

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Provoz a připojení pobřežních větrných elektráren

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

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

Jméno a příjmení: **Lukáš VOJTA**

Osobní číslo: **E14B0247P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**

Název tématu: **Provoz a připojení pobřežních větrných elektráren**

Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

Bakalářská práce "Provoz a připojení pobřežních větrných elektráren" bude zaměřena na tyto body:

1. Uveďte fyzikální princip funkce.
2. Zpracujte informace o různých variantách technického řešení.
3. Vypracujte způsob integrace těchto pobřežních větrných elektráren do distribuční, popř. nadřazené soustavy.
4. Porovnejte výhody a nevýhody instalace pobřežních větrných elektráren.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

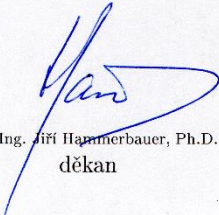
Seznam odborné literatury:

1. Skripta a přednášky z předmětu Elektroenergetika I, II.
2. Internetové podklady. Legislativní předpisy o řízení P,Q u zdrojů.
3. Dle uvážení a pokynů udá vedoucí BP.


Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá problematikou provozu a připojení pobřežních větrných elektráren. V úvodu je vysvětlen princip vzniku větru a popsány jeho důležité parametry. Poté je vysvětlena činnost a konstrukce větrných elektráren. Následuje část zaměřená na konkrétní konstrukci pobřežních větrných elektráren, jejich stavbu, servis a problémy s nimi spojené. Další kapitola se zaměřuje na integraci pobřežních větrných elektráren do distribuční sítě, kde jsou popsány jednotlivé technologie přenosu, jsou zde znázorněny příklady připojení větrných elektráren, vysvětluje způsoby regulace činného výkonu a vliv větrných elektráren na elektrizační síť. V poslední části jsou shrnuty výhody a nevýhody instalace pobřežních větrných elektráren. V závěru se nachází vyhodnocení a shrnutí práce.

Klíčová slova

Větrná elektrárna, pobřežní větrná elektrárna, větrná energie, větrný park, vítr, rychlost větru, turbína, generátor, offshore, regulace, přenos, akumulace energie, obnovitelný zdroj energie, účinnost, ekologie.

Abstract

The submitted bachelor thesis is focused on the matter of operation and connection of the offshore wind power plants. In the introduction, the principle of wind is explained, along with important wind parameters. Then the function and construction of wind farms is explained. Following part is focused on the specific construction of the offshore wind power plants, their construction, the service and the problems connected with it. Next chapter focuses on the integration of the offshore wind power plants into the distribution network, where there are described the technologies of transmission, examples of wind power plants connection, the ways to regulate the active power and the effect of wind power plants on the electricity network. In the last part, the advantages and disadvantages of offshore power plants are summarized. The evaluation and summary of the thesis is in the conclusion.

Key words

Wind power plant, offshore wind power plant, wind energy, wind park, wind, wind speed, turbine, generator, offshore, regulation, transmission, energy storage, renewable energy source, efficiency, ecology.

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 4.6.2017

Lukáš Vojta

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. za její cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD.....	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 VĚTRNÁ ENERGIE	13
1.1 VÍTR.....	13
1.2 RYCHLOST VĚTRU.....	14
1.3 ENERGIE VĚTRU.....	16
2 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	18
2.1 PRINCIP ČINNOSTI.....	18
2.2 KONSTRUKCE	18
2.2.1 Základy.....	18
2.2.2 Stožár větrné elektrárny.....	19
2.2.3 Gondola.....	20
2.2.4 Lopatky.....	22
2.3 DRUHY VĚTRNÝCH TURBÍN	22
2.3.1 Odporové turbíny.....	23
2.3.2 Vztlkové turbíny.....	23
2.3.3 Turbíny s horizontální osou otáčení.....	24
2.3.4 Turbíny s vertikální osou otáčení.....	25
2.4 TEORIE VĚTRNÉ TURBÍNY.....	26
2.4.1 Účinnost.....	26
2.4.2 Teoreticky dosažitelný výkon.....	26
2.4.3 Princip funkce vztlkových motorů.....	27
2.4.4 Rychloběžnost.....	28
2.5 TYPY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	29
3 POBŘEŽNÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	31
3.1 NÁZVOSLOVÍ.....	31
3.2 ZÁKLADY	31
3.2.1 Železobetonové základy.....	32
3.2.2 Monopile.....	32
3.2.3 Jacket.....	32
3.2.4 Tripod.....	33
3.2.5 Tri-pile.....	33
3.3 STAVEBNÍ PRAVIDLA.....	34
3.4 SERVIS	34
3.5 NEJVĚTŠÍ POBŘEŽNÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY V EVROPĚ	35
4 INTEGRACE POBŘEŽNÍCH VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN DO DISTRIBUČNÍ SÍTĚ	36
4.1 VYSOKONAPĚŤOVÝ PŘENOS A ZTRÁTY	36
4.1.1 Technologie HVAC.....	36
4.1.2 Technologie HVDC.....	38
4.1.3 Technologie LFAC.....	40
4.2 PŘÍKLAD PŘIPOJENÍ OFFSHORE VTE DO PŘENOSOVÉ SOUSTAVY.....	41
4.2.1 Střídavé připojení HVAC.....	41
4.2.2 Stejnoseměrné připojení HVDC.....	42
4.2.3 Schéma připojení větrného parku Fantanele-Cogevalac.....	42
4.3 REGULACE ČINNÉHO VÝKONU VTE.....	43
4.3.1 Malé větrné elektrárny.....	43
4.3.2 Velké větrné elektrárny.....	44
4.4 VLIV VTE NA ELEKTRIZAČNÍ SÍŤ	46

4.4.1	Přetěžování sítí.....	47
4.4.2	Zkratové poměry.....	47
4.4.3	Flicker.....	48
4.4.4	Napětí vyšších harmonických.....	48
4.4.5	Rušení HDO signálu.....	49
4.4.6	Regulace výkonu.....	49
4.5	AKUMULACE ENERGIE	49
5	POROVNÁNÍ VÝHOD A NEVÝHOD INSTALACE POBŘEŽNÍCH VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	52
5.1	VŠEOBECNÉ VÝHODY VTE	52
5.1.1	Výhody pobřežních větrných elektráren	52
5.2	VŠEOBECNÉ NEVÝHODY VTE	53
5.2.1	Nevýhody pobřežních větrných elektráren.....	53
6	ZÁVĚR.....	55
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	57

Úvod

Větrná energie je jedním z mnoha současně využívaných obnovitelných zdrojů, společně se solárním zářením, energií vody, biomasy a bioplynu, geotermální energií a dalšími. Jak klesá dostupnost konzervativních zdrojů energie, jako jsou např. ropa nebo uhlí, roste zároveň poptávka po těchto „zelených“ energiích, které jsou viděny jako potenciální náhrada fosilních paliv. Díky tomu můžeme v posledních letech vidět nárůst využívání alternativních zdrojů energie, v Čechách zejména solární energie (rozvoj spojený zejména s vysokou výkupní cenou této energie v minulých letech).

Obnovitelné zdroje mají obrovský energetický potenciál. Jen solární záření dopadající na povrch Země by několikrát dokázalo pokrýt celosvětovou spotřebu energie. Obnovitelným zdrojem s největším energetickým potenciálem je v Čechách vodní energie, pro další rozvoj se nejvíce počítá se spalováním biomasy, jako jsou dřevní štěpky a další produkty především lesního a zemědělského původu. Biomasa se spaluje jak čistá, tak ve směsi s uhlím. Poloha České republiky bohužel nezaručuje optimální podmínky pro využívání solární a větrné energie, proto se dají tyto zdroje energie považovat pouze jako doplňkové k současným konvenčním zdrojům. [1]

K nesporným výhodám obnovitelných zdrojů musíme ale přičíst i jejich velké nevýhody. K nim patří závislost na poloze a rozmarům počasí, z čehož vyplývá i jejich nestabilita dodávky, zejména u větrných a solárních elektráren, které je nutné pokrývat instalací dodatečných akumulčních elektráren, které tyto výkyvy dokáží velice rychle vyrovnat. To ale znamená i dodatečnou náročnost celého řízení dodávky elektrické energie.

Samotná větrná energie je mnohem více využívána v zahraničí než u nás. Největší instalovaný výkon má Čína, následovaná USA a Německem. V pobřežních větrných elektrárnách, které jsou předmětem této bakalářské práce, dominuje Velká Británie, Německo a Dánsko. [2]

Seznam symbolů a zkratk

A	Plocha (m^2)
a	Třída drsnosti (-)
B	Susceptance (Ω)
C	Kapacita (F)
c	Napětový součinitel (-)
c_p	Výkonový součinitel (-)
$\cos\varphi$	Účinitel (-)
D	Průměr rotoru (m)
E_k	Kinetická energie (J)
f	Frekvence (Hz)
G	Svod (S)
h	Výška (m)
I	Proud (A)
I_k''	Zkratový proud (A)
L	Indukčnost (H)
m	Hmotnost (kg)
n	Otáčky za minutu (ot/min)
P	Výkon (W)
R	Odpor (Ω)
s	Dráha (m)
S_k''	Zdánlivý počáteční rázový souměrný zkratový výkon (VA)
t	Čas (s)
THD	Celkové harmonické zkreslení (-)
THF	Činitel harmonického zkreslení (-)
U	Rychlost konce listu při otáčení (ot/min)
U_h	Napětí h-tého řádu harmonické (V)
U_n	Jmenovité napětí (V)
U_1	Efektivní hodnota napětí první harmonické (V)
v	Rychlost (m/s)
W	Tepelné ztráty (J)
X	Indukční reaktance (Ω)
Y	Indukční reaktance (Ω)

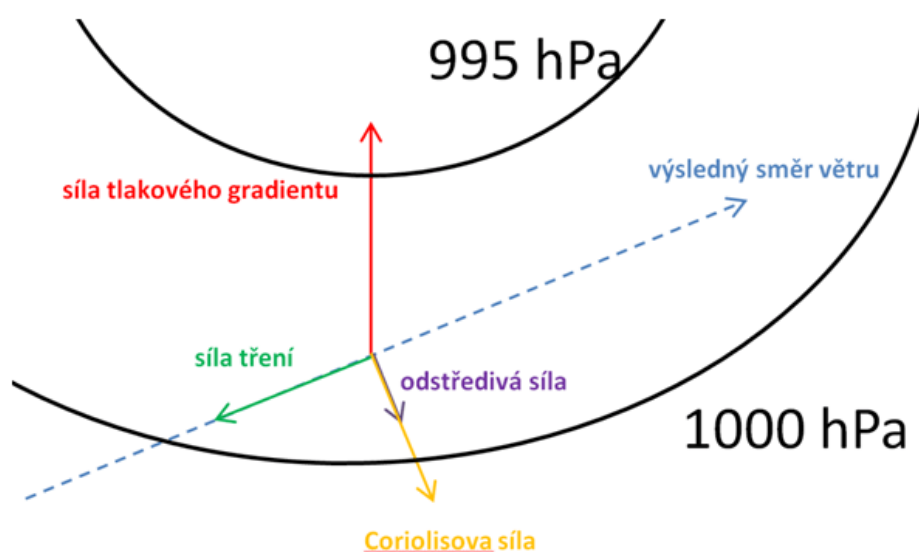
Z	Podélná impedance (Ω)
Z_k''	Výsledná impedance k místu zkratu (Ω)
η	Účinnost (-)
λ	Koeficient rychloběžnosti (-)
π	Konstanta Pi (3,14)
ρ	Hustota vzduchu (kg/m^3)
AC.....	Střídavý proud
DC.....	Stejnoseměrný proud
ES.....	Elektrizační soustava
HAWT	Turbíny s horizontální osou otáčení
HDO.....	Hromadné dálkové ovládání
HVAC.....	Střídavé vedení vysokého napětí (High Voltage Alternating Current)
HVDC.....	Stejnoseměrné vedení vysokého napětí (High Voltage Direct Current)
LFAC	Střídavé vedení s nízkou frekvencí (Low Frequency Alternating Current)
nn	Nízké napětí
OZE	Obnovitelné zdroje energie
VAWT	Turbíny s vertikální osou otáčení
vn	Vysoké napětí
VTE	Větrná elektrárna

1 Větrná energie

1.1 Vítr

Vítr je proudění vzduchu v atmosféře vznikající pomocí rozdílů v tlaku vzduchu a rotací Země. Díky rozmanitosti zemského povrchu se jeho některé části zahřívají výrazněji a rychleji než jiné. Tyto rozdíly jsou způsobeny barvou a charakterem povrchu, např. poušť se rozpálí více než oceán. K tomu se navíc do nižších zeměpisných šířek dostává více tepla od Slunce. Zahřátý povrch Země poté předává teplo atmosféře, která tímto získává mnohem více tepla než od slunečního záření, a v atmosféře tak vzniknou oblasti s rozdílnou teplotou a fyzikálními vlastnostmi. Poté dochází k vyrovnávání těchto rozdílů, vznikají tím tlakové níže a výše a masy vzduchu se rozpo pohybují. Čím větší jsou tlakové rozdíly, tím silnější je i vítr. Vzduch proudí při zemi z tlakové výše do tlakové níže, v horní troposféře se tento vzduch ochlazuje, dál nemůže stoupat, a tak se vrací zpět do tlakové výše.

Dalším výrazným prvkem působícím na vítr je Coriolisova síla. Tato síla je nulová jen na rovníku, kde větry vanou přímo, na naší polokouli odchyluje vítr směrem doprava, na jižní naopak doleva. Dále se uplatňuje odstředivá síla a vliv tření. Díky všem těmto faktorům je vyrovnávání tlakových rozdílů komplikované a pokud připočteme trvalý příkon energie ze Slunce, je vítr prakticky všudypřítomnou realitou každého dne všude na světě, přestože se výjimečně objeví kratší časové období bezvětří.



Obrázek 1.1: Síly působící na vzduch v tlakovém poli v blízkosti zemského povrchu [3]

Mimo globálního větru vznikají také místní větry. Mezi ně patří fén, bríza, monzun, tornádo, bóra a mistrál.

Fén (také föhn) je vítr vanoucí z jihu přes Alpy. Nejdříve na návětrné (jižní) straně pohoří vystoupá a ochladí se. To způsobí vypadávání srážek. Na závětrné (severní) straně fén poté klesá a otepluje se.

V přímořských oblastech vzniká bríza. Bríza je pravidelný vítr, který vzniká díky rozdílným teplotám nad vodní plochou a pevninou. V noci je vzduch nad pevninou studenější, protože si vodní plocha zachovává teplo déle a vzduch nad pevninou se tlačí pod vzduch nad vodou, který je teplejší a stoupá vzhůru, kde se ochlazuje. Přes den se naopak pevnina ohřívá rychleji a v odpoledních hodinách má bríza díky tomu opačný směr – studený vzduch nad vodou se tlačí pod teplý nad pevninou. Existují i další varianty brízy, horská a městská, jsou ale slabší než mořská bríza.

Monzun je pravidelný sezónní vítr, který přináší mohutné srážky v oblasti jihovýchodní Asie. Dělí se na letní a zimní monzun, kdy letní přináší dešťové a zimní sněhové srážky. Princip monzunu spočívá v nerovnoměrném zahřívání oceánu a pevniny a následném vzniku tlakových níží, podobně jako u brízy, pouze v delším časovém rozpětí. U letního se pevnina zahřívá rychleji, teplý vzduch stoupá a tím vzniká tlaková níže. Do té se následně tlačí vlhký vzduch od oceánu, ten se zaráží o vysoká pohoří v těchto oblastech a stoupá po nich vzhůru, kde se ochlazuje za vzniku bouřlivých srážek. Zimní monzun je naopak závislý na nerovnoměrném ochlazování. Suchý vzduch nad pevninou je přitahován k oceánu, vzniká tím tlaková výše a z moře se nasává vlhkost. Nakonec tak dochází ke sněhovým srážkám.

Tornádo je v Čechách nepříliš častý jev, přestože se v posledních letech vyskytuje častěji. Je to velmi rychle stoupající větrný proud, který vzniká při nerovnoměrném rozložení teploty a tlaku vzduchu nad zemským povrchem. Rychlost tornáda se může dostat přes 200 km/h.

