

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Plovoucí větrné elektrárny

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

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

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš SOUKUP**
Osobní číslo: **E13N0030K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Plovoucí větrné elektrárny**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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


1. Popište fyzikální princip funkce větrné elektrárny.
2. Navrhněte varianty technického řešení.
3. Popište způsob integrace do soustavy.
4. Stanovte nutné podmínky rozvoje větrné energetiky na moři.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Jiřina Mertlová, CSc.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na větrnou energetiku s důrazem na plovoucí větrné elektrárny. Cílem této práce je seznámit v úvodu čtenáře s principem vzniku větru a jeho důležitými parametry. Následně bude vysvětlen princip činnosti klasické pevninské větrné elektrárny. Další kapitoly se zaměřují přímo na větrné elektrárny a větrné parky na moři. Budou uvedeny jejich podstatné vlastnosti a parametry a bude představeno několik zajímavých instalací. Zároveň je obsažena úvaha nad podmínkami pro další rozvoj této energetické oblasti. Vyhodnocení a shrnutí práce je obsaženo v závěru.

Klíčová slova

Větrná energie, větrná elektrárna, offshore, onshore, větrný park, obnovitelné zdroje energie, účinnost, ekologie, ekonomie.

Abstract

This master theses is focused on wind energy with emphasis to floating wind turbines. The aim of this work is in the introduction to acquaint the reader with the principle of formation of wind and its relevant parameters. Further will be explained the principle of operation classical mainland wind power plant. Next chapters are focused directly on wind power plants and offshore wind farms. Especially are presented basic characteristics and parameters with several interesting installations. It is also included consideration of the conditions for further development of the energy sector. Evaluation and summary of the thesis is contained in the end.

Key words

Wind energy, wind power plant, offshore, onshore, wind farm, renewable energy sources, efficiency, ecology, economics.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou 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 diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 1.5.2015

Tomáš Soukup

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiřině Mertlové, CSc. a dále konzultantovi diplomové práce Ing. Richardu Habrychovi, Ph.D. za jejich cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD.....	11
1 VÍTR A ENERGIE VĚTRU	13
1.1 POTENCIÁL VĚTRU	13
1.2 VZNIK VĚTRU	14
1.3 RYCHLOST A SMĚR VĚTRU	14
1.4 ENERGIE A VÝKON VĚTRU	16
1.5 VĚTRNÁ MAPA.....	17
2 FYZIKÁLNÍ PRINCIP FUNKCE VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY.....	18
2.1 HLAVNÍ ČÁSTI VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	18
2.1.1 Rotor	18
2.1.2 Gondola	19
2.1.3 Stožár	20
2.1.4 Základ.....	22
2.2 ROZDĚLENÍ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN Z HLEDISKA VÝKONNOSTI	23
2.3 STATISTIKY PŘIPOJENÝCH VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN A JEJICH VÝROBY	25
2.4 EKOLOGICKÉ ASPEKTY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN.....	27
3 TECHNICKÁ ŘEŠENÍ PLOVOUCÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	29
3.1 NÁZVOSLOVÍ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN.....	29
3.2 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI A ODLIŠNOSTI	30
3.3 KONSTRUKČNÍ A TECHNICKÉ VÝZVY	30
3.3.1 Projekt a matematické modely.....	31
3.3.2 Základ a jeho stabilita	31
3.3.3 Doprava a montáž.....	33
3.3.4 Připojení do sítě.....	34
3.3.5 Provoz, řízení a údržba.....	34
3.3.6 Likvidace.....	34
4 INTEGRACE PLOVOUCÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY DO ENERGETICKÉ SOUSTAVY.....	36
4.1 TEORIE VYSOKONAPĚŤOVÉHO PŘENOSU A ZTRÁT.....	36
4.2 HVDC TECHNOLOGIE PRO PŘENOS ENERGIE NA PEVNINU	36
4.3 HVAC TECHNOLOGIE PRO ROZVOD ENERGIE DÁLE DO VNITROZEMÍ	39
4.4 KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	40
4.5 KVALITATIVNÍ A OCHRANNÉ PRVKY VTE.....	41

4.6	ENERGIE A VÝKONOVÁ BILANCE ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY	42
4.7	AKUMULACE ENERGIE	43
5	OFFSHORE VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY A VĚTRNÉ FARMY V EVROPĚ.....	47
5.1	VĚTRNÝ POTENCIÁL EVROPY	47
5.2	STATISTIKY EWEA	48
5.3	VYBRANÉ OFFSHORE VTĚ INSTALACE V EVROPĚ.....	49
6	NUTNÉ PODMÍNKY ROZVOJE VĚTRNÉ ENERGETIKY NA MOŘI.....	52
	ZÁVĚR	55
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	56

Seznam symbolů a zkratk

Zkratka	Význam (originální)	Význam (český překlad)
AA-CAES	Advanced-Adiabatic Compressed Air Energy Storage	Úložiště na stlačený vzduch s přidaným adiabatickým okruhem
AC	Alternating Current	Střídavý proud
CAES	Compressed Air Energy Storage	Energetické úložiště na stlačený vzduch
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav	-
ČR	Česká republika	-
DC	Direct Current	Stejnoseměrný proud
EIA	Environmental Impact Assessment	Projekt vyhodnocení vlivů na životní prostředí
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity	Evropská síť provozovatelů elektroenergetických přenosových soustav
EU	Evropská unie	-
EWEA	European Wind Energy Association	Asociace evropské větrné energetiky
EWI	European Wind Initiative	Projekt evropská větrná iniciativa
GWEC	Global Wind Energy Council	Světová rada pro větrnou energetiku
HVAC	High-Voltage Alternating Current	Vysokonapěťový střídavý přenos
HVDC	High-Voltage Direct Current	Vysokonapěťový stejnosměrný přenos
CHKO	Chráněná krajinná oblast	-
OZE	Obnovitelné zdroje energie	-
PVE	Přečerpávací vodní elektrárna	-
VtE	Větrná elektrárna	-

Symboly	Význam	Jednotky
A	Plocha	$[m^2]$
B	Magnetická indukce	$[\Omega]$
C	Kapacita	$[F]$
$\cos \varphi$	Účinník	$[0-1]$
c_p	Účinnost stroje	$[-]$
E	Kinetická energie	$[J]$
f	Frekvence	$[Hz]$
G	Svod	$[S]$
I	Elektrický proud	$[A]$
L	Indukčnost	$[H]$
m	Hmotnost	$[kg]$
P	Činný výkon	$[W]$
R	Elektrický odpor	$[\Omega]$
s	Dráha	$[m]$
S	Plocha rotoru	$[m^2]$
t	Čas	$[s]$
U	Elektrické napětí	$[V]$
U_n	Jmenovité napětí	$[V]$
v	Rychlost proudění vzduchu	$[m \cdot s^{-1}]$
V	Objem	$[m^3]$
X	Indukční reaktance	$[\Omega]$
Y	Příčná admitance	$[S]$
Z	Podélná impedance	$[\Omega]$
π	Konstanta π	$[3,14]$
ρ	Hustota vzduchu	$[kg \cdot m^{-3}]$

Úvod

Již v 19. století, kdy průkopníci jako Alessandro Volta, Michael Faraday či Thomas Alva Edison pokládali teoretické i praktické základy elektrotechniky, bylo jasné, že elektrotechnika a elektrická energie jsou budoucností lidstva. A jejich předpoklady se vyplnily beze zbytku.

Současná společnost je, dle mého názoru, na elektrické energii téměř absolutně závislá. Přestože se naše znalosti posunuly za poslední dvě století podstatným krokem kupředu, stále to jsou převážně elektrické stroje a zařízení, která přeměňují naše znalosti a nápady do faktické tvorby a odvádějí tak za nás těžkou a nepříjemnou práci jako takovou. Ať už je tento směr vývoje pro naši budoucnost dobrý či špatný, faktem zůstává, že elektrická energie je nezbytná a musíme hledat další její zdroje a zefektivnit její stávající využití.

