

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Využití vodíku pro akumulaci energie z OZE

autor: Jakub Štěpánek

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub ŠTĚPÁNEK**
Osobní číslo: **E10N0099P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Technická ekologie**
Název tématu: **Využití vodíku pro akumulaci energie z OZE**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


1. Popište dostupné technologie výroby vodíku pomocí elektrické energie.
2. Porovnejte účinnost této akumulace s ostatními běžně používanými formami akumulace.
3. Navrhněte systém využívající nadvýrobu elektrické energie pro akumulaci vodíku.
4. Navrhněte systém využívající vodík k výrobě elektrické energie a tepla.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Beneš**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem systému, který při nadvýrobě elektrické energie z obnovitelných zdrojů vyrábí a ukládá vodík. Dále se zabývá návrhem systému využívající naakumulovaný vodík k výrobě elektrické energie a tepla v případě potřeby.

Klíčová slova

Vodík, akumulace energie, palivový článěk, elektrolyzér, elektrolýza vody, skladování vodíku, vodíkové projekty

Abstract

In this dissertation is designed system, which accumulated energy from renewable sources to the hydrogen. For production of hydrogen are used surplus of electric power. Next is designed hydrogen storage system. Finally is designed system which produced electric power and heat from the hydrogen.

Key words

Hydrogen, energy storage, fuel cell, electrolyser, electrolysis of water, hydrogen storage, hydrogen projects

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 9.5.2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Benešovi za poskytnutí materiálů týkajících se objektu, pro který byl navrhován systém akumulace a za rady a připomínky k práci. Dále bych chtěl poděkovat RNDr. Jiřímu Hostýnkovi za poskytnutí hydrometeorologických dat pro danou oblast.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
TECHNOLOGIE VÝROBY VODÍKU POMOCÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE	12
1.1 ÚVOD.....	12
1.2 VÝROBA VODÍKU POMOCÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE – NÍZKOTEPLTNÍ ELEKTROLÝZA VODY	12
1.2.1 Alkalické elektrolyzéry	12
1.2.2 Elektrolyzéry s polymerní membránou.....	14
1.3 VYSOKOTEPLTNÍ ELEKTROLÝZA.....	15
1.4 PALIVOVÉ ČLÁNKY	16
1.4.1 Palivový článek s polymerní membránou (PEMFC - Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell) 16	
1.4.2 Palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC - Phosphoric Acid Fuel Cell).....	16
1.4.3 Alkalický palivový článek (AFC - Alkaline Fuel Cell)	17
1.4.4 Palivový článek s tekutým uhlíčanem (MCFC - Molten Carbonate Fuel Cell)	17
1.4.5 Palivový článek s pevným oxidem (SOFC - Solid Oxide Fuel Cell).....	17
1.5 VODÍKOVÉ SPALOVACÍ MOTORY	17
2 POROVNÁNÍ ÚČINNOSTI AKUMULACE ENERGIE DO VODÍKU S OSTATNÍMI BĚŽNĚ	
POUŽÍVANÝMI FORMAMI AKUMULACE	18
2.1 IDEÁLNÍ SYSTÉM NA AKUMULACI ENERGIE	18
2.2 ZPŮSOBY AKUMULACE ENERGIE	18
2.3 AKUMULÁTORY	18
2.3.1 Olověný akumulátor.....	18
2.3.2 Nikl-kadmiový akumulátor (NiCd).....	19
2.3.3 Nikl-metal-hybridový akumulátor (NiMH).....	19
2.3.4 Lithium-iontový akumulátor (Li-ion)	20
2.3.5 Lithium-polymerový akumulátor (Li-pol).....	20
2.3.6 Sodíko-sírový akumulátor (NaS).....	21
2.3.7 Zinko-brómový akumulátor ZnBr.....	21
2.3.8 Sodík-chlorid nikelnatý akumulátor „ZEBRA“ (NaNiCl).....	22
2.4 PŘEČERPÁVACÍ VODNÍ ELEKTRÁRNÝ (PVE)	23
2.5 AKUMULACE ENERGIE DO STLAČENÉHO VZDUCHU (CAES)	24
2.6 AKUMULACE ENERGIE DO SETRVAČNÍKU	25
2.7 SUPERKAPACITORY (SCES).....	26
2.8 SUPRAVODIVÝ MAGNETICKÝ SYSTÉM AKUMULACE ENERGIE (SMES)	27
2.9 AKUMULACE ENERGIE DO VODÍKU	28
Obr. 10 Blokové schéma systému akumulace energie do vodíku.....	28
2.9.1 Skladování vodíku	29
2.10 VODÍKOVÉ PROJEKTY	30
2.10.1 Solárně-vodíkový projekt v Neunburgu vorm Wald, Německo.....	30
2.10.2 Systém PHOEBUS - Jülichu	32
2.10.3 Projekt HARI ve WestBeacon Farm v Leicestershire, Anglie	33
2.10.4 Projekt Utsira.....	34
2.10.5 Prenzlau – Německo	35
2.10.6 Hydrogen Community Lolland - Dánsko	36
2.11 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH PRINCIPŮ AKUMULACE	37
3 NÁVRH SYSTÉMU VYUŽÍVAJÍCÍ NADVÝROBU ELEKTRICKÉ ENERGIE PRO AKUMULACI	
VODÍKU	38
3.1 ÚVOD.....	38
3.2 POPIS OBJEKTU	38

3.3	SPOTŘEBA A POTŘEBA ENERGIE V OBJEKTU.....	38
3.3.1	<i>Potřeba tepla a tepelné ztráty</i>	38
3.3.2	<i>Spotřeba elektrické energie</i>	40
3.4	NÁVRH SYSTÉMU VÝROBY ENERGIE Z OZE.....	41
3.4.1	<i>Klimatické podmínky</i>	41
3.4.2	<i>Návrh systému větrných elektráren</i>	42
3.4.3	<i>Návrh systému solárních elektráren</i>	46
3.4.4	<i>Vodní elektrárna</i>	48
3.4.5	<i>Bioplyn</i>	48
3.5	NÁVRH SYSTÉMU NA VÝROBU VODÍKU.....	48
3.6	NÁVRH SYSTÉMU AKUMULACE.....	49
4	NÁVRH SYSTÉMU VYUŽÍVAJÍCÍ VODÍK K VÝROBĚ ELEKTRICKÉ ENERGIE A TEPLA ...	53
4.1	VÝROBA ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	53
4.2	VÝROBA TEPLA.....	55
4.3	BLOKOVÉ SCHÉMA NAVRŽENÉHO SYSTÉMU AKUMULACE.....	57
4.4	NÁVRH NA UMÍSTĚNÍ SYSTÉMU.....	59
4.5	MATEMATICKÝ MODEL.....	59
5	ZÁVĚR A ZHODNOCENÍ.....	62
5.1	ENERGETICKÁ EFEKTIVNOST.....	62
5.2	ENVIROMENTÁLNÍ HLEDISKO.....	62
5.3	EKONOMIKA.....	62
	POUŽITÁ LITERATURA.....	63
	PŘÍLOHY.....	1

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na návrh systému akumulace energie z obnovitelných zdrojů do vodíku. Dále se zabývá jeho následným využitím v případě nedostatečné nebo žádné výroby z obnovitelných zdrojů. Text je rozdělen do pěti částí. V první části jsou popsány technologie výroby vodíku pomocí elektrické energie a systémy využívající vodík na výrobu elektrické energie. V druhé části jsou popsány principy akumulace energie a dále jsou zde popsány největší výzkumné a pilotní projekty využívající vodík jako médium pro akumulaci energie. Ve třetí části je navržen systém vyrábějící elektrickou energii z obnovitelných zdrojů, který při nadvýrobě elektrické energie vyrábí a ukládá vodík. Čtvrtá část obsahuje návrh systému, který z vodíku v případě potřeby vyrábí elektrickou energii a teplo. V páté části je zhodnocení navrženého systému a vodíkových technologií.

Seznam symbolů

$[\text{Nm}^3]$	Normativní metr krychlový
$[\text{kWh/kg}]$	Měrná hustota energie
$[\text{kWh/Nm}^3 \text{ H}_2]$	Energie v normativním metru krychlovém vodíku
$\text{J}[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$	Moment setrvačnosti
E_k [J].....	Kinetická energie
E_p [J].....	Potenciální energie
v_h [ms^{-1}].....	Rychlost větru
h [m].....	Výška větrné turbíny
E_{EL} [J].....	Spotřeba elektrické energie
E_{TEP} [J].....	Spotřeba tepelné energie
k_t [-].....	Koeficient teploty
k_d [-].....	Koeficient dne v týdnu
V_{H_2} [Nm^3].....	Spotřeba vodíku
$H_{\text{o,n}}$ [kJ/m^3].....	Spalné teplo
p [Pa].....	Tlak
n [mol].....	Látkové množství
R [$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$].....	Univerzální plynová konstanta
a [-].....	Koeficient Redlich-Kwonovi stavové rovnice
b [-].....	Koeficient Redlich-Kwonovi stavové rovnice

Technologie výroby vodíku pomocí elektrické energie

1.1 Úvod

V současné době je někdy vodík prezentován jako na palivo budoucnosti. Vodík se ale v použitelné formě pro spalování nebo jako palivo do palivových článků na Zemi nevyskytuje. Existuje několik způsobů výroby vodíku. Ve všech případech je ale zapotřebí dodat energii kterou lze v omezené míře získat zpět. Proto je pro vodík vhodnější označení energetický vektor neboli nosič energie. A je jen tak čistý, jak jsou čisté primární zdroje a suroviny použité na jeho výrobu.

1.2 Výroba vodíku pomocí elektrické energie – nízkoteplotní elektrolýza vody

Nízkoteplotní elektrolýza je proces, při kterém dochází k elektrochemickému rozkladu vody přivedením stejnosměrného napětí na elektrody elektrolýzéry. V současnosti jsou průmyslově vyráběny dva typy elektrolýzérů, alkalické a s pevnou polymerní membránou. Elektrolýzéry mají výrobní kapacitu od několika dm^3 do stovek m^3 vodíku za hodinu. Elektrolýzou vody jsou vyrobeny asi 4 % z celosvětové produkce vodíku. [1] [2]

1.2.1 Alkalické elektrolýzéry

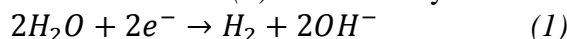
Alkalické elektrolýzéry používají nejčastěji jako elektrolyt vodný roztok hydroxidu draselného (25 až 30 % KOH), který je použit pro zvýšení vodivosti. Roztok KOH má ze všech alkalických hydroxidů nejvyšší vodivost a na rozdíl od kyselých elektrolytů nemá korozivní účinky na elektrody. Tyto jednotky mohou být unipolární nebo bipolární. Membrána (diafragma) slouží k oddělení vyrobených plynů, a musí umožňovat průchod iontů. Nejčastěji jsou použity azbestové, dále keramické, kompozitní a polymerní jsou spíše ve stádiu vývoje. [1] [2]

Unipolární elektrolýzéry mají elektrody připojené paralelně a membrána oddělující vyráběný vodík a kyslík je umístěna mezi anody a katody.

Bipolární elektrolýzéry mají elektrolýzní články zapojené do série a vodík je produkován na jedné straně článku a kyslík na druhé. Jednotlivé elektrody jsou odděleny membránami. Tyto elektrolýzéry jsou schopné vyrábět největší množství vodíku a jsou celosvětově nejpoužívanější. [3]

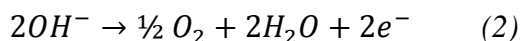
Produkce vodíku na katodě v alkalickém elektrolýzéry

Rozštěpením molekuly vody pomocí elektrického proudu vznikne na záporné elektrodě a dvouatomová molekula vodíku a iont OH^- (1). Anoda se vyrábí z Ni nebo je poniklována.



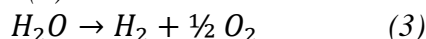
Produkce kyslíku na anodě v alkalickém elektrolýzéry

Ionty OH^- se na kladné elektrodě oxidují a ztrácejí elektrony (2). Katoda se vyrábí z oceli nebo niklu.



Souhrnný děj v alkalickém elektrolýzéry

Rozklad vody na vodík a kyslík (3).



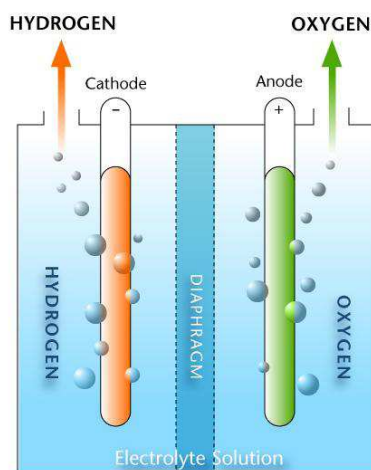
Spotřeba energie	4,3 – 4,8 kWh/Nm ³ H ₂	47,8 – 53,4 kWh/kg H ₂
Ideální napětí	1,229 V při 25 °C	
Reálné napětí	1,85 – 2,05 V	
Rozsah teplot	70-90 °C pokročilé experimentální elektrolyzéry až 150 °C	
Čistota vodíku	99,9 % (zvyšuje se průchodem přes kontaktní hmotu)	
Generovaný tlak	0,1 – 3 MPa	
Účinnost procesu	70 - 80 % klesá s rostoucí produkcí H ₂	

Aktuální stav

Alkalická elektrolyza je jedinou vysokokapacitní elektrochemickou technologií na výrobu vodíku. Výhodou je použití nenáročných a levných materiálů, dlouhá životnost a robustnost. [4]

Směr vývoje

Snahou ve vývoji alkalických elektrolyzérů je nahradit stávající masivní separační prepážku materiálem s menším ohmickým odporem. Náhradou stávající diafragmy by bylo možné snížit vzdálenost mezi elektrodami a tím zvýšit napěťovou účinnost. Vývoj směřuje k polymerní anion selektivní membráně, bohužel ale v současnosti není k dispozici dlouhodobě stálý materiál splňující všechny požadavky. [4]



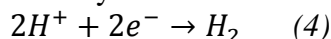
Obr. 1 Schéma alkalického elektrolyzéro

1.2.2 Elektrolyzéry s polymerní membránou (PEM – Polymer Electrolyte Membrane nebo Proton Exchange Membráně nebo SPE – Solid Polymer Membrane)

Elektrolyzéry s pevnou polymerní membránou jsou nejnovější používanou technologií. V této jednotce je místo vodného roztoku použita pevná polymerní pro ionty propustná membrána. Voda je přiváděna k anodě, kde se elektrolyticky rozloží na kyslík, H^+ ionty, a elektrony. Atomy kyslíku se na povrchu elektrody spojují v plynný O_2 , zatímco H^+ ionty prostupují přes membránu. Elektrony procházejí vnějším napájecím obvodem. Na katodě se protony spojují s elektrony a vyvíjí se plynný vodík. V tomto elektrolyzérovi nedochází ke kontaminaci plynů, či materiálů systému kyselinou, nebo zásadou. Pevný elektrolyt také podporuje tvorbu plynů přímo daného tlaku. Membrány těchto systémů se vyrábí z jediného komerčně úspěšného materiálu NAFIONTM. [5]

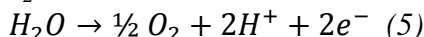
Produkce vodíku na katodě v PEM elektrolyzérovi (4):

Katoda se vyrábí z Pt nebo ze sloučeniny C s Pt



Produkce kyslíku na anodě v PEM elektrolyzérovi (5):

Anoda se vyrábí z Pt-IrO₂, RuO₂ nebo Ti



Souhrnný děj v PEM elektrolyzérovi (6):



Spotřeba energie	cca 45 kWh/kg H ₂
Reálné napětí	1,4 V – 2V
Pracovní teplota	cca 80 °C
Čistota vodíku	> 99,99 %
Max. generovaný tlak	až 1,4 MPa
Účinnost elektrolýzy	80 % - 90

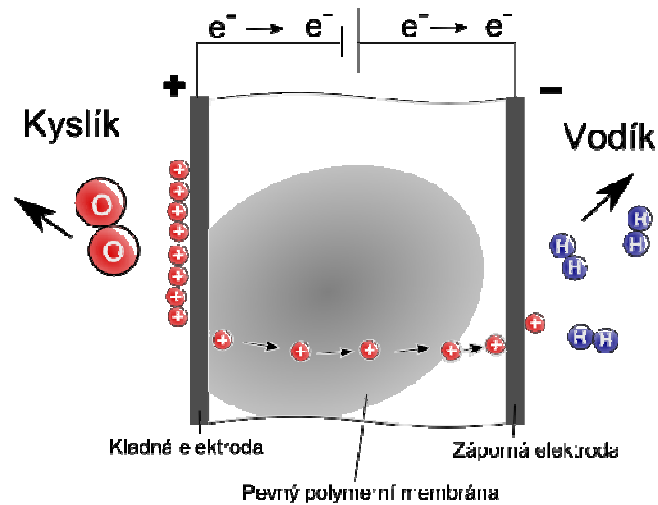
Aktuální stav

Systémy na bázi PEM, které jsou nyní komerčně dostupné vyrábí vodík v řádech jednotek až několika málo desítek Nm³/hod. Jejich využití je pro nízko až středně kapacitní aplikace. Z těchto systémů lze získávat vodík o tlaku až 1,4 MPa bez použití kompresoru. Energie potřebná ke kompresi vodíku je dodávána ve formě zvýšeného potenciálu katody asi o 30 mV na dekádu vzrůstu tlaku (při přetlaku 1 MPa o 0,030 V/článek, při přetlaku 10 MPa o 0,60 V/článek). Elektrochemická komprese je účinnější než mechanická komprese již vyrobeného vodíku. [3] [5]

Směr vývoje:

Vývoj se v této oblasti zaměřuje na zvyšování tlaků a teplot do oblasti 110 °C – 200 °C. Tím dojde ke zvýšení kinetiky elektrodových reakcí. A bylo by možné nahradit Pt katalyzátory jinými levnějšími materiály, popř. snížit množství použité platiny. Současné polymerní materiály zatím nejsou stále v tomto prostředí.

Na Obr. 2 je zobrazen princip funkce PEM elektrolyzáru.



Obr. 2 Princip funkce PEM elektrolyzáru

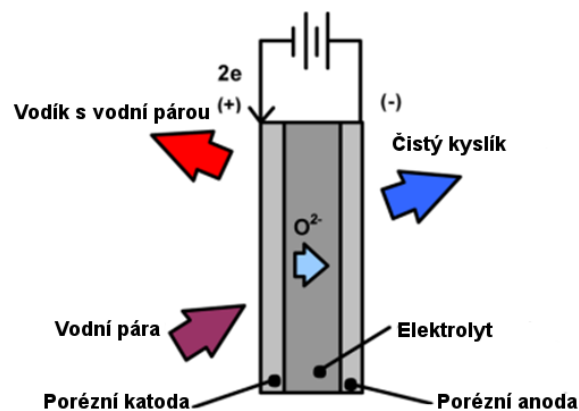
1.3 Vysokoteplotní elektrolýza

U této technologie je část energie dodané ve formě tepla a část ve formě elektrické energie. Přiváděním energie ve formě tepla dojde ke snížení rovnovážného napětí a snadnějšímu překonání aktivační bariéry na povrchu elektrody. Výstupem z elektrolyzáru je vodík a vodní pára z toho tvoří 75 - 90 % hmotnosti vodík. Vodík je od páry vyčištěn v kondenzační jednotce. Část vodíku se vrací zpět do procesu a zbytek je uskladňován. Energie na výrobu vodíku je vyšší o energii nutnou pro ohřev páry, ale celková účinnost systému je vyšší oproti nízkoteplotní elektrolýze. [1]

Spotřeba energie	cca 3,1 kWh/Nm ³ H ₂ při 1000 °C
Provozní teplota	600 – 1000°C

Aktuální stav

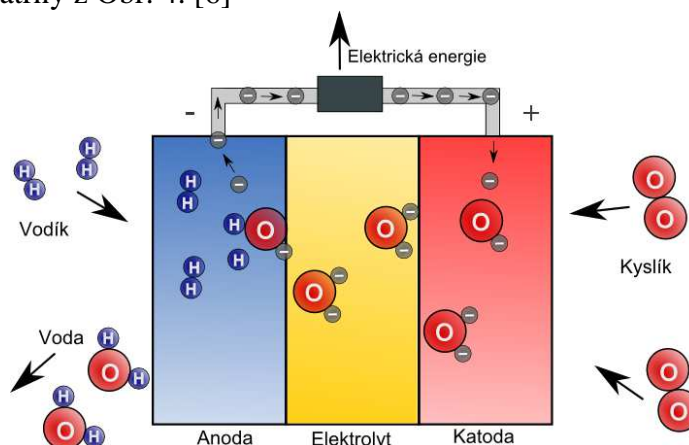
Využití těchto zařízení se zkoumá. Rozvoj technologie by mohl nastat s vybudováním komerčních pokročilých vysokoteplotních jaderných reaktorů. Tyto reaktory mají vysoké výstupní teploty chladicího média a vysokou účinnost výroby elektrické energie. Ve vhodných lokalitách lze uvažovat i s použitím koncentračních slunečních elektráren. Nevýhodou této technologie je vysoké tepelné namáhání materiálů a potřeba inovovaných keramických materiálů na elektrody a elektrolyt.



Obr. 3 Výroba vodíku při vysokoteplotní elektrolýze

1.4 Palivové články

Palivový článek je elektrochemické zařízení, které přeměňuje chemickou energii v palivu během oxidačně-redukční reakce přímo v elektrickou energii. Skládá se z porézních elektrod oddělených elektrolytem. V oblasti pórů elektrod vzniká třífázové rozhraní – elektroda, elektrolyt a reagenty vzniklé oxidací paliva a redukcí okysličovadla. Základní princip transformace energie je pro všechny palivové články stejný, jednotlivé typy se však liší materiálem elektrod, použitým elektrolytem a pracovní teplotou i konkrétními chemickými reakcemi na anodě a katodě. Princip funkce palivového článku, děj v principu inverzní k elektrolýze, jak je patrný z Obr. 4. [6]



Obr. 4 Princip činnosti palivového článku [36]

1.4.1 Palivový článek s polymerní membránou (PEMFC - Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)

Jako elektrolyt slouží iontoměničová polymerní membrána (většinou na bázi kyselých fluorovaných polymerů), která je výborným protonovým vodičem. Vzhledem k tomu, že jedinou kapalinou v tomto typu PČ je voda, jsou minimalizovány problémy s korozí. Pro efektivní provoz je klíčovým problémem tzv. vodní režim; podmínky musí být nastaveny tak, aby se produkt - voda – neodpařovala rychleji, než je produkována. Vysoký stupeň hydratace membrány je podmínkou pro její dobrou protonovou vodivost. Operační teplota je limitována použitým polymerem, většinou je nižší než 120 °C (ačkoliv v současné době se provádí testy s novými materiály až k 200 °C). Palivem je v tomto případě čistý vodík nebo metanol, používaný většinou v přenosných aplikacích, popřípadě v malých až středních stacionárních jednotkách. Jako katalyzátor se využívá především Pt, případně Pt/Rh a jiné. Pro tento typ katalyzátorů je významným jedem CO, proto se musí zajistit, aby v palivu nebyla jeho koncentrace vyšší než 5 ppm. Hustota výkonu se u PEM palivového článku pohybuje těsně nad hranicí 0,1kW/l a 0,125 kW/kg. [7] PEMFC pracují při nízkých teplotách, což dovoluje rychlejší najíždění a okamžitou odezvu na změnu požadovaného výkonu. Z těchto důvodů se PEMFC hodí především pro pohon vozidel, ale jsou vyvíjeny i jako malé stacionární jednotky. [6]

1.4.2 Palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC - Phosphoric Acid Fuel Cell)

Tento druh PČ pracuje při 150 – 220 °C, přičemž jako elektrolyt používá 100% kyselinu fosforečnou. Při nižších teplotách má H_3PO_4 horší protonovou vodivost a problém CO jako katalytického jedu pro Pt se stává významnějším. Kyselina fosforečná je stabilnější než ostatní běžné kyseliny, proto je schopná pracovat v širokém rozsahu teplot. [7] U PAFC musí být zajištěn odvod tepla jsou proto často využívány jako kogenerační jednotky. [6]

1.4.3 Alkalický palivový článek (AFC - Alkaline Fuel Cell)

Elektrolytem je 85 % hmotnostních KOH (hydroxid draselný) pro PČ pracujících při vyšších teplotách (~250°C), pro nižší teploty (<120°C) se používá (35 – 50 % hmotnostních). Elektrolyt je udržován v porézním materiálu, kterým je ve většině případů azbest. Výhodou tohoto typu PČ je možnost využití širokého spektra (levných) katalyzátorů - Ni, Ag, MeO, korund a vzácné kovy. Největším problémem je čistota paliva a oxidačního činidla, kdy i malé množství CO₂ způsobuje znehodnocování elektrolytu (reakcí CO₂ s KOH za vzniku K₂CO₃). CO je stejně jako v případě PEMFC katalytickým jedem. Proto se nejčastěji jako okysličovadlo používá čistý O₂. [7]

1.4.4 Palivový článek s tekutým uhličitánem (MCFC - Molten Carbonate Fuel Cell)

Elektrolytem je většinou směs alkalických uhličitánů (typicky tavenina obsahující 62 mol% Li₂CO₃ a 38 mol% K₂CO₃) které jsou zadržovány v matrixu LiAlO₂. Provozní teplota je od 500 °C do 700 °C; v tomto rozmezí tvoří směs uhličitánů vysoce vodivou roztavenou sůl, ve které zprostředkovávají vodivost uhličitánové ionty. Díky vysokým teplotám není nutné používat vzácné kovy pro katalyzátory. [7]

Anoda bývá tvořena slitinami niklu (obvykle s Cr nebo Al) a katoda jeho oxidy (NiO s příměsí lithia). Hlavním problémem je strukturální stabilita a spékání porézní Ni anody a rozpad NiO katody. [6]

1.4.5 Palivový článek s pevným oxidem (SOFC - Solid Oxide Fuel Cell)

Tento typ PČ je výjimečný tím, že jeho elektrolyt je pevný, neporézní kovový oxid, používá se Y₂O₃ stabilizovaný ZrO₂. Pracovní teplota je 600 – 1000 °C, přičemž vodivost zprostředkovávají kyslíkové anionty. Materiálem pro anodu je Co-ZrO₂ nebo Ni-ZrO₂, pro katodu se používá LaMnO₃ dopovaný stronciem. Skutečnost, že elektrolyt je pevný, má velký význam pro zjednodušení systému, vyskytují se zde na rozdíl od všech ostatních typů PČ pouze dvě fáze, pevná a plynná. [7]

Výstupní proud produktů chemické reakce je u článků SOFC na dostatečně vysoké teplotní úrovni, aby jej bylo možno využít pro následnou expanzi v plynové turbíně, čímž lze ještě zvýšit účinnost celého zařízení. [6]

1.5 Vodíkové spalovací motory

Obecné vlastnosti spalovacích motorů jsou v jistém smyslu opačné než u palivových článků. Vysoké účinnosti se dosahuje až při větším zatížení, směrem k otáčkami stupňovanému výkonu účinnost opět klesá.

