



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

VĚTRNÁ ENERGIE

WIND ENERGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ONDŘEJ KRÁL

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR KRACÍK

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Ondřej Král

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Větrná energie

v anglickém jazyce:

Wind energy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Náplní práce je popsat možnosti využití větrné energie a porovnat výrobu elektrické energie s dalšími zdroji.

Cíle bakalářské práce:

- popište základní konstrukci větrné elektrárny
- popište základní fyzikální principy transformace energie ve větrné elektrárně
- porovnejte výrobu elektrické energie z větrné elektrárny s jinými zdroji

Seznam odborné literatury:

KHALIGH, Alireza a Omer C ONAR. Energy harvesting: solar, wind, and ocean energy conversion systems. Boca Raton: CRC Press, c2010, xv, 350 s., [16] s. bar. příl. ISBN 978-1-4398-1508-3.

CROME, Horst. Technika využití energie větru: svépomocná stavba větrných zařízení. 1. české vyd. Ostrava: HEL, 2002, 144 s. ISBN 8086167194.
firemní literatura

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Kracík

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 15.10.2013

L.S.

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

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá větrnou energetikou. První kapitola se zaměřuje na základní typy konstrukcí větrných elektráren, jejich rozdělení a popis hlavních částí. Základní fyzikální principy, pomocí nichž se vyrábí elektrická energie, představuje pak navazující kapitola, která také pojednává o životnosti větrných elektráren. V závěrečné kapitole je popsán vývoj větrných elektráren v průběhu dějin, větrná energie se v ní porovnává s dalšími zdroji energie a nakonec se kapitola věnuje otázce energetické návratnosti větrných elektráren.

Klíčová slova

Větrná energie, větrné elektrárny, konstrukce větrných elektráren, energetický mix, energetická náročnost, energetická návratnost.

Abstract

This bachelor's thesis discuss wind energy sector. The first chapter focuses on basic construction types of wind power plants, their classification and description of the main parts. Basic physical principles by which electrical energy is produced, presents the next section, which deals with the lifetime of wind turbines, too. The final chapter describes the development of wind power in history, wind energy is here compared with other energy sources, and finally it is dedicated to matter of wind turbines' energy payback.

Key words

Wind energy, wind turbines, wind turbines construction, energy mix, energy performance, energy payback.

Bibliografická citace

KRÁL, O. *Větrná energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 61 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Kracík.

Prohlášení autora o původu práce

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Větrná energie* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

30. 5. 2014

Datum

Ondřej Král

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Petru Kracíkovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

Velmi děkuji také své rodině za podporu při studiu.

Obsah

ÚVOD	- 16 -
1 ZÁKLADNÍ KONSTRUKCE VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	- 17 -
1.1 Typy větrných elektráren	- 17 -
1.1.1 Netradiční větrné elektrárny	- 22 -
1.2 Rozdělení z hlediska výkonnosti	- 23 -
1.3 Hlavní části větrné elektrárny	- 25 -
1.3.1 Popis a výroba rotoru	- 25 -
1.3.2 Popis a výroba strojovny	- 27 -
1.3.3 Popis a výroba stožáru	- 29 -
1.3.4 Základ VtE	- 32 -
2 ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ PRINCIPY TRANSFORMACE ENERGIE VE VĚTRNÉ ELEKTRÁRNĚ	- 35 -
2.1 Princip přeměny kinetické energie na mechanickou	- 35 -
2.1.1 Kinetická energie větru	- 35 -
2.1.2 Betzův zákon	- 35 -
2.1.3 Princip vzniku vztlaku a točivého momentu	- 37 -
2.2 Princip přeměny mechanické energie na elektrickou	- 40 -
2.3 Životnost VtE a faktory, které ji ovlivňují	- 42 -
3 POROVNÁNÍ VÝROBY ELEKTRICKÉ ENERGIE Z VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY S JINÝMI ZDROJI	- 43 -
3.1 Historické hledisko (vývoj)	- 43 -
3.2 Energetický mix v ČR, EU a ve světě	- 44 -
3.3 Ekologická efektivita	- 48 -
ZÁVĚR	- 52 -
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	- 53 -
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	- 58 -
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	- 60 -

Úvod

Větrná energetika je rychle se rozšiřujícím průmyslovým odvětvím. Větrná energie patří mezi obnovitelné zdroje energie, a tak se s postupem času na ni bude soustředit značná pozornost, protože vyčerpání neobnovitelných zdrojů energie je nevyhnutelné. To si dnes již velké procento populace uvědomuje. Vedle toho je také velmi aktuální otázka ekologického chování lidstva. Člověk za posledních sto let zvýšil produkci škodlivých plynů tak extrémně, že následky jsou vidět i na životním prostředí celého světa.

Nikdy v minulosti nebyla ekologická šetrnost v mnoha odvětvích lidského chování tak silným hlediskem, jako je dnes. Stejně tak se tato záležitost dotýká výroby elektrické energie z větrných elektráren, které už mají řady příznivců, ale i odpůrců s mnoha poměrně rozumnými argumenty, proč by se větrná energie měla či neměla podporovat. Najít ryze objektivní pohled na věc může být ještě dlouho velmi náročný úkol. Je jasné, že časem se optimální řešení situace najde, avšak hledat se musí již teď.

Všechny technologie, které vyrábějí elektřinu, ji ovšem taktéž spotřebovávají. Často navíc produkují skleníkové plyny, které ovlivňují více či méně jak životní prostředí, tak člověka samotného. Při hodnocení energetické efektivity výroby elektrické energie ve větrné elektrárně je nutné zhodnotit komplexně celý její životní cyklus. K tomu je nutné posoudit jak investiční, tak operační náklady spojené s výrobním procesem.

1 Základní konstrukce větrné elektrárny

1.1 Typy větrných elektráren

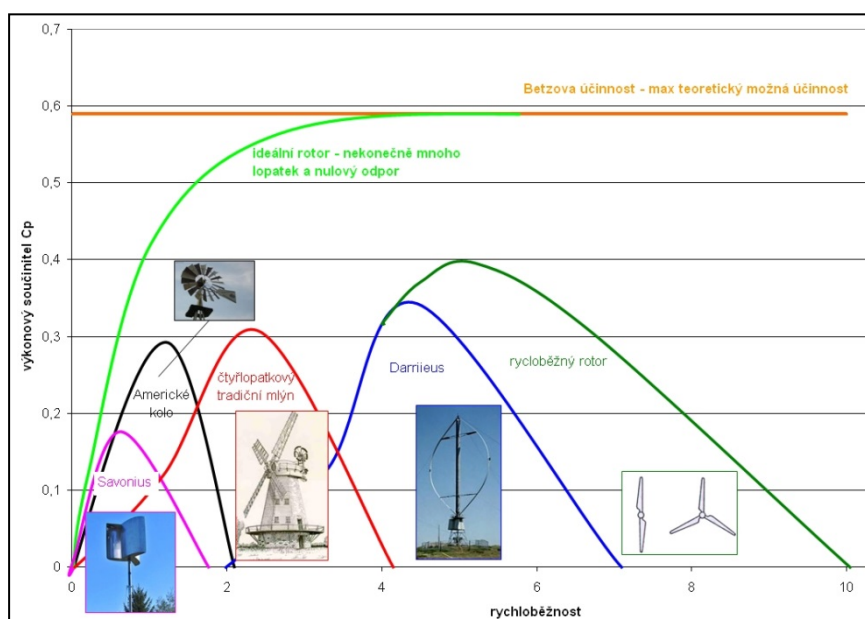
Větrné elektrárny (dále jako VtE) můžeme rozdělit podle několika hledisek.

Nejzákladnější rozdělení vychází z principu vzniku sil na rotoru větrné elektrárny. Podle tohoto hlediska se elektrárny dělí na elektrárny odporového typu a elektrárny využívající vztakovou sílu na lopatce rotoru či listu vrtule [1].

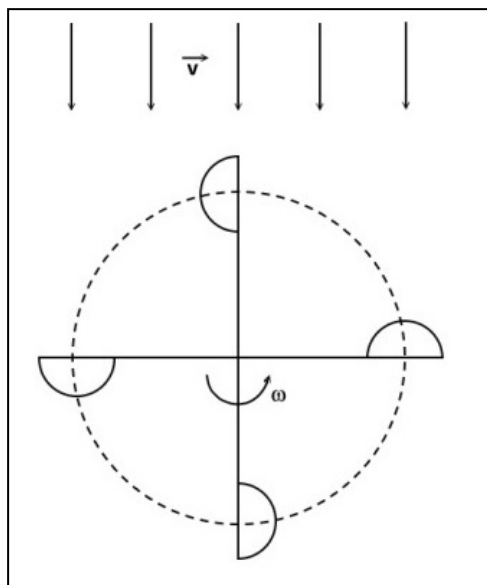
Dále můžeme větrné elektrárny odlišit podle toho, jaká je hodnota jejich rychloběžnosti či výkonového součinitele. Rychloběžnost se značí řeckým písmenem λ (v některé literatuře [3] také písmenem μ) a je definována jako poměr rychlosti hrotů rotorových listů (lopatek) u $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ a rychlosti větru v [2]:

$$\lambda = \frac{u}{v} \quad (1)$$

Výkonový součinitel C_p [-] udává účinnost využití energie větru. Tento součinitel má hraniční hodnotu, která se nazývá Betzova účinnost. Její hodnotu, která je přibližně 59,3 %, vypočítal již v roce 1926 Albert Betz. Jedná se o teoretický nejvyšší možný stupeň využití větrných zařízení, kterého je v praxi však těžké dosáhnout kvůli tepelným ztrátám v ložiscích a převodovce, ztrátám energie v generátoru a také z důvodu neideálního křídla rotoru [3].



Obr. 1: Rozdělení rotorů větrných elektráren dle rychloběžnosti rotorů: [2]



Obr. 2 : Schéma anemometru [4]



Obr. 3: Anemometr [22]

Z hlediska praxe je vhodné rozdělit větrné elektrárny na elektrárny s větrnými motory vrtulového typu, které mají vodorovnou osu otáčení zachytávající axiální směr proudění větru a musí se být neustále do tohoto směru natáčený, a na elektrárny s větrnými motory rotorového typu, kdy osa otáčení je svislá a zachytává radiální směr proudění větru, který pak většinou není potřeba sledovat [1].

Z těchto hledisek tedy můžeme rozlišit již konkrétní základní typy větrných elektráren, které se v průběhu let vyvinuly až do dnešní podoby:

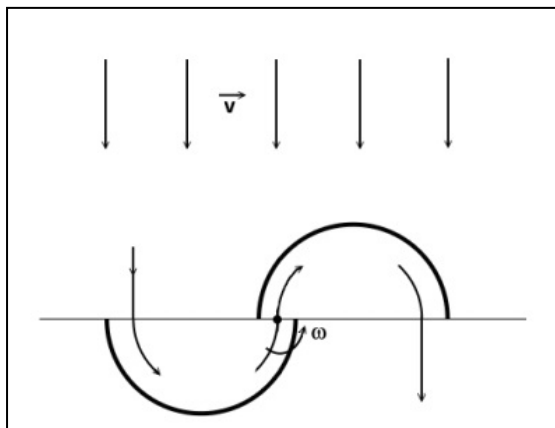
Miskový anemometr neplní úplně funkci větrné elektrárny, ale reprezentuje klasický případ větrného motoru odporového typu. Zároveň se jedná o rotorový typ větrného motoru, jehož rychloběžnost se pohybuje kolem hodnoty 1, díky čemuž se toto zařízení používá pro měření rychlosti proudění větru [1].

Misky mají tvar duté polokoule a využívají toho, že odpor, kladený dutinou misky proti působení větru, může být až čtyřikrát větší, než odpor, který klade vypuklá část misky. Reálná hodnota poměru odporů je však nižší z důvodu vlivu obvodové rychlosti lopatek při rotaci. Díky rozdílným odporům vzniká moment, který uvádí rotor do pohybu úhlovou rychlostí ω [1].

Účinnost tohoto zařízení je velmi malá, asi 5 %. Zbytek protékající energie se na hřídel rotoru nepřevádí, ale spotřebovává se na rozvření proudu a vzniku tepla, nebo zůstává zcela nevyužit [1].

Savoniova turbína je větrná elektrárna rotorového typu, která by se z hlediska principu vzniku sil na lopatkách dala označit za typ přechodový. Lopatky zde nejsou na rozdíl od anemometru polokulové, ale poloválcové a současně se překrývají přes osu rotace. To způsobuje, že vzduch proudí z jedné lopatky do druhé, čímž vznikají aerodynamické síly jako důsledek změny hybnosti protékajícího vzduchu [1].

Tato turbína disponuje dvěma až třemi lopatkami a roztočí se již při malé rychlosti větru, která je pak nižší, než je obvodová rychlost rotoru, díky čemuž se často využívá hlavně pro náběh Darrierova rotoru [7]. Její účinnost přeměny energie proudícího vzduchu se podle obr. 1 pohybuje v hodnotách do 20 %.



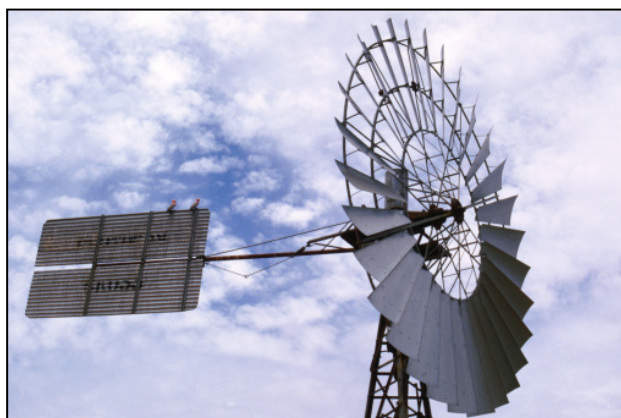
Obr. 4: Schéma Savoniova větrného motoru [4]



Obr. 5: Savoniova turbína s estetickým vzhledem [5]

Větrné kolo lidé znají hlavně z westernových filmů. Sloužilo především ale k čerpání vody, a ne k výrobě elektřiny, proto zde nemůžeme použít pojem elektrárna. Je však prvním větrným zařízením, které pracuje na principu vztaku. Maximální účinnost této větrné turbíny se za dobrých podmínek pohybuje podle obr. 1 mezi 20 až 30 %.

Jedná se o pomaloběžný stroj s velkým počtem lopatek o velké ploše, které jsou jednoduše vytvořeny z ohnutých plechů, díky čemuž kolo dosahuje sice nízkých otáček, zato má však poměrně vysoký rozběhový výkon. Tato zařízení nejsou vhodná pro výrobu elektřiny, neboť elektrické generátory vyžadují vysokou frekvenci otáček (asi 800 až 3000 ot/min), kterých se špatně dosahuje i za pomoci velkých převodů, jež vykazují vysoké ztráty energie [3].



Obr. 6: Klasické větrné kolo [5]

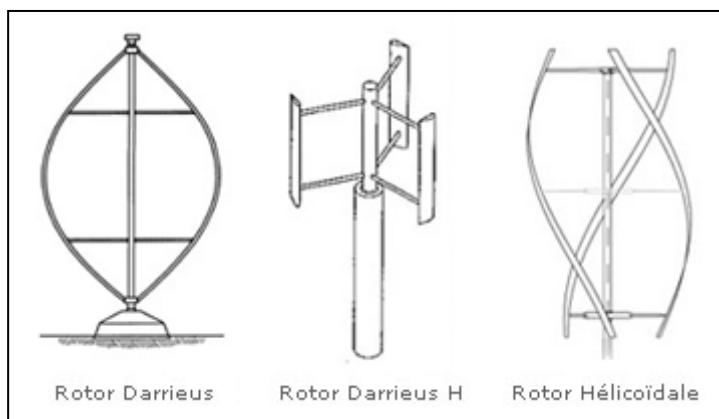
Dalším větrným motorem, opět však ne větrnou elektrárnou, který využívá vztlaku vzduchu, je, nebo spíš byl, čtyřlopatkový plachtový větrný mlýn. Ten se vyznačuje vrtulí se čtyřmi lopatkami a má podobnou účinnost přeměny energie větru jako větrné kolo – obr. 1. Podle toho, jestli se do směru natáčí celé tělo větrného mlýnu, nebo pouze jeho střecha s vrtulí, rozlišujeme mlýn sloupový a holandský. Dnes má toto tradiční zařízení význam hlavně v Nizozemí. Na území České republiky je stále 16 částečně dochovaných větrných mlýnů sloupového typu a 56 holandského typu [24].