Elektrická energie se na Zemi v okamžitě využitelné podobě nevyskytuje, ale získáváme ji vždy přeměnou z jiné formy energie. Nejčastěji se jedná o přeměnu tepelné energie na kinetickou a potažmo elektrickou. Tuto soustavu reprezentují klasické tepelné elektrárny, ve kterých dochází spalováním uhlí, ropy nebo zemního plynu (příp. štěpením jader v jaderném reaktoru) k výrobě tepla, které se mění v páru pohánějící turbínu s hřídelí, díky které následně alternátor generuje elektrickou energii. Tento způsob výroby je v současnosti nejpoužívanější. Jelikož se však zásoby fosilních paliv (uhlí, ropa, zemní plyn) na Zemi pomalu, ale jistě zmenšují, hledáme jiné možné zdroje energie. Řádově za desítky let by se totiž mohlo stát, že nebudeme mít čím tyto tepelné elektrárny napájet.

Abychom předešli hrozícímu nedostatku energetických zdrojů, nejčastěji se proto naše pozornost upíná na tzv. obnovitelné zdroje energie (OZE). Jedná se o využití přírodních zdrojů k výrobě elektrické energie. Jak již ze samotného názvu vyplývá, tyto přírodní zdroje mají schopnost úplné nebo částečné obnovy a to buď samy, nebo s pomocí člověka. Nejčastěji hovoříme zejména o energii vody, větru a Slunce. Z praktických zkušeností již víme, že prostřednictvím fotovoltaických panelů lze transformovat sluneční paprsky na elektrickou energii, víme, že přehrazením tekoucí řeky a získaným regulovatelným vodním proudem lze pohánět turbínu s alternátorem a také víme, že tuto turbínu s alternátorem může roztáčet i obyčejný vítr.

Právě energii větru, větrným elektrárnám a zejména pak plovoucím větrným elektrárnám, které se umísťují v mělkých vodách u pobřeží nebo i dále na otevřeném moři, se budu dále věnovat v této práci a v jejích dalších kapitolách. Pro komplexní pochopení problematiky objasním v úvodní kapitole vznik větru a uvedu jeho nejpodstatnější parametry. V následující kapitole se věnuji již samotným větrným elektrárnám. Vysvětlím princip jejich činnosti, stavby a uvedu podstatné argumenty pro i proti jejich užívání. V dalších kapitolách se již budu věnovat výhradně větrným elektrárnám umístěným na moři. Postupně objasním rozdíly mezi pevninskými a mořskými VtE, opět uvedu výhody a nevýhody jednotlivých řešení a porovnáám přínosy pro populaci. Také objasním technickou stránku provedení mořských VtE, zdůrazním komplikace, které při jejich výstavbě mohou nastat a nastíním jejich možná řešení. Zároveň představím několik mořských větrných parků, které se podstatnou měrou podílely nebo podílejí na vývoji odvětví mořských VtE. Na závěr uvedu podmínky podstatné pro další rozvoj tohoto perspektivního odvětví.

Impulem pro vznik této práce pro mne byla rychlost, jakým se odvětví mořských a plovoucích VtE aktuálně rozvíjí a samozřejmě také můj zájem o danou problematiku. Přestože v našich zeměpisných podmínkách nebude, vzhledem k absenci moře, toto téma tolik aktuální, pevně věřím, že se tento ucelený přehled a úvod do problematiky stane vhodným doplněním dosud známých informací a získáme tak lepší představu o tom, jaké jsou současné evropské a světové trendy.

Pro úplnost dodávám, že mezi OZE řadíme kromě energie vody, větru a Slunce i u nás méně využívané formy získávání energie - geotermální energii, energii přílivu a odlivu (tzv. osmotické elektrárny, u nás nevyužívané) a dále energie získané z bioplynu, biomasy a biopaliva. Vzhledem k charakteru práce však nebudu tyto alternativní zdroje dále zmiňovat, případně jen okrajově, neboť nejsou předmětem mé práce.

1 Vítr a energie větru

1.1 Potenciál větru

Potenciál větru dokázali využít již naši dávní předkové. První takové zmínky pocházejí ze starověkého Egypta (přibližně 3000 let př. n. l.), kdy byla energie větru použita k pohonu lodí. Zdrojem pohonu byly plachty, které zachytávaly proud vzduchu a loď se tak pohybovala po hladině. Často platila úměra, že čím větší plocha a počet plachet, tím byl pohon výkonnější, resp. plavidlo rychlejší. Mohu říci, se jedná i o prapočátky námořní dopravy, neboť plachetnice, ač značně modernizované, používali lidé ještě velmi dlouho potom a i v současnosti nacházíme jejich uplatnění.

Velmi důležité bylo využití větru ve větrných mlýnech, které sloužily nejčastěji k mletí obilí, pohonu pil a dopravě vody do osídlených oblastí, případně k jinému mechanickému využití. První takové mlýny byly použity v Persii přibližně kolem roku 200 př. n. l. Největší rozvoj větrných mlýnů pak přišel kolem 11. století na Středním východě. V Evropě se počátky datují do 13. století. Nejdříve se objevily v Itálii, Francii a na Pyrenejském poloostrově, později ve Velké Británii, v Německu a Holandsku. Holandsko větrné mlýny využívalo mimo jiné k odvodňování mokřin a svými typickými větrnými mlýny se proslavilo.



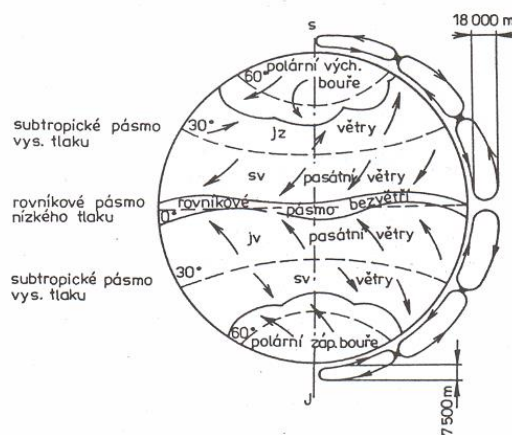
Obr. 1: Větrný mlýn holandského typu. [13]

O větrných mlýnech na našem území máme zmínky z roku 1277, kdy byl postaven větrný mlýn v zahradě Strahovského kláštera. Na území Čech, Moravy a Slezska víme o celkem 879 historicky prokázaných větrných mlýnech, většina z nich je z 19. století. Tyto mlýny však vždy sloužily k přeměně větrné energie na práci, nikoliv na elektrickou energii. [1]

1.2 Vznik větru

Vítr je proud vzduchu vznikající díky rozdílům atmosférického tlaku. Tyto rozdíly způsobují změny teplot a následnou změnu hustoty. Vzduch vždy proudí z míst vyššího tlaku vzduchu do míst nižšího tlaku vzduchu. Rychlost větru závisí na velikosti tlakového rozdílu. [2]

Proudění vzduchu zároveň způsobuje odlišné ohřívání moře a pevniny – moře se ohřívá podstatně pomaleji, má však větší schopnost akumulace tepla. Síla zemské rotace ovlivňuje směr větru – na severní polokouli jej odchyluje doprava, na jižní polokouli doleva.



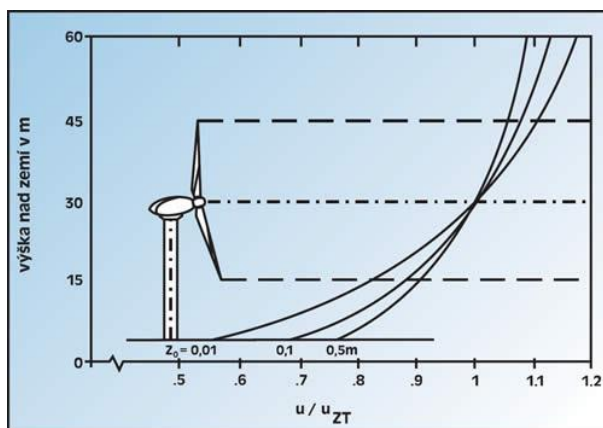
Obr. 2: Schéma hlavních směrů větru na zeměkouli. [37]

1.3 Rychlost a směr větru

Rychlost a směr jsou základními parametry větru, které určují. Jak vysvětlím níže, zejména rychlost větru je v případě nejen větrných elektráren naprosto stěžejní.

V přízemní vrstvě je však nutné brát v potaz zejména členitost terénu (těž drsnost), což si lze představit jako množství překážek, které stavíme větru do cesty. Lze proto říci, že největší vítr bude na otevřeném prostranství, nejčastěji na moři. Naopak nejmenší vítr budeme pozorovat v lese nebo ve městě, kde je hustota překážek podstatně větší a vítr nemá kudy volně proudit.

