



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Propojení větrné elektrárny a vodíkového akumulčního systému

Interconnection wind power plant with hydrogen

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: doc. Ing. Milan Jäger, CSc.

Jakub Zimčík

Praha 2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Jakub Zimčík

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektrotechnika a management

Název tématu:

Propojení větrné elektrárny a vodíkového akumulčního systému

Pokyny pro vypracování:

1. Popis větrné elektrárny a jejího provozního režimu
2. Podstata vodíkové technologie a možnosti jejího využití pro akumulaci elektřiny
3. Využití vodíkové jednotky pro vyrovnávání kolísavého výkonu obnovitelného zdroje

Seznam odborné literatury:

1. Ptáček J., Modlitba P.: Současný stav a očekávaný rozvoj větrných elektráren v Evropě a v ES ČR a jejich vliv na rozvoj soustav, Konference ČK CIRED 2008
2. Porš Z.: Palivové články, Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s., 2010
3. Arnaud ETE: Hydrogen Systems Modelling, Analysis and Optimisation, Disertation, University of Strathclyde Engineering, 09/2009, 103s.

Vedoucí bakalářské práce: Doc.Ing. Milan Jäger, CSc.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2014/2015


Doc.Ing. Jaroslav Knápek, CSc.

vedoucí katedry




Prof.Ing. Pavel Ripka, CSc.

děkan

V Praze dne 9.9.2013

**Prohlášení:**

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze dne

.....

Jakub Zimčák

**Abstrakt:**

Tato bakalářská práce pojednává o využití vodíkové technologie pro vyrovnání kolísavého výkonu větrné elektrárny. V první části seznamuje s využitím, funkcí a stavbou větrné elektrárny. Dále se zabývá jednotlivými částmi vodíkového hospodářství, výrobou, skladováním, dopravou a spotřebou vodíku.

Druhá část práce se zabývá vlastním návrhem propojení vodíkového akumulčního systému s větrnou elektrárnou. V počátku popisuje funkci systému po technické stránce. Následně je vypočítána ekonomická analýza tohoto systému a zhodnocení investice.

Klíčová slova:

Větrná elektrárna, vodíková akumulace, vyrovnání kolísavého výkonu větrné elektrárny

Abstract:

This bachelor thesis examines the use of hydrogen technology to compensate fluctuating power of wind power plant. The first part introduces the use, function and construction of wind power plant. It also features the basics information about hydrogen production, storage, transportation and consumption.

The second part addresses the design of interconnection of hydrogen storage system with wind power. At the beginning thesis describes the system from a technical view, followed by the economic calculation and analysis of the system and return of investment.

Keywords:

Wind power plant, hydrogen accumulation, compensation of fluctuating power of wind power plant



Poděkování:

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu doc. Ing. Milanu Jägerovi, CSc. za vedení mé bakalářské práce, dále za podnětné rady a informace. Rád bych poděkoval mým rodičům za neustálou podporu ve studiu.



Obsah

| | | |
|-------|---|----|
| I. | Seznam tabulek..... | 8 |
| II. | Seznam obrázků..... | 9 |
| 1 | Úvod..... | 11 |
| 2 | Větrné elektrárny..... | 13 |
| 2.1 | Větrná energetika ve světě a v ČR..... | 15 |
| 2.1.2 | Svět..... | 15 |
| 2.1.1 | ČR..... | 17 |
| 2.2 | Popis větrné elektrárny..... | 20 |
| 2.2.1 | Betonový základ..... | 20 |
| 2.2.2 | Stožár..... | 20 |
| 2.2.3 | Gondola..... | 22 |
| 2.2.4 | Větrné motory..... | 23 |
| 2.2.5 | Příklad VtE..... | 25 |
| 3 | Vodíkové hospodářství..... | 26 |
| 3.1 | Vodík..... | 26 |
| 3.2 | Výroba vodíku..... | 27 |
| 3.2.1 | Petrochemické procesy..... | 27 |
| 3.2.2 | Elektrolýza vody..... | 28 |
| 3.2 | Skladování vodíku..... | 29 |
| 3.2.1 | Skladování vodíku v plynném stavu..... | 29 |
| 3.2.2 | Skladování vodíku v kapalném stavu..... | 30 |
| 3.3 | Doprava vodíku..... | 31 |
| 3.3.1 | Přeprava plynovody..... | 31 |
| 3.3.2 | Přeprava v tlakových nádobách..... | 32 |



| | | |
|-------|--|----|
| 3.4 | Spotřeba vodíku | 32 |
| 3.4.1 | Vodíkové spalovací motory | 32 |
| 3.4.2 | Palivové články | 33 |
| 4 | Propojení VtE a vodíkové akumulace | 34 |
| 4.1 | Technická část | 34 |
| 4.2 | Ekonomické zhodnocení | 41 |
| 4.2.1 | Investiční náklady | 41 |
| 4.2.2 | Provozní náklady | 44 |
| 4.3 | Peněžní příjmy z investice | 46 |
| 4.4 | Vyhodnocení projektu | 47 |
| 4.4.1 | Metody hodnocení projektu | 48 |
| 4.4.2 | Výsledky | 49 |
| 5 | Závěr | 50 |
| 6 | Použitá literatura | 52 |
| | Příloha I. Obsah přiloženého CD | 55 |



I. Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 1 Pravděpodobnost výskytu větru dané rychlosti větru v procentech [5]..... | 14 |
| Tabulka 2 Vlastnosti vodíku [10] | 26 |
| Tabulka 3 Měrná výhřevnost paliv [10] | 27 |
| Tabulka 4 Koncentrace energie v palivech [10] | 30 |
| Tabulka 5 Technické parametry Vestas V90 [15] | 37 |
| Tabulka 6 Využití vyrobené elektřiny | 40 |
| Tabulka 7 Investiční náklady | 41 |
| Tabulka 8 Doba odpisování jednotlivých komponent [29] | 42 |
| Tabulka 9 Koeficienty odpisování k [29] | 43 |
| Tabulka 10 Koeficienty pro zvýšenou roční odpisovou sazbu o 10% [29]..... | 43 |
| Tabulka 11 Stálé provozní náklady | 44 |
| Tabulka 12 Roční porovnávací náklady | 45 |
| Tabulka 13 Měrné náklady na kWh..... | 45 |
| Tabulka 14 Ekonomický přehled | 47 |



II. Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obr. 1 Schéma VtE s vodíkovou akumulací v Německu [1]..... | 11 |
| Obr. 2 Větrná mapa ČR [13]..... | 13 |
| Obr. 3 Anemometr [5] | 14 |
| Obr. 4 Vývoj VtE v čase [12] | 15 |
| Obr. 5 Nový instalovaný výkon VtE ve světě 1996 – 2012 [8]..... | 15 |
| Obr. 6 Celkový instalovaný výkon VtE ve světě 1996 -2012 [8]..... | 16 |
| Obr. 7 Celkový instalovaný výkon VtE ve světě v červnu 2013 [17] | 16 |
| Obr. 8 Nově instalovaný výkon v první polovině roku 2013 [17]..... | 17 |
| Obr. 9 Mapa instalovaných VtE ČR [2] | 17 |
| Obr. 10 Instalovaný výkon a výroba VtE v ČR v jednotlivých letech [2]..... | 18 |
| Obr. 11 Instalovaný výkon VtE dle výrobců elektrárny v ČR [2]..... | 19 |
| Obr. 12 Hotový betonový základ [2] | 20 |
| Obr. 13 Ocelový stožár [2] | 20 |
| Obr. 14 Betonový stožár [2] | 21 |
| Obr. 15 Příhradový stožár [2] | 21 |
| Obr. 16 Strojovna VtE firmy Siemens [2] | 22 |
| Obr. 17 Savoniův větrný motor [3]..... | 23 |
| Obr. 18 VtE s vodorovnou osou (vlevo) a vertikální osou [14] | 23 |
| Obr. 19 Příklady provedení vztlakových rotorů [5]..... | 24 |
| Obr. 20 Příklady provedení motorů s vertikální osou [30]..... | 24 |
| Obr. 21 Průběh stavby elektrárny[6]..... | 25 |
| Obr. 22 Jak se vyrábí vodík [9]..... | 27 |
| Obr. 23 Parní reforming [9]..... | 28 |
| Obr. 24 Elektrolýza vody [10] | 29 |



| | |
|---|----|
| Obr. 25 Složení vysokotlaké nádoby [9] | 30 |
| Obr. 26 Vodíkové potrubí [11] | 31 |
| Obr. 27 Přeprava plynného vodíku kamiónem a kapalného vodíku lodí [11]..... | 32 |
| Obr. 28 Funkce palivového článku [9] | 33 |
| Obr. 29 Denní diagram VtE s vodíkovou akumulací..... | 35 |
| Obr. 30 Schéma funkce VtE s vodíkovou technologií..... | 36 |
| Obr. 31 Výkonová křivka Vestas V90 [15] | 37 |
| Obr. 32 NPV při různých diskontních sazbách..... | 49 |
| Obr. 33 NPV při různých výkupních cenách elektřiny..... | 49 |



1 Úvod

K základním potřebám lidí v rozvinutých státech dnes určitě patří dostupnost elektrické energie. Toho jsme docílili stavbou různých typů elektráren, většinou na neobnovitelné zdroje jako uhlí, ropu a zemní plyn. Věděli jsme ovšem, že časem budeme muset nahradit tyto zdroje zdroji obnovitelnými. Proto vyspělé státy investují velké peníze na výzkum a zlepšení elektráren využívající obnovitelné zdroje energie jako vodu, slunce nebo vítr.

Tato práce by se měla zabývat právě využitím větru pro výrobu elektřiny. Bohužel množství vyrobené elektřiny kolísá v závislosti na rychlosti větru, tudíž tento zdroj má nestálou dodávku elektřiny. Tato nestálost znehodnocuje možnosti využití této energie. Proto je potřeba akumulárního systému, který by vyrovnával rozdíly mezi výrobou a poptávkou. I na tento problém tato práce reaguje. Je mnoho variant a technologií, jak uložit vyrobenou energii. Můžeme využívat změny potenciální energie vody jako u vodních přečerpávacích elektráren nebo elektrochemickou přeměnu u různých typů baterií. Pro mou potřebu jsem si zvolil vodíkový akumulární systém, kdy budu využívat elektrolýzy vody pro získání čistého vodíku, který následně mohu v době potřeby využít jako palivo v palivovém článku pro výrobu elektřiny. Podobná větrná elektrárna, která využívá také větrné energie pro získání vodíku z vody, byla spuštěna roku 2011 v Německu v Prenzlau. Schéma této fungující elektrárny můžeme vidět na Obr. 1.



Obr. 1 Schéma VtE s vodíkovou akumulací v Německu [1]



Přebytky energie, které VtE nedodá do distribuční sítě, využívá na elektrolýzu vody, kde následný vodík dodává do speciálních tankovacích stanic nebo je přidáván do bioplynu a následně spalován. Podobný, avšak jednodušší systém se budeme snažit vytvořit i v této práci [1]

Nejprve se, ale seznámím s funkcí větrné elektrárny a jejím provozním režimem. Osvětlím podstatu vodíkového akumulčního systému a v poslední části využiji získaných vědomostí pro možné nastínění projektu větrné elektrárny s vodíkovým akumulčním systémem.

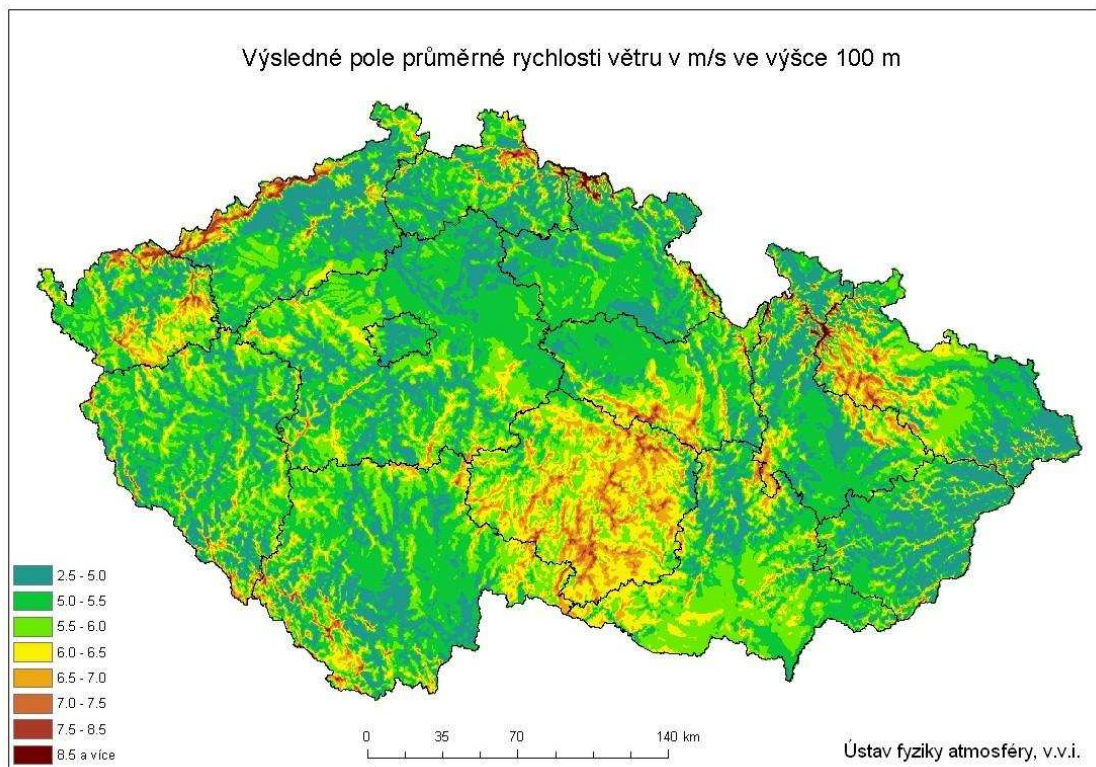


2 Větrné elektrárny

Lidstvo využívá vítr už tisíce let pro usnadnění práce. V minulosti se nejvíce využívalo větru v lodní dopravě, dále u větrných mlýnů pro mechanické pohony nebo k čerpání vody. V českých zemích se od 80. let 20. století začali využívat VtE pro výrobu elektřiny.[2]

Vítr vzniká díky rozdílům tlaku vzduchu, ty vznikají ohříváním vzduchu a rotací Země. Atmosféra se zahřívá hlavně povrchem země (zahřívání přímo od Slunce je zanedbatelné). Členitost povrchu je rozmanitá, proto se povrch zahřívá různě (poušť se zahřeje rychleji než oceán), tím se i různě rychle ohřívá vzduch, vznikají různé tlakové výše a níže. Při povrchu vítr vždy proudí z tlakové výše do tlakové níže. Čím je tlakový rozdíl větší, tím je vítr silnější.[3]

Jak můžeme vidět na Obr. 2, v ČR jsou nejlepší podmínky pro výstavbu VtE na pohraničních pohořích, které jsou většinou národním parkem, a proto je často výstavba nemožná.



