

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**



**TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI**



České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky

**Ing. Tomáš Taussig**

## **OPTIMALIZACE VÝROBY VODÍKU Z VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN**

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: 3907V001 - Elektroenergetika

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, srpen 2011

Disertační práce byla vypracována v distanční formě doktorského studia na katedře Elektroenergetiky Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Ing. Tomáš Taussig  
Fakulta elektrotechnická ČVUT  
Technická 2  
Praha 6 – Dejvice  
166 27

Školitel: Prof. Ing. Jiří Tůma, DrSc.  
Katedra Elektroenergetiky  
Fakulta elektrotechnická ČVUT  
Technická 2  
Praha 6 – Dejvice  
166 27

Oponenti: .....

.....

.....

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba disertace se koná dne ..... v ..... hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru 3907V001 - Elektroenergetika v zasedací místnosti č ..... Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

Prof. Ing. Josef Tlustý, CSc.  
předseda komise pro obhajobu disertační práce  
ve studijním oboru  
Elektroenergetika  
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

# OBSAH

1.	ÚVOD .....	1
2.	SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE .....	1
3.	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....	3
4.	AKUMULACE PŘEBYTEČNÉ ELEKTRICKÉ ENERGIE VYROBENÉ VĚTRNÝMI ELEKTRÁRNAMI DO VODÍKU .....	4
4.1	POPIS SYSTÉMU VÍTR-VODÍK .....	4
4.1.1	<i>Fyzikální model systému vítr – vodík .....</i>	4
4.1.2	<i>Hlavní komponenty systému vítr – vodík .....</i>	5
5.	MODELOVÁNÍ SYSTÉMU VÍTR-VODÍK .....	5
5.1	POUŽITÍ PŘEBYTEČNÉ ENERGIE VĚTRU NA VÝROBU VODÍKU .....	6
5.2	VODÍK POUŽIT PRO AKUMULACI ENERGIE A NAPÁJENÍ PALIVOVÉHO ČLÁNKU .....	6
5.2.1	<i>Využití kapacity distribuční sítě .....</i>	7
5.2.2	<i>Stanovení výkonu akumulačního zařízení .....</i>	7
6.	OPTIMÁLNÍ PROVOZ SYSTÉMU VÍTR-VODÍK .....	9
6.1	POPIS ZÁKLADNÍHO SYSTÉMU .....	9
6.2	NÁVRH MODELU .....	10
7.	METODA ZPRACOVÁNÍ .....	12
7.1	NALEZENÍ OPTIMÁLNÍHO PROVOZU SYSTÉMU VÍTR-VODÍK PRO ZADANÉ PRŮMĚRNÉ HODNOTY RYCHLOSTI VĚTRU .....	12
7.1.1	<i>Popis a volba daného systému VTE-HY .....</i>	12
7.1.2	<i>Volba programu k modelování systému vítr-vodík .....</i>	13
7.1.3	<i>Použití vstupní hodnoty v systému vítr-vodík .....</i>	14
7.2	VÝSLEDKY .....	16
7.2.1	<i>Výsledné hodnoty modelování systému vítr-vodík .....</i>	16
8.	ZÁVĚR .....	24
	SEZNAM V TEZÍCH POUŽITÉ LITERATURY .....	26
	SEZNAM PRACÍ DISERTANTA VZTAHUJÍCÍCH SE K DISERTACI .....	27
	SUMMARY .....	28
	RESUMÉ .....	29

## 1. ÚVOD

Větrná energie je dnes nejrychleji rostoucí technologií výroby elektrické energie. Nicméně, nepravidelný provoz větrných elektráren je obzvláště náročný. Kromě toho nejlepší větrné zdroje se často nacházejí ve venkovských oblastech daleko od stávajících distribučních soustav. Vhodná akumulace energie by mohla zvýšit hodnotu větrné energie v energetickém systému, tím, že zajistí větší shodu mezi větrnou energií a poptávkou po elektrické energii. V oblastech se slabými distribučními sítěmi je skladování větrné energie možno také použít jako prostředek pro zamezení přetížení sítí nebo nežádoucího zvýšení napětí v obdobích s vysokou rychlostí větru. Vodík vyrobený z elektrolýzy vody udává vztah mezi větrnou energií a "vodíkovým hospodářstvím". Existuje řada dalších řešení, jak skladovat energii, která by mohla být použita v hospodaření s energií v souvislosti s větrnou energií, jako je sekundární baterie, přečerpávací vodní elektrárny a ukládání stlačeného vzduchu. Využití přebytečné energie z větrných elektráren k výrobě vodíku a jeho následná přeměna na elektrickou energii pomocí palivových článků je jedním z možností, jak jednak přispět ke snížení zatížení dopadu na životní prostředí a to tím, že dojde ke snížení výroby elektrické energie z neobnovitelných zdrojů, které jsou potřeba na výrobu elektrické energie v období, kdy větrné elektrárny nedodávají elektrickou energii do distribuční soustavy a také k dosažení větší možnosti řízení výroby elektrické energie ze systému vítr-vodík, čímž je dosahováno řízením výroby v elektrolyzérech a palivových článcích. Přebytečná vyrobená elektrická energie je uložena do vodíku a následně využita v období, kdy je nízká výroba ve větrných elektrárnách. Pomocí tohoto systému vítr-vodík, lze tedy dosáhnout kontinuálnější výroby elektrické energie a snížit tak špičkovou výrobu z větrných elektráren. Tato práce popisuje jednu z možných aplikací pro akumulaci energie z větrných elektráren.

Myšlenka využít skladování vodíku není nic nového. I když je stále větší pozornost zaměřena na výrobu elektrické energie z větrných elektráren, vývoj technologií skladování pokračuje, publikovaných studií o hospodaření s energií s tímto systémem je však málo. Mezi hlavními přínosy této práce patří v *návru optimalizace výroby vodíku z přebytečné elektrické energie vyrobené větrnými elektrárnami a návrh optimální struktury hlavních prvků (množství a velikost) systému vítr-vodík pro konkrétní zadané vstupní hodnoty rychlosti větru ve zvolených lokalitách a variantách zapojení těchto prvků, včetně tvorby programu pro výpočet výstupních hodnot v souvislosti s reálnými daty větrné energie, možnost zvýšit stabilitu distribuční sítě snížením přebytečného dodávaného výkonu z větrných elektráren, možnost ekologické výroby vodíku pro další zpracování, zapojením systému vítr-vodík do tzv. Inteligentní energie (podporu energetické účinnosti a obnovitelných zdrojů energie).*

## 2. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Podíl elektřiny vyráběné z obnovitelných zdrojů (větrné a solární elektrárny) po celém světě velmi rychle roste. Vzhledem ke kolísavým výkonům těchto zdrojů elektrické energie je jak u síťových, tak u autonomních systémů i při kombinaci zdrojů nutno přizpůsobit potřebu nebo část energie akumulovat. Dopusud žádná technologie schopná uchovat energii nemá dostatečný výkon [W/kg] a zároveň hustotu energie [Wh/kg]. Proto se vytváří systémy tvořené různými typy technologií uchováající energii.

Výkon solárních a větrných elektráren je vždy dán aktuálními klimatickými podmínkami, které se nedají ovládat. Vzhledem k velkému nárůstu instalovaného výkonu z těchto obnovitelných zdrojů je potřeba se vyrovnat s většími výkyvy generovaného výkonu.

Technologií pro ukládání energie je poměrně dost, avšak každá má svoje hranice či nedostatky, díky nimž jsou jednotlivé technologie použitelné jen v určitých aplikacích, popřípadě dochází ke kombinaci více typů. Podle principu uchování energie, může rozlišovat dvě skupiny: <sup>[1]</sup>

1. Princip chemické akumulace energie (baterie)

- Olověné a alkalické baterie
- Moderní baterie pracující na principu Lithium-Ion, Sodík-Síra
- Superkapacitor

2. Princip fyzikální akumulace energie

- Setrvačníky a další stroje
- Přečerpávací vodní elektrárny
- Akumulace energie ve stlačeném vzduchu

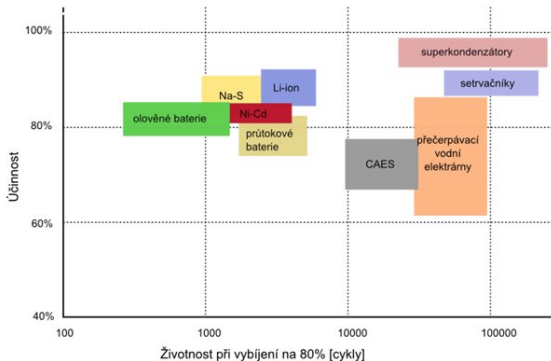
***Přečerpávací vodní elektrárny a akumulace energie ve stlačeném vzduchu tzv. (CAES)***

Tyto uvedené systémy jsou schopny uchovat velké množství energie po delší dobu (řádově hodiny). Na rozdíl od ostatních způsobů akumulace jejich spouštěcí čas činí desítky sekund až několik minut. Pro potřeby regulace činného i jalového výkonu elektrizační soustavy jsou tyto parametry dostatečné.

Oba systémy mají speciální topologické požadavky, u přečerpávacích elektráren je zapotřebí dvou vodních rezervoárů, u CAES musí být k dispozici dostatečně velká a nepropustná kaverna. Zejména u CAES je snížena účinnost díky tepelným ztrátám - vzduch ohřátý při stlačení v kompresorech se v akumulátoru ochladí, čímž ztratí přibližně třetinu energie.

***Účinnost vs. životnost***

Životnost společně s účinností doplňují sérii parametrů důležitých při výběru vhodné technologie.



Obr. č. 1 Závislost účinnosti na životnosti

<sup>1</sup> P.Dvořák, Akumulace elektřiny, VUT Brno, publikovaného v rámci konference Nekonvenční zdroje elektrické energie 2010 (NZEE 2010), dostupné na <http://energie.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektřiny>

### **Celkové náklady**

Náklady bývají při výběru často velmi důležité. Data v tomto grafu jsou spíše orientační, tak jak se akumulátory stále vyvíjejí tak se mění i náklady na jednotku energie

Základními ukazateli každé technologie pro uchování energie jsou:

- specifická hustota energie [Wh/kg]
- měrný výkon [W/kg]
- účinnost [%]
- samovybití (ztráty)
- životnost (počet cyklů)

Dalšími aspekty mohou být: dostupnost prostředků a materiálů, cena, vliv na životní prostředí a bezpečnost.