Analogicky lze odvodit, že s výškou nad terénem (nad překážkami) zpravidla rychlost proudění vzduchu stoupá. To zobrazuje následující obrázek.



Obr. 3: Vertikální profily rychlosti větru. [6]

Monitorováním a měřením rychlosti a směru větru v České republice se zabývá Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ). Rychlost a směr větru se dle standardu měří ve výšce 10 metrů nad povrchem a vyhodnocuje se jeho 15minutový průměr.

ČHMÚ zároveň zajišťuje systém preventivních výstrah, které jsou v případě hrozícího nebezpečí rozesílány na dotčené instituce a k potřebným společnostem, včetně energetických. V případě hrozících velkých nebezpečí lze díky těmto informacím škody značně minimalizovat a částečně jim předcházet.

K určení odhadu rychlosti větru podle jeho snadno pozorovatelných projevů na moři či na souši se také používá tzv. Beaufortova stupnice [3], která má dvanáct stupňů:

Stupeň	Vítr	Uzly	km.h ⁻¹	Na souši	Hladina moře	Výška vln v metrech
0	bezvětrí	< 1	< 1	kouř stoupá kolmo vzhůru	zrcadlo	< 0,03
1	vánek	1.3	1.5	směr větru lze poznat podle pohybu kouře.	vlnky	asi 0,03
2	větřík	4.6	6.11	listí stromů šelestí	světlejší hřebety vln	asi 0,13
3	slabý vítr	7.10	12.19	listy stromů a větvičky jsou v trvalém pohybu	lom vln	0,3 - 0,7
4	mírný vítr	11.16	20 - 28	vítr zvedá prach a útržky papíru	místa bílé hřebeny	0,6 - 1,2
5	čerstvý vítr	17 - 21	29 - 39	listnaté keře se začínají hýbat	nad vlnami vodní tříšť	1,2 - 2,4
6	silný vítr	22 - 27	40 - 49	telegrafní dráty sviští, používání deštníků je nesnadné	silná vodní tříšť	2,4 - 4

7	mírný vichr	28 - 33	50 - 61	chůze proti větru je obtížná, celé stromy se pohybují	bílá pěna na vlnách	4.6
8	čerstvý vichr	34 - 40	62 - 74	ulamují se větve, chůze proti větru je normálně nemožná	bílá pěna na vlnách	4.6
9	silný vichr	41 - 47	75 - 88	vítr strhává komíny, tašky a břidlice ze střech	vysoké rolující vlny	asi 6
10	plný vichr	48 - 55	89 - 102	vítr strhává komíny, tašky a břidlice ze střech	přepadající hřebenatky	6.9
11	vichřice	56 - 62	103 - 114	vítr působí rozsáhlá pustošení	vlny pokryté pěnou	> 14
12	orkán	> 62	> 117	ničivé účinky (vítr odnáší střechy, hýbe těžkými hmotami)	vlnobití, pěna ve vzduchu	> 14

Tab. 1: Beaufortova stupnice k určení rychlosti větru.

1.4 Energie a výkon větru

Kinetická energie E volně se pohybujícího tělesa o hmotnosti m , které se pohybuje rychlostí v je přímo úměrná hmotnosti m a druhé mocnině rychlosti v .

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

Po hmotnost vzduchu platí vztah (2), kde ρ je hustota vzduchu, V je objem, A je plocha a s je dráha, kterou urazí pohybující se vzduch.

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

Dosazením za hmotnost m ve vztahu (1) výraz z pravé strany rovnice (2) dostanu vzorec pro stanovení energie větru vanoucího plochou A . Je-li A v m^2 , ρ v kg/m^3 a v v m/s dostanu energii větru E v joulech [J].

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

Pro přepočítání na výkon větru P ve watttech [W] využiji známý vztah mezi P a E

$$P = \frac{E}{t} \quad (4)$$

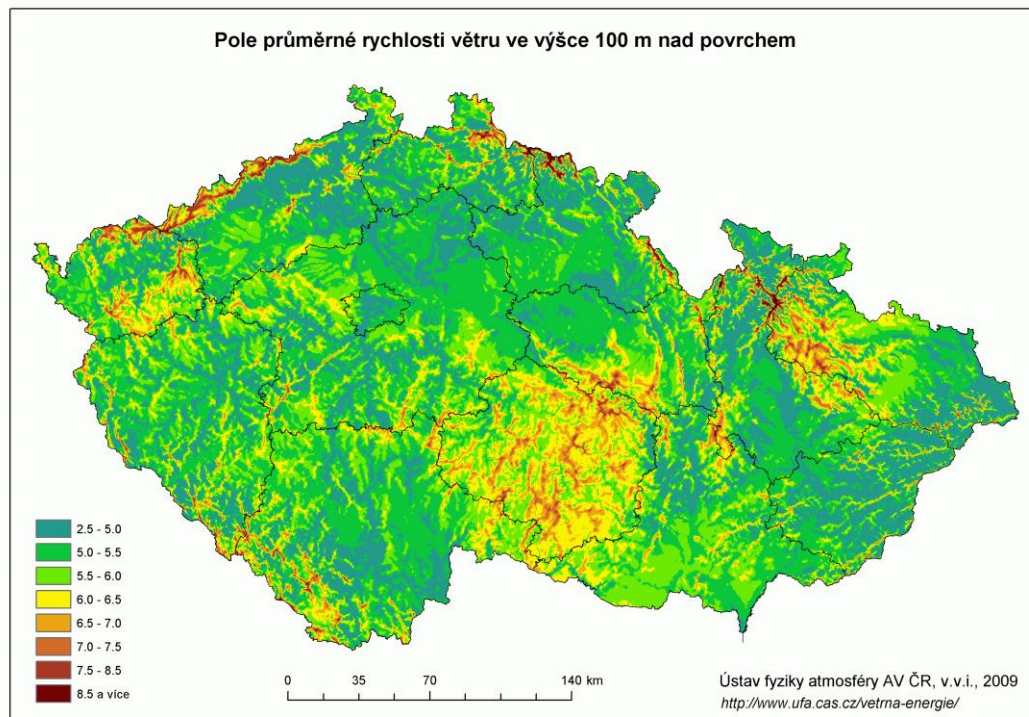
jehož úpravou následně získám vztah:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (5)$$

Vztah (3) nebo (5) vyjadřuje, že energie větru, resp. výkon větru, je přímo úměrný hustotě vzduchu a zároveň velmi citlivě reaguje na rychlost větru. Malá změna rychlosti větru způsobí velkou změnu energie větru, neboť energie větru roste s třetí mocninou jeho rychlosti. [4] To odůvodňuje potřebu velmi pečlivé volby umístění větrného motoru v krajině a také volby výšky pohonné jednotky větrného motoru nad zemským povrchem.

1.5 Větrná mapa

Při praktickém stanovení velikosti energie větru si mohu pomoci tím, že místo skutečných hodnot dosadím hodnoty dlouhodobého měřeného průměru (např. jeho měsíčního průměru) pro dané místo. Pro tento účel použiji tzv. větrnou mapu. [5]



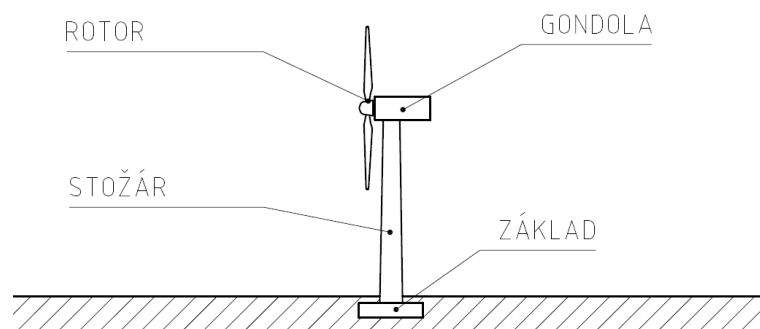
Obr. 4: Větrná mapa rychlosti větru v ČR. [5]

2 Fyzikální princip funkce větrné elektrárny

Elementární princip moderní větrné elektrárny [4] [6] spočívá v přeměně energie větru na energii elektrickou dodávanou do elektrizační soustavy. Působením větru na listy rotoru dochází prostřednictvím aerodynamických sil k otáčení rotoru, který je skrze převodový mechanismus a hřídel spojen s generátorem, ve kterém dochází k výrobě elektrické energie. Princip je tedy velmi podobný klasickým tepelným elektrárnám s tím rozdílem, že v tomto případě je prvotní energetický zdroj přírodní – vítr.

