	10 - 100	1 – 10	< 0.1
měrný výkon [W/kg]	< 1000	< 10 000	<100 000
životnost [cyklů]	1000	> 500 000	> 500 000
účinnost nabíjení a vybíjení [%]	70 – 85	85 –98	> 95

Srovnání akumulátorů a kondenzátorů

Závěrem můžu říct, že superkondenzátorům určitě patří budoucnost. Vyplňují místo mezi klasickými kondenzátory a nabíjecími akumulátory. Existuje totiž opravdu mnoho aplikací, kde kondenzátory mají malou kapacitu a naopak akumulátory mají pomalé nabíjení, limitované zatížení a krátkou životnost. Zvláště je budoucnost superkondenzátorů jako krátkodobých zálohovacích zdrojů krátkých výpadků napájení (hodiny, radiobudíky, stolní PC, rekordéry a vypalovací zařízení apod.), vyrovnávání a akumulaci el. energie pro malé větrné a solární elektrárny, hybridní automobily a napájení nízko příkonové kapesní elektroniky.

3. Všeobecné hodnocení akumulátoru el. energie

Hodnotí-li se akumulace energie jako celek, pak jednotlivé akumulční soustavy jsou porovnávány v tab.1 a 2. Tabulka 1 srovnává hlavní technické parametry soustav, tabulka 2 dává základní podklady pro různé ekonomické propočty svými údaji o výši investičních nákladů na 1 kW.h akumulované energie a o předpokládané životnosti jednotlivých soustav.

Druh	Soustava	Měrná hustota energie		Účinnost %	Kapacita (kW.h)
		(W.h.kg ⁻¹)	(kWh.m ⁻³)		
Elektrický	kondenzátor cívka	0,01	do 20	do 50 85 až 90	max asi 0,05 10 ⁵ až >10 ⁷⁺)
Elektrochemický	Pb/PbO ₂	35 až 40	(7 až 9).10 ⁵	do 80	10 ⁻³ až 10 ³ až 10 ⁵⁺)
	Ni/Cd	25 až 35	(5 až 8).10 ⁵	do 80	10 ⁻⁶ až 10 ³
	Na/S	80 až 100		68	10 ⁴ až >10 ⁵⁺)
	Li/S	80 až 100		68	10 ⁴ až >10 ⁵⁺)
	Redox	až 55		60 až 75	104
Chemická	H ₂ (plyn)	33 000	300	22 až 52	
	H ₂ (kapalina)	33 000	2360	18 až 43	
	hydrid	600	3600	21 až 50	
	absorbce 4 Mpa			20 až 47	
Mechanický	setrvačník	260 až 600	1400	85 až 95	10 ² až 10 ³ až 10 ⁴⁺)
	stlačený vzduch a plynová turbína		2 až 5	40 až 45	až 10 ³
	stlačený vzduch			až 67	až >10 ⁵⁺)
	akumulační vodní nádrž 500 m			60 až 77	až >10 ⁷⁺)
tepelný	vodní zásobník (50 K)	60		50 až 90	až >10 ⁵⁺)
	parní zásobník			60 až 90	
	hydratovaná sůl	do 70			
	latentní teplo	do 100		33	

^{+) špičkové}

Tab. 1: Specifická data akumulátoru

Ukazatel	chemická	vodíková	tepelná	setrvač- níková	elektomag- netická	hydraulická	pneuma- tická
Minimální eko- nomická kapa- cita(MW.h)	10	10	$6 \cdot 10^2$	10	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^2$
Výpočtové investice (USD. kW ⁻¹ .h ⁻¹)	180	300	100 až 400	400	500 až 600	200 až 300	230
Životnost roků	10 až 20	30	20	30	30	50	50
Účinnost energe- tické přeměny(%)	70 až 80	40 až 60	vysoká	80	90 až 95	70	45
Investice na 1 rok životnosti USD.(kW.h.r) ⁻¹	9 až 18	10	5 až 20	13,3	16,7 až 20	4 až 6	11,5

Tab. 2: Hlavní ekonomické parametry akumulční soustavy

Poměr mezi těmito dvěma hodnotami bude určitým rámcovým ukazatelem pro srovnání jednotlivých soustav mezi sebou. Podle tohoto ukazatele vycházejí všechny způsoby akumulace přibližně na stejné úrovni s výjimkou hydraulické akumulace, která vychází jako nejvýhodnější zejména díky velké životnosti, a elektromagnetické akumulace, která je ze všech soustav jednoznačně nejdražší. Rozšiřování soustav pro hydraulickou akumulaci je značně omezeno na geografické podmínky, takže lze soudit, že u běžných případů akumulace, až na výjimky, nebudou velké rozdíly v ceně energie dodávané z různých akumulátorů. Posoudí-li se takto údaj o ceně 1 kW.h dodávané běžným olověným akumulátorem, vypočtený podle jeho ceny, bude cena energie z jakékoli akumulční soustavy řádově kolem 10 Kč za 1 kW.h.