Bóra je studený kontinentální vítr vznikající nad pevninou u moří v blízkosti pohoří. Způsobuje prudký pokles teploty. Stejný jev popisuje i mistrál, což je místní název pro bóru v Jižní Francii.

1.2 Rychlost větru

Rychlost větru představuje rychlost vzduchu vůči zemi. Měří se nejenom jeho rychlost, ale i směr. Rychlost lze měřit pomocí anemometru, směr pomocí větrných směrovek. Anemometrů je více druhů, např. mechanické, aerodynamické, termické a další. Rychlost větru se pomocí nich měří standardně ve výšce 10 metrů nad zemí na místě, kde není měření ovlivněno terénními překážkami. Některé druhy anemometrů dokáží měřit i směr větru.



Obrázek 1.2: Miskový anemometr [4]

K přibližnému odhadu síly větru se využívá Beaufortova stupnice větru (viz. Tab. 1.1). Tato stupnice byla vytvořena britským kontradmirálem sirem Francisem Beaufortem, který jí stanovil pro námořní účely. Původně umožňovala odhad rychlosti větru podle vlnění mořské hladiny, dodatečně byly doplněny i znaky větru na souši. Její největší výhodou je použitelnost a představitelnost bez nutnosti použití měřicích přístrojů.

Tabulka 1.1: Beaufortova stupnice [5]

Stupeň	Rychlost větru (km/h)	Slovní označení	Znaky na souši
0	0–1	bezvětrí	Kouř stoupá svisle vzhůru.
1	1–5	vánek	Kouř už nestoupá úplně svisle, korouhev nereaguje.
2	6–11	větrík	Vítr je cítit ve tváři, listí šelestí, korouhev se pohybuje.
3	12–19	slabý vítr	Listy a větvičky v pohybu, vítr napíná prapory.
4	20–28	mírný vítr	Vítr zvedá prach a papíry, pohybuje větvičkami a slabšími větvemi.
5	29–38	čerstvý vítr	Hýbe listnatými keři, malé stromky se ohýbají.
6	39–49	silný vítr	Pohybuje silnějšími větvemi, telegrafní dráty sviští, používání deštníku se stává obtížným.
7	50–61	mírný víchř	Pohybuje celými stromy, chůze proti větru obtížná.
8	62–74	čerstvý víchř	Láme větve, vzpřímená chůze proti větru je již nemožná.

9	75–88	silný víchr	Vítr působí menší škody na stavbách (strhává komíny, tašky ze střechy).
10	89–102	plný víchr	Na pevnině se vyskytuje zřídka, vyvrací stromy a ničí domy.
11	103–117	vichřice	Rozsáhlé zpustošení plochy.
12	118 a více	orkán	Ničivé účinky – odnáší domy, pohybuje těžkými hmotami.

1.3 Energie větru

Vztah pro energii větru lze odvodit z obecného vztahu pro kinetickou energii. Kinetická energie E_k tělesa o hmotnosti m , pohybující se rychlostí v je v následujícím vztahu:

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (1)$$

Dále si vyjádřím hmotnost vzduchu m . Hustota vzduchu je ρ , plocha je A , dráha, kterou vzduch urazí, je s , objem vzduchu je V , rychlost vzduchu je v a čas je t :

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot s = \rho \cdot A \cdot v \cdot t \quad (2)$$

Dosazením rovnice (2) do rovnice (1) dostaneme energii větru procházejícího plochou A . Jednotkou energie jsou jouly (J):

$$E_k = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot t \cdot v^3 \quad (3)$$

Protože energie se dá vyjádřit jako výkon za čas, můžeme z tohoto vztahu snadno vyjádřit právě výkon P ve watttech (W):

$$P = \frac{E}{t} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (4)$$

Z rovnice (4) vyplývá, že výkon větru je přímo závislý na hustotě proudícího vzduchu, ploše, kterou vzduch prochází, a na třetí mocnině rychlosti vzduchu. Malé změny rychlosti větru tedy vyvolávají velké změny energie.

Rychlost větru roste s narůstající výškou nad povrchem. Vztah pro výpočet rychlosti větru v různé výšce nad povrchem je následující:

$$c_2 = c_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^a \quad (5)$$

V rovnici (5) je c_2 rychlost větru ve výšce h_2 , c_1 rychlost ve výšce h_1 (měřená, známe) a a je třída drsnosti, jejíž velikost se odvozuje od reliéfu krajiny (viz. tabulka 1.2). [6]

Tabulka 1.2: Třída drsnosti jednotlivých povrchů [6]

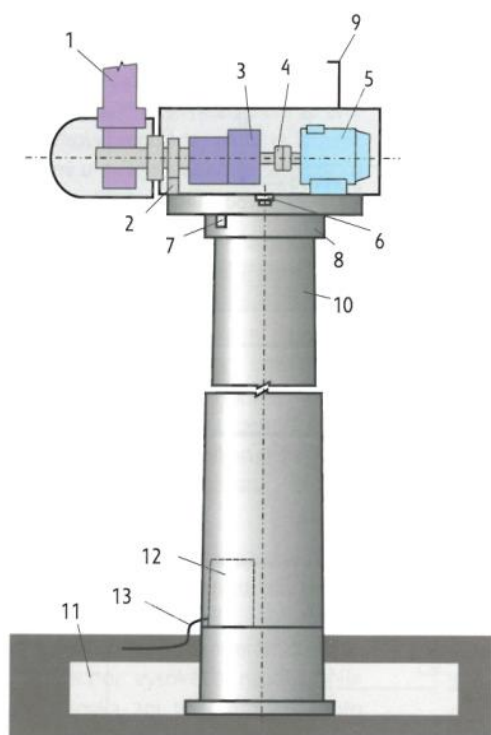
třída drsnosti	charakter krajiny	a (-)
0	otevřené pobřeží bez jakýchkoliv překážek s větrem směřujícím k pobřeží	0,12
1	otevřená krajina s ojedinělými volně stojícími keři a stromy (pobřeží, prémie)	0,15
2	zemědělská krajina s rozptýlenými budovami a křovinami	0,18
3	uzavřená krajina s porostem stromů,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

2 Větrné elektrárny

2.1 Princip činnosti

Větrné elektrárny jsou zařízení fungující na principu přeměny kinetické energie větru na energii elektrickou. Větrná turbína je větrem roztáčena a působící aerodynamickou silou proudícího vzduchu převádí na rotační mechanickou energii. Ta se poté převádí na elektrickou energii pomocí elektrického generátoru, který je připojen na konec hřídele. Elektrická energie je pak přenášena a rozváděna do rozvodny a dále k jednotlivým spotřebičům.

2.2 Konstrukce



Popis jednotlivých částí velké větrné elektrárny:

- 1 - rotor (main shaft) s rotorovou hlavicí a listy
- 2 - brzda rotoru
- 3 - planetová převodovka
- 4 - spojka
- 5 - generátor
- 6 - servo-pohon natáčení strojovny
- 7 - brzda točny strojovny
- 8 - ložisko točny strojovny
- 9 - čidla rychlosti a směru větru
- 10 - několikadílná věž elektrárny
- 11 - betonový armovaný základ elektrárny
- 12 - elektrorozvaděče silnoproudého a řídicího obvodu
- 13 - elektrická přípojka

Obrázek 2.1: Schéma velké větrné elektrárny [7]

Větrná elektrárna se skládá ze sloupu, který je k zemi upevněn betonovými základy a z gondoly s větrnou turbínou, převodovkou a generátorem.

2.2.1 Základy

Základy větrné elektrárny jsou nejtěžší částí VTE. Před stavbou se musí provést geologický průzkum místa stavby, aby se zjistilo složení a stabilita spodních vrstev zeminy, která je pro vysokou stavbu elektrárny velmi důležitá, VTE je totiž velmi citlivá na

naklonění. V případě nevyhovující zeminy je nutná úprava podloží, například zhutněním s cementem.

Se stavbou základů se začíná několik týdnů před samotnou instalací elektrárny. Základy jsou tvořeny betonovou deskou. U větrné elektrárny s výškou 74 m se jedná přibližně o rozměry 13×13×1,7 m (větrný park Břežany). [8] [9]



Obrázek 2.2: Pohled na hotový betonový základ VTE [9]

2.2.2 Stožár větrné elektrárny

Stožár větrné elektrárny musí být dostatečně vysoký, aby vynesl větrnou turbínu nad přízemní pásmo větrných turbulencí a zároveň dostatečně silný, aby unesl hmotnost celého ústrojí a odolal síle větru. V dnešní době se výška stožáru standardně pohybuje od 40 do 110 m. Stožár je dutý, mírně kónický, jeho středem vede servisní žebřík nebo schodiště do gondoly. Stožárem je také vedeno elektrické vedení. Nejčastějším materiálem na konstrukci stožáru je ocel, případně kombinovaná se železobetonem.

Stožár je smontovaný ze segmentů o délce přibližně 20 m. Dělení na segmenty se využívá hlavně pro snadnější přepravu. Stožár se vybírá z hlediska více faktorů: podle lokality instalace, estetiky, výkonu a samozřejmě ceny. Pro výšky větší, než je 100 m, se používají stožáry příhradové konstrukce z krátkých nosníků nebo sloupy betonové. U příhradových je výhodou, že se stavba provádí až na místě, nemusí se proto řešit problémy s přepravou jednotlivých částí, betonové se využívají pro ekonomicky výhodné lokální řešení stavby větrných farem. [10]



Obrázek 2.3: Vybavení segmentu stožáru žebříkem, kabelovými lávkami a výkonovými kabely [11]



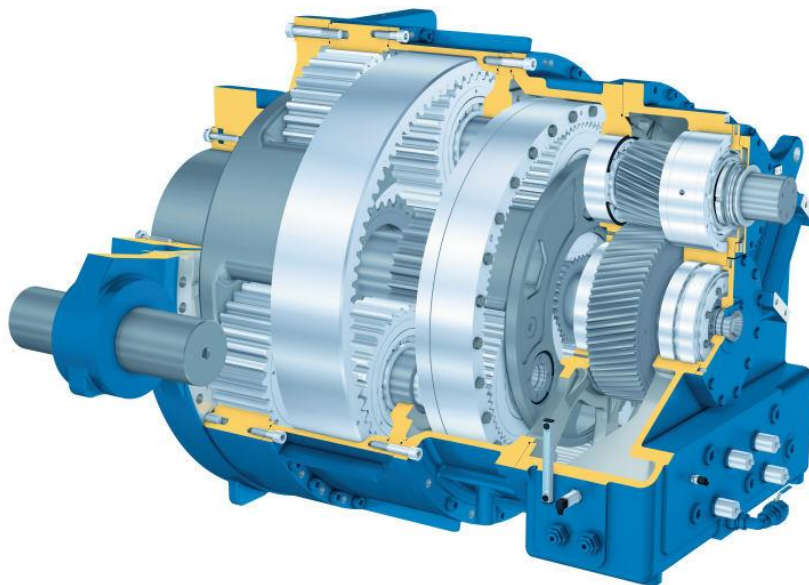
Obrázek 2.4: Příhradová větrná elektrárna [12]

2.2.3 Gondola

Na vrcholu věže větrné elektrárny se nachází těleso gondoly. Ta se automaticky natáčí vzhledem ke směru proudění větru pomocí elektropohonů. V gondole se nachází všechny základní prvky elektrárny.

Jeden z nich je větrný motor s vhodně tvarovanými rotorovými listy, které jsou větrem uváděny do rotačního pohybu. Dále se zde nachází generátor s převodovkou, který transformuje mechanickou energii motoru na energii elektrickou. Ta je pak rozváděna do elektrické sítě. Spojení mezi převodovkou a generátorem se provádí pomocí hřídele. Převodový poměr bývá různý, podle výkonu VTE. Při výkonech do 50 kW mívá vrtule

otáčky v rozmezí 40 – 80 ot/min, převodový poměr poté bývá 1:12 – 1:25 v závislosti na použitém generátoru. Pro vyšší výkony nad 500 kW se pracovní otáčky rotoru pohybují od 5 do 20 ot/min, převodové poměry jsou 1:70 – 1:200 a generátory mají pracovní otáčky dle typu 1000, 1500 nebo 3000 ot/min. Kromě tradiční technologie s převodovkou, kde se převádí nízké rychlosti rotoru na vyšší rotační rychlost konvenčních generátorů, se začaly vyrábět elektrárny bez převodovky. [13] [14]

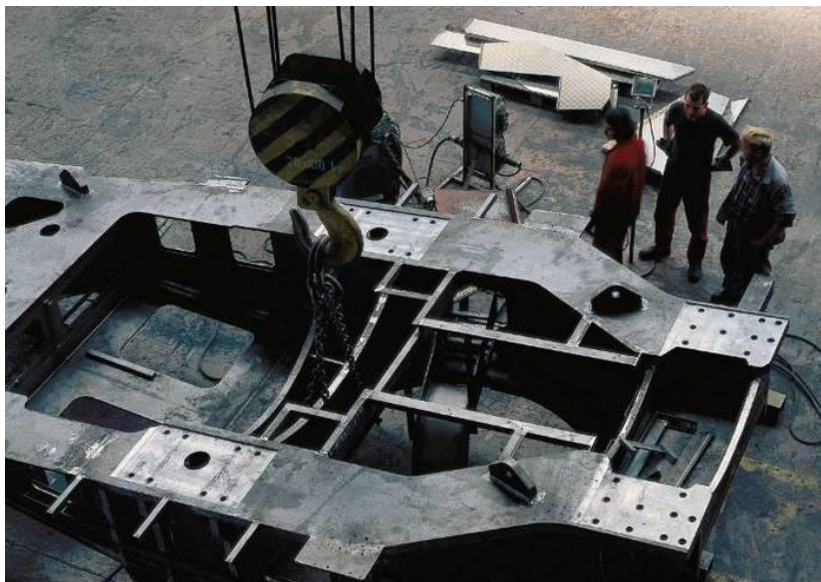


Obrázek 2.5: Převodovka větrné elektrárny od firmy Bosch-Rexroth s označením Redulus GPV pro výkon 2 MW [14]

Ve větrných elektrárnách jsou používány jak synchronní, tak asynchronní generátory, v poslední době i mnohápólové generátory. Typ generátoru si volí výrobci podle konkrétní situace. [15]

Součástí gondoly je také brzda rotoru, která při hrozícím nebezpečí její havárie (jako je například velmi vysoká rychlost proudění větru, námraza nebo přehřátí ložiska a vinutí generátoru) větrnou elektrárnu odstaví. Ta je většinou řešena hydraulickým systémem. Hydraulicky jsou řešeny i další části VTE – brzda generátorového hřídele, brzda systému otáčení strojovny kolem svislé osy a hydraulický může být i systém natačení rotorových listů větrné elektrárny. [16]

Celá strojovna je uzavřena do nosného rámu. Slouží k nesení všech komponent strojovny a zároveň musí odolávat silám působícím na gondolu. Vyrábí se z ocelových plátů, které jsou svařeny k sobě do požadovaného tvaru.



Obrázek 2.6: Nosný rám strojovny VTE [17]

2.2.4 Lopatky

Největší větrné turbíny mají lopatky duté, vyrobené ze sklolaminátu. Jejich počet závisí na otáčkách turbíny. Jako nejčastější můžeme vidět větrné turbíny se třemi lopatkami, které mají nejlepší parametry, ale vyskytují se i vícelopátkové a naopak se dá zkonstruovat i turbína s jednou lopatkou. Větrné turbíny s jednou lopatkou mají nižší pořizovací cenu, to je ale vykoupeno vyšší hlučností, protože se točí ve vyšších otáčkách, aby byly schopny fungovat s požadovanou účinností. [18] Při velikosti okolo 50 metrů dosahují dnešní turbíny takových rozměrů, kdy se při otáčení projeví rozdíl rychlosti větru. Na každou lopatku tak působí jiné síly, čímž se může rozkmitat celá turbína a hrozí poškození celé elektrárny.

Problém s hlukem a dalšími různými zvukovými efekty je způsoben velmi rychlým pohybem konců lopatek u velkých větrných turbín. Tento efekt stěžuje výběr umístění větrných elektráren.