Obr. 2 Větrná mapa ČR [13]



Na základě provedených měření byla vytvořena Tabulka 1, pro pravděpodobné rozdělení rychlostí větru pro jeho různé průměrné rychlosti. Tyto údaje však slouží pouze jako základní orientace o větrné situaci. Při větších projektech je potřeba měření na předpokládaném místě stavby a ve výšce rotoru. Měření se provádí pomocí anemometru, Obr. 3.



Obr. 3 Anemometr [5]

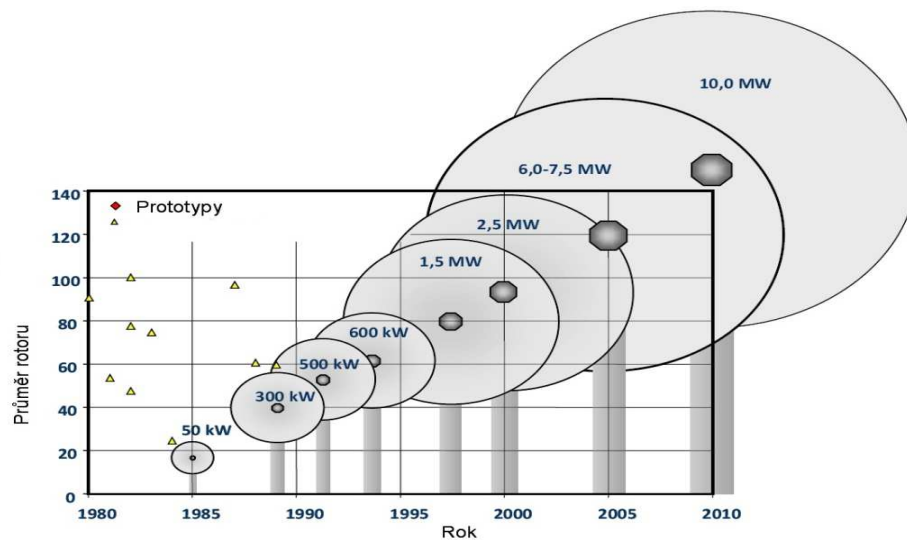
Tabulka 1 Pravděpodobnost výskytu větru dané rychlosti větru v procentech [5]

| Měřené rychlosti větru ($m.s^{-1}$) | Průměrná rychlost větru ($m.s^{-1}$) | | | | | | |
|--|--|------|------|------|------|------|------|
| | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Do 0,5 | 4,2 | 2,8 | 1,96 | 1,48 | 1,17 | 0,95 | 0,74 |
| 1 | 13,7 | 9,7 | 7,2 | 5,06 | 4,54 | 3,42 | 2,85 |
| 2 | 17,6 | 13,7 | 10,6 | 8,55 | 7,10 | 5,93 | 5,13 |
| 3 | 16,5 | 14,3 | 11,9 | 9,9 | 8,4 | 7,1 | 6,3 |
| 4 | 13,9 | 13,1 | 11,6 | 11,0 | 8,85 | 7,75 | 6,9 |
| 5 | 10,6 | 10,8 | 10,6 | 9,8 | 8,3 | 8,0 | 7,2 |
| 6 | 7,5 | 8,9 | 9,25 | 8,9 | 8,45 | 7,65 | 7,1 |
| 7 | 5,35 | 7,2 | 7,75 | 8,0 | 7,7 | 7,4 | 6,85 |
| 8 | 3,75 | 5,48 | 6,4 | 6,85 | 6,35 | 6,85 | 6,5 |
| 9 | 2,62 | 4,0 | 5,13 | 5,9 | 6,05 | 6,28 | 6,15 |
| 10 | 1,7 | 3,0 | 4,1 | 5,5 | 5,4 | 5,6 | 5,6 |
| 11 | 1,1 | 2,3 | 3,2 | 4,0 | 4,7 | 5,0 | 5,13 |
| 12 | 0,57 | 1,6 | 2,5 | 3,2 | 3,9 | 4,35 | 4,56 |
| 13 | 0,4 | 1,14 | 1,9 | 2,6 | 3,3 | 3,78 | 4,1 |
| 14 | 0,23 | 0,68 | 1,6 | 2,16 | 2,7 | 3,2 | 3,65 |
| 15 | 0,19 | 0,45 | 1,14 | 1,7 | 2,3 | 2,74 | 3,2 |
| 16 | 0,11 | 0,34 | 0,8 | 1,42 | 1,9 | 2,3 | 2,74 |
| 17 | - | 0,25 | 0,68 | 1,14 | 1,6 | 2,0 | 2,4 |
| 18 | - | 0,15 | 0,45 | 0,85 | 1,4 | 1,71 | 2,06 |
| 19 | - | 0,11 | 0,34 | 0,66 | 1,13 | 1,48 | 1,71 |
| 20 | - | - | 0,23 | 0,41 | 0,85 | 1,25 | 1,48 |
| 21 | - | - | 0,20 | 0,31 | 0,68 | 0,97 | 1,25 |
| 22 | - | - | 0,17 | 0,25 | 0,57 | 0,83 | 1,14 |
| 23 | - | - | 0,11 | 0,19 | 0,4 | 0,68 | 0,91 |
| 24 | - | - | 0,05 | 0,17 | 0,28 | 0,57 | 0,80 |
| 25 | - | - | - | 0,11 | 0,25 | 0,45 | 0,68 |
| 26 | - | - | - | 0,07 | 0,20 | 0,40 | 0,57 |
| 27 | - | - | - | 0,04 | 0,17 | 0,34 | 0,45 |
| 28 | - | - | - | - | 0,14 | 0,25 | 0,36 |
| 29 | - | - | - | - | 0,11 | 0,20 | 0,32 |
| 30 | - | - | - | - | - | 0,14 | 0,25 |



2.1 Větrná energetika ve světě a v ČR

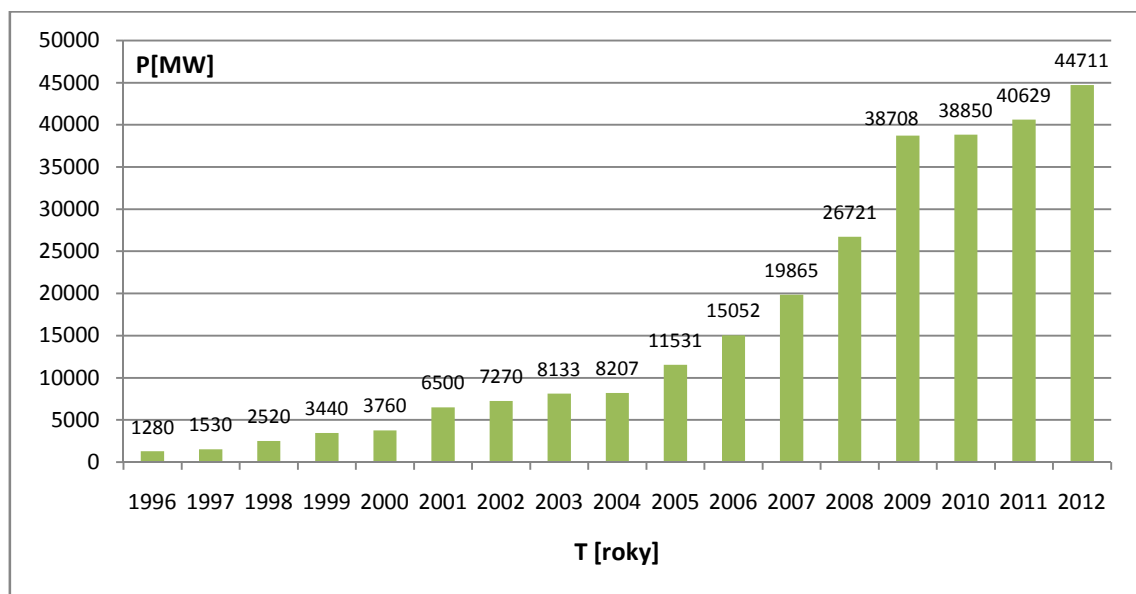
Větrná energetika zažívá svůj vzestup nejen díky vývoji větších průměrů rotoru a vyšších stožárů, viz Obr. 4, ale také díky celosvětovému zaměření na energii z obnovitelných zdrojů.



Obr. 4 Vývoj VtE v čase [12]

2.1.2 Svět

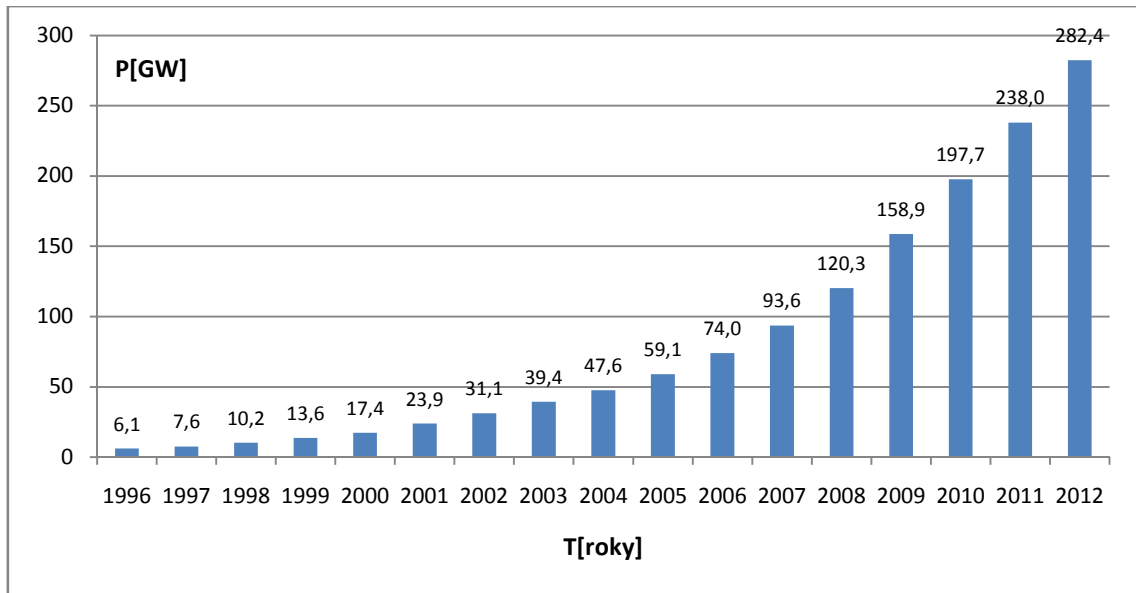
Větrná energie má ve světě velký potenciál. Každým rokem roste nově instalovaný VtE ve světě. Na Obr. č. 5 můžeme sledovat roční nárůst od roku 1996 až po rok 2012.



Obr. 5 Nový instalovaný výkon VtE ve světě 1996 – 2012 [8]

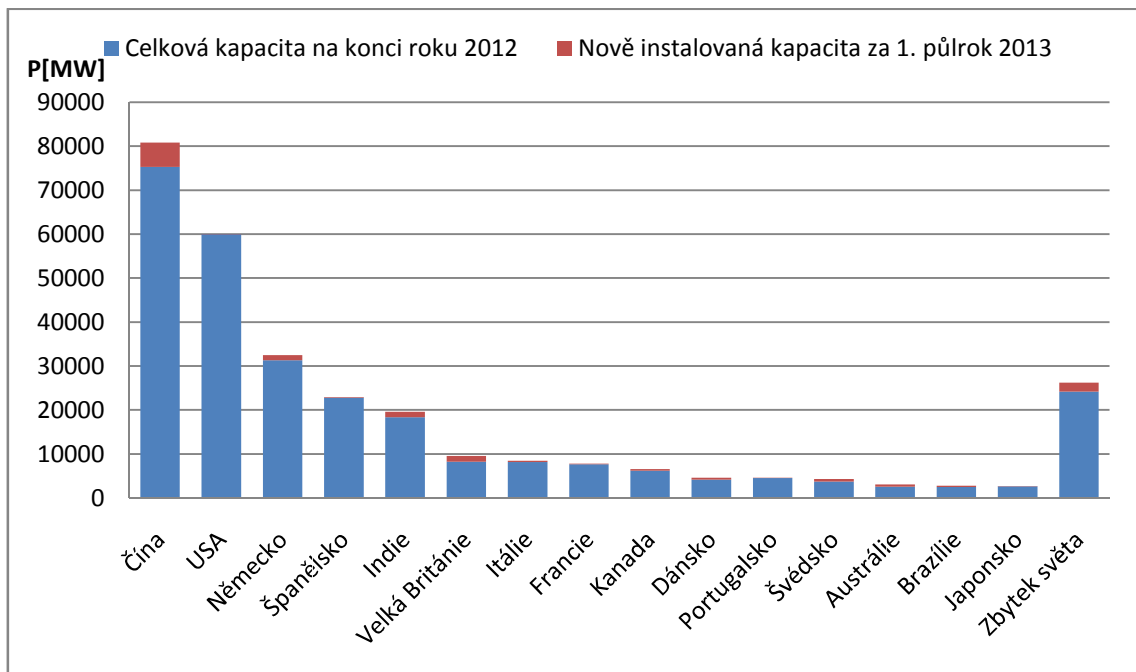


S rostoucím nově instalovaným výkonem roste i celkový instalovaný výkon VtE ve světě, viz Obr. 6.



