

4. VYUŽITÍ ENERGIE VĚTRU

Jiří Škorpík, ORCID: 0000-0002-3034-1696, skorpik.jiri@email.cz

Úvod 1

Vítr a jeho energie 2

• Vítr 2 • Vztah mezi rychlostí větru a výkonem větrné turbíny 3 • výpočet citlivosti výkonu větrné turbíny na změnu rychlosti větru [Ú.593] 4 • Vliv vybrané lokality na výkon větrné turbíny 4 • Třídy drsnosti zemských povrchů [T.591] 4 • návrh instalovaného výkonu větrné elektrárny pro vybranou lokalitu [Ú.592] 6

Konstrukce větrné elektrárny 7

• Gondola 7 • Sloup větrné elektrárny 8 • Základy 9 • Lopatky větrných turbín 9 • Multirotorová větrná elektrárna 10

Stavba větrné elektrárny 11

Větrná energetika 13

Odkazy 13

Přílohy 16

• 592 Řešení úlohy 16 • 593 Řešení úlohy 19

Úvod

Budeme hovořit o větrných elektrárnách

Pomineme-li lodní plachty, pak větrnou energii využíváme především pro výrobu elektrické energie ve větrných elektrárnách. Ve větrných elektrárnách probíhá transformace části kinetické energie větru na práci větrné turbíny¹, která je pak v elektrickém generátoru transformována na energii elektrickou.

Převažuje axiální typ větrných turbín

Tento článek je téměř výhradně zaměřen na využití větrné energie, neboli eoliky, pomocí větrných turbín s horizontální osou rotace (tzv. axiální turbíny¹¹), protože tento typ výrazně převažuje.

1093 Skupina větrných elektráren v Břežanech u Znojma



Jedná se o 5 jednotek Vestas V52 s celkovým instalovaným výkonem 850 kW, výška sloupu 74 m, průměr rotoru 52 m. Zdroj parametrů [2].

243 Plovoucí větrná elektrárna Hywind Tampen



Průměr rotoru tohoto typu elektrárny je 167 m při instalovaném výkonu 8 MW. Svislý plovák, ke kterému je sloup připevněn, je ke dnu ukotven lany. Elektrické vedení je vedeno podél jednoho kotevního lana. Zdroj parametrů [20]. Autor obrázku: Kværner

Na pevnině i na moři

Větrné turbíny s horizontální osou rotace jsou umísťovány nad terénem nejčastěji na sloupu ve výšce, ve které je dostatečná rychlostí větru, viz *Obrázek 1093, s. 1*. Větrné elektrárny umísťované na pevnině se označují v angličtině slovem onshore a elektrárny budované na moři se anglicky označují slovem offshore. Sloupy offshore elektráren mohou být v betonovém základu zapuštěného do dna, přišroubované k příhradové konstrukci pevně stojící na dně, nebo mají plovoucí základ, který je ke dnu ukotven pouze lany (tato varianta umožňuje stavět elektrárny dále od pobřeží ve větších hloubkách [8]), viz *Obrázek 243, s. 1*.

Současné velikosti

V současnosti (2020) největší větrné elektrárny stavěné na souši dosahují výšky sloupu kolem 180 m, respektive špiče lopatek dosahuje do výše kole 250 m – elektrárny instalované na moři jsou nižší, ale s větším průměrem rotorů při vyšších výkonech, protože nad oceánem jsou nižší turbulence³⁸ a vyšší rychlosti větru.

Vítr a jeho energie

Vítr

Vliv Slunce i rotace Země

Vítr (proud vzduchu) vzniká v atmosféře z rozdílů tlaků způsobených nerovnoměrným ohříváním povrchu Země. Také je ovlivněn rotací Země (Coriolisova síla, odstředivá síla). Další vliv má (v přízemních výškách) morfologie krajiny, druh rostlin a stavby.

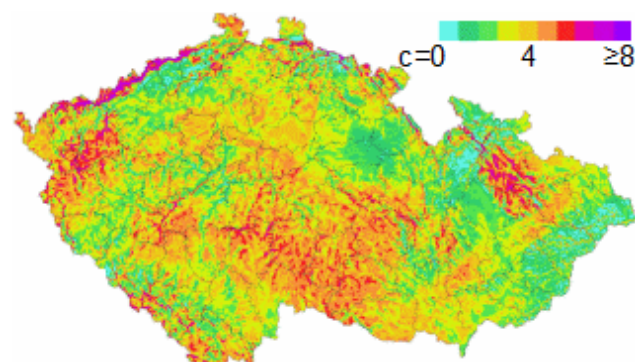
Přes den fouká více

Rychlost větru se v dané lokalitě mění i v průběhu dne podle slunečního svitu, který ohřívá vzduch, a tím ho uvádí do pohybu, proto k večeru vítr často ustává a dopoledne naopak zesiluje (viz záznamy denní rychlosti větrů z meteorologických stanic) – to samozřejmě platí pro případy, kdy výrazně nepřevažuje vliv kontinentálních tlakových níží a výší.