Obr. 7: Větrný mlýn holandského typu [6]

Větrná elektrárna s rotorem typu Darrieus má vertikálně orientovanou osu otáčení. Pracuje díky aerodynamicky tvarovaným lopatkám na základě vztlaku vzduchu a dosahuje účinnosti až 35 % - obr. 1. Svislý směr osy otáčení dává zařízení nezávislost práce na směru větru a umožňuje umístit generátor elektrické energie blízko u země. Vzhledem k tomu, že náběh otáčení není možné realizovat při malých rychlostech větru, kdy rotor elektrárny ještě není v pohybu, využívá se kombinace se Savoniovou turbínou, která náběh do potřebných otáček efektivně zajistí [7, 8].

Tento typ větrné elektrárny začíná v poslední době nabírat na významu, protože díky menším rozměrům a především nižší hlučnosti je možné stavět tyto elektrárny i v obydlených oblastech [5].

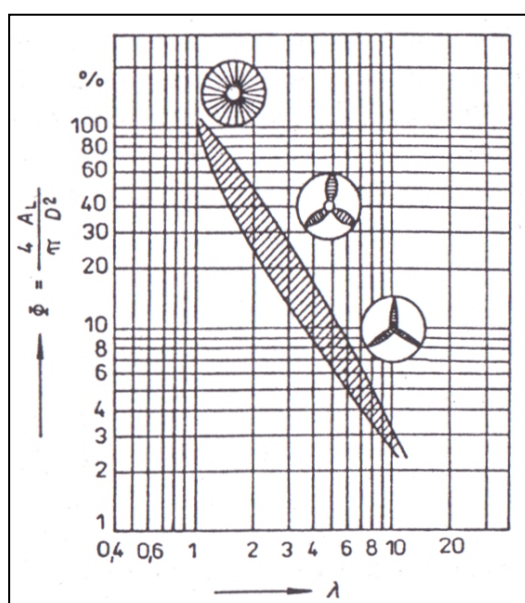


Obr. 8: Různé typy Darrierova rotoru [8]

Nejefektivnější typ VtE je větrná elektrárna s rychloběžnou vrtulí, právě proto je nejrozšířenější na světě. Pracuje na principu vztlaku vzduchu a je charakterizován svým vrtulovým rotorem s vodorovnou osou otáčení a s aerodynamickými listy, které jsou podobného tvaru jako lopatky leteckých vrtulí [5].

Jedním z hledisek rozdělení tohoto typu větrných elektráren je počet listů rotoru. V průběhu vývoje se testovaly jednolísté až čtyřlísté vrtule, ze kterých se jako nejvýhodnější ukázaly vrtule třílísté [2].

S počtem listů souvisí opět koeficient rychloběžnosti. Čím vyšší tento koeficient je, tím menší je optimální počet listů. Z toho vyplývá, že jednolísté vrtule pracují při vyšších otáčkách než vrtule třílísté. Při nižších otáčkách by jedna lopatka nebyla schopna transformovat energii větru v celém průřezu rotoru požadovanou účinností. Nespornou výhodou jednolísté vrtule jsou nižší pořizovací náklady (přestože je potřeba použít protizávaží), avšak při zvyšujícím se počtu otáček rychle roste hladina hluku [3, 35].



Obr. 9: Graf závislosti procentuálního poměru vyplnění plochy rotoru Φ [-] (A_L je plocha rotoru, D [m] je průměr rotoru) na rychloběžnosti [2]

Dvoulísté vrtule mají zase tu nevýhodu, že zejména u velkých větrných elektráren není rychlost větru na ploše rotoru konstantní, čímž je celý rotor příliš dynamicky namáhán, a snižuje se tak jeho životnost. Nestálá rychlost větru je způsobena rozdílnou výškou od zemského povrchu a do jisté míry také vzdušnými turbulencemi, které jsou důsledkem krajinné nerovnosti [2].

Třílísté vrtule jsou lépe vyvážené a proti namáhání mnohem odolnější [2]. Přitom je jejich účinnost poměrně uspokojivá a dosahuje hodnoty až 45 % [34]. Aby se také co nejvíce využilo povětrnostně výhodných oblastí a snížily se náklady na projektování a výstavbu, sdružují se velké větrné elektrárny do skupin, tzv. větrných farem (větrných parků) [9].

Právě této nejčastější variantě větrné elektrárny bude v následující části práce věnována veškerá pozornost. Proto pod pojmem větrná elektrárna, pokud nebude řečeno jinak, bude myšlena větrná elektrárna s třílístou vrtulí.

Tyto větrné elektrárny můžeme jako samostatný celek rozdělit ještě do mnoha podskupin. Z hlediska polohy stavby na vnitrozemské (onshore) a pobřežní (offshore), na autonomní systémy (grid off - systémy nezávislé na rozvodné síti) a systémy dodávající energii do rozvodné sítě (grid on) [9], podle typu použitého generátoru, podle konstrukčního řešení, výkonu atd.

1.1.1 Netradiční větrné elektrárny

Vedle běžných konceptů větrných elektráren se stále vyvíjejí i nové netradiční typy, u kterých je snahou, aby vykazovaly vyšší účinnost, nižší náklady na stavbu či provoz, nebo byly ekologičtější. Často se jedná prozatím pouze o experimentální projekty, z nichž za zmínku stojí větrné čochy, stéblová větrná elektrárna nebo letící větrná turbína.

Větrné čochy jsou alternativou vrtulových turbín, které byly naprojektovány speciálně pro japonské pobřeží. Kruhová obruč kolem rotoru má několikanásobně zvýšit výkon elektrárny, která by se umístila na speciální plovoucí pontony [5].



Obr. 10: Testování větrných čoch v Japonsku [25]

Stéblová větrná elektrárna by vznikla na základě pozorování přírody a napodobovala by stébla trav, na která má vítr velký vliv. Energie by se generovala díky tření speciálních disků uvnitř stébel vlivem ohybu a také v důsledku jejich natáčení vůči zemi [5].

Letící větrná turbína by se musela pohybovat ve velkých výškách (asi 4 km), kde je vítr dostatečně silný a stálý. Byla by poměrně efektivní, navíc oproti klasickým větrným elektrárnám velmi mobilní, jen by se musel dát pozor, aby nezasahovala do letecké sítě [5].

1.2 Rozdělení z hlediska výkonnosti

Důležitým kritériem pro rozdělení větrných elektráren je jejich výkon, který udržují za běžného provozu.

Základem výkonu větrné elektrárny je výkon větru P , který roztáčí rotor. Ten lze stanovit rovnicí

$$P = \frac{E_k}{t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot R^2 \cdot \pi \cdot \frac{d}{t} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot R_r^2 \cdot \pi \cdot v^3, \quad (2)$$

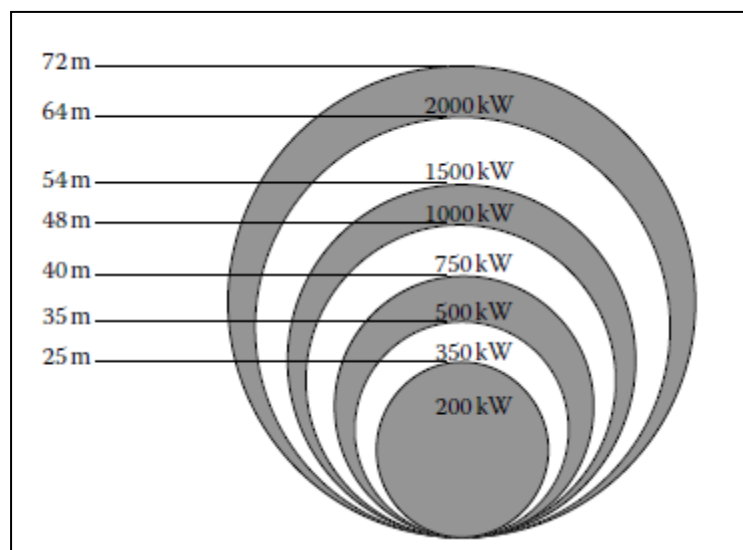
kde E_k je kinetická energie vzduchu, ρ je hustota vzduchu, t je čas, R_r je poloměr rotoru a d je tloušťka disku, který listy rotoru vytváří [10].

Je vidět, že jeho hodnota se mění se třetí mocninou průměrné rychlosti větru. Tu je ale člověk schopen jen těžko ovlivnit, stejně tak jako hustotu vzduchu. Je potřeba se tedy zaměřit na délku listu, respektive poloměr rotoru, tedy na velikost větrné turbíny [10].

Celkový výkon elektrárny $P_{\text{celkový}}$ je pak

$$P_{\text{celkový}} = c_p \cdot P. \quad (3)$$

Podle celkového výkonu je možné větrné elektrárny rozdělit do tří skupin, a to na *malé, střední a velké* [10].



Obr. 11: Výkon elektráren pro různé velikosti jejich turbín [10]

Malé větrné elektrárny se převážně používají pro dodávání elektřiny do domácností v obytných částech měst, ale jsou vhodné i pro napájení odlehklých zařízení, pro které je

rozvodná síť obtížně dostupná. Jsou projektovány pro nízké rychlosti větru kolem 4 m/s a jejich výstupní výkon nepřevyšuje hodnotu 20 kW [10].

Výkonnějšími jsou střední větrné elektrárny, jejichž výkon se pohybuje v rozmezí od 20 do 300 kW. Opět jsou využívány hlavně k napájení vzdálených objektů nebo k dodávce elektřiny do komerčních (obchodních) budov. Stožár je u tohoto typu vysoký do 40 m a průměr rotoru se pohybuje mezi 7 až 20 metry [10].

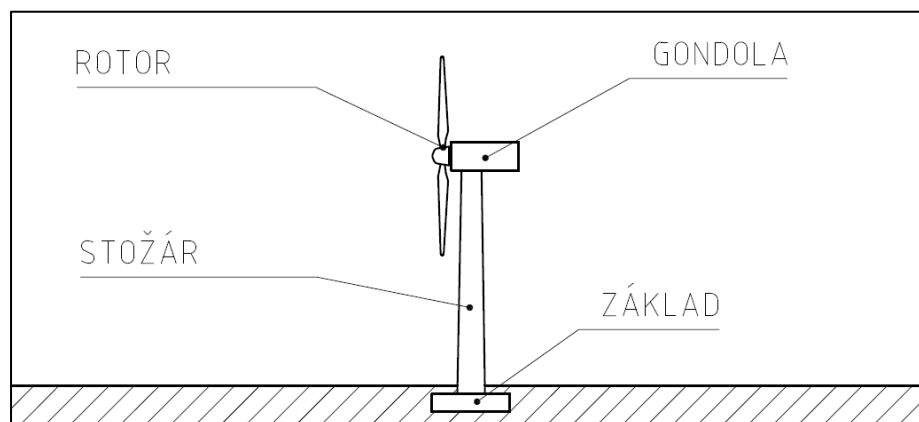
Nejvýkonnější jsou velké větrné elektrárny, které vykazují výkon v jednotkách MW. Zpravidla jsou součástí větrných farem, kde jich mohou být desítky až stovky [10]. Jednou z takových farem je na konci srpna roku 2013 zprovozněná mořská větrná farma *Bard Offshore 1* v Severním moři v Německu. Tvoří ji 80 turbín typu Bard 5.0 o výkonu 5 MW o celkovém nominálním výkonu 400 MW. Rotor každé z nich má průměr 122 m, přičemž rotorová hlava se nachází 90 m nad hladinou moře. Tato jedna z největších mořských větrných farem na světě se rozkládá na téměř 60 kilometrech čtverečních a její stavba trvala přibližně 3,5 roku [11, 12].



Obr. 12: Porovnání větrné turbíny Bard 5.0 se zásobovací lodí [12]

1.3 Hlavní části větrné elektrárny

Každá VtE má na první pohled tři základní části, kterými jsou rotor, gondola a stožár. Čtvrtou částí je základ, jenž zůstává často ukrytý v zemi či pod mořskou hladinou.



Obr. 13: Základní části VtE

1.3.1 Popis a výroba rotoru

Rotor (vrtule) je komponentou VtE, která zachycuje kinetickou energii větru a vlivem sil od něj působících je schopna konat rotační pohyb, jenž uvádí celý proces výroby elektrické energie do chodu.

Rotor sám o sobě je možno dále rozdělit na listy rotoru a rotorovou hlavu, ke které jsou během stavby VtE rotorové listy uchyceny. Ty je také možné ovládat pomocí systému natáčení kolem jejich podélné osy, kterého se využívá pro udržení konstantní úhlové rychlosti vrtule, jež je potřeba pro optimální chod celé elektrárny. Většinou se používá, jakmile rychlost větru přesáhne svou nominální hodnotu [10]. V té chvíli se listy natočí, změni se jejich poloha vůči proudu vzduchu, čímž se změní i síla, která na ně působí.

Základním konceptem je použití dvou skořepin, které jsou spojené s tuhými žebry. Těžším úkolem je už pak najít ideální rovnováhu mezi aerodynamikou a strukturou listu. Aerodynamické vlastnosti jsou rozhodující pro určení toho, jak efektivně bude energie z větru získána. Dále to ovlivňuje také struktura listu, která musí být co nejpevnější, nejtužší a zároveň co možná nejlehčí [14]. Ta se v dnešní době vytváří již v profesionálních modelářských programech, které často využívají metodu konečných prvků.

Technologie výroby listů je založena na stabilních, pečlivě testovaných materiálech, které poskytují nejlepší vlastnosti za požadovanou cenu. Základem konstrukce jsou kompozitní materiály z čistých skleněných vláken a pryskyřičné matrice. Skleněná vlákna jsou pevným univerzálním materiálem, který dává listu primární pevnost, zatímco pryskyřice ovlivňuje konečnou kvalitu svými vlastnostmi, z nichž jsou nejsledovanější viskozita, rychlost tvrdnutí, přilnavost k vláknům a podpora celkové pevnosti kompozitu [14].

Listy rotoru jsou vyráběny metodou laminování. To je proces, kdy se vrstvy vláken, která jsou spřádána do tkanin, sytí pojivem a pokládají na sebe, čímž vznikne tzv. laminát. Pro zvýšení plošné tuhosti se mezi vrstvy tkanin ještě někdy vkládá výplňový materiál ve formě tvrzené pěny [2]. Při dokončování skořepiny se navíc efektivně používá vakuová infuze, která vytváří velmi pevné a jednotné lamináty bez vzduchových bublin [14].

Laminátová skořepina musí být zevnitř vyztužena nosníkem, který při provozu přenáší hlavní zatížení a zabráňuje zborcení listu. Právě z tohoto důvodu se u nosníku často aplikují nejen skelná, ale také uhlíková a kevlarová vlákna [2].

Při výrobě rotorových listů se hojně používá pryskyřičná matrice polyesterová [14], avšak pro metodu laminování do negativní formy je vhodná pryskyřice epoxidová. U této metody je forma zhotovena ze dřeva či hliníku, z kusů o délce okolo 1,5 m, které se spojí a zasadí do ocelového rámu. Celý list je potřeba rozdělit na dvě poloviny a mezi ně se při kompletaci usadí nosník [2].



Obr. 14: Spojení horní a dolní poloviny rotorového listu [15]

V dnešní době se při stavbě větrné elektrárny spojuje s rotorovou hlavou většina listů turbín jako jeden kus v celé své provozní délce. Ve snaze dosahovat stále vyšších výkonů u jednotlivých větrných elektráren se rozměry rotorů neustále zvětšují. V důsledku toho se firmy začínají zabývat problémem až příliš dlouhých rotorových listů, který se týká nejen výroby, ale hlavně dopravy [16].



Obr. 15: Doprava rotorového listu, který měří přes 80 m [17]

S řešením přišel již v roce 2007 německý výrobce VtE Enercon, který představil první dělený rotorový list. Stalo se tak při stavbě větrné turbíny E126, která byla v té době 6 MW

prototypem, dnes má však výkon již 7,5 MW, díky čemuž byla až do nedávna největší a nejvýkonnější větrnou turbínou na světě. Listy o délce 80 m a výkonem 8 MW se až v lednu roku 2014 před ní dostala větrná elektrárna V164, kterou postavila dánská firma Vestas. E126 má rotor o průměru 127 m s listy délky 59 m. Listy jsou rozděleny na kořenovou (24 m) a vnější (35 m) část listu, k sobě jsou spojeny dvaceti velkými šrouby M52.