## **3. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE**

Cílem této práce je popis komplexní představy systému na využití OZE v kombinaci s vodíkovým hospodářstvím. Budu se zabývat jeho popisem a funkcí, jako součástí energetického mixu zdrojů, sloužících k zajištění bezpečné a spolehlivé dodávky elektrické energie. Současná diskuse o omezení jaderných zdrojů vede ke zvýšenému použití OZE a bude mít tak za následek větší příklonění se k těmto typům energetických zdrojů. V současné době je tato problematika ve světě řešena pouze na vědecké úrovni, popřípadě v několika málo pilotních projektech. Rád bych popsal tuto problematiku pro ČR, kde budou využity naměřené data rychlosti větru z větrných elektráren. Cílem práce bude také posoudit a namodelovat, jak by mělo být velké akumulační zařízení pro skladování energie (pomocí optimalizace prvku systému) a chod systému tak, aby odpovídal velmi proměnlivé energii větru na výrobu elektrické energie.

Další cíle vztahujících k uvedené problematice, které budou v mé práci popsány, jsou koncentrovány do následujících bodů:

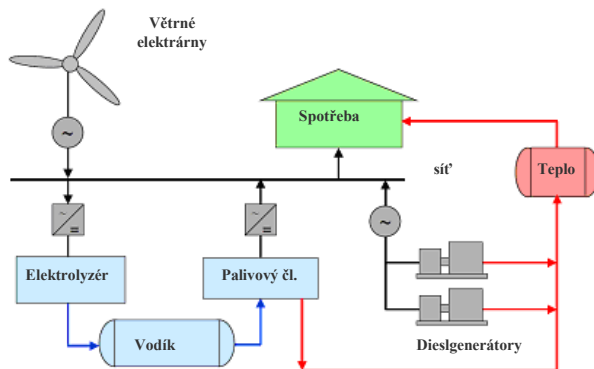
- 1) Definice a popis rozdělení obnovitelných zdrojů na jednotlivé druhy podle formy využití vstupní energie a možné využití OZE v podmínkách ČR
- 2) Popis VTE, její základní princip fungování, odhadu rozvoje větrné energetiky v budoucnosti, základní současné technologii větrných elektráren a jejich působení v elektrizační soustavě. Budou rozebrány podmínky jejich připojování do ES a možné problémy a dopady na kvalitu elektrické energie při připojování VTE do distribučních sítí,
- 3) Popis vodíkového hospodářství, jeho principy v současnosti a výhledy v perspektivách jeho budování. Především v jeho možnostech výroby, dopravy a skladování vodíku
- 4) Popis možné kombinace (zapojení) větrné energie a vodíkové hospodářství, popis akumulace přebytečné elektrické energie větrných elektráren ve formě vodíku, popis hlavních prvků systému
- 5) Popsání dodávek elektrické energie do elektrické sítě a akumulace energie, výpočty potřebného akumulačního prostoru, možné způsoby využití vyrobeného vodíku
- 6) Modelování daného systému vítr-vodík, optimalizace výroby elektrické energie v systému větrná energie-vodík, návrh pravděpodobnostního modelu akumulace elektrické energie, návrh optimálního provozu systému vítr-vodík
- 7) Vliv rozdílné rychlosti větru na výrobu elektrické energie a návrh simulačních modelů a ověření na praktických příkladech při reálných hodnotách rychlosti větru ve zvolených lokalitách, nalezení optimálního provozu systému vítr-vodík



## 4. AKUMULACE PŘEBYTEČNÉ ELEKTRICKÉ ENERGIE VYROBENÉ VĚTRNÝMI ELEKTRÁRNAMI DO VODÍKU

### 4.1 POPIS SYSTÉMU VÍTR-VODÍK

Tato podkapitola se zabývá popisem fyzikálního modelu a hlavními komponenty celého systému vítr-vodík. Příklad jednoho způsobu zapojení tohoto systému je uveden na obr. č. 2, kdy systém vítr-vodík není zapojen do distribuční soustavy.

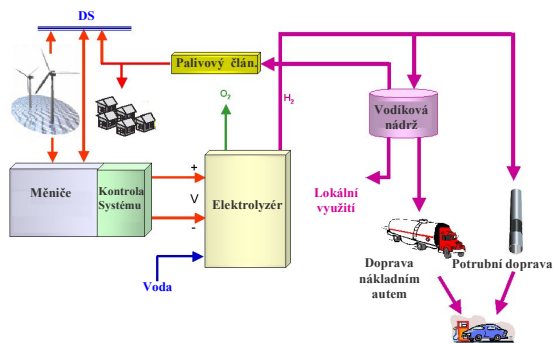


Obr. č. 2 Systém vítr – vodík v izolovaném „ostrovním“ režimu

#### 4.1.1 Fyzikální model systému vítr – vodík

Systém vítr – vodík je zde uvažován jako komplexní zařízení sloužící k výrobě elektrické energie v podobě kombinace větrné energie a vodíku bez zapojení tradičních zdrojů energie založených na fosilních palivech. Analyzovaný systém se skládá z větrných elektráren, elektrolyzátoru, nádrží kde je uložen vodík jako stlačený plyn, příslušnými měniči a palivovým článkem. V tomto systému nevznikají žádné emise znečišťujících látek a je šetrný k životnímu prostředí. Prvním cílem systému je poskytnout veškerou elektrinu pouze pomocí obnovitelných zdrojů energie v průběhu celého roku. Druhým cílem je dodávat elektrinu bez jakýchkoli produkce znečišťujících látek vůči životnímu prostředí, zejména CO<sub>2</sub>. Problémem obnovitelných zdrojů je kolísání a nedostatečná spolehlivost dodávek elektrické energie po celý rok. Základní princip výše uvedeného případu je ten, že primárně větrné elektrárny vyrábí elektrickou energii, která je dále distribuována do distribuční soustavy. V období, kdy je přebytek této energie, bude tato přebytečná energie odvedena do elektrolyzátoru, kde se tato energie přemění na vyrobený vodík a kyslík. Tento vyrobený vodík je pomocí pomocných zařízení, jako jsou čerpadla a kompresory stlačen do připojených vodíkových nádrží. V období kdy je nedostatek elektrické energie (vyšší poptávka) bude tento uložený vodík přiveden do připojeného palivového článku a zde dojde k přeměně na elektrickou energii, která je pak dodávána do distribuční soustavy. Tento systém najde také uplatnění v izolovaném systému, kdy není možnosti připojení k vyšší distribuční (přenosové) soustavě. Po tom je však potřeba do systému vítr – vodík zapojit další záložní zdroj, převážně se využívá dieslových motorů. Systém vítr vodík může být:

- připojen do distribuční soustavy a dodává elektrickou energii do distribuční sítě
- pracuje v izolovaném systému, kdy záložním zdrojem je dieslgenerátor



Obr. č. 3 Zapojení systému vítr-vodík

#### 4.1.2 Hlavní komponenty systému vítr – vodík

Jednou ze základní a hlavní komponenty systému vítr – vodík jsou větrné elektrárny. Větrné elektrárny přeměňují kinetickou energii větru na mechanickou práci a tu potom generátorem na elektrickou. Zpomalením proudu vzduchu, který protéká jejich pracovní plochou, z něj odebírají energii. Výkon větru, přenesený na lopatky větrné elektrárny, nám udává tzv. výkonový součinitel  $c_p$ . Takto vyrobená elektrická energie je dále využita již k samotnému napájení distribučních sítí, nebo například k výrobě vodíku. V systému vítr – vodík jsou dále použity tyto hlavní prvky systému:

- Elektrolyzátor (použit k výrobě vodíku)
- Měníče (použit k přeměně napětí ze stejnosměrného na střídavý a naopak)
- Vodíkové nádrže (použity k akumulaci vyrobeného vodíku)
- Palivový článěk (použit k výrobě elektrické energie z vodíku a k napájení distribuční sítě)
- Pomocné zařízení a příslušenství (použity pro zajištění chodu systému)

### 5. MODELOVÁNÍ SYSTÉMU VÍTR-VODÍK

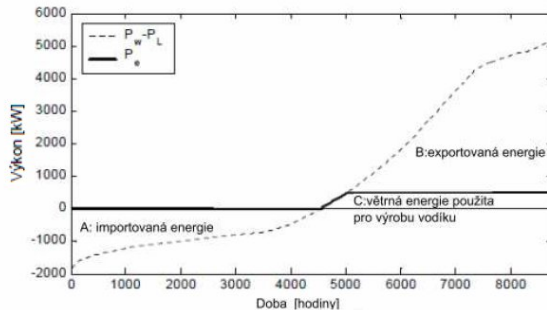
Hlavním důvodem výroby vodíku jako zdroje uchování elektrické energie je zvýšení využitelnosti energie větru v oblastech, kde jsou omezené schopnosti přenosové soustavy. Existuje řada možností jak využít akumulování elektrické energie vyrobené ve větrných elektrárnách. Já jsem se zaměřil na již zmíněný systém uchování elektrické energie ve formě vodíku. Tento systém jsem rozdělil do tří možných případů, které se mohou v tomto systému vyskytnout. Vše se opírá o základní systém, jímž je výroba elektrické energie ve větrných elektrárnách, která bude pomocí elektrolyzátorů využita pro výrobu vodíku, který bude dále využit ať už jako palivo v dopravě, nebo jako palivo pro napájení palivového článku a následnou výrobu elektrické energie v pozdějším potřebné době. Toto rozdělení je možné dále rozdělit na připojení k distribuční síti, nebo na lokální síť. Systém vítr-vodík lze rozdělit do několika kategorií a případů, které zde budou uvedeny. Za první (I) je vodík vyroben z přebytečné elektrické energie větrných elektráren a je použit pro napájení dopravních prostředků. Za druhé (II) je možné použít vodík k akumulaci přebytečné energie v období, kdy je nabídka vyrobené energie z větrných elektráren vyšší, než je poptávka po této energii. Přebytečná energie se tak uloží ve formě vodíku, ten je pak použit jako palivo pro palivový článěk, který dodává vyrobenou elektrickou energii do distribuční soustavy v období, kdy není dostatek elektrické

energie z větrných elektráren. Posledním třetím (III) případem je možnost kombinace dvou předchozích případů, kdy je vyrobený vodík použit jak pro napájení palivového článku tak je spotřebováván v automobilovém průmyslu. Využití vyrobeného vodíku lze rozdělit na několik případů:

- První případ I – v tomto případě bude diskutována možnost využití vyrobeného vodíku jako zdroje pro veřejnou dopravu.
- Druhý případ II – kdy je vodík použit pro napájení palivového článku a následně výrobě elektrické energie v období kdy je potřeba.
- Třetí případ III – kdy je vyrobený vodík použit jak pro veřejnou dopravu, tak pro napájení palivového článku jako zdroje elektrické energie a tepla.

## 5.1 POUŽITÍ PŘEBYTEČNÉ ENERGIE VĚTRU NA VÝROBU VODÍKU

Zde bude popsán způsob výroby vodíku z přebytečné energie větru, v době kdy v distribuční síti vznikají výkonové přebytky a ty je nutné kompenzovat. Charakteristické pro tento způsob je to, že nebude potřeba dodávat elektrickou energii na výrobu vodíku z distribuční sítě. Množství vyrobeného vodíku je dáno jen výrobou z větrných elektráren. Graf č. 1 ukazuje křivku výroby vodíku z přebytečné energie větru kdy ( $P_e$ ) [kW] je výkon potřebný pro napájení elektrolyzátoru a výkonové přebytky jsou uvedeny jako rozdíl výkonů ( $P_w - P_l$ ). Z grafu je vidět, že nedochází k výrobě vodíku, když dojde ke ztrátě výkonu a že elektrolyzátor většinou běží na jmenovitý výkon, když vznikne přebytečný výkon.