Možnost práce spalovacího motoru na vodík byla zkoušena od 20. let minulého století (vzducholodní motory). Vodík hoří velmi rychle řetězovou rozvětvenou reakční kinetikou. Jeho plamen je v důsledku vysoké výhřevnosti stabilní i při velmi chudé směsi, což lze využít pro omezení emisí oxidů dusíku. Nevýhodou spalování vodíku je malá objemová výhřevnost směsi daná nízkou hustotou vodíku. Zejména použití chudých směsí vyžaduje proto přeplňování a vstřík vodíku do válce až během sání, nejlépe ke konci sacího zdvihu.

Spalovací motory budou s největší pravděpodobností využívány jen na přechodné období. Předpokládá se, že v budoucnu budou nahrazeny palivovými články. Výhodou spalovacích motorů je nízká cena a vysoká životnost. Oproti palivovým článkům mají nižší účinnost mezi 30% a 35%. Pro výrobu elektrické energie je vodíkový motor spojen s generátorem.[1] [7] [8]

2 Porovnání účinnosti akumulace energie do vodíku s ostatními běžně používanými formami akumulace

2.1 Ideální systém na akumulaci energie

Ideální systém na akumulaci energie by měl mít [9]:

- vysoký výkon
- vysokou energetickou kapacitu
- rychlou časovou odezvu
- možnost kompenzace jalového výkonu
- vysokou účinnost
- nízké samovybíjení
- možnost samostatného ostrovního provozu
- nízké pořizovací i provozní náklady
- negativní vliv na životní prostředí

2.2 Způsoby akumulace energie

V současné době jsou k dispozici nebo ve vývoji následující technologie pro uchovávání energie:

1. Olověné akumulátory (zaplavené, VRLA konstrukce)
2. Moderní akumulátory (Li-Ion, Zebra, NaS a další)
3. Přecherčovací vodní elektrárny (PVE)
4. Akumulace energie založená na stlačeném vzduchu (CAES)
5. Nízkorychlostní a vysokorychlostní elektromechanické setrvačníky (FESS)
6. Superkapacitory (SCES)
7. Supravodivý magnetický systém akumulace energie (SMES)
8. Akumulace energie do vodíku

2.3 Akumulátory

Akumulátory přeměňují elektrickou energii na energii chemickou, která je v případě potřeby transformována zpět na elektrickou energii.

2.3.1 Olověný akumulátor

Článek olověného akumulátoru je tvořen dvěma olověnými elektrodami pokrytými sulfidem olova. Při nabíjení se začne na kladné elektrodě tvořit oxid olovičitý (PbO_2), na záporné elektrodě zůstane olovo. Současně vlivem probíhajících chemických reakcí klesá obsah vody a zvyšuje se koncentrace kyseliny sírové v elektrolytu asi z $1,12 \text{ g/cm}^3$ na $1,28 \text{ g/cm}^3$. Napětí článku přitom dosáhne hodnotu 2 V. Klidové napětí nabitého článku je o něco větší než 2,0 V a je asi 2,12 V. Napětí vybitého článku je 1,75 V. Při vybíjení prochází proud opačným směrem, uvolňuje se voda a elektrody se opět pokryjí sulfidem olova. [37]

Hustota energie	30 - 40 Wh/kg	60 000 – 70 000 Wh/m ³
Pracovní teplota	-40 °C až +60 °C	
Počet nabíjecích cyklů	500 – 800	
Samovybíjení	cca 3 % za měsíc	
Nabíjení	nevybíjí se před nabíjením	
Skladování	v režimu nabíjení	
Účinnost akumulace	cca 85 %	

Výhody: Jsou levné a moderní konstrukce nepotřebuje údržbu. Mají nízký vnitřní odpor a mohou dodávat vysoké nárazové proudy.

Nevýhody: Velká hmotnost. Při hlubokém vybíjení nebo při skladování v nedobitém stavu degradují a ztrácejí kapacitu.

Příklad použití

Olovené akumulátory se využívají ve speciálních stacionárních aplikacích jako zdroje při ostrovním provozu či jako náhradní nebo nouzové zdroje, výkony těch největších se pohybují v MW, výjimečně v desítkách MW. Často slouží k překlenutí doby, po kterou nabíhá jiný zdroj.

2.3.2 Nikl-kadmiový akumulátor (NiCd)

Kladná elektroda alkalického akumulátoru v nabitém stavu je tvořena oxo-hydroxidem nikelnatým NiO(OH), který při vybíjení přechází na hydroxid nikelnatý. Záporná kadmiová elektroda při vybíjení reaguje s kyslíkem za vzniku CdO. Elektrolytem je rozpuštěný hydroxid draselný ve vodě. Napětí jednoho článku je 1,2 V. [38]

Hustota energie	40 - 60 Wh/kg	140 Wh/l
Pracovní teplota	-20°C + 60 °C	
Počet nabíjecích cyklů	1000-1200	
Samovybíjení	10 % za měsíc	
Nabíjení	vybíjí se před nabíjením	
Skladování	vybité	

Výhody: NiCd akumulátory mohou dodávat vysoké nárazové proudy a nejsou náchylné na hluboké vybíjení a rychle se nabíjejí.

Nevýhody: NiCd akumulátory se mohou poškodit při přebíjení nebo přehřátí. Obsahují toxické kadmium. Mají paměťový efekt.

Příklad použití

Největší systém využívající NiCd články je na Aljašce, kde slouží jako rezerva pro regulaci. Systém se skládá z 13 760 akumulátorů a jeho výkon je 27 MW po dobu 15 min, nebo 40 MW po dobu 6 až 7 minut. [39]

2.3.3 Nikl-metal-hybridový akumulátor (NiMH)

Jsou v podstatě obdobou NiCd akumulátorů. Byly vyvíjeny na základě požadavků na vyšší kapacitu akumulátoru při stejném objemu a s ohledem na zátěž životního prostředí. [40]

Hustota energie	60 -80 Wh/kg	180 Wh/l
Počet nabíjecích cyklů	500-700	
Samovybíjení	10-15 % za měsíc	
Nabíjení	vybíjí se před nabíjením	
Skladování	nabité	
Účinnost akumulace		

Výhody: Oproti NiCd mají méně toxických látek a jsou tak šetrnější k životnímu prostředí.

Nevýhody: Mohou být snadno poškozeny při přebíjení a také se nehodí do systémů vyžadující velké proudové odběry. Při teplotách pod bodem mrazu klesá významně jejich kapacita.

Příklad použití

Tyto akumulátory jsou používány především v mobilních aplikacích.

2.3.4 Lithium-iontový akumulátor (Li-ion)

Nabíjecí akumulátory tvořené elektrodami z lithia mají vysoké jmenovité napětí, kapacitu a tím také mimořádnou energetickou hustotu. Katoda Li-ion akumulátorů tvoří oxid kovu (LiCoO_2), anoda je z uhlíku s vrstevnatou strukturou. Elektrolyt tvoří lithná sůl (LiPF_6) rozpuštěná v organickém karbonátu. Při nabíjení Li ionty interkalují do vrstevnaté struktury uhlíkové elektrody. Li-ion akumulátory mají velkou hustotu energie i účinnost se jmenovitým napětím 3,6 V. [37]

Hustota energie	90 -180 Wh/kg	500 Wh/l
Počet nabíjecích cyklů	500-1000	
Samovybíjení	5 % za měsíc	
Nabíjení	nevybíjí se před nabíjením	
Skladování	nabité	
Účinnost akumulace	95 %	

Výhody: Mají nízkou hmotnost a velkou energetickou hustotu. Mohou dodávat vysoké zátěžové proudy.

Nevýhody: Pro bezpečnost a dlouhověkost musí být každý li -iontový akumulátor vybaven ochranným obvodem, který hlídá maximální napětí každého článku během nabíjení a minimální při vybíjení. Také musí být limitován maximální vybíjecí a nabíjecí proud a sledována teplota článku. Jinak hrozí nebezpečí výbuchu.

Příklad použití

Začínají se používat v elektromobilech.

2.3.5 Lithium-polymerový akumulátor (Li-pol)

Jsou levnějším provedením Li-ion baterií. Je zde elektrolyt v pevné fázi. Kapalina je zde přidána pouze pro zlepšení vodivosti.

Hustota energie	až 180 Wh/kg
Počet nabíjecích cyklů	500 -1000
Samovybíjení	10 % za měsíc
Nabíjení	nevybíjí se před nabíjením
Skladování	nabité

Výhody: Stejně jako Li-ion mají nízkou hmotnost. Nehrozí nebezpečí průsaku toxického elektrolytu.

Nevýhody: Mají výrazně nižší zátěžový proud a než li-ion akumulátory. Potřebují ochranou elektroniku.

Příklad použití:

Převážně v mobilních aplikacích.

2.3.6 Sodíko-sírový akumulátor (NaS)

Oproti olověným akumulátorům mají akumulátory NaS reagující látky v kapalném stavu a elektrolyt je pevný. Reagujícími látkami je roztavený sodík (Na) a roztavená síra (S). Elektrolyt je beta-aluminiumoxid, keramická pevná látka, která je pro sodíkové ionty propustná. Během vybíjecího procesu putuje sodík ve formě iontů elektrolytem k síře a reaguje tam s ní na sulfid sodíku NaS. Během fáze nabíjení se tento proces obrátí. [37]

Hustota energie	experimentálně až 150 Wh/kg	90-120 Wh/kg
Pracovní teplota	290-350 °C	
Počet nabíjecích cyklů	2500	
Účinnost akumulace	cca 90 %	

Výhody: Je hermeticky uzavřen a nepotřebuje údržbu. Netrpí samovybíjením. Sodík a síra jsou levné a dostupné prvky. Rychlé dobíjení. Mohou být krátkodobě přetíženy.

Nevýhody: Vysoká provozní teplota nutná k udržení sodíku v tekutém stavu. Potřebují tepelnou izolaci. Sodík je velmi korozivní. Nesmí dojít ke styku sodíku se vzduchem nebo vlhkostí hrozí výbuch nebo požár.

Příklad použití

Největší systém o výkonu 34 MW byl instalován v Japonsku. Systém má kapacitu 245 MWh a slouží k stabilizaci větrné farmy o výkonu 51 MW na severu Japonska. [41]

2.3.7 Zinko-brómový akumulátor ZnBr

Během nabíjení se čerpá roztok bromidu zinečnatého do prostoru mezi elektrody a na záporné elektrodě se vylučuje kovový zinek a na kladné elektrodě kapalný bróm, který je společně s vodou a přísadami pro zlepšení jeho rozpustnosti odváděn do druhé nádrže. Při vybíjení se proces obrátí a roztok bromu pumpovaného z druhé nádrže do první reaguje na elektrodách s kovovým zinkem za vzniku bromidu zinečnatého a elektrického proudu (s napětím asi 1,7V na jeden článek). [42]

Hustota energie	experimentálně až 150 Wh/kg
Počet nabíjecích cyklů	1500+
Účinnost akumulace	cca 75 %

Výhody: Uložení velkého množství energie.

Nevýhody: Systém nelze hermeticky uzavřít a je nutná jeho údržba. Brom je nebezpečný pro životní prostředí.

Příklad použití

Japonská firma Kyushu Electric Power má nainstalovaný systém o výkonu 1MW s kapacitou 4 MWh.

2.3.8 Sodík-chlorid nikelnatý akumulátor „ZEBRA“ (NaNiCl)

Fungují na podobném principu jako NaS. Sírová elektroda je nahrazena elektrodou z pevného chloridu železa nebo niklu. Elektrody jsou uloženy v tekuté soli.

Hustota energie	cca 145 kWh/m ³
Počet nabíjecích cyklů	2000+
Pracovní teplota	300-400 °C

Výhody: Nemá paměťový efekt. Neobsahuje žádné toxické materiály.

Nevýhody: Vysoká pracovní teplota. Je použit tekutý sodík nevýhody jako u NaS.

Příklad použití:

Testují se v elektromobilech.

2.4 Přečerpávací vodní elektrárny (PVE)

U přečerpávacích vodních elektráren se jedná o mechanickou akumulaci energie. Využívá se zde přeměny elektrické energie na energii potenciální, která se v případě potřeby mění zpět na elektrickou energii.

Přečerpávací vodní elektrárny mají speciální topologické požadavky, musí mít spodní a horní vodní rezervoár s poměrně velkým výškovým rozdílem. Oba rezervoáry jsou propojeny potrubím s reverzní turbínou, která v době přebytku energie čerpá vodu do horní nádrže a v době nedostatku energie je voda přepouštěna přes turbínu do spodní nádrže. [10]

Potenciální energie (7):

$$E_p = m \cdot g \cdot \Delta h \quad (7)$$

Přečerpávací elektrárny jsou v současnosti nejrozšířenější způsob akumulace energie sloužící k pokrývání odběrových špiček.

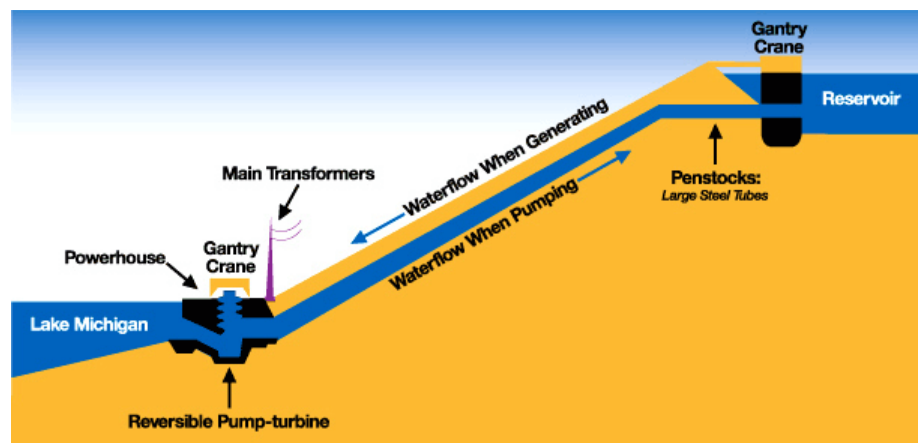
Hustota energie	cca 0,27 Wh/kg při výškovém rozdílu 100 m cca 277 Wh/m ³ při výškovém rozdílu 100 m
Životnost	50 až 100 let
Náběhový čas	řádově desítky sekund až minut
Nabíjení	řádově hodiny
Účinnost akumulace	až 75 %

Výhody: Tento systém dokáže dodávat velké množství energie po relativně dlouhou dobu (v řádech hodin). Jedná se nejrozšířenější způsob akumulace velkých množství energie, který je technicky dobře zvládnutý.

Nevýhody: Nevýhodou jsou delší náběhové časy v řádech desítek sekund až minut a nízká hustota naakumulované energie. Velký zastavěný prostor a potřeba velkého výškového rozdílu. Výstavba PVE je velký zásah do krajiny.

Realizované projekty

Ve světě je postaveno mnoho přečerpávacích vodních elektráren různých výkonů a kapacit. V ČR např. PVE Dlouhé stráně sloužící k regulaci systémové odchylky a má instalovaný výkon 2x 325 MW, spád 510 m a horní nádrž má objem 2,72 mil. m³. Doba naplnění je při plném výkonu 8,5 h. Doba vyprázdnění je při plném výkonu 6,5 h. [11]



Obr. 5 Schéma systému PVE

2.5 Akumulace energie do stlačeného vzduchu (CAES)

Další formou mechanické akumulace energie je ukládání energie do stlačeného vzduchu popř. plynu.

V době přebytku energie je kompresorem stlačován vzduch (5-7,5 MPa) a je vháněn do nepropustných podzemních prostorů. Při nedostatku energie je vzduch vypouštěn do vzduchové turbíny. U současných zařízení dochází k odvádění kompresního tepla do atmosféry a při expanzi je nutné dodávat teplo z plynových hořáků. Tím je snížena účinnost celého cyklu.

AA-CAES (advanced adiabatic – compressed air energy storage)

Účinnost systému CAES lze zvýšit ukládáním kompresního tepla do akumulátoru. Při expanzi je plyn ohříván teplem z akumulátoru a dohřev pomocí hořáků v tomto případě není potřeba. Přidáním tepelného akumulátoru se zvýší účinnost systému. [12]

Nejlevnější a nejjednodušší řešení je pro stlačování vzduchu využití nepoužívaných solných dolů, vytěžených ložisek ropy, zemního plynu nebo jiných hlubinných dolů, kde vlivem tlaku nedochází k rozrušování stěn kaverny. Budování nadzemních zásobníků je ekonomicky nevýhodné.

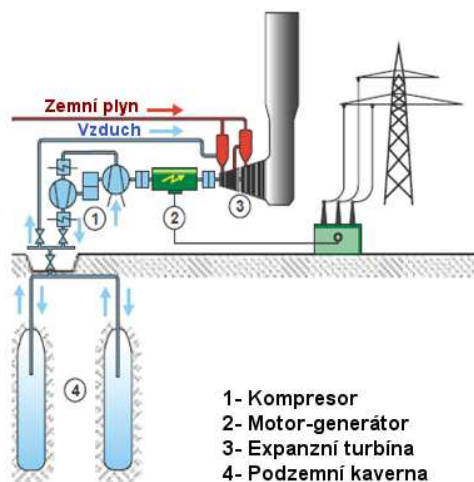
Hustota energie	cca 2 222 Wh/m ³ při 8 MPa
Životnost	< 50 let
Náběhový čas	desítky sekund až minut
Účinnost akumulace	až 50 % kompresní teplo do atmosféry (nutný dohřev) až 75 % kompresní teplo do akumulátoru (opět využito)

Výhody: Tento systém dokáže dodávat velké množství energie po relativně dlouhou dobu (v rádech hodin). K akumulaci využívá vzduch, kterého je dostatek a nepoškozuje životní prostředí.

Nevýhody: Systém CAES nelze vybudovat v místě s nevhodným geologickým podložím. Současné systémy spotřebovávají fosilní paliva.

Realizované projekty:

Ve světě jsou funkční pouze dvě velké jednotky Huntorf, Německo - 290MW po dobu 3 h. A Alabama, McIntosh, USA - 110 MW po dobu 26 h. Žádný systém AA-CAES není v současnosti v provozu.



Obr. 6 Blokové schéma systému CAES [13]

2.6 Akumulace energie do setrvačnicku

Energie je v setrvačnicku uložena ve formě kinetická energii. Množství uložené energie je úměrné hmotě setrvačnicku a druhé mocnině jeho úhlové rychlosti (8).

$$- \quad (8)$$

Maximální úhlová rychlost je omezena pevností v tahu materiálu, ze kterého je vyroben rotor. Lehčí materiály při stejné pevnosti v tahu umožňují vyšší rychlosti. Proto lze do lehčího materiálu uložit více energie na jednotku hmotnosti i objemu. Rotory nízkootáčkových setrvačnicků jsou vyrobeny z oceli a umožňují rychlosti do 8 000 ot/min. Moderní vysokootáčkové setrvačnicku mají setrvačnicku z plastů vyztužené vysocepevnostními vlákny a jsou schopné pracovat při rychlostech do 60 000 ot/min. Pro snížení ztrát třením je kolem rotoru vytvořené vakuum a místo obyčejných ložisek se používají magnetická ložiska.

Setrvačnicku jsou vhodné pro stabilizaci sítě v ostrovním režimu, na překrytí doby kdy nabíhá jiný zdroj energie nebo tam kde je požadován vysoký výkon po velmi krátkou dobu. V současnosti nejsou příliš využívány, ale jejich větší uplatnění v praxi se zkoumá. [9] [14]

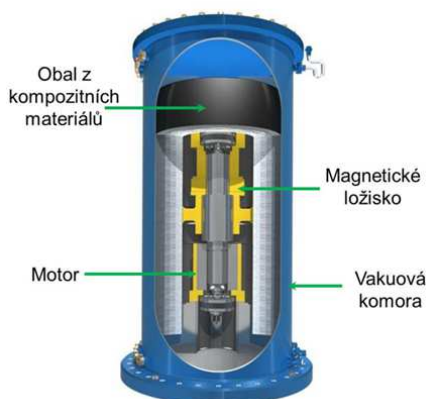
Hustota energie	100 – 130 Wh/kg
Životnost	až 20 let
Náběhový čas	řádově desetiny ms (omezen řídicí elektronikou)
Počet nabíjecích cyklů	10 ⁵
Samovybíjení	1 % za hodinu
Nabíjení	řádově minuty
Účinnost akumulace	85-95 % při úplném vybití

Výhody: Setrvačnicku mohou dodávat vysoký výkon ale jen po krátkou dobu. Mají rychlý náběh.

Nevýhody: Při provozu na jmenovitý výkon se rychle vyčerpají. V nestacionárních aplikacích vzniká problém s gyroskopickým efektem.

Realizované projekty

Firma Rosseta Technik GmbH z Dessau-Roßlau přestavila technicky vyvráslou krátkodobou akumulaci elektrické energie do setrvačnicků, které mohou uskladnit podle typu setrvačnicku až 5 kWh při špičkovém krátkodobém výkonu 3 až 800 kW. Vlastní setrvačnicku jsou ocelové, jsou vyráběny speciální technologií, také mohou mít až 25000 otáček za minutu. V současné době se v praxi využívá setrvačnicku ve stacionární stanici, která komunikuje s tramvajovou sítí ve městě Zittau, kde stanice akumuluje energii při brzdění tramvajů a energii vydává při jejich rozjezdu. [15]



Obr. 7 Řez setrvačnickem [16]

2.7 Superkapacitory (SCES)

U superkapacitorů se jedná o uložení energie v elektrostatickém poli.

$$- \quad (9)$$

Superkapacitory, na rozdíl od konvenčních kondenzátorů jsou více elektrolytické zařízení než elektrostatické. energii ukládají na rozhraní mezi iontově vodivým elektrolytem a elektronově vodivou elektrodou (nejčastěji uhlíkovou), kde se tvoří elektrochemická dvojrstva. Uhlíkový materiál má velký měrný povrch (více než $2000 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) a vzdálenost elektrod je řádu několika angstromů. Používané napětí je nízké, typicky 1,5 V pro systémy s vodivými elektrolyty a 3 V pro systémy s nevodivými elektrolyty. [9]

U superkapacitorů nedochází při nabíjení a vybíjení na rozdíl od baterií k přeměně chemických vazeb a na elektrodách nedochází k látkové přeměně. Proto mají velmi vysokou životnost a velký počet nabíjecích cyklů.

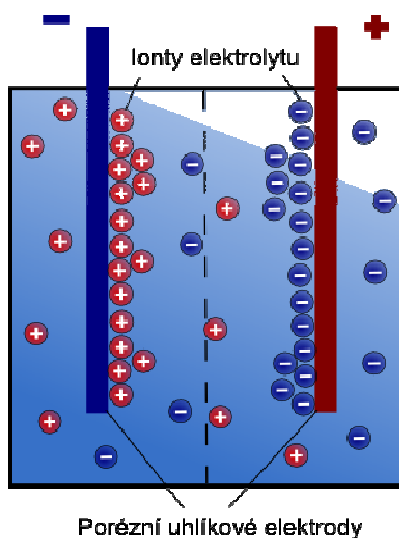
Hustota energie	až 10 Wh/kg
Životnost	10-20 let
Náběhový čas	milisekundy až sekundy
Počet nabíjecích cyklů	$10^5 - 10^6$
Pracovní teplota	od -40°C do 60°C
Nabíjení	milisekundy až sekundy
Účinnost akumulace	až 85 - 95%

Výhody: Odolné proti úplnému vybíjení a přebíjení. Velmi rychle se nabíjení na plnou kapacitu. Díky nízkému vnitřnímu odporu mohou dodávat vysoké proudy (až kiloampéry).

Nevýhody: Nízká specifická energie. Při vyšším napětí než dovoleném dochází k vývinu vzduchu a tím k poškození superkapacitoru.

Realizované projekty

Superkapacitory se využívají především v hybridních automobilech a elektromobilech pro rychlou akumulaci při rekuperaci během brzdění a k rychlému dodání energie při akceleraci.



Obr. 8 Schematické znázornění superkapacitoru

2.8 Supravodivý magnetický systém akumulace energie (SMES)

Jedná se o elektromagnetickou akumulaci, založenou na ukládání energie formou elektromagnetického pole kolem supravodivých vodičů.

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (10)$$

Magnetické pole je vytvořené proudem procházejícím supravodivou cívkou. Aby nedocházelo k ohmickým ztrátám, musí být materiál ochlazen na kritickou teplotu. Nejčastěji používaný materiál je slitina niobu a titanu. Supravodivá cívka se nejčastěji chladí kapalným heliem. Při kritické teplotě mohou materiálem protékat velké proudy bez elektrických ztrát. Jediné ztráty při akumulaci energie do supravodivých cívek vznikají při přeměně stejnosměrného napětí na střídavé a při napájení chladicího systému. Proto musí být systém dobře tepelně izolován. Pro vysoké náklady a technická omezení se systémy SMES používají pouze pro velmi krátkodobou dodávku energie (milisekundy až sekundy) tam kde je nezbytná kontinuita dodávky elektrické energie nebo pro zlepšení kvality přenášeného výkonu. Energetická kapacita používaných systémů je několik kWh. [9] [14] [18]

Tento způsob akumulace energie je poměrně nový a je předmětem intenzivního výzkumu.