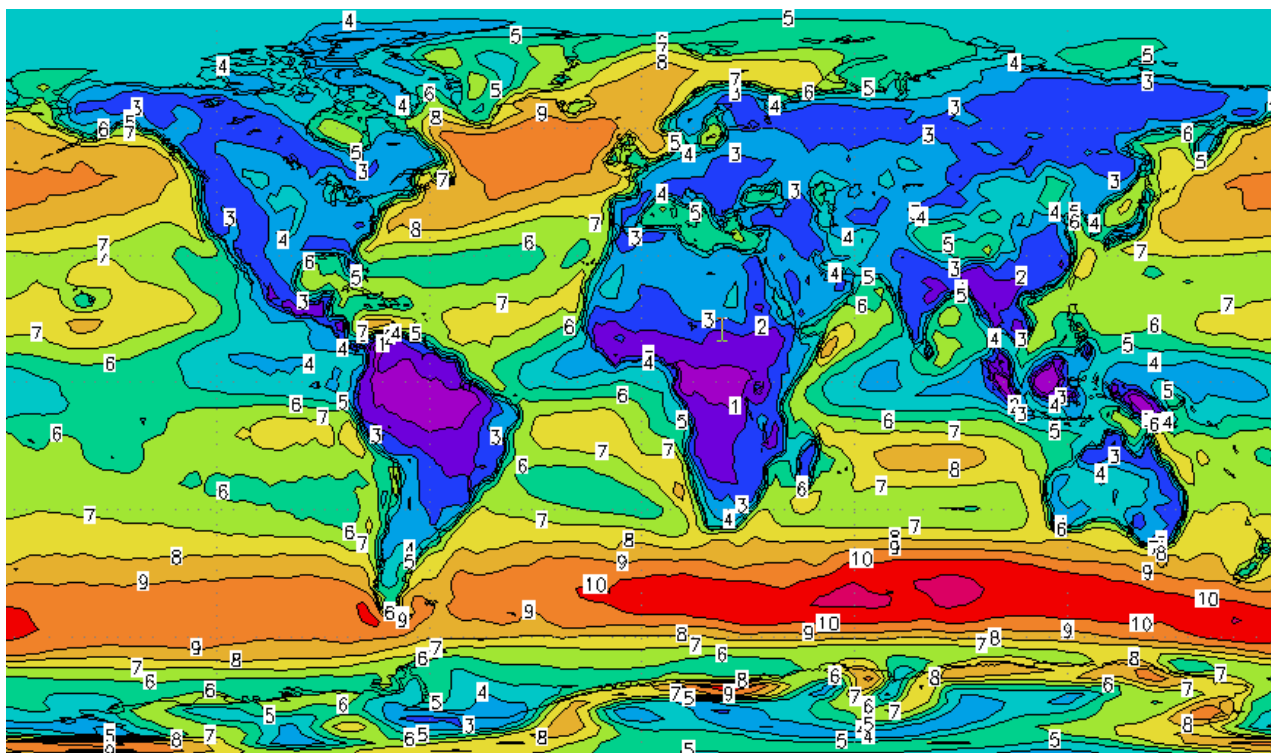
Rozložení rychlosti větru v krajině

Některá místa na zemském povrchu mají horší větrné podmínky jiná lepší, jak ukazuje mapa rozložení rychlosti větru na *Obrázku 589*, která vznikla z měření prováděné v letech 1976 až 1995 po celém světě (rychlost v některých lokalitách byla dopočítána), a větrná mapa České republiky na *Obrázku 1099*.

1099 Větrná mapa ČR ve výšce 10 m nad povrchem (2005)



c [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] průměrná hodnota rychlosti větru za rok. Zdroj [12].



589 Větrná mapa Země ve výšce 10 m nad povrchem

Údaje jsou v $m \cdot s^{-1}$ a jedná se o roční průměrné rychlosti větru. Zdroj [11].

Vztah mezi rychlostí větru a výkonem větrné turbíny

Kinetická energie větru

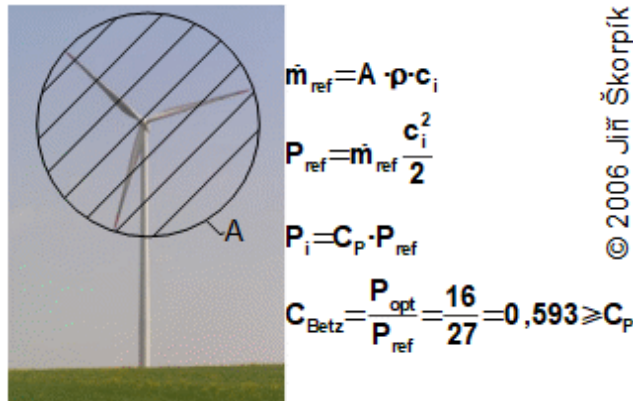
Proud vzduchu má měrnou kinetickou energii odpovídající polovině druhé mocniny jeho rychlosti ($0,5c^2$). Sníží-li se jeho rychlost, znamená to, že část této energie se musela transformovat na jinou (například tlakovou⁴³, vnitřní tepelnou⁴³ apod.) nebo na práci podle prvního zákona termodynamiky pro otevřený systém⁴³. Právě transformace kinetické energie vzduchu na práci může probíhat při průchodu vzduchu větrnou turbínou (přesný popis viz kapitola Základní rozdělení a princip činnosti¹¹).

Referenční a optimální výkon větrné turbíny

Jestliže výkon proudu vzduchu, který by protékal plochou rotoru lokální rychlostí větru, nazveme referenční, pak je jasné, že skutečný výkon rotoru větrné turbíny bude menší než tento, viz *Vzorec 217, s. 4*. Jednak kvůli ztrátám a tomu, že nelze využít celou kinetickou energii vzduchu (to by se proud zastavil a tedy i průtok), a jednak také kvůli tomu, že rotorem protéká mnohem méně vzduchu než odpovídá součinu plochy rotoru a lokální rychlosti větru, více o tomto problému v podkapitole Ztráty ve větrných turbínách²². Navíc lze dokázat, že za ideálních podmínek se může ve větrné turbíně transformovat na práci maximálně $8/9$ kinetické energie vzduchu (úplný důkaz je proveden v kapitole Energetická bilance větrné turbíny¹³), tato práce se nazývá měrnou optimální prací větrné turbíny. Výkon, který by vzduch procházející turbínou při takové práci konal se nazývá optimální výkon větrné turbíny. Podíl optimálního výkonu a referenčního výkonu se nazývá Betzův limit podle německého fyzika **Alberta**

Betze, který tento limit definoval. Pomocí Betzova limitu lze tedy stanovit orientačně výkon větrné turbíny s tím, že skutečný výkon bude menší, viz *Vzorec 217*.