Obr. 16: Stavba VtE E126 – kořenové části rotorových listů přichycené k rotorové hlavě [16]

1.3.2 Popis a výroba strojovny

Strojovna je nejsložitější částí VtE. Z ní je sledována a řízena veškerá činnost. Je umístěna v tzv. gondole, jež tvoří její schránku.

Strojovna se nachází na vrcholu stožáru, ke kterému je přichycena pomocí natáčecího mechanismu. Tento mechanismus umožňuje celé gondole i rotoru se natáčet podle směru větru tak, aby se zachytilo co největší množství energie proudícího vzduchu. Během rotace strojovny však vzniká nebezpečí překroucení kabelů uvnitř stožáru. To se může stát v případě, kdy změna směru větru bude neustále stejná. Pak se i turbína bude točit pouze jedním směrem. Proto je větrná elektrárna vybavena čidlem, které včas upozorní řídicí jednotku, že je potřeba kabely narovnat zpět [10].

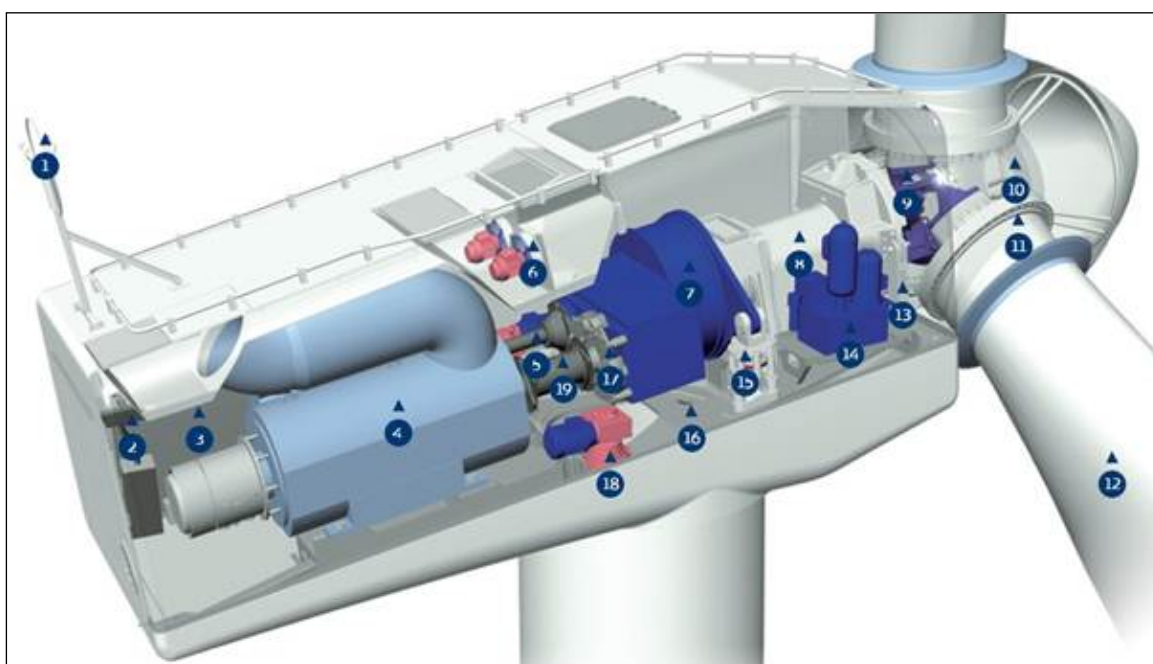
Celá strojovna je přichycena k nosnému rámu, mezi její hlavní části patří převodovka, generátor a podpůrné systémy [10, 18].

Součástí strojovny jsou také dvě hřídele, které přes převodovou skříň spojují rotor turbíny s rotorem generátoru. Hřídel spojující rotor a převodku se nazývá hlavní a přenáší celé zatížení a krouticí moment rotoru. Hlavní hřídel je uložena ve dvou velkých ložiscích, z nichž může být jedno již součástí převodovky [10, 18].

Převodovka je jedním z nejkomplikovanějších mechanismů VtE. Slouží k převodu nízkých otáček za vysoké hodnoty krouticího momentu na otáčky vysoké, které jsou 80 až 100násobně vyšší. První částí většiny převodovek větrných elektráren je tzv. planetová převodovka. Ta je tvořena třemi ozubenými koly či pastorky, které jsou vedeny hlavní hřídelí a obíhají po vnějším korunovém kole. Při tomto pohybu otáčí kola centrálním pastorkem, který plní funkci výstupní hřídele z převodovky. Výstupní hřídel rotuje za vysokých otáček a je spojena pomocí spojky s vysokorychlostní hřídelí, která vstupuje do generátoru [18].

Generátor představuje ústřední komponentu celé elektrárny, je nejtěžší částí strojovny. Vyrábí elektrickou energii, která následně putuje přes transformátory do rozvodné sítě. Transformátory slouží ke zvýšení napětí, které při přenosu rozvodnou sítí vykazuje menší ztráty. Vysoké napětí je proto vhodnější pro přenos energie z větrné elektrárny k zákazníkovi, kde dochází naopak k jeho snížení. [10, 18].

Mezi podpůrné systémy patří řídicí elektronika, hydraulická stanice a chladicí systém. Řídicí elektronika zaznamenává rychlost a směr proudění větru (anemometr), úhlovou rychlost rotoru a zatížení generátoru, na základě těchto údajů určuje vstupy pro řídicí systém elektrárny. Hydraulická stanice přivádí pod tlakem olej do částí strojovny, které jej potřebují pro správnou funkci (převodovka, natačecí mechanismus, atd.). Součástí strojovny je i velký chladicí systém, který je v podstatě podobný těm v automobilech. V převodovce, generátoru a všech elektrických součástkách vzniká velké množství odpadního tepla. Toto teplo je potřeba dovést k chladičům a vyventilovat ven [10, 18].



Obr. 17: Schéma strojovny VtE Vestas V52 o výkonu 850 kW: 1- ultrazvukový anemometr, 2- servisní výtah, 3- regulátor s konvertorem, 4- asynchronní generátor, 5- hydraulický válec natáčení listů rotoru, 6- ventilátory chlazení, 7- převodovka, 8- hlavní hřídel, 9- systém natáčení listů rotoru, 10- ložisko listu rotoru, 11- ložisko listu rotoru, 12- list rotoru, 13- systém aretace rotoru, 14- hydraulický agregát, 15- držák převodovky zachycující krouticí moment, 16- nosný rám strojovny, 17- mechanická kotoučová brzda, 18- pohon natáčení strojovny, 19- gondola [46]

Strojovna je částí VtE, která není ani tak složitá z hlediska výroby jako z hlediska montáže, neboť každá firma vyrábí či staví strojovny různých velikostí, technických parametrů nebo používá jiná konstrukční řešení.

V České republice je významnou firmou v tomto odvětví německá společnost SIAG se sídlem v Chrudimi, která se věnuje mimo jiné i produkci nosných rámců pro velké větrné elektrárny. Nosný rám se vyrábí jako svařenec z ocelových plátů, u kterého se dále obrábějí

funkční plochy a některé jeho části se i lakují. Nosný rám může být také dělen na dvě části (přední a zadní), jejichž montáží se zabývá například španělská firma Gamesa, která patří k největším výrobcům větrných turbín na světě [19, 20, 47].

Značná pozornost je věnována také gondolám, které se vyrábějí sklolaminátové, čímž se jejich struktura podobá listům rotoru. Také u těchto schránek strojoven se řeší otázka, jak zlepšit jejich výrobu tak, aby byly pro zákazníky cenově zajímavější. Touto problematikou se zabývá například americká společnost MFG Wind, která vyrábí své gondoly jako dělené, čímž se zjednodušuje jejich přeprava, která je pak levnější [21, 48].



Obr. 18: Dělená gondola firmy MFG Wind [21]

1.3.3 Popis a výroba stožáru

Stožár je částí VtE, jehož hlavním účelem je podepírat gondolu s rotorem a přitom odolávat působení větru, který navíc často mění svůj směr i rychlost. Slouží také pro svod kabelů vedoucích vnitřkem stožáru od generátoru v horní části k přenosovému vedení v dolní části [10].

Jedním z hlavních znaků stožáru je jeho výška, která se obecně liší podle toho, zda se jedná o pobřežní typ VtE, nebo vnitrozemský. Vyšší stožáry jsou výhodnější pro zachytávání stabilnějšího větru, protože ve vyšších polohách nad zemským povrchem je proudění vzduchu méně turbulentní. Nicméně se stožáry nedají zvyšovat donekonečna, protože jsou limitovány stabilitou své konstrukce. V případě vnitrozemských VtE je možné se dostat k větším hodnotám rozměrů stožárů než už těch pobřežních, neboť půda na souši představuje pevnější podloží oproti mořskému dnu. Protože na moři nejsou žádné překážky a terénní nerovnosti, vítr je možné efektivně zachytávat již blízko u hladiny. Podmínky pro budování VtE na moři jsou vyrovnanější. Překážek jako jsou budovy, stromy či celé hory je často velké množství, a

tak je někdy nevyhnutelné k získání energie stavět značně vysoké VtE [10]. Logickou snahou je vyvarovat se většině nerovností a stavět VtE ve vyšších otevřených lokacích.

Výška stožáru se nejčastěji pohybuje mezi 40 až 110 m a stejně jako u ostatních částí VtE se využívá segmentace, kdy je stožár hlavně z důvodu přepravy rozdělen na více menších prvků [27].

U vnitrozemských VtE se používají tři typy stožárů: ocelový tubusový, příhradový a prefabrikovaný betonový [27].

Ocelový tubusový stožár je v Evropě nejčastěji používaným typem, jehož segmenty jsou ocelové svařence, u kterých se pro povrchovou úpravu používá žárový zinek (menší segmenty), nebo nátěr barvami. Výrobě těchto stožárů se věnuje již zmiňovaná firma SIAG, jejíž postupy zde budou popsány. Základem stožáru je plech, jehož tloušťka se liší podle polohy na stožáru. Na vrcholu bývá plech tenký 12 mm, naopak u paty stožáru má stěna tloušťku až 45 mm, neboť její obvod je dlouhý až 12,5 m. Z plechu se kyslíko-acetylenovým plamenem vyřezává polotovar tvaru rozvinutého kužele, který po spojení svých konců vytvoří prstenec. Ten se vyrábí na válcové skružovací stoličce a všechny skružené prstence se následně podélně svaří metodou MAG a svařování pod tavidlem. Na krajní prstence segmentů se poté přivaří příruby s otvory pro šrouby, kterými se spojují jednotlivé segmenty při montáži k sobě, a kvůli přesnosti se až poté přistoupí ke svaření jednotlivých prstenců jednoho segmentu dohromady.



Obr. 19: Příruby s otvory pro šrouby, které se navaří na čela krajních prstenců jednotlivých segmentů [28]

Při výrobě jsou předepsány velmi přísné kontrolní postupy. Svary jsou kontrolovány ultrazvukovým, vizuálním a někdy i magnetickým testováním (při výrobě nového typu stožáru) s tím, že pokud se odhalí chyba ve svaru, je podle předpisů možná pouze jedna oprava špatně zavařeného místa. Po kontrole svarů následuje na vnitřní straně stěn instalace úchytů pro pozdější technologie jako žebřík či kabelový rošt a až poté je segment připraven k povrchové úpravě, která ve své první fázi zahrnuje i odstranění nečistot z povrchu pomocí otryskání. V případě nátěru barvami se většinou používá technologie stříkání. Pak už zbývá

jen přejít k závěru výrobní operace, který představuje nainstalování výstupového žebříku, kabelového roštu s výkonovými kabely a technologické plošiny na horní straně segmentu, po níž se budou pohybovat montéři při spojování. V poslední době se objevuje nová technologie uchycení veškerého vybavení k vnitřní stěně stožáru pomocí magnetů. Běžnými metodami jsou přivaření či vrtání otvorů. Jsou ale jednoznačně pracnější a složitější na aplikaci a navíc vytvářejí v místech úchytů napětí a kritická místa z hlediska únavy a šíření trhlin v materiálu [28].

VtE se stožárem příhradovým je v Evropě vidět spíše výjimečně, hodně rozšířená je ale například v Číně či Indii. Mezi její největší výhody patří bezproblémová doprava částí (jednotlivých nosníků) stožáru na místo určení, která je podstatně levnější než přeprava nadrozměrného nákladu. Dalšími výhodami pak jsou také ekonomická výhodnost při výškách stožáru nad 100 m a z vizuálního hlediska nižší zásah do krajinného rázu především u větších vzdáleností od pozorovatele. Jednu z opravdu velkých VtE, kterou postavila firma Führlander, je možné vidět v Německu. Její výkon je 2,5 MW a dosahuje až do výšky 205 m, přičemž stožár měří 160 m a váží 374 tun. Jeho konstrukce je tvořena prvky s L profilem, z nichž je každý žárově zinkován [29].



Obr. 20: Führlander 2500 – na jeho stavbu byl potřeba jeden z největších jeřábů s lomeným ramenem v Evropě [29]

Poslední variantou je prefabrikovaný betonový stožár, který je docela novým, rychle se rozvíjícím typem. Poskytuje velké množství výhod oproti stožáru ocelovému. Z nich nejvýznamnější jsou [30]:

- bezproblémové dělení stožárových dílů kvůli dopravě
- nízké nároky na opravu konstrukce a dlouhá životnost
- lepší tlumící vlastnosti, menší provozní vibrace a hluk
- vysoká odolnost vůči korozi, jež je častým problémem u pobřežních VtE
- jednodušší a ekonomicky výhodnější výroba velkých patních segmentů stožárů o výškách nad 80 až 100 m

Jednotlivé díly stožáru jsou betonové skořepiny, které nejsou pouze kruhové, ale většinou také polokruhové či čtvrtkruhové. Ty se spojují pomocí ocelové výztuže do prstenců, jež se staví po několika kusech na sebe a vytváří kuželovitou sekci stožáru. Celá sekce, která je propojena předepínacími kabely, už je pak umístěna ze země na svou pozici pomocí jeřábu a s další sekcí musí být ihned propojena předepjatými šrouby. V průběhu stavby roste spolu se stožárem také podpůrná konstrukce, kterou tvoří dva příčné segmenty a montážní plošina po nich se pohybující, ta pomáhá zajišťovat svislou stabilitu spojených sekcí. K dokončovacími operacím při stavbě stožáru patří umístění ocelového zakončení na vrcholu pro otočové ložisko gondoly. Instalace vybavení uvnitř stožáru a také nátěr barvou, jež zvyšuje odolnost celé konstrukce vůči povětrnostním vlivům, je realizován již při výrobě jednotlivých částí v továrnách [30].



Obr. 21: První prstence u paty stožáru s podpůrnou konstrukcí a montážní plošinou [30]

1.3.4 Základ VtE

Základ větrné elektrárny není opět jednoznačnou záležitostí, ale má hodně podob. Nejmarkantnější rozdíl je možné vidět ihned mezi základy pro vnitrozemské VtE a základy pro pobřežní VtE, u kterých se dá spíše hovořit o zakotvení do země.