2.1 Hlavní části větrné elektrárny

Každá VtE se skládá ze čtyř částí, kterými jsou rotor, gondola, stožár a základ, který je velmi často skryt pod zemí nebo pod vodní hladinou a bývá opomínán. [7] [13]



Obr. 5: Hlavní části VtE.

2.1.1 Rotor

Rotor sám o sobě lze dále rozdělit na listy rotoru a rotorovou hlavu, ke které jsou jednotlivé listy uchyceny. Listy o délce desítek metrů bývají zpravidla tři navzájem o 120° posunuté. Tvar listů rotorů musí splňovat náročné aerodynamické vlastnosti, aby VtE vhodně plnila svůj účel. Listy musí být navrženy a vyrobeny tak, aby na jejich plochu mohla působit vztlaková síla větru podobně, jako tomu je u letadel a zároveň byly listy co nejlehčí a nejpevnější. Působením této síly dochází k otáčení celé rotorové hlavy a síla působící na listy rotoru se na ně rovnoměrně rozprostírá. Protože pro VtE je podstatné udržovat si kontaktní rychlost otáčení (úhlovou rychlost), jsou moderní větrné elektrárny vybaveny systémem natáčení listů rotoru vůči směru a rychlosti větru, čímž lze velmi efektivně regulovat absorpci větru a potažmo celý výkon elektrárny. Tato vlastnost je velmi podstatná i z hlediska bezpečnosti, neboť větrnou elektrárnu jako takovou lze provozovat jen za určitých povětrnostních

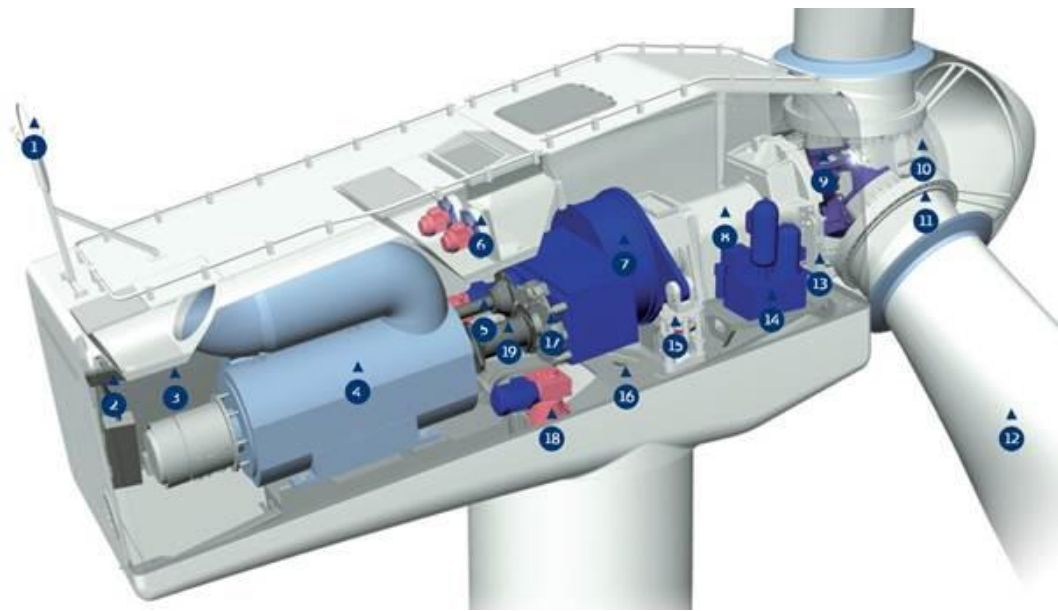
podmínek – nejčastěji se uvádí její spouštění při minimální větru o rychlosti 2 - 3 m/s a její odstavení při rychlosti větru 20 - 30 m/s. Systém natáčení listů rotoru nám tedy dává větší možnost regulace a v případech, kdy bychom VtE bez systému natáčení lopatek již museli odstavit, VtE s tímto systémem lze za jistých podmínek dále provozovat, čímž se prodlužuje doba, po kterou vyrábí elektřinu a stává se tak efektivnější. Pokud však dojde k překročení hranice výrobního maxima i za použití regulačních prvků, musí být elektrárna bezpečna zastavena a zabrzděna, aby nedošlo k jejímu poškození.

2.1.2 Gondola

Gondola v sobě ukrývá technicky nejsložitější a zároveň nejdůležitější část celé větrné elektrárny – strojovnu. Její základní funkcí je transformace krouticího momentu hlavní hřídele rotorové hlavy na vstupu až na samotnou elektrickou energii na výstupu. Ze strojovny je zároveň sledována a řízena veškerá činnost.

Jak bylo uvedeno výše, vítr narážející do listů rotorové hlavy vytváří díky aerodynamickému tvaru listů vzlakovou sílu působící na listy rotoru a dochází k rotačnímu pohybu celé rotorové hlavy, na kterou je pevně připojena hlavní rotorová hřídel. Tato hřídel ústí do převodové skříně, ve které jsou pomocí tzv. planetové převodovky nízké otáčky mnohonásobně zvětšeny (řádově 100krát vyšší) a vedeny dále přes výstupní hřídel do generátoru. Generátor představuje ústřední komponentu celé elektrárny, jelikož v něm dochází k samotné výrobě elektrické energie. Generátor je nejtěžší a největší komponentou ve strojovně. Na výstupu generátoru jsou transformátory, které převádějí vyrobené napětí na vyšší napěťovou hladinu, která je v místě připojení do elektrizační soustavy.

Mezi další komponenty strojovny patří ventilátory chlazení, mechanická kotoučová brzda, řada podpůrných systémů a řídicí elektroniky, která se stará o monitoring a chod elektrárny. VtE je samozřejmě vybavena systémem natáčení celé strojovny vůči směru větru tak, aby celková výkonnost byla co možná nejvyšší. Protože strojovna je zemí spojena silovými a datovými vodiči, musí být vybavena čidlem hlídající maximální možnou míru otočení tak, aby nedošlo ke zkroucení nebo poškození vodičů. Celá strojovna je přichycena k nosnému rámu, který je právě přes systém natáčení strojovny spojen se stožárem a na něm pevně usazen.



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

2.1.3 Stožár

Hlavním účelem stožáru je podepírat gondolu s rotorem při zachování dostatečné statické stability. Stožár musí odolat náporům větru, který neustále mění svoji velikost a směr. Je tedy podstatné, aby měl co nejlepší aerodynamické vlastnosti, co možná nejmenší odpor vzduchu a zároveň byl dostatečně pevný, aby celá konstrukce větrné elektrárny byla stabilní.

Jedním z hlavních znaků stožáru je jeho výška, která se nejčastěji pohybuje v rozmezí 40 - 110 m. Podle umístění větrné elektrárny je nutné ji vhodně zvolit. Na otevřeném prostranství, nejčastěji na moři, není například nutný tak vysoký stožár, potažmo celá větrná elektrárna, jako kdyby byla umístěna na pevnině. Statisticky je však ověřeno, že každý metr výšky stožáru větrné elektrárny v rozmezí 80 – 100 m znamená přírůstek 0,9 % k ročnímu vyrobenému množství elektřiny. Stožár VtE vysoký 160 m tak představuje zvýšení roční výroby elektrické energie o 35 – 45 % oproti 100 m stožáru. V těchto výškových hladinách je nárůst roční výroby na 1 m výšky stále asi 0,67 %.