217 Přibližný výkon větrné turbíny



$\dot{m}_{\text{ref}}$ [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$] referenční průtok vzduchu rotorem turbíny; A [m^2] plocha rotoru; ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] hustota vzduchu; c_i [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] rychlost větru před rotorem (v takové vzdálenosti před rotorem, kde ještě rotor neovlivňuje proudění); P_{ref} [W] referenční výkon větrné turbíny; P_i [W] skutečný výkon rotoru větrné turbíny; C_p [-] výkonový koeficient²² větrné turbíny, který zohledňuje ztráty a reálný průtok vzduchu rotorem; P_{opt} [W] optimální výkon rotoru větrné turbíny.

593 Úloha

Vypočítejte kolikrát se změnil referenční výkon větrné elektrárny, když rychlost větru z $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ klesne třikrát na rychlost $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Řešení úlohy je uvedeno v *Příloze 593*, s. 19.

Vliv vybrané lokality na výkon větrné turbíny

Změna rychlosti větru s výškou

Jestliže chceme předpovědět výkon větrné elektrárny, pak musíme znát rychlost větru ve vybrané lokalitě. V jakémkoliv místě se rychlost větru s výškou nad povrchem mění, a to přibližně exponenciálně (viz přibližný *Vzorec 590*). Tato změna v blízkosti povrchu souvisí s odpory (stavby, les apod), turbulencí a třením proudu vzduchu o povrch, ve vyšších vrstvách se projevuje i inverze.

590 Přepočet rychlosti větru podle výšky

$$c_{h2} = c_{h1} \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^a$$

c_{h2} [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] rychlost větru v požadované výšce; c_{h1} [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] rychlost větru ve výšce, ve které byla hodnota rychlosti měřena; h_1 [m] výška měření rychlosti c_{h1} ; h_2 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] požadovaná výška, ve které je rychlost větru c_{h2} ; a [-] exponent jehož velikost se odvozuje od reliéfu krajiny – odvozeno od třídy drsnosti zemského povrchu viz *Tabulka 591*. Zdroj [13].

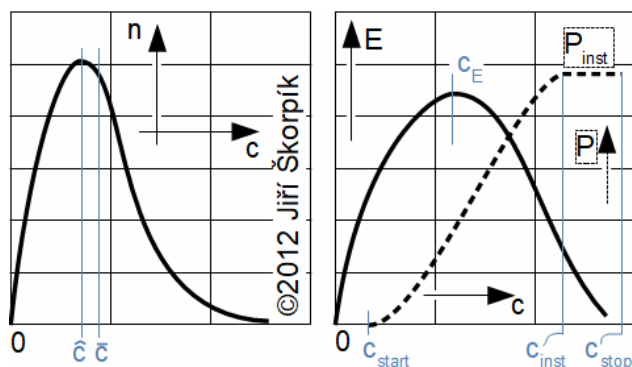
591 Třídy drsnosti zemských povrchů

t.d. charakter krajiny	a
0 otevřené pobřeží bez jakýchkoliv překážek s větrem směřujícím k pobřeží	0,12
1 otevřená krajina s ojedinělými volně stojícími keři a stromy (pobřeží, prairie)	0,15
2 zemědělská krajina s rozptýlenými budovami a křovinami	0,18
3 uzavřená krajina s porostem stromů, mnoha křovinami a sousedícími budovami	0,24

t.d. třída drsnosti krajiny. Zdroj [13].

Určení četnosti
rychlosti větru pro
požadovanou lokalitu

1100 Stanovování
průměrné roční
rychlosti větru a
potenciál výroby
elektriny za rok



vlevo průměrná rychlost větru stanovená z absolutní četnosti rychlosti větru v dané lokalitě; **vpravo** roční energetický potenciál větru jednotlivých rychlostí větru v dané lokalitě. E [kWh] předpokládané množství vyrobené energie při dané rychlosti větru za rok; n [dny] četnost; $\hat{c}$ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] modus, což je nejčastěji naměřená hodnota rychlosti větru; c_E [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] ekonomická rychlost větru (rychlost větru, která má nejvyšší podíl z vyrobené elektrické energie za rok); P [W] výkon generátoru při dané rychlosti větru; c_{start} [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] rychlost větru, při které generátor začíná vyrábět elektřinu; c_{inst} [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] rychlost větru, při které generátor dosahuje maximálního instalovaného výkonu P_{inst} ; c_{stop} [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] rychlost větru, při které se elektrárna odstavuje. O sestavování četnosti např. [14, s. 43].

Rozdělení rychlosti
větru podle
Rayleighova rozdělení
pravděpodobnosti

Křivka četnosti rychlosti větru je velmi blízká Rayleighovu rozdělení pravděpodobnosti, takže dokážeme-li odhadnout průměrnou hodnotu rychlosti větru, pak lze pomocí vzorců Rayleighova rozdělení odhadnout absolutní četnost rychlosti větru. Tento postup se aplikuje zejména v případech, kdy chybí podrobné dlouhodobé měření rychlosti větru v dané lokalitě, viz *Úloha 592*, s. 6.

Aerodynamický návrh
lopatků se provádí pro
rychlost c_E

Všimněte si, že v oblasti s průměrnou rychlostí $4,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ by elektrárna s instalovaným výkonem při rychlosti $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dosahovala tohoto výkonu jen několik hodin za rok. Na druhou stranu, protože výkon turbíny roste s třetí mocninou rychlosti větru (*Vzorec 217*), může při mnohem větší rychlosti vyrobit za tuto kratší dobu stejné množství elektřiny jako za mnohem delší dobu při menší rychlosti. Z těchto důvodů se aerodynamický tvar lopatek navrhuje na rychlost větru, při které se vyrobí nejvíce elektrické energie, což je rychlost c_E (kombinace výkonu elektrárny při dané rychlosti a četnosti této rychlosti větru). To je dáno tím, že nelze zkonstruovat generátor a rotor účinně a spolehlivě pracující v širokém rozsahu výkonů.