Lopatky všech větších větrných turbín jsou natáčivé, aby se dokázaly přizpůsobit proměnlivé rychlosti větru. Existuje i takové natočení, při kterém se rotor úplně zastaví. V lopatkách se nachází také bleskosvod. [19]

2.3 Druhy větrných turbín

Větrné turbíny se dělí podle dvou hlavních kritérií: podle principu fungování a podle osy otáčení rotoru. Podle principu fungování se dělí na odporové a vztlakové, podle osy otáčení rotoru na horizontální a vertikální.

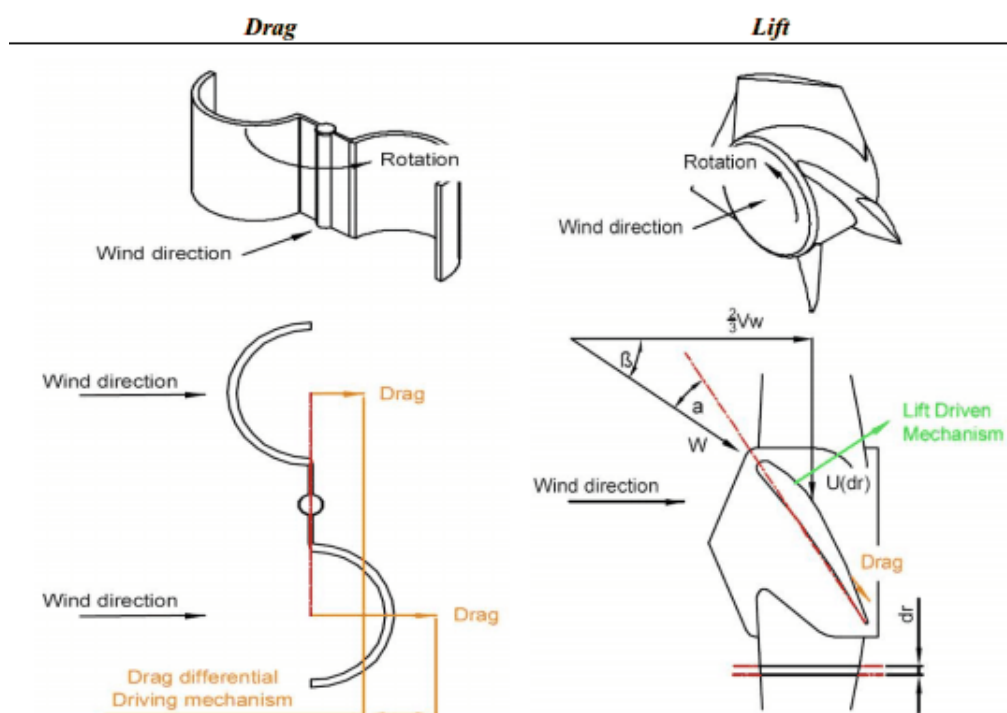
2.3.1 Odporové turbíny

Odporové turbíny (drag turbines) jsou starší z historického hlediska. Jsou principiálně jednodušší a mají nižší účinnost než vztlakové turbíny, proto dnes nejsou příliš používané. Fungují tak, že se využívá rozdílu sil, které působí na lopatky v důsledku jejich různého odporu proti proudícímu vzduchu. Toho se dá dosáhnout dvěma způsoby:

- **Různým tvarem lopatek.** Lopatka má v tomto případě různý aerodynamický odpor v závislosti na směru proudícího větru. Jako příklad se dají uvést lopatky miskovitého tvaru.
- **Natočením lopatek.** Plocha lopatek se natáčí v závislosti na pozici rotoru a směru proudícího větru. Má vyšší účinnost než předchozí řešení, je však komplikovanější.

2.3.2 Vztlakové turbíny

V dnešní době jsou vztlakové turbíny (lift turbines) nejpoužívanějším typem. Využívá se u nich tzv. aerodynamické vztlakové síly vznikající na listu rotoru při obtékání vzduchem. Tato síla vzniká díky speciálně vytvarovanému profilu lopatek, podobně jako na letecké vrtuli. Vztlaková síla je příčinou rotačního pohybu turbíny a síla odporová působí proti směru pohybu a je v tomto případě nežádoucí. Na následujícím obrázku jsou oba způsoby popsány názorněji.



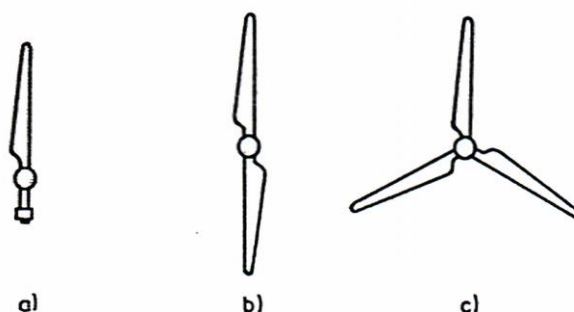
Obrázek 2.7 – Princip odporové (drag) a vztlakové (lift) turbíny [20]

2.3.3 Turbíny s horizontální osou otáčení

Anglicky jsou tyto turbíny označovány jako HAWT – horizontal axis wind turbine. Tyto turbíny musí vždy směřovat proti směru větru. Z tohoto důvodu se u menších elektráren využívají směrové lopatky, u větších větrný senzor a servo motor. Součástí většiny horizontálních turbín je také převodové ústrojí zvyšující rychlost pomaloběžného rotoru na rychlost vhodnou pro pohon generátoru. Kvůli své vyšší účinnosti (okolo 48 %) jsou dnes využívanější než vertikální. [20]

2.3.3.1 Vrtule

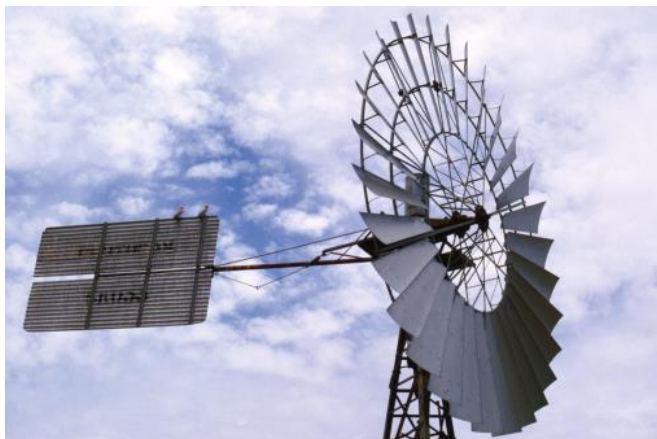
Vrtule jsou turbíny s horizontální osou otáčení. Rovina otáčení je kolmo ke směru větru. Můžou být jedno až čtyřlísté. Pro běžnou praxi jsou nejčastější lopatky tři, v menší míře dvě. Vrtule s jednou lopatkou mají na druhé straně protizávaží a využívají se pouze výjimečně, stejně jako čtyřlísté. Účinnost tohoto typu turbín je přes 40 % a jsou rychloběžné, obvodová rychlost konce lopatek se pohybuje mezi dvou až desetinásobkem rychlosti větru, a proto jsou dnes nejpoužívanější pro VTE. [7]



Obrázek 2.8: Vrtule jedno, dvou a třílísté [7]

2.3.3.2 Větrná kola

Větrná kola mají stejně jako vrtule horizontální osu otáčení, jsou na rozdíl od nich ale pomaloběžné. Mají nižší účinnost než vrtule, výhodou však je lepší rozběh díky většímu počtu lopatek. Nejčastější využití větrných kol je k čerpání vody.



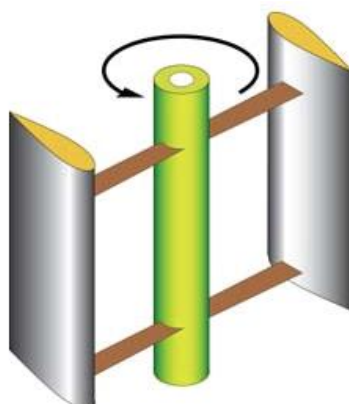
Obrázek 2.9: Větrné kolo [21]

2.3.4 Turbíny s vertikální osou otáčení

Turbíny s vertikální osou otáčení, nebo anglicky VAWT – vertical axis wind turbine, mají oproti horizontálním sice nižší účinnost (okolo 38 %) a vyšší cenu pro srovnatelný výkon, mají ale výhodu v nenutnosti měnit jejich směr. To je výhodou zejména na místech, kde se směr větru často mění. Další výhodou je možnost umístit generátor a převodové ústrojí na zem, čímž se zjednodušuje údržba. Zabírají také méně místa oproti horizontálním, na větrných farmách se tak dají umístit blíže k sobě bez vzájemného aerodynamického ovlivňování. Jsou i méně hlučné. [20]

2.3.4.1 Darrierova turbína

Tato turbína funguje na vztakovém principu. Rotor má vejcovitý tvar. Její účinnost je nejvyšší z vertikálních turbín (35-38 %), pro svůj start ale potřebuje vyšší rychlost větru než jiné. [20]

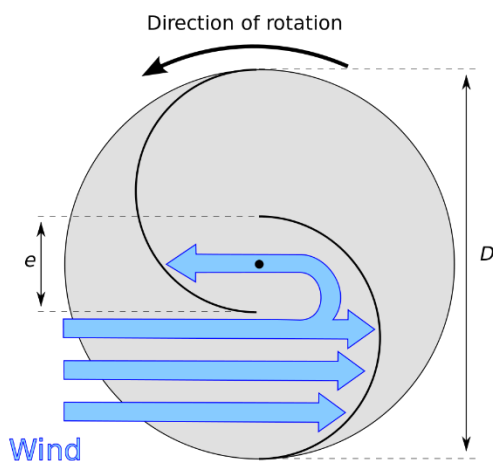


Obrázek 2.10: Darrierova větrná turbína. [7]

2.3.4.2 Savoniova turbína

Savoniova turbína pracuje na odporovém principu. Tato turbína se skládá ze dvou svislých lopatek vzájemně přesazených uprostřed přibližně o 20 % průměru rotoru. Tím se

část energie větru dostane ze zadní strany pasivní lopatky na přední stranu aktivní. Mezi výhody těchto turbín patří jednoduchá konstrukce, nezávislost na směru větru, přímý přenos kroutícího momentu na hřídel a využití rychlosti větru už od 2 m/s. Nevýhody jsou malá rychloběžnost, nízké otáčky, vysoké hodnoty točivého momentu a nízká účinnost, která se pohybuje kolem 20 %. [7]



Obrázek 2.11: Princip Savoniova rotoru [22]

2.4 Teorie větrné turbíny

2.4.1 Účinnost

Větrné turbíny mění kinetickou energii větru na vlastní energii otáčivého pohybu, v praxi je ale nemožné využít celou větrnou energii. To vyplývá ze zákona o zachování hmoty, tedy že množství vzduchu dosedající na lopatky větrné turbíny ji musí následně opustit. Teoreticky maximální dosažitelnou účinnost větrného stroje odvodil v roce 1919 Albert Betz. Takzvané Betzovo pravidlo udává, že maximální využití energie větru ve větrné turbíně dosahuje 59,26 % celkové kinetické energie proudícího vzduchu přes turbínu. K tomu je nutné započítat také ztráty třením, odporem listů rotoru, převodové ztráty a ztráty v generátoru a měniči. Tím se dostáváme k účinnosti současných větrných elektráren, která je mezi 75-80 % Betzova limitu při jmenovitých otáčkách. [20]

2.4.2 Teoreticky dosažitelný výkon

Z rovnice (4) pro výkon větru lze odvodit výkon větrné turbíny. Toho dosáhneme dosazením výkonového součinitele c_p . Výkonový součinitel závisí na účinnosti turbíny, která je omezena hodnotou Betzova limitu, tj. 0,5926. V tomto případě bude plocha A aktivní plochou větrné turbíny: [23]

$$P = \frac{1}{2} c_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (6)$$

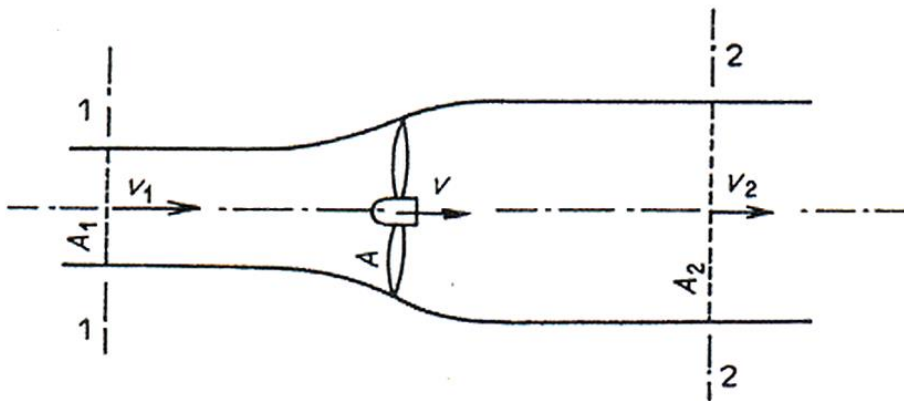
Plocha větrné turbíny závisí na typu turbín. Turbíny s horizontální osou otáčení mají aktivní plochu odpovídající kruhu, turbíny s vertikální osou mají plochu odpovídající projekci jejich obrysů. Pro nejčastěji používané turbíny s horizontální osou otáčení bude tedy vzorec pro výkon vypadat následovně. D je průměr rotoru:

$$P = \frac{1}{2} c_p \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (7)$$

2.4.3 Princip funkce vztlakových motorů

Funkce vztlakových motorů je odvozena od fyzikální podstaty proudění. Z rovnice kontinuity (viz. rovnice 8) lze vidět, že rychlost proudění v trubici s menším průřezem je větší než v trubici s průřezem větším. Proudění v zúžené trubici má zároveň nižší tlak, naproti tomu v širší trubici vzniká přetlak. Zkráceně řečeno: kde je větší rychlost proudění, tam je nižší tlak. Rychlosti v jsou v jednotlivých místech značeny s příslušným indexem, to samé platí pro plochy průřezu A : [24]

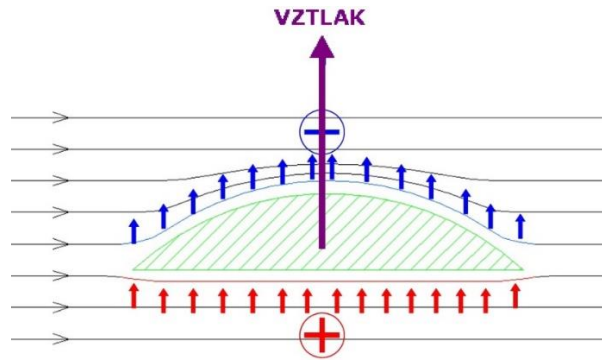
$$v_1 \cdot A_1 = v \cdot A = v_2 \cdot A_2 \quad (8)$$



Obrázek 2.12: Rovnice kontinuity [7]

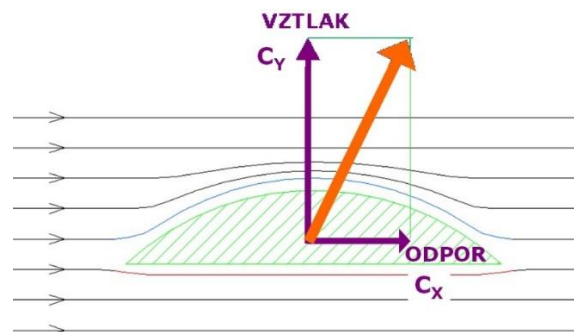
Tento princip si převedeme do našeho případu, to znamená k aerodynamickému profilu (viz. Obrázek 2.13). Proud vzduchu, naznačen černými proudnicemi, dopadá na těleso tvaru kruhové výseče. Tento tvar přibližně odpovídá lopatkám VTE. Proud vzduchu se před tělesem rozděluje a za stejný čas se za tělesem spojuje. Červená proudnice pod výsečí je kratší než modrá nad ní, proto musí být rychlost proudění nad profilem rychlejší než rychlost proudění pod profilem. Protože při větší rychlosti proudění máme menší tlak a naopak,

vzniká nad výsečí podtlak a pod výsečí přetlak. Výslednicí těchto dvou tlakových polí je pak jedna síla nazývaná vztlak. [24]



Obrázek 2.13: Vznik vztlaku [24]