Na souši se zpravidla budují základy betonové, které zůstávají ukryty v zemi a mohou mít tvar nejen čtvercový, ale také kruhový či šestiboký. V těchto případech se jednoznačně jedná o nejtěžší část větrné elektrárny, jejíž hmotnost může přesahovat tisíc tun. Takovýto základ není pouze obrovské množství betonu, ale jeho součástí jsou i ocelové výztuže, potrubí pro vyvedení výkonové kabeláže a ocelový fundament, do něhož se zasazuje stožár. Je potřeba, aby tento fundament byl ustaven do vodorovné polohy, neboť tolerance horizontální polohy je pouhé dva mm. Toho se dosahuje pomocí distančních šroubů. Ke konci betonování základu upravují pracovníci jeho horní plochu tak, aby její spád směřoval k okrajům a voda

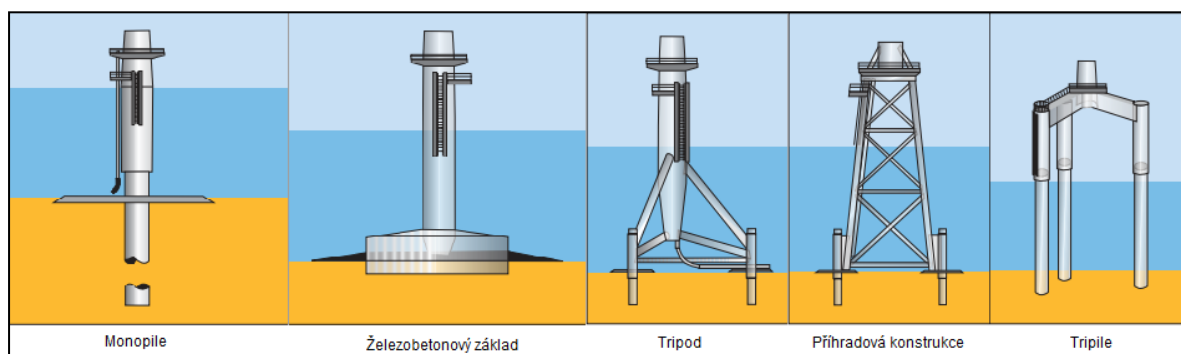
tak odtékala. Je to z toho důvodu, aby se zabránilo pronikání vlhkosti mezi styčné plochy fundamentu a betonu. Plastický nátěr v kontaktních místech je současně schopen kompenzovat pohyb a různou teplotní roztažnost [31].



Obr. 22: Betonový základ čtvercového půdorysu [31]

Offshore VtE jsou v dnešní době spojeny s mořským dnem v naprosté většině případů pevně. Ovšem jak se větrná energetika posouvá dál na moře do větší hloubky, objevují se už i projekty, které pracují s plovoucími základovými konstrukcemi [32].

U kotvení pevně spojených s mořským dnem rozlišujeme pět základních provedení, jejichž podoba je vidět na obr. 23.



Obr. 23: Pevné základové konstrukce [32]

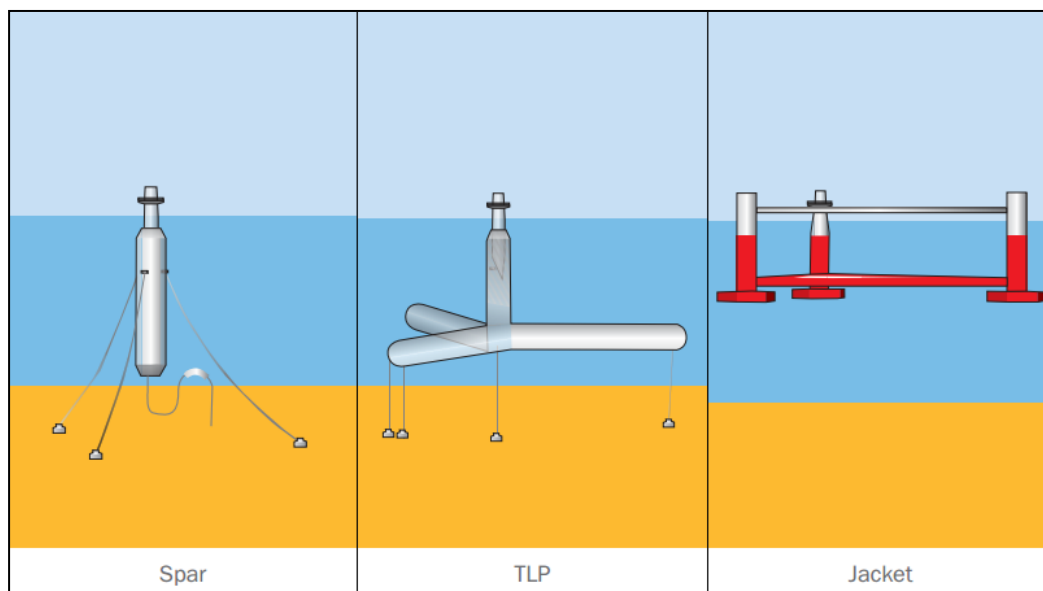
Monopile je ocelová trubka zatlučená do mořského dna. Používá se pro hloubky do 25 m a je poměrně jednoduchá na výrobu i instalaci. Podobné vlastnosti vykazuje i železobetonový základ, který je vhodný nejčastěji pro hloubky do 30 m. Ten se od monopilu liší tím, že není do mořského dna zatlučen, ale spíše na něm leží [32].

Tripod, příhradová konstrukce a tripile patří do zatím méně častých rámových konstrukcí, které je ale možné použít pro hloubky od 20 m do 50 m. Jejich úkolem je přenést síly do mořského dna a minimalizovat poměr hmotnosti k tuhosti konstrukce [32].

Otázka přesunu VtE do větších vzdáleností na moři a větších hloubek je dnes nejvíce diskutována a plánována v zemích, které mají omezený počet vhodných lokací pro stavbu ještě ekonomicky výhodných elektráren s pevným ukotvením. V rámci Evropy se jedná hlavně o místa ve Středozemním moři, Atlantském oceánu či norských vodách [32].

Je pravděpodobné, že s hloubkou větší než 50 m bude toto řešení základových konstrukcí nejvhodnější. Mezi hlavní výhody patří značná variabilita v konstrukčním a stavebním řešení nebo možnost jednoduché likvidace při vyřazení VtE z provozu. Naopak největší výzvou bude udržení potřebné stability, která bude hodně ovlivňována náporům větru a vln. Také řešení elektrické infrastruktury bude složitější [32].

Všechny plovoucí základové konstrukce jsou zatím spíše jen v experimentální fázi. Je ale logické očekávat, že potenciál, jaký na moři je, požene jejich vývoj rapidně kupředu. V současné době se rozlišují tři primární druhy: Spar (plovoucí bóje podobného tvaru jako stožár), TLP („tensioned-leg platform“ – plošina přikotvená ke dnu z každého svého konce pomocí napnutých lan) a plovoucí příhradová konstrukce („Jacket“) [32].



Obr. 24: Plovoucí základové konstrukce [32]

2 Základní fyzikální principy transformace energie ve větrné elektrárně

2.1 Princip přeměny kinetické energie mechanickou

2.1.1 Kinetická energie větru

Větrná elektrárna je zdrojem obnovitelné energie, neboť jejím hnacím médiem je proud vzduchu. Ten vzniká primárně díky dopadu slunečních paprsků na zemský povrch, který je ale ohříván nerovnoměrně. To vede z důvodu rozdílných tlaků v atmosféře ke vzniku větru.

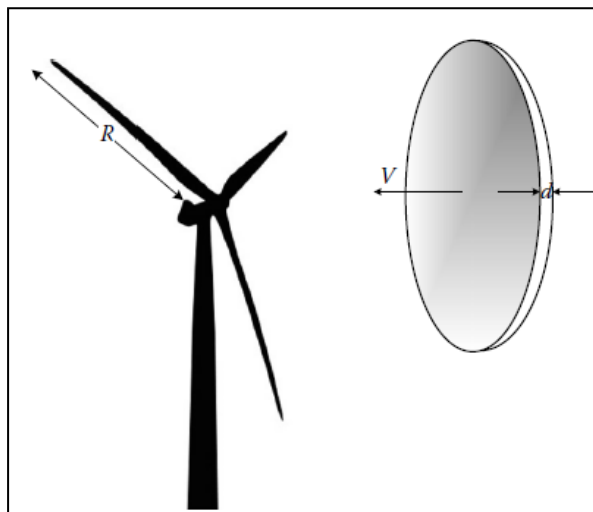
Kinetická energie větru je dominantně určena jeho rychlostí, avšak její velikost je značně ovlivněna i dalšími faktory, jako je hustota a teplota vzduchu. Síla větru, která je s rostoucí hustotou vyšší, úzce souvisí právě i s teplotou. Teplý vítr stoupá vzhůru, a proto je ve vyšších polohách méně hustý než v nízkých nadmořských výškách. Hustota vzduchu také mírně klesá, pokud se zvyšuje jeho vlhkost [10].

Vedle rychlosti větru je pro určení kinetické energie důležitá také plocha rotoru. Délka listů hraje v tomto případě důležitou roli, protože čím bude větší, tím bude větší i plocha větrné turbíny a tím více větru se při stejných povětrnostních podmínkách zachytí [10].

Kinetická energie se dá vyjádřit vztahem [10]

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_L \cdot d \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot R^2 \cdot \pi \cdot d \cdot v^2, \quad (4)$$

kde m [kg] je hmotnost vzduchu a d je tloušťka disku, který listy rotoru vytvářejí.



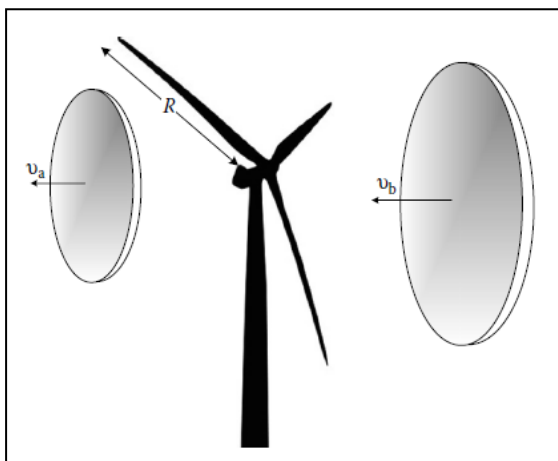
Obr. 25: Kinetická energie větru [10]

2.1.2 Betzův zákon

Betzova účinnost byla zmíněna již při dělení větrných elektráren, ale je nutné upřesnit, jak se její zjistila.

Je nutné si uvědomit, že výkon lze z kinetické energie větru získat pouze tak, že proud vzduchu protékající turbínou sníží svoji rychlost. To znamená, že rychlost větru za turbínou je mnohem nižší, než jeho rychlost před turbínou, kdy se z něj ještě nezískala žádná energie [10]. V ideálním případě bychom byli schopni přeměnit větrnou energii v užitečnou stoprocentně. Takhle by se však musel vzduch po průchodu vrtulí elektrárny zcela zastavit, a to není reálně možné, protože jakmile narazí vítr na překážku, nikdy se nezastaví, ale má tendenci se jí vyhnout a proudit kolem ní [3]. Zároveň je vyloučeno, aby se vzduch za rotorem nekonečně kumuloval.

Pokleslá rychlost větru za turbínou přímo poskytuje informaci o možném množství energie, které lze z větru získat. Na obr. 26 jsou znázorněny obě rychlosti větru [10].



Obr. 26: Rychlost větru před a za turbínou. [10]

Získaný výkon z větru popisuje rovnice 5 [10].

$$P_{získaný} = \frac{E_k}{t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot R^2 \cdot \pi \cdot \frac{d}{t} \cdot (v_b^2 - v_a^2) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot R_r^2 \cdot \pi \cdot \frac{v_a + v_b}{2} \cdot (v_b^2 - v_a^2), \quad (5)$$

kde $P_{získaný}$ je maximální výkon, který lze z větru získat, a v_a a v_b jsou rychlosti větru před a po průchodu skrz turbínu.

Vztah mezi totálním výkonem $P_{totální}$ a výkonem získaným lze spočítat jako [10]

$$P_{totální} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot R_r^2 \cdot \pi \cdot v_b^3, \quad (6)$$

$$\frac{P_{získaný}}{P_{totální}} = \frac{(v_a + v_b)/2(v_b^2 - v_a^2)}{v_b^3} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{v_a^2}{v_b^2} \right) \left(1 + \frac{v_a}{v_b} \right). \quad (7)$$

Aby se získal maximální výkon, musí se zjistit, pro jakou hodnotu poměru v_a k v_b bude maximální i poměr výkonu získaného k výkonu totálnímu. Pro jeho vyčíslení je nutné použít rovnici [10]

$$\frac{d\left(\frac{P_{\text{získaný}}}{P_{\text{totální}}}\right)}{d\left(\frac{v_a}{v_b}\right)} = 0 \quad (8)$$

jejímž řešením je pro v_a/v_b hodnota 1/3. Jejím dosazením do rovnice 7 se získá [10]

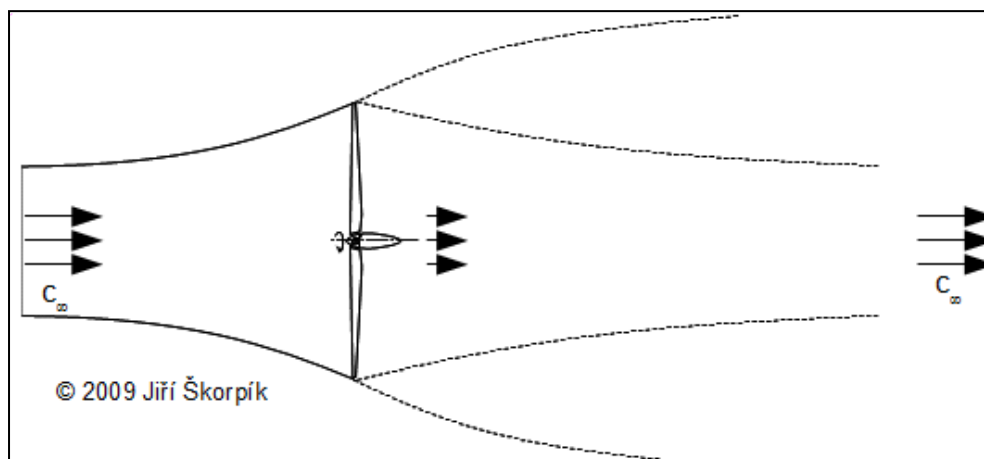
$$\left.\frac{P_{\text{získaný}}}{P_{\text{totální}}}\right|_{\frac{v_a}{v_b}=\frac{1}{3}} = 0,59259. \quad (9)$$

Jak vyplývá z rovnice 9, získaný výkon větru je přibližně 2/3 výkonu totálního [10]. Tohoto teoretického výkonu nebude nikdy možné zcela dosáhnout, snahou však bude se mu co nejvíce přiblížit ať už vývojem dokonalejších větrných listů, převodovek či generátorů.

2.1.3 Princip vzniku vztlaku a točivého momentu

Již bylo zmíněno, že list rotoru VtE je svým tvarem podobný lopatkám u vrtulí letadel. Jenomže při výrobě elektrické energie plní listy právě opačnou úlohu než letecké vrtule. Vrtule poháněné motorem okolní vzduch urychlují a opačným směrem uvádějí letadlo do pohybu. Naopak rotor VtE proudění vzduchu zachycuje a zpomaluje, čímž se roztáčí a pohánění mechanismus ve strojovně, který vyrábí elektrickou energii.

Základním principem, díky kterému vzniká na lopatkách rotorů vztlak, je zákon zachování hmoty. Tento zákon je vyjádřen rovnicí kontinuity, která popisuje proudění ideální tekutiny v uzavřené trubici [57].



Obr. 27: Profil proudícího vzduchu přes větrnou turbínu [33]

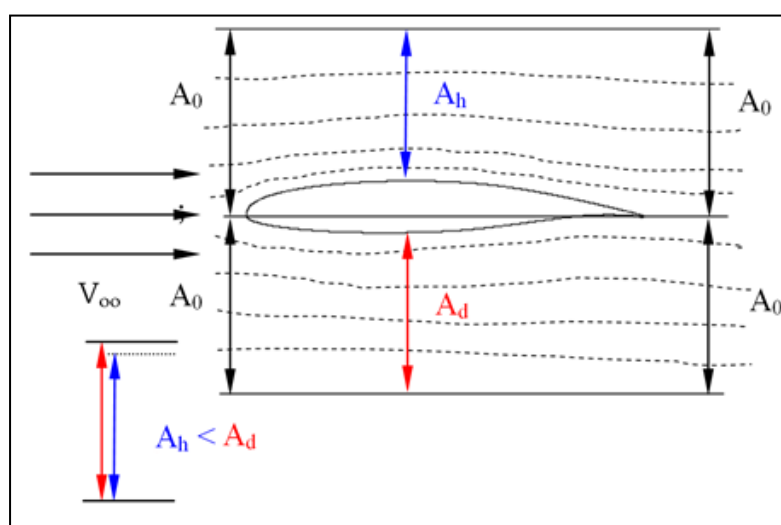
Na obr. 27 je vidět tvar proudění vzduchu, který protéká větrnou turbínou, a je možné si představit, že tento tvar představuje onu uzavřenou trubici. C_∞ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] představuje rychlost daleko před a za turbínou (značení rychlosti písmenem c je již zastaralé, dnes se používá písmeno v). Proč proudí vzduch právě tímto způsobem, vysvětluje zmíněná rovnice kontinuity [57]

$$\rho \cdot A \cdot v = \text{konst.} \quad (10)$$

Při malých rychlostech tekutin, mezi které spadá i proudění vzduchu kolem VtE, je možné uvažovat jejich nestlačitelnost, tím jsou prakticky ideální. Pokud uvažujeme, že vzduch je nestlačitelný, pak pro jeho hustotu platí $\rho = \text{konst.}$ Za tohoto předpokladu je možné rovnici 10 přepsat do tvaru [57]

$$A \cdot v = \text{konst.}, \quad (11)$$

ze které plyne, že pokud se sníží rychlost vzduchu, musí se zvětšit plocha, kterou vzduch prochází. Tohoto principu se využívá také při detailním zkoumání jednotlivých listů rotoru.