Graf č. 1 Křivka výroby vodíku z přebytečného výkonu větrných elektráren

## 5.2 VODÍK POUŽIT PRO AKUMULACI ENERGIE A NAPÁJENÍ PALIVOVÉHO ČLÁNKU

Možnost uložení vodíku pro pozdější využití jako paliva pro palivový článek bude popsáno v této podkapitole. Lze uvést dvě možné kombinace využití palivového článku jako:

- Využití reverzibilního palivového článku, kdy palivový článek je použit zároveň jako elektrolyzátor
- Oddělený palivový článek a elektrolyzátor

### 5.2.1 Využití kapacity distribuční sítě

V této podkapitole budu uvažovat s omezenou velikostí vodíkových nádrží, používaných pro akumulování nadměrné energie větru, která by byla jinak nevyužita v důsledku omezení dané distribuční sítí. Je důležité si uvědomit, že uložení vyrobeného vodíku by mohlo být využito i pro jiné účely jako je například optimalizace výkonu s ohledem na měnící se tržní cenu elektřiny. Zde budu brát v úvahu to, že přebytečná elektrická energie vyrobená ve větrných elektrárnách, která by byla mařena v důsledku omezení dané distribuční soustavou, bude využita na výrobu vodíku. Velikost použitých vodíkových nádrží, tak bude mít dopad na náklady na výrobu elektrické energie. Lze vybrat PČ, který plní funkci elektrolyzáru (reverzibilní palivový článek) nebo samostatný elektrolyzáru a palivový článek.

#### *Reverzibilní palivový článek*

Kapacita reverzibilního palivového článku je odvozena z rovnice (1.1)

$$P_e^{\max} = P_w^{\max} - P_g^{\max} - \min\{P_i(t)\} \quad (1.1)$$

Průměrná účinnost systému vítr- palivový článek je relativně vysoká, ačkoli kapacita akumulací nádrže vodíku je pod 50%. Účinnost systému vítr- vodík je definována jako:

$$\eta_{\text{sys}} = \frac{E_w - P_d - E_e + E_f}{E_w} \quad (1.2)$$

#### *Oddělený elektrolyzáru a palivový článek*

Dimenzování elektrolyzáru se vypočte z rovnice (1.1).

### 5.2.2 Stanovení výkonu akumulačního zařízení

V této podkapitole bude namodelováno výkonové omezení při stanovení výkonu akumulačního zařízení. Je nutné rozlišit mezi nabíjecí a vybíjecí kapacitou. Následující rovnice, představují omezení nabíjecího a vybíjecího výkonu:

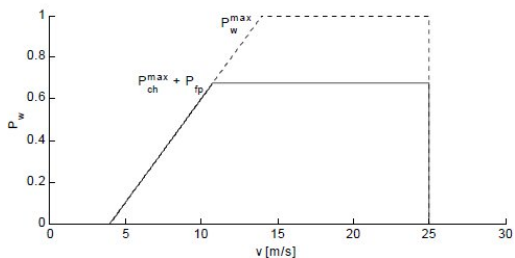
$$P_{ch}(v) = \min [P_w(v) - P_{fp}, P_{ch}^{\max}] \text{ pro } P_w(v) > P_{fp} \quad (1.3)$$

$$P_{ch}(v) = 0 \text{ pro } P_w(v) \leq P_{fp}$$

$$P_{dch}(v) = \min [P_{fp} - P_w, P_{dch}^{\max}] \text{ pro } P_w(v) < P_{fp} \quad (1.4)$$

$$P_{dch}(v) = 0 \text{ pro } P_w(v) \geq P_{fp}$$

Pokud by nedošlo k omezení nabíjecí kapacity akumulačního zařízení, je možné využít veškerou nadměrnou větrnou energii pro nabíjení. Nicméně pokud je nabíjecí kapacita nižší než  $P_w^{\max} - P_{fp}$ , není možné použít veškerou přebytečnou energii větru k nabíjení. Je možné toto omezení namodelovat v upravené výkonové křivce graf č. 2.



Graf č. 2 Modifikovaná výkonová křivka (plná čára), která je k dispozici pro nabíjení, tečková čára je skutečná křivka větrných elektráren

Očekávaná hodnota nabíjecího výkonu do akumulárního zařízení se zjistí z modifikované výkonové křivky:

$$E(\dot{S}_{ch}) = \int_{v(P_{fp})}^{v_0} \eta_{ch} (P_w(v) - P_{fp}) \cdot f(v) dv \quad (1.5)$$

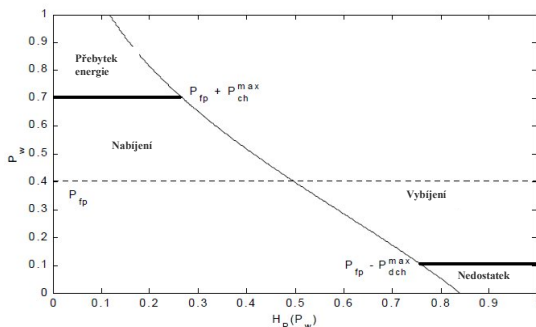
Pokud bychom chtěli zjistit velikost vybíjecího výkonu, použijeme upravený výraz pro vybíjecí výkon:

$$E(\dot{S}_{dech}) = \int_0^{\infty} S_{dech}(v) \cdot f(v) dv = \int_0^{\infty} \eta_{dech}^{-1} \cdot P_{dech}(v) \cdot f(v) dv \quad (1.6)$$

$$H_p(P_w) = 1 - F_p(P_w) \quad (1.7)$$

$H_p(P_w)$  značí křivku větrné elektrárny

Vliv omezení nabíjecí a vybíjecí kapacity je zobrazen na v grafu č. 3. Plocha označena "Nabíjení" je plocha, která se rovná danému podílu větrné energie, která je použita pro nabíjení akumulárního zařízení. Pokud bude nadměrná větrná energie vyšší než nabíjecí kapacita, dojde k přelití přebytečné energie do distribuční sítě. Podobně, to bude v oblasti a v období kdy bude nedostatek větrné energie a pokud by vybíjecí kapacita byla menší než daná hladina výkonu.

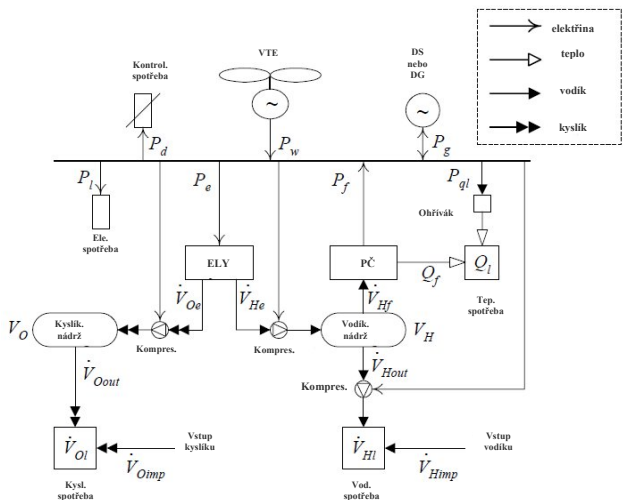


Graf č. 3 Zobrazení omezení nabíjecí a vybíjecí kapacity.

## 6. OPTIMÁLNÍ PROVOZ SYSTÉMU VÍTR-VODÍK

### 6.1 POPIS ZÁKLADNÍHO SYSTÉMU

Systém vítr-vodík je jak bylo popsáno složen s jednotlivých komponent jak je vidět na schématickém obr. 4 včetně uvedených hlavních hodnot vstupujících/vystupujících z / do systému.



Obr. č. 4 Schematické zapojení systému vítr-vodík do DS.

Kde:

ELY	elektrolyzér	
PČ	palivový článek	
VTE	větrná elektrárna	
DG	dieslgenerátor	
DS	distribuční síť	
$P_{ql}$	výkon spotřebovaný v ohříváči	[kW]
$P_c$	výkon spotřebovaný ke stačení plynů	[kW]
$Q_f$	využitá teplo z PČ	[kW]
$Q_l$	tepelná zátěž	[kW]
$V_O$	objem v kyslíkové nádrži	[Nm <sup>3</sup> ]
$V_H$	objem ve vodíkové nádrži	[Nm <sup>3</sup> ]
$\dot{V}_{He}$	vodík vyrobený v ELY	[Nm <sup>3</sup> /h]
$\dot{V}_{Oe}$	kyslík vyrobený v ELY	[Nm <sup>3</sup> /h]

$\dot{V}_{Hf}$	vodík spotřebovaný v PČ	[Nm <sup>3</sup> /h]
$\dot{V}_{Hout}$	tok vodíku z vodíkové nádrže do spotřeby	[Nm <sup>3</sup> /h]
$\dot{V}_{Hl}$	vodíková spotřeba	[Nm <sup>3</sup> ]
$\dot{V}_{Himp}$	dotávka vodíku	[Nm <sup>3</sup> ]

Větrná elektrárna je připojena k místní distribuční síti a je zdrojem elektrické energie pro jednoho či více odběratelů a také zdrojem pro výrobu tepla tak i pro napájení elektrolyzéro na výrobu vodíku a kyslíku. Připojený palivový článek přeměňuje uložený vodík zpátky na elektrickou energii, ale je i zdrojem tepla, které může být dále využito.