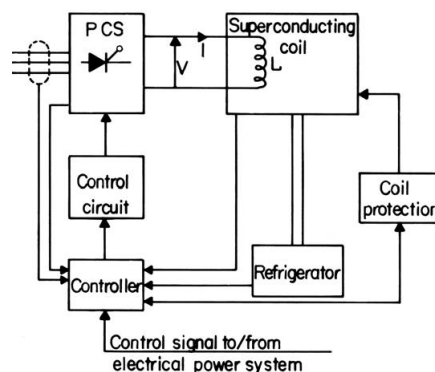
Hustota energie	>7.7 kWh/m ³
Pracovní teplota	-269 °C (Nb-Ti)
Životnost	cca 30 let
Náběhový čas	řádově ms (závisí na výkonové elektronice)
Počet nabíjecích cyklů	řádově miliony
Samovybíjení	0,1 % za hodinu
Účinnost akumulace	až 95 % - pro velké systémy bez započítání chlazení

Výhody: Velmi vysoká životnost. Velmi krátký náběhový čas. Jsou schopné dodávat vysoké proudy po velmi krátkou dobu.

Nevýhody: Velmi vysoké náklady na chlazení. Nízká hodnota naakumulované energie. Vysoká cena supravodičů.

Realizované projekty

Systém o kapacitě 8,3 kWh byl nainstalován společností Bonneville Power Administration ve spolupráci s Los Alamos National Laboratory v Tacomské rozvodně. Jednotka SMES zde stabilizuje severo-jihní spojovací vedení. Energetická výměna mezi jednotkou a vedením je regulována tak aby byly dostatečně tlumeny výkyvy v provozu. [19]



Obr. 9 Blokové schéma SMES systému [20]

2.9 Akumulace energie do vodíku

Princip akumulace spočívá v rozkladu demineralizované vody v elektrolyzáru za vzniku vodíku. Ten je stlačován a ukládán do skladovacích nádrží. Před skladováním bývá vodík zpravidla dočištěván (prochází přes absorber kyslíku). V případě potřeby energie je slučováním vodíku s kyslíkem získávána elektrická popř. i tepelná energie v palivovém článku. Další možností výroby elektrické energie je využití upraveného spalovacího motoru napojeného na generátor.

Tyto systémy jsou zatím ve stádiu vývoje a výzkumných a ověřovacích projektů. Jejich využití je tam, kde je potřeba větší množství energie po delší dobu. [1] [2] [21] [22]

Hustota energie	Vodík 0,1MPa	2,77 kWh/m ³
	Vodík 25 MPa	562,2 kWh/m ³
	Vodík 35 MPa	733,3 kWh/m ³
	Vodík 70 MPa	1277,7 kWh/m ³
	Vodík kapalný (-253°C)	2350 kWh/m ³
Pracovní teplota	60°C až 1000°C – dle typu palivového článku a elektrolyzáru	
Životnost	5 - 20 tis. hodin – pro palivový článek	
Náběhový čas	PEM řádově sekundy	
Účinnost akumulace	PAFC z klidu v jednotky hodin (nutný ohřev na prac. teplotu)	
	25-35%	

Výhody: Na výrobu vodíku je potřeba jen čistá voda. Z palivového článku odchází pouze vodní pára.

Nevýhody: Velké ztráty na jednotlivých komponentech. Potřeba dodat energii na stlačení vodíku. Prostupnost vodíku některými materiály a jeho výbušnost.

Realizované projekty

Jsou detailně popsány níže v kapitole 2.10



Obr. 10 Blokové schéma systému akumulace energie do vodíku

2.9.1 Skladování vodíku

Fyzikální a chemické vlastnosti vodíku způsobují problémy při jeho skladování. Vodík má nízkou hustotu a malé molekuly, které mohou pronikat (difúzně) některými materiály. Vodík může pronikat některými kovy a plasty. Dále také způsobuje vodíkové křehnutí a je reaktivní s mnoha prvky a výbušný se vzduchem v koncentracích od 4 % obj do 75 % obj. Proto jsou kladeny vysoké nároky na výběr materiálů určených pro skladování vodíku. [23] Ve srovnání s energeticky adekvátními skladovacími systémy na fosilní paliva jsou vodíkové skladovací systémy rozměrnější, hmotnější a náchylnější na mechanické poškození. [1]

Plynný vodík

Nejčastěji se plynný vodík skladuje v plynné formě v bateriových zásobnících. Svazek obsahuje 12 kusů tlakových lahví vyrobených z chrommolybdenové oceli. Každá lahev má objem 50 l. Naplněny při tlaku 20 MPa obsahují 107 m³ vodíku. Dále lze vodík skladovat v standardizovaných tlakových nádobách o objemu 25, 50 a 95 m³. Nádoby mají pracovní tlak 5 MPa. Nestandardní nádoby mohou mít i značně vyšší objemy. V současnosti jsou certifikovány nádoby, které pracují s tlaky až 70 MPa. Současný technologický limit je 100 MPa. Pro mobilní aplikace se používají kompozitní materiály. Skladování stlačeného plynného vodíku je energeticky méně náročné než skladování kapalného vodíku. Energie potřebná na stlačení vodíku na 35 MPa je přibližně 30 % energie v palivu. [2] [23] [24]

Kapalný vodík

Větší množství vodíku se skladují v kapalném stavu. Kapalný vodík musí být skladován v dobře izolovaných kryogenních nádržích. Nádoby jsou často dvouplášťové a mají válcovitý nebo kulovitý tvar aby měli co nejmenší plochu v kontaktu s okolím a do nádrže pronikalo co nejméně tepla. Jako izolace bývá používáno vakuum nebo Perlit. K dispozici jsou zásobníky o skladovací kapacitě 5 000 až 47 000 m³ vodíku. Nestandardní zásobníky mohou mít však značně větší rozměry. [2]

Nevýhodou tohoto systému skladování je nutnost udržovat vodík při teplotách nižších než je bod varu vodíku (-252,7 °C při 101,3 kPa). Vodík je udržován při maximální přetlaku 500 kPa. Při teplotách nad bodem varu dochází k odpařování vodíku a roste tlak v nádržích. Plynný vodík musí být upouštěn popř. jímán v tlakových nádobách na plynný vodík. V opačném případě hrozí poškození nádrže nebo výbuch. Pro běžně používané nádrže dosahují ztráty odparem až 1 - 3 % z obsahu na den. Další nevýhodou je požadavek na vysokou čistotu vodíku všechny plyny kromě helia mají vyšší teplotu varu a při ochlazení by zkapalnili nebo ztuhly. Zvláště nebezpečný je kyslík, jehož koncentrace v kapalném vodíku nesmí kvůli nebezpečí výbuchu překročit hranici 1 ppm. Zkapalňování vodíku je energeticky a finančně náročné. Proces zkapalnění a komprese spotřebuje 30 - 40 % energie uložené ve vodíku. [23] [25]

Zkapalňování vodíku – nejčastěji Claudův proces [2]

1. stlačení vodíku a odvedení kompresního tepla
2. předchlazení kapalným dusíkem
3. expanze v expanzní turbíně a s tím spojené ochlazení
4. expanze na Joule- Thomsonově ventilu – další ochlazení až ke zkapalnění.

Spotřeba energie na zkapalnění 1 kg H₂: cca 40 až 50 MJ

Skladování vodíku v hydridech kovů

Systémy skladování v metalhydridech jsou založeny na principu snadné absorpce plynu určitými materiály, za podmínek vysokého tlaku a mírných teplot. Tyto látky pak uvolňují vodík v případě, kdy jsou zahřívány při nízkých tlacích a relativně vysokých teplotách. Výhoda metal-hydridových skladovacích systémů se soustřeďuje na fakt, že vodík se stává součástí chemické struktury těchto kovů, a proto dále není požadován vysoký tlak nebo kryogenní teplota pro vlastní provoz. Jelikož vodík je uvolňován z hydridů pro použití při nízkém tlaku, jsou hydridy ze své podstaty nejbezpečnější ze všech systémů skladování. Právě pevný lithium hydrid je nejvážnějším kandidátem na náhradu tlakové nádrže na vodík v automobilech. Problém však je, že místo šedesátilitrové nádrže, která i s palivem váží 70 kilogramů, je zapotřebí trojnásobně větší a čtyřnásobně těžší zásobník, nemluvě o vysoké ceně lithia a nutnosti jeho regenerace (opětovné nasycení vodíkem). [23]

Legislativní požadavky na skladování vodíku

Požadavky na skladování plynů stanoví ČSN 07 8304. Skladují se ve skladech technických plynů mimo vnitřní prostory, na dobře odvětraných místech, která jsou chráněna před povětrnostními vlivy a před přímým slunečním zářením. Vhodný je přístřešek s částečně otevřenými bočními stěnami. Místo musí být označeno tabulkami s názvy skladovaných plynů. Ve vnitřních prostorách je skladování vodíku možné za předpokladu zajištění výměny vzduchu 3x za hodinu. Vodík nesmí být skladován společně s látkami podporujícími hoření. Lahve s vodíkem musí být zajištěny proti pádu a nesmí být umístěny poblíž topných těles, parních potrubí a dalších zdrojů sálavého tepla, které mohou způsobit nebezpečné ohřátí lahví. Je nutné vyloučit veškeré zdroje vznícení, vyloučit zdroje statické elektřiny, neboť vodík je extrémně hořlavý a výbušný plyn, snadno vznětlivý při všech teplotách. V objektech, kde bývá skladováno nebo manipulováno s větším množstvím vodíku, platí zvláštní předpisy pro bezpečný provoz. [2]

2.10 Vodíkové projekty

V posledních třech desetiletích bylo ve světě postaveno několik projektů různých velikostí zaměřených na ověření konceptu vodíkového hospodářství. Vždy se jednalo o výzkumné nebo pilotní projekty. Níže jsou popsány největší z nich.

2.10.1 Solárně-vodíkový projekt v Neunburgu vorm Wald, Německo

V letech 1986 – 1999 proběhl v Německu rozsáhlý pokus. Na tomto projektu pracovalo mnichovské sdružení Solar-Wasserstoff-Bayern GmbH. Cílem projektu bylo ověření různých konstrukčních řešení a součástí solárně-vodíkového hospodářství. Byly zkoumány rozdílné technologie především fotovoltaické panely a měniče, elektrolyzéry, systémy pro uskladnění vodíku, systémy přímého spalování vodíku, palivové články, automobilové nádrže na vodík a jejich plnění. Bylo zde instalováno 3 000 m² fotovoltaických panelů, které průměrně vyrobily 290 MWh/a. Připojené elektrolyzéry ročně vyrobili asi 50 000 m³/a. Vyroběný vodík byl využíván pro výrobu tepla v kotlích s upravenými plynovými hořáky. Kotle byly schopné spalovat vodík, zemní plyn a i směs obou plynů. Dále byl využit v kogenerační jednotce typu PAFC pro výrobu tepla a elektrické energie. Byl zde také simulován provoz automobilového alkalického palivového článku (upuštěno od testování ve prospěch PEMFC). Dále zde bylo testováno zkapaňování vodíku a možnosti jeho plnění do automobilů. Testovacím automobilem bylo BMW s motorem upraveným pro spalování vodíku. V druhé fázi byl přidán PEM elektrolyzátor, vodíkový katalytický kotel a systém chlazení. Byl zde také testován provoz vysokozdvížného vozíku s palivovým článkem PEMFC a s uskladněním vodíku v metalhydridové nádrži. [26]

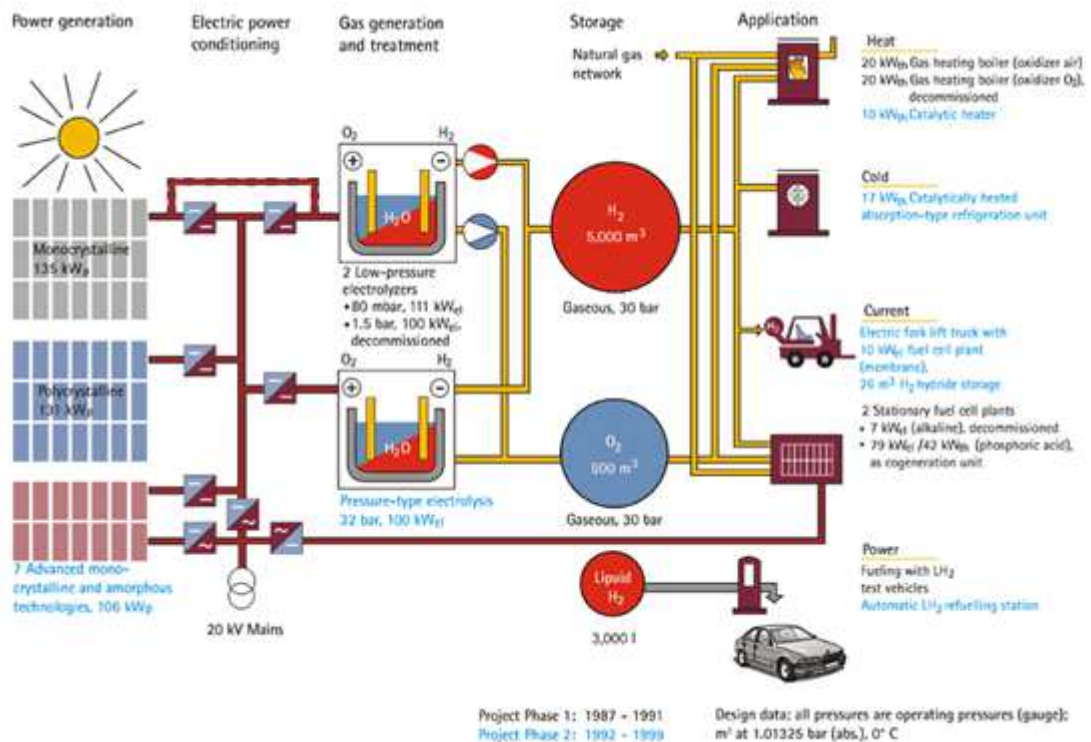
Technické parametry instalovaných zařízení a systémů

1. Fáze projektu

Fotovoltaické panely	135 kW _p	monokrystal.
Fotovoltaické panely	131 kW _p	polykrystal.
Nízkotlaký elektrolyzátor	2 x 111 kW _{el} , 8 kPa ??; 47Nm ³ /h	alkalický
Vodíková nádrž	5 000 Nm ³ ; 3 MPa	
Kyslíková nádrž	500 Nm ³ ; 3 MPa	
Nádrž na tekutý vodík	3 000 l	
Vodíkový kotel	20 kW _{tep}	oxidant vzduch
Vodíkový kotel	20 kW _{tep}	oxidant kyslík
Alkalický palivový článek	6,5 kW _{el}	
Kogenerační jednotka - PAFC	79 kW _{el} ; 42 kW _{tep} ; 610 A _{DC} ; 154 V _{DC}	
Zkapařovací linka		
Zařízení na plnění LH ₂		
Testovací automobil	BMW řady 7 – dojezd 300 km	

2. Fáze projektu

Fotovoltaické panely	106 kW _p	monokr. a amorf.
Vysokotlaký elektrolyzátor	100 kW _{el} , 3,2 MPa	alkalický
Katalytický kotel	10 kW _{tep}	
Chlazení	17 kW _{tep}	katalyticky
Vysokozdvížený vozík	PEMFC 10 kW _{el} , nádrž 26 Nm ³	metalyhydrid
Automat. plnicí stanice na LH ₂	100 l LH ₂ / 3 min	



Obr. 11 Blokové schéma zařízení v Neunburgu vorm Wald

2.10.2 Systém PHOEBUS - Jülichu

Demonstrační Zařízení PHOEBUS bylo navrženo tak aby autonomně napájelo budovu knihovny Výzkumného centra v Julichu. Střecha a fasáda budovy jsou pokryty fotovoltaickými panely o celkové ploše 312 m². Vyrobená energie ze slunce je průměrně 29 MWh/a. Panely jsou přes měniče DC/DC napojeny do stejnosměrné sítě. Měniče upravují napětí v síti podle napětí na akumulátorech. Olověných akumulátorů je v systému 110 a jsou typu OPzS OCSM s recirkulací elektrolytu a slouží jako krátkodobí zdroj energie a na vyrovnávání rázů v síti. Provozní napětí akumulátorů je 200–260 V. V první fázi byl použit alkalický bipolární elektrolyzátor s 30% roztokem KOH. Maximální produkce vodíku v elektrolyzátoru je 6.5 Nm³/h a 3.25 Nm³/h kyslíku. Tyto plyny jsou stlačovány kompresorem do tlakových nádrží (18 tlakových lahví pro vodík s objemem 1,4 m³ každá). V průběhu let byl pístový kompresor pro nutnost častého servisu vyměněn za membránový. Elektrická energie je z vodíku získávána z alkalického palivového článku typu Siemens BZA 4-2 s účinností 63% při jmenovitém zatížení a 70% při třetinovém zatížení. V další fázi byl přidán vysokotlaký PEM elektrolyzátor a palivový článek s polymerní membránou. Palivové články a elektrolyzéry jsou do DC sítě připojeny přes DC/DC měniče. Knihovna se sítí 230V pracující na frekvenci 50 Hz je připojena přes střídač. Celý systém je plně automatizovaný a bylo by možné, aby pracoval v ostrovním režimu. [27] [28] [29]

Technické parametry instalovaných zařízení a systémů

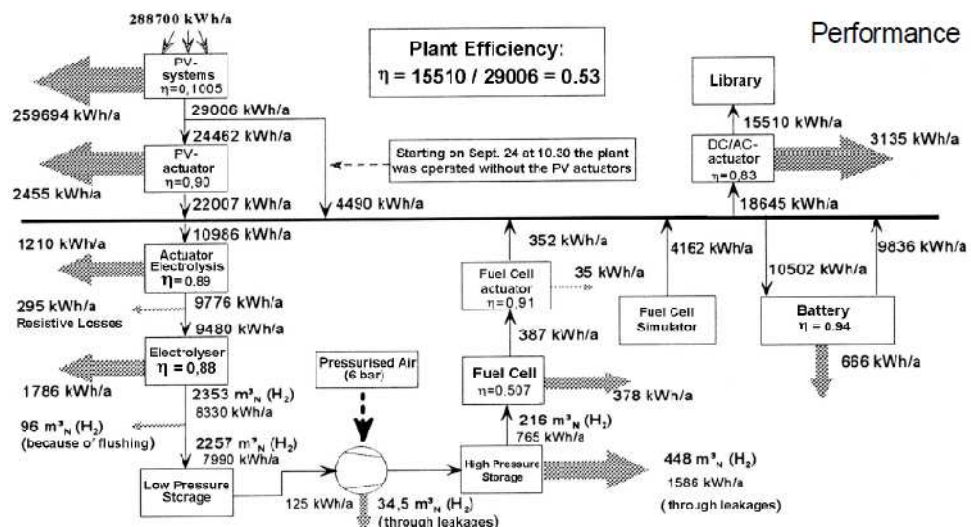
1. Fáze

Fotovoltaické panely	43 kWp	
Akumulátory	304 kWh; 1380 Ah; 220 V DC	OPzS OCSM
Elektrolyzátor	26 kW; 0,7 MPa; 750 A; 3 kA/m ² ; 80 °C;	Alkalický
Vodíková nádrž	12 MPa; 25 m ³ tj. 3000 Nm ³ H ₂	
Kyslíková nádrž	7 MPa; 20 m ³	
Palivový článek	6,5 kW; 48 V; 135 A	Alkalický
Kompresor		Pístový

2. Fáze

Vysokotlaký elektrolyzátor	5 kW; 12MPa; 60 °C	PEM
Palivový článek	2,5 kW	PEMFC
Kompresor		Membránový

Účinnost celého systému: 53 % (včetně přímo využité energie a energie uložené do baterií)



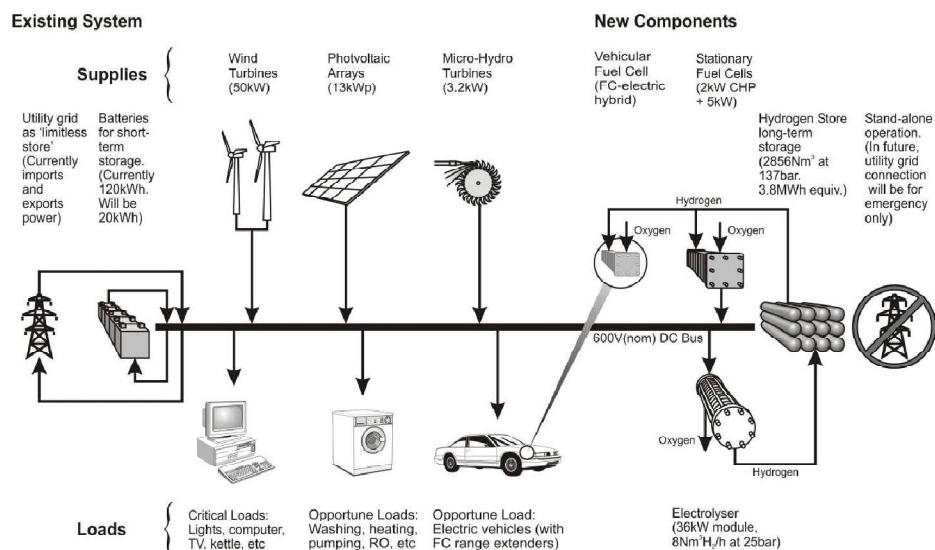
Obr. 12 Blokové schéma zařízení PHOEBUS. V obrázku jsou znázorněny ztráty na jednotlivých prvcích

2.10.3 Projekt HARI ve WestBeacon Farm v Leicestershire, Anglie

Cílem tohoto projektu je přinést zkušenosti s integrací obnovitelných zdrojů energie a systémů akumulace energie do vodíku. Dalším cílem je navrhnout softwarový model, který by sloužil při navrhování dalších vodíkových systémů tohoto typu. Zdroje obnovitelné energie jsou v tomto případě dvě větrné turbíny, fotovoltaické panely a dvě vodní mikroturbíny. Na výrobu vodíku je použit alkalický elektrolyzátor od firmy Stuart Energy Europe, který spotřebuje $3,9 \text{ kWh/Nm}^3\text{H}_2$. Pro snížení start/stop cyklů elektrolyzátoru jsou instalovány akumulátory, které překlenou krátkodobé kolísání sítě. Zebra akumulátory schopné pracovat na požadovaném napětí nahradili staré olovené akumulátory. Vodík je ukládán do 48 ocelových tlakových lahví, každá má objem $0,475 \text{ m}^3$ a váží přibližně 1 t. Při maximálním naplnění mají tlakové lahve kapacitu 3,8 MWh. Farma může být zásobována elektrickou energií z vodíku po dobu tří týdnů. Kogenerační palivový článek je připojen na deskový výměník a ohřívá vodu v topném systému. Tento článek může v případě potřeby dodávat až 4 kW_{el} po dobu 15 min. Druhý palivový článek vyrábí pouze elektrickou energii. Systémy výroby a akumulace energie jsou propojeny pomocí DC sběrnice (600 V) přes DC/DC konvertory a usměrňovače a střídače. Další systémy instalované v objektu jsou solární termické kolektory, tepelné čerpadlo 10 kW_{tep} , kogenerační jednotka spalující biomasu 15 kW_{el} a 38 kW_{tep} , a je zde využíván elektromobil a hybridní automobil (baterie-benzin). [30]

Technické parametry instalovaných zařízení a systémů

Větrná turbína	2x 25kW; 415 VAC
Fotovoltaické panely	4x 1,5 kWp; 120 V DC
Vodní turbíny	850W a 2,2 kW
Elektrolyzátor	36 kW, $8 \text{ Nm}^3\text{H}_2/\text{h}$; 2,5 MPa; 24 V _{DC}
Vodíková nádrž	2 856 Nm^3 ; 13,7 MPa;
Palivový článek	5 kW_{el}
Kogenerační palivový článek	2 kW_{el} , 2 kW_{tep} ,
Systém reverzní osmózy	$1,5 \text{ kW}$
Zebra baterie	32 Ah; 620 V; 20 kWh; 250°C
Totem ICE CHP (LPG)	15 kW_{el} , 39 kW_{tep} ,
Vodíkový kompresor	$3,75 \text{ kW}$; $11 \text{ Nm}^3/\text{h}$; kompres. poměr 8:1
Vyrovnávací nádrž	37,85 l



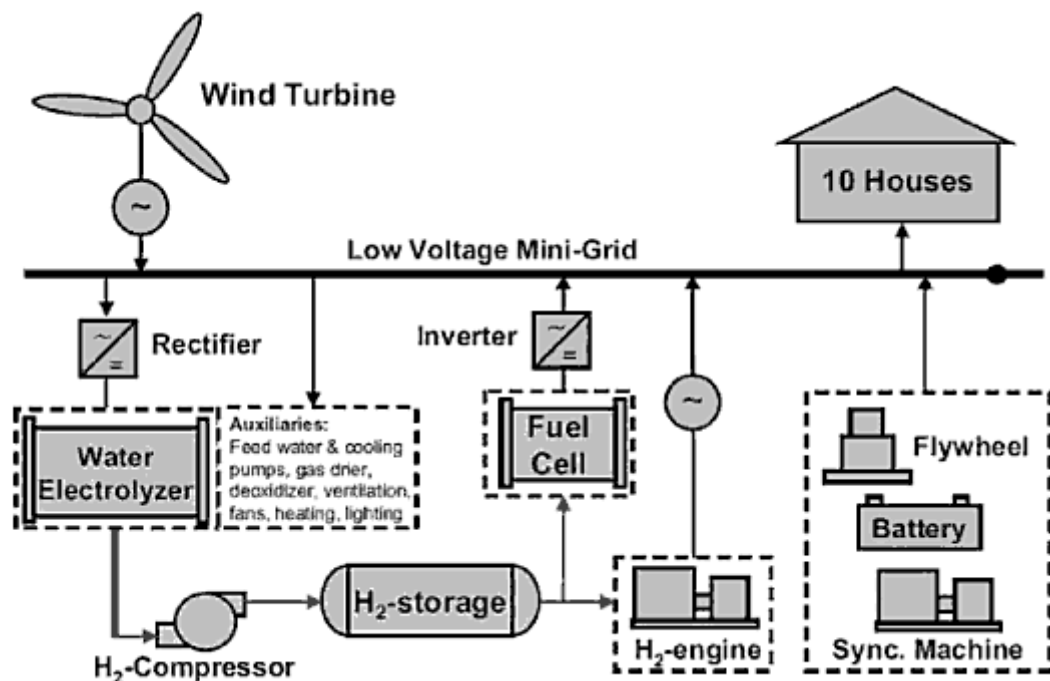
Obr. 13 Blokové schéma projektu HARI ve WestBeacon Farm v Leicestershire