Obr. 28: Profil proudícího vzduchu kolem listu rotoru [57]

Pokud se u obr. 28 uvažuje, že proudící vzduch je nestlačitelný a zároveň není ovlivněný v dostatečné vzdálenosti od tělesa, pak v části nad i pod tělivou profilu platí rovnice kontinuity, která má tvar [57]

$$A_0 \cdot v = A_h \cdot v_h, \quad (12)$$

$$A_0 \cdot v = A_d \cdot v_d. \quad (13)$$

Po dosazení jedné rovnice do druhé platí

$$A_h \cdot v_h = A_d \cdot v_d, \quad (14)$$

odkud vyplývá, že pokud $A_d > A_h$, pak $v_h > v_d$.

Dalším zákonem, který se v této problematice uplatňuje, je zákon zachování energie. Tento je popsán Bernoulliho rovnicí, která vyjadřuje vztah mezi kinetickou, tlakovou a potenciální energií plynu. Její podoba je upravená právě pro ustálené proudění ideální tekutiny [57]

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = konst., \quad (15)$$

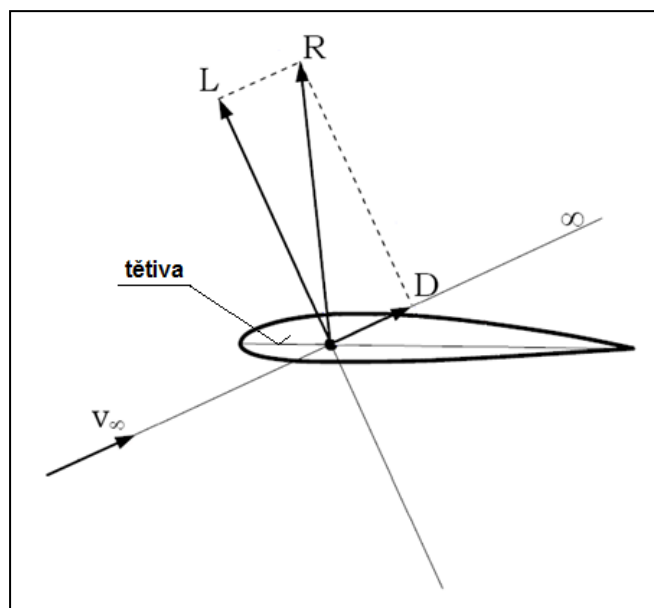
kde p je tlak, g gravitační zrychlení a h je výška profilu v nejširším místě. První člen levé strany rovnice, tlak p , představuje tlak statický, druhý člen rovnice $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$ se označuje jako tlak dynamický a třetí člen $\rho \cdot g \cdot h$ je potenciální energie. Avšak veličiny ρ i h jsou poměrně malé a třetí člen je tak podstatně menší než ostatní. Je proto možné jej zanedbat. Bernoulliho rovnice se nám tedy redukuje na tvar, [57]

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = konst., \quad (16)$$

ze kterého lze vidět, že jakmile vzroste rychlost proudění, zvýší se dynamický tlak a statický tlak tak poklesne. Při aplikaci rovnice 16 na obr. 28 je možné psát [57]

$$p_h + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_h^2 = p_d + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_d^2, \quad (17)$$

odkud vyplývá, že pokud $v_h > v_d$, pak $p_d > p_h$. Rozdíl tlaků pod a nad listem vede ke vzniku vztaku. Tento vztlak je možné nahradit ekvivalentní vztakovou silou L [N], která prochází aerodynamickým středem profilu listu a je vždy kolmá na nabíhající proud vzduchu.



Obr. 29: Profil listu s aerodynamickými silami [58]

Vztlaková síla je velmi závislá na úhlu náběhu α [rad], což je ostrý úhel mezi směrem nabíhajícího proudu vzduchu a tětivou profilu listu. Působením proudícího vzduchu nevzniká pouze vztlaková síla, ale také odporová síla D [N], na kterou má úhel náběhu také výrazný vliv. Výslednice těchto dvou aerodynamických sil se nazývá výsledná síla R [N]. Tato síla je konečně příčinou vzniku krouticího momentu, který uvádí rotor VtE do rotačního pohybu [58].

2.2 Princip přeměny mechanické energie na elektrickou

Generátor elektrické energie je jednou z hlavních částí VtE. Jedná se o nejtěžší zařízení stroje, které vyrábí elektřinu, jež je vedena kabely přes transformátory do sítě. Existují různé typy používaných generátorů a není jasně dané kritérium pro jejich volbu vzhledem k dané VtE. Mohou být vybrány na základě instalovaného výkonu, polohy VtE, druhu zatížení a zvoleného typu ovládání [10].

V podstatě existují dva typy generátorů. Jeden vyžaduje konstantní otáčky, což vyvolává požadavek na řízení turbíny, druhý je schopný pracovat s otáčkami proměnnými [18]. Výrobci volí nejčastěji použití synchronních a asynchronních generátorů. V poslední době se objevují také mnohopólové [43]. Ty už od začátku svojí existence používá společnost Enercon, která se tak zcela vyhnula použití převodovky [50].



Obr. 30: Prstenec mnohapólového synchronního generátoru VtE [50]

Generátor vyrábí energii pomocí rotace rotoru obsahujícího permanentní magnety, či elektromagnety. Rotor je umístěn uvnitř statoru, který se skládá z vinutých kovových cívek. Pokud se magnety pohybují kolem cívek, indukuje se v cívkách elektrický proud [18].

Tento děj je možné popsat vztahem [49]

$$\text{moment síly} + \text{magnetické pole} \Rightarrow \text{elektrický proud.} \quad (18)$$

Proces (18) vyjadřuje fyzikální zákon, který se nazývá Faradayův zákon elektromagnetické indukce. Ten je založen na experimentálně dokázaném jevu, tj. pokud se mění počet indukčních čar magnetického pole procházejících plochou vodivé smyčky, pak se v této smyčce indukuje proud, a tedy i elektromotorické napětí (dále jen emn). Faradayův zákon zní takto: „Velikost emn indukovaného ve vodivé smyčce je rovna rychlosti změny magnetického indukčního toku procházejícího touto smyčkou.“ [49]

Tento zákon je možné zapsat matematicky jako [49]

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt}, \quad (19)$$

kde ε je emn a Φ_B magnetický indukční tok. Aplikuje-li se tento zákon na hustě vinutou cívku s N závitů, pak indukované emn na celém jejím vinutí je [49]

$$\varepsilon = -N \cdot \frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (20)$$

Magnetický indukční tok je možné měnit celkem třemi způsoby: velikostí magnetického pole v cívce, změnou obsahu průřezu cívky, respektive té části plochy, jež leží v magnetickém poli (ať už např. rozpínáním cívky, či vysouváním cívky z magnetického pole), nebo změnou úhlu mezi směrem magnetického pole a plochou cívky tak, aby se měnil počet indukčních čar procházejících plochou cívky [49]. Hlavně kombinace druhého a třetího způsobu se využívá právě při funkci generátorů u VtE.

2.3 Životnost VtE a faktory, které ji ovlivňují

V Evropě, a tedy i v České republice se větrné elektrárny navrhují tak, aby jejich životnost byla 20 let, což je způsobeno optimalizací, kterou ovlivňují především ekonomické důvody. K tomuto rozhodnutí se přistoupilo mimo jiné také na základě zkušeností dánských výrobců větrných turbín, kteří jsou součástí asociace s názvem The Danish Wind Industry Association (DWIA). Ti uvádějí, že 20 let je rozumný kompromis pro navrhování součástí větrných elektráren. Například v USA již ale existují i jiné studie, které podporují myšlenku budování VtE s provozní životností 30 let. V takových případech by musely být elektrárny podrobeny každoročním údržbám a navíc také generálním opravám každých 10 let, kdy by došlo k výměně hlavních komponent [51].

Životnost každé elektrárny je tedy dána tím, jak dlouho vydrží funkční její jednotlivé části. Některé z nich jsou více náchylnější na opotřebení než ostatní. Obecně platí, že komponenty, které se pohybují nebo nejsou kryté před působením okolních vlivů, se opotřebovávají rychleji než ty, jež jsou kryté nebo v klidu. Nejrychleji opotřebovávanými částmi jsou převodovka a listy rotoru [52].

V mnoha případech, kdy dojde VtE ke konci svého technického života, může být její oprava pro prodloužení životnosti cenově výhodnější než celá její výměna. Generální oprava tak bude obnášet pouze výměnu listů a zařízení ve strojovně, nedotkne se ale stožáru, který je často ještě v dobrém stavu [52].

Běžně jsou části VtE navrhovány tak, aby vydržely v provozu 20 let. Některé z nich by sice nebylo problém vyrobit tak, aby vydržely provozuschopné mnohem déle při nijak velkém nárůstu nákladů, avšak u těch hlavních částí jako převodovka či generátor roste cena příliš rychle a bylo by neekonomické, kdyby celá elektrárna přestala pracovat pouze kvůli jedné její části. Ekonomického kompromisu se docílilo právě při životnosti 20 let, což přispělo k zaměření se na vývoj nových a modernějších komponent. U nich je snahou, aby byly během dvou desetiletí co nejspolehlivější, aby hrozilo co nejmenší nebezpečí jejich selhání [52].

Je potřeba také rozlišovat mezi navrhovanou životností a skutečnou životností, kterou bude větrná turbína opravdu mít. Nedá se nikdy vyloučit, že VtE bude nakonec pracovat mnohem delší dobu, než se původně plánovalo. Jak dlouho to bude, záleží jednak na kvalitě montáže jednotlivých částí VtE, jednak na konkrétních přírodních podmínkách jako [52]:

- množství výskytu větrných turbulencí
- hustotě vzduchu
- průměrné vlhkosti
- seismické činnosti

Zdálo by se, že VtE pobřežního typu budou výhodnější jednoduše z toho důvodu, že na moři nejsou žádné překážky, které by přispívaly ke vzniku turbulencí, což by vedlo ke snížení nákladů na údržbu. Avšak ve výsledku vede poloha na moři také ke zvýšení nákladů na dopravu k elektrárně, čímž se cena srovná. Jak moc, to už vždy záleží na konkrétní VtE [52].

3 Porovnání výroby elektrické energie z větrné elektrárny s jinými zdroji

3.1 Historické hledisko (vývoj)

Větrné turbíny v podobě strojů byly používány již ve starověku - například Peršany či Římany většinou jako větrné mlýny se svislou osou s několika lopatkami. Mezi jejich hlavní účely patřilo mletí obilí a také doprava vody v zavlažovacích systémech. Na území Čech, Moravy a Slezska je postavení historicky prvního větrného mlýna doloženo v roce 1277 v zahradě Strahovského kláštera v Praze [23]. První větrný mlýn, který vyráběl elektřinu, byl sestaven v roce 1887 ve skotském Glasgow profesorem Jamesem Blythem na Andersonově univerzitě. Dále přispělo ke značnému rozvoji v roce 1931 Rusko, kde se použil moderní generátor s vodorovnou osou rotace o výkonu 100 kW, který byl přimontován na 30 m vysoký stožár a připojen k místní rozvodné síti o napětí 6,3 kV [10].

Na světě první VtE s výkonem přes jeden megawatt se zprovoznila již o deset let později ve Vermontu v USA. Zpočátku byly součástí elektráren elektrické stroje pracující se stejnosměrným proudem. Až v 50. letech 20. století se v Dánsku vyvinuly dvoulisté větrné turbíny, které využívaly stroje se střídavým proudem. Ve stejné době se opět v Dánsku objevily první návrhy třílistých větrných turbín. Po první ropné krizi roku 1973 se v mnoha zemích výrazně zvýšil zájem o větrnou energii - hlavně v Německu, Švédsku, Velké Británii a USA [10].

Na počátku 80. let byla postavena VtE o výkonu 2 MW, která byla na svou dobu poměrně revoluční. S rotorem o průměru 54 m pracovala při proměnlivých otáčkách pomocí synchronního generátoru a výkonové elektroniky. To bylo poprvé, kdy byla elektronika použita k řízení výroby elektrické energie z větrné. V této době v USA klesla cena za kWh elektrické energie o 50 %, a to díky výstavbě nových VtE od dánské společnosti Nordtank o výkonu 55 kW. Tisíce těchto větrných turbín bylo dodáno do větrných farem v Kalifornii, ze kterých je neznámější větrná farma u města Palm Springs [10].



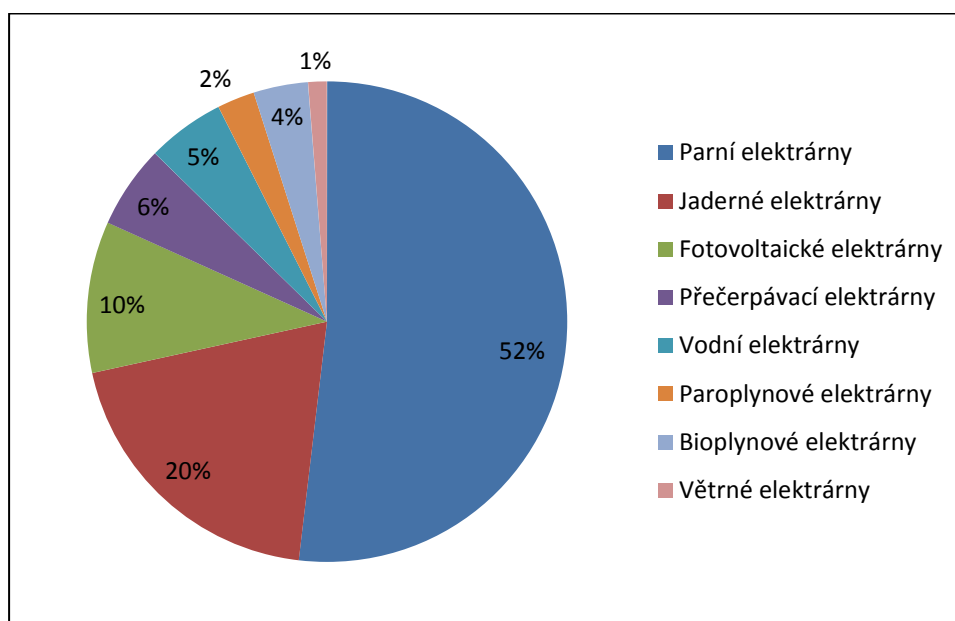
Obr. 31: Větrná farma u Palm Springs v Kalifornii [26]

Další vývoj VtE se zaměřil především na zdokonalování dvoumegawattových turbín, vytváření větrných farem, zřizování pobřežních VtE a zavádění nových řídicích metod ke zvýšení celkové účinnosti strojů [10].

3.2 Energetický mix v ČR, EU a ve světě

Výroba elektrické energie z větru tvoří v České republice (ČR) pouze malý zlomek výroby elektřiny celkové. Přesto má počet větrných elektráren v tuzemsku stále rostoucí tendenci, což je z velké části ovlivněno politikou celé Evropské unie (dále jen EU), jejíž dlouhodobým cílem je do roku 2050 snížit emise skleníkových plynů nejméně o 80 %. Jedním z klíčových aspektů tohoto plánu je zvýšení podílu obnovitelných zdrojů na výrobě elektřiny, díky tomu bude pozornost směřována i k větrné energii [36, 39].