Obvyklý provozní
rozsah větrných
elektráren

Většina typů větrných elektráren startuje až při rychlosti větru 4 až $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a maximálního výkonu dosahují při $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (při rychlostech vyšších, než je povolená rychlost větru, je větrná

turbína zabržděna a lopatky jsou stočeny tak, aby kladly větru co nejmenší odpor).

Výkyvy v rychlostech větru

Výkon větrné turbíny také ovlivňuje roční stálost větru v požadované lokalitě. Obecně lze ale říci, že čím je větší výška sloupu, tím jsou i menší rozdíly v rychlosti větru v oblasti rotoru během roku. Takže s výškou sloupu roste i spolehlivost dodávek elektrické energie z větrné turbíny.

Vzdálenosti větrných turbín od sebe

Větrná turbína ovlivňuje své okolí, jednak se kolem ní snižuje energie větru, a jednak vznikají turbulence. Proto má smysl další turbínu postavit až ve vzdálenosti, kde už bude proud vzduchu, který prošel rotorem turbíny, opět promíchán s okolním a získá zpět ztracenou kinetickou energii. Minimální vzájemné vzdálenosti větrných turbín doporučuje výrobce (obvykle odpovídá 7 průměrům rotoru [19]) a povolují příslušné úřady. Další větrné elektrárny směrem do stran se staví ve vzdálenosti odpovídající 4 průměrům rotoru [19].

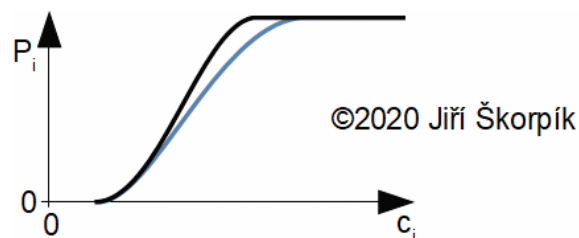
Námraza

Při výběru vhodné lokality by se, mimo její větrnosti, mělo přihlížet i na možnost tvorby námrazy (námraza svou tíhou narušuje vyváženost rotoru a při pádu z rotoru může ohrožovat okolí) a zohledňovat tahy velkých ptáků a ochrana přírody obecně, viz pokyny v [18].

Stroboskopický efekt a hlučnost

Dalším omezením, tentokrát hygienickým, je stroboskopický efekt otáčejícího se rotoru a především hlučnost elektrárny, což je problém zejména v obydlených oblastech, například ve vzdálenosti 300 m od elektrárny Vestas V52, při výšce sloupu 49 m lze naměřit hlučnost na úrovni 45 až 40,8 dB [2]. Hlučnost lze snižovat natáčením lopatek (například v režimu den/noc), i když se sníží výkon elektrárny, viz *Obrázek 1098*.

1098 Výkonová charakteristika větrné elektrárny



Modrá čára představuje snížení výkonu natočením lopatek za účelem snížení hlukového zatížení okolí.

Co dále řešit při výběru lokality?

Při výběru lokality je nutné také řešit přenos elektriny¹ do obydlených oblastí – jedná se o problém odlehlých lokalit v zahraničí. Dalšími faktory při výběru lokality je dopad vizuálního znečištění, infrastruktura dané oblasti potřebná pro stavbu apod.

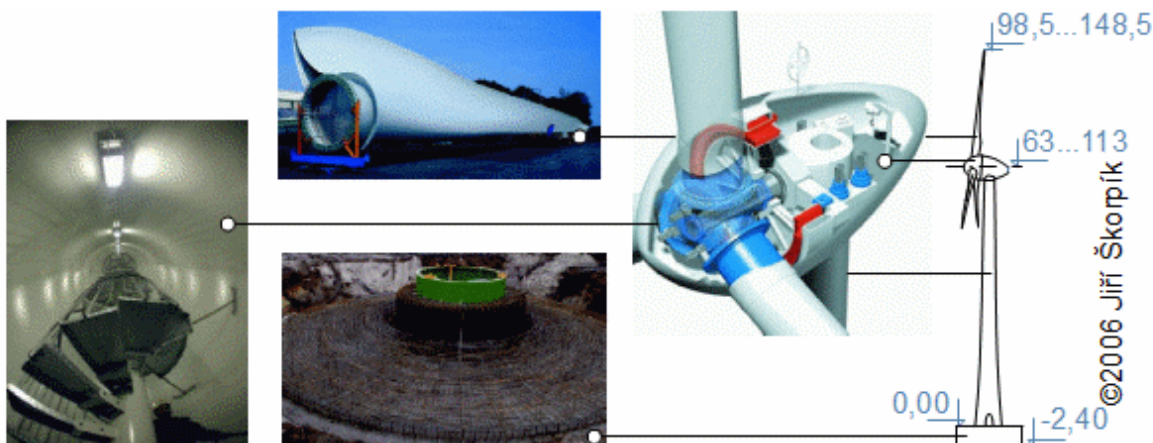
592 Úloha

Navrhněte přibližný instalovaný výkon větrné turbíny pro lokalitu okresu Znojmo-východ. Povolená výška sloupu je 74 m a průměr rotoru 52 m. Řešení úlohy je uvedeno v *Příloze 592, s. 16*.

Konstrukce větrné elektrárny

Čtyři základní části
větrných elektráren

Větrná elektrárna obsahuje čtyři základní částí (Obrázek 1094), přičemž nejmohutnější je sloup a jeho masivní betonový základ. Na vrcholu sloupu je gondola obsahující elektrický generátor s příslušenstvím, ke kterému je připojena větrná turbína s lopatkami¹¹.