U vnitrozemských VtE umístěných na pevnině rozlišují tři základní typy stožárů:

- **Ocelový tubusový stožár** (*Obr. 7*) je v Evropě nejrozšířenější typ. Jejich výška je zpravidla 40 – 105 m, výjimečně i více. Pro jednodušší přepravu se dělí na segmenty o délce cca 20 m. Segmenty jsou vyrobené z ocelových plátů, které jsou skruženy do prstenců a na místě instalace k sobě svařeny. Tloušťka oceli je řádově 12 mm u vrchu až 45 mm u paty stožáru.
- **Příhradový stožár** (*Obr. 8*) je konstruován ze standardních válcovaných L profilů, které jsou zároveň zinkovány. Svým vzhledem je velmi podobný stožárům vysokonapěťových linek nebo stožárům telekomunikačních společností. Ve srovnání s ocelovým tubusovým stožárem je na něj potřeba méně oceli. Tento typ stožáru se na VtE používá zejména v asijských zemích, nejvíce v Číně a Indii.
- **Betonové stožáry** (*Obr. 9*) jsou novou alternativou stavby stožárů. Staví se z prefabrikátů (betonových poloskruží), které se na místě kompletují do skruží a pro lepší pevnost jsou jejich dutinami vedena předepjatá ocelová lana od jeho vrcholu až k jeho patě.



Obr. 7 [38]



Obr. 8 [38]



Obr. 9 [38]

Volba vhodného typu stožáru VtE je vždy kompromisem mezi více faktory. Nejdůležitějším je zejména náročnost a cena dopravy materiálu na místo instalace vůči jejich instalaci samotné. Snadno se dopravuje materiál na příhradové stožáry, jelikož jejich montáž probíhá až na místě. Na druhou stranu je nutné na místo montáže dopravit větší počet pracovníků a strojů a celkově je nutné zajistit větší zázemí, než když menší tým zaměstnanců zkompletuje ocelové segmenty tubusového stožáru, které jsou již z výroby předpřipraveny. Z tohoto pohledu se uvádí, že ekonomicky rentabilní hranice příhradového stožáru je přibližně nad 100

m výšky. S každým dalším metrem výšky je pak tato volba ve srovnání s ostatními výhodnější. V případě použití betonových stožárů doporučuji mít nedaleko betonárku pro výrobu prefabrikovaných dílů – vyplatí se tedy v případě větrných parků o větším počtu elektráren. Dalším aspektem může být tvar a vzdušnost konstrukce stožáru. Ocelové tubusové a betonové stožáry jsou uzavřené stavby. Jejich vnitřek, technologie a zázemí jsou tak lépe chráněny proti povětrnostním vlivům i proti případným zlodějům nebo vandalům a lze je proto i lépe vybavit. Ve srovnání s příhradovým stožárem jsou ale dražší a kladou větru větší odpor, což je nutné brát v úvahu. V neposlední řadě je podstatné brát v potaz i krajinný ráz a uvažovat, jak bude daná konstrukce na místě vypadat, ačkoliv toto kritérium je velmi subjektivní. Pokud bychom stavěli VtE na odlehlém místě, zřejmě by nám nevadil příhradový stožár, který se v krajině při pohledu z dálky „utopí“. Naopak na místech snadno přístupných a viditelných volím klasický ocelový tubusový stožár, neboť působí s ostatními částmi elektrárny jednotněji, komplexněji a více jako čistá stavba.

2.1.4 Základ

Betonový základ VtE je její nezbytnou součástí. Protože celá stavba je na tomto základě umístěna, je nezbytné, aby byl dostatečně dimenzovaný, zejména po hmotnostní, statické a pevnostní stránce. Vzhledem k výšce VtE a jejímu profilu je absolutně nezbytné, aby nedošlo k žádnému vychýlení stavby od svislice, což by mohlo mít fatální následky. Proto je základ VtE nejtěžší částí celé elektrárny.

Pro názornost jsou uvedeny parametry VtE VESTAS V90:

- Rotor – průměr 90 m, hmotnost 38 t
- Gondola – hmotnost 68 t
- Stožár – ocelový tubus vysoký 105 m, hmotnost 225 t
- Základ – čtvercový základ (15,9 x 15,9 m), výška 1,8 - 2,0 m, spotřeba 500 m³ betonu, hmotnost celková 1 144 t

Betonový základ je nejčastěji čtvercových rozměrů, vyskytují se však i kruhový, případně jiný mnohostranný základ. Se stavbou základu se začíná na místě instalace již o několik týdnů dříve. Po provedení geologického průzkumu dochází ke zpevnění podloží, vylití malého množství základu, na který se následně na předem určené místo usadí ocelový fundament o hmotnosti řádově desítek tun. Připraví se armování tvaru základu kolem a včetně fundamentu a následně se celá stavba zalije betonem a nechá dostatečně vytvrdnout. Posledním krokem jsou pak ochranné a penetrační nátěry a zpětné osazení zeleně na místě stavby.



Obr. 10: Betonový armovaný základ VtE. [15]

2.2 Rozdělení větrných elektráren z hlediska výkonnosti

Výkon VtE [8] vypočítám podle vzorce

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

kde

P ... výkon větrné elektrárny [W],

ρ ... hustota vzduchu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],

v ... rychlost proudění vzduchu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

c_p ... účinnost stroje [-],

S ... plocha rotoru [m^2].

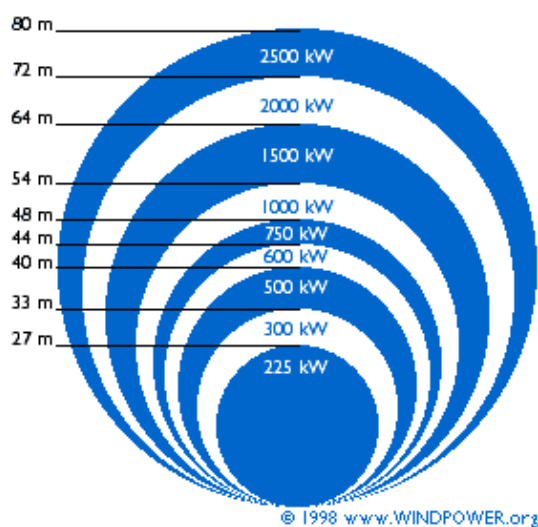
Podle výkonu mohu VtE rozdělit do tabulky:

Typ VtE	Výstupní výkon P_{out}	Výstupní napětí U_{out}	Instalace	Typické užití
Mikroelektrárny	10W - jednotky kW	12V /24V (MN)	pevná	experimentální, domácí
Malé VtE	Jednotky kW - 60kW	230V / 400V (NN)	pevná / otočná	napájení větších zařízení nebo stavení, provoz v ostrovním režimu
Střední VtE	60kW - 750 kW	6,3kV/22kV (VN)	otočná	napájení vesnic a malých měst, dodávka do sítě
Velké VtE	>750 kW - jednotky MW	6,3kV/22kV (VN)	otočná	dodávka elektřiny do sítě

Tab. 2: Výkonnostní dělení VtE.

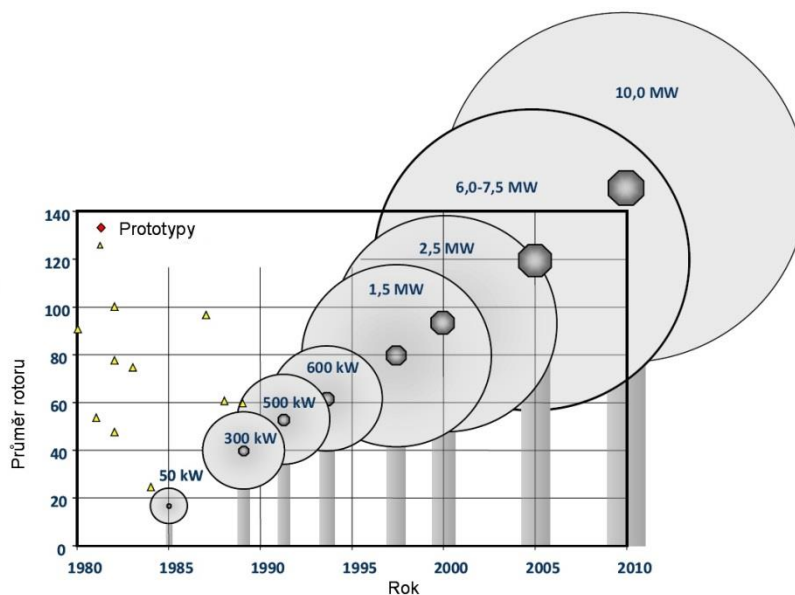
Z výše uvedeného vzorce (6), který je upravenou podobou obecného vzorce (5) pro výkon větru, usuzuji, že **celkový výkon je závislý na druhé mocnině plochy (průměru) rotoru**, jak také názorně ukazuje následující obrázek (uváděny jsou průměrné hodnoty výkonů, neboť

jednotliví výrobci mají různé účinnosti svých zařízení a z daného rotoru jsou schopni vytěžit jiná maxima).