Nejlepší pro porovnání výroby energie z větru s ostatními zdroji v ČR je v současné době rok 2012, pro který Energetický regulační úřad (ERÚ) již zpracoval zprávu o provozu elektrizační soustavy. Na konci tohoto roku bylo u nás 105 větrných elektráren o celkovém instalovaném výkonu přibližně 262 MW [40].



Obr. 32: Energetický mix ČR v % pro rok 2012 [36]

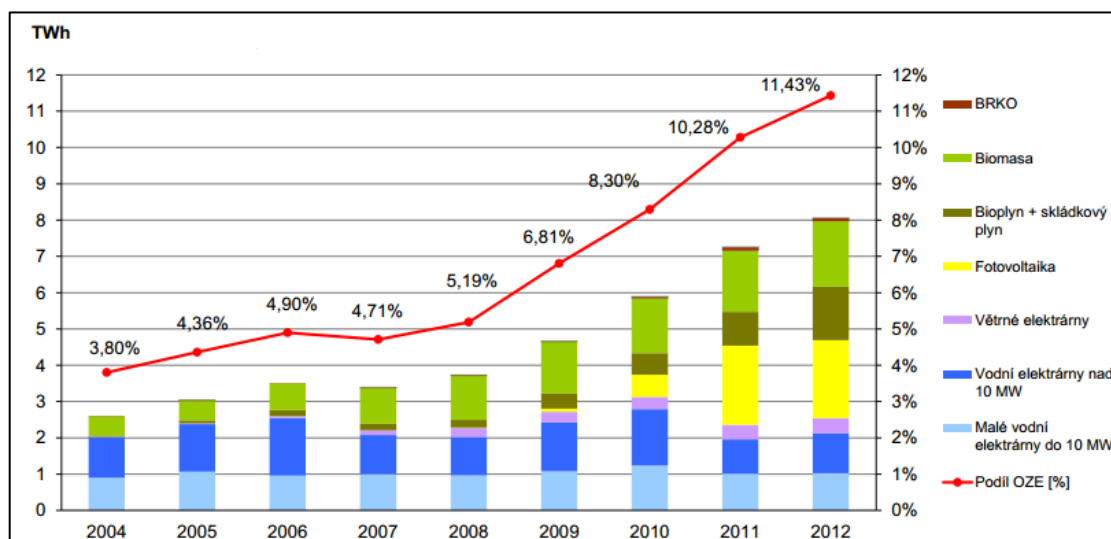
Z obr. 32 je vidět, že VtE představují pouze 1 % (přesnější hodnota je 1,3 % [36], pro graf byla čísla upravena na celá) z celkových zdrojů elektřiny. Jsou to ovšem údaje, které vycházejí právě z instalovaného výkonu elektráren, ten se ale zrovna u VtE od výkonu reálného podstatně liší. Do vztahu nám tyto výkony dává tzv. kapacitní faktor k_r , který vyjadřuje, nakolik se průměrný výkon za dané časové období blíží jmenovité hodnotě. Uvádí se v procentech a platí pro něj [40]

$$k_r = \frac{E_r}{P_{\text{inst}} \cdot t_r}, \quad (21)$$

kde E_r je roční výroba elektřiny, P_{inst} instalovaný výkon elektrárny a t_r je délka roku. Studie ukázaly, že v posledních pěti letech se průměrný koeficient ročního využití výkonu

všech VtE v ČR pohybuje okolo hodnoty 20 % [40]. V roce 2012 se vyrobilo díky veškerým elektrárnám všech typů 87 573,7 GWh elektrické energie, na čemž se větrné elektrárny podílely 417,3 GWh [37]. Z těchto údajů vyplývá, že se VtE nepodílely na výrobě elektřiny z 1,3 %, ale pouze z necelých 0,48 %. Pokud by ale pracovaly VtE ideálně po celý rok, tedy s kapacitním faktorem 100 %, vyprodukovaly by 2 295,12 GWh elektrické energie, a pak by se na výrobě podílely přibližně 2,57 %.

Další zajímavé údaje je možné dostat při porovnání výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie (OZE) s jejím podílem na hrubé domácí spotřebě, která zahrnuje i energii pro samotný chod všech elektráren v zemi.



Obr. 33: Vývoj výroby elektřiny z OZE a její podíl na hrubé domácí spotřebě [37]

Z obr. 33 je zřejmé, že podíl OZE na výrobě elektřiny má rostoucí tendenci a v roce 2012 se tyto zdroje podílely na domácí spotřebě ČR z 11,43 %. Podíl VtE na spotřebě činil ovšem pouhých 0,59 % [37], což znamená, že větrná energie tvořila 5,16 % OZE.

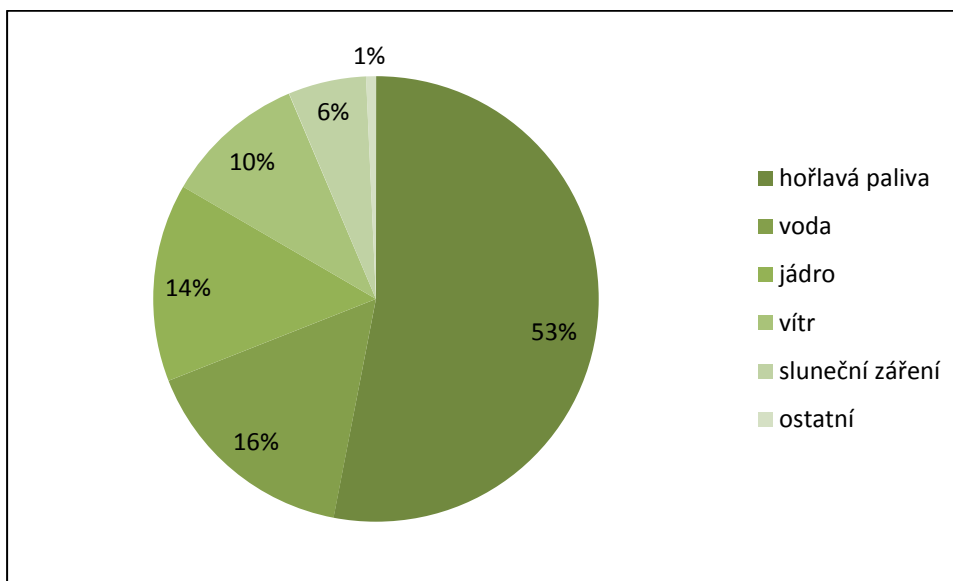
Optimističtější čísla je možné spatřit u potenciálu větrné energie v ČR. Ten dle studií Ústavu fyziky atmosféry Akademie věd ČR ukazuje, že reálně by bylo v ČR možné vybudovat 759 VtE, které by měly dohromady instalovaný výkon 2 277 MW [38].

Čím větší je oblast zkoumání, tím déle trvá získat a detailně vyhodnotit statistická data, která ukazují pravdivý vývoj výroby elektrické energie.

Při zaměření se na poměry v Evropě je dobré se soustředit na státy EU, které mají jednotný plán vývoje energetiky a spolupracují při sdílení podrobných informací. Cílem EU je v současné době zvýšení podílu OZE na hrubé konečné spotřebě energie na 20 %, a to do roku 2020 [41]. V rámci EU je vhodné analyzovat rok 2011, pro který jsou již Evropskou komisí, jednou ze tří hlavních institucí EU, zpracovány ucelené statistiky. Je třeba si ale uvědomit, že v tom roce měla EU pouze 27 členských států a ne 28, jako má dnes.

Celkový instalovaný výkon veškerých elektráren v roce 2011 byl v EU 919,275 TW. Po jaderných elektrárnách zaujímaly větrné čtvrtou pozici s výkonem 94 099 MW, čímž byl jejich podíl necelých 10,24 %. Z pohledu OZE tvořila však větrná energie 28,93 % instalovaného výkonu, což ukazuje její velký význam. Vyrobenou elektrickou energii v tomto roce opět ovlivní kapacitní faktor. EU vyrobila celkem 3 279,6 TWh, z toho na OZE připadá

699,5 TWh a na tom se větrná energie podílí 179 TWh. VtE vyrobily tedy asi 5,46 % celkově vyprodukované elektřiny v EU [42].



Obr. 34: Energetický mix EU v % pro rok 2011 podle typu pohonné hmoty [42]

Z globálního hlediska prodává větrná energetika obrovský růst. V roce 2013 bylo po celém světě nově nainstalováno 35 289 MW výkonu, což vzhledem ke konci roku 2012 tvoří nárůst o 12,46 % [45]. Které státy a oblasti světa představují velmoci ve větrné energetice, je vidět z následujících tabulek.

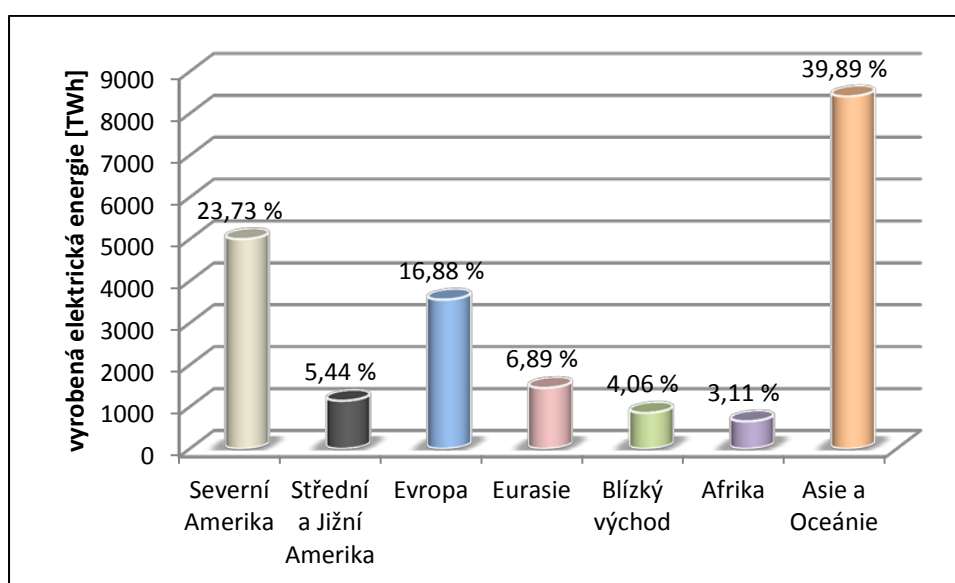
STÁT	INSTALOVANÝ VÝKON [MW]
1. ČÍNA	91 412
2. USA	61 091
3. NĚMECKO	34 250
4. ŠPANĚLSKO	22 959
5. INDIE	20 150
6. VELKÁ BRITÁNIE	10 531
7. ITÁLIE	8 552
8. FRANCIE	8 254
9. KANADA	7 803
10. DÁNSKO	4 772

Tab. 1: Státy s nejvyšším instalovaným výkonem VtE v roce 2012 [45]

OBLAST	INSTALOVANÝ VÝKON [MW]
AFRIKA A BLÍZKÝ VÝCHOD	1 255
ASIE	115 927
EVROPA (EU)	121 474 (117 289)
LATINSKÁ AMERIKA A KARIBIK	4 764
SEVERNÍ AMERIKA	70 811
AUSTRÁLIE A OCEÁNIE	3 874
CELKEM	318 105

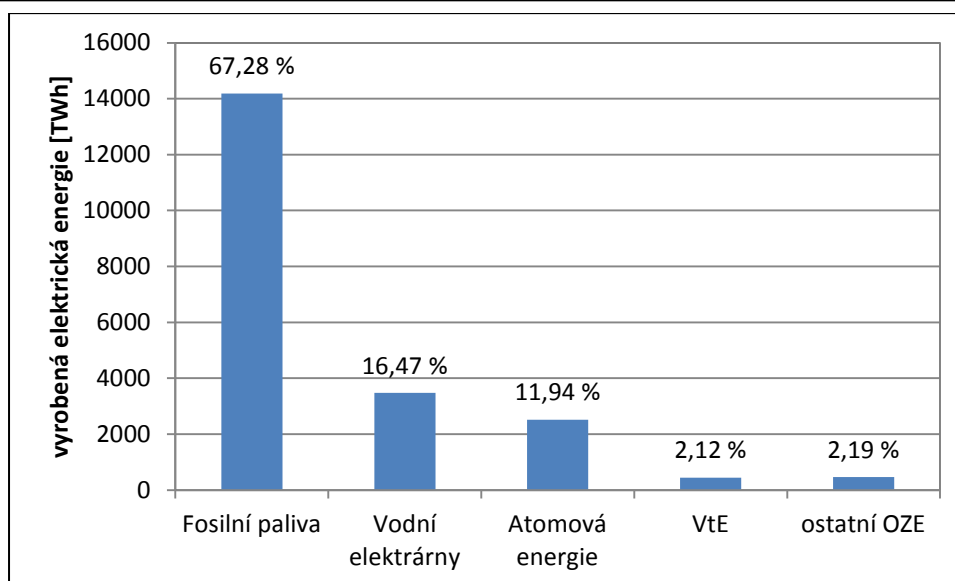
Tab. 2: Instalovaný výkon VtE v jednotlivých částech světa v roce 2012 [45]

Pro porovnání s ostatními zdroji elektrické energie je nutné se vrátit do roku 2011, pro který jsou již zpracována potřebná data. Nejlépe o světové situaci vypovídají opět statistiky, které se přímo zabývají celkově vyrobenou elektrickou energií, nikoli instalovaným výkonem.



Obr. 35: Podíl kontinentů a jejich oblastí na celkové vyrobené elektrické energii za rok 2011 [44]

Na prvenství Asie a Oceánie se z velké části podílela Čína [44], která držela suverénně i první příčku ve výrobě větrné energie, jak je vidět v tab. 1. V Severní Americe zase dominovaly USA, jejichž výroba je větší než v celé Evropě, která má produkci elektřiny na jednotlivé státy rozloženou poměrně rovnoměrně [44]. V předchozí tabulce je Oceánie spojena s Austrálií (což je obvyklé a užívané) a spojení s Asií na obr. 35 je zřejmě tendenční - poznámka.



Obr. 36: Podíl hlavních zdrojů na celkové výrobě elektrické energie za rok 2011 [44]

Z globálního hlediska se větrná energie v roce 2011 podílela na celkové produkci elektřiny z asi 2,12 %, z více jak dvou třetin byl svět závislý na fosilních palivech. V dnešní době nebude situace příliš odlišná, je však na místě se domnívat, že s postupem času bude význam OZE růst, zatímco získávání energie z fosilních paliv bude omezováno, a to hlavně z ekologických důvodů.

3.3 Ekologická efektivita

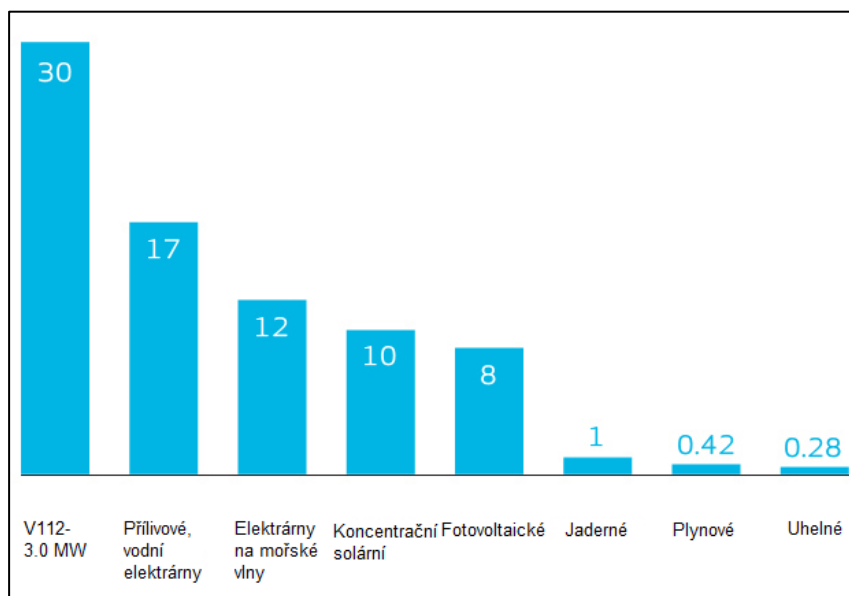
Energie získaná z VtE tvoří pouze jednotky procent veškeré energie, kterou elektrárny po celém světě produkují. Jedná se však o energii z obnovitelných zdrojů, která je navíc poměrně ekologická. V současnosti se míra šetrnosti k životnímu prostředí posuzuje často pomocí množství skleníkových plynů, které se vypustí do ovzduší při výrobě, stavbě, provozu a likvidaci elektrárny. Toto množství se vyjadřuje v gramech uhlíkového (CO_2) ekvivalentu vztažených na jednu kWh [54]. Tímto měřítkem je možné vidět největší pozitiva větrné energetiky. V roce 2012, který analyzovala i předchozí kapitola, se v ČR díky výrobě elektřiny z VtE ušetřilo přes 407 000 tun hnědého uhlí a došlo ke snížení emisí CO_2 o více než 500 000 tun a o tisíce tun oxidů síry a dusíku [53].