4. Užití akumulátoru ve spojení s malou větrnou elektrárnou:

Následující část řeší malou větrnou elektrárnu na samotě v Krušných horách, situovaná mezi poli s předpokladem proudění větru větším než 8 m/s po dobu 10 hod denně, spojenou se systémem akumulace elektrické energie.

Energetický požadavek

spotřebič	výkon [W]	denní využití [h]	po čet
žárovka	11	4	4
zářivka trubicová	10	2	
stolní lampa	15	2	2
barevná televize	60	3	
vodní čerpadlo	60	3	
poplachové zařízení	2	12	
měníč v provozu	300	24	
počítač	120	3	
chladnička	20	24	

Tab. 3: Požadavky spotřebičů

Výpočet požadované kapacity [Ah] akumulátoru z tabulky :

1) výkon spotřebiče [W] / napětí [V] = příkon [A]

žárovky: $(4 \times 11) / 230 = 0,19 \text{ A}$

zářivka trubicová: $10 / 230 = 0,043 \text{ A}$

stolní lampy: $(2 \times 15) / 230 = 0,13 \text{ A}$

barevná televize: $60 / 230 = 0,26 \text{ A}$

vodní čerpadlo: $60 / 230 = 0,26 \text{ A}$

poplachové zařízení: $2 / 240 = 0,008 \text{ A}$

měníč: $300 / 230 = 1,3 \text{ A}$

počítač: $120 / 230 = 0,52 \text{ A}$

chladnička: $20 / 230 = 0,09 \text{ A}$

$$2) \text{ příkon [A]} \times \text{požadovaná doba provozu [h]} = \text{potřebná kapacita [Ah]}$$

$$\text{žárovky: } 0,19 \times 4 = 0,76 \text{ Ah}$$

$$\text{zářivka trubicová: } 0,043 \times 2 = 0,086 \text{ Ah}$$

$$\text{stolní lampy: } 0,13 \times 2 = 0,26 \text{ Ah}$$

$$\text{barevná televize: } 0,26 \times 3 = 0,78 \text{ Ah}$$

$$\text{vodní čerpadlo: } 0,26 \times 3 = 0,78 \text{ Ah}$$

$$\text{poplachové zařízení: } 0,008 \times 12 = 0,096 \text{ Ah}$$

$$\text{měnič: } 1,3 \times 24 = 31,2 \text{ Ah}$$

$$\text{počítač: } 0,52 \times 3 = 1,56 \text{ Ah}$$

$$\text{chladnička: } 0,09 \times 24 = 2,16 \text{ Ah}$$

$$3) \text{ potřebná kapacita [Ah]} \times \text{bezpečnostní faktor [1,3]} = \text{požadovaná kapacita}$$