2.10.4 Projekt Utsira

Projekt byl připravován od roku 2002 a byl spuštěn v roce 2004. Ukončen byl v roce 2008. Cílem společnosti bylo demonstrovat možnost autonomního zásobování odlehlých míst elektrickou energií pomocí akumulace energie z větru do vodíku. Ostrov Utsira má vhodné povětrnostní podmínky pro výrobu elektrické energie z větru. Průměrná rychlost větru je zde přes 10 m/s. Na ostrově bylo 10 domácností zásobováno energií z dvou větrných turbín. Za příznivých povětrnostních podmínek byly domácnosti napájeny přímo z větrných turbín. Při nadbytku energie byl v elektrolyzátoru generován vodík, který byl kompresorem stlačován a uskládán v nádrži. Při slabém nebo příliš silném větru byla elektrická energie vyráběna z uskladněného vodíku pomocí spalovacího vodíkového motoru napojeného na generátor a v palivovém článku. Spalovací motor byl upravený diesellový motor. Pro stabilizaci sítě byl použit setrvačnick. Akumulátory sloužily jako nouzový zdroj energie. Při bezvětří byl tento systém schopen zásobovat domácnosti po dobu až tří dnů. Maximální potřebný výkon domácností je přibližně 50 kW a celková spotřeba je přibližně 200 MWh/a. [31]

Technické parametry instalovaných zařízení a systémů

Větrná turbína	2x600 kW
Setrvačnick	200 kW, 5 kWh
Synchronní generátor	100 kVA
Spalovací vodíkový motor	55 kW (při plném zatížení)
Palivový článek	10 kW
Elektrolyzátor	10 Nm ³ /h, 48 kW
Vodíková nádrž	2400 Nm ³ H ₂ ; 20 MPa; 12 m ³
Kompresor	5,5kW
Baterie	35 kWh, NiCd



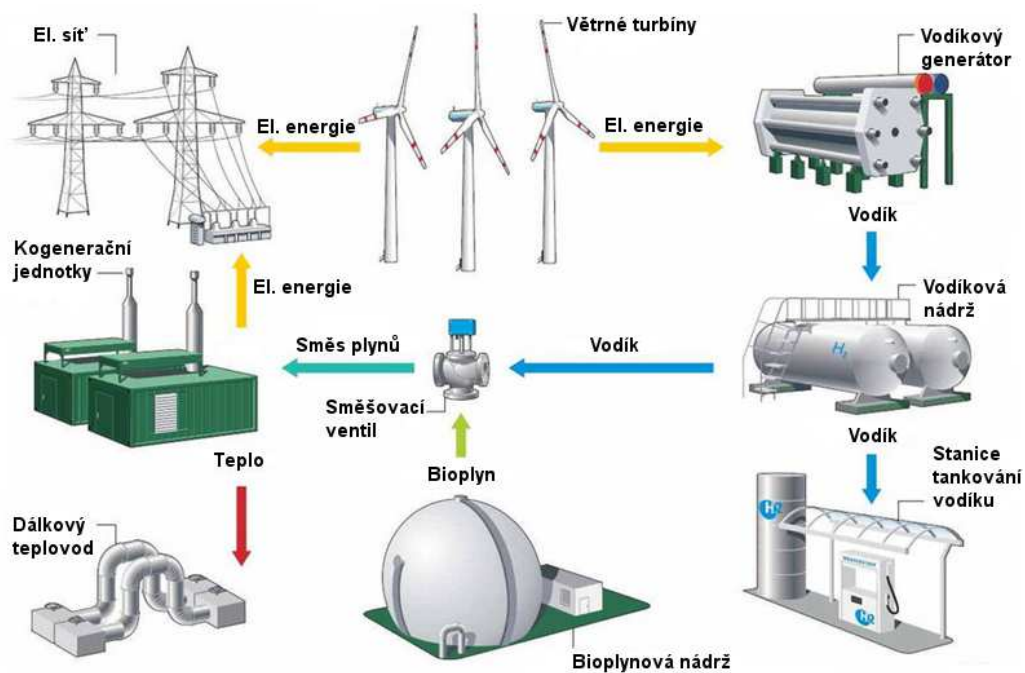
Obr. 14 Blokové schéma projektu na ostrově Utsira [32]

2.10.5 Prenzlau – Německo

Vodíkové hospodářství bylo na elektrárnu připojeno, aby vyrovnávalo nerovnoměrnou výrobu elektrické energie za nepříznivých povětrnostních podmínek. Elektrická energie je vyráběna ve třech větrných turbínách. Při normálním provozu dodává elektrárna vyrobený výkon do sítě. Při nadvýrobě elektrické energie je část vyrobené elektrické energie přivedena na přívod elektrolyzáru. Vyrobený vodík je skladován v pěti nádržích, ze kterých může být dodáván do stanice pro tankování vodíku do automobilů. V případě potřeby je vodík z nádrží směřován s bioplymem v poměru max. 70% vodíku a výsledná směs je přiváděna do kogenerační jednotky. Kogenerační jednotka vyrobí ročně průměrně 2 776 MWh_e a 2 250 MWh_{tep}. Teplo je využíváno k centrálnímu vytápění domácností. Jedná se o pilotní projekt, jehož cílem je prezentovat relevantní provozní výsledky.

Technické parametry instalovaných zařízení a systémů

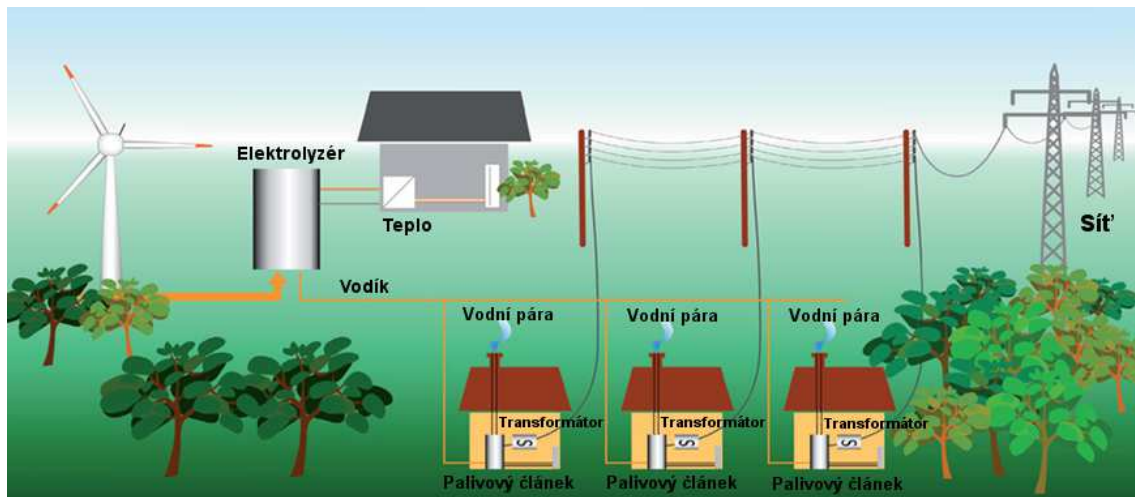
Větrná turbína	3x 2 MW _{el}
Elektrolyzář	0,5 MW; 120 Nm ³ H ₂ /hod;
Vodíková nádrž	3,1 MPa; 1 350 kg H ₂
Kogenerační jednotka	2x 0,35 MW _{el} ; 2x 0,34 MW _{tep} ,
Zařízení na plnění LH ₂	



Obr. 15 Blokové schéma hybridní elektrárny v Prenzlau

2.10.6 Hydrogen Community Lolland - Dánsko

Odlišný přístup byl zvolen v projektu Hydrogen Community Lolland. Zde se počítá s centrální výrobou vodíku z obnovitelných zdrojů a jeho následnou distribucí do jednotlivých objektů, stejně jako je tomu u zemního plynu. Každý objekt by měl doma malý (cca 2kW) kogenerační palivový článek napojený na střídač. V případě přebytků by byla elektrická energie z jednotlivých objektů přes transformátor dodávána do distribuční sítě. V roce 2008 bylo k systému připojeno pět domácností a v dalších letech je v plánu připojit 35 domácností.[33]



Obr. 16 Blokové schéma projektu Hydrogen Community Lolland

2.11 Porovnání jednotlivých principů akumulace

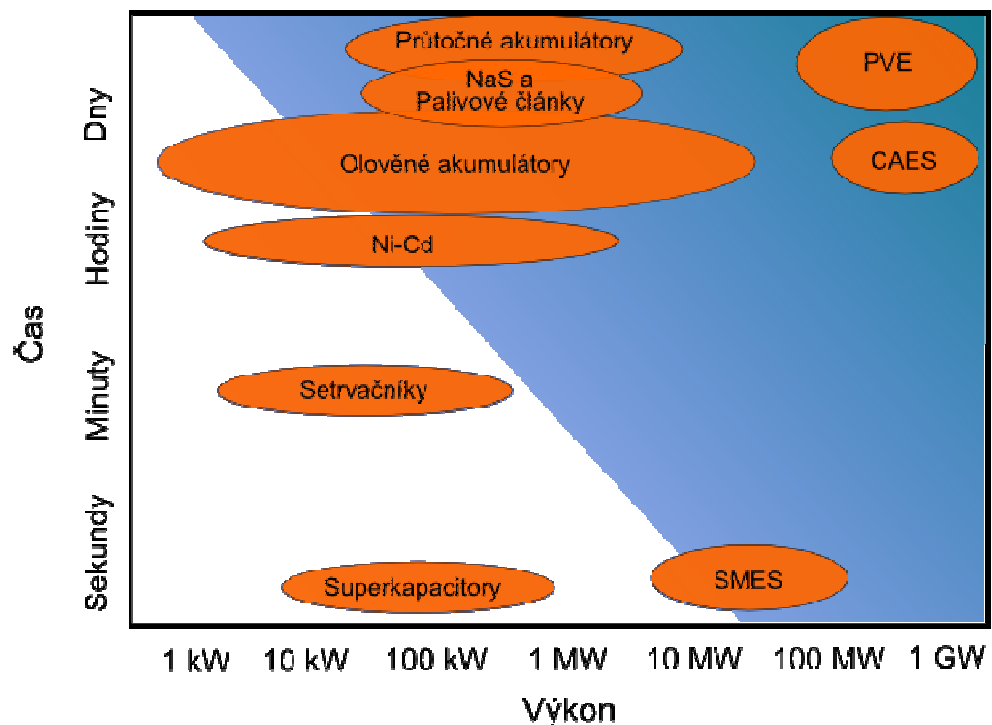
Žádný ze současných systémů nespĺňuje ideálně všechny požadavky na ideální akumulaci energie. Pro konkrétní aplikace je nutné zvážit výhody a nevýhody jednotlivých systémů akumulace a popř. je vhodně zkombinovat.

Všechny porovnávané systémy mají vyšší účinnost cyklu energie-uložiště-energie než akumulace energie do vodíku.

Superkapacitory, supravodivé cívky a setrvačníky jsou vhodné pro krátkodobé zálohování a stabilizaci sítí. Mohou velice rychle uvolnit naakumulovanou energii a velice rychle ji zase naakumulovat zpět, stejně jako u akumulace energie do vodíku nedošlo zatím k jejich masivnímu rozšíření. Systém akumulace do vodíku je spíše vhodný pro dlouhodobé zásobování energií.

Systém akumulace energie do stlačeného vzduchu a přečerpávací vodní elektrárny jsou vhodné tam, kde je potřeba velké množství energie například k regulování sítě po delší dobu. Oproti systému akumulace energie do vodíku je ale v použitých médiích (při běžně používaných podmínkách) uloženo řádově nižší množství energie na objemovou jednotku. Dále mají speciální požadavky na lokalitu, ve které budou umístěny, to v mnoha případech znemožňuje jejich výstavbu. Systém akumulace energie do vodíku žádné speciální požadavky na lokalitu nemá.

Nevýhodou chemických akumulátorů je omezený počet nabíjecích a vybíjecích cyklů. A u některých obsah nebezpečných látek.



Obr. 17 Vhodné využití jednotlivých systémů akumulace energie

3 Návrh systému využívající nadvýrobu elektrické energie pro akumulaci vodíku

3.1 Úvod

System akumulace energie z obnovitelných zdrojů do vodíku byl navržen pro Základní školu v obci Lukavec. Celý systém byl numericky namodelován. Do modelu byly vloženy rychlosti větru a spotřeby energie v objektu z let 2002 až 2012. Sledované období je od 1.1.2002 do 29.2.2012 tj. 3 712 dní. Podle výstupů z modelu byly navrženy vhodné komponenty pro systém akumulace, který by byl schopný pokrýt energetické nároky objektu.

3.2 Popis objektu

Objekt je po celkové rekonstrukci a nachází na kraji obce Lukavec, ve výšce 680 m.n.m v okrese Pelhřimov, kraj Vysočina. Objekt se skládá z pěti budov I. stupeň, II. stupeň, stravování a dílny, společné funkce, a tělocvična. Spotřeba elektrické energie a energie na vytápění je zobrazena v grafech (Obr. 19 a 20). Budova je od září do června využívána od pondělí do pátku, o víkendech je zde minimální provoz a je zde znatelný pokles ve spotřebě energie. O letních prázdninách tj. v měsíci červenci a srpnu je budova využívána minimálně a spotřeba také významně poklesne.



Obr. 18 Základní škola Lukavec

3.3 Spotřeba a potřeba energie v objektu

3.3.1 Potřeba tepla a tepelné ztráty

Potřeba tepla na vytápění a tepelné ztráty převzaty z Energetického auditu vystaveného dle zákona 406/2000 Sb. a prováděcí vyhlášky č. 213/2001 Sb. v roce 2005. V objektu je uvažováno 261 topných dní a střední teplota venkovního vzduchu je 3,8 °C.

Potřeba tepla v objektu v jednotlivých měsících

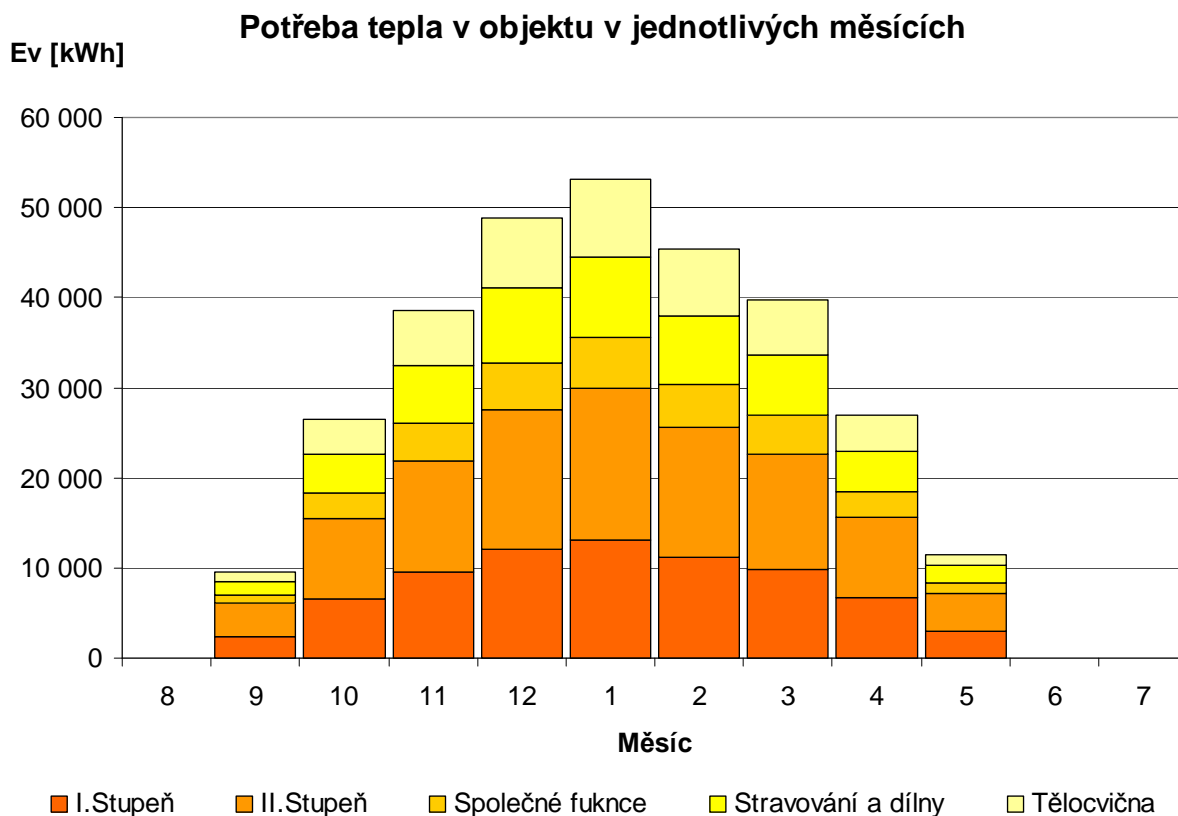
měsíc	počet dnů	t _{es} [°C]	E _v			B _v		
			[kWh]	[GJ]	[%]	[m ³]	[kWh]	[GJ]
8	0	15,0	0	0	0	0	0	0
9	23	12,3	9 515	34	15	1 038	11 195	41
10	31	7,2	26 437	95	44	2 881	31 104	112
11	30	2,2	38 499	139	64	4 195	45 294	163
12	31	-1,2	48 859	176	82	5 323	57 481	207
1	31	-2,8	53 130	191	89	5 788	62 505	225
2	28	-1,7	45 335	163	76	4 939	53 333	192
3	31	2,2	39 783	143	66	4 335	46 804	168
4	30	6,7	26 878	97	45	2 929	31 620	114
5	26	12,0	11 428	41	18	1 247	13 446	157
6	0	15,0	0	0	0	0	0	0
7	0	15,0	0	0	0	0	0	0
Celkem	261		299 867	1 080	500	32 673	352 785	1 270

Tab. 1 Tabulka potřeby tepla v jednotlivých měsících [34]

t_{es} – průměrná měsíční teplota

E_v – potřeba energie

B_v – potřeba paliva a energie na vstupu (zemní plyn)



Obr. 19 Graf potřeby tepla v jednotlivých měsících

Tepelné ztráty objektu

Budova	Tepelná ztráta [kW]	Výpočtová venkovní teplota [°C]	Průměrná vnitřní teplota [°C]
I. Stupeň	61,906	-15	17,4
II. Stupeň	78,252	-15	18,4
Společné funkce	27,255	-15	16,9
Stravování a dílny	42,851	-15	16,8
Tělocvična	44,233	-15	15
Celkem	254,497		

Tab. 2 Tepelné ztráty jednotlivých budov [34]

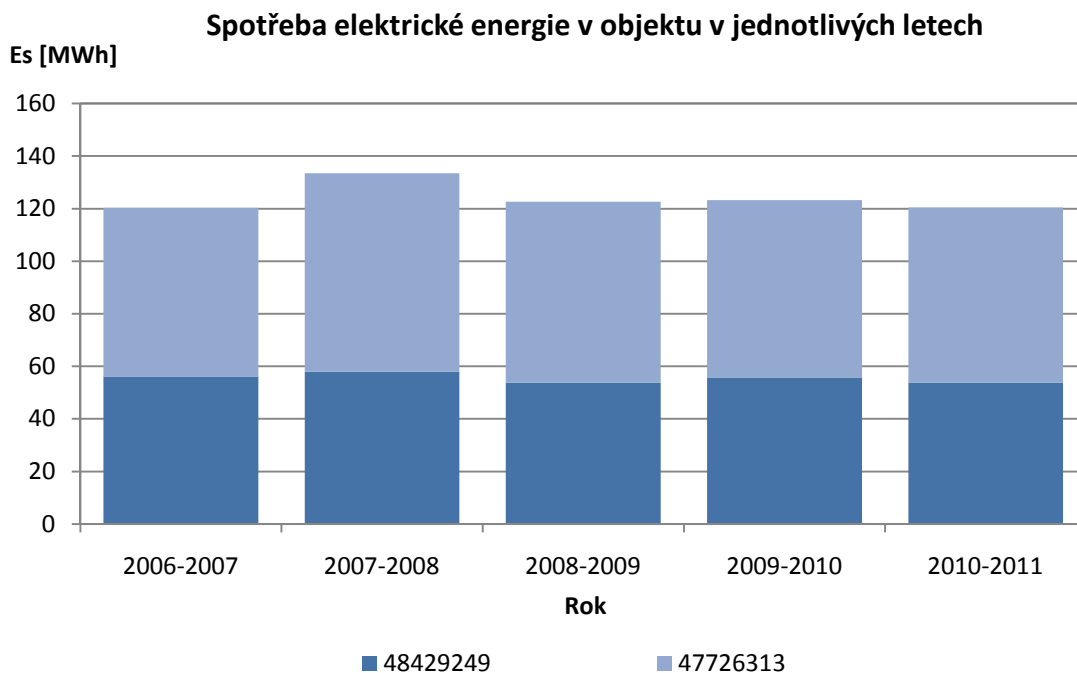
3.3.2 Spotřeba elektrické energie

Spotřeba elektrické energie byla určena z vyúčtování za elektrickou energii. Z let 2006 až 2011. Průměrná roční spotřeba objektu z tohoto období je 124 MWh.

Spotřeba elektrické energie v jednotlivých letech

Datum		Spotřeba [MWh]					
		Elektroměr 48429249			Elektroměr 47726313		
od	do	VT	NT	Celkem	VT	NT	Celkem
07/2006	07/2007	41,52	14,64	56,16	9,001	55,154	64,155
07/2007	07/2008	42,8	15,2	58	6,622	68,865	75,487
07/2008	06/2009	37,646	16,189	53,835	10,371	58,394	68,765
07/2009	07/2010	38,964	16,801	55,765	15,59	51,873	67,463
07/2010	07/2011	37,32	16,508	53,828	10,953	55,666	66,619

Tab. 3 Tabulka spotřeby elektrické energie v jednotlivých letech

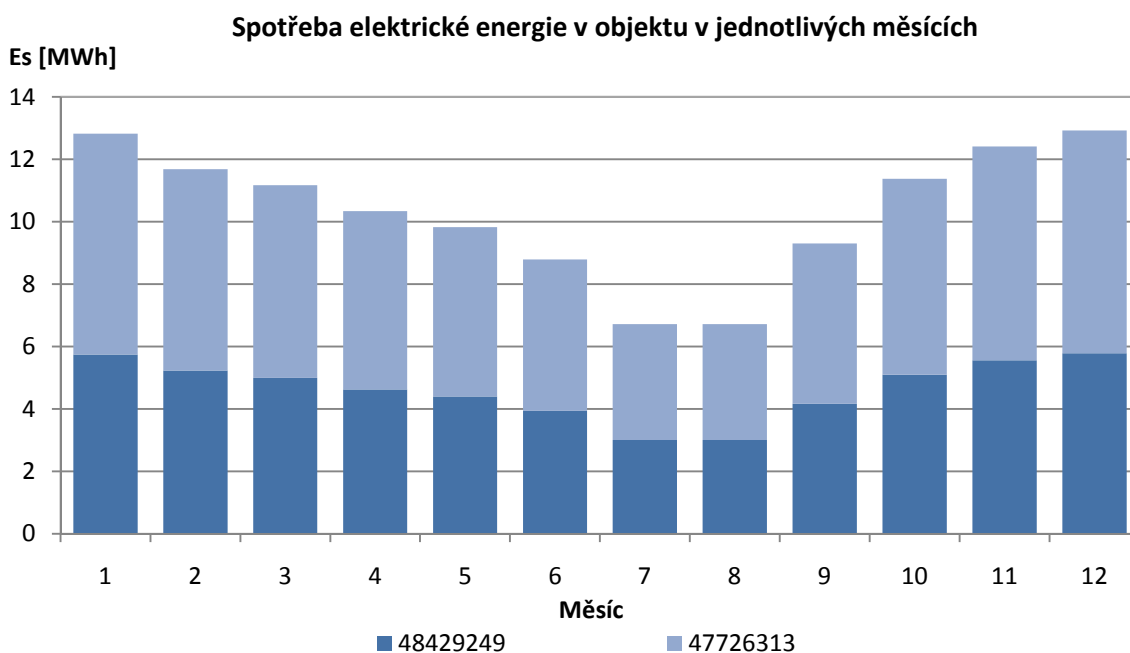


Obr. 20 Spotřeba elektrické energie v objektu v jednotlivých letech

Průměrná spotřeba elektrické energie v objektu v jednotlivých měsících

Elektroměr	Měsíc											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
48429249	5,74	5,23	5,00	4,63	4,40	3,93	3,01	3,01	4,16	5,09	5,55	5,78
47726313	7,08	6,45	6,16	5,71	5,42	4,85	3,71	3,71	5,14	6,28	6,85	7,14
Celkem	12,81	11,68	11,16	10,33	9,82	8,78	6,72	6,72	9,30	11,37	12,40	12,92

Tab. 4 Tabulka průměrné spotřeby elektrické energie v jednotlivých měsících v MWh



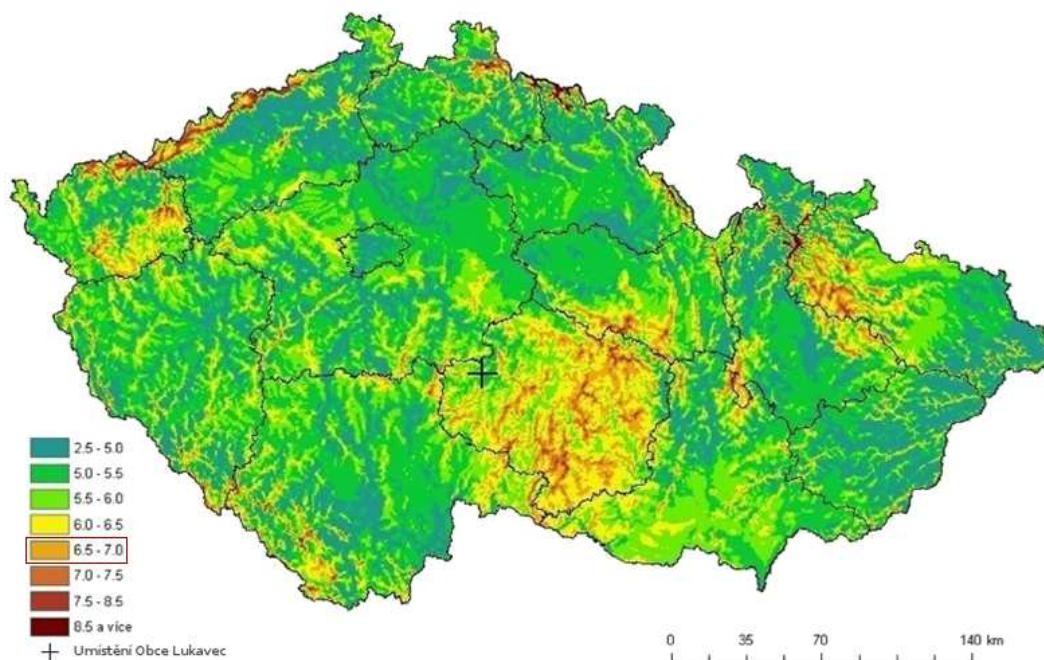
Obr. 21 Graf průměrné spotřeby elektrické energie v jednotlivých měsících

3.4 Návrh systému výroby energie z OZE

System výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů musí být navržen tak aby byl schopen vyrobit nadbytek energie, která bude naakumulována do vodíku a využita při nevhodných povětrnostních podmínkách, kdy nedochází k výrobě elektrické energie.