Dalším velmi důležitým hlediskem k posouzení ekologičnosti VtE je také poměr energetické návratnosti (dále jen PEN), který vyjadřuje poměr energie vyprodukované elektrárnou za svou životnost a energie, která se spotřebovala na celou realizaci projektu stavby VtE. Tato realizace zahrnuje energetické náklady na velký počet operací, jako je výroba a zpracování materiálů, výroba jednotlivých částí VtE, jejich přeprava, stavba VtE, samotný chod elektrárny a také její případná likvidace [54]. Různé studie se mohou lišit v počtu operací, kterými se detailně zabývaly, avšak lze očekávat, že chybějící data by výrazně výsledky neovlivnila. Nejdříve pro představu o ekologické efektivitě je zajímavé se podívat na tvrzení České společnosti pro větrnou energii (ČSVE), která uvádí: „Za svoji životnost VtE vyrobí 50krát více energie, než je potřeba pro její výrobu a likvidaci.“ [53] Není však uvedeno, pro jaký typ a polohu VtE to platí ani jak bylo této hodnoty dosaženo.

V ČR hraje velmi významnou roli firma Vestas, která zde měla na začátku roku 2011 nainstalováno 44 z celkových 93 elektráren. Vlastní tak téměř 50 % všech VtE na území ČR [40, 55]. Proto je opodstatněné se zaměřit na analýzu VtE od této firmy, a to konkrétně na typ V112-3.0 MW, pro který vyšla roku 2011 výstupní zpráva ze studie o posouzení životního cyklu [56]. PEN se obecně počítá podle vztahu

$$PEN = \frac{\text{Životnost}}{\text{ČEN}}, \quad (21)$$

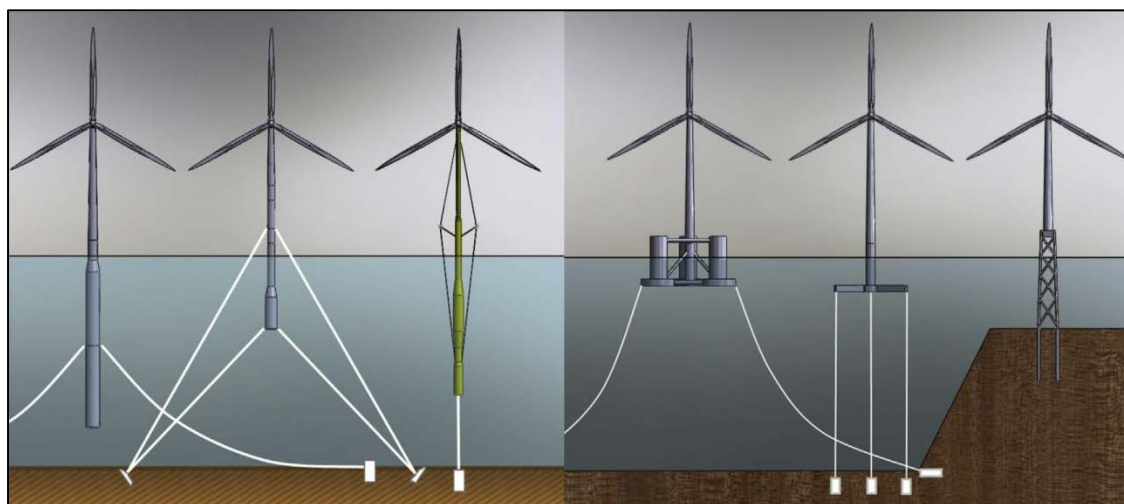
kde ČEN je čas energetické návratnosti, který udává počet měsíců, za které se vyrobí tolik energie, aby se pokryly energetické náklady na celý životní cyklus VtE [54]. Pro Vestas elektrárny se hodnota ČEN obvykle pohybuje v rozmezí 5 až 12 měsíců, u typu V122-3.0 MW je to 7 měsíců pro střední povětrnostní podmínky. Z toho vyplývá, že během svého životního cyklu vyrobí tato VtE 30krát více energie, než spotřebuje. To znamená, že pokud se investuje 1 kWh energie do větrné energie, zisk bude činit 30 kWh. O jak dobré číslo se jedná v porovnání s jinými zdroji energie, je možné vidět na obr. 37 [56].



Obr. 37: Porovnání VtE V112-3.0 MW s dalšími typy elektráren z hlediska PEN [56]

V současné době se větrná energetika stále více zaměřuje na moře, kde se instalují velmi výkonné VtE často ve větrných parcích. S postupem času se budou elektrárny stavět ve stále větších vzdálenostech od pobřeží, což bude vyžadovat vyřešení otázky, jaká konstrukce bude pro dané případy nejvhodnější. Je tedy na místě, aby bylo provedeno zhodnocení energetické bilance budoucích offshore VtE.

S VtE Vestas V112-3.0 MW, která reprezentuje vnitrozemský typ, bude z hlediska energetické bilance porovnáno 6 různých koncepčních návrhů pobřežních VtE, které jsou vidět na obr. 38.



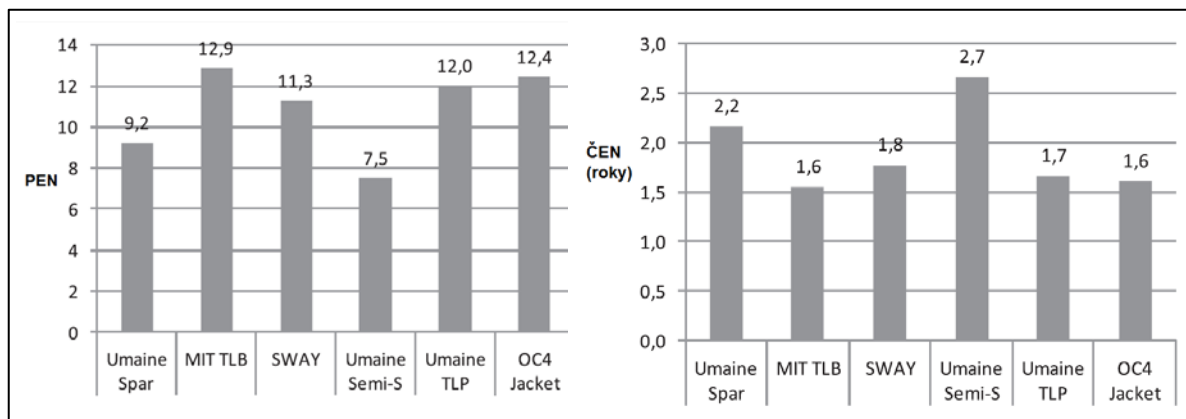
Obr. 38: Ilustrace všech šesti konceptů, jejich názvy zleva doprava: UMaine Spar, MIT TLB, SWAY, UMaine Semi-Sub, UMaine TLP a OC4 Jacket [54]

Jedná se o pět konceptů s plovoucí a o jeden pevnou základovou konstrukcí. Pro všechny se uvažuje výška rotorové hlavy nad hladinou 90 m, průměr rotoru 126 m, hloubka vody 200 m v případě plovoucích VtE a 50 m v případě VtE s pevnou základovou konstrukcí. U všech se předpokládá umístění 200 km od britského pobřeží v rámci větrné farmy o 100 větrných turbínách (rozložení do čtverce 10 krát 10 turbín). Životnost farmy se standardně předpokládá 20 let a hodnota výkonového součinitele 46 % [54].

Při této analýze se brala v úvahu spotřeba energie na [54]:

- instalaci (palivo)
 - spotřeba paliva spojená s dopravou všeho vybavení z pobřeží k VtE pro stavbu
- materiály pro rotor, gondolu a stožár
 - výroba, zpracování a doprava všech materiálů v souvislosti s výrobou turbíny; likvidace materiálů také zahrnuta
- základové materiály
 - výroba, zpracování a doprava všech materiálů v souvislosti s výrobou základové konstrukce, včetně kabelů vedoucích na pobřeží; likvidace materiálů také zahrnuta
- údržba (palivo)
 - spotřeba paliva spojená s dopravou z pobřeží k VtE kvůli údržbě
- údržba (opravy)
 - výroba, zpracování a doprava všech materiálů použitých na údržbu během životnosti větrné farmy; likvidace materiálů zahrnuta
- údržba (ostatní)
 - výroba, zpracování a doprava podpůrných materiálů použitých při údržbě (olej atd.), práce s odpadem

- likvidace (palivo)
 - palivo spotřebované při likvidaci větrné farmy; pro zjednodušení se uvažuje stejné jako pro stavbu



Obr. 39: PEN a ČEN všech šesti konceptů offshore VtE [54]

Na obr. 39 jsou prezentovány indikátory energetické náročnosti PEN a ČEN. Čím vyšší ukazatel PEN je, tím lepší je ekologická efektivita. V případě ukazatele ČEN je tomu naopak. Obrázek ukazuje, že zkoumané koncepční návrhy dosahují hodnot PEN mezi 7,5 a 12,9 a hodnot ČEN mezi 1,6 a 2,7 roky. Poměrně velký rozsah výsledků je způsoben hlavně rozdílnými provedeními základových konstrukcí a způsobem kotvení, což souvisí s množstvím použité oceli a náročností stavby a likvidace. Koncepty MIT TLB a OC4 Jacket vykazují nejlepší výsledky. V porovnání s dalšími studiemi bylo potvrzeno, že malé VtE s výkonem v jednotkách kW spotřebují za svůj životní cyklus třikrát více energie na jednotku výkonu než velké VtE s MW výkony. Proto je možné očekávat, že ukazatel PEN obecně poroste se zvětšováním velikostí větrných turbín [54].

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo jednak popsat základní konstrukci větrné elektrárny a fyzikální principy transformace energie v ní, jednak porovnání výroby elektrické energie z větrné elektrárny s jinými zdroji energie. Tyto cíle se podařilo splnit.

Vnější konstrukce velkých velmi výkonných VtE se již vizuálně příliš nemění. Tyto elektrárny pracují na principu vztaku a hlavně kvůli vyvážení jsou jejich vrtule třílísté. Nejčastější rozdíly jsou v řešení základových konstrukcí u offshore VtE, výrobci se také odlišují v technickém či konstrukčním provedení strojoven.

Nejmodernější VtE dnes vyrábí elektrickou energii se zhruba 75 % účinností ve vztahu k limitní hodnotě fyzikálně dané, což je způsobeno ztrátami hlavně v převodovce, generátoru a také v rozvodné síti. Skutečná výroba elektřiny větrnými elektrárnami je navíc značně ovlivněna tím, že VtE nemá po celou dobu výkon instalovaný, ale kvůli povětrnostním podmínkám či poruchám vykazuje výkon nižší. Koeficient ročního využití výkonu se pohybuje zatím okolo 20 %, v čemž se skrývá velký potenciál větrné energie. Při zvyšování účinnosti, ale samozřejmě také výkonu a počtu VtE, poroste i podíl větrné energie na energetickém mixu, který je zatím v jednotkách procent.

V dnešní době již existují studie, které zkoumají ekologickou efektivitu (energetickou náročnost) různých typů VtE. Ta je posuzována pomocí ukazatelů PEN a ČEN, které se pro vnitrozemské a pobřežní větrné elektrárny významně liší. Zatímco se u těch velmi výkonných vnitrozemských investovaná energie vrátí zhruba 30krát, v případě pobřežních VtE se PEN pohybuje mezi 7,5 a 12,9. Čas, za který se vyrobí energie, jež zcela pokryje energetické náklady na realizaci VtE, je u onshore větrných elektráren asi 2 až 3krát kratší než u typu offshore. Důležitým poznatkem je, že energetická náročnost je významně ovlivněna typem základové konstrukce a objemem ocele v ní obsažené. Dalšími důležitými parametry při porovnávání ekologické efektivity různých typů VtE je jejich životnost, povětrnostní podmínky, vzdálenost od pobřeží a budovací a likvidační procesy.

Koncepční návrhy zde analyzovaných pobřežních elektráren vykazují vyšší energetickou náročnost v porovnání s VtE vnitrozemskými, jejichž instalovaný výkon je dokonce nižší. Tato skutečnost může naznačovat, že navíc investovaná energie do offshore projektů nemusí být ve výsledku z důvodu přídatné základové konstrukce výhodná. Mělo by být však zdůrazněno, že ekologická efektivita a také množství škodlivých plynů nereprezentují jediné ukazatele životního prostředí. V úvahu musí být brány také další ukazatele, které více či méně významně ovlivňuje politika a ekonomika jednotlivých států. Jedná se o využití půdy, vizuální aspekty, hluk a vliv na blízkou faunu a flóru. Tyto jsou zvláště důležité při porovnávání výroby energie z větru na souši a moři.

Seznam použitých zdrojů

- [1] CENEK, Miroslav. *Obnovitelné zdroje energie*. 2. upr. a dopl. vyd. Praha: FCC Public, 2001, 208 s. ISBN 80-901-9858-9.
- [2] Počet listů rotoru větrné elektrárny. In: *Česká společnost pro větrnou energii (ČSVE)* [online]. © 2013 [cit. 2013-12-29]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/pocet-listu-rotoru-vetrne-elektrarny/310>
- [3] HALLENGA, Uwe. *Malá větrná elektrárna: návod ke stavbě s konstrukčními výkresy*. 2. přepr. a rozš. vyd. Ostrava, : HEL, 2006, 95 s. ISBN 80-861-6727-5.
- [4] Obnovitelné zdroje energie, energie vody a větru. In: *Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav fyziky a materiálového inženýrství* [online]. [cit. 2014-02-11]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_11.pdf
- [5] Větrné elektrárny: Nejčastější typy, experimentální projekty a zajímavosti. In: *Ekobonus* [online]. © 2014 [cit. 2014-02-11]. Dostupné z: <http://www.ekobonus.cz/vetrne-elektrarny-nejcastejsi-typy-experimentalni-projekty-a-zajimavosti>
- [6] *Windturbine* [online]. 2008-04-07 [cit. 2014-03-14]. Dostupné z: <http://windturbine.livejournal.com/>
- [7] Teorie – základy. *Malé větrné elektrárny* [online]. [cit. 2014-02-13]. Dostupné z: http://ve.mzf.cz/index.php?teorie_zaklady
- [8] Darrieus vertical axis wind turbine. In: *Ecosources/Information portal of renewable energy* [online]. [cit. 2014-03-13]. Dostupné z: http://www.ecosources.info/en/topics/Darrieus_vertical_axis_wind_turbine
- [9] Energie větru. In: *EkoWATT – Centrum pro obnovitelné zdroje a úspory energie* [online]. [cit. 2014-02-16]. Dostupné z: <http://www.ekowatt.cz/cz/informace/obnovitelne-zdroje-energie/energie-vetru>
- [10] KHALIGH, Alireza. *Energy harvesting: solar, wind, and ocean energy conversion systems*. Boca Raton: CRC Press, c2010, xv, 350 s., [16] s. bar. příl. Energy, power electronics, and machines series. ISBN 978-1-4398-1508-3.
- [11] NEJEDLÝ, Petr. Zprovozněn největší mořský větrný park. In: *Idnes* [online]. 2013-09-01 [cit. 2014-02-20]. Dostupné z: <http://nejedly.blog.idnes.cz/c/358985/Zprovoznen-nejvetsi-morsky-vetrny-park.html>
- [12] BARD Offshore 1. *BARD* [online]. [cit. 2014-02-20]. Dostupné z: <http://www.bard-offshore.de/en/projects/offshore/bard-offshore-1.html>