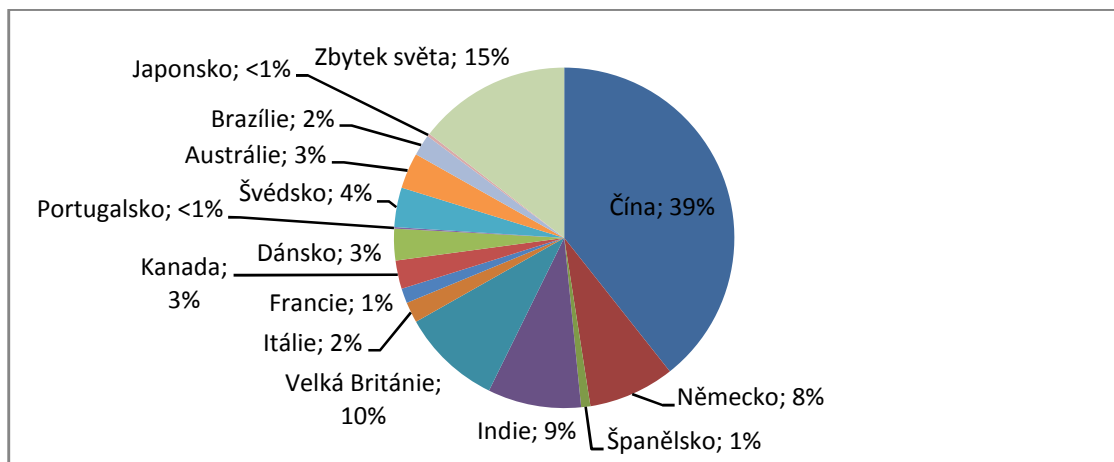
Obr. 6 Celkový instalovaný výkon VtE ve světě 1996 -2012 [8]

Na 73 % z celosvětového instalovaného výkonu z VtE se podílí pět hlavních větrných států. Jedná se o Čínu, USA, Německo, Španělsko a Indii, viz Obr. 7.



Obr. 7 Celkový instalovaný výkon VtE ve světě v červnu 2013 [17]

Co se ovšem týče nově instalovaného výkonu, velký potenciál má Velká Británie, která v Evropě instalovala nejvíce v první polovině roku 2013 a ve světě získala druhou příčku za Čínou, viz Obr. 8 na straně 17.



Obr. 8 Nově instalovaný výkon v první polovině roku 2013 [17]

2.1.1 ČR

Přestože Česká Republika nemá příliš příhodné podmínky pro využití větrné energie, existují i vhodné lokality s vyššími průměrnými rychlostmi větru. Většina je situována ve vyšších nadmořských výškách. Za minimální ekonomickou hranici pro využití větrné energie se ve světě považuje průměrná rychlost větru $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Vždy je však nutné určit tuto hodnotu jednotlivě pro konkrétní případ. Na Obr. 9 můžeme vidět aktuální rozestavení instalovaných elektráren v ČR.



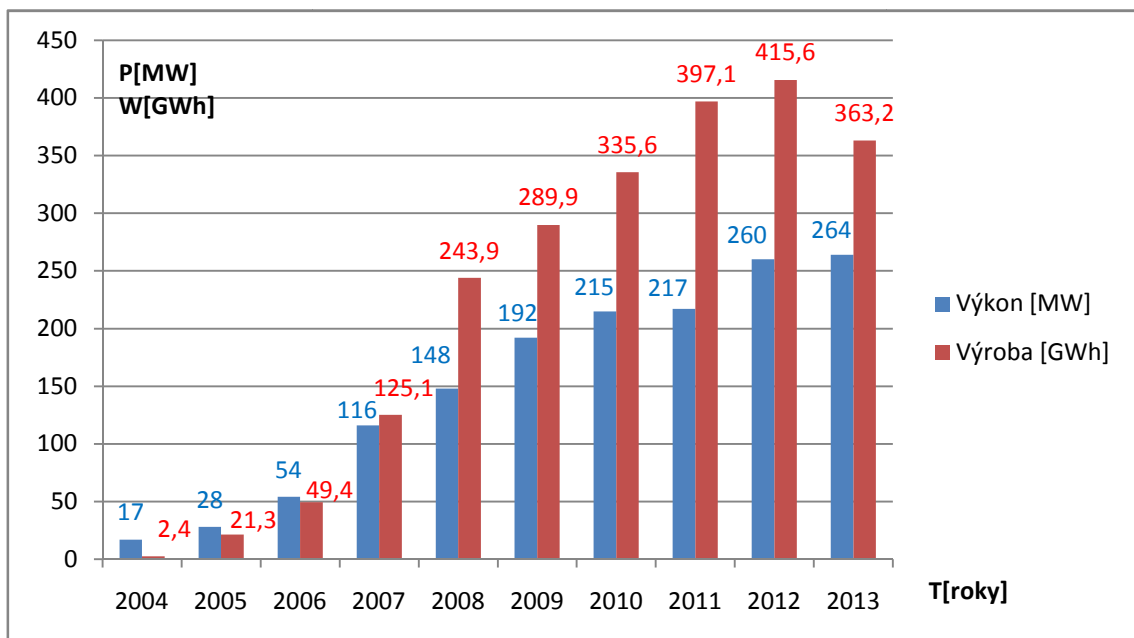
Obr. 9 Mapa instalovaných VtE ČR [2]



Ústav fyziky atmosféry Akademie Věd ČR zpracoval v roce 2008 zprávu, ve které vypočítal potenciál využití větrné energie na území ČR. Dle této zprávy je celkový potenciál ČR:

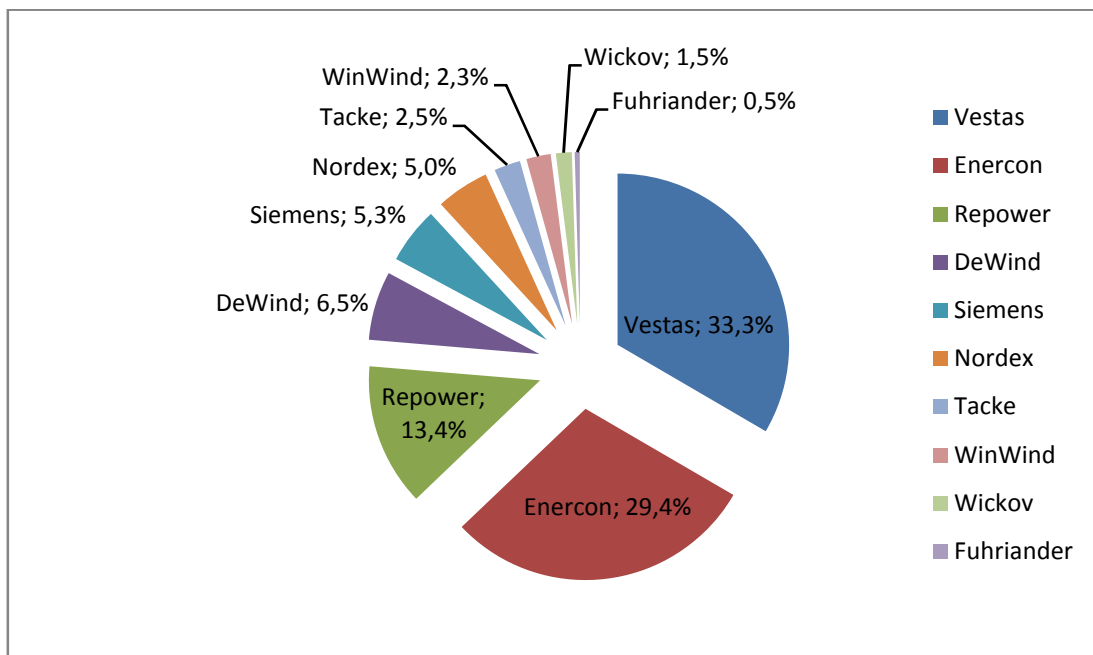
- 1 165 větrných elektráren
- 2 462 MW instalovaný výkon
- 5 451 GWh.rok⁻¹ vyrobená energie

Když tyto hodnoty srovnáme s aktuálními hodnotami vystavěných elektráren, viz Obr. 10, vidíme, že zatím využíváme kolem 10 % možného potenciálu. Údaje za rok 2013 jsou počítány jen za úsek leden – říjen, jelikož ERÚ zveřejňuje informace s 2-3 měsíčním zpožděním.[14, 20]



Obr. 10 Instalovaný výkon a výroba VtE v ČR v jednotlivých letech [2]

Existuje mnoho výrobců větrných elektráren. Na Obr. 11 na straně 19 můžeme vidět jejich zastoupení na podílu instalovaného výkonu v ČR. Převážně se jedná o dánského výrobce Vestas a americký Enercon.



Obr. 11 Instalovaný výkon VtE dle výrobců elektrárny v ČR [2]



2.2 Popis větrné elektrárny

Větrná elektrárna se skládá ze čtyř základních částí: z betonového základu, stožáru, gondoly s elektrickým generátorem a převodovkou a větrné turbíny.

2.2.1 Betonový základ

Základ VtE tvoří většinou betonová deska. Například u 75 m vysokého stožáru je betonový základ přibližně o velikosti 10x10x5 m. U elektráren budovaných na vodní hladině je základ položený na dně. Uvažuje se i o plovoucí elektrárně ukotvené ke dnu pouze lany.[6]



Obr. 12 Hotový betonový základ [2]

2.2.2 Stožár

Rozlišujeme 3 základní typy stožárů: ocelový, betonový a příhradový. Ve vyšší výšce je proudění větru rychlejší, proto s vyšším stožárem roste i výkon VtE.

Ocelový tubusový stožár

Nejčastěji používaný stožár v Evropě. Využívá se hlavně pro stožáry do 100 m. Při vyšších stožárech je nutnost tlustých plátů až 40 mm, které se těžko obrábějí. Kvůli dopravě je většinou spojován po 25 m celcích. Na Obr. 13 vidíme nástřik barev proti zamezení koroze oceli.



Obr. 13 Ocelový stožár [2]



Betonový stožár

Jedná se o stožár sestavený z několika prstenců. I samotné prstence bývají z více částí, což zjednodušuje dopravu. Výhodou je dlouhá životnost a vysoká odolnost proti korozi, které se využívá hlavně v přímořských oblastech. Nevýhodou je vyšší cena. Na Obr. 14 nasazuje jeřáb další prstencovou část betonového stožáru.



Obr. 14 Betonový stožár [2]

Příhradový stožár

Stožár smontovaný z mnoha vzpěr a nosníků, jak vidíme na Obr. 15. Využívá se pro malé lokální VtE, dále pak pro stožáry nad 100 m, kdy je ekonomicky výhodnější, díky potřebě méně materiálu a jednodušší dopravě. Tento typ stožáru je rozšířený převážně v Číně a Indii.[2]

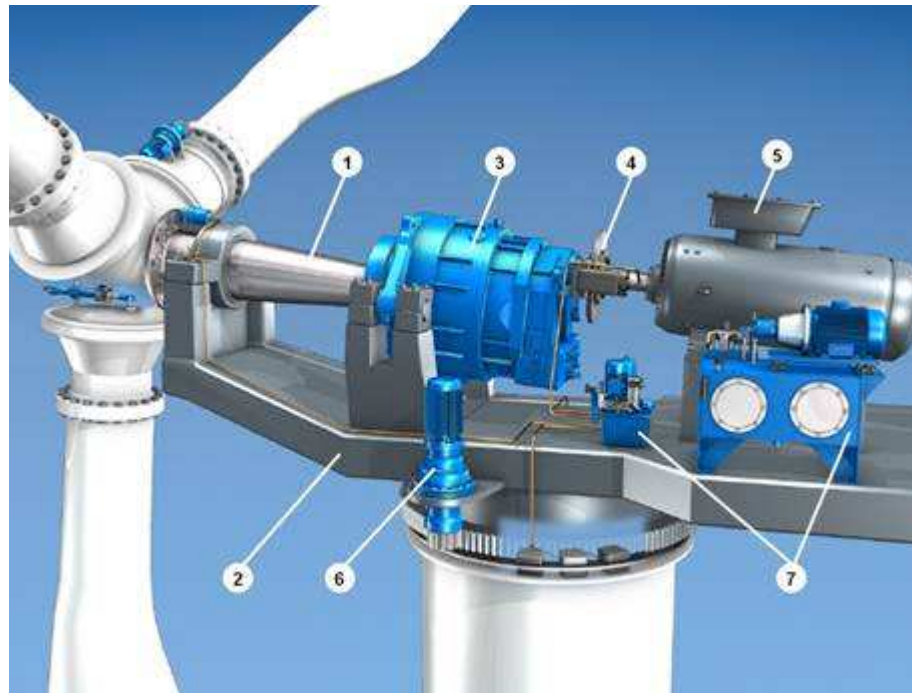


Obr. 15 Příhradový stožár [2]



2.2.3 Gondola

Základní a nejdůležitější částí VtE je strojovna. Zde se přeměňuje mechanická energie na elektrickou. Celá strojovna je umístěna ve sklolaminátové gondole posazené na vrcholu stožáru. Na Obr. 16 můžeme vidět uspořádání ve strojovně od firmy Siemens.