Je možné uvažovat několik řešení a to v závislosti na lokalitě, kde se systém nachází. Pokud bude systém umístěn v odlehle oblasti bez možnosti připojení na distribuční soustavu, bude nutné počítat s akumulačním zařízením na uchování vyrobené energie a popřípadě s použitím záložního zdroje. Pokud je systém připojen na distribuční síť, může být tato distribuční síť využita jak k prodeji tak nákupu elektrické energie

## 6.2 NÁVRH MODELU

Systém je složen z lineárních rovnic pro výkon, teplo a výkonovou bilanci. Použití hlavní symboly jsou zobrazeny na obr. č. 4. Rovnice pro akumulaci energie při daném časovém kroku t je pak vyjádřena jako:

$$V_H(t+1) - V_H(t) = \left( \dot{V}_{He}(t) - \dot{V}_{Hf}(t) - \dot{V}_{Hout}(t) \right) \cdot \Delta t \quad (1.8)$$

$$V_O(t+1) - V_O(t) = \left( \dot{V}_{Oe}(t) - \dot{V}_{Oout}(t) \right) \cdot \Delta t \quad (1.9)$$

kde  $V_H(t)$  odkazuje na úroveň skladování vodíku na počátku kroku v čase t. Vodíková a kyslíková spotřeba je pokryta buď dotávkou plynů z nádrží, nebo externě:

$$\dot{V}_{Hout}(t) + \dot{V}_{Himp}(t) = \dot{V}_{Hl}(t) \quad (1.10)$$

$$\dot{V}_{Oout}(t) + \dot{V}_{Oimp}(t) = \dot{V}_{Ol}(t) \quad (1.11)$$

Vodík a kyslík je vyprodukován v procesu elektrolyzy následujícími vztahy:

$$P_e(t) = \eta_e \cdot \dot{V}_{He}(t) \quad (1.12)$$

$$\dot{V}_{Oe}(t) = r \cdot \dot{V}_{He}(t) \quad (1.13)$$

kde r je množství kyslíku na jednotku vyrobeného vodíku a  $\eta_e$  je lineární aproximace elektrické účinnosti elektrolyzéro (kWh/Nm<sup>3</sup>) s přihlédnutím na ztráty v člancích a ztráty energie během přeměny. Vodík a kyslík je stlačen a po té uložen v tlakových nádržích. Celkový výkon použitý ke stlačení je dán:

$$P_c(t) = \eta_{HC} \cdot \dot{V}_{He}(t) + \eta_{HC2} \cdot \dot{V}_{Hout}(t) + \eta_{Oe} \cdot \dot{V}_{Oe}(t) \quad (1.14)$$

kde  $\eta_{Hc}$  a  $\eta_{oc}$  jsou účinnosti kompresorů mezi elektrolyzérem a vodíkovou a kyslíkovou nádrží, resp. účinnost kompresoru, který je potřebný pro poskytování potřebného tlaku tak, aby mohl být vodík využit pro čerpací stanice a je označován  $\eta_{Hc2}$ . Podobně jako výkon elektrolyzéru, může být výkon palivového článku vyjádřen jako:

$$P_f(t) = \eta_f \cdot \dot{V}_{Hf}(t) \quad (1.15)$$

V závislosti na typu palivového článku a provozních podmínkách, může být vyprodukované teplo z palivových článků dále využito. Tepelná bilance je pak dána:

$$Q_f(t) = \eta_{fq} \cdot \dot{V}_{Hf}(t) \quad (1.16)$$

$$Q_f(t) + \eta_{qt} \cdot P_{qt}(t) - Q_d(t) = Q_r(t) \quad (1.17)$$

kde  $\eta_{fq}$  je tepelná účinnost palivových článků a  $\eta_{qt}$  je účinnost elektrického vytápění. Pokud bude vyprodukované teplo v palivovém článku přesahovat potřebné teplo, tak se nadměrné teplo bude vypouštět do okolí což je uvedeno v  $Q_d$ . V reálných systémech není vztah mezi teplem  $Q_r$  a tokem vodíku  $H_f$  lineární. Výkonovou rovnováhu lze pak vyjádřit jako:

$$P_f(t) - P_c(t) - P_g(t) - P_{qt}(t) - P_d(t) - P_c(t) = P_r(t) - P_w(t) \quad (1.18)$$

kde regulovaná zátěž  $P_d$  je nezbytná k tomu, kdy lokální výkonové přebytky převyšují přenosové kapacity distribuční sítě. Ztráty v distribuční síti jsou vypočítány z těchto rovnic:

$$P_{gl}(t) = a_{gl} \cdot (P_{imp}(t) + P_{exp}(t)) \quad (1.19)$$

$$P_g(t) = P_{exp}(t) - P_{imp}(t) \quad (1.20)$$

Kde:

$P_{imp}$  je dodávka výkonu z distribuční sítě  
 $P_{exp}$  je prodej do distribuční sítě  
 $P_{gl}$  ztráty v distribuční síti

Lineární aproximace ztrát ve vedení je schována pod parametrem  $a_g^*$ . Výkon  $P_g$  může tak mít plusové nebo záporné hodnoty, což představuje prodej, respektive nákup výkonu. Je možné nasimulovat izolovaný provoz, při kterém se položí  $P_{exp}$  rovno nule. V tomto režimu je pak  $P_{imp}$  rovné výkonu záložní jednotky, například dieselgenerátoru. Některé z proměnných v uvedeném modelu jsou omezeny horními a dolními hranicemi (maximální a minimální):

$$V_H^{\min} \leq V_H(t) \leq V_H^{\max} \quad (1.21)$$

$$V_O^{\min} \leq V_O(t) \leq V_O^{\max} \quad (1.22)$$

$$P_e^{\min} \leq P_e(t) \leq P_e^{\max} \quad (1.23)$$

$$P_f^{\min} \leq P_f(t) \leq P_f^{\max} \quad (1.24)$$

$$P_g^{\min} \leq P_g(t) \leq P_g^{\max} \quad (1.25)$$

$$0 \leq P_{exp}(t) \leq P_g^{\max} \quad (1.26)$$

$$0 \leq P_{imp}(t) \leq -P_g^{\min} \quad (1.27)$$



kde  $-P_{gmin}$  se rovná  $P_{gmax}$  pokud bude systém připojen k distribuční síti a bude se rovnat kapacitě záložního generátoru v izolovaném systému. Hodnota  $P_{gmax}$  je nulová v izolovaném systému.

## 7. METODA ZPRACOVÁNÍ

### 7.1 NALEZENÍ OPTIMÁLNÍHO PROVOZU SYSTÉMU VÍTR-VODÍK PRO ZADANÉ PRŮMĚRNÉ HODNOTY RYCHLOSTI VĚTRU

#### 7.1.1 Popis a volba daného systému VTE-HY

Větrné elektrárny vyrábějí elektrickou energii. K distribuční síti je připojena elektrická zátěž a další příslušné komponenty. V období, kdy jsou nízké hodnoty rychlosti větru a tím pádem, větrné elektrárny nevyrábějí dostatek elektrické energie, je tento nedostatek pokryt z vyrobené elektrické energie v palivovém článku nebo je tato energie nakupována z distribuční sítě. Pro izolovaný systém je jako záloha použit dieselaagregát. V období, kdy je dostatek elektrického výkonu, je část elektrické energie dodávána jednak do distribuční sítě a část je použita k napájení připojeného elektrolyzéro pro výrobu vodíku. Takto vyrobený vodík je uskladněn v připojených palivových nádržích, nebo jak bude ukázáno dále, je použit ke spotřebě v tzv. vodíkové zátěži. (pod tímto si lze představit jakýkoli odběr vodíku). V uvedeném systému je tato hodnota pro všechny zvolené případy zvolena na hodnotu 4,8kg / den. Výše této spotřeby může být volena podle dané potřeby. Dalšími vstupní hodnoty, které budou v modelování systému použity, jsou reálné naměřené hodnoty rychlosti větru pro vybrané lokality. Jedná se o roční hodinové hodnoty rychlosti větru, které jsem obdržel od provozovatelů hydrometeorologických stanic a provozovatelů větrných elektráren. Tyto naměřené hodnoty byly naměřeny ve výšce 10 m nad mořem. Pro modelování byly získány roční hodinové hodnoty rychlosti větru pro tyto lokality: **ČR, Wales, Island**. Volba těchto lokalit byla záměrná a to z důvodu různého geografického rozložení. Další vstupním parametrem je definovaná spotřeba. Hodnota této spotřeby bude pro všechny varianty stejná, aby bylo možno porovnat provoz systému při různých zapojeních prvků a také při různých rychlostech větru. Jako posledními hodnotami, které do systému vstupují, jsou ekonomické hodnoty jako například investiční a provozní náklady jednotlivých prvků systému (ceny vztažené na kW). Není-li součástí je i volba výkupní ceny elektrické energie a cena elektrické energie, která je nakupována z distribuční sítě v období, kdy je nízká výroba z větrných elektráren a je potřeba dodávat elektrickou energii do distribuční soustavy. V systému vítr-vodík jsem počítal se 4 variantami zapojení příslušných komponent systému:

- Příklad I: VTE – DS – PČ – EZ- VZ
- Příklad II: VTE – DS – PČ- EZ
- Příklad III: VTE – DG – PČ- EZ -VZ
- Příklad IV: VTE – DG – PČ – EZ

Jedná se vždy o dvě varianty, které se liší v dalším využití vodíku. Složení příslušných komponent bude potom následující:

Kde:

- VTE větrná elektrárna
- DS distribuční síť

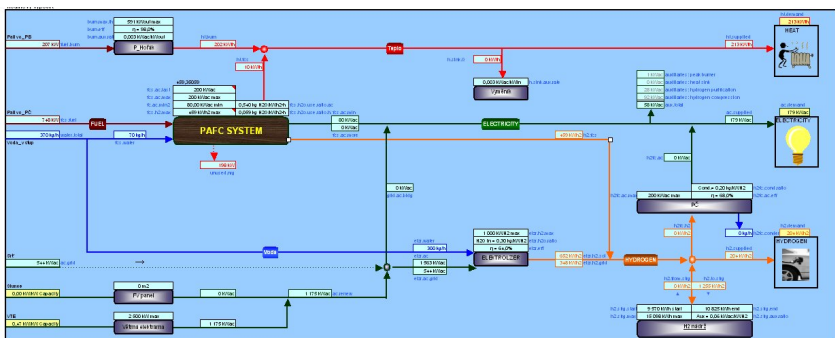
- DG diesel agregát
- PČ palivový článek
- VZ vodíková zátěž
- EZ elektrické zátěž
- ELY elektrolyzér

Příslušné hlavní komponenty obsahují i potřebné příslušenství (kompresory, čerpadla atd.). Ty jsou součástí těchto komponent a nebudou zvlášť uváděny. Distribuční síť je omezena velikostí dodávaného výkonu (120 kW) a nakupovaného výkonu do systému (200 kW).

Investiční a provozní náklady jednotlivých komponent jsou uvedeny v měně - \$, tzn., že i cena vyrobené energie a vyrobeného vodíku bude také uvedena v této národní měně.

### 7.1.2 Volba programu k modelování systému vítr-vodík

K nalezení optimálního provozu a počtu prvků systému vítr-vodík byl použit optimalizační program **HOMER**. Jedná se o program, jehož úkolem je nalézt nejvhodnější kombinaci a počet prvků daného systému, aby bylo zajištěno napájení definované spotřeby. Pro modelování systému vítr-vodík jsem zvolil 4 varianty zapojení hlavních prvků systému. Pro výpočet výstupních hodnot systému vítr- vodík jsem použil program Excel, kde jsem pomocí daných vzorců a vstupních hodnot získal výstupní hodnoty, které jsou dále v textu shrnuty do příslušných tabulek. Jelikož jsem pracoval s ročními hodinovými vstupními hodnotami, upravil jsem výstupní hodnoty na hodnoty měsíční, a to z důvodu velkého počtu získaných dat. Na následujícím obrázku je zachycen výstupní model systému – vítr vodík, který jsem namodeloval v programu **Excel**. V dalším obrázku č. 5, bude ukázán příklad jedné ze vstupních tabulek, které jsou součástí namodelovaného programu, který jsem vytvořil pro tuto práci. Model, jak již bylo zmíněno, byl vytvořen v programu **Excel** za použití příslušných maker.