1094 Větrná elektrárna Enercon E-70

Výkon 2 MW, otáčky 6...21,5 min⁻¹, poloměr rotoru 71 m. Zdroj obrázků a parametrů [3].

Gondola

Obsah gondoly

Gondola obsahuje převodovku, spojku, el. generátor a hřídel turbíny. Gondola s celým svým vybavením je uložena na kluzném ložisku²⁴ s plastickým mazivem²⁴, aby se mohla na sloupu natáčet proti větru. Mezi gondolou a sloupem bývá také nainstalováno tlumení, které zabraňuje přenosu vibrací.

Hlavní ložisko

Hřídel je uložena ve valivém obvykle dvouřadém kuželíkovém ložisku (vnější průměr tohoto ložiska může dosahovat i několika metrů [9-v článku je popsána funkce zkušebního zařízení na velká valivá ložiska pro větrné elektrárny], viz kapitola Valivá ložiska²⁴).

Převodovka a brzda

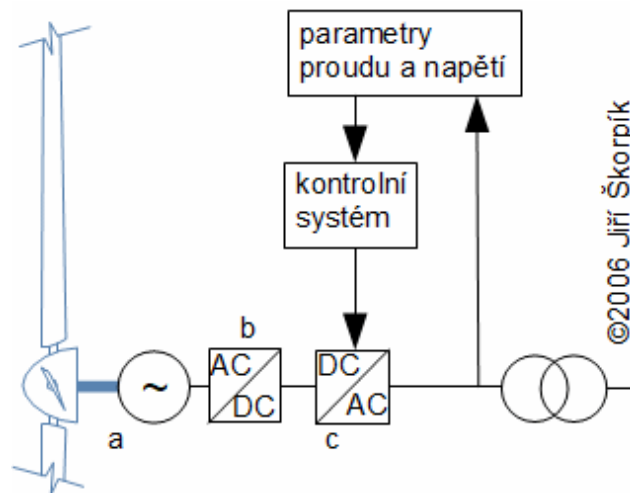
Mezi rotorem a generátorem bývá převodovka planetového provedení, aby hřídel generátoru a turbíny byly ve stejné ose. Převodovka může být s plynulou změnou převodového poměru [4], ale lze se setkat i s dvou až třírychlostními převodovkami nebo dokonce s větrnými elektrárnami bez možností změny otáček turbíny (regulace probíhá pouze natáčením lopatek). Za převodovkou je brzda, a až pak spojka a za ní generátor.

Generátor – jeho
frekvence

Pokud je použit vícepólový generátor s frekvenčním měničem (výstupem je elektřina nejen s proměnlivým proudem, ale i frekvencí a napětím), není převodovka potřeba, což zvyšuje účinnost. Nevýhodou je nutnost vysokofrekvenční elektřinu transformovat na stejnosměrný proud a poté opět na střídavý o frekvenci 50 Hz, viz Obrázek 1095, s. 8 – vysokofrekvenční generátor má i elektrárna Enercon na předchozím obrázku. Větrné elektrárny s vysokofrekvenčním generátorem se používají i u

nejmenších větrných elektráren (výkony několik stovek Wattů) určené pro výrobu elektřiny v domácnostech např. [6, 7]. U klasických generátorů s převodovkou je přímo vyráběn proud o frekvenci 50 Hz.

1095 Schéma zapojení vysokofrekvenčního generátoru větrné elektrárny



a generátor; b usměrňovač; c střídač.

Napětí generátoru

Napětí na svorkách generátoru větrné turbíny záleží na typu a výkonu. U velmi malých větrných elektráren pracujících v ostrovním režimu (osamocené stavby, malé lodě apod.) se jedná většinou o stejnosměrné generátory o napětí 12 až 24 V. U větrných elektráren pro domácnosti to může být až 230 V/fázi. U velkých elektráren napětí často nepřesahuje 1000 V, ale dodávají se generátory pro větrné turbíny o jmenovitém napětí 6,3 kV až 11 kV [4]. Napětí generátoru je transformováno v objektu elektrárny na 22 kV nebo vyšší podle místního napětí přenosové soustavy.

Výkon generátoru

Výkon generátoru musí odpovídat očekávanému výkonu větrné turbíny v požadované lokalitě, protože při jeho provozu mimo jeho optimální výkon se zhoršuje jeho účinnost.

Kompenzátor jalového výkonu

Některé elektrárny mají i funkci regulace jalové elektřiny v přenosové soustavě [26] – funguje jako rotační kompenzátor jalového výkonu pomocí změn v buzení generátoru.

Sloup větrné elektrárny

Obecné požadavky

Sloup větrné elektrárny musí být nejen požadovaně vysoký, ale i dostatečně pevný, aby odolal hmotnosti celého soustrojí a síle větru. Středem sloupu také vede servisní žebřík nebo schodiště a elektrické vedení do gondoly. Tvar sloupu by měl také splňovat i estetické požadavky v lokalitě [1, s. 444].

Skořepinové i příhradové konstrukce

Konstrukce sloupu je nejčastěji tvořena ocelovým dutým kuzelem (u malých turbín ocelovým sloupem) případně kombinován se železobetonovým tubusem. Při větších výškách se používají sloupy z příhradové konstrukce z krátkých nosníků. Společnost GE začala v roce 2014 používat kombinaci příhradové konstrukce nosníku potaženého sklolaminátovými pláty pro lepší

ochranu konstrukce sloupu před větrem a deštěm a pro chránění přístupové cesty ke gondole [5].

Základy

Masivní betonový základ

Základy větrné elektrárny obvykle tvoří betonová deska. U větrné elektrárny s výškou sloupu 75 m se jedná přibližně o rozměry 10x10x5 m (větrný park Břežany). O základech elektráren typu offshore je stručně pojednáno již v úvodu článku.