Obr. 16 Strojovna VtE firmy Siemens [2]

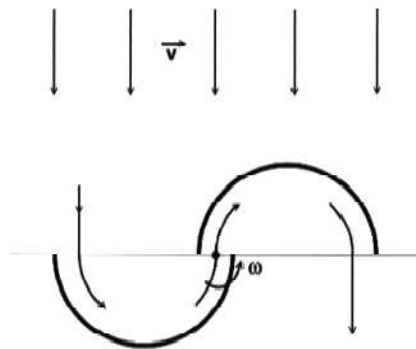
- 1) Hlavní hřídel větrné elektrárny
- 2) Nosný rám strojovny
- 3) Převodovka větrné elektrárny
- 4) Spojení mezi převodovkou a generátorem
- 5) Generátor větrné elektrárny
- 6) Systém natáčení strojovny
- 7) Hydraulické systémy větrné elektrárny



2.2.4 Větrné motory

Odporové

Jedná se o nejstarší princip, kdy lopatky rotoru jsou nastaveny proti proudění větru, tím vzniká aerodynamický odpor. Na ploše lopatky vzniká mechanická síla, která se přeměňuje na rotační. Otáčky rotoru jsou přímo úměrné rychlosti větru. Malý výskyt tohoto principu je dán nízkou účinností, kolem 15 - 23%. Výhodou je jednoduchá konstrukce, použitelnost již od rychlosti větru $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a nezávislost na směru větru. Princip motoru je vidět na Obr. 17.



Obr. 17 Savoniův větrný motor [3]

Vztlakové

V současné době pracuje většina VtE na vztlakovém principu. Jedná se o motory s vodorovnou nebo vertikální osou.

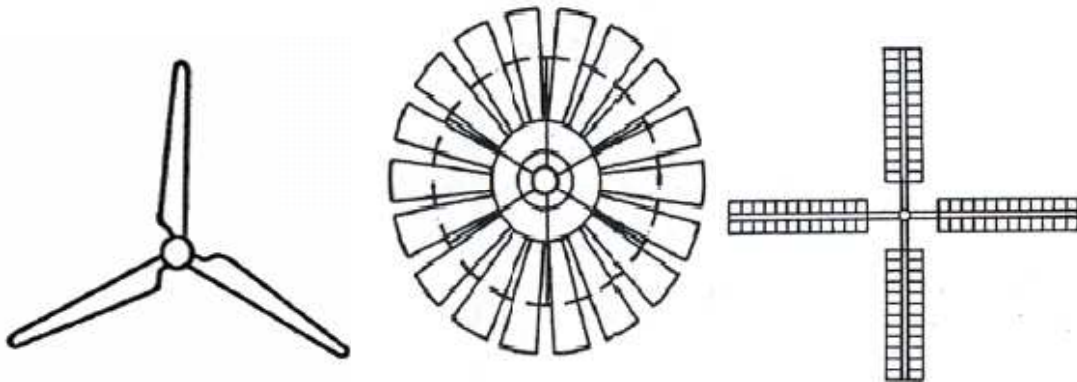


Obr. 18 VtE s vodorovnou osou (vlevo) a vertikální osou [14]



Horizontální osa

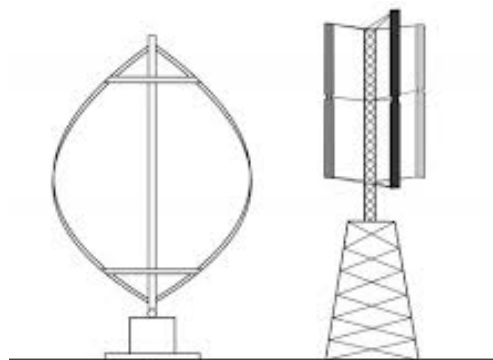
Motory s vodorovnou osou a lopatkami postavenými kolmo proti proudění větru, tvoří většinou soudobých VtE. Jsou závislé na směru větru, proto je potřeba natáčení rotoru a listů rotoru pro regulaci výkonu. V poslední době došlo ke zdokonalení větrných vztlakových motorů a díky tomu dosahuje účinnost i nad 40%. Další výhodou je i nižší hmotnost. Nevýhodou je rozběhová rychlost kolem $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. [3]



Obr. 19 Příklady provedení vztlakových rotorů [5]

Vertikální osa

Motory s vertikální osou jsou nezávislé na směru větru. Pracují v nižších výškách, tudíž v oblasti menší rychlosti větru. Mají menší aerodynamickou účinnost než VtE s horizontální osou. Výhodou je, že strojovna nemusí být umístěna v gondole, ale může být na zemi.



Obr. 20 Příklady provedení motorů s vertikální osou [30]



2.2.5 Příklad VtE

Stavba VtE



Obr. 21 Průběh stavby elektrárny[6]

1 základy; 2 stavba sloupu; 3 vyzvednutí gondoly; 4 vyzvednutí generátoru; 5 sestavení rotoru z jednotlivých lopatek (na zemi) a připevnění ke gondole.



3 Vodíkové hospodářství

Vodíkové hospodářství se zabývá jednotlivými operacemi využívajícími vodíku jako nositele energie. Především se jedná o:

- výrobu vodíku
- skladování vodíku
- dopravu vodíku
- spotřebu vodíku

3.1 Vodík

Vodík zastává první místo v periodické soustavě prvků. Jedná se o nejmenší a nejjednodušší chemický prvek. Společně s dusíkem, uhlíkem a kyslíkem tvoří základní stavební kameny všech živých organismů. Tento hořlavý plyn je bezbarvý, bez chuti a zápachu. Jedná se o nejhojněji vyskytovaný prvek na Zemi a také ve vesmíru. Výskyt elementárního vodíku je v přírodě jen ojedinělý, ve velké míře se ovšem vyskytuje ve sloučeninách. Hlavně ve vodě, zemním plynu či uhlí. Jeho vlastnosti vidíme v Tabulce 2.

Tabulka 2 Vlastnosti vodíku [10]

| | | |
|--|----------------|--------|
| Chemický vzorec | H ₂ | |
| Molekulová hmotnost (g.mol ⁻¹) | 2,01588 | |
| Teplota (°C) | tání | -259,2 |
| | varu | -252,7 |
| | kritická | -239,9 |
| | samovznícení | 520 |
| Kritický tlak (MPa) | 1,29 | |
| Hustota (kg.m ⁻³) při 0 °C; 101,3 kPa | 0,08987 | |
| Výhřevnost (kJ.m ⁻³) | 10789 | |



Vodík je vhodný palivový zdroj díky nejvyšší měrné energii a čistému spalování, při kterém vzniká pouze voda a teplo. V Tabulce 3 můžeme porovnat jeho měrnou výhřevnost s aktuálně používanými palivy.

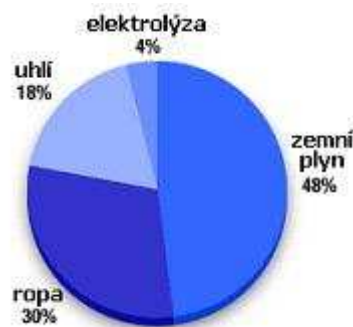
Tabulka 3 Měrná výhřevnost paliv [10]

| Palivo | Vyšší výhřevnost |
|----------|------------------|
| Vodík | 141,86 kJ/g |
| Metan | 55,53 kJ/g |
| Propan | 50,36 kJ/g |
| Benzin | 47,5 kJ/g |
| Nafta | 44,8 kJ/g |
| Methanol | 19,96 kJ/g |

3.2 Výroba vodíku

V průmyslu se využívá několika technologických procedur k získání vodíku z organických sloučenin. Rozdělit bychom je mohli do tří hlavních skupin:

- Petrochemické procesy ze zemního plynu, ropy a uhlí
- Elektrolýza vody
- Jaderná energie



Obr. 22 Jak se vyrábí vodík [9]

3.2.1 Petrochemické procesy

Jak můžeme vidět na Obr. 22, momentálně více jak 95 % vyrobeného vodíku pochází z petrochemických procesů. Při petrochemických procesech vstupuje uhlovodíkové palivo s teplem a výstupem je čistý vodík, oxid uhličitý, případně jiné sloučeniny. Většina těchto technologií probíhá za vysoké teploty a tvorby skleníkových plynů. Jako příklad můžeme uvést rovnici parního reformingu zemního plynu:



1. Reformní reakce: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$
2. Konverze CO: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$

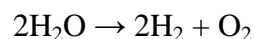
Proces probíhá při teplotách 500 – 950 °C a tlaku 0,3 - 2,5 MPa. Účinnost procesu se pohybuje kolem 80 %. Velkou nevýhodou je vytvoření 7 kg oxidu uhličitého na 1 kg vodíku.[9]



Obr. 23 Parní reforming [9]

3.2.2 Elektrolýza vody

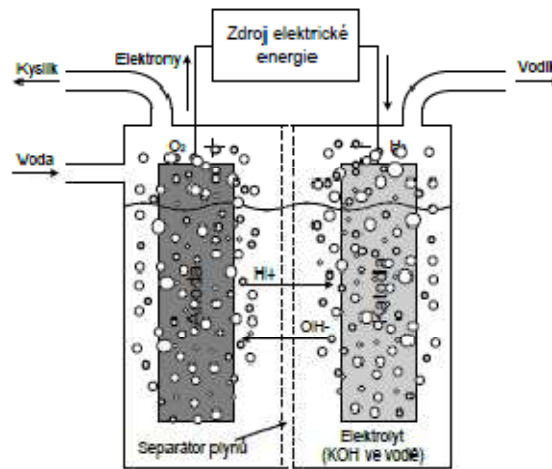
Při elektrolýze získáváme z vody vodík na katodě a kyslík na anodě za pomoci elektrické energie:



Spotřeba energie elektrolýzou je většinou větší, než při výrobě vodíků z uhlovodíků. Elektrolýzou získáváme velmi čistý vodík s čistotou nad 99,9 %. Při elektrolýze se neuvolňuje do ovzduší žádný skleníkový plyn. Nakolik bude výroba vodíku ekologická, záleží také na výrobě elektřiny použité pro elektrolýzu. Proto je možnost využití přebytečné elektřiny obnovitelných zdrojů pro výrobu ekologicky čistého vodíku zajímavá. Elektrolýza je zastoupena pouze ze 4 %, s úbytkem uhlovodíků a s růstem využití obnovitelných zdrojů energie se očekává nárůst využití této technologie. Účinnost elektrolýzy se pohybuje mezi 80 - 92 %. Na celkové účinnosti se podílí i účinnost výroby elektřiny, proto konečná účinnost je daleko menší. Elektrolýza se



vyplatí převážně tam, kde je dostatek vody a levná elektřina. Spotřeba elektrického proudu se pohybuje kolem 4,3 kWh na 1 m³ vodíku. [9]



Obr. 24 Elektrolýza vody [10]

Se zapojením jaderné energie se počítá až v budoucnu, po zvládnutí jednotlivých technologických problémů. Bude se jednat o termochemický proces.

3.2 Skladování vodíku

Hlavní výhodou vodíku oproti elektřině je možnost jeho skladování. Ovšem ve srovnání s konvenčními palivy ho lze skladovat jen velmi obtížně. Skladování vodíku je zatíženo specifickými obtížemi. Vodík má nízkou hustotu, molekuly vodíku jsou malé, proto může difúzně pronikat některými materiály (plasty, některé kovy) v kapalném i plynném stavu. Způsobuje vodíkové křehnutí a je vysoce reaktivní. Existuje několik technických možností skladování vodíku, které můžeme rozdělit na:

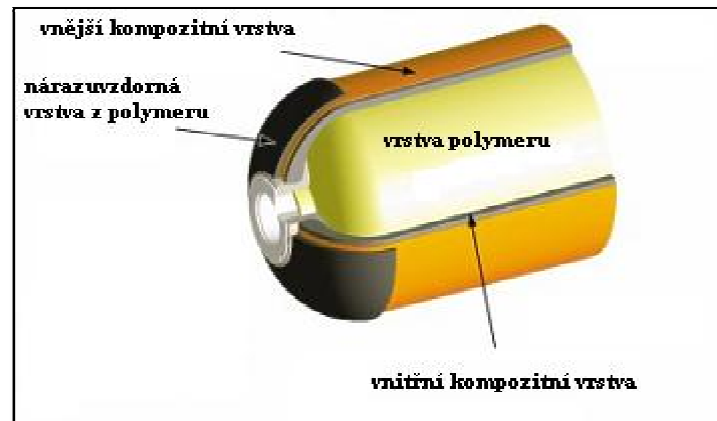
- Skladování plynného vodíku
- Skladování kapalného vodíku

3.2.1 Skladování vodíku v plynném stavu

Velkou nevýhodou je nízká hustota vodíku, čímž by byl objem pro skladování nepraktický. Proto se stlačuje do vysokotlakých nádob. Tento způsob skladování je jednoduchou, vspělou a léty prověřenou technologií. Tlak ve válcových nádobách



o objemu nad 50 litrů se pohybuje mezi 20 - 70 MPa. Pro uskladnění musíme nejprve vodík stlačit na potřebný tlak, což se většinou dělá pomocí pístových kompresorů. Stlačení vodíku na 35 MPa si vyžádá asi 30 % energie paliva. Pro statické aplikace se obvykle používá ocelových bezešvých lahví, viz Obr. 25, z nízkouhlíkaté nebo legované oceli. Vnitřní povrch kompozitních lahví tvoří obvykle tenká vrstva kovu případně speciálního polymeru, která zabraňuje úniku plynu přes strukturu kompozitu. [10, 26]



Obr. 25 Složení vysokotlaké nádoby [9]

3.2.2 Skladování vodíku v kapalném stavu

Skladování v kapalném stavu je energeticky náročnější než v plynném. Oproti normálním palivům je nutné vodík udržovat při normálním tlaku pod teplotou -253 °C . Tím pádem jsou zvýšené nároky na použité materiály a vysoké energetické nároky i na zkapalnění. Vzniká zároveň problém s odpařováním vodíku, což dosahuje až 4 % denně z objemu. Velkou výhodou je velká koncentrace energie oproti plynnému skladování, jak je vidět v Tabulce 4.