Obr. č. 5 Ukázka výstupní modelu systému vítr- vodík z programu Excel

	A	B	C	D	E	F
1						
2				Rychlost větru (m/s)	Výstup (% of maximum)	Celkový výstup (kW)
3	Instalovaný výkon (kW)	990	Vstupní sešit	0	0,00%	0
4	Výška stožáru (m)	50		2	0,00%	0
5	Data měřená ve výšce (m)	10		3	0,00%	0
6	Tranzistivní koeficient	1,258		4	1,09%	11
7	Náklady na demontáž (\$/kW)	600		5	8,48%	84
8				6	17,52%	173
9				7	26,91%	269
10				8	41,62%	414
11				9	57,03%	565
12				10	73,03%	726
13				11	88,06%	872
14				12	97,38%	964
15				13	100,00%	990
16				14	100,00%	990
17				15	100,00%	990
18				16	100,00%	990
19				17	100,00%	990
20				18	100,00%	990
21				19	100,00%	990
22				20	100,00%	990
23				21	100,00%	990
24				22	100,00%	990
25				23	100,00%	990
26				24	100,00%	990
27				25	100,00%	990
28						
29						
30						
31	Kapitálové investice větrné elektrárny					
32	Hlavní kusy / systémy zařízení	Náklady - základní na odinstalování	Instalace nákladovou položkou	Základní investiční náklady	Poznámky	Zdroj dat
33	Větrná elektrárna	\$ 990 000	1,10	\$ 1 045 000		
34				\$ -		
35				\$ -		
36				\$ -		
37				\$ -		
38				\$ -		
39				\$ -		
40				\$ -		
41				\$ -		
42				\$ -		
43	Celkem	\$ 990 000		\$ 1 045 000		
44						

Obr. č. 6 Ukázka tabulky pro zadávání vstupních hodnot větrné elektrárny

## 7.1.3 Použité vstupní hodnoty v systému vítr-vodík

Hlavním vstupním parametrem při hledání optimálního provozu systému vítr-vodík je průměrná rychlost větrné energie, která má vliv na výrobu elektrické energie ve větrných elektrárnách a jeho následné využití pro výrobu vodíku v elektrolyzáru. Dalším hlavním vstupním prvkem je definovaná spotřeba elektrické energie a jako poslední lze považovat za vstupní hodnoty investiční, provozní náklady jednotlivých prvků systému.

### 7.1.3.1 Průměrné roční rychlosti větru

Průměrné hodnoty rychlosti jsou reálné hodnoty získané z meteorologických stanic. Rychlost větru se měří obvykle ve výšce 10 m nad mořem a skutečná rychlost větru v ose rotoru je potom pomocí vzorců přepočtena. Naměřené a přepočtené hodnoty jsou zobrazeny v grafu č.4.

Pro modelování systému vítr- vodík jsem vybral lokality s průměrnou roční rychlostí větru:

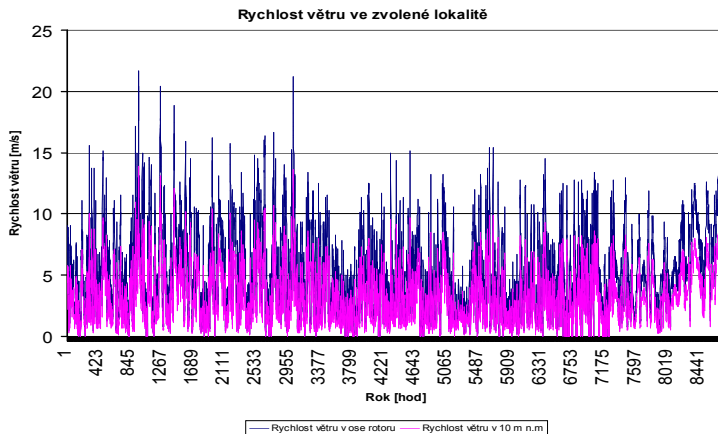
- ČR – Velké Pavlovice - 3.3 m/s (roční kapacitní faktor = 12 %)
- Wales – 4.0 m/s - (roční kapacitní faktor = 15.3 %)
- Island – 4.83 m/s (roční kapacitní faktor = 25,7%)

A dále jsem pro porovnání zvolil pro lokalitu Island průměrné roční hodnoty rychlosti větru:

- Zvolená hodnota – 6.5 m/s (při zvolené průměrné rychlosti je roční kapacitní faktor = 45,0 %)

Byla zvolena jedna hodnota průměrné roční rychlosti větru a to z toho důvodů, aby bylo možné ukázat, jak bude systém reagovat při zvýšení průměrné rychlosti větru, tzn., jak bude využita přebytečná elektrická energie vyrobená ve větrných elektrárnách při těchto zvýšených hodnotách. Při těchto hodnotách budou také vyšší hodnoty kapacitních faktorů.

Uvedené lokality se dále liší v rozdílných nadmořských výškách. Např. pro lokalitu Island byla zvolena 0 nadmořská výška a pro lokalitu ČR 100 m nad mořem.



Graf č. 4 Křivka rychlosti větru pro lokalitu ČR - Velké Pavlovice

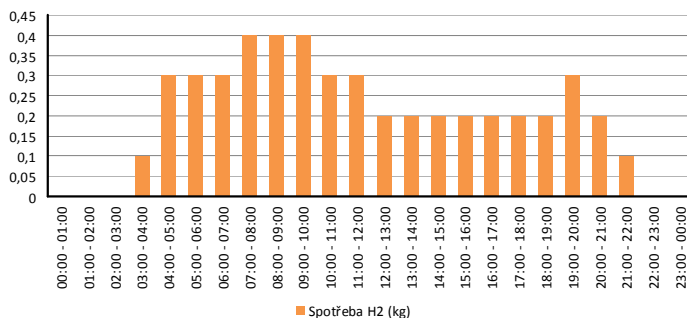
### 7.1.3.2 Průměrná měsíční/roční elektrická a vodíková spotřeba

Při modelování systému optimálního provozu byly použity dané hodnoty elektrické zátěže.

Měsíc	Spotřeba (kWh)
leden	36 954,73
únor	32 767,85
březen	37 876,45
duben	36 168,64
květen	36 450,29
červen	36 320,94
červenec	36 999,24
srpen	38 505,84
září	36 317,44
říjen	37 133,49
listopad	35 394,09
prosinec	37 111,62
<b>celkem</b>	<b>438 000,6</b>

Tab. č. 1 Průměrná roční spotřeba elektrické energie

Průběh denní spotřeby vodíku je uveden na příslušném grafu č. 5.



Graf č. 5 Průběh denní spotřeby vodíku

## 7.2 VÝSLEDKY

### 7.2.1 Výsledné hodnoty modelování systému vítr-vodík

V této podkapitole budou uvedeny výsledné hodnoty získané z optimálního modelování systému vítr-vodík.

Budou použity hodinové rychlosti větru, které byly v dané lokalitě naměřeny a jsou přepočteny na rychlosti větru v ose větrné turbíny. V každé variantě je získán pomocí optimalizačního programu optimální instalovaný výkon a počet komponent, tak aby bylo zajištěno napájení definované spotřeby při dané průměrné rychlosti větru a přebytečná elektrická energie mohla být využita k výrobě vodíku.

#### 7.2.1.1 Průměrná roční rychlost větru pro lokalitu ČR (Velké Pavlovice)

Optimalizačním programem byly pro tyto čtyři varianty zapojení hlavních částí a roční průměrné rychlosti větru v dané lokalitě zjištěny tyto optimální struktury zdrojů pro napájení dané spotřeby a to v tomto složení:

Varianta	VTE (kW)	PČ (kW)	ELY (kW)	DS (kW)	DG (kW)	US (kW)	STŘ (kW)	VN (kg)	Celkové investiční náklady (\$)	Celkové provozní náklady (\$/r)	NPC (\$)	COE (\$/kWh)
Varianta I	990	300	250	200	-	250	250	800	2 058 500	63 099	2 178 620	0,30
Varianta II	990	50	100	200	-	250	250	350	1 126 000	61 458	1 404 443	0,20
Varianta III	990	50	250	-	150	250	250	800	1 528 000	185 230	3 666 498	0,72
Varianta IV	990	100	250	-	150	250	250	350	1 540 500	154 153	3 291 572	0,65

Tab. č. 2 Optimální struktura zapojení hlavních komponent pro definovanou spotřebu elektrické energie (lokalita ČR)

Kde:

- COE – náklady na výrobu elektrické energie
- COH – náklady na výrobu vodíku
- NPC – čisté současné náklady

Dále budou uvedeny v předložených tabulkách výsledné hodnoty, celého systému vítr- vodík, doplněné příslušnými grafy, které byly získány jako výstup z vytvořeného programu Excel.

### Výroba a spotřeba elektřiny

V této tabulce č. 3 je shrnuta celková výroba elektrické energie, jak z větrné elektrárny, tak i z palivového článku plus nakupovaná elektrická energie z distribuční sítě, v období, kdy je nízká výroba elektrické energie z větrných elektráren. Je zde také uveden podíl jednotlivých spotřeb - AC spotřeba a spotřeba elektrolyzéro (pro výrobu vodíku). U dvou prvních variant, kdy je systém připojen distribuční síti, je vidět i prodej vyrobené elektrické energie do této sítě. Poslední část tabulky je tvořena hodnotou, nevyužitá energie, která není dále využita. U variant č. III a č. IV je vidět vyšší hodnotu a to z toho důvodu, že systém není připojen do distribuční soustavy a přebytečnou energii nelze dále distribuovat.

Je zde také pro doplnění uveden podíl OZE na výrobě elektrické energie. Jak je patrné, tak nejmenší podíl je ve variantě č. I, kdy dochází k vyššímu nákupu elektrické energie z distribuční sítě. Pro doplnění ještě uvádím cenu za prodanou a nakupovanou elektrickou energii z distribuční sítě. Dále na následujícím grafu č. 6 a č. 7 je uveden podíl roční výroby elektrické energie z hlavních zdrojů pro variantu I a II.