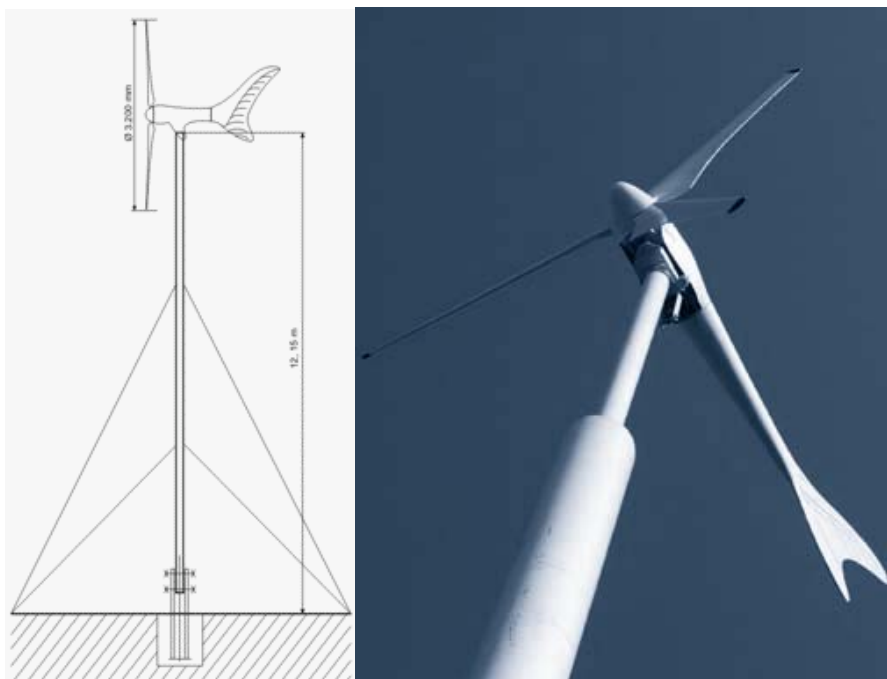
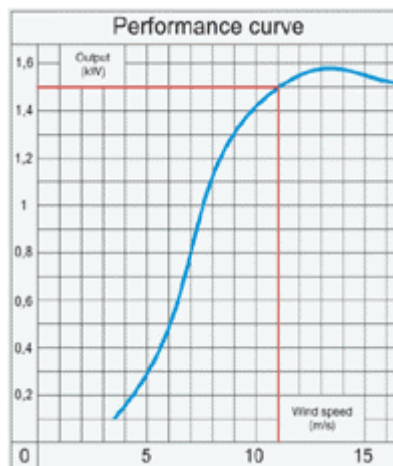
$$(0,76 + 0,086 + 0,26 + 0,78 + 0,78 + 0,096 + 31,2 + 1,56 + 2,16) \times 1,3 = 49 \text{ Ah}$$

4.1 Návrh elektrárny a akumulátoru

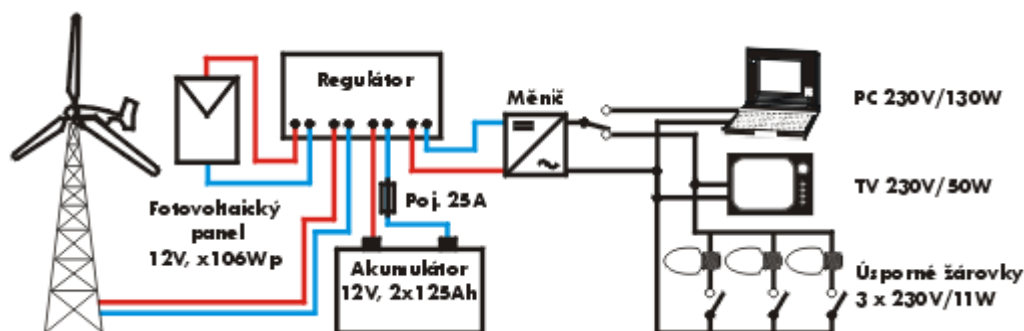
Větrnou elektrárnu o výkonu 1500W od firmy Energo Wind System, typ ML 1500 Shark.

Parametry:

Deklarovaný výkon	1500 W (11 m/s)
Maximální výkon	1600 W
Napětí	12/24 V DC, 230 DC/AC
Průměr rotoru	3200 mm
Start	3,6 m/s
Odstavení	15 m/s
Hmotnost	52 Kg
Stožár	12-21 m



Obr. 13: Náčrty a fotografie větrné elektrárny ML 1500 Shark



Obr. 14: Příklad zapojení malé větrné elektrárny do domu

Akumulátory pro větrné elektrárny

Akumulátor větrných zdrojů se nabíjí při větru. Vybíjení se výrazně liší v závislosti na použitých spotřebičích. Lze je rozdělit přibližně na:

- Pravidelné denní zatěžování, např. zapínání nočního osvětlení
- Sezónní využití (o dovolené, o sobotách a nedělích)
- Výjimečně při spuštění signalizace a osvětlení zabezpečovacího zařízení (podle typu zabezpečení může být zařízením trvale odebírán proud řádově v miliampérech)

Při pravidelném zatěžování je třeba použít baterie s dlouhou životností. Tomu nejlépe vyhovují staniční akumulátory s kladnými trubkovými elektrodami, které dosahují životnosti kolem 1200 cyklů nabití- vybití, nebo akumulátory s tyčovými kladnými elektrodami. Někteří výrobci dávají baterie konstruované speciálně pro větrné aplikace, ale s vyšší pořizovací cenou. Pro zabezpečovací zařízení je možné volit staniční baterie s přibližnou životností patnáct, deset nebo pět let. Pro sezónní použití lze volit i startovací akumulátory, které jsou levnější než akumulátory staniční, ale jejich životnost je jeden až tři roky (podle četnosti a hloubky vybíjení) nebo 100 cyklů nabití- vybití.