Tabulka 4 Koncentrace energie v palivech [10]

| Palivo | Koncentrace energie kJ/m^3 |
|---------|--|
| Vodík | 10 050 plyn 1 bar, 15 °C |
| | 1 825 000 plyn 200 bar, 15 °C |
| | 4 500 000 plyn 690 bar, 15 °C |
| | 8 491 000 kapalný |
| Metan | 32 560 plyn 1 bar, 15 °C |
| | 6 860 300 plyn 200 bar, 15 °C |
| | 20 920 400 kapalný |
| Propan | 86 670 plyn 1bar, 15 °C |
| | 23 488 800 kapalný |
| Benzín | 31 150 000 kapalný |
| Nafta | 31 435 800 minimálně, kapalný |
| Metanol | 15 800 100 kapalný |



Jiné metody uskladnění vodíku jsou ve fázi výzkumu a nejsou dosud prakticky používány. Například uskladnění vodíku mezi hydridy kovů, uhlíkaté struktury aj.

3.3 Doprava vodíku

Jestliže chceme, aby vodík nahradil současná paliva, musíme zajistit jeho dopravu a distribuci. Převážet vodík můžeme v plynném nebo kapalném stavu. Právě nedostatečná infrastruktura, a tím zvýšené náklady, brzdí začlenění vodíkových technologií mezi běžné uživatele.

3.3.1 Přeprava plynovody

Pro přepravu vodíku by se dala využít již existující síť potrubí pro zemní plyn. Zemní plyn má 3krát větší výhřevnost než vodík, tudíž je potřeba dopravit 3krát větší množství vodíku. Na druhou stranu kapacita potrubí závisí na hustotě plynu a je úměrná druhé mocnině hustoty. Hustota vodíku je asi 9krát menší, a tak při zvýšení tlaku v potrubí by mohla být kompenzačním faktorem. Bohužel nevýhodou je částečný únik vodíku přes stěny potrubí, pro snížení ztrát by se potrubí muselo obalit či natřít vrstvou materiálu zmírňující únik vodíku. [10]



Obr. 26 Vodíkové potrubí [11]



3.3.2 Přeprava v tlakových nádobách

Přeprava v tlakových nádobách může probíhat silniční, vlakovou nebo lodní dopravou a to v kapalném nebo plynném stavu. Většinou se příliš neliší od přepravy zemního plynu. Na Obr. 27 můžeme vidět kamión na přepravu plynného vodíku a loď uzpůsobenou na prevoz kapalného vodíku.



Obr. 27 Přeprava plynného vodíku kamiómem a kapalného vodíku lodí [11]

3.4 Spotřeba vodíku

Celý průběh vodíkového hospodářství je zakončený hlavní částí, a to spotřebou vodíku potřebnou k proměně na energii. Principiálně máme dvě možnosti. Uvolnit jeho chemickou energii spálením ve spalovacím motoru nebo díky jeho vlastnostem ho rovnou přeměnit na elektrickou energii v palivových článcích.

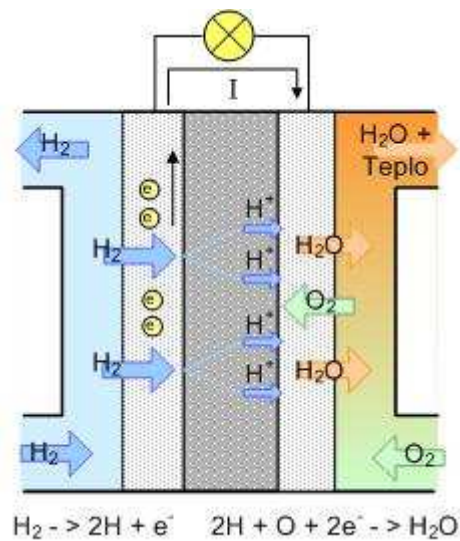
3.4.1 Vodíkové spalovací motory

Vývoj spalovacích motorů na vodík probíhá již od 20. let minulého století. Vodík hoří velmi rychle vysokou výhřevností. Princip funguje podobně jako s jinými palivy, proto je technologie na vysoké úrovni. Pokud není vodík spalován s čistým kyslíkem, ale se vzduchem, vznikají i oxidy dusíku. Elektrická účinnost se pohybuje kolem 35 %. Pokud budeme využívat i odpadní teplo, dostaneme se na celkovou účinnost 85 %. Nyní se používají vodíkové spalovací motory hlavně v raketoplánech. Velké automobilky pracují na vývoji motorů na vodík pro automobily.



3.4.2 Palivové články

Funkce palivového článku funguje na opačném principu než elektrolýza. Vstupem do reakce je vodík s kyslíkem, výstupem poté voda, teplo a elektrická energie, viz Obr. 28. Palivových článků je více typů, které se většinou liší typem elektrolytu, typu katody a anody, pracovní teplotou a nutností čistoty vodíku. Výhodou oproti spalovacím motorům spalující vodík je vyšší elektrická účinnost, až nad 50 %, a tichý provoz. Nevýhodou je dražší technologie a pomalejší reakce při změně zatížení. [27]



Obr. 28 Funkce palivového článku [9]



4 Propojení VtE a vodíkové akumulace

V této části práce se budu věnovat využití vodíkové jednotky pro vyrovnávání kolísavého výkonu obnovitelného zdroje. Jako obnovitelný zdroj použiji větrnou elektrárnu. Cílem je dosáhnout co nejvíce konstantní výkon k dodání do sítě. Abych toho dosáhl, budu přebytečnou energii využívat pro elektrolýzu vody, ze které získám vodík. Tento vodík budu uchovávat v tlakových nádobách a v době malého výkonu VtE ho budu přeměňovat v palivových člancích na elektrickou energii. Tato elektrická energie dodá potřebný výkon na splnění stanoveného výkonu do sítě.

4.1 Technická část

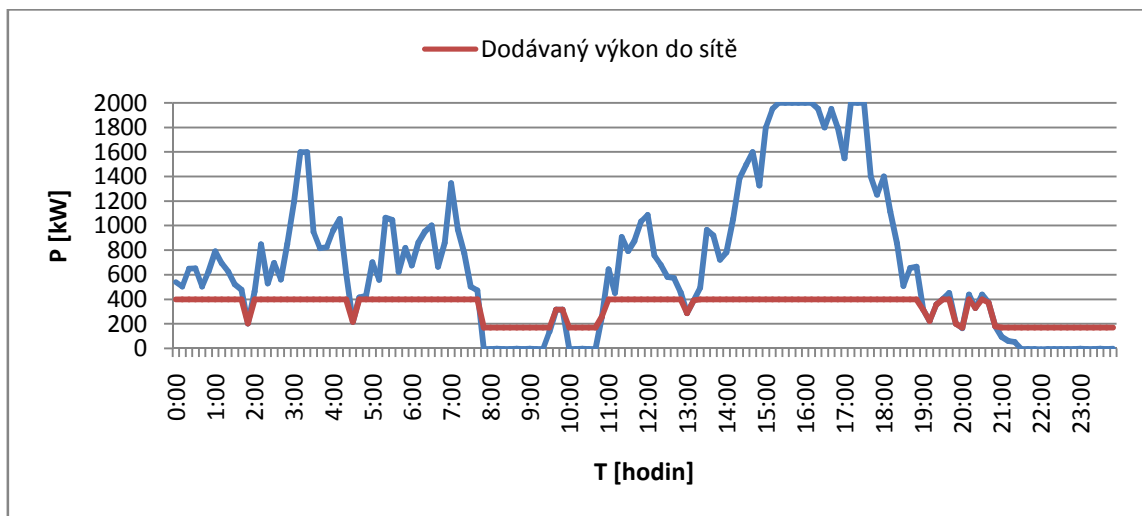
Navrhovaný modelový příklad bude zmírňovat nevýhody, které v současné době výroba energie z VtE přináší. Mezi základní problémy při připojení VtE do distribuční sítě patří:

- Přetěžování sítí – potřeba dostatečně dimenzovaného místa připojení až k transformační stanici pro vyvedení výkonu VtE.
- Kolísání napětí – ovlivněné kompenzací jednotlivých strojů.
- Zhoršení zkratových poměrů – připojením jakékoliv další elektrárny do jednoho bodu sítě se zvýší zkratový výkon v síti.
- Kvalita dodávky energie – regulace VtE založená na výkonové elektronice může být rušivým zdrojem v síti.
 - Flicker (kolísání napětí) – ovlivňuje světelný tok svítidel, a tím nepříjemně působí na lidské oko.
 - Vyšší harmonické – Zkreslují výslednou kvalitu elektřiny.
 - Hromadné dálkové ovládání – útlum řídicího signálu distribuční sítě.
- Nestálost dodávek elektřiny – způsobená nestálou rychlostí větru.

Pro využití větrné energie, a zároveň dosažení lepších kvality výstupní elektrické energie, nastíním jednu z možných variant řešení s využitím vodíkové technologie.[3]



Mým hlavním cílem, při návrhu soustavy zařízení, je zajistit stálou dodávku elektrické energie při málo proměnném výkonu. Musím navrhnout řešení, kde by se dodávaný výkon pohyboval pouze v určitém intervalu. V mém případě se bude jednat o interval od 170 kW do 400 kW. Tento rozsah dodávaného výkonu jsem zvolil na základě dat o vyrobené elektřině VtE za jeden měsíc a účinností jednotlivých komponent. Příklad dosavadního denního diagramu výroby VtE je zobrazen na Obr. 29 modrou křivkou, červená křivka značí velikost dodávaného výkonu do sítě po zavedení vodíkové akumulace.



Obr. 29 Denní diagram VtE s vodíkovou akumulací

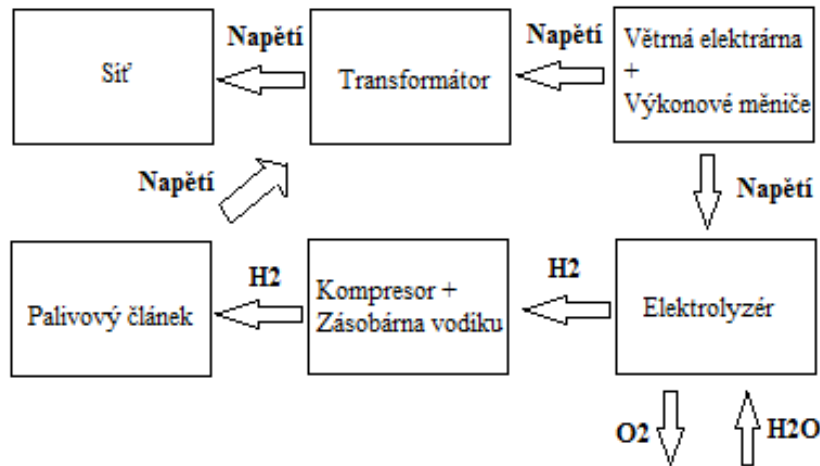
Návrh řešení se bude skládat z následujících jednotlivých komponent:

- větrná elektrárna
- výkonové měniče
- transformátor
- elektrolyzér
- kompresor
- vysokotlaký zásobník
- palivový článek

Tyto jednotlivé části budou vzájemně propojené. Větrná elektrárna bude přes transformátor dodávat elektřinu do sítě. Pokud její výkon bude vyšší než 400 kW, využije veškerou elektřinu nad 400 kW pro elektrolyzér, který bude dodávat vodík do vysokotlakových zásobníků. Pokud naopak VtE nebude dosahovat výkonu alespoň o hodnotě 170 kW, využije palivový článek vodík pro proměnu na elektrickou energii



a tímto výkonem dorovná výrobu VtE na potřebných 170 kW. Pro lepší představu funkce tohoto modelového příkladu jsem vytvořil zjednodušené schéma, které je na Obr. 30. Provoz této soustavy by měl být bezobslužný, monitorovaný dálkově s automatickým hlášením poruch pomocí SMS.



Obr. 30 Schéma funkce VtE s vodíkovou technologií

Větrná elektrárna Vestas V90

Nejdůležitější je zdroj elektrické energie. Pro přiblížení k reálným hodnotám vycházím z výrobních hodnot větrné elektrárny u obce Věžnice u Přibyslavi. Proto je má případová studie uvažována v lokalitě se stejnými podmínkami. Lokalita se nachází v nadmořské výšce přesahující 500 m. Průměrná rychlost větru ve výšce 100 m se pohybuje kolem $6,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro svou potřebu budu využívat jednu větrnou elektrárnu dánské firmy Vestas typu V90 o výkonu 2 MW s vertikální osou rotoru ve výšce 80 m. V níže uvedené Tabulce 5 jsou uvedené základní technické údaje větrné elektrárny. Výkonová charakteristika této VtE je znázorněna na Obr. 31. Celková investice na instalaci 1 MW větrné elektrárny se pohybuje od 30 – 50 miliónů Kč, v závislosti na:

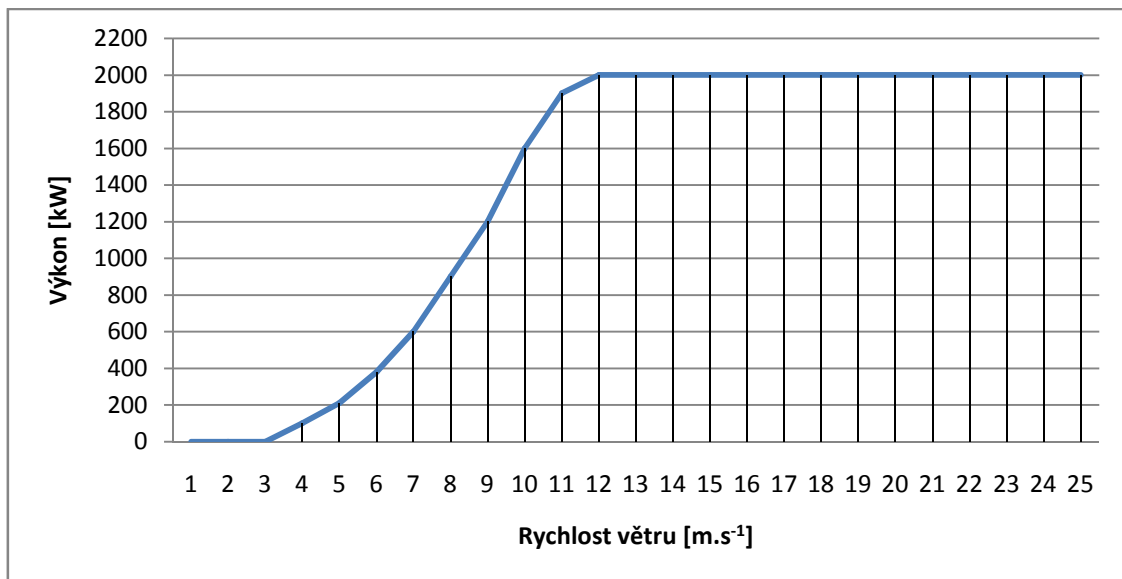
- počtu VtE
- nutných stavebních prací
- vzdálenosti k možnosti připojení k síti
- typu technologie aj.