Lopatky větrných turbín

Počet lopatek je dán počtem otáček

Nejčastěji se stavějí větrné turbíny se třemi lopatkami, ale mohou mít i více lopatek, nebo naopak lze zkonstruovat zcela funkční větrnou turbínu s jednou lopatkou. Počet lopatek má velký vliv na otáčky turbíny při dané rychlosti větru, přičemž nejvyšší otáčky musí mít turbíny s jednou lopatkou, více v podkapitole Ztráty ve větrných turbínách²².

Natáčivé lopatky

Lopatky větrných turbín (kromě malých) jsou natáčivé, aby se přizpůsobovaly proměnlivé rychlosti větru – což snižuje požadavky na převodové poměry převodovky. Existuje i natočení lopatky takové, při kterém dojde k zastavení otáčení rotoru.

Na velmi dlouhých lopatkách se projevují lokální rozdíly v rychlostech větru

V současnosti dosahují lopatky největších větrných turbín již takových délek (50 m), že se při otáčení projevuje rozdíl rychlosti větru mezi nejvyšší a nejnižší polohou lopatek, který způsobuje nerovnoměrné zatížení turbíny během jedné otáčky. Tato nerovnoměrnost může způsobit rozkmitání celé turbíny a následně i elektrárny a její poškození či destrukci – tomu zabraňuje diagnostika rotorové soustavy v reálném čase a natáčení lopatek.

Problém vysoké rychlosti na špičce

U velkých větrných turbín se konce lopatek pohybují velmi vysokou rychlostí, při kterých vznikají různé doprovodné zvukové efekty, což stěžuje výběr lokality pro umístění větrné elektrárny.

Konstrukce lopatek

Lopatky malých turbín se vyrábí buď z plných profilů (dřevo, laminát, hliníkový plech), nebo ze dřevěné či hliníkové kostry s potahem. Lopatky velkých turbín jsou duté vyrobené ze sklolaminátu (*Obrázek 911*), aby byly co nejlehčí, ale i tak,

911 *Výroba lopatky větrné turbíny.*



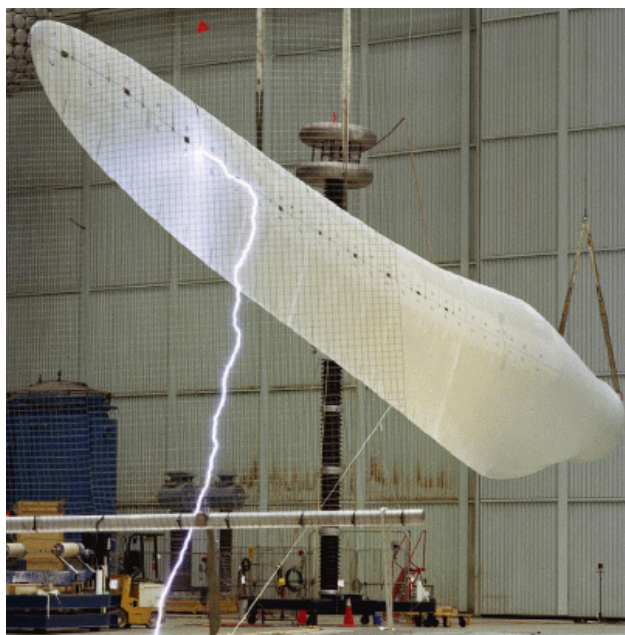
Na obrázku je fáze nanášení vrstev skelných vláken před zalitím polyesterem v továrně společnosti LM Wind Power [22]. Drobné informace o výrobě i v [8].

hmotnost velkých lopatek dosahuje několika tun, při délce kolem 50 m už jejich hmotnost přesahuje 10 tun. Jelikož výplň dutiny lopatky tvoří vzduch, tak občas dochází uvnitř lopatky ke kondenzaci vzdušné vlhkosti, která může vytvářet nevyváženosti rotoru, což vede k dočasnému zastavení elektrárny.

*Požadavky na lopatky
a jejich vnitřní čidla*

Lopatky se testují na vysoko-cyklovou únavu a musí být odolné podmínkám venkovní instalace, tj. vůči extrémům počasí, včetně úderů bleskem, námrazám a pod. (Obrázek 218). Lopatky jsou proto podle potřeby vybaveny bleskosvodem, čidly teplot, odmrazovacím zařízením, čidly na měření vibrací a dalšími doplňky, které přímo nesouvisí s jejich funkcí. Lopatky se projektují přibližně na dobu životnosti 20 let. Po tuto dobu musí být plně funkční bez nutnosti nátěru.

218 *Testování lopatky
větrné turbíny*



Testování odolnosti lopatky při úderu bleskem v továrně společnosti LM Wind Power (Nizozemsko) [22].

Multirotorová větrná elektrárna

*Větší množství
součástek, ale menších*

Mimo klasickou konstrukci s jednou gondolou na jednom sloupu se vážně experimentuje i s více menšími rotory na jednom sloupu, viz Obrázek 1225. S výkonem klasických jednorotorových elektráren totiž rostou i jejich rozměry a hmotnosti součástek. To jednak klade vysoké požadavky na konstrukci (vysoké měrné zatížení, které zvyšuje opotřebení pohyblivých dílů), a jednak na dopravní infrastrukturu (o tomto problému více v následující kapitole). Kdežto v případě vícerotorové elektrárny se použije sice více, ale menších součástek (zavádí se sériovost) a dokonce lze uvažovat i menších základech sloupu, na který působí menší páka od axiálních sil rotoru.