3.4.1 Klimatické podmínky

Údaje o rychlosti větru a teplotě z let 2002 až 2011, pochází ze stanice Košetice, Data byla poskytnuta Českým hydrometeorologickým ústavem. Od roku 2002 do roku 2007 byly pro výpočty použity průměrné rychlosti větru za den. Stanice Košetice leží 6,7 km západně od místa navrženého pro instalaci větrné elektrárny.



Obr. 22 Pole rychlosti větru v České republice ve výšce 100 m [35]

3.4.2 Návrh systému větrných elektráren

Vzhledem ke spotřebě energie v objektu a jeho umístění (kraj Vysočina) je nejvhodnějším zdrojem energie větrná turbína. Údaje o rychlosti větru byly přepočteny ze standardní výšky pro měření rychlosti větru 10 m nad povrchem na rychlost větru ve výšce větrné turbíny.

Tabulka průměrných rychlostí větru ve výšce 80 m nad zemí

Rok	Měsíc											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2002	6,95	10,19	6,84	6,44	6,37	5,12	5,12	5,47	5,47	7,77	6,06	6,76
2003	7,60	4,73	5,84	7,45	5,75	4,62	5,34	4,85	5,22	7,57	6,63	7,78
2004	7,64	9,85	8,11	6,29	5,62	4,84	5,06	5,10	5,54	6,63	8,19	6,42
2005	9,25	7,27	6,86	4,96	5,46	5,67	5,95	4,95	5,34	6,02	5,46	7,02
2006	5,60	5,97	6,20	5,18	5,94	4,41	3,40	4,89	5,24	4,47	6,55	4,86
2007	9,31	6,32	5,80	4,42	5,04	4,76	6,01	4,50	6,78	5,33	7,43	6,03
2008	8,05	6,97	7,92	5,41	5,00	4,51	5,34	5,73	5,34	4,98	7,08	7,62
2009	5,21	8,28	7,78	5,85	5,73	6,97	6,10	4,94	5,12	6,56	6,63	6,66
2010	6,36	6,66	7,89	5,60	6,77	6,03	5,20	6,34	6,39	6,02	7,17	7,05
2011	6,87	6,73	6,59	7,44	5,72	9,03	8,43	6,75	6,64	8,75	7,59	12,94
Průměr	7,28	7,30	6,98	5,90	5,74	5,59	5,59	5,35	5,71	6,41	6,88	7,32
Roční průměr	6,34											

Tab. 5 Tabulka průměrných rychlostí větru ve výšce 80 m nad zemí

Návrh větrné turbíny

Pro danou aplikaci byly porovnány 4 typy větrných turbín. Vždy byl zvolen nejvyšší výrobcem dodávaný stožár. V tabulce 6 je zobrazen nominální výkon, koeficient využití, vyrobená energie větrnými turbínami, nevyužitá energie v budově a v systému akumulace, nedostatek energie v navrhovaném systému akumulace z celkového sledovaného období. Turbíny byly porovnávány ve spolupráci s navrženými komponenty.

Porovnání větrných turbín

Výrobce	Typ	NV	VS	KV	VE	NVE	NDE	NDE
		[kW]	[m]	[-]	[GWh]	[GWh]	[dny]	[%]
Lagerwey	LW 52-750	750	74	0,27	17,74	6,14	34	0,92
Lagerwey	LW 58-750	750	80	0,31	20,56	7,78	23	0,61
Gamesa Eolica	G58-850kW	850	71	0,27	20,49	7,87	33	0,89
Suzlon	S.64/950	950	64,5	0,27	23,06	10,41	34	0,92

Tab. 6 Porovnání větrných turbín, NV- nominální výkon, VS- výška stožáru, KV- koeficient využití, VE- vyrobená energie, NVE- nevyužitá energie, NDE- nedostatek energie v celém systému

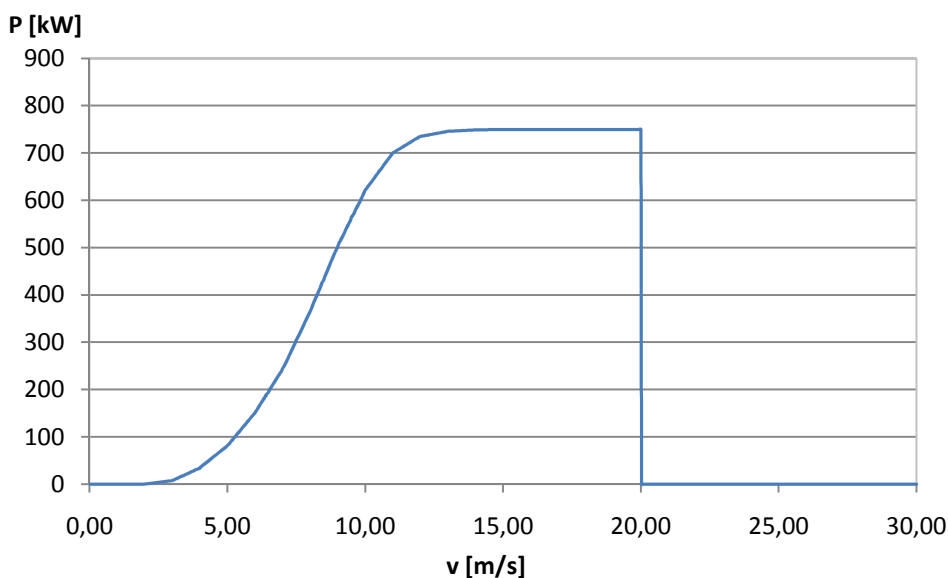
Dle výpočtů z numerického modelu vyšla pro tento systém jako nejvhodnější větrná turbína Lagerwey 58-750. Jedná se o bezpřevodkovou turbínu s pomaloběžným generátorem. V tabulce (7) je energie vyrobená větrnou turbínou v jednotlivých měsících sledovaného období. V grafu (obr. 24) je zobrazena vyrobená energie větrnou turbínou a spotřeba energie v objektu v prosinci 2004.

Základní parametry turbíny zvolené turbíny Lagerwey 58-750

Průměr rotoru	58 m
Otáčky rotoru	proměnné, nominální 21 ot/min
Nominální výkon	750 kW
Minimální rychlost větru	3 m/s
Odstavení turbíny	20 m/s
Regulace otáček turbíny	natáčením lopatek
Zvolený stožár	80 m

Generátor

Typ	synchronní multipólový
Napětí	690 V
Průměr	3,8 m
Vyvedení napětí	AC-DC-AC

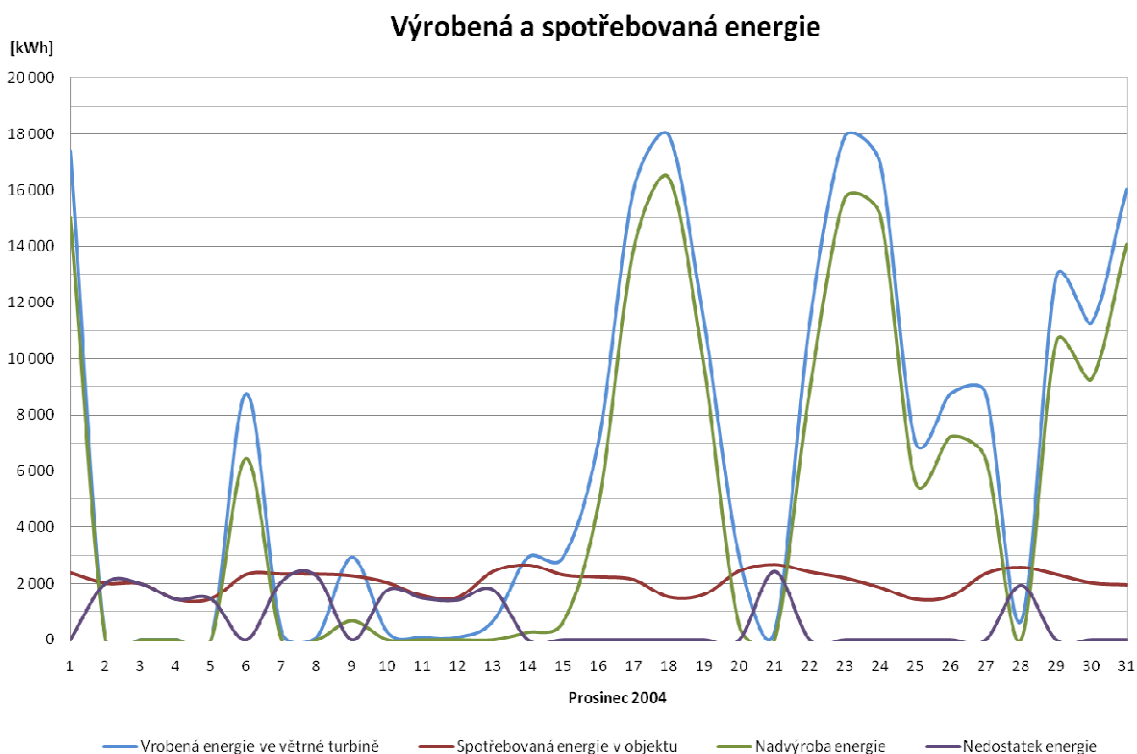
Výkonová křivka větrné turbíny LW 58-750

Obr. 23 Výkonová křivka větrné turbíny LW 58-750

Energie vyrobená větrnou turbínou v MWh

Rok	Měsíc											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2002	219,7	330,8	199,7	163,2	182,5	98,2	102,1	121,0	120,7	243,0	147,5	187,3
2003	243,1	86,6	147,3	222,1	137,6	65,0	97,3	94,5	108,3	244,8	181,0	246,8
2004	251,5	295,6	275,6	175,5	125,7	72,4	86,5	95,0	132,3	160,9	255,7	203,4
2005	320,3	222,9	206,1	88,8	127,0	130,3	145,4	91,0	106,6	148,3	114,0	203,3
2006	146,2	141,6	170,0	103,8	140,2	64,5	24,5	90,9	118,9	76,0	192,6	91,2
2007	344,4	169,7	146,1	61,0	105,1	84,1	150,6	59,7	196,1	121,3	242,1	160,6
2008	264,2	195,6	253,3	107,2	81,6	55,7	109,0	133,1	105,7	94,7	197,4	254,4
2009	100,3	260,9	259,6	126,7	121,2	189,6	166,5	71,6	97,0	187,9	181,5	178,4
2010	181,1	164,5	256,7	109,5	187,0	136,7	101,5	181,2	171,2	149,0	215,9	210,2
2011	207,0	170,9	183,8	206,0	145,9	316,8	279,9	186,7	177,2	295,7	232,0	411,3
Průměr	227,8	203,9	209,8	136,4	135,4	121,3	126,3	112,5	133,4	172,2	196,0	214,7

Tab. 7 Energie vyrobená větrnou turbínou v jednotlivých letech v MWh – výstup z numerického modelu



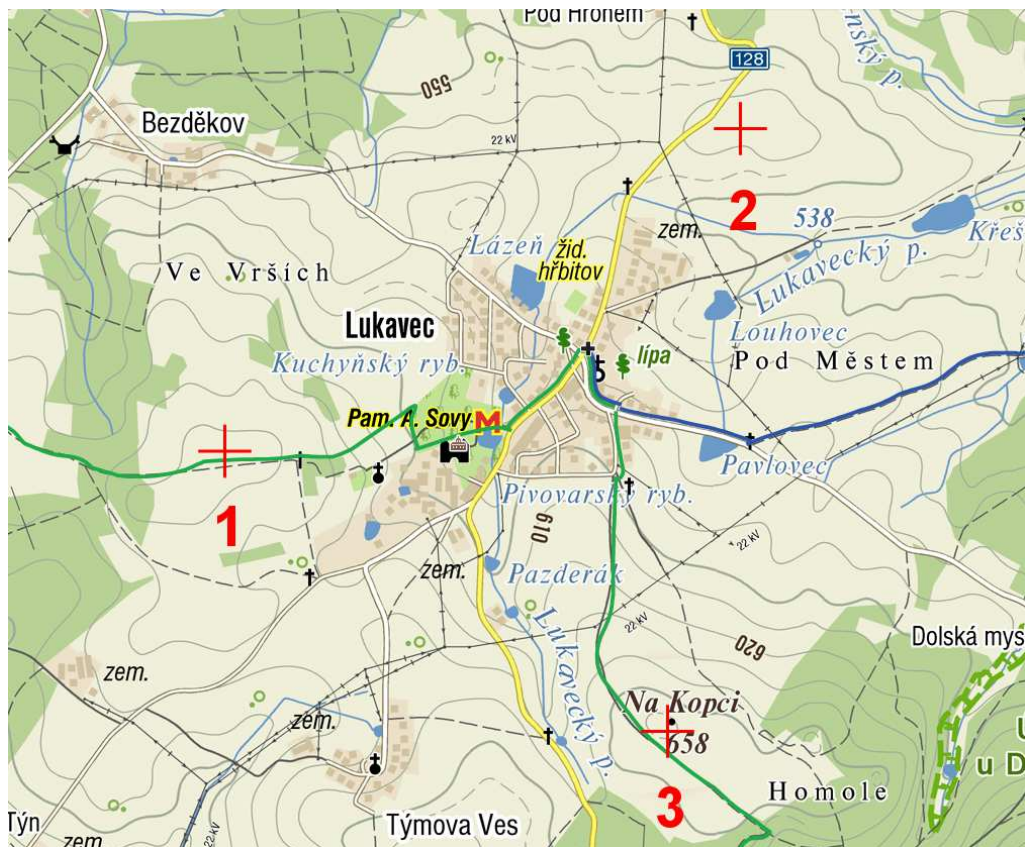
Obr. 24 Vyrobená energie větrnou turbínou a spotřeba energie v objektu v prosinci 2004 - výstup z numerického modelu

Vytipovaná místa pro umístění větrné elektrárny

Místa byla vytipována s ohledem na hygienické limity hluku. Ty jsou ve venkovním prostoru obytných budov 50 dB ve dne (6 až 22 hod.) a 40 dB v noci. Tyto hodnoty přibližně odpovídají vzdálenosti cca 400 m od zástavby. Někteří výrobci doporučují nejbližší vzdálenost k obydlí 475 m. Vytipované místo 1 je od nejbližší obytné zástavby vzdáleno 920 m a 610 m od průmyslové zástavby, místo 2 je vzdáleno 510 m od obytné zástavby a místo 3 je vzdáleno 1 km od obytné zástavby. Pro všechny varianty by měli být splněny hlukové limity.

Popis jednotlivých lokalit

1. Leží v nadmořské výšce 643 m, 500 m západně se nachází lesní porost, který může ovlivňovat proudění vzduchu. Lokalita je od navrhovaného objektu vzdálená 970 m. A od nejbližší distribuční soustavy 1000 m.
2. Leží v nadmořské výšce 564 m, 470 m východně a 370 m severně se nachází menší lesní porost, který může ovlivňovat proudění vzduchu. Lokalita je od navrhovaného objektu vzdálená 1 400 m. A od nejbližší distribuční soustavy 350 m.
3. Leží v nadmořské výšce 658 m, z východu a jihu je lokalita obklopena lesem a 2 km východně se nachází zalesněný kopec s nadmořskou výškou 703 m, který může významně ovlivňovat proudění vzduchu. Lokalita je od navrhovaného objektu vzdálená 1 500 m. A od nejbližší distribuční soustavy 500 m.



Obr. 25 Navrhovaná místa pro umístění větrné elektrárny

Zvolená lokalita

Jako nejvhodnější místo pro umístění větrné turbíny se s ohledem na připojení jeví lokalita č. 1. Výstupní výkon z větrné turbíny bude do distribuční sítě a do objektu přiveden kabelem uloženým v zemi (obr. 26). Napětí 690 V je pro objekt ZŠ a systém akumulace potřeba transformovat na 230/400V a pro distribuční síť na 22 kV.

Vyvedení výkonu z větrné turbíny do objektu ZŠ a do distribuční sítě 22kV



Obr. 26 Vyvedení výkonu z větrné turbíny do objektu ZŠ a do distribuční sítě 22kV

3.4.3 Návrh systému solárních elektráren

Spotřeba energie v navrhovaném objektu je nejvyšší v zimním období. V letním období je spotřeba energie malá. Z toho důvodu není vhodné využívat jako zdroj energie fotovoltaické panely. V případě kdy by byla spotřeba energie v objektu po celý rok vyrovnaná, by byli fotovoltaické panely vhodným doplněním větrné elektrárny.

Výpočet vyrobené energie z PV

Pomocí programu Photovoltaic Geographical Information System [36] byla spočítána energie, kterou by bylo možné získat z fotovoltaických panelů o nominálním výkonu 1 kW_p nainstalovaného u obce Lukavec. Např. v případě výrazného zvýšení spotřeby energie v letních měsících.

Nominální výkon	1.0 kW_p	
Sklon systému	35 °	(pevný)
Orientace	0° na jih	(pevný)
Ztráty vlivem teploty	7.3 %	(použity místní okolní teploty)
Ztráty odrazem vlivem úhlu dopadu	3.0 %	
Další ztráty (kabely, inventory atd.)	14.0 %	
Kombinované ztráty PV systému	22.7%	

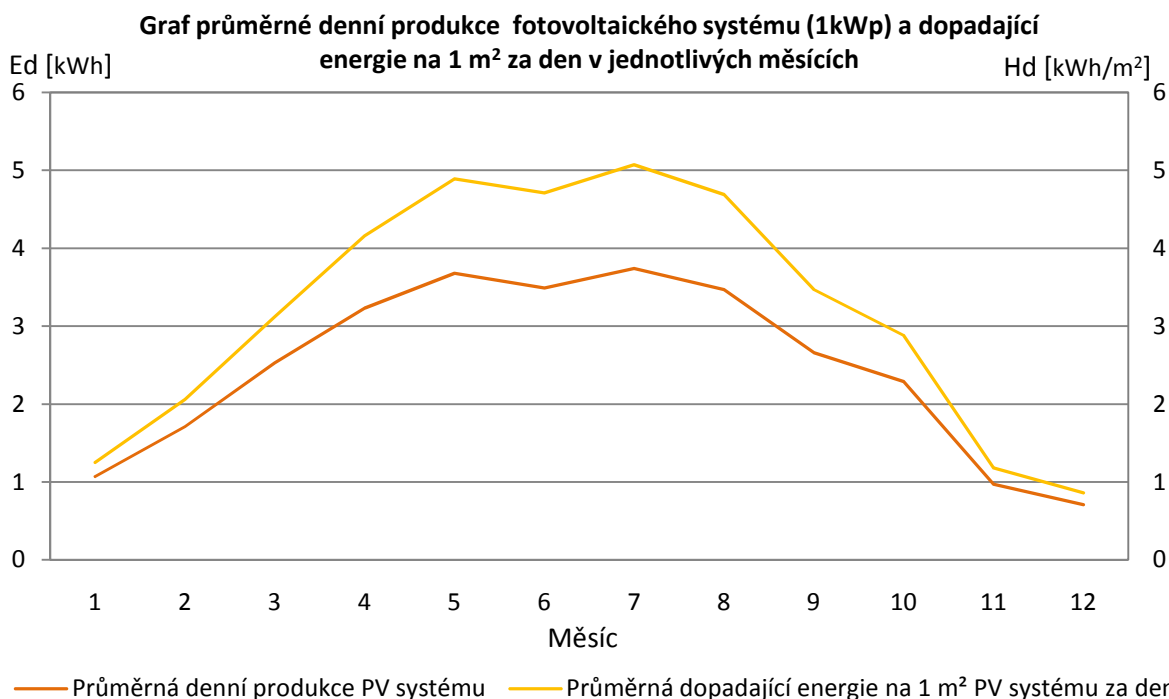
Výpočet vyrobené energie z 1kWp instalovaného u obce Lukavec

Měsíc	Ed [kWh]	Em [kWh]	Hd [kWh/m ²]	Hm [kWh/m ²]
1	1,07	33,20	1,25	38,8
2	1,71	48,00	2,06	57,6
3	2,53	78,4	3,12	96,60
4	3,23	96,90	4,16	125,00
5	3,68	114,00	4,89	152,00
6	3,49	105,00	4,71	141,00
7	3,74	116,00	5,07	157,00
8	3,47	108,00	4,69	145,00
9	2,66	79,90	3,47	104,00
10	2,29	71,10	2,88	89,20
11	0,97	29,20	1,18	35,50
12	0,71	22,40	0,86	26,60
Průměr	2,47	75,10	3,20	97,40
Celkem		901,00		1170,00

Tab. 8 Výpočet vyrobené energie z 1kWp instalovaného u obce Lukavec

Ed: Průměrná denní produkce systému

Em: Průměrná měsíční produkce systému

Hd: Průměrná dopadající energie na 1 m² fotovoltaického systému za denHm: Průměrná dopadající energie na 1 m² fotovoltaického systému za měsícObr. 27 Graf průměrné denní produkce fotovoltaického systému (1 kWp) a dopadající energie na 1 m² za den v jednotlivých měsících v obci Lukavec

3.4.4 Vodní elektrárna

V blízkosti objektu se nenachází žádný vodní tok vhodný pro výstavbu malé vodní elektrárny.

3.4.5 Bioplyn

Spalování vodíku v kombinaci s bioplynem v zimních měsících by umožnilo snížit kapacitu vodíkové nádrže. Část energie by byla dodávána z bioplynu. V blízkosti objektu se ale nenachází žádný zdroj bioplynu a ani se neplánuje jeho výstavba.

3.5 Návrh systému na výrobu vodíku

Pro schopnost vyrábět velké množství vodíku byl zvolen alkalický elektrolyzátor. Pro danou aplikaci je dostačující elektrolyzátor s maximální produkcí vodíku 40 Nm³/h. Vhodný elektrolyzátor je například HySTAT-10-25 od firmy Hydrogenics. Na produkci 40 Nm³/h je potřeba čtyř jednotek HySTAT-10-25. Za sledované období zapne tento elektrolyzátor 1914 krát, vyrobí 579 000 Nm³/h a spotřebuje při tom 2 769 MWh.