Investiční náklady větrné elektrárny, včetně stavebních prací a připojení k síti, jsem odhadl na základě podobných projektů na 67 miliónů Kč. [20, 21, 22]

Tabulka 5 Technické parametry Vestas V90 [15]

| | |
|------------------------------|--|
| Jmenovitý výkon | 2 MW |
| Průměr rotoru | 90 metrů |
| Konstrukce rotoru | návětrný rotor se třemi nastavitelnými listy |
| Výška hlavy rotoru | 80 metrů |
| Startovací rychlost větru | 4 m/s |
| Jmenovitá rychlost větru | 12 m/s |
| Vypínací rychlost větru | 25 m/s |
| Opětovná startovací rychlost | 23 – 20 m/s |
| Napětí | 690 V |
| Frekvence | 50 Hz |



Obr. 31 Výkonová křivka Vestas V90 [15]

K dispozici jsem obdržel diagram dodávaného výkonu elektrárny v 10 minutových intervalech po dobu jednoho měsíce. Jedná se o data z prosince roku 2010. Z daných dat jsem vypočítal průměrný výkon elektrárny za dané období, který činí 415 kW. Celkovou roční výrobu elektrické energie V_{tE} - přibližně 3 650 MWh, jsem vypočítal vynásobením průměrného výkonu počtem hodin v roce. Z jednotlivých 10 minutových intervalů jsem vypočítal, kolik elektřiny se dodá přímo do sítě - přibližně 1 650 MWh/rok, a kolik se využije pro elektrolyzér - přibližně 2 000 MWh/rok.



Zároveň si uvědomuji, že průměrný výkon VtE v prosinci bude asi vyšší než je průměrný výkon elektrárny v červenci nebo v srpnu, což vede k tomu, že vypočtená hodnota bude zřejmě částečně nadhodnocena.

Transformátor a vedení

Výstupní napětí z VtE je 690 V. Nejvyšší dodávaný výkon je 400 kW. Pro vedení do nejbližší trafostanice, která je vzdálená zhruba 1 km využiji transformátor NN/VN pro transformaci na 6 kV.

Elektrolyzér

Ke zdroji energie potřebuji elektrolyzér pro výrobu vodíku. Elektrolyzér by měl mít výkon rozdíl jmenovitého výkonu elektrárny a požadované maximální hodnoty odváděné do sítě, tedy 1,6 MW. Cena tohoto elektrolyzéru se dle zdroje [19, 20] pohybuje kolem 13 miliónů Kč. K funkci elektrolyzéru je potřeba voda. Za cenu investice 60 tisíc Kč se u objektu vyhloubí studna a zajistí se potřebné celoroční čerpání vody. Předpokládám, že bude příhodné podloží pro vrtání a hloubka studny bude do 50 m. Jinak by se náklady zvýšily. Celkové ztráty způsobené elektrolyzou, čerpáním vody a stlačováním do vysokotlakého zásobníku na hodnotu tlaku 1,8 MPa jsem odhadl na 30 %. Proto je účinnost procesu 70 %. Při elektrolyze vzniká i kyslík, který dále nevyužívám a vypouštím do ovzduší. V případě poptávky je možné kyslík plnit do lahví a dále využívat či prodávat.

Skladování vodíku

Vyrobený vodík budu stlačovat na tlak 1,8 MPa pomocí kompresoru do vysokotlakého zásobníku. Kompresor, který lze pořídit dle [23] za 19 tisíc Kč, umožňuje kompresi vodíku až do 2,6 MPa. Díky stlačení vodíku zvětším jeho hustotu, a tím zmenším velikost potřebné nádrže. Zároveň se ale zvyšuje unikání vodíku přes stěny nádoby. Z tohoto důvodu a také, jelikož nejsem omezený prostorem, budu mít větší zásobníky na menší tlak, pouze 1,8 MPa. Při takovém tlaku nebudu uvažovat unikání vodíku přes stěny nádoby.



Pro výpočet velikosti zásobníku potřebuji znát:

1. Minimální dodávaný výkon do sítě $P_{min} = 170$ kW.
2. Elektrickou účinnost palivového článku $\mu_{pč} = 50$ %.
3. Výhřevnost vodíku $q_H = 33,3$ kWh/kg.
4. Hustota vodíku při atmosférickém tlaku $\rho_H = 0,09$ kg/m³.
5. Počet hodin nepřetržitého provozu palivového článku při bezvětrí $h = 47$, jsem odhadl dle průběhu výroby VtE.

Potřebná velikost zásobníku je dána vzorcem:

$$V_H = \frac{h * P_{min}}{q_H * \mu_{pč}} * \frac{p_a}{\rho_H * p} = \frac{47 * 170}{33,3 * 0,5} * \frac{0,1}{0,09 * 1,8} = 296,2 \text{ m}^3 \quad [\text{m}^3] \quad (1)$$

| | | | |
|-----|------------|---|----------------------|
| kde | V_H | je celkový potřebný objem zásobníku | [m ³] |
| | h | počet hodin dodávání do sítě (bezvětrí) | [h] |
| | P_{min} | minimální výkon dodávaný do sítě | [kW] |
| | q_H | výhřevnost vodíku | [kWh/kg] |
| | $\mu_{pč}$ | účinnost palivového článku | [-] |
| | ρ_H | hustota vodíku | [kg/m ³] |
| | p_a | atmosférický tlak | [MPa] |
| | p | tlak v zásobníku | [MPa] |

Jelikož trh s velkými zásobníky na stlačený vodík je malý, je těžké zjistit cenu zásobníku o objemu 300 m³. Proto vycházím z ceny zásobníků na LPG, kde za 2 zásobníky objemu 150 m³ zaplatím něco přes 1, 5 miliónu Kč.[24]

Spotřeba vodíku

Energii z vodíku chci přeměnit jen na elektrickou energii, proto využiji palivový článek, který má větší elektrickou účinnost než různé spalovací motory. Výkon palivových článků bude 200 kW, aby byl větší než minimální stálý výkon dodávaný do sítě. V příkladu vždy počítám jen s elektrickou účinností, v mém případě 50 %. Uvolňující se teplo dále nevyužívám, i když by se výrazně zvýšila celková účinnost palivového článku až na 85 %. Získané teplo by se dalo dále prodat a použít na vytápění pro zvýšení ekonomické efektivity, ale vyžadovalo by to další investici do soustavy centralizovaného zásobování teplem.

***Větrná elektrárna s vodíkovou akumulací***

Zhodnocení využití, ztrát a prodeje vyrobené elektřiny. Celková účinnost systému pro dodávání neustálého výkonu mezi 170 kW až 400 kW je 63 %.

Tabulka 6 Využití vyrobené elektřiny

| | | |
|---|-------|---------|
| Vyrobena elektřina VtE | 3 634 | MWh/rok |
| Využitá elektřina na uvolnění H ₂ z vody | 1 982 | MWh/rok |
| Účinnost převedení na H ₂ | 70 | % |
| Získaná elektřina z palivových článků | 654 | MWh/rok |
| Účinnost palivových článků | 50 | % |
| Ztráty elektřiny | 1 328 | MWh/rok |
| Celková účinnost akumulace | 35 | % |
| Prodaná elektřina do sítě | 2 306 | MWh/rok |
| Celková účinnost dodávky stálého výkonu | 63 | % |



4.2 Ekonomické zhodnocení

V této části zhodnotím celkový projekt po ekonomické stránce za předpokladu, že projekt bude schválen příslušnými orgány.

4.2.1 Investiční náklady

Investiční náklady jednotlivých komponent byly stanoveny na základě expertních odhadů nebo z měrných investičních nákladů zařízení podobného typu. Stejným způsobem jsem odhadl i předpokládanou životnost jednotlivých částí.

Tabulka 7 Investiční náklady

| Zařízení | Investice | Životnost | Poměrná anuita | Anuita |
|---|-----------------|--------------|-----------------|---------------------|
| | N_i [tis. Kč] | T_z [roky] | $a r^{T_z} [-]$ | N_{vpT} [tis. Kč] |
| Větrná elektrárna | 55 000 | 20 | 0,078 | 5 384 |
| Připojení k síti NN/VN (trafostanice, vedení) | 2 000 | 20 | 0,078 | 196 |
| Stavební část (základy, přístupová cesta) | 10 000 | 30 | 0,062 | 635 |
| Elektrolyzér | 13 000 | 10 | 0,127 | 2 175 |
| Kompresor 0 - 2,6 MPa | 19 | 10 | 0,127 | 3 |
| Redukce tlaku 1,8 MPa | 2 | 10 | 0,127 | 0,3 |
| Zásobování vodou | 60 | 30 | 0,062 | 4 |
| Tlakový zásobník 2x 150 m ³ | 1 543 | 30 | 0,062 | 104 |
| Palivový článek 200 kW | 2 400 | 10 | 0,127 | 426 |
| Celkem | 84 024 | | | 8 927 |

Celková životnost projektu je 20 let. Pro zařízení s nižší životností počítám, že je po konci jejich životnosti obnovím za stejnou cenu. Jedná se o elektrolyzér, kompresor, redukci a palivový článek.



Financování projektu

Celková cena projektu je 84 024 tis. Kč. Realizátor projektu je investor s vlastním vstupním kapitálem 30 %, tedy 25 207 tis. Kč. Na zbylých 70 % si investor vezme úvěr ve výši 58 817 tis. Kč. Úvěr je na 15 let a výše úrokové míry úvěru je 4,5 %.

Diskontní sazba

Diskontní sazba má vliv na současnou hodnotu budoucích peněz. Já ji určím jako průměrné náklady kapitálu (Wighted Average Cost of Capital, WACC). K výpočtu potřebuji znát sazbu daně z příjmu právnických osob, která aktuálně činí 19 %. Průměrné náklady kapitálu a tedy i diskontní sazbu spočítám z:[25]

$$r = WACC = r_{CK} * (1 - d) * \frac{CK}{K} + r_{VK} * \frac{VK}{K} = 4,652 \% \quad [\%] \quad (2)$$

| | | | |
|-----|----------|---|-----|
| kde | r | diskontní sazba | [%] |
| | CK | cizí kapitál (70 %) | [%] |
| | r_{CK} | úroková sazba cizího kapitálu (4,5 %) | [%] |
| | d | sazba daně z příjmu (19 %) | [%] |
| | VK | vlastní vložený kapitál (30 %) | [%] |
| | r_{VK} | náklad vlastního vloženého kapitálu (7 %) | [%] |
| | K | celkový kapitál CK+VK (100 %) | [%] |

Odpisy

Dle zákona č. 586/1992 Sb., o daních z příjmů musím dlouhodobý hmotný majetek odepisovat. Ten je rozdělen do šesti odpisových skupin, které mají předepsanou dobu odepisování. Já využiji pro tento projekt jen 3, 4 a 5 odpisovou skupinu, viz Tabulka 8.

Tabulka 8 Doba odpisování jednotlivých komponent [29]

| Odpisová skupina | Doba odepisování | Komponenty |
|------------------|------------------|---|
| 3 | 10 | Elektrolyzér, Palivový článek, Tlakový zásobník |
| 4 | 20 | Větrná elektrárna, Připojení k síti |
| 5 | 30 | Stavební část, Zásobování vodou |



Mám na výběr dva způsoby daňového odpisování:

- Rovnoměrné – rovnoměrně rozložené po čas odpisování
- Zrychlené – je v prvních letech vyšší

Já jsem si vybral, že budu rovnoměrně daňově odepisovat. Roční odpis pro daný rok jsem vypočítal z tohoto vzorce:

$$O_n = \frac{PC * k}{100} \quad [\text{Kč}] \quad (3)$$

kde O je odpis v daném roce [Kč]
 PC počáteční cena [Kč]
 k koeficient dle odpisové skupiny [-]
 n odpisový rok [-]

Koeficienty prodanou odpisovou skupinu jsou v Tabulce 8.

Tabulka 9 Koeficienty odpisování k [29]

| Odpisová skupina | 1. rok odpisování | Další roky odpisování |
|------------------|-------------------|-----------------------|
| 3 | 5,5 | 10,5 |
| 4 | 2,15 | 5,15 |
| 5 | 1,4 | 3,4 |

Pokud je poplatník prvním vlastníkem, můžu u 3. odpisové skupiny, tudíž elektrolyzéro, tlakového zásobníku a palivových článků, využít zvýšenou roční odpisovou sazbu o 10 %. To mi umožňuje §31 zákona č. 586/1992 Sb. Koeficienty pak budou pro třetí odpisovou skupinu následující:[29, 31]

Tabulka 10 Koeficienty pro zvýšenou roční odpisovou sazbu o 10% [29]

| Odpisová skupina | 1. rok odpisování | Další roky odpisování |
|------------------|-------------------|-----------------------|
| 3 | 15,4 | 9,4 |



4.2.2 Provozní náklady

Provozní náklady dělíme na stálé a proměnné. U větrné elektrárny se jedná převážně o stálé provozní náklady, jelikož nepotřebuje žádné palivo pro výrobu energie.