Na profilu navíc vzniká ještě odporová síla, která je oproti vztlakové menší. Výslednicí vztlaku a odporu je jedna síla nakloněná o určitý úhel oproti vztlaku (viz. Obrázek 2.14). [24]



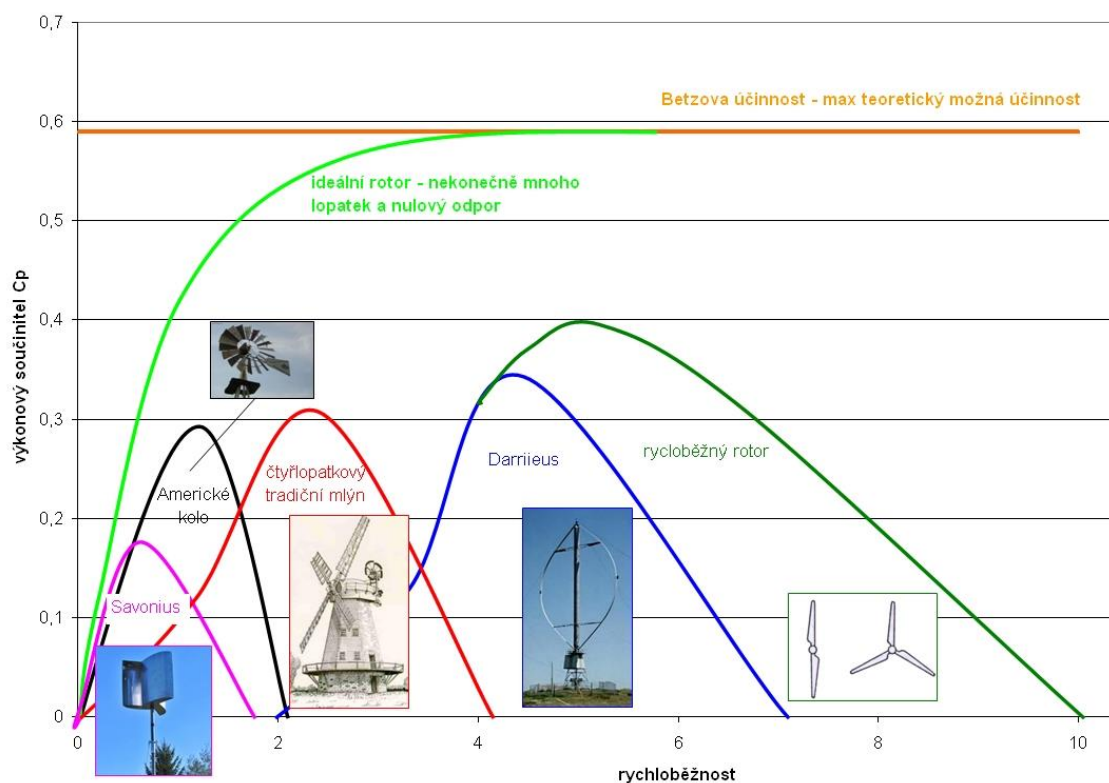
Obrázek 2.14: Výslednice sil [24]

2.4.4 Rychloběžnost

Koeficient rychloběžnosti rotoru λ ovlivňuje počet listů rotoru. Vypočítá se z následujícího vztahu. U je rychlost konce listu při otáčení, v je rychlost větru, D značí průměr rotoru a n otáčky za minutu:

$$\lambda = \frac{U}{v} = \frac{\pi \cdot D \cdot \frac{n}{60}}{v} \quad (9)$$

Z následujícího grafu (viz. Obrázek 2.15) lze vyčíst, že pro malé koeficienty rychloběžnosti musí být plocha rotoru více pokryta rotorovými listy. [25]



Obrázek 2.15: Rozdělení rotorů větrných elektráren podle rychloběžnosti rotorů [25]

2.5 Typy větrných elektráren

Nejčastějším typem větrných elektráren jsou vztlakové rychloběžné rotory. V současnosti se spíše než s ojedinělými „věžemi“ větrných elektráren setkáváme s velkým množstvím turbín sdružených do farem. Tyto farmy mají už značný výkon, ať jsou to farmy na souši či na moři. Pro souš hovoří jednodušší a levnější instalace a údržba, pro moře stabilnější větrné podmínky. Trendem je zvětšování turbín a stavění větších farem, zejména na moři.

Kromě těchto typických větrných elektráren se můžeme setkat i s dalšími, méně častými a výkonnými variantami. Například Savoniova turbína, pracující na odporovém principu, se hodí spíše pro použití v domácích podmínkách.

Vyloženě experimentální projekty jsou větrné čočky, japonský projekt turbín s kruhovou obručí kolem rotoru vrtule. Její výkon je tak zvýšen dvakrát až pětikrát.



Obrázek 2.16.: Japonské větrné čočky [21]

Dále např. stéblová větrná elektrárna, která byla navržena pro město Masdar ve Spojených arabských emirátech. Umělá stébla s průměrem 10–20 cm a výškou 55 m by se měla ve větru přirozeně vlnit a pomocí tření speciálních disků uvnitř stébel vyrábět elektrickou energii.

Pro zajímavost, další kuriózní větrnou turbínou jsou tzv. letící. Vznášejí se na lanech ve výšce kolem 4 km, díky tomu jsou celkem efektivní, při slabém větru ale nejsou schopné udržet potřebnou výšku. [21]

3 Pobřežní větrné elektrárny

S postupným vyčerpáním vhodných prostorů pro klasické větrné parky na souši se stále více investuje do stavby pobřežních větrných elektráren. Přes samozřejmé komplikace při stavbě a údržbě nabízí toto řešení stabilnější větrné podmínky, prakticky nevyčerpatelný potenciál, a s technickými znalostmi získanými při stavbě onshore větrných elektráren je tato varianta realizovatelná. Myslím si, že i díky plánům Evropské unie na podporu OZE budou offshore větrné parky zažívat výrazný rozvoj.

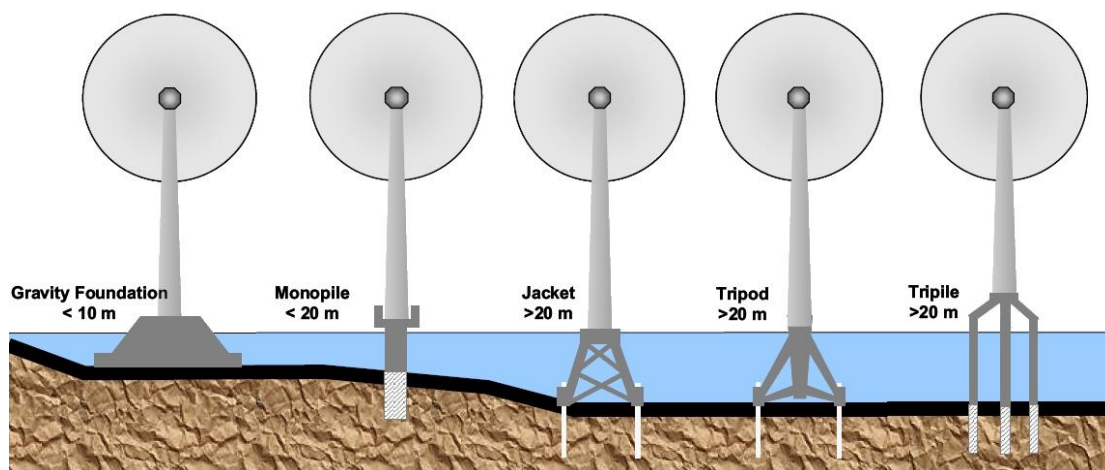
3.1 Názvosloví

U větrných elektráren obecně se v praxi vychází z anglických pojmů. Základem je anglické slovo **shore**, znamenající v doslovném překladu pobřeží nebo pevnina, ke kterému se připojují různé přívlastky.

Rozlišujeme dva hlavní druhy. **Onshore** jsou VTE umístěné na pevnině (on = na), **offshore** umístěné mimo pevninu (off = mimo). Offshore se dále dělí na **nearshore**, neboli umístěné v blízkosti pobřeží (near = blízko), a na **deep offshore**, umístěné do „hluboké“ vody (deep = hluboký).

3.2 Základy

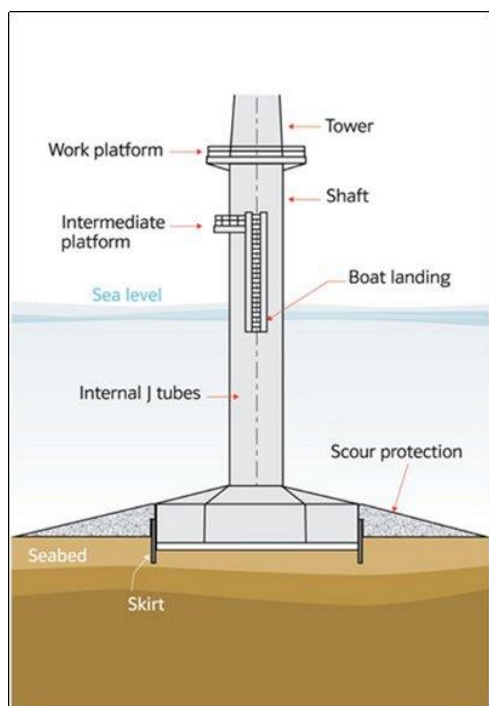
Na základy u offshore VTE jsou kladeny mnohem větší nároky než u onshore elektráren. Musí odolávat tlaku vody, agresivním vlivům slané vody, povětrnostním vlivům, mořským vlnám a proudům a být dostatečně pevné na unesení celé konstrukce. Základové konstrukce offshore elektráren jsou v současné době nejčastěji usazovány do hloubky 10 až 50 m. Minimální životnost je 20 let. Používá se 5 typů základových konstrukcí podle hloubky vody – železobetonové základy, monopile, příhradové konstrukce, tripod a tri-pile. [26]



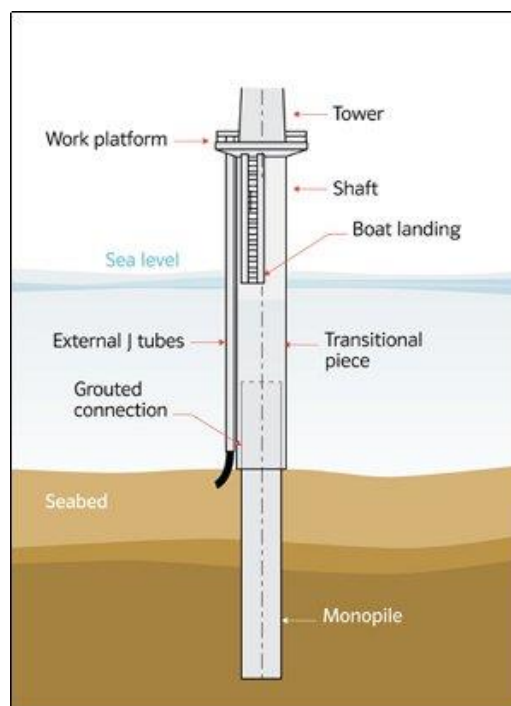
Obrázek 3.1: Typy základů u mořských instalací VTE [9]

3.2.1 Železobetonové základy

Základy používané na mělčinách, přibližně do 10 m hloubky. Masivní betonový blok je usazen na mořské dno a na jeho hřbet je umístěno ocelové tělo větrné elektrárny. Výhodou u tohoto typu základů je nízká cena a menší složitost při montáži, jsou ale omezeny nízkou hloubkou. [26]



Obrázek 3.2: Železobetonové základy [27]



Obrázek 3.3: Konstrukce monopile [28]

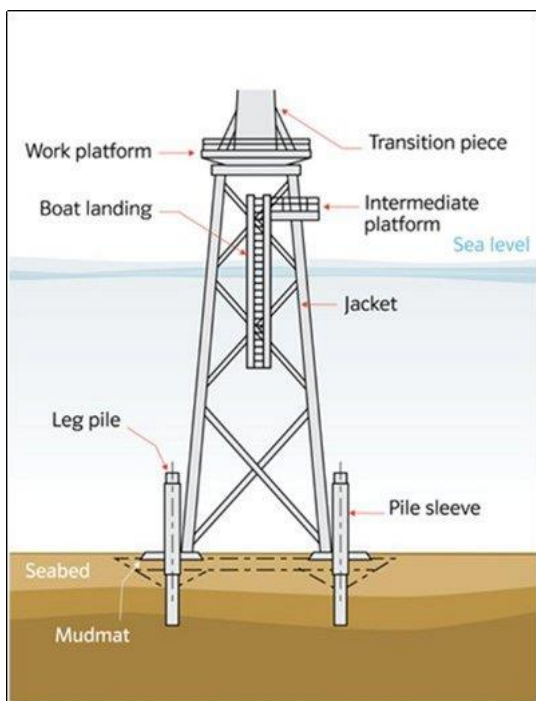
3.2.2 Monopile

Monopile je typ základů používaný do hloubky zhruba 30 m. Se současnými technologiemi je možné tuto hloubku překonat, ale pro větší hloubky více hodí jiné typy základů. Konstrukce monopile je složena z ocelové duté trubky o průměru do 6 metrů a tloušťce do 150 mm. Váha dosahuje až 650 tun, jako třeba u offshore farmy London Array. Do mořského dna se pomocí speciálního parního nebo hydraulického kladiva musí zatlučit. Hloubku zatlučení lze měnit podle místních podmínek. Dnes je tato konstrukce nejpoužívanější pro jednoduchost její instalace v malých a středních hloubkách. Mezi jeho přednosti patří rychlá a snadná montáž a velká odolnost proti podpovrchovým erozím a nárazům cizích objektů. Nevýhodou je nemožnost zakotvení na skalnaté podloží a potřeba velkého množství oceli. [28]

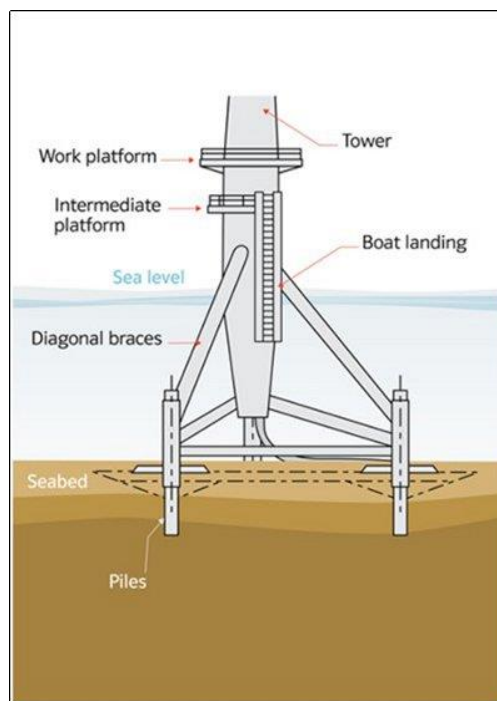
3.2.3 Jacket

Jacket, neboli příhradová konstrukce, se používá v hloubkách od 20 do 50 m. Její vzhled je velmi podobný stožárům venkovního vedení vysokého a velmi vysokého napětí. Skládá se ze 3 až 4 pilířů zakotvených do mořského dna, na které se usazuje příhradová konstrukce.