Shrnutí výhod

Uvedené očekávané výhody multirotorových větrných elektráren (snížení měrných nákladů, požadavků na dopravní infrastrukturu při stavbě i oprav a zvýšení spolehlivosti) jsou předmětem

1225 Prototyp čtyřrotorové větrné elektrárny



Větrná elektrárna obsahuje čtyři gondoly s vlastním příslušenství a rotorem. Ramena gondol na stejné výškové úrovni jsou propojena a mají společná axiální a radiální ložiska pomocí kterých se mohou otáčet kolem sloupu. Výška sloupu je 60 m, gondoly jsou převzaty z elektráren Vestas V29 s průměrem rotoru 29 m. Celkově instalovaný výkon elektrárny je 4x225 kW, tedy srovnatelný výkon jako jedné ale větší elektrárny na Obrázku 1093, s. 1. Obrázek převzat z [23], zdroj dat [24].

výzkumu, stejně tak, jako vliv sloupu u níže položené dvojice na proudění, kde se ukazuje, že je při nízkých rychlostech větru pozitivní [25].

Stavba větrné elektrárny

*Potřeba elektrického
vedení a dopravní
komunikace*

K místu stavby je obvykle nutné přivést elektrické vedení s dostatečnou kapacitou a vybudovat obslužnou komunikaci. Komunikace musí být budována tak, aby po ní mohl projet tahač s lopatkou (délky cca 30 m), jeřáb a betonářské vozy.

*Obtíže stavby při
silném větru*

Pro stavbu se vybírá nejméně větrné období v roce, protože mobilní jeřabové komplexy, které jsou pro stavbu nezbytné (Obrázek 1102, s. 12), lze provozovat pouze do určité rychlosti větru. Toto omezení často prodražuje opravy na větrné elektrárně (taxa za prostoje jeřábu, který je již na místě a nemůže pracovat, blokování dopravy při převozu jeřábu atd.) a prodlužuje jejich dobu.

*Montáž rotoru v kuse,
nebo po částech*

Při opravě nebo výměně jedné lopatky se musí demontovat celý rotor turbíny v jednom kuse. Takový úkon je opět velmi citlivý na rychlost větru (rozměrná turbína a nutná přesnost při montáži). Proto v roce 2012 představila společnost AREVA Wind GmbH nový systém (Single blade installation-SBI) umožňující montáž

1102 Stavba větrné elektrárny Enercon



1 základy; **2** stavba sloupu; **3** vyzvednutí gondoly; **4** vyzvednutí generátoru; **5** sestavení rotoru turbíny z jednotlivých lopatek a jeho následné vyzvednutí ke gondole. Zdroj [3].

rotoru ve výšce po jedné lopatce, viz *Obrázek 892*. Konstrukteři společnosti vyřešili především problém se šikmým zavěšením jedné lopatky během montáže.

Velmi dlouhé lopatky mohou být složeny dokonce ze dvou kusů (pro snadnější přepravu a manipulaci ve vnitrozemí), přičemž ta patní část (blíže k ose) je obvykle kovová, viz *Obrázek 892*.

Montáž dvoudílných lopatek

892 Alternativní přístupy k montáži rotoru větrné turbíny



vlevo Zařízení na montáž/demontáž větrné turbíny po jedné lopatce [10] – uvedený systém umožňuje montáž lopatky přímo na hřídel gondoly ve výšce v náklonu lopatky až do 330° při rychlosti větru do $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. **vpravo** Montáž rotoru větrné turbíny Enercon e-126 s dělenými lopatkami [3] – Patní části lopatek rotoru se kompletují k hřídeli na zemi a výsledný rotor se zvedá společně. K patní částí lopatek se připevňují druhé poloviny lopatek pomocí šroubů až ve výšce. Průměr rotoru s dělenými lopatkami dosahují až 126 m při instalovaném výkonu $7,58 \text{ MW}$.

Dělené sloupy pro přepravu

Problém představují i hmotné komponenty sloupu (ten se převážně dělí). V některých případech se přistupuje k odlehčení sloupů za cenu nutnosti jejich "zavětrování" pomocí kotevních lan.

Větrná energetika

Stav ČR

Významný rozvoj větrné energetiky v ČR nastal až po roce 2001 především díky dotacím na výkup vyrobené elektřiny z větrných elektráren. Od té doby rostl prudce instalovaný výkon větrných turbín, který se výrazně zpomalil až v sezóně 2011 (kombinace vyčerpání lokalit s povolením stavby větrné elektrárny a snížení výkupních cen elektřiny). V současnosti (2019) jsou v ČR v provozu větrné elektrárny s celkovým instalovaným výkonem $339,4\text{ MW}$, které v témže roce dodaly do sítě 691 GW elektrické energie [15].

Globální potenciál

Využitelný celosvětový větrný potenciál je přibližně 250 TW [17].

*Roční využití
instalovaného výkonu
větrné elektrárny*

Parametrem informující o "větrné kvalitě" lokality je roční využití instalovaného výkonu větrné elektrárny tj. poměr dodané elektrické energie do sítě za rok ku množství elektrické energie, které by elektrárna za rok vyrobila, kdyby pracovala neustále na maximální instalovaný výkon. Nutno ale dodat, že v některých oblastech nemusí mít výroba elektřiny z větrných turbín přednost a tak, mohou být během roku odstavovány nejen z důvodu větrných podmínek, ale i z důvodů nadbytku elektřiny v síti. Využití instalovaného výkonu v ČR roce 2015 bylo přibližně 23 %. Nejvyšších hodnot ročního využití instalovaného výkonu mají větrné elektrárny při pobřeží moře. Tyto elektrárny dosahují ročního využití instalovaného výkonu od 20 do 30 %.

*Metody zvyšování
instalovaného výkonu*

V 2013 se začaly testovat větrné elektrárny s řídicím systémem schopným komunikace s dalšími větrnými elektrárnami vzdálenými i několik stovek km a opatřenými akumulací elektrické energie. Tento systém umožňuje predikci výkonu na základě údajů předpovědi počasí a výkonu vzdálených elektráren, od kterých postupuje zesilující/oslabující vítr. Tyto predikce v kombinaci s možností krátkodobé akumulace elektrické energie umožňují zvýšit využití instalovaného výkonu větrné elektrárny až na 45 % [16].