Parametry jedné jednotky elektrolyzátoru HySTAT-10-25:

Provozní tlak	2,5 MPa
Max. množství vyrobeného vodíku	10 Nm ³ /h
Rozsah produkce vodíku	40% - 100%
Čistota vodíku (před HPS*)	99,9%
Čistota vodíku (po HPS*)	99,998%; O ₂ < 2 ppm; N ₂ < 12 ppm
Přibližná spotřeba energie**	4,9 kWh/Nm ³ při plném zatížení
Napětí	AC 3x400 V ± 3%
Frekvence	50 Hz ± 3%
Spotřeba demineralizované vody	< 1 litr/Nm ³ H ₂
Elektrolyt	30% vodný roztok KOH
Množství elektrolytu	300 l

* hydrogen purification system- systém čištění vodíku

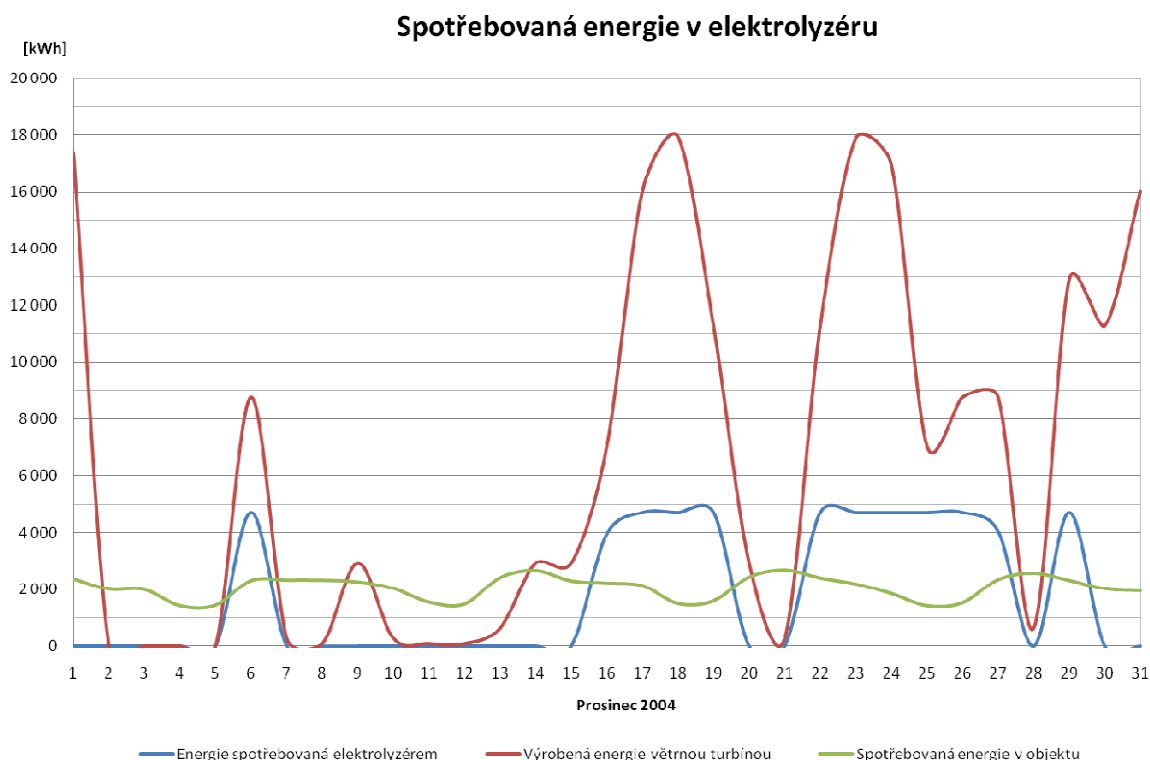
** Započítána pomocná zařízení (dočišťování vodíku, vzduchotechnika, chlazení, úprava vody, řídicí jednotka)

Tabulka vyrobeného vodíku v jednotlivých měsících v Nm³

Rok	Měsíc											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2002	12 927	1 783	4 704	6 889	3 111	2 498	1 290	2 309	3 228	2 966	8 007	9 644
2003	6 562	5 712	11 395	5 874	1 854	3 845	1 715	2 431	3 410	3 266	6 909	6 349
2004	7 796	3 226	5 839	5 949	1 900	3 767	1 968	2 201	3 891	3 784	5 882	11 262
2005	2 276	5 936	4 353	7 536	6 737	3 211	1 909	1 416	3 796	4 691	6 326	7 980
2006	8 411	10 118	12 025	4 679	5 967	2 833	1 349	5 881	3 460	7 114	5 188	4 848
2007	12 240	8 693	5 027	5 885	7 903	5 108	1 233	2 466	1 311	7 227	5 161	2 189
2008	13 532	8 644	1 877	5 280	3 512	3 121	1 270	1 829	3 508	2 514	8 676	4 369
2009	6 188	8 391	2 308	6 706	1 790	192	1 738	1 988	2 896	3 112	6 414	4 221
2010	11 819	5 161	2 259	4 080	1 354	446	2 374	1 590	1 521	4 454	6 150	5 377
2011	8 383	7 204	10 494	2 256	8 133	519	484	965	1 757	1 699	5 554	3 176
Průměr	9 013	6 487	6 028	5 513	4 226	2 554	1 533	2 308	2 878	4 083	6 427	5 942
Roční průměr	4 749											

Tab. 9 Tabulka vyrobeného vodíku v jednotlivých měsících v Nm³ – výstup z numerického modelu

Graf vyrobené energie, energie spotřebované v objektu a v alkalickém elektrolyzáru



Obr. 28 Graf vyrobené energie, energie spotřebované v objektu a v alkalickém elektrolyzáru v prosinci 2004 výstup z numerického modelu

3.6 Návrh systému akumulace

Pro potřebné množství vodíku je nejvýhodnější použití vysokotlakých nádrží na plynný vodík. Pro uskladnění vyrobeného vodíku navrhuji použití čtyř tlakových nádrží, každá o objemu 15 m^3 . Maximální tlak, na který bude vodík v nádržích stlačován je 20 MPa. Kapacita jedné nádrže při 20 MPa je $2400 \text{ Nm}^3\text{H}_2$. Celkový objem nádrží je tedy 60 m^3 a pojmu $9600 \text{ Nm}^3\text{H}_2$. Tento typ nádrží byl použit v projektu Utsira. V letních měsících při extrémních teplotách kolem $40 \text{ }^\circ\text{C}$ by mohl tlak vodíku vzrůst až na 21 MPa. Nádrž musí být dimenzována na tyto tlaky. Popř. vybavena pojišťovacím ventilem.

Pro stlačování vodíku navrhuji použití suchého pístového kompresoru. Vhodný je například kompresor Hofer TKH 72/30-300-100. Mezi elektrolyzáru a kompresor je potřeba zařadit vyrovnávací nádrž.

Parametry navrženého kompresoru

Vstupní tlak	2,5 MPa
Kapacita	$39 \text{ Nm}^3/\text{h}$
Výstupní tlak (max.)	100 MPa
Instalovaný výkon motoru	30 kW

V tabulce 10 je zobrazen počet dní ze sledovaného období s nedostatkem vodíku na výrobu elektrické a tepelné energie v závislosti na kapacitě nádrží s vodíkem.

Tabulka nedostupnosti vodíku v závislosti na kapacitě nádrží

Počet nádrží	Kapacita nádrží [Nm ³]	Nedostatek vodíku [Nm ³]	Nedostupnost vodíku	
			[dny]	[%]
1	2400	71 288	164	4,42
2	4800	36 019	63	1,69
3	7200	23 515	37	0,99
4	9600	14 637	23	0,61
5	12000	10 284	14	0,37

Tab. 10 Tabulka nedostupnosti vodíku v závislosti na kapacitě nádrží - výstup z numerického modelu

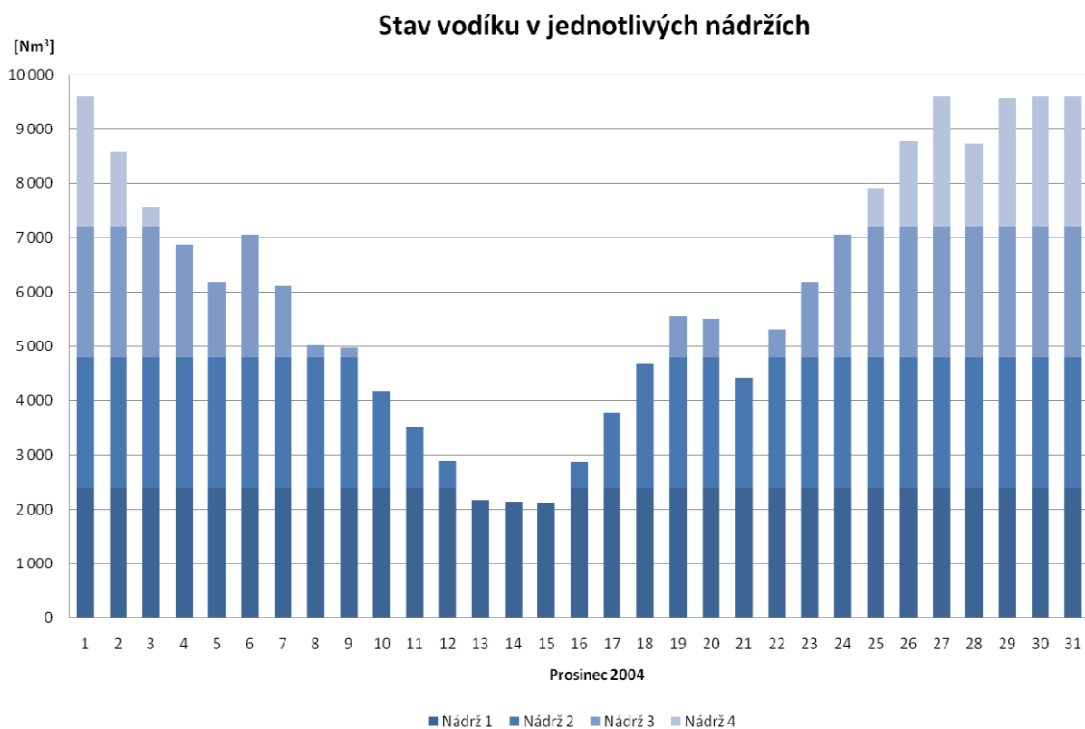
Na začátku sledovaného období nebyly nádrže naplněny. V případě plných nádrží na začátku sledovaného období by bylo energií pokryto dalších 9 dní. Po odečtení těchto 9 dní od hodnot v tabulce vychází pro vybranou variantu 4 pouze 14 dní s nedostatkem energie tj. 0,37% ze sledovaného období. V průměru tak připadá na jeden rok jeden a půl dne bez energie. Bez dodávek elektrické energie z větrné turbíny se plné nádrže v měsíci lednu vyprázdňují za devět dní, v dubnu a v říjnu se vyprázdňují za 16 dní a v letních měsících v červenci a srpnu za 51 dní. K úplnému vyprázdnění nádrží došlo ve sledovaném období v únoru roku 2003 na 5 dní, na 4 dni v prosinci roku 2006 na 2 dni v lednu 2008. Vždy to bylo způsobeno několikanásobným nedostatkem energie a nízkým stavem nádrže na začátku období. V případě kdy je objekt připojen na distribuční síť lze využít energie ze sítě jako záložního zdroje. V ostrovním režimu by k překlenutí těchto období při nízkém stavu vodíku v nádržích a při předpovědi nízkých rychlostí větru bylo potřeba omezit spotřebu jen na nejnужnější zařízení.

Tabulka počtů úplného vyprázdnění jednotlivých nádrží pro zvolenou variantu 4

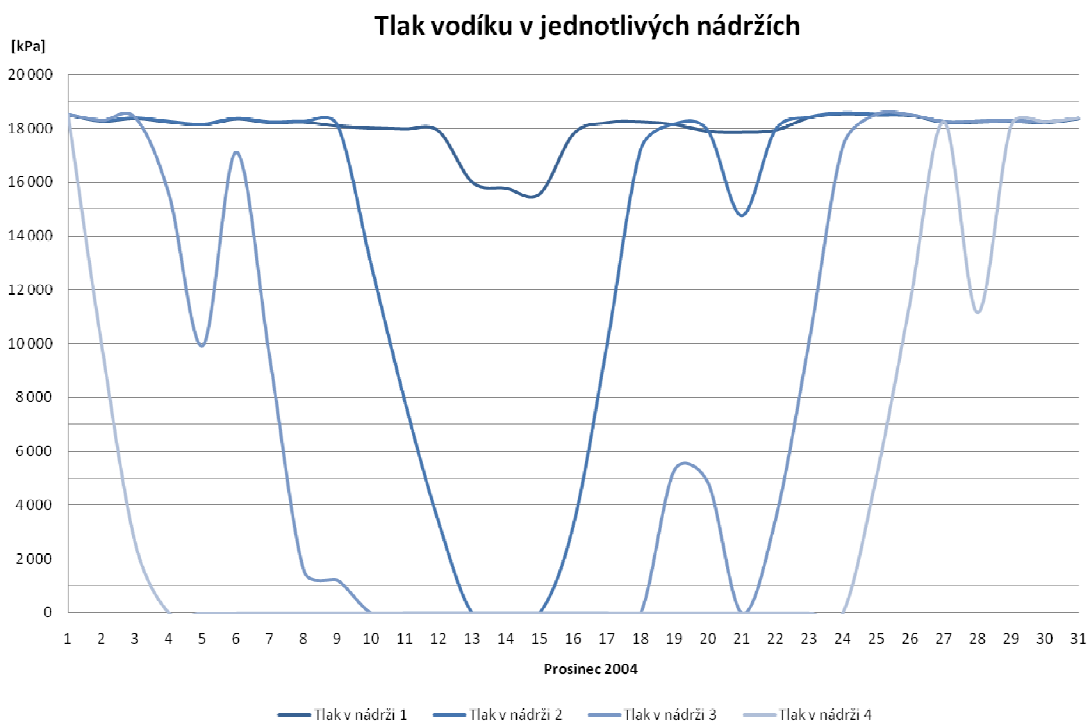
	Počet úplného vyprázdnění nádrží
Nádrž 1	23
Nádrž 2	81
Nádrž 3	170
Nádrž 4	523

Tab. 11 Tabulka počtů úplného vyprázdnění jednotlivých nádrží za sledované období - výstup z numerického modelu

V grafu (Obr.29) je znázorněno množství vodíku v jednotlivých nádržích a v grafu (Obr.30) je znázorněn tlak vodíku v nádržích v prosinci roku 2004.

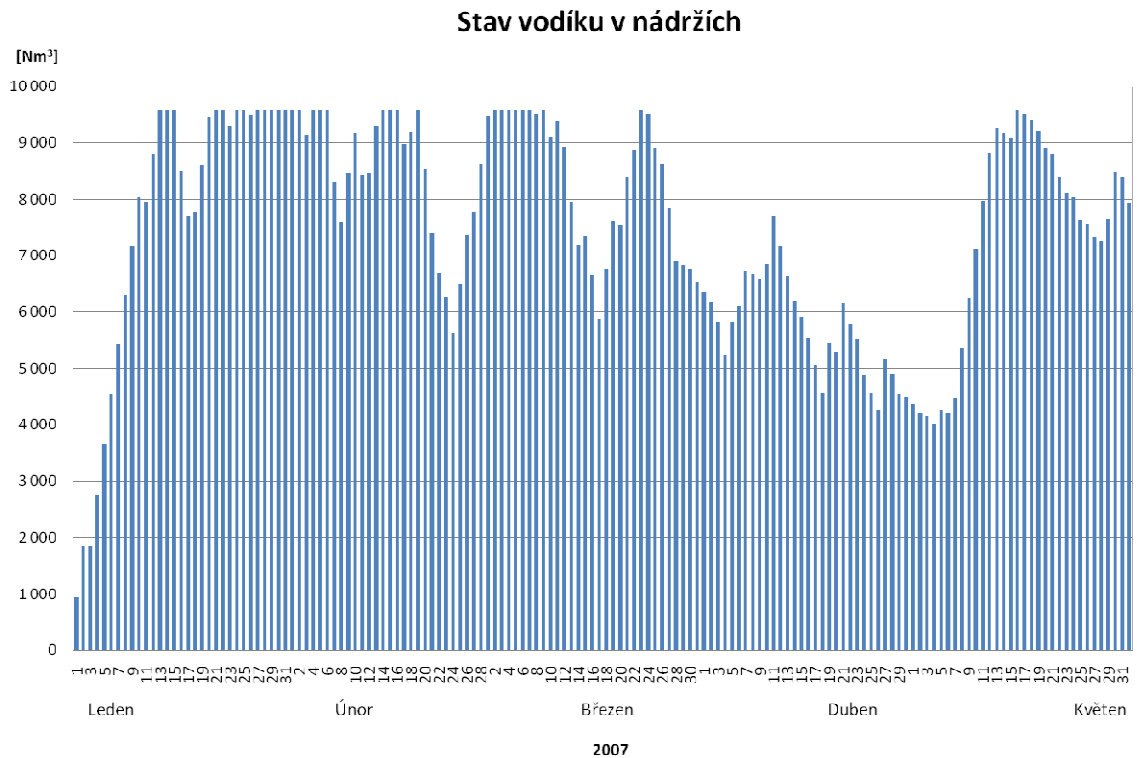


Obr. 29 Stav vodíku v jednotlivých nádržích v prosinci 2004 – výstup z numerického modelu

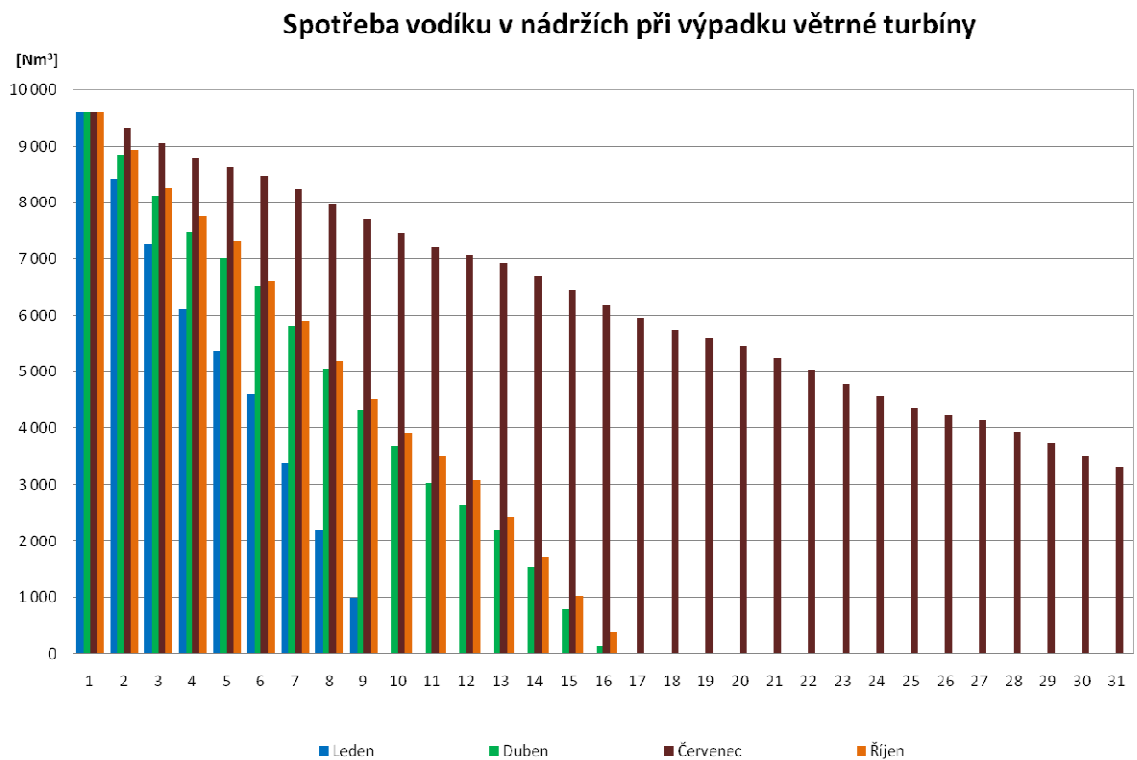


Obr. 30 Tlak vodíku v jednotlivých nádržích v Prosinci 2004 – výstup z numerického modelu

Obr. 31 zobrazuje množství vodíku v nádržích v období od ledna do května roku 2007 a Obr. 32 zobrazuje spotřebu vodíku z nádrží v případě vypnutí dodávek energie z větrné turbíny.



Obr. 31 Graf stavu vodíku v nádržích Leden až Květen 2007 – výstup z numerického modelu



Obr. 32 Graf spotřeby vodíku v nádržích v průměrných měsících Leden, Duben, Červenec, Říjen – výstup z numerického modelu

4 Návrh systému využívající vodík k výrobě elektrické energie a tepla

4.1 Výroba elektrické energie

Budova má dva elektroměry každý je jištěn jističem 3x125 A. Maximální možný příkon budovy je proto 165 kW, vyčteno dle vzorce (11).

$$P = \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (11)$$

V tabulce (VV) je zobrazena průměrná účinnost a spotřeba vodíku tří možných variant výroby elektrické energie ve sledovaném období. Ve variantě 1 je potřebný výkon rozdělen mezi navrhované palivové články. Ve variantě 2 pokrývá palivový článek celou potřebu elektrické energie a v případě potřeby je připojen další. Ve variantě 3 je spalovací motor s generátorem.

Porovnání průměrných účinností a spotřeby vodíku jednotlivých variant

	Průměrná účinnost [-]	Spotřeba vodíku [Nm ³]
Varianta 1	0,51	67 859
Varianta 2	0,49	69 954
Varianta 3	0,29	136 874

Tab. 12 Porovnání průměrných účinností a spotřeby vodíku jednotlivých variant za sledované období

Odpadem z palivových článků je pouze voda. Dochází zde k přímé přeměně energie, proto mají vyšší účinnost než spalovací motor. Nevýhodou palivových článků je, že pro připojení do objektu je potřeba střídače. Střídač snižuje účinnost a výstupní napětí může obsahovat vyšší harmonické. Motory spalující vodík mají nižší účinnost, produkují NO_x (10x méně než motor na konvenční paliva), jsou zdrojem hluku, ale jsou levnější, mají vyšší životnost a generátor vyrábí sinusové harmonické napětí.

S ohledem na účinnost navrhuji pro výrobu elektrické energie použití tří palivových článků (PEMFC). Dva o výkonu 75 kW a třetí o výkonu 17,2 kW.

Parametry navržených palivových článků:

Ballard HD6

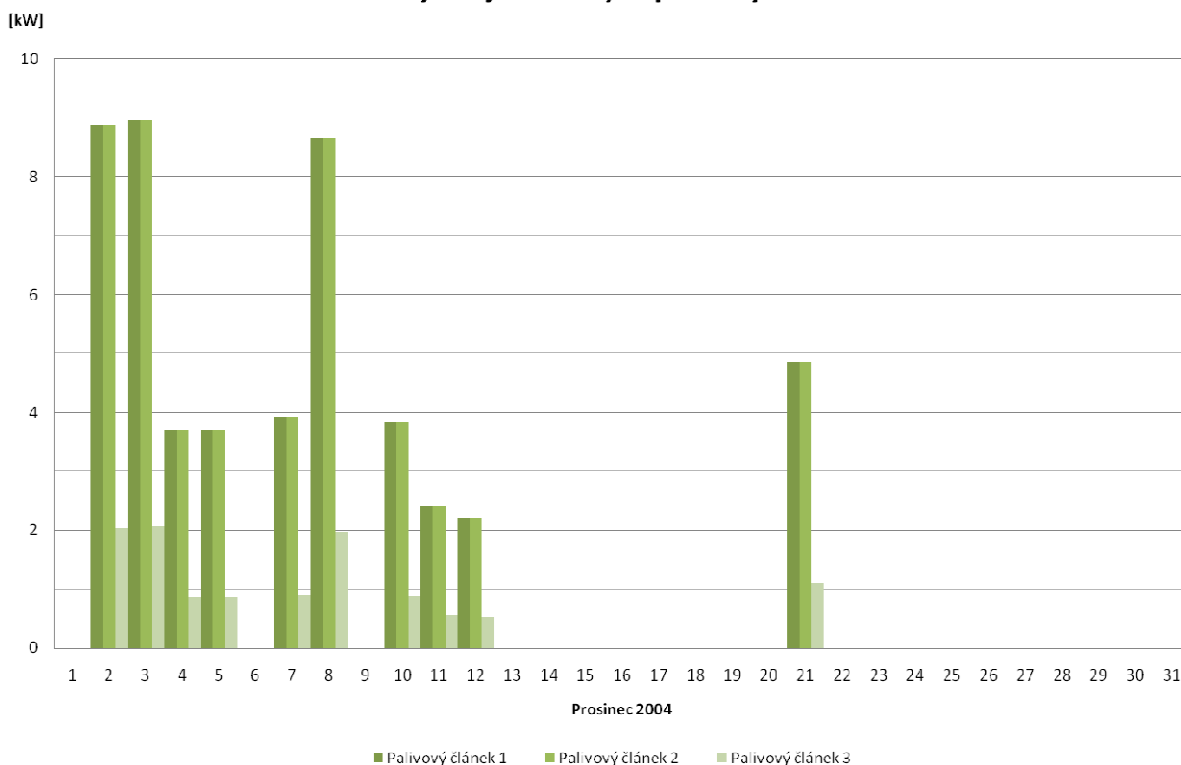
Max. výkon	75 kW
Maximální proud	300 A
Napětí	230-365 V DC
Minimální tlak vodíku	1,6 MPa
Teplota chladicí kapaliny	63 °C

Ballard 9SSL

Max. výkon	17,2 kW
Maximální proud	300 A
Napětí	57,4 V DC

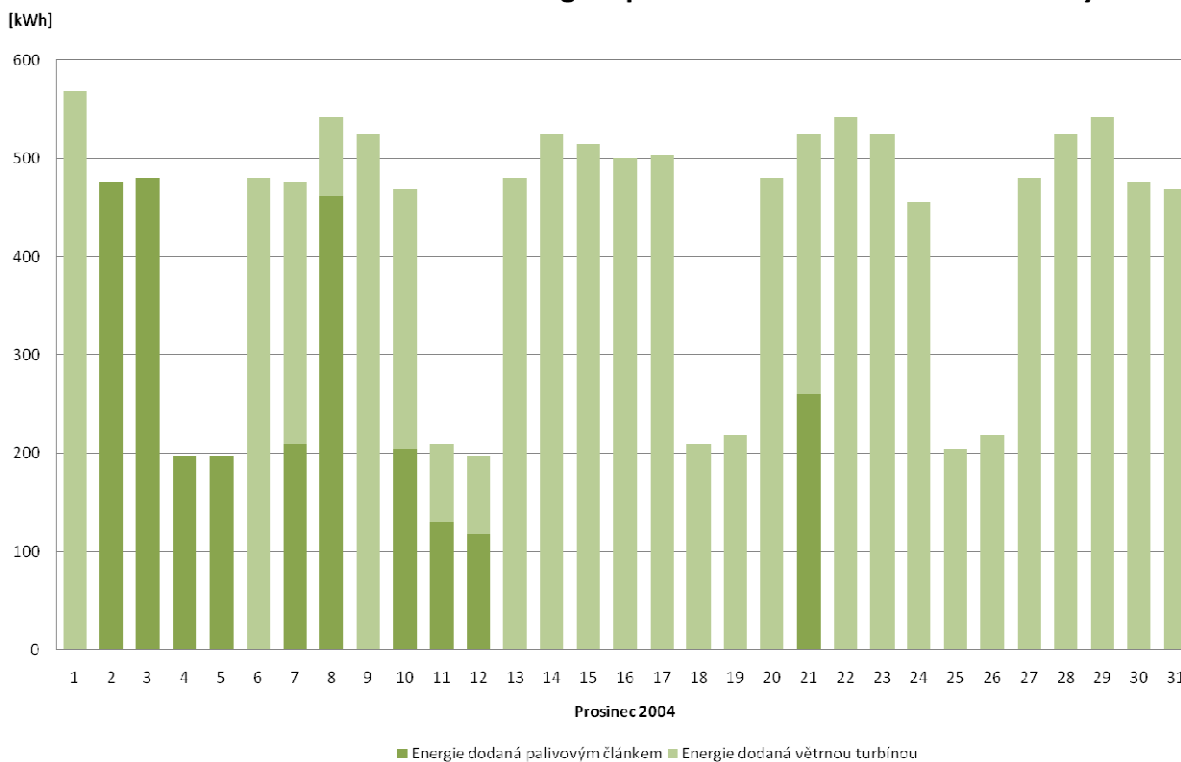
V grafech (Obr. 33 a 34) je zobrazen výkon dodávaný do budovy a podíl dodané elektrické energie v prosinci roku 2004.