Obr. 11: Závislost jmenovitého výkonu VtE na průměru rotoru. [8]

Tato skutečnost vede na již známý trend obecného zvětšování větrných elektráren v čase, jehož vývoj zobrazuje následující obrázek.



Obr. 12: Vývoj velikosti VtE v čase. [8]

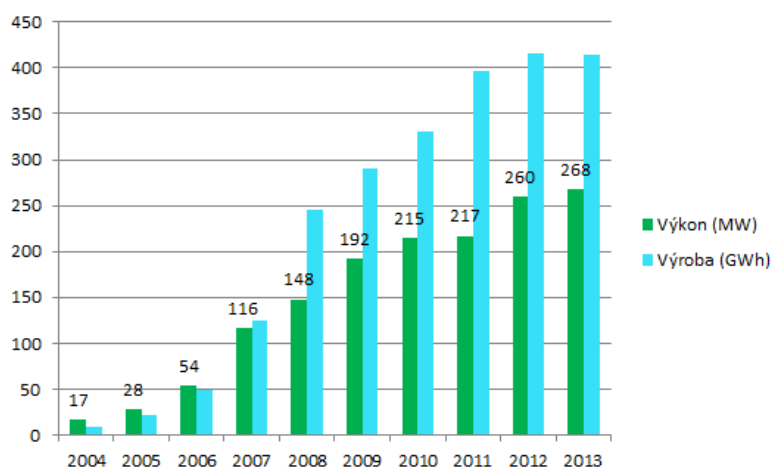
Tento trend je dán také faktorem plochy, která je pro danou novou větrnou elektrárnu vyhrazena. Zřít novou větrnou elektrárnu velkých rozměrů je administrativně velmi náročné a je nutný nespočet povolení a financí. Je proto logické, že každý investor má zájem na tom, aby daná větrná elektrárna měla co nejvyšší výkon, čímž z přidělené plochy vytěží maximum

elektrické energie a bude mít maximální ziskovost. Toho dosáhne právě tím, že bude stavět vyšší elektrárny s většími rotorovými listy, které pojmu podstatně více větrné energie. To vše samozřejmě s přihlédnutím k ekonomické stránce – každý investor staví tak, aby poměr cena/výkon byl ve výsledku co největší.

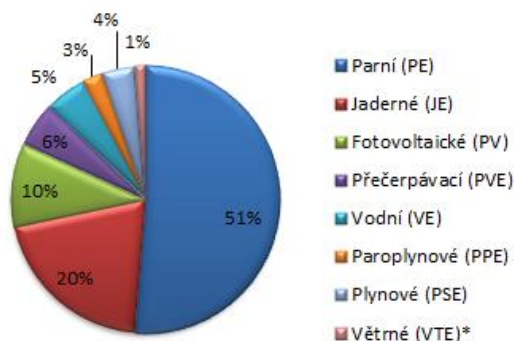
2.3 Statistiky připojených větrných elektráren a jejich výroby

Větrná energetika zažívá velmi dynamické období. Jejímú růstu napomáhá trend čistých energetických zdrojů, neboť o globálním oteplování a možné změně klimatu se hovoří stále více. Tím, že se společnosti snaží o ekologickou výrobu elektrické energie, je uplatnění větrných elektráren stále častější. Neustále tak roste počet nově připojených zdrojů a tím i celkový instalovaný výkon VtE. Navíc jde o technologii a postupy, které jsou již řadou let ověřené. Je samozřejmé, že ne v každé zemi je tento růst stejný, protože každá země má pro to jiné předpoklady, větrný potenciál. Trendy růstu větrných elektráren mohou sledovat například v měřítku národním [10], evropském [11] ale i celosvětovém [12].

V České republice byly do roku 2014 instalovány větrné elektrárny o celkovém výkonu 283 MW. Nejvíce z nich je umístěno v ústeckém kraji (86,8 MW), karlovarském kraji (51,8 MW) a olomouckém kraji (42,6 MW). Instalují se zejména VtE od výrobců Vestas (100,4 MW) nebo Enercon (81,9 MW).

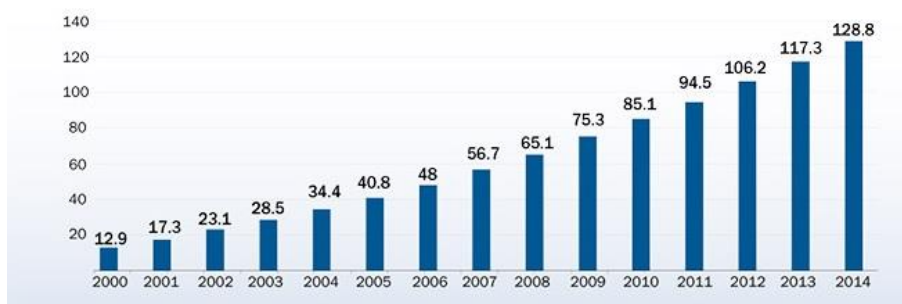


Obr. 13: Instalovaný výkon VtE v ČR [MW]. [10]



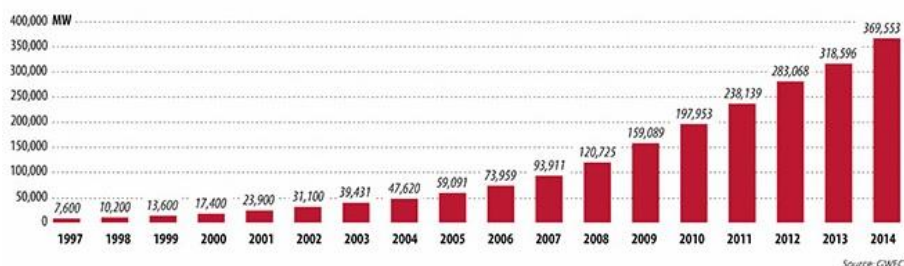
Obr. 14: Energetický mix v ČR v % pro rok 2013. [10]

V Evropské unii (EU) je aktuálně instalováno 128,8 GW ve větrné energii, z toho přibližně 120,6 GW v onshore (pevninských) a přes 8 GW v offshore (mořských) instalacích. Tato kapacita odpovídá roční produkci 284 TWh elektřiny, což pokrývá poptávku 10,2 % celkové spotřeby v zemích EU.



Obr. 15: Instalovaný výkon VtE v EU [GW]. [11]

Celosvětový instalovaný výkon VtE je 369,553 GW, což odpovídá 2,5 % podílu na celkové celosvětové produkci elektrické energie. Největší přírůstek v instalacích VtE byl právě v roce 2014, kdy bylo nainstalováno 51,477 GW nových výrobních kapacit, jak zveřejnila Světová rada pro větrnou energetiku (GWEC, z anglického Global Wind Energy Council).



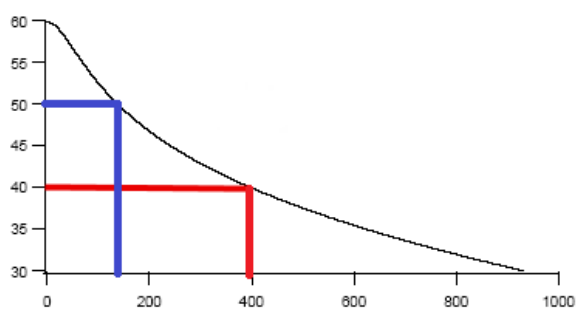
Obr. 16: Celosvětový instalovaný výkon VtE [GW]. [12]

2.4 Ekologické aspekty větrných elektráren

Ekologie každé nové stavby nebo nového zařízení je vždy velmi diskutována. Nejinak je tomu i v případě větrných elektráren. Z principu jsou z ekologického hlediska samy o sobě správnou volbou. Je však třeba vyřešit některé nepříjemné vlivy, které mohou během jejího provozu nebo její výstavbou nastat. [4] [9]

Zřejmě nejpodstatnějším z nich je umístění samotné větrné elektrárny. Vždy je nutné jednat o jejím umístění tak, aby krajinný ráz narušila co možná nejméně, avšak na dostatečně větrném místě, aby byla výstavba smysluplná a efektivní. Proto se větrné elektrárny umísťují ideálně mimo osídlené oblasti, kde jsou i dobré větrné podmínky (nejčastěji pole, mýtiny, vrcholky kopců).