Odkazy

[1] HAU, Erich, *Wind Turbines – fundamentals, technologies, Applications, Economics*, 2006. 2. vydání. Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN – 10-3-540-24240-6.

[2] *Vestas Wind Systems A/S*. Výrobce větrných elektráren. Adresa: Hedeager 44 8200 Aarhus N, Denmark, web: <http://www.vestas.com>, [2010].

[3] *ENERCON GmbH*. Výrobce větrných elektráren. Adresa: Otto-Lilienthal-Strasse 25, 28199 Bremen, Deutschland, web: <http://www.enercon.de>, 2010.

[4] *Wikov Wind a.s.*. Výrobce a dodavatel větrných elektráren. Web: <http://www.wikov.com>, [2011].

- [5] Autor neuveden. Stožár s unikátním prostorovým rámem, *Technický týdeník*, č. 8, ročník 2014. ISSN 0040-1064.
- [6] *Swift*. Internetové stránky věnované na propagaci malé větrné elektrárny o výkonu 1,5 kWe. Dostupné z <http://www.swiftwindturbine.com>, [2012].
- [7] *Honeywell Wind Turbine*. Internetové stránky věnované na propagaci malé větrné elektrárny o výkonu 4,5 kWe – s generátorem po obvodu rotoru. Dostupné z <http://www.windtronics.com>.
- [8] CEJNAROVÁ, A. Jak zkrotit vítr z moře, *Technický týdeník*, č. 11, ročník 2010. ISSN 0040-1064.
- [9] Autor neuveden. Významný mezník ve vývoji větrných elektráren, *Technický týdeník*, č. 13, ročník 2012. ISSN 0040-1064.
- [10] SHARPLEY, Nic. Single blade installation equipment showcased at Husum, *Windpower Engineering*, 2012. [on-line] pokračující zdroj. Web: <http://www.windpowerengineering.com>.
- [11] Autor neuveden. *The World of Wind Atlases – Wind Atlases of the World*, [2010]. Dostupné z <http://www.windatlas.dk>, 2010.
- [12] Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v.v.i. – Akademie věd ČR. Web: <http://www.ufa.cas.cz>, [2010].
- [13] CROME, Horst. *Technika využití energie větru*, 2002. Ostrava: HEL, ISBN 80-86167-19-4.
- [14] IBLER, Zbyněk, KARTÁK, Jan, MERTLOVÁ, Jiřina, IBLER, Zbyněk ml. *Technický průvodce energetika-1. díl*, 2002. 1. vydání. Praha: BEN-technická literatura, ISBN 80-7300-026-1.
- [15] *Energetický regulační úřad*. Web: <http://www.eru.cz>.
- [16] Autor neuveden. Obří inteligentní elektrárna, *Technický týdeník*, č. 7, ročník 2013. ISSN 0040-1064.
- [17] Autor neuveden. Statistika, *Scientific American*, 2012, listopad-prosinec. České vydání. Praha: Espero publishing, s.r.o., ISSN 1213-7723.
- [18] *Metodický pokyn k vybraným aspektům postupu orgánů ochrany přírody při vydávání souhlasu podle § 12 a případných dalších rozhodnutí dle zákona č. 114/1992 Sb., které souvisí s umísťováním staveb vysokých větrných elektráren*, 2011. Praha: Ministerstvo životního prostředí ČR. Dostupné z <http://www.mzp.cz>.
- [19] T. Al-Shemmeri. *Wind turbines*, 2010. 1st edition. Bookboon.com. ISBN 978-87-7681-692-6.
- [20] Tisková zpráva. *Hywind Tampen: the world's first renewable power for offshore oil and gas*. Dostupné z <https://www.equinor.com>. [2020-08-12].
- [21] TOPIČ, Petr. Jako uvnitř tanku, ale 80 metrů nad zemí. Jak se řídí větrná elektrárna, *iDnes.cz*, 2016. Dostupné z <http://technet.idnes.cz>, [Cit. 2020-08-14].
- [22] THOMSEN, Troels. *Reliability of large rotor blades*, 2004. Prezentace ke stejnojmenné přednášce na konferenci: AusWIND 2004 in July 28 – 30, Launceston, Tasmania. [cit. 2012-11] Dostupné on-line z <http://www.lmwindpower.com/>.
- [23] Autor neuveden. Tisková zpráva. *Vestas multi-rotor conceptmølle går ind i den afgørende testfase*. 2016. Dostupné z <https://www.vindenergi.dtu.dk>. [Cit. 2020-08-12].

[24] BAUER, Lucas, MATYSIK, Silvio. *wind-turbine-models.com*. Dostupné z <https://en.wind-turbine-models.com>, [2020-08-12].

[25] Maarten van der LAAN, M. P., ANDERSEN, S. J., Ramos GARCÍA, N., ANGELOU, N., PIRRUNG, G. R., OTT, S., SJÖHOLM, M., SØRENSEN, K. H., Vianna NETO, J. X., KELLY, M., MIKKELSEN, T. K., LARSEN, G. C.: Power curve and wake analyses of the Vestas multi-rotor demonstrator, *Wind Energy Science*, 4, 251–271. Dostupné z <https://doi.org/10.5194/wes-4-251-2019>, [Cit. 2020-08-14].

[26] ŠANTÍN, Vlastimil. *Simulace jevů způsobených připojováním a provozem větrných elektráren a farem*, 2012. Disertační práce: Západočeská univerzita v Plzni Fakulta elektrotechnická. Dostupné z <https://dspace5.zcu.cz/>, [Cit. 2020-09-10].

Bibliografická citace článku

ŠKORPÍK, Jiří. Využití energie větru, *Transformační technologie*, 2006-10, [last updated 2020-10-23]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <https://www.transformacni-technologie.cz/04.html>.