Výkon jednotlivých palivových článků



Obr. 33 Výkon jednotlivých palivových článků dodávaný do budovy – výstup z numerického modelu

Podíl dodané elektrické energie z palivového článku a z větrné turbíny



Obr. 34 Podíl dodané elektrické energie z palivového článku a energie dodané z větrné turbíny - výstup z numerického modelu

Stabilizace sítě

Pro stabilizaci sítě a na pokrytí výkonových špiček navrhuji použít setrvačnick s maximálním výkonem 200 kW a s kapacitou 5kWh od firmy Enercon. Pro krátkodobé pokrytí výkonových špiček a záložní napájení jednotlivých systémů navrhuji NiCd akumulátory s kapacitou 60 kWh. Akumulátory budou použity i při kolísání výkonu větrné turbíny a tím i omezení startů-stop cyklů jednotlivých systémů. V případě kolísání vyrobené energie z větrné turbíny by akumulátory měli být schopné pokrýt spotřebu elektrolyzérů a kompresoru po dobu 15 minut popřípadě spotřebu objektu v průměrném měsíci lednu po dobu 3 hodin.

4.2 Výroba tepla

Tepečná ztráta objektu při výpočtové teplotě $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ je 255 kW. Dle normy ČSN EN 12831 (Tepečné soustavy v budovách - výpočet tepečného výkonu) musí být tepečný zdroj v objektu dimenzovaný v okrese Pelhřimov na $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Protože za posledních 10 let klesly průměrné denní teploty pod $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ pouze 4x není zde uvažován zátopový výkon. Při dostatečném množství vyrobené energie z větrné turbíny navrhuji použít na vytápění elektrické topné patrony o celkovém příkonu 255 kW. Topné patrony budou připojeny do akumuláčnní nádrže. Pro vytápění objektu za nepříznivých klimatických podmínek navrhuji použití pěti plynových kotlů s upraveným hořákem pro spalování vodíku (úprava hořáků dle vodíkového projektu v Neunburk vorm Wald). Každý může dodávat tepečný výkon v rozsahu od 11 kW do 55 kW. Teplotní spád na kotlích bude 70/50. Podle výsledků měření v Neunburg vorm Wald klesá účinnost spalování vodíku s rostoucím vyrobeným výkonem. Proto navrhuji regulování kotlů tak aby bylo v provozu co nejvíce kotlů a byli provozovány na nejmenší možný výkon dostačující k pokrytí ztrát. Kotle budou taktěž zapojeny do akumuláčnní nádrže. Akumuláčnní nádrž bude mít objem 4 m^3 a bude připojena na stávající topný systém. Do akumuláčnní nádrže se podle vzorce (12) při teplotním rozdílu $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ naakumuluje 232 kWh. Tj. téměř celá tepečná ztráta objektu při venkovní teplotě $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ za jednu hodinu.

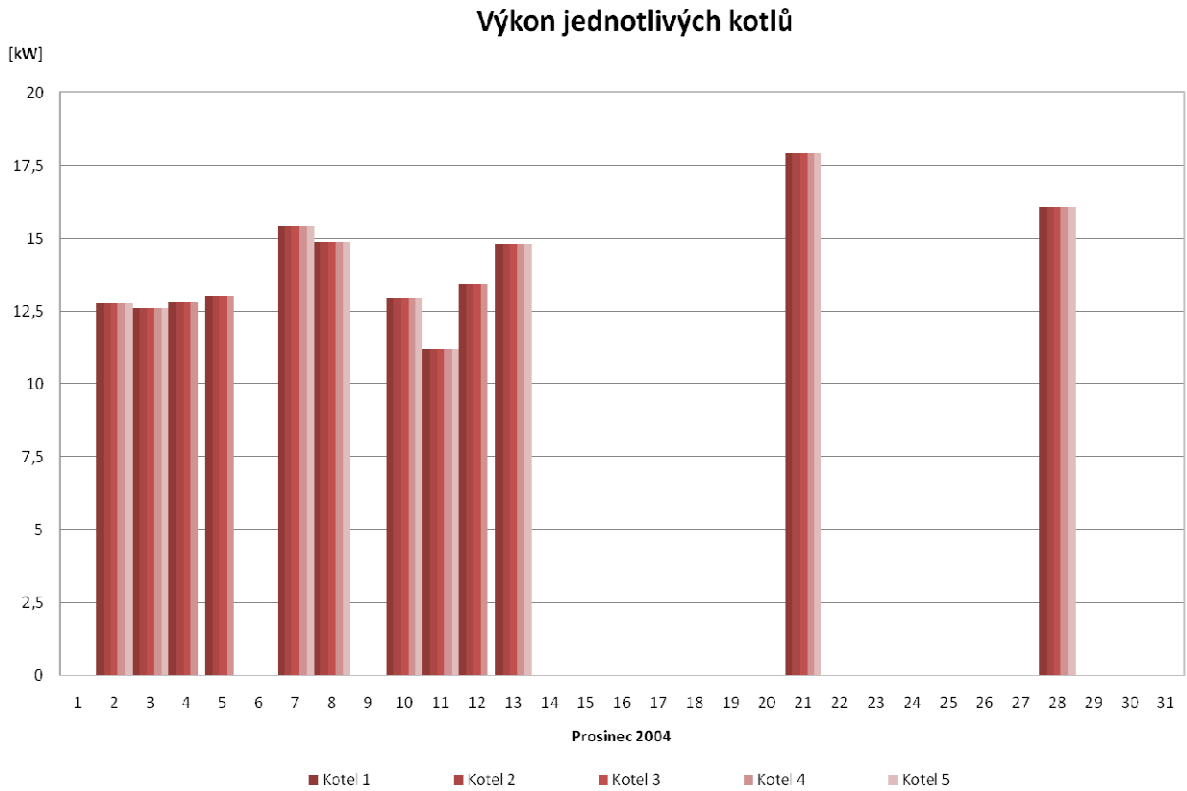
$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \quad (12)$$

V tab. XY jsou patrné rozdíly v celkové účinnosti spalování a spotřebě vodíku. Ve variantě jedna je další kotel připojen, až když výkon kotlů v provozu nedostačuje k pokrytí tepečných ztrát. Ve variantě dva je v provozu největší možné množství kotlů a každý pokrývá jen část tepečných ztrát. Kotle tak pracují s vyšší účinností a mají menší spotřebu paliva. V tabulce je množství vodíku, který by se spotřeboval bez ohledu na stav vodíku v nádržích. Výkon jednotlivých kotlů je zobrazen v grafu (Obr. 35).

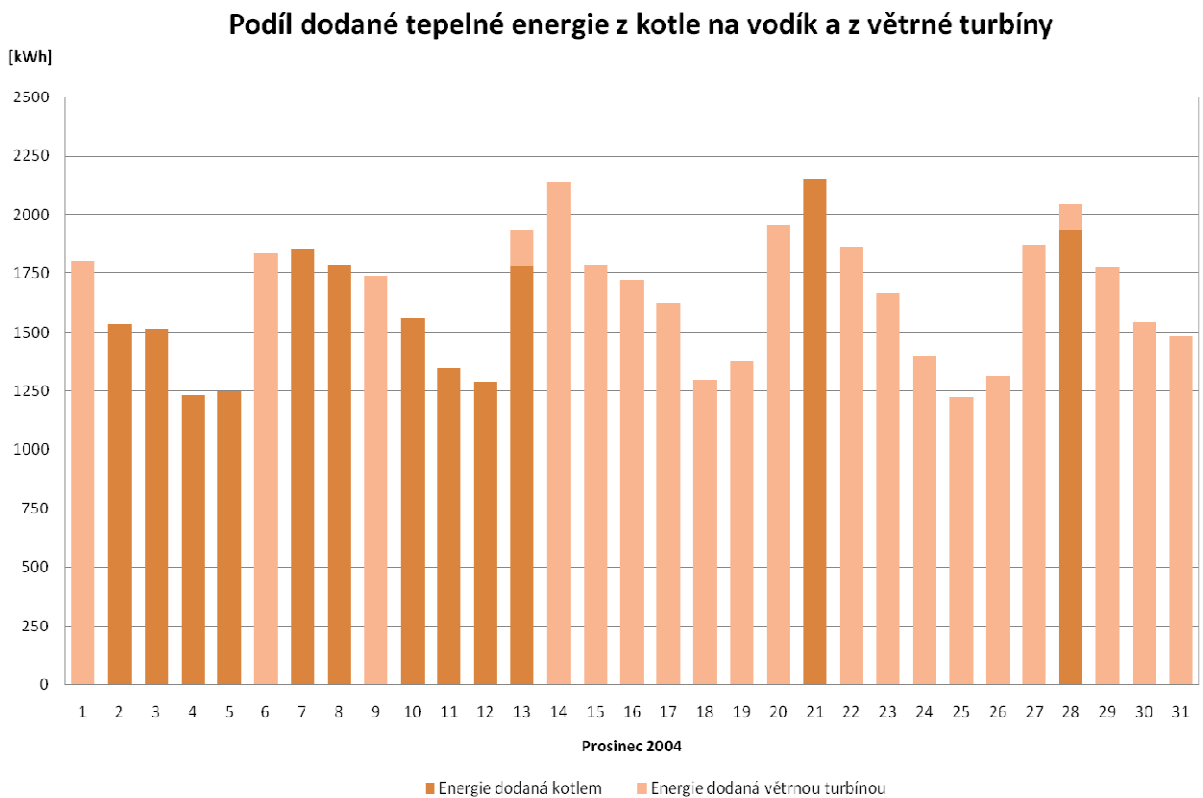
Spotřeba vodíku v závislosti na spínání vodíkových kotlů

	Průměrná účinnost [-]	Množství potřebného H_2 [Nm ³]
Varianta 1	0,826	324 067
Varianta 2	0,847	306 841

Tab. 13 Spotřeba vodíku v závislosti na spínání vodíkových kotlů ve sledovaném období

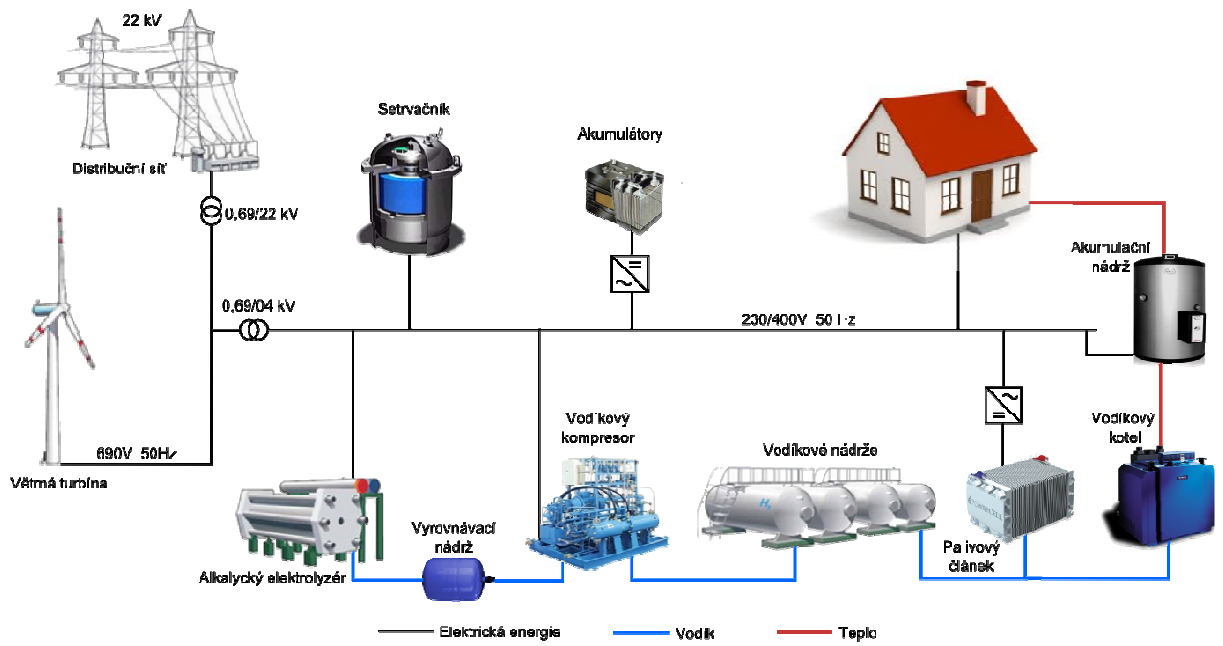


Obr. 35 Výkon jednotlivých kotlů dodávaný do budovy – výstup z numerického modelu



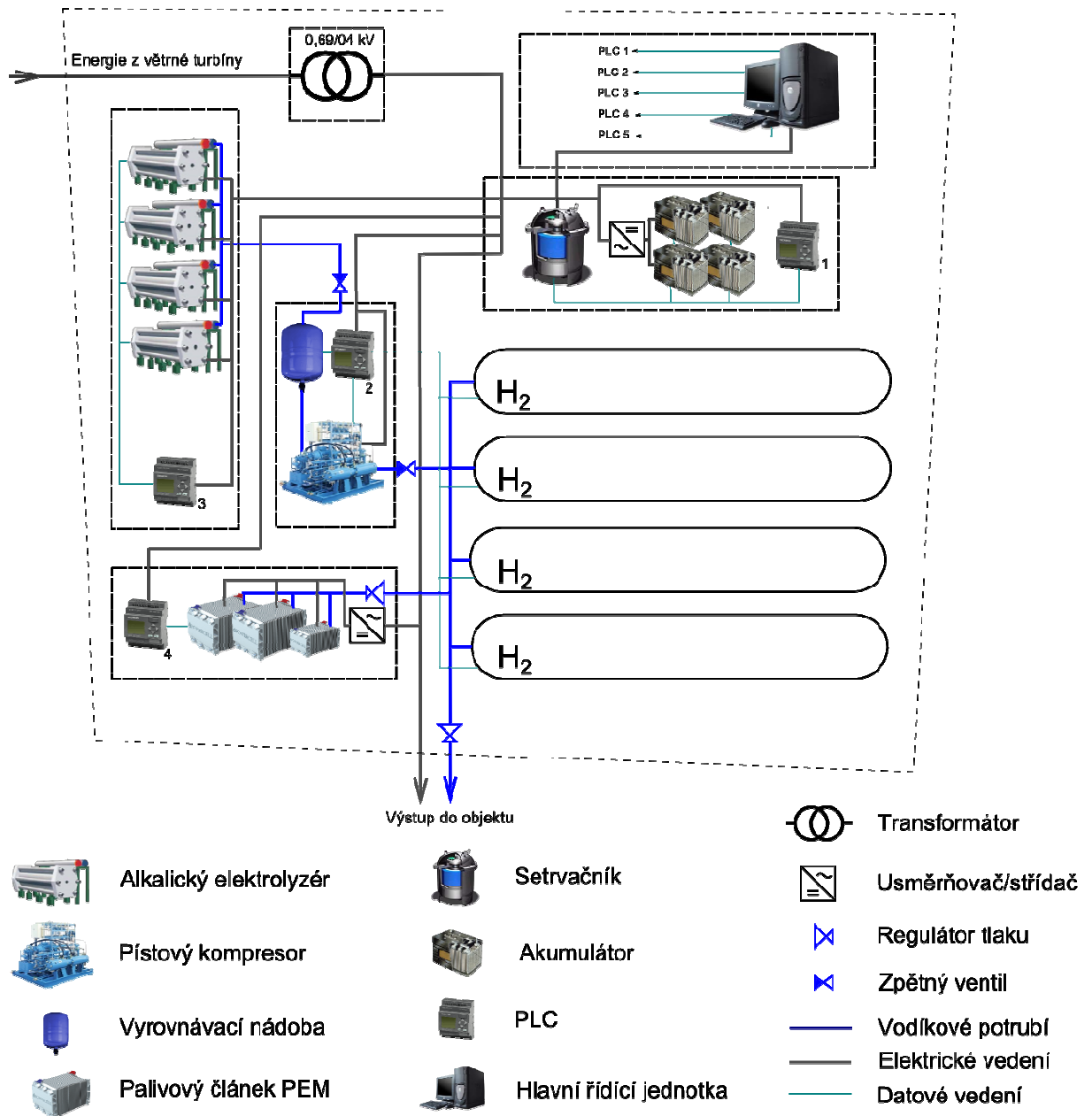
Obr. 36 Podíl dodané tepelné energie z kotle na vodík a energie dodané z větrné turbíny - výstup z numerického modelu

4.3 Blokové schéma navrženého systému akumulace

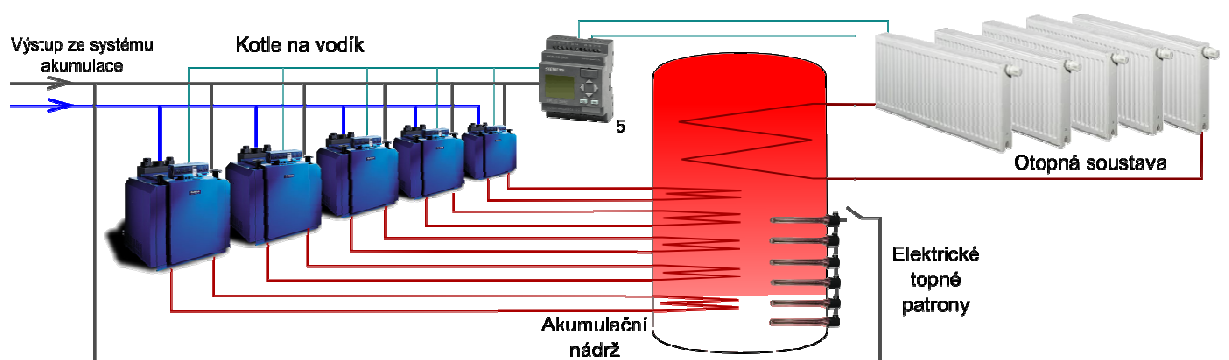


Obr. 37 Blokové schéma navrhovaného zařízení

Na obrázku 38 je navržené rozmístění a propojení jednotlivých systémů a na obrázku 39 je nakresleno blokové schéma systému vytápění.



Obr. 38 Rozmístění a propojení jednotlivých komponent



Obr. 39 Blokové schéma otopné soustavy

4.4 Návrh na umístění systému

Vzhledem k návrhu využívat k výrobě tepla přímé spalování vodíku v plynových kotlích je vhodné, aby se systém akumulace vodíku nacházel v blízkosti objektu. V tomto případě by bylo možné systém umístit na volném prostranství před budovou školy Obr. 40. Jednotlivé systémy je pro venkovní prostředí potřeba umístit do upravených skladových kontejnerů. Někteří výrobci svoje zařízení dodávají již zabudované do kontejneru (např. Elektrolyzéry Hydrogenics). Celý prostor kolem systému akumulace musí být z důvodu bezpečnosti oplocen.



Obr. 40 Návrh na umístění systému

4.5 Matematický model

Celý systém byl numericky namodelován v programu MS Excel 2007. Podle výsledků byly navrženy a optimalizovány jednotlivé komponenty. V textu je popsán základní princip funkce programu. Program obsahuje některé další mezi výpočty a pomocné výpočty, které závisí na splnění podmínek a byli nezbytné pro správný chod programu. Téměř všechny vstupní podmínky lze změnit (časová konstanta, výkon pomocných zařízení, ztráty vodíku, parametry jednotlivých komponentů...).

Výroba energie

Jako základ pro návrh větrné elektrárny byl použit program z ČVUT *Analýza větrné lokality.xls*. Program podle zadaných rychlostí větru vyhledává hodnotu výkonu na výkonové křivce. Z hodnoty výkonu je pak přes časovou konstantu vypočítána vyrobená energie. Program byl upraven tak aby přepočítával rychlost větru ze standardizované výšky 10 m nad zemí na výšku větrného motoru pomocí vzorce (13). Dále byly přidány funkce pro výpočet průměrných rychlostí větru v zadaných měsících.

$$v_h = \left(\frac{h^n}{h_0^n}\right) \cdot v_0 \quad (13)$$

Spotřeba energie

Spotřeba energie pro jednotlivé dny je vypočítána z celkové spotřebované energie za měsíc. Celková spotřebovaná elektrická energie za měsíc je vydělena počtem dnů v měsíci. Dále je spotřeba elektrické energie vynásobena koeficientem dne v týdnu (Tab. 14) a koeficientem náhody. Výpočet denní spotřeby elektrické energie je tedy podle vzorce (14).

$$E_{EL} \text{ denní} = \frac{E_{EL. \text{ měsíční}}}{n_{\text{dny v měsíci}}} \cdot k_d \cdot k_n \quad (14)$$

Celková spotřebovaná tepelná energie za měsíc je vydělena počtem dnů v měsíci a poté je vynásobena koeficientem teploty (16), koeficientem dne v týdnu (Tab. 15) a koeficientem náhody. Výpočet denní spotřeby tepelné energie je tedy podle vzorce (15)

$$E_{TEP} \text{ denní} = \frac{E_{TEP. \text{ měsíční}}}{n_{\text{dny v měsíci}}} \cdot k_t \cdot k_d \cdot k_n \quad (15)$$

Koeficient náhody jsou náhodně vložená čísla v rozsahu 0,95-1,05. Koeficient teploty byl spočítán podle vzorce (kJ)

$$k_t = \frac{(1,025 - t_{okolí})}{100} \quad (16)$$

Tabulka s koeficienty dne v týdnu pro spotřebu elektrické energie

Den v týdnu	Po	Út	St	Čt	Pá	So	Ne
Koeficient	1,15	1,2	1,3	1,2	1,15	0,5	0,5

Tab. 14 Tabulka s koeficienty dne v týdnu pro spotřebu elektrické energie

Tabulka s koeficienty dne v týdnu pro spotřebu tepelné energie

Den v týdnu	Po	Út	St	Čt	Pá	So	Ne
Koeficient	1,15	1,2	1,1	1	0,95	0,8	0,8

Tab. 15 Tabulka s koeficienty dne v týdnu pro spotřebu tepelné energie

Takto upravená spotřeba pro jednotlivé dny se v součtu od skutečné spotřeby odlišuje jen minimálně.

Z rozdílu vyrobené a spotřebované energie je vyhodnocen stav vyrobené energie jako nadvýroba nebo nedostatek.

Nadvýroba

Od hodnoty vyrobené energie je odečtena část energie na pomocná zařízení. V případě že je po odečtení pomocných zařízení dostatek energie na spuštění elektrolyzéro tak je podle zbývajících výkonu vyhledáno na výkonové křivce množství vyrobeného vodíku za hodinu. Vynásobením množství vyrobeného vodíku za hodinu časovou konstantou vyjde množství vyrobeného vodíku za den. V případě plné nádrže je výroba vodíku v elektrolyzéro blokována.