-
- [13] Wind turbines. In: *Alternative energy news* [online]. © 2014 [cit. 2014-02-21].
Dostupné z: <http://www.alternative-energy-news.info/technology/wind-power/wind-turbines/>
- [14] Rotor blades. *LM Wind Power* [online]. [cit. 2014-03-02]. Dostupné z:
<http://www.lmwindpower.com/Rotor-Blades>
- [15] LM Wind Power building new blade facility in Brazil. *Renewbl - renewable energy news* [online]. 2012-10-03 [cit. 2014-03-02]. Dostupné z:
<http://www.renewbl.com/2012/10/03/lm-wind-power-building-new-blade-facility-in-brazil.html>
- [16] The 10 biggest turbines in the world. In: *Wind Power Monthly* [online].
[cit. 2014-03-02]. Dostupné z:
<http://www.windpowermonthly.com/10-biggest-turbines>
- [17] Wind power. *Windbyte* [online]. © 2006-2014 [cit. 2014-03-02]. Dostupné z:
<http://www.windbyte.co.uk/windpower.html>
- [18] Explore the nacelle of a wind turbine. In: *Vestas* [online]. [cit. 2014-03-11].
Dostupné z: <http://www.vestaselearning.com/explore/explore-the-nacelle-of-a-wind-turbine/>
- [19] Výroba nosníků. In: *SIAG* [online]. © 2012 [cit. 2014-03-11]. Dostupné z:
<http://www.siag.cz/sluzby/sluzba-2/>
- [20] Manufacturing and assembly process. In: *Gamesa* [online]. © 2010 [cit. 2014-03-11]. Dostupné z: <http://www.gamesacorp.com/en/products-and-services/wind-turbines/design-and-manufacture/manufacturing-and-assembly-process.html>
- [21] Nacelles. In: *MFG WInd* [online]. © 2014 [cit. 2014-03-11]. Dostupné z:
<http://www.mfgwind.com/nacelles>
- [22] The Revolving Cup Anemometer and Lateral Loads. In: *Whatsontheare - Architectural Resource* [online]. 2012-05-16 [cit. 2014-03-14]. Dostupné z:
<http://www.whatsontheare.com/2012/05/16/the-revolving-cup-anemometer-and-lateral-loads/>
- [23] Větrné elektrárny. In: *Alternativní zdroje energie* [online]. [cit. 2014-03-14].
Dostupné z: <http://www.alternativni-zdroje.cz/vetrne-elektrarny.htm>
- [24] " Větráky " dříve a dnes. In: *Větrné mlýny v Čechách, na Moravě a ve Slezsku* [online]. [cit. 2014-03-14]. Dostupné z:
<http://vetrnemlyny.unas.cz/index2.htm>

- [25] Demonstration Test of Offshore Wind Farming in Hakata Bay Kicks Off. In: *Kyushu University* [online]. 2012-02-23 [cit. 2014-03-14]. Dostupné z: http://www.kyushu-u.ac.jp/english/topics/index_read.php?kind=&S_Category=&S_Page=&S_View=&word=&page=&B_Code=4330
- [26] Palm Springs Wind Farm. In: *Wind Power Directory* [online]. 2010-05-23 [cit. 2014-03-14]. Dostupné z: <http://windpowerdirectory.net/wind-farms/palm-springs-wind-farm-s26.html>
- [27] Stožár. In: *Česká společnost pro větrnou energii (ČSVE)* [online]. © 2013 [cit. 2014-03-26]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/detail-kategorie/stozar/86>
- [28] Ocelový tubusový stožár. In: *Česká společnost pro větrnou energii (ČSVE)* [online]. © 2013 [cit. 2014-03-26]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/ocelovy-tubusovy-stozar/229#prettyPhoto>
- [29] Příhradový stožár větrné elektrárny. In: *Česká společnost pro větrnou energii (ČSVE)* [online]. © 2013 [cit. 2014-03-26]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/prihradovy-stozar-vetrne-elektrarny/228#prettyPhoto>
- [30] Prefabrikovaný betonový stožár větrné elektrárny. In: *Česká společnost pro větrnou energii (ČSVE)* [online]. © 2013 [cit. 2014-03-26]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/prefabrikovany-betonovy-stozar-vetrne-elektrarny/227#prettyPhoto>
- [31] Betonový základ. In: *Česká společnost pro větrnou energii (ČSVE)* [online]. © 2013 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/betonovy-zaklad/305#prettyPhoto>
- [32] Wind in our Sails: The coming of Europe's offshore wind energy industry. In: *The European Wind Energy Association (EWEA)* [online]. 2011-11 [cit. 2014-03-27]. Dostupné z: http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/reports/23420_Offshore_report_web.pdf
- [33] ŠKORPÍK, Jiří. Lopatkový stroj, *Transformační technologie*, 2009-08, [last updated 2014-02]. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/lopatkovy-stroj.html>.
- [34] ŠKORPÍK, Jiří. Využití energie větru, *Transformační technologie*, 2006-10, [last updated 2014-05]. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/vyuziti-energie-vetru.html>.
- [35] ŠKORPÍK, Jiří. Základní rovnice lopatkových strojů, *Transformační technologie*, 2009-09, [last updated 2012-09]. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/zakladni-rovnice-lopatkovych-stroju.html>.

-
- [36] Energetický mix ČR. In: *Česká společnost pro větrnou energii (ČSVE)* [online]. © 2013 [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/energeticky-mix-cr/485>
- [37] Roční zpráva o provozu ES ČR 2012. In: *Energetický regulační úřad (ERÚ)* [online]. 2013 [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2012.pdf/4fdde065-9e59-442f-ba17-74651ff68625
- [38] Potenciál větrné energie ČR. In: *Česká společnost pro větrnou energii (ČSVE)* [online]. © 2013 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/potencial-vetrne-energie-cr/495>
- [39] Jak by měl vypadat energetický mix budoucnosti?. In: *Evropský parlament* [online]. 2013-03-21 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://www.europarl.europa.eu/news/cs/news-room/content/20130318STO06602/html/Jak-by-m%C4%9Bl-vypadat-energetick%C3%BD-mix-budoucnosti>
- [40] BECHNÍK, Bronislav. Roční využití výkonu větrných elektráren v České republice. In: *TZBinfo – stavebnictví, úspory energií, Technická Zařízení Budov* [online]. 2014-04-14 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/11077-rocni-vyuziti-vykonu-vetrnych-elektren-v-ceske-republice>
- [41] Renewable energy in the EU28. In: *Evropská komise* [online]. 2014-03-10 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_PUBLIC/8-10032014-AP/EN/8-10032014-AP-EN.PDF
- [42] EU Energy in Figures: Statistical Pocketbook 2013. In: *Evropská komise* [online]. 2013 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/2013_pocketbook.pdf
- [43] Generátor větrné elektrárny. In: *Česká společnost pro větrnou energii (ČSVE)* [online]. © 2013 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/generator-vetrne-elektarny/329>
- [44] International Energy Statistics. *U. S. Energy Information Administration (EIA)* [online]. [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=2&pid=2&aid=12>
- [45] Global statistics. In: *Global wind energy council (GWEC)* [online]. [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: <http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>
- [46] Strojovna větrné elektrárny s převodovkou a asynchronním generátorem (výrobce VESTAS). In: *Česká společnost pro větrnou energii (ČSVE)* [online]. © 2013 [cit. 2014-03-11]. Dostupné z: [http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektarny-s-prevodovkou-a-asynchronnim-generatorem-\(vyrobce-vestas\)/332](http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektarny-s-prevodovkou-a-asynchronnim-generatorem-(vyrobce-vestas)/332)
-

-
- [47] Nosný rám strojovny. In: *Česká společnost pro větrnou energii (ČSVE)* [online]. © 2013 [cit. 2014-03-11]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/nosny-ram-strojovny/326>
- [48] Strojovna větrné elektrárny. In: *Česká společnost pro větrnou energii (ČSVE)* [online]. © 2013 [cit. 2014-03-11]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny/324>
- [49] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 1. české vyd., 2. dotisk. Překlad Jan Obdržálek, Bohumila Lencová, Petr Dub. V Brně: Prometheus, 2006, vii, 1034-1198, [30]. ISBN 80-214-1868-0.
- [50] Strojovna větrné elektrárny bez převodovky s multipólovým synchronním generátorem (výrobce ENERCON). In: *Česká společnost pro větrnou energii (ČSVE)* [online]. © 2013 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: [http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-bez-prevodovky-s-multipolovym-synchronnim-generatorem-\(vyrobce-enercon\)/333](http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-bez-prevodovky-s-multipolovym-synchronnim-generatorem-(vyrobce-enercon)/333)
- [51] SHEPHERD, William a Li ZHANG. *Electricity Generation Using Wind Power* [online]. 2011-11-07 [cit. 2014-05-06]. ISBN 978-1-61344-613-3. Dostupné z: <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpEGUWP002/electricity-generation>
- [52] Operational and Maintenance Costs for Wind Turbines. In: *Wind Measurement International* [online]. [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://www.windmeasurementinternational.com/wind-turbines/om-turbines.php>
- [53] Jaký mají větrné elektrárny skutečně přínos?. In: *Česká společnost pro větrnou energii (ČSVE)* [online]. © 2013 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/jaky-maji-vetrne-elektrarny-skutecne-prinos-/524>
- [54] RAADAL, Hanne Lerche et al. Renewable Energy: GHG emissions and energy performance of offshore wind power. *Elsevier* [online]. 2014, č. 66 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148113006654>
- [55] Proč Vestas. *Niko - zástupce Vestas Czechia* [online]. [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.niko-brno.cz/index.php?page=proc>
- [56] Energy payback. In: *Vestas* [online]. © 2014 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://vestas.com/en/about/sustainability#!energy-payback>
- [57] KOUTNÍK, Tomáš. *Cvičení v předmětu Letadla – prezentace č. 3*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Strojního inženýrství, Letecký ústav. 2014-03-06
- [58] KOUTNÍK, Tomáš. *Cvičení v předmětu Letadla – prezentace č. 4*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Strojního inženýrství, Letecký ústav. 2014-03-13
-

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka	Význam
BRKO	Biologicky rozložitelný komunální odpad
ČEN	Čas energetické návratnosti
ČR	Česká republika
emn	Elektromotorické napětí
EU	Evropská unie
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PEN	Poměr energetické návratnosti
USA	Spojené státy americké
VtE	Větrná elektrárna

Symbol	Význam	Jednotky
λ	Rychloběžnost	[-]
A	Plocha, přes kterou daný vzduch prochází	[m ²]
A ₀	Plocha před profilem listu, kterou daný vzduch prochází	[m ²]
A _d	Plocha pod profilem listu, kterou daný vzduch prochází	[m ²]
A _h	Plocha nad profilem listu, kterou daný vzduch prochází	[m ²]
A _L	Plocha rotoru	[m ²]
C _p	Výkonový součinitel	[-]
d	Tloušťka rotorového disku	[m]
ε	Elektromotorické napětí	[V]
E _k	Kinetická energie vzduchu	[J]
E _r	Roční výroba elektřiny	[MWh]
g	Gravitační zrychlení	[m·s ⁻²]
h	Výška profilu listu	[m]
k _r	Kapacitní faktor	[-]
P	Výkon vzduchu	[W]
p	Tlak vzduchu	[Pa]
P _{celkový}	Celkový výkon elektrárny	[W]
p _d	Tlak pod profilem listu	[Pa]
p _h	Tlak nad profilem listu	[Pa]
P _{inst}	Instalovaný výkon VtE	[MW]
P _{totální}	Totální výkon	[W]
P _{získaný}	Maximální výkon, který lze získat z větru	[W]
R	Poloměr rotoru	[m]

t_r	Délka roku	[h]
v	Rychlost vzduchu	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
v_a	Rychlost větru před turbínou	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
v_b	Rychlost větru po průchodu turbínou	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
v_d	Rychlost daného vzduchu pod profilem listu	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
v_h	Rychlost daného vzduchu nad profilem listu	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
ρ	Hustota vzduchu	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
Φ_B	Magnetický indukční tok	[Wb]

Seznam obrázků a tabulek

Obrázky:

Obr. 1: Rozdělení rotorů větrných elektráren dle rychloběžnosti rotorů: [2].....	- 17 -
Obr. 2 : Schéma anemometru [4]	- 18 -
Obr. 3: Anemometr [22].....	- 18 -
Obr. 4: Schéma Savoniova větrného motoru [4].....	- 19 -
Obr. 5: Savoniova turbína s estetickým vzhledem [5]	- 19 -
Obr. 6: Klasické větrné kolo [5].....	- 19 -
Obr. 7: Větrný mlýn holandského typu [6]	- 20 -
Obr. 8: Různé typy Darrierova rotoru [8]	- 20 -
Obr. 9: Graf závislosti procentuálního poměru vyplnění plochy rotoru Φ [-] (A_L je plocha rotoru, D [m] je průměr rotoru) na rychloběžnosti [2]	- 21 -
Obr. 10: Testování větrných čoček v Japonsku [25].....	- 22 -
Obr. 11: Výkon elektráren pro různé velikosti jejich turbín [10].....	- 23 -
Obr. 12: Porovnání větrné turbíny Bard 5.0 se zásobovací lodí [12].....	- 24 -
Obr. 13: Základní části VtE.....	- 25 -
Obr. 14: Spojení horní a dolní poloviny rotorového listu [15].....	- 26 -
Obr. 15: Doprava rotorového listu, který měří přes 80 m [17]	- 26 -
Obr. 16: Stavba VtE E126 – kořenové části rotorových listů přichycené k rotorové hlavě [16].....	- 27 -
Obr. 17: Schéma strojovny VtE Vestas V52 o výkonu 850 kW	- 28 -
Obr. 18: Dělená gondola firmy MFG Wind [21]	- 29 -
Obr. 19: Příruby s otvory pro šrouby, které se navaří na čela krajních prstenců jednotlivých segmentů [28]	- 30 -
Obr. 20: Führlander 2500 – na jeho stavbu byl potřeba jeden z největších jeřábů s lomeným ramenem v Evropě [29]	- 31 -
Obr. 21: První prstence u paty stožáru s podpůrnou konstrukcí a montážní plošinou [30] ..	- 32 -
Obr. 22: Betonový základ čtvercového půdorysu [31]	- 33 -
Obr. 23: Pevné základové konstrukce [32]	- 33 -
Obr. 24: Plovoucí základové konstrukce [32].....	- 34 -
Obr. 25: Kinetická energie větru [10]	- 35 -
Obr. 26: Rychlost větru před a za turbínou. [10]	- 36 -

Obr. 27: Profil proudícího vzduchu přes větrnou turbínu [33]	- 38 -
Obr. 28: Profil proudícího vzduchu kolem listu rotoru [57]	- 38 -
Obr. 29: Profil listu s aerodynamickými silami [58].....	- 40 -
Obr. 30: Prstenec mnohápólového synchronního generátoru VtE [50]	- 41 -
Obr. 31: Větrná farma u Palm Springs v Kalifornii [26]	- 43 -
Obr. 32: Energetický mix ČR v % pro rok 2012 [36]	- 44 -
Obr. 33: Vývoj výroby elektřiny z OZE a její podíl na hrubé domácí spotřebě [37]	- 45 -
Obr. 34: Energetický mix EU v % pro rok 2011 podle typu pohonné hmoty [42]	- 46 -
Obr. 35: Podíl kontinentů a jejich oblastí na celkové vyrobené elektrické energii za rok 2011 [44].....	- 47 -
Obr. 36: Podíl hlavních zdrojů na celkové výrobě elektrické energie za rok 2011 [44].....	- 48 -
Obr. 37: Porovnání VtE V112-3.0 MW s dalšími typy elektráren z hlediska PEN [56]	- 49 -
Obr. 38: Ilustrace všech šesti konceptů, jejich názvy zleva doprava: UMaine Spar, MIT TLB, SWAY, UMaine Semi-Sub, UMaine TLP a OC4 Jacket [54].....	- 50 -
Obr. 39: PEN a ČEN všech šesti konceptů offshore VtE [54]	- 51 -

Tabulky:

Tab. 1: Státy s nejvyšším instalovaným výkonem VtE v roce 2012 [45]	- 46 -
Tab. 2: Instalovaný výkon VtE v jednotlivých částech světa v roce 2012 [45]	- 47 -