Stálé provozní náklady

Stálé provozní náklady jsem vypočítal ze stálých poměrných ročních provozních nákladů jednotlivých zařízení z hodnoty investice, viz Tabulka 10. Ty jsem určil na základě odborného odhadu. Stálé roční provozní náklady zahrnují servis, který je řešen servisní smlouvou s dodavatelem o údržbě, opravách a výměnách dílů, dále zahrnuje pojištění, poplatky obci, osobní náklady odpovědného pracovníka.

Tabulka 11 Stálé provozní náklady

| Zařízení | Investice | Poměrné stálé roční provozní náklady | Stálé roční provozní náklady |
|---|--------------|--------------------------------------|------------------------------|
| | Ni [tis. Kč] | p _{ps} [%Ni] | p _s [tis. Kč] |
| Větrná elektrárna | 55 000 | 2,0% | 1 100 |
| Připojení k síti NN/VN (trafostanice, vedení) | 2 000 | 2,0% | 40 |
| Stavební část (základy, přístupová cesta) | 10 000 | 0,1% | 10 |
| Elektrolyzér | 13 000 | 4,0% | 520 |
| Kompresor 0 - 2,6 MPa | 19 | 2,0% | 0,4 |
| Redukce tlaku 1,8 MPa | 2 | 1,0% | 0,02 |
| Zásobování vodou | 60 | 1,0% | 0,6 |
| Tlakový zásobník 2x 150 m ³ | 1 543 | 0,5% | 7,7 |
| Palivový článek 200 kW | 2 400 | 5,0% | 120 |
| Celkem | 84 024 | | 1 799 |

Proměnné provozní náklady

Náklady na elektrickou energii jednotlivých zařízení jsou zahrnuty v účinnosti těchto zařízení nebo procesů. Náklady za vodu dále neuvažuji, jelikož si v rámci projektu vyhloubím vlastní studnu, z které čerpám potřebnou vodu. Případné poplatky příslušným úřadům neuvažuji.

**Poměrná výrobní cena za kWh**

Vypočítal jsem i měrné náklady na výrobu elektřiny, a to jak s akumulací tak bez ní. Využil jsem poměrné anuity a_{rTz} a ročních porovnávacích nákladů N_{vpT} . Poměrná anuita se spočítá ze vzorce:

$$a_{rTz} = \frac{r * (1 + r)^{Tz}}{(1 + r)^{Tz} - 1} \quad [-] \quad (4)$$

kde r je diskontní sazba [-]

Tz doba životnosti [roky]

Pro výpočet ročních porovnávacích nákladů N_{vpT} použijí tento vzorec:

$$N_{vpT} = N_i * (a_{rTz} + p_{ps}) \quad [\text{Kč}] \quad (5)$$

kde N_i je investice [tis. Kč]

a_{rTz} poměrná anuita [-]

p_{ps} poměrné stálé roční provozní náklady [-]

Tabulka 12 Roční porovnávací náklady

| | Ni[tis. Kč] | Tz[roky] | p _{ps} [%Ni] | a _{rTz} [-] | N _{vpT} [tis. Kč] |
|---|-------------|----------|-----------------------|----------------------|-------------------------------|
| Větrná elektrárna | 55 000 | 20 | 2,0% | 0,078 | 5 384 |
| Připojení k síti VN/VVN | 2 000 | 20 | 2,0% | 0,078 | 196 |
| Stavební část (základy, přístupová cesta) | 10 000 | 30 | 0,1% | 0,062 | 635 |
| Elektrolyzér | 13 000 | 10 | 4,0% | 0,127 | 2 175 |
| Kompresor 0 - 2,6 MPa | 19 | 10 | 2,0% | 0,127 | 3 |
| Redukce tlaku 1,8 MPa | 2 | 10 | 1,0% | 0,127 | 0,3 |
| Zásobování vodou | 60 | 30 | 1,0% | 0,062 | 4 |
| Tlakový zásobník 2x 150 m ³ | 1 543 | 30 | 0,5% | 0,062 | 104 |
| Palivový článek 200 kW | 2 400 | 10 | 5,0% | 0,127 | 426 |
| Celkem | 84 024 | | | | 8 927 |

Měrné náklady na výrobu elektřiny s akumulací jsem získal poměrem celkových ročních porovnávacích nákladů (8 927 tis. Kč) celkovou dodanou elektřinou do sítě za rok (2 306 MWh). Měrné náklady na výrobu elektřiny bez akumulace je poměrem N_{vpT} elektrárny (6 225 tis. Kč) celkovou vyrobenou elektřinou VtE (3 634 MWh).

Tabulka 13 Měrné náklady na kWh

| | | |
|---|------|--------|
| Měrné náklady na výrobu elektřiny bez akumulace | 1,71 | Kč/kWh |
| Měrné náklady na výrobu elektřiny s akumulací | 3,87 | Kč/kWh |



4.3 Peněžní příjmy z investice

Peněžní příjmy z naší investice bude tvořit prodaná elektrická energie do sítě. Díky vodíkovému akumulárnímu systému budu zaručovat výkon, který se bude pohybovat mezi 170 kW až 400 kW. To by mi mělo zajistit vyšší výkupní cenu za kWh. Ve svém příkladu jsem zvolil hlavní výkupní cenu 4,1 Kč/kWh, která je hraniční, aby byl projekt ekonomicky efektivní. Jedná se tak spíše o informativní cenu, která nám řekne, kolik stojí výroba elektřiny VtE s vodíkovou akumulací. Cena je vyšší než měrné náklady na výrobu elektřiny s akumulací, jelikož zde je již počítáno s daní z příjmu a odpisy. Při ročním prodeji 2 306 MWh a této ceně bude můj roční příjem z prodeje elektřiny a zároveň i celkový roční příjem 9 455 tis. Kč.

Změna legislativy

Všechny nově postavené větrné elektrárny od roku 2005 do 2014 mohli využít zvýhodnění, buď ve formě výkupní ceny nebo ve formě zeleného bonusu. Při výkupních cenách dodal výrobce veškerou vyrobenou elektrickou energii distributorovi za danou výkupní cenu. Výkupní ceny pro nové elektrárny každoročně klesaly, od 3 247 Kč/MWh do 2 014 Kč/MWh pro elektrárny postavené roku 2014. Při formě zelených bonusů dostal výrobce za každou vyrobenou MWh o 480 Kč méně, než byla výkupní cena, ale mohl s vyrobenou elektřinou naložit dle svého uvážení. V mém projektu by podpora v rámci zelených bonusů zvýšila ekonomickou efektivitu. Snížila by potřebnou výkupní cenu, která je nezbytná, aby byla investice ekonomicky efektivní.[18] Bohužel v říjnu roku 2013 byl přijat zákon 310/2013 Sb., kterým se mění zákon č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů, ve znění zákona č. 407/2012 Sb., a další související zákony.[30, 32] Z tohoto zákona plyne, že většina nových obnovitelných zdrojů, mezi nimi i větrné elektrárny, přestávají být tímto způsobem dotovány. Proto dotace ve svých výpočtech již neuvažuji. Tento nový zákon však s největší pravděpodobností zamezí v rozmachu větrné energetiky v ČR. Důvodem zavedení tohoto zákona bylo omezení dopadů podpory obnovitelných zdrojů na spotřebitele, průmysl a státní rozpočet.



4.4 Vyhodnocení projektu

Vyhodnocení projektu jsem provedl převážně pomocí čisté současné hodnoty. Pro různé výkupní ceny elektřiny a různou diskontní sazbu jsem udělal i citlivostní analýzu. Jelikož tyto dvě hodnoty se mohou lišit případ od případu. Podkladem byly mnou vypočtené jednotlivé ekonomické veličiny, viz Tabulka 14.

Tabulka 14 Ekonomický přehled

| Rok | Investice | Celkové provozní výdaje | Celkové příjmy | EBITDA | Odpisy | EBIT | Úrok | EBT | Daň z příjmu | EAT | CF | CFD | KCFD |
|-----|-----------|-------------------------|----------------|--------|--------|------|------|------|--------------|------|--------|--------|--------|
| 0 | 84024 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -84024 | -84024 | -84024 |
| 1 | 0 | 1799 | 9455 | 7656 | 3976 | 3680 | 2647 | 1034 | 196 | 837 | 7460 | 7128 | -76896 |
| 2 | 0 | 1799 | 9455 | 7656 | 4870 | 2786 | 2470 | 315 | 60 | 255 | 7596 | 6936 | -69960 |
| 3 | 0 | 1799 | 9455 | 7656 | 4870 | 2786 | 2294 | 492 | 93 | 398 | 7562 | 6598 | -63362 |
| 4 | 0 | 1799 | 9455 | 7656 | 4870 | 2786 | 2117 | 668 | 127 | 541 | 7529 | 6277 | -57085 |
| 5 | 0 | 1799 | 9455 | 7656 | 4870 | 2786 | 1941 | 845 | 161 | 684 | 7495 | 5971 | -51114 |
| 6 | 0 | 1799 | 9455 | 7656 | 4870 | 2786 | 1765 | 1021 | 194 | 827 | 7462 | 5680 | -45434 |
| 7 | 0 | 1799 | 9455 | 7656 | 4870 | 2786 | 1588 | 1198 | 228 | 970 | 7428 | 5403 | -40030 |
| 8 | 0 | 1799 | 9455 | 7656 | 4870 | 2786 | 1412 | 1374 | 261 | 1113 | 7395 | 5140 | -34890 |
| 9 | 0 | 1799 | 9455 | 7656 | 4870 | 2786 | 1235 | 1551 | 295 | 1256 | 7361 | 4889 | -30001 |
| 10 | 15421 | 1799 | 9455 | 7656 | 4870 | 2786 | 1059 | 1727 | 328 | 1399 | -8093 | -5137 | -35137 |
| 11 | 0 | 1799 | 9455 | 7656 | 5649 | 2007 | 882 | 1124 | 214 | 911 | 7442 | 4513 | -30624 |
| 12 | 0 | 1799 | 9455 | 7656 | 4725 | 2931 | 706 | 2225 | 423 | 1802 | 7233 | 4192 | -26432 |
| 13 | 0 | 1799 | 9455 | 7656 | 4725 | 2931 | 529 | 2401 | 456 | 1945 | 7200 | 3987 | -22446 |
| 14 | 0 | 1799 | 9455 | 7656 | 4725 | 2931 | 353 | 2578 | 490 | 2088 | 7166 | 3792 | -18654 |
| 15 | 0 | 1799 | 9455 | 7656 | 4725 | 2931 | 176 | 2754 | 523 | 2231 | 7133 | 3606 | -15047 |
| 16 | 0 | 1799 | 9455 | 7656 | 4725 | 2931 | 0 | 2931 | 557 | 2374 | 7099 | 3430 | -11618 |
| 17 | 0 | 1799 | 9455 | 7656 | 4725 | 2931 | 0 | 2931 | 557 | 2374 | 7099 | 3277 | -8340 |
| 18 | 0 | 1799 | 9455 | 7656 | 4725 | 2931 | 0 | 2931 | 557 | 2374 | 7099 | 3132 | -5209 |
| 19 | 0 | 1799 | 9455 | 7656 | 4725 | 2931 | 0 | 2931 | 557 | 2374 | 7099 | 2993 | -2216 |
| 20 | 0 | 1799 | 9455 | 7656 | 4725 | 2931 | 0 | 2931 | 557 | 2374 | 7099 | 2860 | 644 |

kde $EBITDA = \text{Celkové příjmy} - \text{Celkové provozní výdaje}$

$EBIT = EBITDA - \text{Odpisy}$

$EBT = EBIT - \text{Úrok}$

$EAT = EBT - \text{Daň z příjmu}$

$CF = \text{Celkové příjmy} - \text{Investice} - \text{Celkové provozní výdaje} - \text{Daň z příjmu}$

CFD je diskontované CF při diskontní sazbě 4,652 %



4.4.1 Metody hodnocení projektu

Pro hodnocení projektu jsem využil dvě celosvětově uznávané metody:

Čistá současná hodnota (NPV)

Tato finanční veličina vyjadřuje současnou hodnotu budoucích peněžních toků. Hlavní výhodou je časové zohlednění peněz. K výpočtu NPV potřebuji znát budoucí finanční toky, diskontní míru, neboli procentuální vyjádření úniku příležitosti jiné investice.

Vzorec pro výpočet NPV:[16]

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{(1-r)^t} \quad [\text{Kč}] \quad (4)$$

| | | | |
|-----|------|-------------------------------------|-------|
| kde | T | počet let životnosti projektu | [-] |
| | r | diskontní míra | [-] |
| | CF | generovaný peněžní tok v daném roce | [Kč] |
| | t | daný rok | [-] |

Projekt je přijatelný, pokud NPV je větší nebo rovno nule.