Hlavní výhodou oproti monopile konstrukci je ušetření oceli, kdy jde ušetřit 40 až 50 % materiálu. Jednotlivé části základů je možné sestavit na pevnině a poté po větších částech převézt pomocí konstrukční lodě na místo stavby. Tato konstrukce je také více odolná oproti vlnovým nárazům díky menší ploše, na kterou voda naráží. Nevýhodou jsou potenciálně vyšší ceny údržby a vysoká cena. [29]



Obrázek 3.4: Příhradová konstrukce [29]



Obrázek 3.5: Konstrukce tripod [30]

3.2.4 Tripod

Vzhledově, funkčně i jménem je tripod podobný stativům pro fotoaparáty. Konstrukce tohoto typu využívá zkušenosti s podobnými základy v ropném průmyslu. Použití nachází v hloubce přes 30 m. Skládá se z kulatých ocelových trubek o menším průměru, které se k sobě svařují tak, aby vznikl stabilní tripod. Takto svařená konstrukce je ke dnu instalována pomocí tří ocelových trubek, které jsou 10 až 20 metrů hluboko v mořském dnu. Největší výhodou je možnost využití na písčném dně, pro skalnaté je naopak tato konstrukce nevhodná. [30]

3.2.5 Tri-pile

Jednoduše řečeno je konstrukce tri-pile spojením tří monopile konstrukcí dohromady. Podobně jako tripod je vhodný do větší hloubky, přibližně od 25 do 40 m. Jako u monopile konstrukce tu dochází k velké spotřebě oceli, každý tri-pile je až z 1100 t oceli. Výhodou je možnost upravení konstrukce pro konkrétní lokalitu a podloží. [31]



Obrázek 3.6: Konstrukce tri-pile [31]

3.3 Stavební plavidla

Díky enormní složitosti stavby offshore větrných farem je nutné mít speciálně upravená plavidla pro stavbu. Tato plavidla se na místě stavby pomocí pilířů dokáží zdvihnout nad mořskou hladinu a fungují tak jako pohyblivá pracovní plošina. Tím se ulehčí stavba a vytvoří se stabilní podmínky bez ohledu na pohyb mořské vody.

Nejčastěji se dnes používají předělané tankery na plyn nebo ropu, postupně se ale s rozvojem odvětví objevují specializovaná plavidla přímo pro stavbu mořských větrných farem.



Obrázek 3.7: Stavební plavidlo Deep Explorer [32]

3.4 Servis

I k servisu jsou využívány speciálně upravená plavidla. Oproti stavebním bývají výrazně menší. Převážejí techniky na místo, poskytují ubytování, mohou obsahovat dílny a umožňovat přímý přístup k turbínám. Při nutnosti rychlého zásahu se používají vrtulníky, ty jsou ale výrazně dražší variantou a nedokáží přepravit větší množství materiálu k opravě.



Obrázek 3.8: Servisní plavidlo Njord Alpha [33]

3.5 Největší pobřežní větrné elektrárny v Evropě

Tabulka 3.1: Přehled největších větrných parků v Evropě [34]

Větrný park	Výkon (MW)	Země	Počet turbín a model	Uvedení do provozu
London Array	630	UK	175 × Siemens SWT-3.6-120	2012
Gemini Wind Farm	600	Nizozemsko	150 × Siemens SWT-4.0	2017
Gwynt y Môr	576	UK	160 × Siemens SWT-3.6-107	2015
Greater Gabbard	504	UK	140 × Siemens SWT-3.6-107	2012
Global Tech I	400	Německo	80 × Areva Multibrid M5000 5.0MW	2015
BARD Offshore 1	400	Německo	80 × BARD 5.0MW	2013
Anholt	400	Dánsko	111 × Siemens SWT-3.6-120	2013
West of Duddon Sands	389	UK	108 × Siemens SWT-3.6-120	2014
Walney	367.2	UK	102 × Siemens SWT-3.6-107	2012
Thorntonbank	325	Belgie	6 × Senvion 5MW, 48 × Senvion 6.15MW	2013
Sheringham Shoal	315	UK	88 × Siemens SWT-3.6-107	2012
Borkum Riffgrund 1	312	Německo	78 × Siemens SWT-4.0-120	2015
Thanet	300	UK	100 × Vestas V90-3.0MW	2010
Nordsee Ost	295	Německo	48 × Senvion 6.15MW	2015
Meerwind Süd / Ost	288	Německo	80 × Siemens SWT-3.6-120	2015
EnBW Baltic 2	288	Německo	80 × Siemens SWT-3.6-120	2015
DanTysk	288	Německo	80 × Siemens SWT-3.6-120	2015
Butendiek	288	Německo	80 × Siemens SWT-3.6-120	2015
Amrumbank West	288	Německo	80 × Siemens SWT-3.6-120	2015
Lincs	270	UK	75 × Siemens SWT-3.6-120	2013
Humber Gateway	219	UK	73 × Vestas V112-3.0MW	2015
Northwind	216	Belgie	72 × Vestas V112-3.0MW	2014
Westermost Rough	210	UK	35 × Siemens SWT-6.0-154	2015
Horns Rev 2	209.3	Dánsko	91 × Siemens SWT-2.3-93	2009
Rødsand II	207	Dánsko	90 × Siemens SWT-2.3-93	2010

V tabulce 3.1 můžeme vidět, že největší rozšíření větrných farem je na pobřeží Spojeného království, Německa, Nizozemska, Dánska a Belgie. Nejvíce používané turbíny jsou od firmy Siemens, následované firmami Senvion, Vestas a Areva Multibrid.

4 Integrace pobřežních větrných elektráren do distribuční sítě

Připojení pobřežních větrných elektráren do distribuční, případně nadřazené soustavy je nutné vhodně realizovat. V případě pobřežních VTE jsou elektrárny umístěny až několik desítek kilometrů daleko od místa připojení, využívá se proto pro přenos vysoké nebo velmi vysoké napětí, u kterého dosáhneme nižších přenosových ztrát. Použít se mohou dvě odlišné varianty – přenos pomocí střídavého nebo stejnosměrného napětí. V běžných elektrizačních soustavách se nejčastěji využívá přenos pomocí střídavého napětí, proto se i u připojení pobřežních VTE častěji využívá napětí střídavé pro jednodušší připojení do sítě. V dnešní době se ale začíná více využívat přenosu pomocí stejnosměrného proudu, u kterého se dosahuje menších přenosových ztrát a tím roste efektivita. Obě tyto varianty jsem popsal na následujících stránkách.

Dále je nutné udržovat kvalitu elektrické energie v přenosové (110 kV a více), případně distribuční soustavě (6,5 – 110 kV). Velké větrné elektrárny, mezi které patří pobřežní větrné parky, se většinou připojují na přenosovou soustavu, menší VTE nejčastěji na distribuční.

4.1 Vysokonapět'ový přenos a ztráty

Vysoké napětí je využíváno pro přenos z důvodu omezení ztrát. Ztráty vedení jsou spojeny hlavně se ztrátami tepelnými, které se vypočítají pomocí následující rovnice:

$$W = R \cdot I^2 \cdot t \quad (10)$$

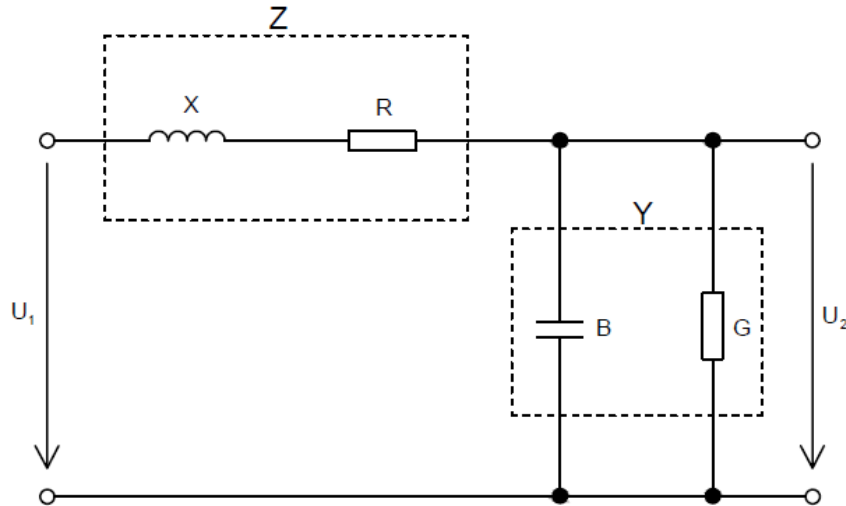
W je velikost tepelných ztrát, R je odpor vodiče, I proud procházející vodičem a t je čas. Odpor vodiče R a čas t jsou pro nás prakticky konstantní, pro snížení ztrát je tedy nutné snížit proud I . Pokud chceme zachovat stejný přenášený výkon při snížených ztrátách, musíme zvýšit přenosové napětí, jak lze vidět z rovnice č. 11:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (11)$$

P je přenesený výkon, U je napětí a $\cos \varphi$ je účinník.

4.1.1 Technologie HVAC

Technologie pro přenos vysokonapět'ového střídavého proudu se používá pro klasický rozvod elektrické energie. Zkratka HVAC je z anglického High-Voltage Alternating Current. Elektrická energie se přenáší pomocí střídavého napětí a proudu o určité frekvenci, v závislosti na níž se neustále mění směr proudu v obvodu. Hodnoty frekvence mohou být různé, v Evropě převládá 50 Hz, například v USA zase 60 Hz.



Obrázek 4.1: Náhradní schéma vedení

$$Z = R + jX \quad (\Omega; \Omega; \Omega) \quad (12)$$

$$X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (\Omega; \text{Hz}; \text{H}) \quad (13)$$

$$Y = G + jB \quad (\text{S}; \text{S}; \Omega) \quad (14)$$

$$B = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \quad (\text{S}; \text{Hz}; \text{F}) \quad (15)$$

Parametry náhradního schéma vedení jsou popsány v rovnicích 12-15. Jsou to podélná impedance Z , příčná impedance Y , indukční reaktance X a kapacitní susceptance B . Reálné parametry vedení jsou udávány v jednotkách na kilometr, se zvyšující délkou se tedy zvětšují a s tím se zvětšují i ztráty. Vznikající jalový výkon je třeba kompenzovat, od určité délky vedení jsou ztráty ale i tak vysoké.

4.1.1.1 Výhody

- Snadnější průmyslová výroba, přenos a vypínání.
- Konstrukčně mnohem menší přístroje silových obvodů (vypínače, pojistky, jističe atd.).
- Jednoduché zvyšování a snižování napětí pomocí transformátorů.
- Generátory nepoužívají komutátory, a proto jsou jednodušší na konstrukci a údržbu.

4.1.1.2 Nevýhody

- Složitější rekuperace – to je ale zmírněno nástupem pokročilých polovodičů.
- Nutnost plně synchronizovat všechny elektrické generátory v síti.

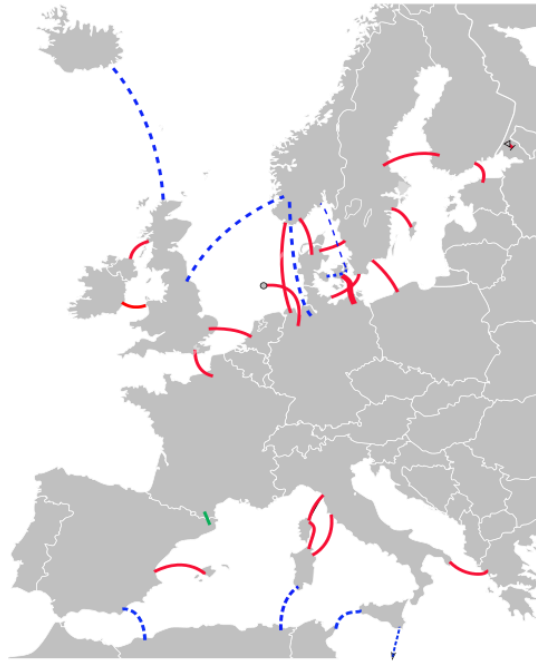
- Nutnost vyvažovat toky činného a i jalového výkonu.
- Podstatný vliv příčných a podélných parametrů na přenosové vedení (viz. Obrázek 4.1).

4.1.2 Technologie HVDC

Stejnoseměrná vedení vysokého napětí (HVDC – z anglického High-Voltage Direct Current) se stále častěji objevují v dnešní energetice, nejvíce v oblasti elektrické trakce a v oblasti přenosu toků vysokého množství energie na velké vzdálenosti. S rozmachem elektráren využívajících obnovitelné zdroje dochází k budování velkých zdrojů energie výrazně vzdálených od míst spotřeby. Tyto vzdálenosti se pohybují v rámci stovek až tisíců kilometrů, a právě pro tyto varianty se jeví jako lepší varianta technologie HVDC oproti klasickému střídavému přenosu.

Historicky byl stejnosměrný přenos součástí prvních stálých zdrojů elektrického proudu. Jedním z prvních využití stejnosměrného proudu byly obloukové lampy, kdy byl tento systém veřejného osvětlení vybudován v Manhattanu (New York) roku 1882. Nevýhody, jmenovitě hlavně nemožnost snadné a efektivní změny napětí, ale brzy převážily a využívat se začal proud střídavý.

Znovuzrození stejnosměrného proudu nastalo v roce 1954, kdy byla spuštěna první komerční HVDC linka spojující švédské pobřeží s ostrovem Gotland. Dnes jsou tyto technologie používány jak u obnovitelných zdrojů, kdy se například pro připojení větrných mořských farem do elektrizační soustavy používá odlehčená verze HVDC Light pro vzdálenosti od desítek kilometrů do několika stovek kilometrů, tak klasické HVDC na dodávku elektřiny do vzdálených míst na pevnině nebo k propojení střídavých linek různé frekvence, a také nově tzv. UHVDC, kdy se například v Číně začíná stavět přenosová linka stanovující světová maxima hladiny napětí, kapacity přenosu i délce vedení na hodnoty 1100 kV, 12 GW a 3000 km. [35] [36]



Obrázek 4.2: Evropské linky HVDC v roce 2008 [37]
(červené – vystavěné, zelené – ve výstavbě, modré – návrhy)

4.1.2.1 Princip HVDC

HVDC technologie pracují na principu usměrnění střídavého proudu (AC) usměrňovačem na stejnosměrný (DC), transportaci tohoto proudu vedením na výstup, kde je převedeno zpět na střídavý proud v měničce v režimu střídače.



Obrázek 4.3: Princip technologie HVDC [38]

Existuje více různých uspořádání DC sítí. Mezi nejběžnější patří následující:

- Jednopolové uspořádání.
- Dvupólové uspořádání.
- Vedení „nulové délky“ (Back-to-Back).

Tyto konfigurace mají své charakteristické využití s ohledem na požadavky aktuálního projektu. [36]

4.1.2.2 Výhody

- Absence parametrů frekvence a fáze a z toho vyplývající snadnější řízení přenosové soustavy.

- Vyšší stabilita přenosové soustavy.
- Indukční a kapacitní jevy eliminovány, neexistuje skin efekt – není omezena přenosová kapacita ani délka kabelu, menší ztráty při přenosu na velké vzdálenosti.
- Nutný menší počet vodičů.
- Žádná potřeba kompenzace jalového výkonu.
- Schopnost kontroly směru a hodnoty přenášeného výkonu.
- Možnost propojení různých přenosových soustav.

4.1.2.3 Nevýhody

- Obtížná a nákladná změna napětí.
- Vhodné pouze pro spojení dvou míst.
- Nevhodné na krátké vzdálenosti.