Pro spočítanou kapacitu 49 Ah navrhují staniční baterii od firmy Banner:

typ	96051
kapacita 5 h	105 Ah
kapacita 20 h	130 Ah
kapacita 100 h	140 Ah
rozměry (d/š/v)	513/189/206
hmotnost	36 kg

Příklady použití akumulátoru [provozní hodiny]	
chladnička 30W	38
televize 50W	23
osvětlení 80W	14

5. Ekonomické hodnocení

Vstupní údaje:

Z tabulky vypočítáme denní spotřebu energie všech spotřebičů:

spotřebič	výkon [W]	denní využití [h]	výkon[W] x denní využití[h]=[Wh]
žárovka	4x11	4	176
zářivka trubicová	10	2	20
stolní lampa	2x15	2	60
barevná televize	60	3	180
vodní čerpadlo	60	3	180
poplachové zařízení	2	12	24
měníč v provozu	300	24	7200
počítač	120	3	360
chladnička	20	24	480
celkem za den			8662

Denní využití je 8662 W.h, takže za rok je to při každodenním stejném používání:

$$8662 \times 365 = 3168,2 \text{ KW.h}$$

Investiční náklady:

Stavební část:

projekt	4 500 Kč
vybetonování základu na sloup elektrárny	9 000 Kč

Technologická část:

elektrárna(životnost 25 let)	95 000 Kč
akumulátor(životnost 10 let)	5 200 Kč
měníč	6 200 Kč

celkové investiční náklady: 119 900 Kč

Návratnost(T_{SI}) při financování pomocí vlastního kapitálu:

$$CF = RV \times C$$

$$CF = 3168,2 \times 3,50$$

$$CF = 11\,088 \text{ Kč}$$

$$T_{SI} = IN / CF$$

$$T_{SI} = 119\,900 / 11\,088$$

$$T_{SI} = 10,16 \text{ let}$$

IN.....investiční náklady

CF.....roční vynos v peněžní podobě

C.....průměrná cena 1 kW.h

RV.....roční spotřeba

Návratnost (T_{S2}) při financování 50% vlastním kapitálem a 50 %-tní státní dotací:

$$T_{S2} = IN / CF$$

$$T_{S2} = 59950 / 11\,088$$

$$T_{S2} = 5,4 \text{ let}$$

6. Závěr

Podle výsledku T_{S1} je zřejmé, že investice do větrné elektrárny jsou dlouhodobé a je třeba si dobře rozmyslet, zda se vyplatí. Cenu energie získané z větrných elektráren určuje výše investičních nákladů a životnost zařízení. Dobrým ukazatelem jsou měrné náklady. Čím menší větrný motor se použije, tím větší jsou měrné náklady na 1 kW. Optimální výkon je 300 až 500 kW. V této kategorii vychází 1 kW.h vzhledem k nákladům a vyrobené energii obvykle nejlevněji. U malých větrných elektráren je vhodná kombinace více systému obnovitelných zdrojů energie, např. kombinace větrné elektrárny a elektrárny sluneční a následná akumulace do akumulátoru. Jelikož v zimě je energie větru nejvyšší, kdežto solární energie nejnižší a v létě je to naopak.

7. Použitá a doporučená literatura:

1. Cenek, M., Jindra, J., Jon, M., Kapelle, J., Kozumplík, J., Vrba, J.: Akumulátory od principu k praxi, FCC PUBLIC, Praha, 2003
2. Rychetník, V., Pavelka, J., Janoušek, J.: Větrné motory a elektrárny, ČVUT, Praha, 1997

Internetové stránky:

3. www.vetrneelektrarny.cz
4. www.eles-solar.cz
5. www.ekowatt.cz
6. www.energetika.cz