Vnitřní výnosové procento (IRR)

Jedná se o další finanční ukazatel pro hodnocení investic. Z definice vidíme, že IRR je takové procento, při kterém je $NPV=0$:[16]

$$NPV = 0 = \sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{(1-IRR)^t} \quad [\text{Kč}] \quad (5)$$

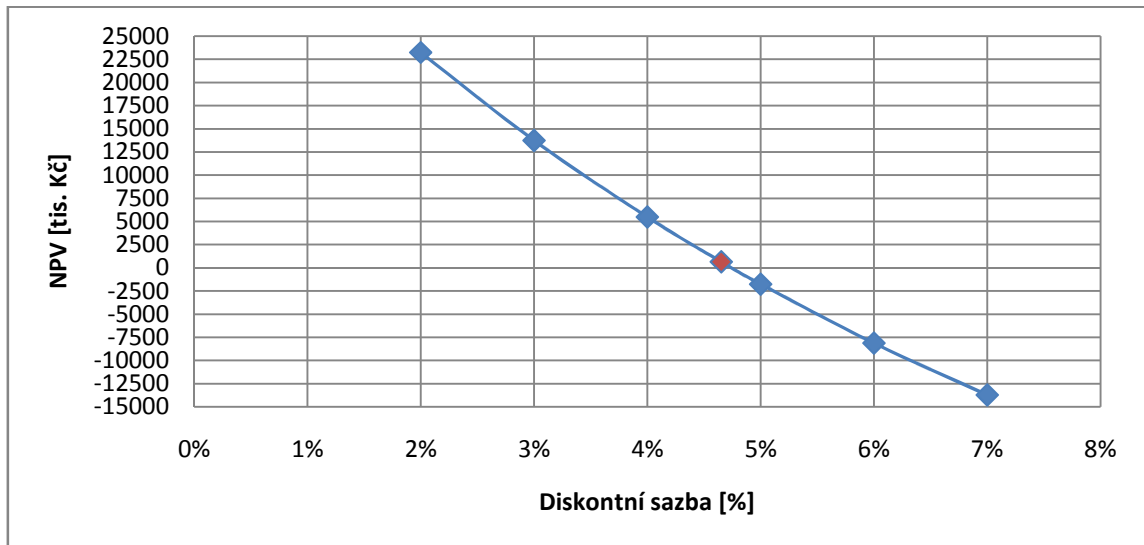
| | | | |
|-----|-------|-------------------------------------|-------|
| kde | T | počet let životnosti projektu | [-] |
| | IRR | vnitřní výnosové procento | [-] |
| | CF | generovaný peněžní tok v daném roce | [Kč] |
| | t | daný rok | [-] |

Projekt je přijatelný, pokud IRR je větší nebo stejné jako diskontní sazba.



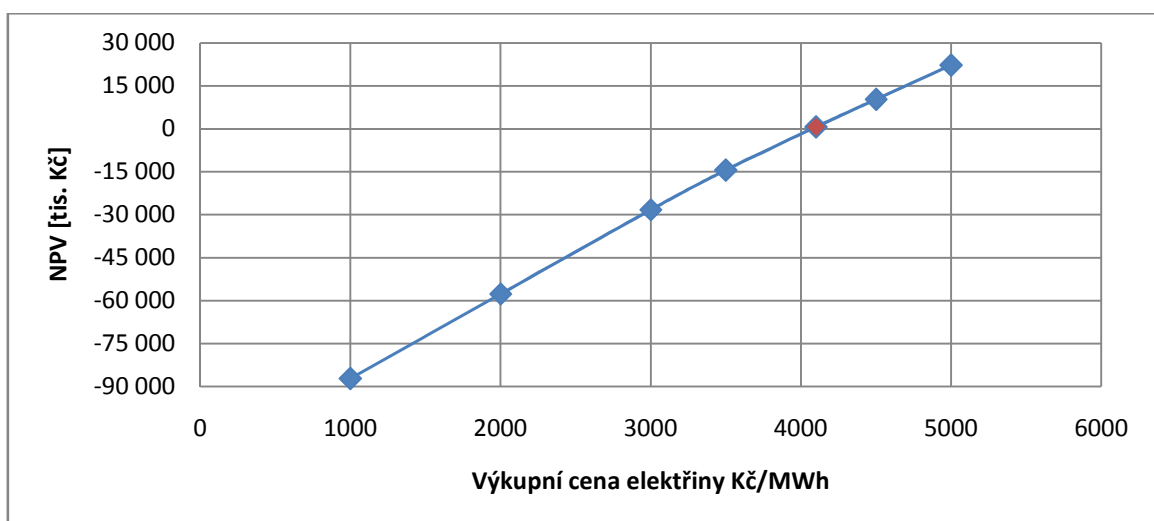
4.4.2 Výsledky

Většina potřebných údajů pro výsledky je uvedena v Tabulce 14. Diskontní míru uvažuji 4,652 % a výkupní cenu 4,1 Kč/kWh. Pro tyto hodnoty vychází NPV = 644 tis. Kč a IRR = 4,74 %. Na Obr. 32 je vidět rozdíl NPV při různých diskontních mírách a výkupní cenou 4,1 Kč/kWh.



Obr. 32 NPV při různých diskontních sazbách

Samozřejmě výkupní cena záleží na dohodě s nákupčím. Já se snažil zvýšit hodnotu elektřiny tím, že zaručuji výkon v rozmezí 170 kW – 400 kW. Proto na Obr. 33 zobrazuji citlivostní analýzu na výkupní cenu elektřiny při diskontní sazbě 4,652 %. Přesto ceny, ve kterých by byl projekt přijatelný, jsou jen těžko dosažitelné.



Obr. 33 NPV při různých výkupních cenách elektřiny



5 Závěr

Základem této práce bylo propojení větrné elektrárny s vodíkovým akumulacním systémem, pro snížení výkyvů výkonu. Toho jsem docílil v nastíněném projektu, kde využívám přebytečný výkon nad 400 kW k rozštěpení vody v elektrolyzáru na kyslík a vodík, který dále skladuji. Skladování probíhá ve dvou 150 m³ nádržích, aby byl systém schopný soustavně dodávat minimální výkon i při 47 hodinovém bezvětří. V době menšího výkonu větrné elektrárny, pod 170 kW, se zapne palivový článek, který začne dorovnávat potřebný výkon pro dodržení minimálního výkonu. Při výpočtech jsem použil reálná data z existující větrné elektrárny. V práci jsem zároveň vypočítal, pomocí ročních porovnávacích nákladů, cenu za výrobu jedné kilowatthodiny a to jak bez akumulacního systému, tak i s akumulacním systémem.

Celá práce je rozdělena do dvou hlavních celků a to části teoretické a aplikační. V teoretické části podávám přehled o rozvoji větrné energetiky ve světě a v ČR. Popisuji funkce a výstavbu větrných elektráren s různými typy rotorů. Po seznámení se s větrnými elektrárnami se zabývám principem vodíkového hospodářství, počínaje výrobou přes akumulaci až po konečnou spotřebu vodíku. Dle mého názoru, problémem u implementace vodíkových technologií je jejich vysoká cena. Dalším problémem je nízká účinnost spalovacích motorů a palivových článků, která se dá reálně vyřešit využitím kogenerace, tj. současné výroby elektrické a tepelné energie. Teoretická část slouží k seznámení s uvedenou problematikou.

Druhá, aplikační část, se již zabývá konkrétním případem propojení větrné elektrárny o jmenovitém výkonu 2000 kW a vodíkového akumulacního systému, s cílem vyrovnávání kolísavého výkonu této elektrárny. Nejprve se zmiňuji o problémech připojení větrné elektrárny do sítě. Následně navrhuji řešení pro regulaci výkonu elektrárny v intervalu od 170 do 400 kW. Zavedením určitého výkonového rozmezí dochází ke zvýšení celkové účinnosti dodávky elektřiny oproti stálému výkonu. Dále v této kapitole popisuji lokalizaci umístění celého systému, typ větrné elektrárny a vlastnosti připojených komponent. V závěru kapitoly stanovuji celkové množství vyrobené elektrické energie větrnou elektrárnou a palivovým článkem.

Následující část se zabývá ekonomickým zhodnocením posuzovaného řešení. Nejprve se zmiňuji o investičních nákladech a následně sestavuji rozpočet posuzované stavby.



Potřebné investiční náklady jsou kryty z 30 % z vlastních prostředků a ze 70 % z úvěru. Diskontní sazbu jsem stanovil na základě vypočítané průměrné ceny kapitálu. Dále byly stanoveny odpisy jednotlivých komponent dle odpisových skupin. Výše provozních nákladů jednotlivých zařízení byla stanovena na základě expertního odhadu. Pomocí ročních porovnávacích nákladů jsem vypočítal přibližnou výši ceny jedné kilowatthodiny při dodávce elektřiny do sítě pouze větrnou elektrárnou – 1,71 Kč/kWh. Stejným způsobem jsem vypočítal přibližnou výši ceny jedné kilowatthodiny dodávané do sítě při současném využití vodíkového akumulčního systému – 3,87 Kč/kWh. V závěru jsem navržený projekt zhodnotil pomocí čisté současné hodnoty a vnitřního výnosového procenta. Pro úplnost jsem dále provedl citlivostní analýzu, zohledňující změnu výkupní ceny elektřiny respektive změnu diskontní sazby. Z provedeného výpočtu vyplývá, že, aby byl projekt ekonomicky efektivní, měla by výkupní cena elektřiny činit 4,1 Kč/kWh při diskontní sazbě 4,652 %. Tato podmínka je vyvolána především vysokými investičními náklady akumulčního vodíkového systému, ale rovněž nízkou účinností, při využívání pouze elektrické energie. Proto bych doporučil využít principu kogenerace s využitím odpadního tepla z palivového článku nebo pístového motoru. Jako další možná varianta řešení se nabízí přímý prodej zákazníkovi, při vynechání služeb distributora. Dále doporučuji využívat dotace, které nabízí Technologická agentura ČR, například v programu Alfa. Využitím těchto řešení, se může stát větrná energie opět konkurenceschopná.



6 Použitá literatura

- [1] Enertrag. [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: www.enertrag.com
- [2] Česká společnost pro větrnou energii. [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: www.csve.cz
- [3] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 254 s. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [4] CITYPLAN SPOL. S R.O. *ÚZEMNÍ ENERGETICKÁ KONCEPCE KRAJE VYSOČINA* [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: <http://www.dlouhabrtnice.cz/file.php?nid=9254&oid=1930017>
- [5] RYCHETNÍK, Václav. *Větrné motory a elektrárny*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997, 199 s. ISBN 80-010-1563-7.
- [6] ŠKORPÍK, Jiří. Využití energie větru. [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/vyuziti-energie-vetru.html>
- [7] Větrný park Dukovany. [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: <http://www.dukovany.cz/vetrny-park-dukovany.html>
- [8] *Global wind energy council* [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: www.gwec.net
- [9] ČESKÁ VODÍKOVÁ TECHNOLOGICKÁ PLATFORMA. [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: www.hytep.cz
- [10] MINAŘÍK, Daniel. Palivové články a jejich využití. 2010. Dostupné z: http://mostech.vsb.cz/source/dokumenty/2_Palivove%20clanky.pdf
- [11] Hydrogen transportation systems. [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: <http://www.fuelcellpark.com/h2/haupt3e.html>
- [12] Vývoj větrné elektrárny. [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/velikost-vetrne-elektrarny-a-jeji-vyvoj/110>



- [13] ÚSTAV FYZIKY ATMOSFÉRY AV ČR. *Odhad realizovatelného potenciálu větrné energie na území ČR.* 2008. Dostupné z: http://www.ufa.cas.cz/files/OMET/potencial_ufa.pdf
- [14] Větrné elektrárny. [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: www.vetrne-elektrarny.com
- [15] VESTAS. [online]. www.vestas.com. [cit. 2013-12-30].
- [16] SCHOLLEOVÁ, Hana. *Ekonomické a finanční řízení pro neekonomy.* 1. vyd. Praha: Grada, 2008, 256 s. ISBN 978-80-247-2424-9.
- [17] THE WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION. 2013 Half-year Report. [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: http://www.wwindea.org/webimages/Half-year_report_2013.pdf
- [18] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: www.eru.cz
- [19] SAUR, C. U.S. Geographic Analysis of the Cost of Hydrogen from Electrolysis. [online]. 2011 [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: <http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/52640.pdf>
- [20] Doc. Ing. JÄGER, Milan CSc. a Ing. Miroslav CSc. VÍTEK. *Efektivnost využití vodíku v energetice.*
- [21] *Větrné elektrárny v Jihomoravském kraji: sborník příspěvků z odborného semináře : 18. červen 2007, Brno.* Brno: ZO ČSOP Veronica, 2007, 56 s. ISBN 978-80-254-0148-4. Dostupné z: http://www.veronica.cz/dokumenty/vetrne_elektrarny.pdf
- [22] HÁJEK, Miroslav. FARMA VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN ABERTAMY. In: [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: http://portal.cenia.cz/eiasea/download/RUIBX0tWSzA0NV9kb2t1bWVudGFjZURPQ18xLnBkZg/KVK045_dokumentace.pdf
- [23] Vysokotlaký kompresor. [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: <http://www.jadal.cz/cz-detail-2153-bezolejovy-kompresor-makita-ac310h-vysokotl-1500w-28bar-36kg.html>
- [24] SHI, Guohua. Cost Optimal Selection of Storage Tanks in LPG Vaporization Station. *Natural Resources* [online]. 2012, vol. 03, issue 03, s. 164-169 [cit. 2013-12-



- 30]. DOI: 10.4236/nr.2012.33021. Dostupné z:
<http://www.scirp.org/journal/PaperDownload.aspx?DOI=10.4236/nr.2012.33021>
- [25] Průměrné náklady kapitálu. [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z:
<https://managementmania.com/cs/prumerne-naklady-kapitalu>
- [26] ETE, Arnaud. *Hydrogen Systems Modelling, Analysis and Optimisation* [online]. University of Strathclyde, 2009 [cit. 2013-12-30]. Dostupné z:
http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MPhil/arnaud_thesis.pdf
- [27] Ing. PORŠ, Zdeněk. *Palivové články* [online]. Ústav Jaderného Výzkumu Řež, a.s., 2002 [cit. 2013-12-30]. Dostupné z:
<http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>
- [28] *Vztlakové větrné turbíny* [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: www.hw.cz
- [29] *Zákon o daních z příjmů* [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z:
<http://business.center.cz/business/pravo/zakony/dprij/>
- [30] Poslanecká sněmovna ČR: Předpis 310/2013 Sb. [online]. [cit. 2013-12-30]. Dostupné z: <http://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?O=6&T=1121>
- [31] Zákon o daních z příjmů (zákon č. 586/1992 Sb.)
- [32] Zákon o podporovaných zdrojích energie (zákon č. 310/2013 Sb.)



Příloha I. Obsah přiloženého CD

Na přiloženém CD jsou uloženy tyto soubory:

- Bakalářská práce ve formátu PDF
- Sešit aplikace MS Excel (výpočty, tabulky, grafy rozvahové analýzy)