4.1.3 Technologie LFAC

Technologie LFAC (z anglického Low Frequency Alternating Current) byla navržena jako mezistupeň mezi HVDC a HVAC technologiemi. Jak lze vyčíst z názvu, pracuje tato technologie na nižší frekvenci než konvenční HVAC, konkrétně na 16 2/3 Hz. Při lepším využití průřezu kabelu se zároveň obejde bez velkých a drahých měnících potřebných pro HVDC, a je tedy variantou k připojení offshore větrných parků. Tato technologie může být potenciálním řešením pro cenově dostupné připojení pobřežních větrných elektráren, ale zatím je její využití spíše experimentální. [39]

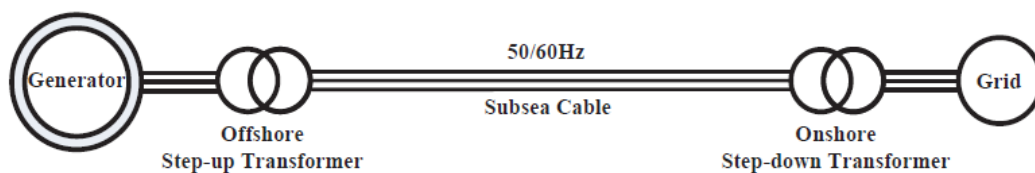


Fig.1 Structure of HVAC transmission system

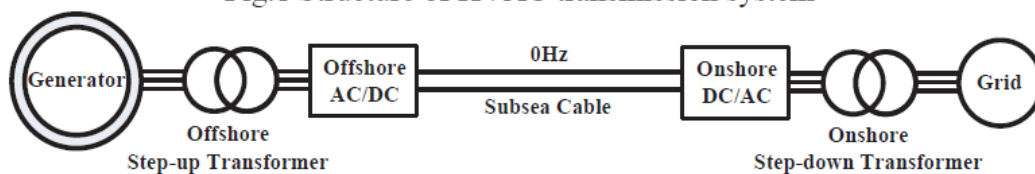


Fig.2 Structure of HVDC transmission system

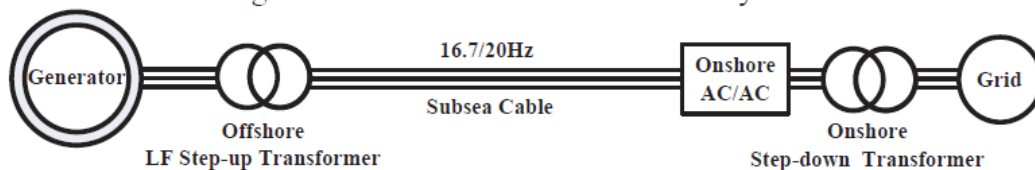


Fig.3 Structure of LFAC transmission system

Obrázek 4.4: Porovnání technologií HVAC, HVDC a LFAC [39]

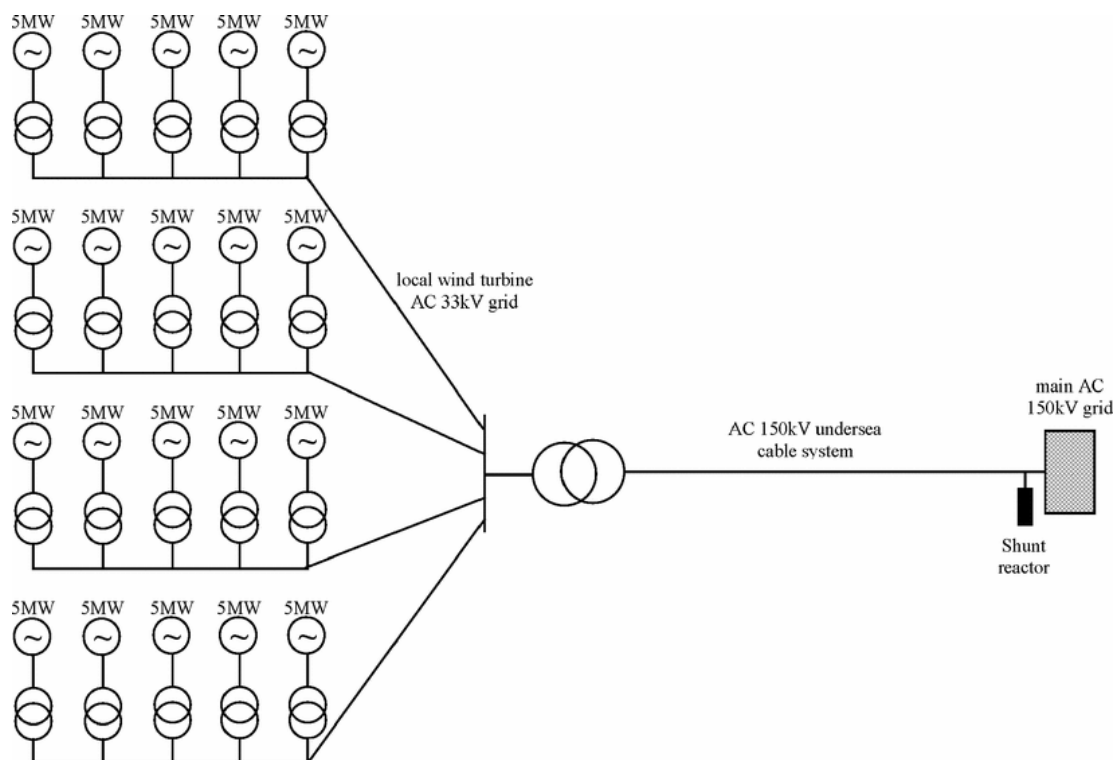
Všechny tyto popsané technologie mají své klady i zápory. Limitací střídavého vedení se na větší vzdálenosti ukazují být hlavně podélné parametry vedení. Ty s rostoucí délkou snižují jeho přenosovou schopnost. Přesto je střídavé vedení ověřenou a nejvíce využívanou přenosovou soustavou. Díky výhodnějším vlastnostem pro přenos na větší vzdálenosti u stejnosměrné technologie je HVDC logicky stále více využíváný jak na extrémní vzdálenosti a výkony, tak na spojení obnovitelných zdrojů, jako jsou právě offshore větrné parky. Mohu říct, že pro takto specializované případy je HVDC přenos jasnou výhodou, pro běžné projekty ale stále zůstává jasnou volbou střídavé vedení. Technologie LFAC je spíše experimentální zajímavostí a její komerční využití je zatím velmi omezené.

4.2 Příklad připojení offshore VTE do přenosové soustavy

Pro připojení offshore větrných parků se využívá HVAC a HVDC technologií. Střídavé HVDC technologie získávají výhodu při větších vzdálenostech od místa připojení do přenosové soustavy, na kratší vzdálenosti je používaná klasická střídavá technologie HVAC.

4.2.1 Střídavé připojení HVAC

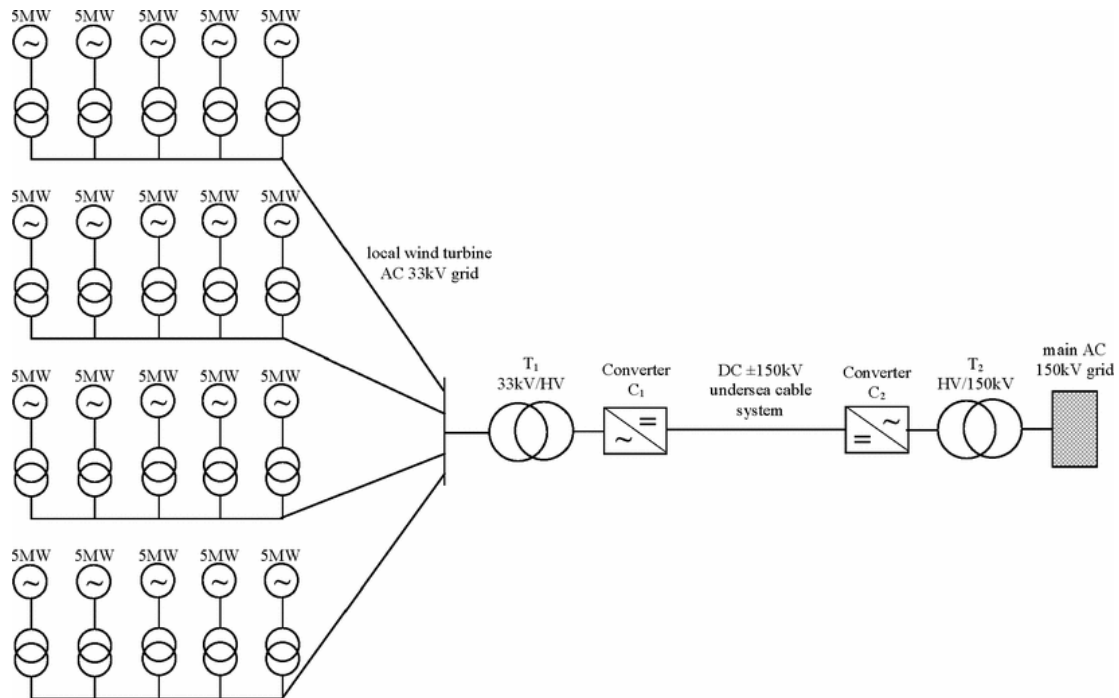
Na Obrázek 4.5 je příklad připojení offshore větrné farmy o výkonu 100 MW. Je nutný pouze jeden transformátor z 33 kV na 150 kV střídavého napětí. Na konci vedení před připojením k elektrizační síti je kompenzační tlumivka (shunt reactor), která absorbuje jalový výkon vznikající na kabelu.



Obrázek 4.5: Příklad připojení větrného offshore parku 100 MW pomocí HVAC technologie [40]

4.2.2 Stejnoseměrné připojení HVDC

Na Obrázek 4.6 je příklad připojení stejné offshore VTE pro technologii HVDC. Pro tento přenos je nutné mít transformátory před stejnosměrným kabelem i za ním, navíc je třeba střídavý proud nejdříve usměrnit a poté převést znovu na střídavý. K tomu se využívají měničny v režimu usměrňovače na začátku a v režimu střídače na konci vedení.

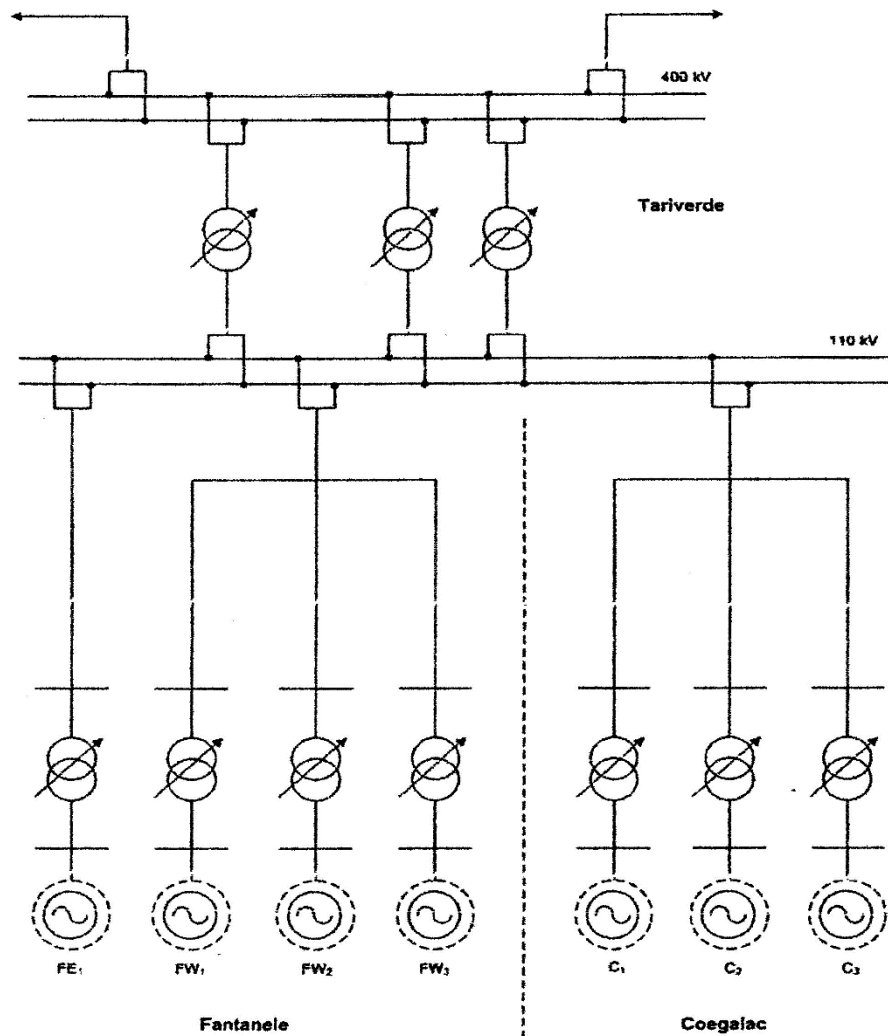


Obrázek 4.6: Příklad připojení větrného offshore parku 100 MW pomocí HVDC technologie [40]

4.2.3 Schéma připojení větrného parku Fantanele-Cogeaalac

Větrný park Fantanele-Cogeaalac v Rumunsku byl v roce 2012, kdy byl dokončen, největší větrnou farmou v Evropě. V tomto přímořském větrném parku vzdáleném 17 km od Černého moře stojí 240 větrných turbín o celkovém výkonu 600 MW, každá turbína s výškou 100 metrů, průměrem rotoru 99 metrů a výkonem 2,5 MW. Vlastníkem je skupina ČEZ. [41]

Jednotlivé turbíny jsou rozděleny do sedmi samostatných parků VTE. Do přenosové soustavy jsou zapojeny pomocí dvojí transformace, konkrétně vn/110 kV a 110/400 kV. [42]



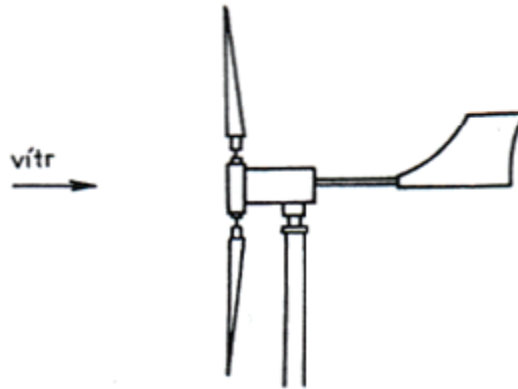
Obrázek 4.7: Schéma zapojení VTE Fantanele-Cogeaalac [42]

4.3 Regulace činného výkonu VTE

Z rovnice č. 6 pro výkon VTE jsem zjistil, že při provozu větrné elektrárny můžeme pro změnu výkonu využívat pouze změnu aktivní plochy rotoru. Toho se dosahuje následujícími způsoby.

4.3.1 Malé větrné elektrárny

K dosažení maximální účinnosti transformace větrné energie je u malých VTE dosahováno orientací rotoru do směru větru. Když není dodržena tato orientace, dochází ke ztrátám výkonu. Pro tyto účely se používá směrové kormidlo, pomocí které se natáčí vrtule.



Obrázek 4.8: Větrná elektrárna se směrovým kormidlem [7]

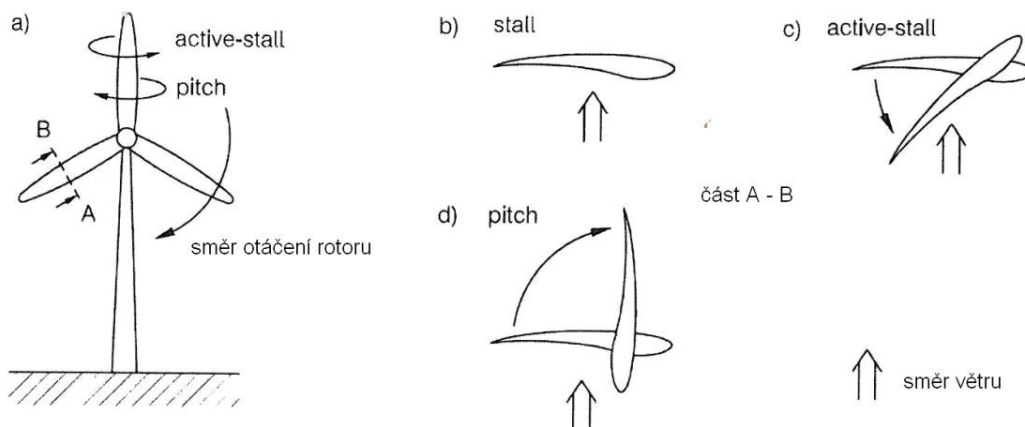
U starších typů větrných elektráren se využívalo regulačního kormidla. To při určité rychlosti větru natáčí rotor, v případě mezních rychlostí se VTE úplně odstaví a osa rotoru je kolmá ke směru větru. V dnešní době se i tyto malé jednotky konstruují jako rychloběžné, většinou s výkonem do 1,5 kW. Jsou brzděny pomaluběžnými generátory s usměrňovačem a obvykle nemají převodovku. [7]

4.3.2 Velké větrné elektrárny

Regulace výkonu u velkých větrných elektráren se provádí následujícími způsoby:

- Regulace STALL
- Regulace PITCH
- Regulace ACTIVE-STALL
- Regulace STALL-PITCH a PITCH-STALL

Větrné elektrárny s technologií STALL jsou obecně konstrukčně jednodušší než VTE s regulací PITCH, protože nemají technický systém měnící systém nastavení listů rotoru.