Nedostatek

V případě nedostatku energie je podle potřebného výkonu nalezena účinnost zařízení při daném výkonu. Dále je v případě palivového článku spalné teplo vodíku (3,54 kWh/m³) vynásobeno nalezenou účinností a účinností dalších potřebných zařízení (generátor,

střídač...). Výsledkem je spotřeba vodíku na pokrytí nedostatku elektrické energie v objektu vzorec (17). U spalovacího kotle na vodík je jeho účinnost vynásobena výhřevností vodíku (2,98 kWh/m³) podle vzorce (18). V případě nedostatku vodíku na pokrytí všech ztrát je upřednostňována výroba elektrické energie.

$$V_{H_2} = H_{o.nH_2} \cdot \eta_z \cdot \eta_{pz} \quad (17)$$

$$V_{H_2} = H_{u.nH_2} \cdot \eta_z \quad (18)$$

Vodíkové nádrže

Od vyrobeného vodíku je odečtena část jako ztráty (1%) a zbytek je připočten ve stavu v nádrži. V případě plné nádrže dojde k zablokování elektrolyzátoru i v případě že je dostatek energie na výrobu vodíku. Při spotřebě vodíku je další část (3%) odečtena jako ztráty. Celkový stav vodíku je dále rozdělen na jednotlivé nádrže. V případě plné nádrže je naplňována další. Tlak v jednotlivých nádržích je spočítán pomocí Redlich-Kwonovi stavové rovnice (19).

$$p = \frac{n \cdot R \cdot T}{V - n \cdot b} - \frac{a \cdot n^2}{T^2 \cdot V \cdot (V + n \cdot b)} \quad (19)$$

Kde *a* a *b* jsou konstanty stavové rovnice. Jejich hodnoty jsou pro každou látku jiné. Lze je získat z experimentálních dat o stavovém chování nebo odhadnout z kritických veličin látek pomocí vztahů (20) a (21).

$$a = 0,42748 \frac{R^3 \cdot T_c^2}{p_c} \quad (20)$$

$$b = 0,08664 \frac{R \cdot T_c}{p_c} \quad (21)$$

Výstup z programu

Výstupem z programu jsou grafy výroby energie a vodíku, spotřeby energie a vodíku, výkony jednotlivých zařízení v závislosti na spotřebě, stav a tlak vodíku v nádržích a průměrné hodnoty nebo součty vybraných veličin.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1							Množství vodíku		objem		Max tlak		
2						Nádrž 1	2400 Nm3		15 m3		20000 kPa		
3						Nádrž 2	2400 Nm3		15 m3		20000 kPa		
4						Nádrž 3	2400 Nm3		15 m3		20000 kPa		
5						Nádrž 4	2400 Nm3		15 m3		20000 kPa		
6													
7						Tokolí		Stav nádrže	Tlak vodíku	Přetlak v	Stav nádrže	Tlak vodíku	Přetlak v
8	Rok	Měsíc	Den	Datum	°C	°K	Nm3	kPa	kPa		Nm3	kPa	kPa
412	2003-2	2003	2	8	8.2.2003	-4,6	268,55	2 400,00	17 956,61	0,00	2 400,00	17 956,61	0,00
413	2003-2	2003	2	9	9.2.2003	-5,4	267,75	2 400,00	17 901,33	0,00	2 400,00	17 901,33	0,00
414	2003-2	2003	2	10	10.2.2003	-5,4	267,75	2 400,00	17 901,33	0,00	2 400,00	17 901,33	0,00
415	2003-2	2003	2	11	11.2.2003	-4,8	268,35	2 400,00	17 942,79	0,00	2 400,00	17 942,79	0,00
416	2003-2	2003	2	12	12.2.2003	-8,2	264,95	2 400,00	17 707,83	0,00	1 679,72	11 916,78	0,00
417	2003-2	2003	2	13	13.2.2003	-8,5	264,65	2 400,00	17 687,10	0,00	934,06	6 375,52	0,00
418	2003-2	2003	2	14	14.2.2003	-8,7	264,45	2 400,00	17 673,28	0,00	80,26	526,41	0,00
419	2003-2	2003	2	15	15.2.2003	-6	267,15	2 400,00	17 859,87	0,00	986,65	6 816,49	0,00
420	2003-2	2003	2	16	16.2.2003	-6,3	266,85	2 400,00	17 839,14	0,00	952,79	6 564,21	0,00
421	2003-2	2003	2	17	17.2.2003	-9,2	263,95	2 400,00	17 638,72	0,00	7,33	47,82	0,00
422	2003-2	2003	2	18	18.2.2003	-9,7	263,45	1 590,59	11 167,00	0,00	0,00	0,00	0,00
423	2003-2	2003	2	19	19.2.2003	-5,8	267,35	1 005,32	6 957,02	0,00	0,00	0,00	0,00
424	2003-2	2003	2	20	20.2.2003	-5,2	267,95	73,40	487,67	0,00	0,00	0,00	0,00
425	2003-2	2003	2	21	21.2.2003	-4	269,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
426	2003-2	2003	2	22	22.2.2003	-1,7	271,45	931,20	6 520,94	0,00	0,00	0,00	0,00
427	2003-2	2003	2	23	23.2.2003	-2	271,15	1 555,10	11 224,07	0,00	0,00	0,00	0,00
428	2003-2	2003	2	24	24.2.2003	-1,8	271,35	499,07	3 422,80	0,00	0,00	0,00	0,00
429	2003-2	2003	2	25	25.2.2003	0,5	273,65	1 425,28	10 314,58	0,00	0,00	0,00	0,00
430	2003-2	2003	2	26	26.2.2003	-1,6	271,55	1 867,31	13 722,41	0,00	0,00	0,00	0,00

Obr. 41 Ukázka programu – stav vodíku v jednotlivých nádržích

5 Závěr a zhodnocení

Z provedených výpočtů je patrné, že by v podmínkách České Republiky bylo možné vybudovat systém akumulace energie z obnovitelných zdrojů do vodíku, který by zajistil celoroční autonomní provoz. V tomto případě je systém navržen tak aby pokryl celoroční spotřebu. Vzniklé přebytky vyrobené energie jsou dodávány do distribuční sítě a je tak využitý celý potenciál větrné energie. V ostrovním režimu by v případě, kdy jsou nádrže na vodík plné a spotřebovaná energie je menší než vyrobená bylo nutné snížit výkon větrné turbíny (brzděním nebo natáčením lopatek) nebo vyrobenou energii využít jiným způsobem např. pro ohřev bazénů.

5.1 Energetická efektivnost

Účinnost akumulace energie do vodíku je oproti ostatním systémům akumulace energie relativně malá. V případě ukládání energie z neobnovitelných zdrojů s ohledem na jejich vliv na životní prostředí a snahu o jejich maximální využití se s těmito systémy nedá počítat. Nevýhodou vodíku je, že pro zvýšení objemové hustoty na hodnotu vhodnou ke skladování pro energetické účely je v současnosti potřeba vyrobený plyn stlačit, popř. zkapalnit. Energie potřebná na stlačení nebo zkapalnění může být kolem třetiny uložené energie v palivu. To je z energetického hlediska velmi nevýhodné.

5.2 Enviromentální hledisko

Systém akumulace energie do vodíku má téměř negativní dopad na životní prostředí. Na vstupu při ukládání energie je pouze demineralizovaná voda. Při výrobě elektrické energie palivovým článkem je odpadem pouze voda nebo vodní pára. Při spalování vodíku v upraveném motoru nebo plynovém kotli vznikají sloučeniny dusíku (NO_x). Jsou známi principy, kterými lze obsah sloučenin dusíku snížit na minimum.

5.3 Ekonomika

Při současných cenách a účinnostech technologií nemůže systém akumulace energie konkurovat zavedeným technologiím. Návrhovatelnosti takovýchto řešení je v lepším případě na hranici životnosti instalovaných zařízení.

Ekonomická stránka navrhovaného projektu nebyla řešena, ale jasné že škola popřípadě malá obec jako Lukavec by si takovýto systém se svým rozpočtem nemohla dovolit.

Použitá literatura

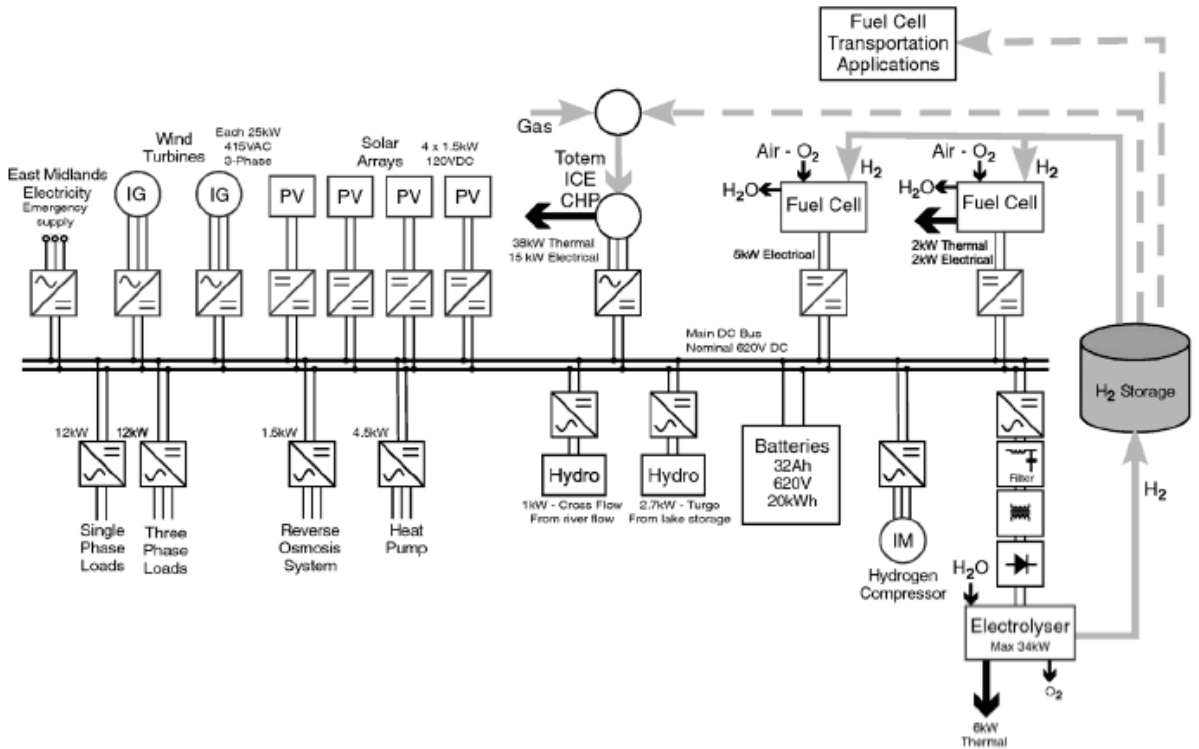
- [1] JANÍK, L - DOUCEK, A - DLOUHÝ, P. Implementační akční plán rozvoje vodíkového hospodářství v ČR, Husinec – Řež 130, 2011
- [2] TUČEK, V. - DVOŘÁKOVÁ, L. – HANZAL, J. Vodík, Česká asociace technických plynů, Praha, 2004
- [3] IVY, Johanna, Summary of Electrolytic Hydrogen Production, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 2004
- [4] BROUZEK, Karel, et.al, Implementační akční plán rozvoje vodíkového hospodářství v ČR, Husinec – Řež 130, 2012
- [5] BAČA, Petr, Palivové články a vodíkové hospodářství jako možný způsob akumulace elektrické energie z OZE, VUT v Brně
- [6] PORŠ, Zdeněk, Palivové články, Husinec – Řež 130, 2002
- [7] DOUCEK, A – TENKRÁT, D. DLOUHÝ, P. Vodíkové hospodářství a možnosti využití vodíku k regulaci obnovitelných zdrojů energie, 2010
- [8] MACEK, Jan, hystep.cz [on-line] 03.12.2007 [cit-24-3-2012] Dostupné z: <http://hytep.cz/?loc=article&id=15>
- [9] BAČA, Petr, Možnosti akumulace energie z obnovitelných zdrojů, Acta Montanistica Slovaca ,2010,15,2,
- [10] LIBRA, Martin, Hospodaření s energií, Česká zemědělská univerzita v Praze,
- [11] Skupina ČEZ, www.cez.cz [on-line], [cit-12-3-2012] Dostupné z <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/obnovitelne-zdroje/voda/dlouhe-strane.html>
- [12] GATZEN, Christoph, The Economist of Power Storage, Oldenbourg Industrieverlag, Munchen, 2008
- [13] CROTOGINO, Fritz, Hunt of CAES: More than 20 Years of Successful Operation, Orlando, Florida, 2001
- [14] PATEL, N. Newest Electrical Energy Storage System: SMES and SCES, National Conference on Recent Trends in Engineering and Technology, 2011
- [15] Eurosolar.cz, www.eurosolar.cz [on-line], 6.1.2010 [cit-12-2-2012], Dostupné z: <http://www.eurosolar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2010010001>
- [16] Beacon POWER, <http://www.beaconpower.com> [on-line], [cit-28-3-2012] Dostupné z <http://www.beaconpower.com/products/about-flywheels.asp>
- [17] KAHRAMAN, E. Analysis of hydrogen fueled internal combustion engine, School of Engineering and Sciences of Izmir Institute of Technology, 2005
- [18] GUPTA Ravi, Application of energy storage devices in power systems, International Journal of Engineering, Science and Technology, 2011
- [19] www.osti.gov [on-line], 29.6.2009 [cit-13-1-2012] Dostupné z http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=5490714
- [20] ClimatechWiki, climatechwiki.org [on-line], [cit-12-3-2012] Dostupné z <http://climatechwiki.org/technology/jiqweb-ee>
- [21] JANÍK, L. DLOUHÝ, P. hytep.cz [on-line] 25.01.2007 [cit-24-2-2012] Dostupné z <http://hytep.cz/?loc=article&id=3>

- [22] JANÍK, L. DLOUHÝ, P. hytep.cz [on-line] 17.04.2007 [cit-22-1-2012] Dostupné <http://hytep.cz/?loc=article&id=5>
- [23] ŠVÁB, M. Trendy ve vývoji vodíkového hospodářství, Česká energetická agentura, 2006
- [24] Hydrogen Storage, IPHE
- [25] JANÍK, L. DLOUHÝ, P. hytep.cz [on-line] 17.05.2007 [cit-15-1-2012] Dostupné z: <http://www.hytep.cz/?loc=article&id=8#>
- [26] Eon, [solarhydrogen.com](http://www.solarhydrogen.com) [on-line] 2002 [cit-22-5-2012] Dostupné z: <http://www.solarhydrogen.com/eng/index.htm>
- [27] SCHUCAN, T. Case studies of integrated hydrogen energy systems, International energy agency
- [28] PHOEBUS, FZJ Wissenschaftliche Ergebnisbericht, 2011
- [29] MEISSNER, Dieter, PHOEBUS a self sufficient solar hydrogen based energy system, Univerzity of Applied Sciences Hagenberg
- [30] GAMMON, R. Hydrogen and renewable integration, CRES, Loughborough University, 2011
- [31] NAKKEN, T. Utsira-demonstratin renewable hydrogen society, Norsk Hydro, 2006
- [32] SORENSEN, B. Hydrogen and fuel cells, Oxford 2011
- [33] Sustainable cities, <http://sustainablecities.dk> [on-line] [cit-4-2-2012] Dostupné z: <http://sustainablecities.dk/en/city-projects/cases/vestenskov-the-world-s-first-hydrogen-community>
- [34] TESAŘÍKOVÁ, I. Energetický audit- Základní škola Lukave, 2005
- [35] HANSLIAN, D. Odhad realizovatelného potenciálu větrné energie na území ČR, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v.v.i. Akademie věd ČR, Praha 2008
- [36] JRC, <http://re.jrc.ec.europa.eu/> [on-line] 17.05.2007 [cit-15-1-2012] Dostupné z: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps3/pvest.php#>
- [37] 4-Construction, <http://www.4-construction.com> [on-line] 2002 [cit-15-3-2012] Dostupné z: <http://www.4-construction.com/cz/clanek/akumulace-energie/>
- [38] DVOŘÁK, Petr, tzb-info.cz [on-line] 09.05.2011 [cit-27-3-2012] Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektřiny>
- [39] Elektrochemie, Ústav procesní a zpracovatelské techniky, Presentace
- [40] Bateria, www.bateria.cz [on-line] [cit-11-3-2012] Dostupné z: <http://www.bateria.cz/stranky3/zabava--pouceni/jak-to-funguje-/niklmetalhydridovy-akumulator-nimh.htm>
- [41] ESA, Sodium sulfur batteries, <http://www.electricitystorage.org/> [on-line] 2010 [cit-17-1-2012] Dostupné z: http://www.electricitystorage.org/technology/storage_technologies/batteries/soidum_sulfur_batteries/
- [42] MURTINGER, K. *Ukládání elektřiny z fotovoltaických a větrných elektráren*, www.nazeleno.cz [on-line] 03.05.2011 [cit-6-5-2012] Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/ukladani-elektřiny-z-fotovoltaickych-a-vetrnych-elektřaren.aspx>

Přílohy

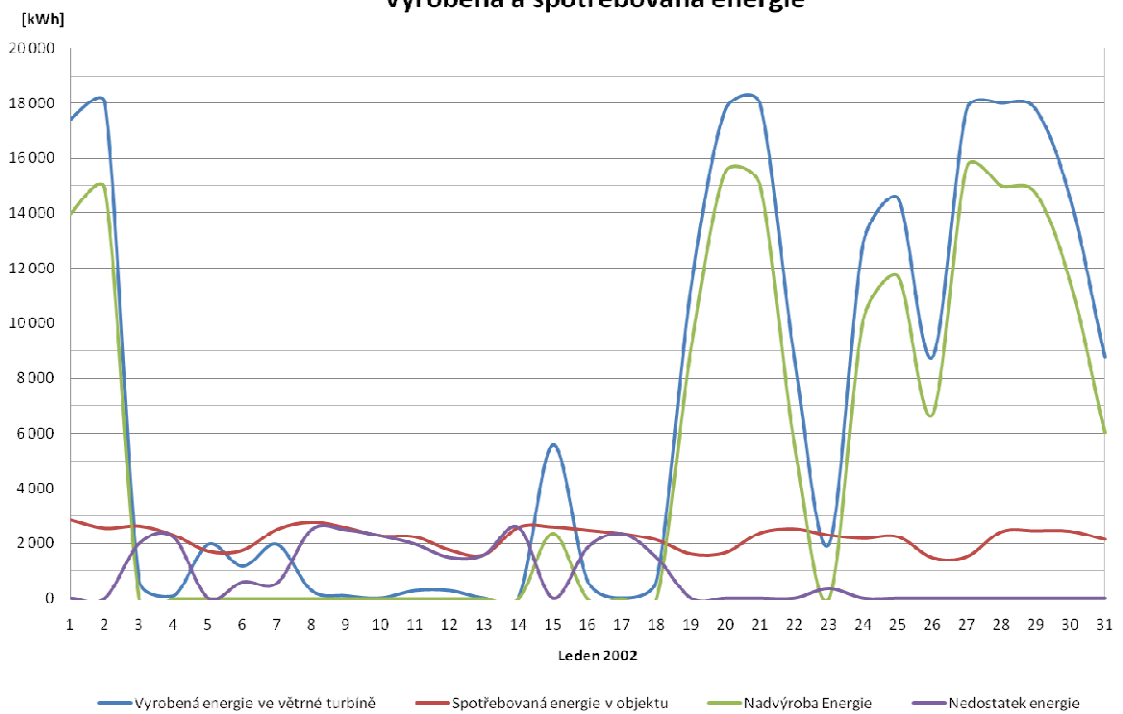
Fyzikálně chemické vlastnosti a požárně bezpečnostní charakteristiky

Chemický vzorec	H ₂
Molekulová hmotnost	2,01588 g/mol
Bod tání (při tlaku 101,3 kPa)	-259,2 °C
Bod varu (při tlaku 101,3 kPa)	-252,7 °C
Kritická teplota	-239,9 °C
Kritický tlak	1,29 MPa
Hustota plynu (při 0 °C, 101,3 kPa)	0,08987 kg/m ³
Relativní hustota plynu (vzduch=1)	0,07
Teplota vznícení cca.	520 °C
Dolní mez výbušnosti se vzduchem	4 obj. %
Horní mez výbušnosti se vzduchem	75 obj. % (dle ČSN EN 60079-10)
Výhřevnost	10 789 kJ/m ³
Rozpustnost ve vodě (při 0 °C)	1,9 mg/l
MESG (mezně bezpečnostní spára)	0,28 mm
Rozpustnost ve vodě (při 0 °C, 101,3 kPa)	1,9 mg/l
Barva	bezbarvý
Zápach	bez zápachu
UN	1049 VODÍK, STLAČENÝ
CAS	333-74-0
ES No:	215-605-7
Označení nebezpečnosti	1 F
Teplotní třída	T1
Skupina výbušnosti	II C

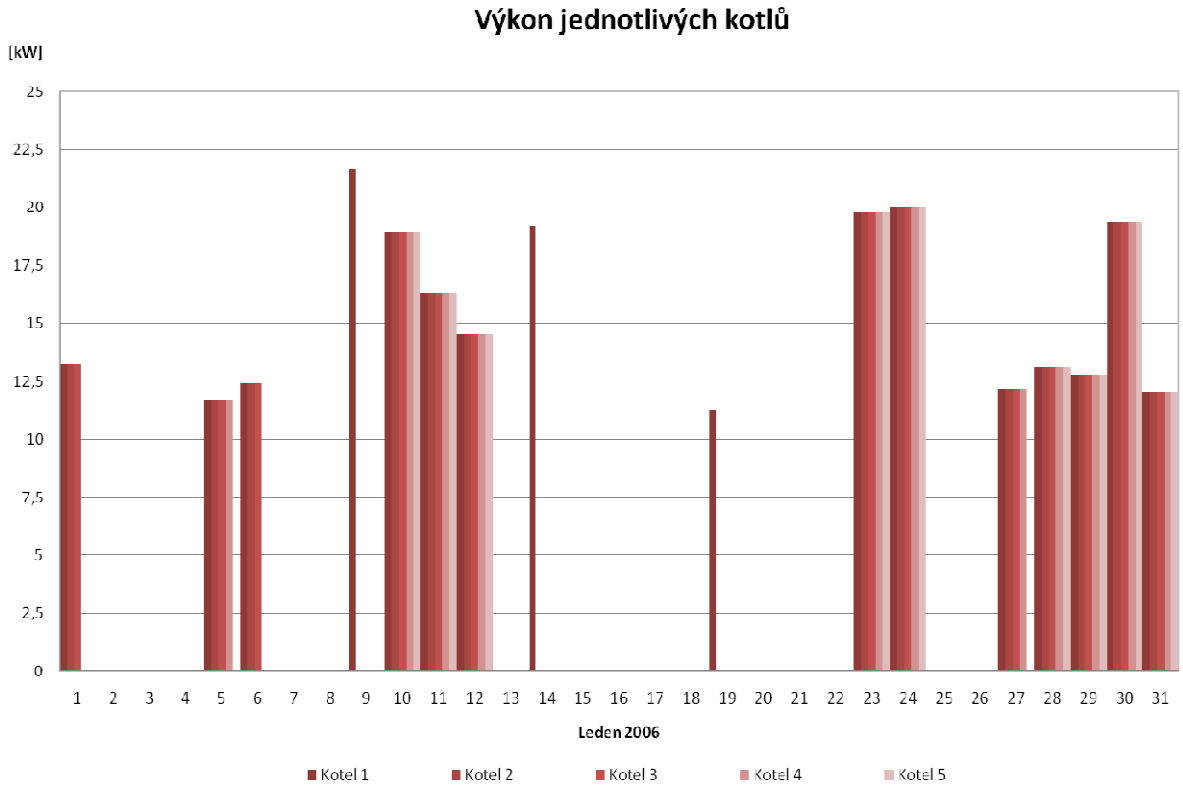


Obr. 42 Blokové schéma projektu HARI ve WestBeacon Farm v Leicestershire

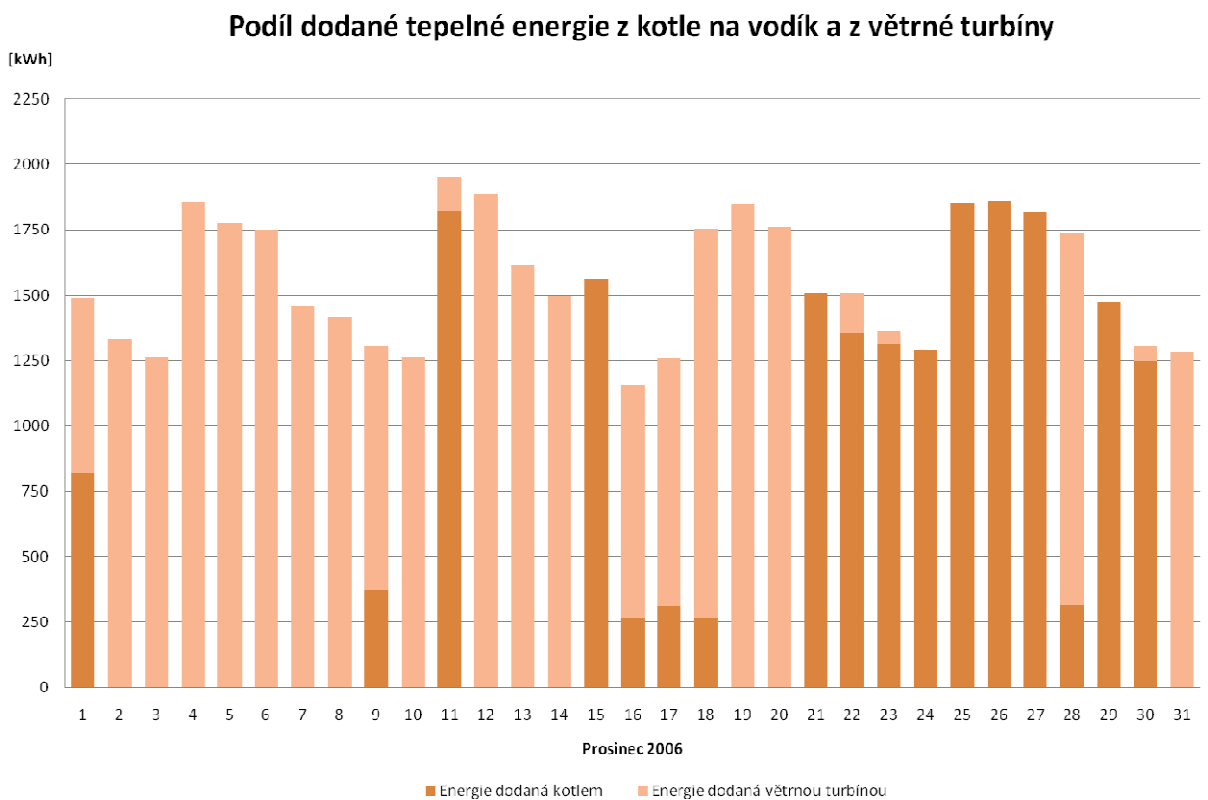
Výrobená a spotřebovaná energie



Obr. 43 Vyrobená energie větrnou turbínou a spotřeba energie v objektu v lednu 2002 (Výstup z numerického modelu)



Obr. 44 Výkon jednotlivých kotlů dodávaný do budovy – výstup z numerického modelu



Obr. 45 Podíl dodané tepelné energie z kotle na vodík a energie dodané z větrné turbíny - výstup z numerického modelu