Komponenta	Podíl	Výroba-Varianta I	Podíl	Výroba-Varianta II	Podíl	Výroba-Varianta III	Podíl	Výroba-Varianta IV
	(%)	(kWh/rok)	(%)	(kWh/rok)	(%)	(kWh/rok)	(%)	(kWh/rok)
Větrná elektrárna	83%	1 042 742	82%	1 052 794	83%	1 042 742	82%	1 042 742
Palivový článek	2%	19 058	4%	57 043	6%	80 891	11%	141 697
Nákup z DS	15%	190 327	14%	176 142	-	-	-	-
Dieslagregát	-	-	-	-	11%	140 956	7%	88 016
<b>Celkem</b>	<b>100%</b>	<b>1 252 126</b>	<b>100%</b>	<b>1 285 979</b>	<b>100%</b>	<b>1 264 589</b>	<b>100%</b>	<b>1 272 455</b>
Typ spotřeby	Podíl	Spotřeba - Varianta I	Podíl	Spotřeba - Varianta II	Podíl	Spotřeba - Varianta III	Podíl	Spotřeba - Varianta IV
	(%)	(kWh/rok)	(%)	(kWh/rok)	(%)	(kWh/rok)	(%)	(kWh/rok)
AC spotřeba	47%	438 000	46%	438 000	58%	438 000	53%	438 000
Spotřeba elektrolyzéro	18%	165 742	17%	159 935	42%	322 971	47%	389 324
Prodej do DS	36%	332 122	37%	354 471	-	-	-	-
<b>Celkem</b>	<b>100%</b>	<b>935 245</b>	<b>100%</b>	<b>952 406</b>	<b>100%</b>	<b>760 971</b>	<b>100%</b>	<b>827 324</b>

Veličina	Jednotky	Varianta I	Varianta II	Varianta III	Varianta IV
Nevyužitá elektřina z VTE	kWh/rok	285 813	299 810	432 448	363 352
Podíl OZE na výrobě elektřiny	%	84,8	86,3	87,8	93,1

Veličina	Jednotky	Varianta I	Varianta II
Prodej elektřiny do DS (podle COE \$/kWh)	(\$)	104 618,4	74 438,9
Nákup elektřiny z DS (při 0,22 \$/kWh)	(\$)	41 871,9	38 751,2

Tab. č. 3 Výroba a spotřeba elektrické energie v systému vítr-vodík při dané roční rychlosti větru

### Výroba, spotřeba, uskladnění a cena vyrobeného vodíku

V této tabulce č. 4 jsou shrnuty hodnoty týkající se vodíku, ať už se jedná o celkovou výrobu v elektrolyzáru, tak i podíl spotřeby tohoto vyrobeného vodíku (palivovým článkem) a to především ve variantě I a III, kdy je vodík dále spotřebováván. Z přiložené tabulky je patrná největší výroba vodíku ve variantě č. IV. Jsou zde pro informaci uvedeny i ceny vodíku. Jak můžeme vidět cena vodíku vyrobeného ve variantě III a IV je vyšší než v předchozích 2 variantách a to z toho důvodu, že v těchto variantách není systém připojen do DS, ale je použit jako záložní zdroj DG. V následujících grafech č.8-11 jsou zobrazeny průběhy akumulace vodíku ve vodíkové nádrži pro variantu I-IV. Příklad výsledných výstupních měsíčních hodnot pro Variantu I jsou shrnuty v tabulce č.5.

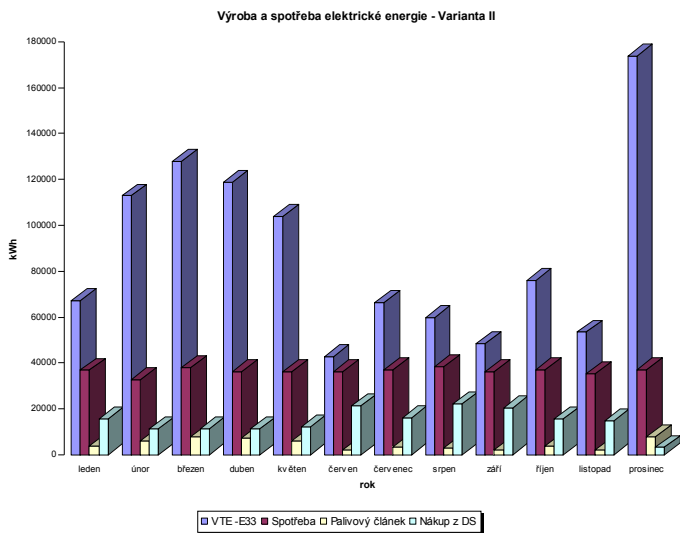
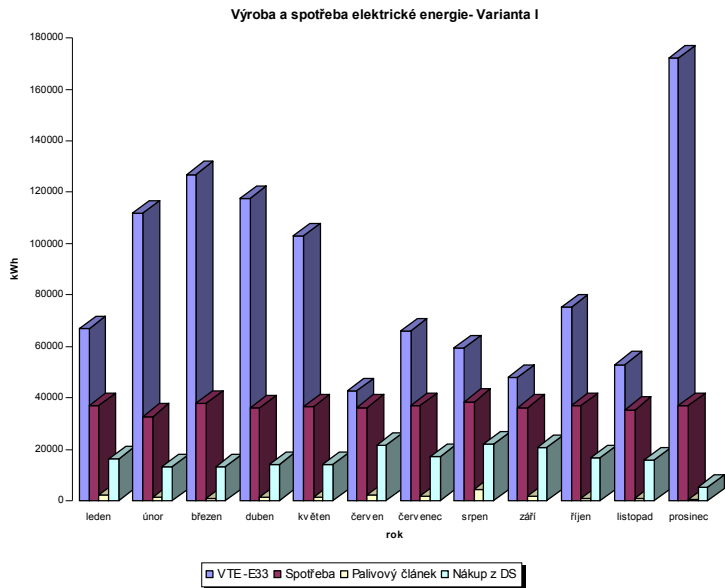
Veličina	Varianta I	Podíl	Varianta II	Podíl	Varianta III	Podíl	Varianta IV	Podíl
<b>Výroba vodíku</b>	<b>(kg/rok)</b>	<b>(%)</b>	<b>(kg/rok)</b>	<b>(%)</b>	<b>(kg/rok)</b>	<b>(%)</b>	<b>(kg/rok)</b>	<b>(%)</b>
Elektrolyzér	3 572	100%	3 447	100%	6 960	100%	8 389	100%
<b>Spotřeba vodíku</b>	<b>kg/rok</b>	<b>Podíl</b>	<b>kg/rok</b>	<b>Podíl</b>	<b>kg/rok</b>	<b>Podíl</b>	<b>kg/rok</b>	
Palivový článek	1 100	39%	3 251	100%	4 611	72%	8 077	100%
Vodíková spotřeba	1 752	61%	0	0%	1 752	28%	0	0%
<b>Celkem</b>	<b>2 852</b>	<b>100%</b>	<b>3 251</b>	<b>100%</b>	<b>6 363</b>	<b>100%</b>	<b>8 077</b>	<b>100%</b>
<b>Výrobní cena H2</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Varianta I</b>	<b>Varianta II</b>	<b>Varianta III</b>	<b>Varianta IV</b>			
COH	\$/kg	11,66	10,46	14,62	13,11			
<b>Vodíková nádrž</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Varianta I</b>	<b>Varianta II</b>	<b>Varianta III</b>	<b>Varianta IV</b>			
Kapacita	kg	800	350	800	350			
Uložení ve formě energie	kWh	26 667	11 667	26 667	11 667			
akumulační doba	hod	533	233	533	233			

Tab. č. 4 Výroba a spotřeba vodíku v systému vítr-vodík při dané roční rychlosti větru

Měsíc	Naměřená rychlost větru	AC spotřeba	Vodík. Spotřeba	VTE	PČ	Nákup z DS	Prodej do DS	Nevyužitá energie z VTE	ELY. vstupní energie	ELY. výstup	Akumul. vodíku - průměr	COH	COE	NPC
	m/s	kWh	kg/hr	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kg/hr	kg	\$/kg	\$/kWh	\$
leden	3,06	36 954,7	148,8	66 736,5	2 088,8	16 312,4	24 830,3	5 056,2	32 986,3	710,8	243,6	11,66	0,30	2 154 620
únor	3,70	32 767,9	134,4	111 856,1	1 154,8	13 267,1	29 503,2	47 624,1	22 138,4	477,1	711,4			
březen	3,91	37 876,4	148,8	126 962,7	931,4	13 350,2	41 751,3	56 460,8	9 369,2	201,9	793,3			
duben	3,73	36 168,6	144,0	117 581,7	1 416,3	14 161,5	34 582,7	56 345,9	10 429,1	224,7	792,7			
květen	3,52	36 450,3	148,8	103 116,1	1 409,4	14 221,5	31 418,4	45 639,5	10 555,4	227,5	795,3			
červen	2,51	36 320,9	144,0	42 533,7	2 116,1	21 487,7	13 828,0	9 651,4	12 259,7	264,2	771,4			
červenec	3,04	36 999,2	148,8	65 941,1	1 642,8	17 109,4	23 876,3	18 343,6	11 293,6	243,4	790,4			
srpen	2,63	38 505,8	148,8	59 386,8	4 395,0	21 951,4	18 596,7	17 198,8	18 369,8	395,8	760,1			
září	2,60	36 317,4	144,0	47 963,1	1 822,2	20 601,0	15 595,0	11 485,9	11 306,7	243,6	779,2			
říjen	3,07	37 133,5	148,8	75 360,0	935,7	16 585,1	25 961,9	25 112,3	9 793,7	211,0	794,2			
listopad	3,01	35 394,1	144,0	53 018,2	925,9	15 832,5	19 517,4	12 809,9	9 057,7	195,2	790,6			
prosinec	4,80	37 111,6	148,8	172 264,4	454,7	5 354,8	52 661,2	83 954,0	8 182,6	176,3	796,1			
<b>Celkem</b>	<b>3,3</b>	<b>438 000,6</b>	<b>1 752,0</b>	<b>1 042 720,3</b>	<b>19 293,2</b>	<b>190 234,5</b>	<b>332 122,4</b>	<b>389 682,4</b>	<b>165 742,1</b>	<b>3 571,5</b>	<b>734,9</b>			

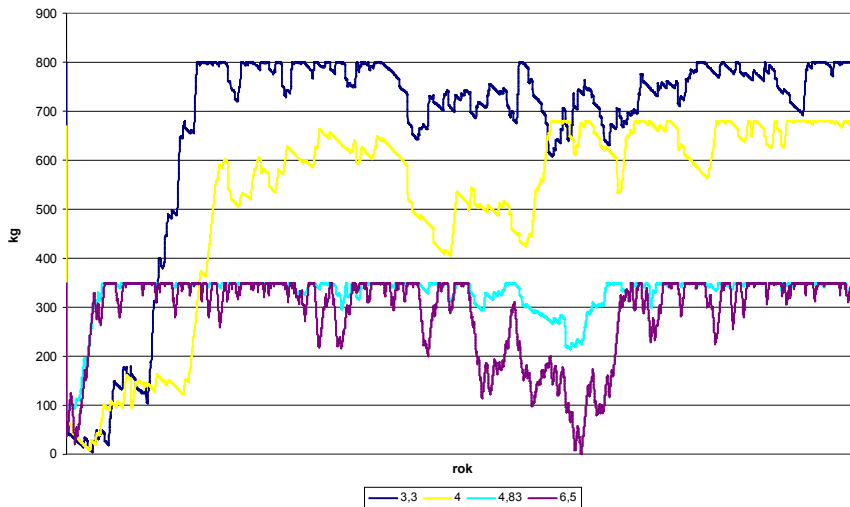
Tab. č. 5 Celkové shrnutí měsíčních výstupních hodnot systému vítr-vodík pro variantu č. I