Obrázek 4.9: Naznačení principu jednotlivých regulací [7]

4.3.2.1 Regulace STALL

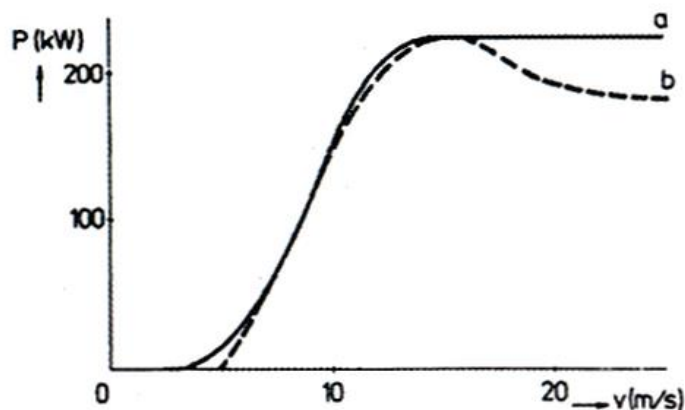
U regulace STALL jsou lopatky pevně ukotveny k rotoru a k regulaci dochází díky proměnnému tvaru lopatek. Geometrie na konci lopatky se elasticky mění při nárůstu rychlosti větru, díky tomu se zvýší úhel náběhu na konec lopatky a postupně se odtrhne proud vzduchu od lopatky. Laminární proudění se mění na turbulentní, a to znamená snížení vztlaku a pokles momentu na hřídeli.

Nevýhodou této regulace je snižující se výkon rotoru při vysokých rychlostech, a tím klesající účinnost. Dále je rotor neschopný samostatného rozběhu. V praxi je rozběh realizován elektrickým motorem. Systém STALL se běžně využívá u VTE s výkonem do 1000 kW. [7]

4.3.2.2 Regulace PITCH

Regulace PITCH je aktivní regulace, která pracuje se vstupním signálem výkonu generátoru. Pokud výkon překračuje bezpečně meze, je v činnost uveden hydraulický systém, který vychýlí lopatky rotoru. Tím se sníží vztlak, zvětší radiální odpor lopatek, a tedy snížení momentu na hřídeli. Potom, co se rychlost větru sníží, zapůsobí regulace opačným směrem a dojde k navýšení výkonu. Pro pohon hydraulického systému je využíváno zpravidla krokových motorů.

Vyšší konstrukční náročnost této regulace má za následek menší spolehlivost. Regulace PITCH se dá využít pro regulaci rozběhu elektrárny, ale zejména se používá pro omezení výkonu při vyšších rychlostech větru, díky čemuž nedochází k výraznému snížení výkonu. Nevýhodou je pomalost regulace, která není schopná zabránit přetěžování generátoru při velkých výkyvech rychlosti větru, proto se v současnosti využívá kombinovaná regulace PITCH-STALL. [7]



Obrázek 4.10: Výkonová charakteristika regulace PITCH (a) a STALL (b) [7]

4.3.2.3 Regulace ACTIVE-STALL

U regulace ACTIVE-STALL je rozběh elektrárny a provoz při nízkých rychlostech stejný jako u regulace PITCH. U limitních hodnot rychlosti větru dochází k natočení lopatek v opačném směru než u regulace PITCH, čímž se zvýší úhel náběhu větru, dojde k odtržení proudu vzduchu a k poklesu vztlaku. Úhel natočení je menší než u regulace PITCH, díky čemuž je možné reagovat na výkyvy rychlosti větru rychleji a předcházet tak přetěžování generátoru. [7]

4.3.2.4 Regulace STALL-PITCH

Tato regulace vyžaduje vybavení turbíny jak natáčenými listy, tak konstrukcí listů na regulaci STALL. Rozběh a pohyb při nízkých hodnotách probíhá v systému regulace PITCH. Při vysoké rychlosti způsobí regulace PITCH zhoršení přetížení listů, které zafungují na principu regulace STALL a změnou geometrie lopatek omezí moment. Při vysokých rychlostech se natáčením lopatek plynule udržuje výkon v maximálních hodnotách.

Jednodušší a stabilnější udržování výkonu v maximu je největší výhodou tohoto typu regulace, nevýhodou je vyšší hlučnost a větší ohyb lopatek než u následující regulace PITCH-STALL. [7]

4.3.2.5 Regulace PITCH-STALL

Při nízkých otáčkách funguje tato regulace jako regulace STALL-PITCH, tzn. v systému regulace PITCH. U vysokých otáček je dále omezován výkon natáčením lopatek. Při dosažení ještě vyšších rychlostí větru je postupně zapojována regulace STALL.

Výhodou této regulace je nižší hlučnost a menší deformace lopatek. [7]

4.4 Vliv VTE na elektrizační síť

Větrné elektrárny jsou pro elektrizační síť problematické z důvodu závislosti jejich okamžitého výkonu na momentálních podmínkách, tzn. na rychlosti větru. Provozní režim větrných elektráren je dále omezen minimální hodnotou, pod kterou se rotor VTE nedokáže roztočit, a maximální hranicí, nad kterou hrozí poškození elektrárny a ta se musí odpojit. Toto rozmezí se pohybuje přibližně od 3 do 25 m/s. Díky tomu nelze jednoduše přizpůsobit dodávaný výkon aktuálním potřebám soustavy a odběratelů, a to negativně působí na elektrizační soustavu. To je částečně omezeno u pobřežních větrných parků, kvůli větší stabilitě větrných podmínek, přesto se nedá mluvit o naprosto stabilním výkonu.

Mezi vlivy na elektrizační soustavu patří přetěžování sítě, změna zkratových poměrů sítě, kolísavé napětí neboli flicker, vyšší harmonické, rušení signálu HDO a horší regulovatelnost výkonu.

4.4.1 Přetěžování sítí

Každý zdroj elektřiny, to znamená i větrné elektrárny, musí být pro připojení do soustavy dostatečně dimenzovaný, od místa připojení až po místo spotřeby, případně po místo transformace pro dálkový přenos. Aby nedocházelo k přetěžování sítě při mimořádných větrných podmínkách, musí být větrná elektrárna připojena do správně zvoleného přípojného místa a její výkon vyveden do části sítě s odpovídající strukturou a uspořádáním. Pokud se VTE připojuje do sítě, která není dostatečně dimenzovaná, musí se provést její posílení, jinak může dojít k poškození provozních prostředků v důsledku vzniku nežádoucích vlivů, například vzniku nadměrných oteplení nebo nedovolených změn napětí. [43]

4.4.2 Zkratové poměry

Nové zdroje připojené do sítě přispívají ke zkratovému proudu, a to zapříčiní nárůst hodnoty zkratového výkonu v přípojném bodě. Může dojít až ke změně toku výkonů, protože může dojít k překročení hodnot zkratové odolnosti některých zařízení distribuční soustavy a tím k jejich poškození. Dále se musí posoudit také odolnost proti zkratům samotného připojovaného zdroje, který může také být poškozen vlivem zkratového proudu sítě.

Při výpočtu zkratového výkonu, případně proudu, které jsou zásadní pro posuzování zpětných vlivů zdrojů na soustavu, se vychází z hodnot za takových normálních podmínek, při kterých jsou hodnoty nejnižší. Neuvažují se přechodné mimořádné konfigurace dané provozem. Nejprve se určí celková impedance k místu zkratu, poté napětí ekvivalentního zdroje a zkratový proud, případně zkratový výkon. [43]

Vztahy pro výpočet celkové zkratové impedance k místě zkratu a rázový zkratový proud jsou následující:

$$Z_k'' = \frac{c \cdot U_n^2}{S_k''} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_k''} \quad (16)$$

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k''} \quad (17)$$

kde S_k'' je zdánlivý počáteční rázový souměrný zkratový výkon, c je napěťový součinitel daný místem, kde se tento S_k'' vyšetřuje, U_n je jmenovité napětí v místě zkratu, I_k'' je rázový zkratový proud a Z_k'' výsledná impedance k místu zkratu.

Tabulka 4.1: Napěťový součinitel c pro výpočet zkratových proudů (ČSN EN 60909-0)

Místo zkratu v síti	Napěťový součinitel c pro výpočet zkratových proudů	
	Maximální c_{max}	Minimální c_{min}
nn	1,10	0,95
vn, 110 kV, 220 kV	1,10	1,00
400 kV, 750 kV	1,05	1,00

4.4.3 Flicker

Flicker, neboli kolísavé napětí, jsou rychlé periodické změny napětí. Tento jev se projevuje rychlou změnou světelného toku na světelných spotřebičích, který může nepříznivě působit na zrak nebo psychický stav lidského organismu. Větrné elektrárny ho způsobují proměnlivou dodávkou elektrické energie do přípojného místa. To může vznikat buď nárazovým větrem, tento vliv je ale částečně vykompenzován díky regulaci větrného rotoru a setrvačnými silami působícími na rotor, nebo momentem, kdy je lopatka turbíny v zákrytu věže, čímž vznikají pravidelné poklesy výkonu.

4.4.4 Napětí vyšších harmonických

Sinusové průběhy o vyšších frekvencích vznikají na zařízeních využívajících polovodičové frekvenční měniče a střídače. Větrné elektrárny obsahují tato zařízení z důvodu produkce střídavého napětí o frekvenci jiné, než je frekvence sítě. Dále se tyto měniče a střídače objevují i u HVDC připojení, které, jak už jsem popsal, bývají v dnešní době u větrných parků využívány. Napětí vytvořené těmito prvky obsahuje kromě první harmonické i vyšší harmonické, které zkreslují průběh napětí. Takové napětí může více namáhat připojená zařízení, ovlivňovat jejich chod nebo dokonce připojená zařízení poškozovat. Proto je nutné poměr tohoto zkreslení určit před připojením VTE. Pro posouzení se určuje hodnota celkového činitele harmonických THF a celkového činitele harmonického zkreslení THD :

$$THF_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U} \quad (18)$$

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} \quad (19)$$

kde U_1 je efektivní hodnota základní harmonické, U_h je výsledné napětí harmonické h -tého řádu ve společném napájecím bodě a h je řád harmonické.

Pro omezení vyšších harmonických se VTE doplňují o filtrační členy – kapacitory a indukty v sérii – volené tak, aby pro frekvence vyšších harmonických způsobovaly zkrat a tím je vyrušily.

4.4.5 Rušení HDO signálu

Pojem hromadné dálkové ovládání, zkráceně HDO, je soubor technických prostředků schopných vysílat signály za účelem regulace odběru elektrické energie. Pro přenos informace využívá silová vedení energetické sítě, kdy je informace vysílána ve tvaru impulsního kódu s frekvencí stovek hertz. Informace může být ovlivněna provozem jiných zařízení, a to zdroji rušivých harmonických napětí shodujících se s frekvencí signálu. Větrné elektrárny navíc způsobují přídavné zatížení přijímačů HDO, stejně jako ostatní rozptýlená výrobní zařízení. Signál může být také ovlivněn kompenzačními zařízeními, jako jsou kondenzátory usměrňovačů s kapacitní filtrací nebo kondenzátorovými bateriemi.

4.4.6 Regulace výkonu

Celá elektrizační soustava má omezenou přenosovou a kapacitní schopnost. V ideální elektrizační soustavě je udržena rovnováha, tzn. dodávka se rovná odběru neboli výroba se rovná spotřebě. Dosáhnout tohoto stavu je vedle bezpečného chodu prioritou každého provozovatele ES.

Větrné farmy z důvodu proměnlivého výkonu nepříznivě ovlivňují spolehlivost dodávky energie. Vzhledem k tomu je nutné je zálohovat jinými zdroji energie, aby se při výpadku VTE dala dodávka energie nahradit. Dále mohou provozovatelé ES ke zlepšení kvality dodávané elektrické energie řídit činný a jalový výkon.

4.5 Akumulace energie

Jak jsem již uvedl výše, provoz VTE je limitován hlavně počasím. Díky tomu jde o proměnlivý energetický zdroj. Protože však je vždy cílem využít pokud možno celý potenciál, snaží se investoři najít možnosti, jak provoz větrných elektráren zefektivnit.

V momentu přebytku energie v síti, tzn. více energie, než je aktuální spotřeba, je žádoucí vyráběnou energii z VTE využít jinak. Proto je vhodné využít akumulace energie.

Se zvyšujícím se podílem obnovitelných zdrojů ve výrobě elektrické energie je pro toto odvětví klíčové nalezení řešení pro skladování energie v měřítku elektrizačních soustav.

Požadavky na systémy akumulace elektřiny jsou často protichůdné, nezávisle na použité technologii jsou žádoucí vlastnosti společné: [44]

- Velikost a kapacita, respektive hustota energie (kolik kWh může uchovat na kilogram hmotnosti).
- Maximální možný poskytnutý výkon, jak rychle dokáže energii uvolnit.
- Doba uchování energie a ztráty energie za tu dobu.
- Účinnost a její pokles s časem.
- Investiční náklady a cena za akumulovanou kWh.
- Počet cyklů a životnost.
- Bezpečnost provozu a vliv na životní prostředí.

Způsobů k ukládání elektřiny je velké množství, některé dobře vyzkoušené a používané, jiné nové a spíše experimentální. Bez výjimky ale nejsou levné. Některé ze způsobů akumulace jsem popsal na následujících řádcích. [45]

- Přečerpávací vodní elektrárny (PVE) – v době malé spotřeby se ukládá elektrická energie ve formě potenciální energie vody pro využití v době špičkové potřeby.
- Pozemní uskladnění tepelné energie (UTES) – čerpadlem poháněný systém ukládání ohřáté nebo vychlazené vody do podzemního zásobníku.
- Akumulace do stlačeného vzduchu (CAES) – v době nízké spotřeby využití elektrické energie ke stlačení vzduchu a uložení v zásobnících.
- Baterie – při nabíjení proud vyvolá vratné chemické změny, které se projeví rozdílem potenciálu na elektrodách. Tento rozdíl se v režimu vybíjení využívá k čerpání elektrické energie z baterie. Existuje množství variant baterií, např. olověné, Lithiové, NaS a další.
- Setrvačníky – elektrická energie je uložena ve formě kinetické energie v mechanických zařízeních otáčejících se vysokou rychlostí. Uložená energie se čerpá při zpomalení setrvačníku.
- Power to Gas (P2G) – přeměna elektrické energie na plynná paliva (vodík nebo metan), která je následně možné přidat do stávající infrastruktury.

- Superkapacity – elektřina akumulována v elektrostatickém poli mezi dvěma elektrodami.
- Supravodivé cívky (SMES) – elektřina akumulována v magnetickém poli vytvořeném průchodem stejnosměrného proudu supravodivou cívkou. Supravodivost je dosažena zchlazením vodiče na teplotu, při které materiál vykazuje skoro nulový odpor, čímž se dosáhne dlouhodobého průchodu proudu při téměř nulových ztrátách energie.

V současnosti se k akumulaci používají převážně přečerpávací vodní elektrárny, které představují 99 % celkové akumulační kapacity. Ty ale, stejně jako baterie, setrvačníky a další technologie, mají své nedostatky a prozatím nejsou schopny poskytnout řešení v dostatečném měřítku. Baterie a setrvačníky jsou dobré pro rychle dostupnou energii a regulaci frekvence, pro dlouhodobé skladování se ale nehodí. K dlouhodobějšímu skladování se hodí přečerpávací vodní elektrárny a ukládání do stlačeného vzduchu CAES, jsou ale výrazně omezeny požadavkem vyhovujících lokalit.

Power to Gas je relativně nová technologie, která by se mohla stát budoucností akumulace energie. Dlouhodobé skladování a distribuování vodíku a metanu je možné pomocí stávající infrastruktury zemního plynu, tj. plynovody a zásobníky, kdy pro příklad v Německu je akumulační kapacita 200 000 GWh, což je kapacita dostatečná na pokrytí několikaměsíční spotřeby celého státu. Ve srovnání s kapacitou německých přečerpávacích vodních elektráren, která se pohybuje kolem 40 GWh, je to přímo astronomické číslo a je jasné, že P2G technologie skýtá velký potenciál do budoucna. [46]

5 Porovnání výhod a nevýhod instalace pobřežních větrných elektráren

Tento bod jsem pro větší přehlednost rozdělil na všeobecné výhody a nevýhody větrných elektráren a na konkrétní výhody a nevýhody pobřežních větrných elektráren.