Dalším aspektem je hluk, který větrná elektrárna produkuje. Jde o aerodynamický zvuk (svist) vznikající třením vzduchu o lopatky rotoru. V těsné blízkosti může být tento hluk pro člověka dlouhodobě velmi nepříjemný. S postupnou modernizací turbín a vylepšováním aerodynamiky rotorových listů však tento aspekt pozbývá významu. Přesto jsou stanoveny a sledovány hlukové normy (v ČR přes den max. 50 dB, v noci max. 40 dB) a při jejich překročení je provozovatel povinen zjednat nápravu, nejčastěji snížit otáčky turbíny nebo provoz zcela zastavit. Závislost hladiny zvuku na vzdálenosti od větrné elektrárny popisuje následující křivka.



Obr. 17: Typická křivka závislosti hlukové hladiny [dB] větrného zdroje na vzdálenosti [m] (s vyznačenými hygienickými hranicemi).

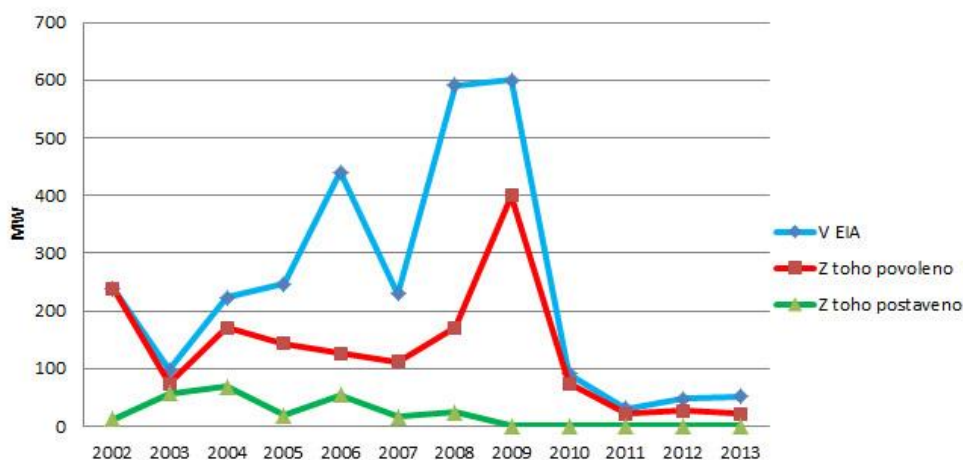
Často se také diskutuje o vlivu větrné elektrárny na místní faunu, zejména na ptactvo. Vzhledem ke skutečnosti, že větrné elektrárny se záměrně umísťují mimo dosah častých výskytů ptactva a jejich tažných cest, je tento vliv zcela minimalizován. Mnohé studie již shodně stanovily, že na každých 10 tisíc ptáků, které proletí přes větrnou farmu, dojde

přibližně pouze k jedné smrtelné kolizi. Při jisté toleranci tedy lze tento vliv považovat za zanedbatelný. Výzkumy zároveň prokázaly, že větrné elektrárny nemají vliv ani na místní zvěř. Zvířata si na její provoz zvyknou a adaptují se, takže je provoz VtE neruší. Běžně lze tedy v blízkosti VtE chovat skot a provozovat zemědělství.

Specifikem jsou obavy ze vzniku infrazvuku a ultrazvuku. V tomto případě nejčastěji dochází, vlivem neznalosti fakt, k nesprávné záměně právě s běžným aerodynamickým hlukem větrné elektrárny vznikající otáčením jejich lopatek. V žádném případě se však nejedná o zvuky o specificky nízkých nebo vysokých frekvencích, ale jde o běžný hluk (svist) popsany výše.

Dalším podstatným faktorem je způsob, jakým bude větrná elektrárna nainstalována, servisována a po skončení její životnosti také zlikvidována. Je logické, že lidé žijící v místě budoucí stavby větrné elektrárny mají zájem na tom, aby stavba proběhla co nejrychleji, nejekologičtěji a aby nebyli podstatnou měrou omezeni. A to jak nyní, tak v budoucnu.

Aby byly výše uvedené rizikové aspekty odstraněny nebo alespoň dostatečně minimalizovány, musí být pro každou novou potenciální výstavbu větrné elektrárny zpracována ekologická studie. Tyto studie jsou následně schvalovány v rámci tzv. procesu vyhodnocení vlivů na životní prostředí (EIA [14], z anglického Environmental Impact Assessment), jehož cílem je získat představu o výsledném vlivu stavby na životní prostředí a obyvatelstvo a určit, zda je výstavba vyhovující či nikoliv. Tento schvalovací proces upravuje zákon č. 100/2001 Sb. o posuzování vlivů na životní prostředí.



Obr. 18: Projekty v ČR vstupující do EIA, poměr jejich schválení a výstavby. [14]

3 Technická řešení plovoucí větrné elektrárny

Prvotní myšlenka umístění VtE na moře místo na pevninu je skoro stejně stará, jako první jednotky o výkonu několika kW. Ale až v posledních letech je tato myšlenka díky zkušenostem, které máme se stavbou klasických pevninských VtE, uváděna do praxe. Protože plovoucí VtE jsou schopny skvěle využít výborných větrných podmínek na moři a přitom eliminují mnohé zápory, které jsou pevninským VtE občas vyčítány, zažívá tento obor velký zájem investorů, velmi dynamicky roste celé odvětví a plovoucí VtE se staly další etapou vývoje tohoto odvětví. Jejich potenciál je navíc pro naše potřeby nevyčerpatelný a i vzhledem k současnému trendu si myslím, že jejich rozvoj bude i nadále pokračovat.

3.1 Názvosloví větrných elektráren

Názvosloví používané v tomto oboru není vždy mezi veřejností zcela jednotné. Nicméně ze samotného překladu z angličtiny vyplývá, že **offshore** VtE jsou umístěny mimo pevninu (off = mimo, shore = pevnina) a **onshore** jsou umístěny na pevnině (on = na, tzn. klasické vnitrozemské VtE, viz předchozí kapitola).

Z pohledu umístění na moři lze offshore VtE dále rozdělit na pobřežní (přímořské) neboli „do mělké vody“ (**nearshore**) a na mořské neboli „do hluboké vody“ (**deep offshore**).

Většinou platí, že pobřežní (nearshore) VtE jsou umístěny do hloubky maximálně 50 metrů, s mořským dnem jsou spojeny pevnou konstrukcí a jsou umístěny řádově do několika kilometrů od pobřeží. Jsou tedy viditelné z pobřeží, čímž přinášejí jen částečné řešení negativních faktorů větrné energetiky (kapitola 2.4). Svým způsobem jsou mezikrokem mezi onshorovou a plně plovoucí deep offshorovou VtE. Většinou jde původem o prototypové instalace, na kterých lze, vzhledem k umístění, snadněji sledovat a aplikovat nové poznatky z vývoje.

Naopak VtE do hluboké vody (deep offshore), jak již název napovídá, jsou umístěny v hloubce od 50 metrů až do stovek metrů, se dnem nejsou spojeny pevnou konstrukcí a jsou tedy plně plovoucími objekty kotvenými řádově desítky kilometrů od pobřeží. Díky tomu nejsou viditelné z pobřeží, ale prakticky jen z lodí nebo letadel, čímž eliminují většinu negativních faktorů VtE. Tyto instalace jsou aktuálním produktem vývoje. Musí být ale

předem známo, jak se budou chovat na moři, jsou jasně definovány jejich parametry a musejí splňovat přísné podmínky provozu a samozřejmě být i dostatečně efektivní ve výrobě elektrické energie.

3.2 Základní vlastnosti a odlišnosti

Základní princip výroby elektrické energie se od pevninských VtE neliší. Prvotním energetickým zdrojem je i nadále vítr, jehož kinetickou energii opět elektrárna zachytává pomocí rotorových listů, mění ji na rotační pohyb na hřídeli, pomocí které vzniká elektrická energie v generátoru.