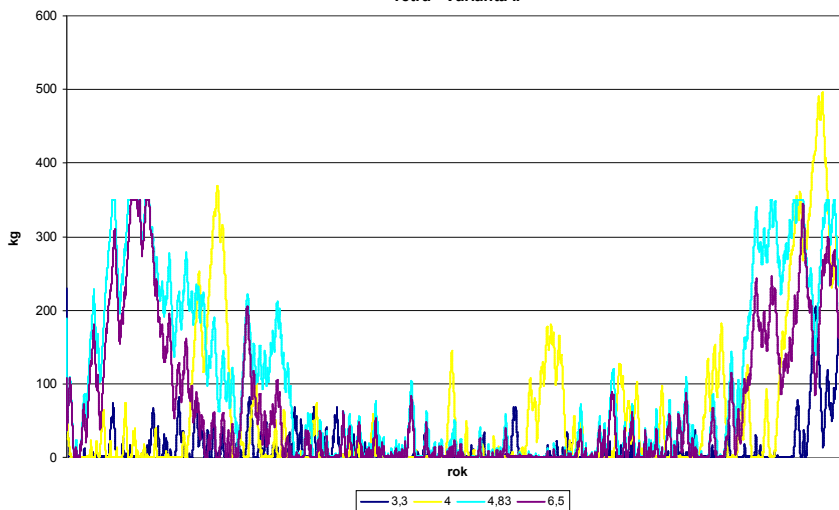


*Graf č. 6 a č. 7 Celkové shrnutí výroby a spotřeby elektrické energie*

Průměrné hodnoty akumulace vodíku ve vodíkové nádrži pro zvolené průměrné rychlosti větru - Varianta I

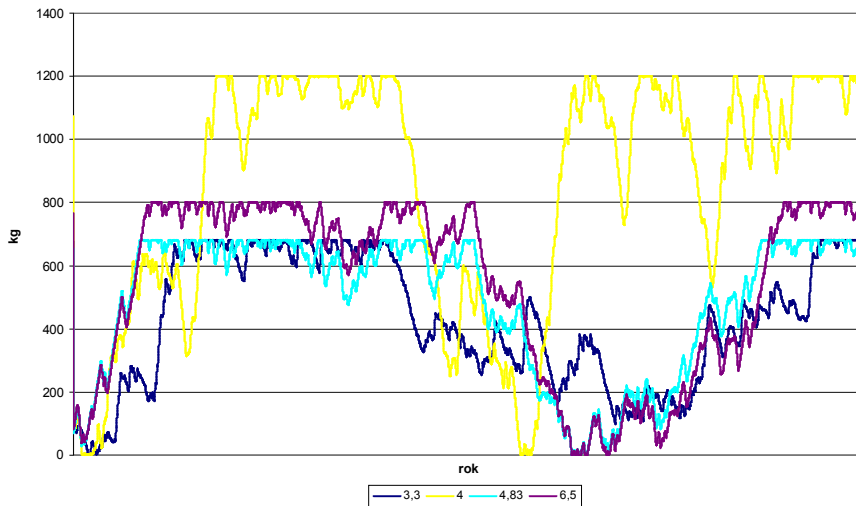


Průměrné hodnoty akumulace vodíku ve vodíkové nádrži pro zvolené průměrné rychlosti větru - Varianta II

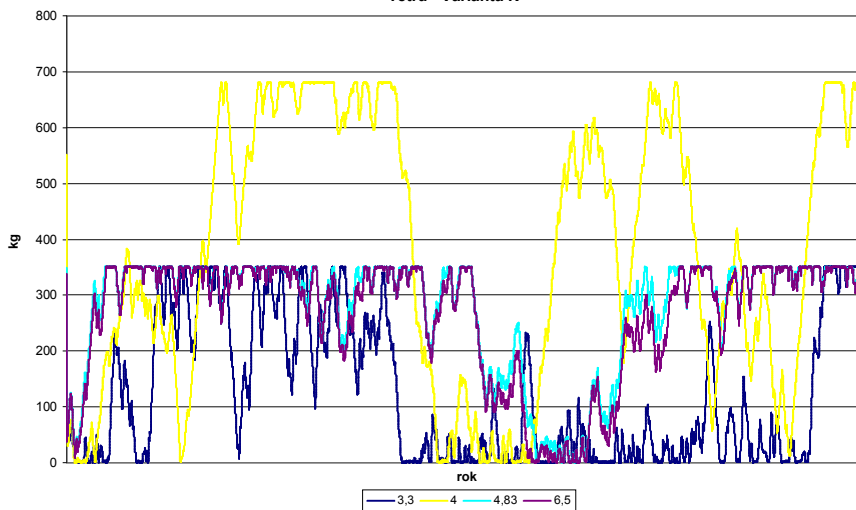


Graf č. 8 a č. 9 Průběh akumulace při různých průměrných rychlostech větru

Průměrné hodnoty akumulace vodíku ve vodíkové nádrži pro zvolené průměrné rychlosti větru - Varianta III

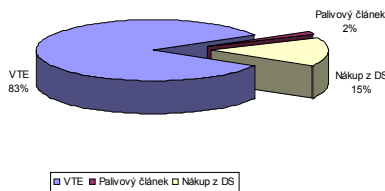


Průměrné hodnoty akumulace vodíku ve vodíkové nádrži pro zvolené průměrné rychlosti větru - Varianta IV

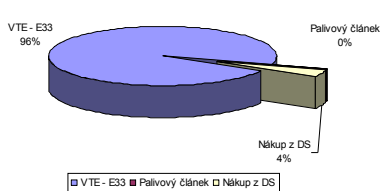


Graf č. 10 a č. 11 Průběh akumulace při různých průměrných rychlostech větru

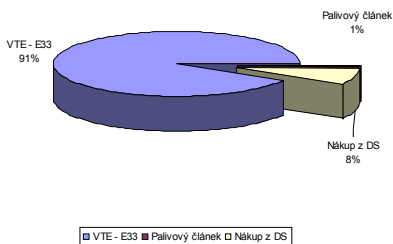
Podíl zdrojů na výrobě elektrické energie - (3,3 m/s)



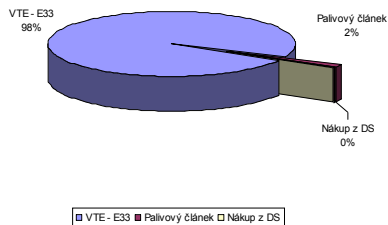
Podíl zdrojů na výrobě elektrické energie- (4,83 m/s)



Podíl zdrojů na výrobě elektrické energie- (4,0 m/s)

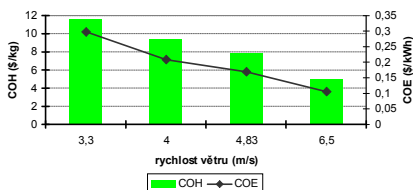


Podíl zdrojů na výrobě elektrické energie- (6,5 m/s)

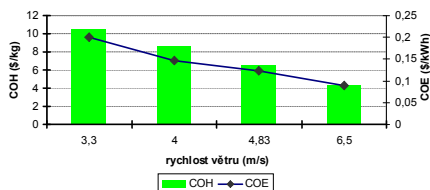


Graf č. 12 Podíl výroby elektrické energie z jednotlivých hlavní zdrojů systému vítr vodík pro různé rychlosti větru – Varianta I

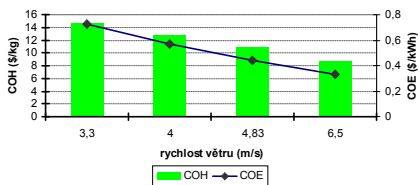
Vývoj cen - varianta I



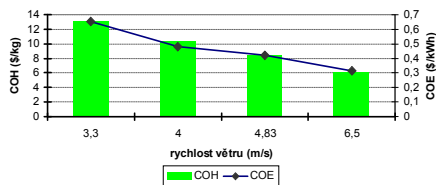
Vývoj cen - varianta II



Vývoj cen - varianta III



Vývoj cen - varianta IV



Graf č. 13 Výrobní ceny elektrické energie (COE) a výrobní ceny vodíku (COH)

## 8. ZÁVĚR

Hlavní myšlenkou této práce bylo popsat, navrhnout a optimalizovat výrobu vodíku z přebytečné elektrické energie vyrobené větrnými elektrárnami a nalézt optimální strukturu hlavních prvků (množství a velikost) systému vítr-vodík pro konkrétní zadané vstupní hodnoty rychlostí větru ve zvolených lokalitách a variantách zapojení hlavních prvků tohoto systému. K tomuto účelu jsem vytvořil v programu EXCEL model pro výpočet výstupních hodnot tohoto systému. Takto vyrobený vodík je možno využít k dalšímu zpracování včetně přeměny na elektrickou energii v palivovém článku a následnému napájení distribuční soustavy v období s nízkou výrobou elektrické energie z větrných elektráren. Motivace pro použití akumulace energie je, ta že větrná energie je nestabilní a obecně těžko předvídatelná, a že výkonné zdroje větrné energie se často vyskytují v oblastech s omezenou kapacitou sítě. V práci jsou použita reálná data, která jsem obdržel od příslušných meteorologických stanic. Nedílnou součástí je výpočet výrobní ceny elektrické energie. Jako doplněk jsem vypočítal i cenu vyrobeného vodíku. Jelikož jsem při modelaci výroby vodíku počítal i s lokalitou ČR, použil jsem pro informaci výstupní data k výpočtu výkupní ceny elektrické energie z palivového článku, tak aby byla dodržena 15 - letá návratnost celkové investice do systému.