5.1 Všeobecné výhody VTE

- Jako obnovitelný zdroj energie je vítr teoreticky nevyčerpatelný zdroj, tím šetří fosilní paliva, která jsou neobnovitelná. Také je to zdroj tzv. čisté energie – při provozu VTE nevznikají škodlivé emise – a navíc nepůsobí takové zásahy do krajiny jako těžba fosilních paliv.
- Nevznikají žádné odpadní produkty.
- Větrná energie je, na rozdíl od fosilních paliv, zcela zdarma.
- Bezpečná výroba energie.
- Jednotlivé zařízení VTE zabírají minimální plochu.
- Kvůli roztroušenosti větrných elektráren nehrozí při havárii velkoplošný výpadek dodávky energie, jako by hrozil u velkých výkonových bloků konvenčních zdrojů energie.
- Po ukončení životnosti se dá VTE rozebrat a z velké části recyklovat.

5.1.1 Výhody pobřežních větrných elektráren

- Stabilnější povětrnostní podmínky a tím stabilnější vyrobený výkon. Díky tomu jsou pobřežní větrné elektrárny efektivnější a mají větší výkonnost na instalovanou jednotku než VTE na pevnině.
- Možnost stavění větších větrných parků a větších větrných turbín díky více vhodným lokalitám, který by byl de facto nevyužitý.
- S ohledem na větší velikost, efektivitu, více vhodných lokalit a stabilnější výkon se dá uvažovat o částečné náhradě konvenčních energetických zdrojů. Tomu napomáhá i projekt Evropské větrné iniciativy (EWI, z anglického European Wind Initiative), který má za cíl stanovit podíl větrné energetiky v evropské rozvodné soustavě ENTSO-E na 20 % v roce 2020, 33 % v roce 2030 a 50 % v roce 2050. [47]
- Předvídaní větrných podmínek na moři je snazší, to napomáhá využitelnosti energie vyrobené na pobřežních větrných elektrárnách.

- Díky velké vzdálenosti od pevniny u většiny těchto větrných elektráren odpadá vliv hluku a estetiky na okolí. Existují ale výjimky, v případech výstavby blíže u pobřeží nebo u turisticky atraktivních lokací.

5.2 Všeobecné nevýhody VTE

- Nestabilita výroby elektrické energie a s tím související dopady na distribuční soustavu, na kterou je připojena.
- Hluk způsobený turbínami. Vzniká činností strojové části elektrárny (u moderních to může být omezeno, protože dokáží pracovat bez převodového ústrojí) a vzájemným působením proudícího vzduchu a povrchu listů rotoru. V denním provozu tento hluk nesmí překročit 50 decibelů, v nočním provozu 40 decibelů. To je zohledněno při projektování.
- Stroboskopický efekt, který vytvářejí rotující lopatky VTE, konkrétně jejich kmitající stín. Pozorovatel může být tomuto jevu vystaven, pokud je v poloze kolmo k rotoru VTE a do vzdálenosti 600 m. To je také bráno v potaz při plánování.
- Dopad na krajinný ráz. To je ale velice subjektivní problém, většina větrných parků se snaží být navržena tak, aby byla co nejméně rušivá.
- Nákladné vybudování větrných elektráren.
- Protože je nutné stavět VTE na místech, kde je vhodný větrný potenciál, existuje malý počet vhodných lokalit pro výstavbu.
- Emise infrazvuku, které jsou ale u absolutní většiny VTE hluboce podlimitní a vyšší hodnoty mohou objevit pouze při poruše.

5.2.1 Nevýhody pobřežních větrných elektráren

- Hlavní nevýhodou je složitost výstavby, provozu a servisu. Podrobněji jsem tuto problematiku rozebral v kapitole č. 3.
- Problematický přenos energie na pevninu, kdy musí být nataženy kabely desítky až stovky kilometrů dlouhé.
- Nutnost přizpůsobení rozvodné soustavy pro nové velké offshore větrné parky, aby nezpůsobovaly problémy v elektrizační síti.
- Při stavbě blízko břehu můžou být problémy s estetikou a hlukem, popřípadě omezení využití pobřežních oblastí k rybolovu a podobně. Ve většině případů se ale uvažuje o stavbě pobřežních VTE ve větší vzdálenosti od pobřeží.

- Malý počet zkušeností s výstavbou a provozem offshore větrných farem, potažmo malý počet zkušených pracovníků.
- Malé množství specializovaných lodí, které jsou většinou přestavěné z ropných tankerů. Tato situace se ale s rozvojem odvětví zlepšuje.
- Hrozba úniku oleje do moře při havárii.
- Výstavba a provoz pobřežních větrných elektráren mohou mít nepříznivý vliv na mořskou faunu, podle některých studií působí nepřetržitý hluk z elektráren negativně na kytovce v pobřežních vodách.

6 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo popsat principy funkce větrných elektráren, a to se zaměřením na pobřežní větrné elektrárny, jejich provoz a připojení.

V úvodu jsem se zabýval fyzikálním principem funkce. Popsal jsem vítr, jeho vlastnosti a výpočet energie. Následuje popis větrné elektrárny, rozebírám zde jednotlivé části konstrukce, od základů, přes stožár, až po gondolu a lopatky. Popisuji také různé druhy větrných turbín, odporové, vztlakové a s horizontální nebo vertikální osou otáčení. Poté se dostávám k teorii větrné turbíny, kde se zabývám teoreticky dosažitelným výkonem, principem funkce vztlakových turbín, které jsou u velkých větrných elektráren používány, a rychloběžností. Úvod zakončuji typy větrných elektráren, kde zmiňuji ty nejčastější i některá experimentální řešení.

V kapitole č. 3 se dostávám k pobřežním větrným elektrárnám, rozebírám jejich základy, na které jsou mnohem vyšší nároky než u onshore větrných elektráren, a zmiňuji speciální stavební a servisní pravidla. Také jsem zde umístil přehled aktuálních největších offshore větrných farem v Evropě, kde jsou jasně vidět státy, kde jsou tyto elektrárny nejvíce využívány. Mezi ně patří Spojené království, Nizozemsko, Dánsko, Německo a Belgie. Výkony těchto velkých farem jsou už velmi výrazné, aktuálně největší větrná farma v Evropě London Array má celkový výkon 630 MW, kterým zásobuje Londýn.

V kapitole č. 4 řeším integraci pobřežních větrných elektráren do distribuční sítě. Rozebírám jednotlivé možnosti vysokonapěťového přenosu, technologie stejnosměrného HVDC, střídavého HVAC a LFAC přenosu a jejich odpovídající výhody a nevýhody. Zjistil jsem, že pro kratší vzdálenosti vychází ekonomicky výhodněji technologie HVAC, pro větší vzdálenosti je výhodnější HVDC technologie. LFAC technologie jako experimentální mezistupeň je vhodná pro speciální případy v určitém rozmezí vzdáleností a je brána jako potenciální možnost pro snížení cen pro připojení offshore větrných parků.

Dále jsem ve čtvrté kapitole nastínil konkrétní možnosti připojení pobřežních větrných parků pomocí HVAC a HVDC technologií a také přidal skutečné připojení přímořského větrného parku Fantanele-Cogevalac v Rumunsku. Poté rozebírám regulaci činného výkonu VTE, kdy se využívá několika různých způsobů a jejich kombinací. Následuje vliv VTE na elektrizační síť, který se před připojením větrných elektráren musí uvažovat. Mezi vlivy patří přetěžování sítě, změna zkratových poměrů, napětí vyšších harmonických, flicker a rušení HDO signálu. Samostatnou kapitolou je řízení činného a jalového výkonu, které jsem pouze zmínil, a které je u těchto větrných elektráren velmi komplikované. Na konec této kapitoly jsem nastínil možnosti akumulace energie, která je pro další rozvoj využívání obnovitelných

zdrojů energie nezbytností. Největší potenciál do budoucna vykazuje technologie Power to Gas, ostatní technologie mají výrazné nedostatky a prozatím se pro potřeby OZE příliš nehodí.

V poslední kapitole č. 5 jsem vyjmenoval výhody a nevýhody instalace pobřežních větrných elektráren. Pokud srovnáme offshore větrné elektrárny s klasickými onshore, výhody jasně převládají u moderních pobřežních parků. Hlavním problémem je jejich cena, problematický přenos energie a komplikovaná stavba a servis, to ale vyvažuje stabilnější povětrnostní podmínky, větší množství vhodných míst a odbourání vlivu hluku a vlivu estetického. S pokračujícím rozvojem stavby pobřežních větrných elektráren se postupně zjednodušuje stavba a servis, díky specializovaným lodím, a zlepšují se i možnosti přenosu energie. V neposlední řadě je pravděpodobný pokles cen z důvodu mnoha nových projektů, které podporuje i Evropská Unie.

Přestože jsou OZE a větrná energie stále jen alternativním zdrojem, jejich podíl v energetice bude nadále růst. Úplné nahrazení konvenčních tepelných elektráren je prozatím nereálné, jejich podíl na výrobě energie se, na úkor obnovitelných zdrojů a třeba právě pobřežních větrných elektráren, bude snižovat.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *Energie z obnovitelných zdrojů* [online]. ČEZ [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje.html>
- [2] *Větrné elektrárny ve světě* [online]. ČSVE [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/vetrne-elektrarny-ve-svete/283>
- [3] ŽÁK, Michal. *Proč fouká a jak vzniká vítr?* [online]. In-počasí, 2015 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/vitr-jak-vznika/>
- [4] *Anemometr* [online]. Wikipedie – otevřená encyklopedie [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Anemometr>
- [5] *Beaufortova stupnice* [online]. Converter [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/beaufortova-stupnice.htm>
- [6] CROME, Horst. *Technika využití energie větru: svépomocná stavba větrných zařízení*. Ostrava: HEL, 2002. ISBN 80-861-6719-4.
- [7] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [8] *Větrný park Břežany* [online]. Větrná energie [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: http://www.vetrna-energie.cz/projekty/vetrne-elektrarny_7
- [9] *Betonový základ* [online]. ČSVE [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://csve.cz/clanky/betonovy-zaklad/305>
- [10] *Stožár* [online]. ČSVE [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://csve.cz/detail-kategorie/stozar/86>
- [11] *Ocelový tubusový stožár* [online]. ČSVE [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/ocelovy-tubusovy-stozar/229>
- [12] *Příhradový stožár větrné elektrárny* [online]. ČSVE [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://csve.cz/cz/clanky/prihradovy-stozar-vetrne-elektrarny/228>
- [13] *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice* [online]. Praha: ČEZ, 2007 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/energie-a-zivotni-prostredi/oze-cr-all-17-01-obalka-in.pdf>
- [14] *Převodovka větrné elektrárny* [online]. ČSVE [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://csve.cz/cz/clanky/prevodovka-vetrne-elektrarny/327>
- [15] *Generátor větrné elektrárny* [online]. ČSVE [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://csve.cz/cz/clanky/generator-vetrne-elektrarny/329>
- [16] *Hydraulické systémy větrné elektrárny* [online]. ČSVE [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://csve.cz/cz/clanky/hydraulicke-systemy-vetrne-elektrarny/331>
- [17] *Nosný rám strojovny* [online]. ČSVE [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://csve.cz/cz/clanky/nosny-ram-strojovny/326>

- [18] ŠKORPÍK, Jiří. *Základní rovnice lopatkových strojů* [online]. Transformační technologie [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/12.html#menu>
- [19] ŠKORPÍK, Jiří. Využití energie větru. *Transformační technologie* [online]. [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/04.html#menu>
- [20] *Větrné elektrárny – princip, rozdělení, elektrárny v ČR* [online]. O energetice, 2015 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/typy-elektraren/vetrne-elektrarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni/>
- [21] *Větrné elektrárny: Nejčastější typy, experimentální projekty a zajímavosti* [online]. EkoBonus [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <https://www.ekobonus.cz/vetrne-elektrarny-nejcastejsi-typy-experimentalni-projekty-a-zajimavosti>
- [22] *Savoniova turbína* [online]. Wikipedie – otevřená encyklopedie [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Savoniova_turb%C3%ADna
- [23] *Betzovo pravidlo* [online]. Wikipedie – otevřená encyklopedie [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Betzovo_pravidlo
- [24] *Vznik vztlaku* [online]. ČSVE [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://csve.cz/cz/clanky/vznik-vztlaku/307>
- [25] *Počet listů rotoru větrné elektrárny* [online]. ČSVE [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://csve.cz/cz/clanky/pocet-listu-rotoru-vetrne-elektrarny/310>
- [26] ZOUFALÝ, Martin. *Pobřežní větrné elektrárny*. Plzeň, 2016. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická.
- [27] *Gravity Based Support Structures* [online]. 4C Offshore, 2013 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.4coffshore.com/windfarms/gravity-based-support-structures-aid8.html>
- [28] *Monopiles Support Structures* [online]. 4C Offshore, 2013 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.4coffshore.com/windfarms/monopiles-support-structures-aid4.html>
- [29] *Jacket or Lattice Structures* [online]. 4C Offshore, 2013 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.4coffshore.com/windfarms/jacket-or-lattice-structures-aid5.html>
- [30] *Tripod Support Structures* [online]. 4C Offshore, 2013 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.4coffshore.com/windfarms/tripod-support-structures-aid7.html>
- [31] *Tripile Support Structures* [online]. 4C Offshore, 2013 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.4coffshore.com/windfarms/tripile-support-structures-aid6.html>
- [32] Deep Explorer. In: *4C Offshore* [online]. [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.4coffshore.com/windfarms/images/vessels/2289.png>
- [33] Njord Alpha. In: *Shipspotting* [online]. [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.shipspotting.com/photos/middle/2/9/1/1986192.jpg>
- [34] *List of offshore wind farms* [online]. Wikipedie – The free encyclopedia [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_offshore_wind_farms

- [35] *ABB wins orders of over \$300 million for world's first 1,100 kV UHVDC power link in China* [online]. ABB [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <http://www.abb.com/cawp/seitp202/f0f2535bc7672244c1257ff50025264b.aspx>
- [36] *HVDC – stejnosměrný přenos elektrické energie* [online]. O energetice [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/hvdc-stejnosmerny-prenos-elektricke-energie/>
- [37] *List of HVDC projects* [online]. Wikipedia – The free encyclopedia [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_HVDC_projects
- [38] DAVIES, M., M. DOMMASCHK, J. DORN, J. LANG, D. RETZMANN a D. SOERANGR. *HVDC PLUS – Basics and Principle of Operation* [online]. Siemens, 2009 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: https://www.energy.siemens.com/nl/pool/hq/power-transmission/HVDC/HVDC_Plus_Basics_and_Principle.pdf
- [39] XIANG, X., M. M. C. MERLIN a T. C. GREEN. *Cost analysis and comparison of HVAC, LFAC and HVDC for offshore wind power connection* [online]. 2016 [cit. 2017-05-29]. ISBN 978-1-78561-230-5. DOI: 10.1049/cp.2016.0386
- [40] BRESESTI, Paola, Wil L. KLING, Ralph L. HENDRIKS a Riccardo VAILATI. *HVDC Connection of Offshore Wind Farms to the Transmission System*. *IEEE Transactions on Energy Conversion* [online]. 2007, **22**(1) [cit. 2017-05-29]. DOI: 10.1109/TEC.2006.889624.
- [41] *Větrný park Fantanele – Cogevalac* [online]. ČEZ [cit. 2017-05-27]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/vitr/vetrny-park-fantanele-cogevalac.html>
- [42] HABRYCH, Richard. Řízení jalového výkonu větrných elektráren. *Energetika*. 2013, (12).
- [43] ŠANTÍN, Vlastimil. *Simulace jevů způsobených připojováním a provozem větrných elektráren a farem*. Plzeň, 2012. Disertace. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická.
- [44] *Ukládání elektřiny z fotovoltaických a větrných elektráren* [online]. EkoBonus [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/ukladani-elektriny-z-fotovoltaickych-a-vetrnych-elektren.aspx>
- [45] *Technologický plán akumulace energie (elektrické a tepelné)* [online]. O energetice, 2017 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/technologicky-plan-v-oblasti-akumulace-energie/>
- [46] *Power to Gas – budoucnost akumulace elektřiny?* [online]. O energetice, 2015 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/power-to-gas-budoucnost-akumulace-elektriny/>
- [47] *The European Wind Initiative: Wind Power Research and Development to 2020* [online]. EWEA, 2013 [cit. 2017-05-29]. ISBN 978-2-930670-02-7. Dostupné z: http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/EWI_2013.pdf