Celá práce je rozdělena do dvou hlavních částí. První část práce se zabývá teoretickým popisem, kdy v kapitole č. 3 jsem se zaměřil na vysvětlení pojmu obnovitelné zdroje, kde jsem v krátkosti popsal rozdělení těchto zdrojů podle primární energie. V další kapitole č. 4 jsem se již zaměřil na jeden typ obnovitelného zdroje a tím jsou větrné elektrárny, kde jsem vysvětlil, co to vlastně jsou větrné elektrárny, jak fungují, jejich historii v ČR a ve světě. V druhé části této kapitoly jsem popsal dva nejvíce používané typy, kdy jeden byl také použit k modelování optimálního provozu systému vítr-vodík. Důležité je u tohoto zvoleného zdroje uvést postup a problémy při připojování do distribuční soustavy. Nedílnou součástí práce je zmínka o vodíkovém hospodářství, čímž je myšlena možná výroba vodíku, jeho doprava a následné skladování v různých typech vodíkových nádrží. Vyrobený vodík může být vyroben v místě větrných elektráren, nebo může být elektrická energie vedena do místa, kde jsou umístěny elektrolyzéry. V kapitole č. 7 jsem se zaměřil na popis samotného systému. Popsal jsem zde hlavní princip systému vítr-vodík a jeho hlavních prvků. V kapitole 8 byl uveden návrh simulačních modelů systému vítr-vodík včetně jeho hlavních prvků. Tyto modely jsou vhodné pro získání informací o optimálním provozu a hlavních prvků tohoto systému. V modelu jsou použity, stochastické vlastnosti rychlosti větru, které slouží jako základ pro hodnocení schopnosti akumulace energie při vyhlazování výkyvů větrné energie. Metoda je užitečná pro odhad minimální přenosové kapacity, která je nutná, tak aby se zabránilo rozptýlení větrné energie. V případech, kdy vyrobený vodík není použit jako palivo pro dopravu, ale pouze pro výrobu elektrické energie, měl by být hodnocen s ostatními akumulátory pro akumulaci větrné energie, jako jsou například přečerpávací vodní elektrárny. Při použití akumulace energie na trzích s elektřinou, je důležité, aby elektrická účinnost akumulátoru byla vysoká. Skladování energie v kombinaci s nástroji pro předpovědi větru otevírá možnosti využití různých cen elektrické energie, stejně jako snížení nákladů.

V praktické části, jak již bylo uvedeno dříve, jsem ukázal modelování systému vítr-vodík, kde byly k výpočtu použity počítačové programy HOMER a EXCEL, kdy jsem pomocí vytvořeného modelu v programu Excel vypočítal potřebné hodnoty. K výpočtu a modelaci byly použity reálná data rychlosti větru získaná z meteorologických stanic. Pro porovnání jsem vybral různé lokality s danými hodnotami rychlosti větru. Dále byly uvedeny čtyři možné formy zapojení hlavních prvků (se zapojením do DS x izolovaná soustava). Modelování výstupních hodnot bylo provedeno také pro lokalitu ČR, kdy byl namodelován optimální provoz systému vítr – vodík. Výsledné hodnoty jsou shrnuty do příslušných tabulek a přiložených grafů. Pro porovnání jsem uvedl další zvolené lokality větrných elektráren, s rozdílnými rychlostmi větrné energie. Z důvodu velkého počtu dat, jsou uvedeny již pouze výsledné tabulky s výstupními hodnotami. Příslušné grafy jsou uvedeny v příloze F.

Zde je také uvedeno grafické srovnání mezi jednotlivými rychlostmi větru, kde je uveden například průběh akumulace vodíku v palivových nádržích při různých rychlostech větru a zvolených variantách zapojení. Jedním z hlavních výstupních hodnot je cena vyrobené elektrické energie a vodíku. Shrnutí těchto variant je uvedeno v podkapitole č. 9.5.2.5. Pro doplnění jsem pro lokalitu ČR vypočetl výkupní cenu elektrické energie z palivového článku a to tak, aby byla dodržena 15- letá návratnost investice.

## SEZNAM V TEŽÍCH POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Ackermann T., Garner K. and Gardiner A. (1999) Embedded wind generation in weak grids - economic optimisation and power duality simulation. *Renewable Energy* 18, 205-221.
- [2] Vogstad K.-O. (1997) Energy resource planning - A system engineering approach. Master Thesis. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- [3] Carpinelli G., Celli G., Pilo F. and Russo A. (2001) Distributed generation siting and sizing under uncertainty. In *Proc. 2001 IEEE Porto Power Tech Conf.*, Porto, Portugal.
- [4] European Commission (1999) *Wind energy - The facts*. ISBN 92-828-4571-0. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- [5] Zaininger H.W. and Barnes P.R. (1997) Applying wind turbines and battery storage to defer Orcas Power and Light Copany distribution circuit upgrades. ORNL-Sub/96-SV115/1. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN - USA.
- [6] Sørensen J. and Bugge O. (2002) Wind-hydrogen system on the island of Røst, Norway. In *Proc. 14th World Hydrogen Energy Conf.*, Montreal, Canada.
- [7] Tande J.O.G., Bindner H. and Murphy P. (1997) Power control for wind turbines in weak grids. In *Proc. 1997 European Wind Energy Conf.*, Dublin, Ireland.
- [8] Persaud S., Fox B., Flynn D. and Hodgkinson G. (1999) Optimising wind power penetration in rural distribution networks. In *Proc. 1999 European Wind Energy Conf.*, Nice, France. p 805-808.
- [9] Korpås M. : Distributed Energy Systems with Wind Power and Energy Storage. Disertační práce. Trondheim : Norwegian University of Science and Technology Faculty of Information Technology, Mathematics and Electrical Engineering, 2004. 217 s
- [10] <http://energie.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektriny>

## SEZNAM PRACÍ DISERTANTA VZTAHUJÍCÍCH SE K DISERTACI

- [1] Brettschneider, Z. - Taussig, T.: Perspective of Hydrogen Production. In Sborník z 3. vědeckého sympózia elektroenergetika 2005 [CD-ROM]. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2005, p. 1-24. ISBN 80-8073-305-8.
- [2] T. Taussig, "Palivový článek", POSTER 2005, 9th International Student Conference on Electrical Engineering, Prague, 2005.
- [3] Kyncl, J. - Kubín, P. - Taussig, T.: Palivové články a jejich význam v budoucích energetických systémech. Energetika. 2005, roč. 55, č. 7, s. 219-223. ISSN 0375-8842.
- [4] Taussig T., Palivové články a možnosti jejich využití v energetice, odborný článek v časopise Pro-Energy, Praha 01/2006
- [5] Taussig T., "Fuel cells and possibility of their use in power engineering", In Sborník z 3. vědeckého sympózia elektroenergetika 2005 [CD-ROM]. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2005
- [6] T. Taussig, Palivové články a možnosti jejich použití v energetice. In Electric Power Engineering 2005 [CD-ROM]. Ostrava: VSB-TUO, 2005, ISBN 80-248-0842-0
- [7] Taussig, T. - Tůma, J.: Wind Power and Hydrogen Production. In Volume of Abstracts of the 1st International Scientific Conference OZE 2010. Bratislava: Slovak University of Technology, 2010, p. 66-67. ISBN 978-80-89402-21-2.
- [8] T. Taussig: Použití palivových článků k výrobě elektrické energie. In Sborník z 3. vědeckého sympózia elektroenergetika 2005 [CD-ROM]. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2005
- [9] T. Taussig: Pravděpodobnostní model akumulace elektrické energie z větrných elektráren, Proceedings of the 12th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2011. VŠB Ostrava, 2011, ISBN 978-80-248-2393-5
- [10] Taussig, T. - Tůma, J.: Wind Power and Hydrogen Production, abstrakt, International Youth Conference on Energetics 2011, Leiria, Portugal

Podíl spoluautorství u všech uvedených publikací je dělen mezi jednotlivé autory vždy rovným dílem. Na uvedené publikace nebyly registrovány žádné ohlasy ani recenze.



## SUMMARY

The theme of this doctoral thesis is the issue of excess energy storage in power systems operating with wind farms and finding the optimal operation for hydrogen production and its further use. Wind power is irregular and generally difficult to predict, and a powerful source of wind energy is often found in areas with limited capacity of distribution networks. Additionally, accumulation of energy in the form of hydrogen allows to obtain a clean fuel for transport. The aim of this study was to evaluate how the energy storage systems should be designed and operated in order to increase stability in the electricity grid. For this purpose stochastic optimization and simulation models were created. Chapter 8.2 presents a general simulation model of wind-hydrogen system. Electrolytic hydrogen is used either as fuel for transportation and for power generation in fuel cells. The proposed model is useful for evaluating how to store hydrogen for increasing penetration of wind power in areas with limited or no transmission capacity of distribution network. The accumulation of energy in hydrogen is used for balancing wind power fluctuations in a given period. The method described in the work is based on the statistical properties of wind speed and wind energy conversion. In on-line operation energy accumulation is important to minimize the departure between production, schedule and the actual system performance. Using the heat of fuel cells and electrolytic oxygen as a by-product is also beneficial. The simulation of hydrogen production optimization shows that the simulations are useful for systems connected to the DS as well as for isolated systems. For isolated systems, the method allows to minimize the use of backup power and ensure safe delivery of hydrogen fuel. Systems connected to the DS can be used to maximize profits from the operation of the energy market. In order to exploit the possibilities of energy storage in electricity markets, it is essential that the electrical efficiency of this accumulation is as high as possible. Therefore, the hydrogen becomes an economically capable carrier of life energy and accumulation medium for wind energy.

## RESUMÉ

Tématem této práce je problematika akumulace přebytečné energie v energetických systémech pracujících s větrnými elektrárnami a nalezení optimálního provozu pro výrobu vodíku a jejího dalšího využití. Větrná energie je nepravidelná a obecně těžko předvídatelná, výkonné zdroje větrné energie se často vyskytují v oblastech s omezenou kapacitou distribučních sítí. Kromě toho, akumulace energie ve formě vodíku umožňuje, získat čisté palivo pro dopravu. Cílem této práce bylo zhodnotit, jak by systémy akumulace energie měly být konstruovány a provozovány za účelem zvýšení stability v elektrizační soustavě. Pro tento účel byly vytvořeny optimalizační a pravděpodobnostní simulační modely. Kapitola 8.2 představuje simulační model obecného systému vítr-vodík. Elektrolytický vodík se používá buď jako palivo pro dopravu nebo pro výrobu elektrické energie v palivových článcích. Model je užitečný pro vyhodnocení akumulace vodíku, pro zvýšení penetrace větrných elektráren v oblastech s omezenou nebo žádnou přenosovou kapacitou distribuční sítě. Akumulace energie do vodíku se tak využije pro vyrovnávání kolísání větrné energie v určitém období. Metoda popsaná v práci vychází ze statistických vlastností rychlosti větru a přeměny větrné energie. Při on-line provozu je akumulace energie důležitá k minimalizování odchylky mezi výrobou, harmonogramem a skutečným výkonem systému. Využití tepla palivových článků a elektrolytického kyslíku jako vedlejšího produktu je také přínosem. Simulace optimalizace výroby vodíku ukazují, že dané simulace jsou výhodné pro systémy připojené do DS stejně jako pro izolované systémy. U izolovaných systémů, metoda umožňuje minimalizovat použití záložního napájení a zajistí bezpečnou dodávku vodíkového paliva. Systém připojený k DS může být použit pro maximalizaci zisku z provozu na energetickém trhu. Za účelem využití možnosti akumulace energie na trzích s elektrinou, je nezbytné, aby elektrická účinnost této akumulace byla tak vysoká, jak je to jen možné. Vodík se tak stává ekonomicky životaschopným nosičem energie a akumulacím médiem pro větrnou energii.