Podstatné je však umístění VtE, resp. využití potenciálu mořského větru. Jak jsem uvedl výše, stěžejním faktorem je drsnost terénu. Protože na moři je drsnost terénu menší než na pevnině, má mořský vítr v přízemní vrstvě podstatně lepší parametry, zejména rychlost. A protože platí, že energie větru roste se třetí mocninou jeho rychlosti, roste tím i celková výroba činného výkonu a lze tak ze stejné větrné elektrárny vytěžit více energie, než by tomu bylo na pevnině - nejčastěji se udává nárůst kolem 50 %.

Pokud VtE umístím na moře dostatečně daleko od osídlených oblastí, odpadne tím i řada protiargumentů (kapitola 2.4), zejména možnost rušení krajinného rázu nebo nadměrného hluku ovlivňujícího okolí. Neznamena to však, že jsem tyto neduhy odstranil (možná jen částečně), ale prakticky jsem je pouze přesunul stranou, kde tolik nevadí.

3.3 Konstrukční a technické výzvy

Při srovnání offshore a onshore VtE zjišťuji, že mají mnoho společného a zároveň se liší v mnoha faktorech. Co mohu považovat za stejné, jsou rotor, gondola a stožár, tedy „vrchní“ (viditelnou) část elektrárny a lze tak na ni aplikovat předchozí poznatky. Naopak tím, že elektrárnu umístím na moře, se musí lišit její základ a celkově se musí počítat s faktem, že bude provozována na nepevném podloží za velmi nepříznivých podmínek a přesto musí odolat všem vlivům (platí zejména v případě deep offshore elektráren, které uvažuji v této kapitole).

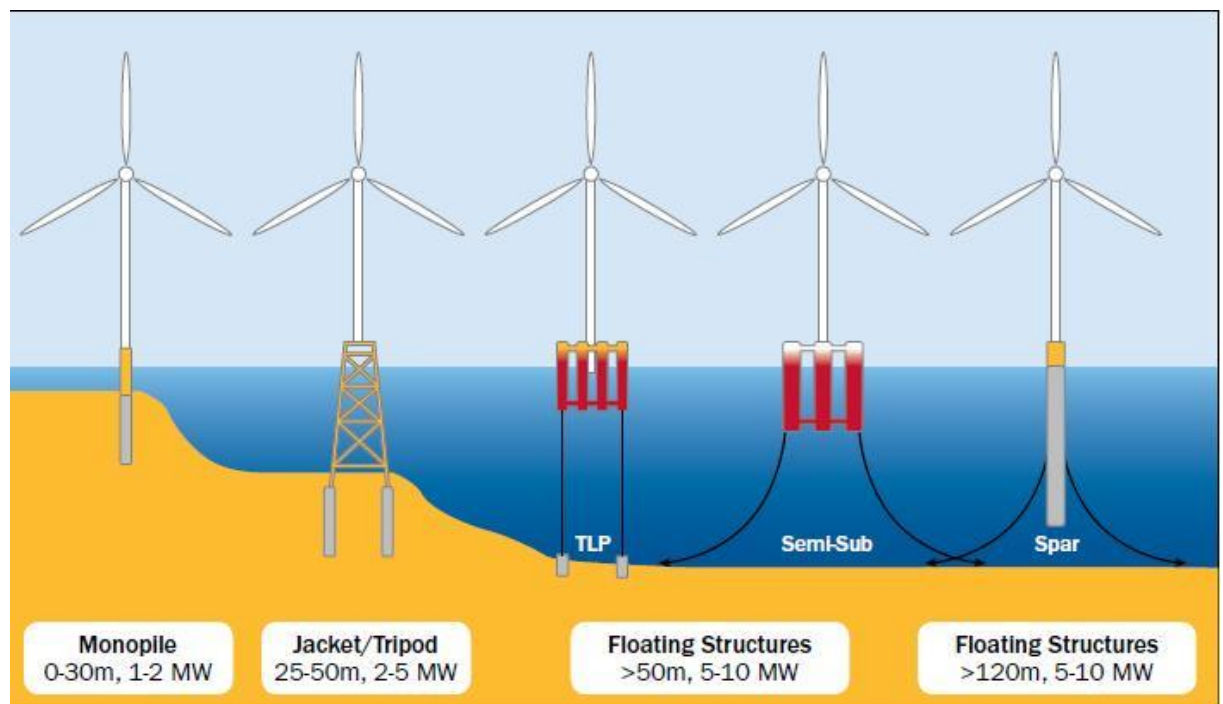
3.3.1 Projekt a matematické modely

Jako při každém novém projektu a stavbě, i zde platí, že správné rozhodnutí a rozmyšlení stavby na jejím začátku jsou naprosto klíčové. Doporučuji se zaměřit a důsledně řešit zejména:

- nalezení vhodné lokality (rychlost a směr větru, hloubka vody, pevnost zemského dna, majetkoprávní vztahy)
- sledování, měření a analýza budoucího místa stavby (vlivy mořských proudů)
- vhodné zvolení výkonu větrné elektrárny
- matematické prognózy a výpočty chování stavby
- praktické zkoušení v laboratořích na modelových případech
- vytvoření veškeré projektové dokumentace a vyřízení administrativy
- ekonomická bilance rentability projektu
- schválení v procesu EIA

Pokud některý z výše uvedených bodů (nemusí přesně odpovídat pořadí) nebude splněn, je to pro mne jasným negativním signálem, že je nutné projekt zastavit a přepracovat. Pokud bych chybu ignoroval a ve stavbě pokračoval, mohla by mne stát v budoucnu likvidační částky na její nápravu, ne-li lidské životy.

3.3.2 Základ a jeho stabilita



Obr. 19: Typy základů pro mořské VtE. [17]

Na obrázku výše uvádím nejčastější typy základů pro mořské VtE, které se též v tomto případě nazývají „plošiny“. Je patrné, že typy Monopile a Jacket/Tripod (česky příhradový stožár) jsou se dnem spojeny pevnou konstrukcí a jsou omezeny hloubkou 50 m. Tyto typy se používají u nearshore (pobřežních) větrných elektráren a nejedná se tedy o plovoucí objekty. Plně plovoucími objekty jsou struktury TLP, Semi-Sub a Spar, které jsou určeny pro hloubky od 50 m a ke dnu jsou kotveny lany. Tyto plošiny vycházejí z koncepce základů pro těžbu ropy a zemního plynu.

Tension-leg platform (TLP)

- vertikálně ukotvená plovoucí konstrukce
- vhodná pro vodní hloubky 300 – 1 500 m
- používá se pro pobřežní těžbu ropy nebo zemního plynu, po určité úpravě byla navržena i pro větrné elektrárny

Semi-submersible (Semi-sub)

- používají se od hloubek 120 m
- mají plně regulovatelný ponor a tím i stabilitu
- některé i s vlastním pohonem, ostatní se na místo přetahují loděmi
- používají se při těžbě ropy na moři

Spar – buoy

- používají se od hloubek 120 m
- vysoká, kulatá a úzká základna plující ve svislé poloze
- malá vodní rovinná plocha
- velká hmotnost

Kotvení, nezávisle na druhu plošiny, musí být natolik pevné, aby udrželo celou větrnou elektrárnu stále ve svislé poloze na předem určeném místě (pracuje tak proti vztlakové síle působící na základ) a aby nemohlo dojít k jejímu otočení kolem svislé osy (překroučení). Proto tato kotevní lana mají tloušťku až několik metrů, musejí odolávat extrémním silám v tahu, velkému namáhání a v neposlední řadě i korozi. Do dna se „zavrtávají“ pomocí speciálních přístrojů až do hloubky několika desítek metrů (v závislosti na výšce elektrárny a hloubce moře v místě). Aby se minimalizovalo riziko vytržení kotevního lana z mořského dna, provádí se většinou ještě zpevnění kotevního bodu. Všechny součásti offshore VtE, zejména ty, které se nacházejí pod hladinou moře, musí být dostatečně ošetřeny, aby měly dobrou dlouhodobou odolnost proti účinkům slané mořské vody. Samozřejmě jsou tyto podstatné vlastnosti monitorovány a pravidelně kontrolovány. [17] [18]

3.3.3 Doprava a montáž

Protože podmínky pro instalaci VtE na moři jsou často velmi nepříznivé až extrémní, musejí je provádět specializované firmy, což zvyšuje cenu stavby. Proto je důležité, abychom maximum možných prací provedli ještě na pevnině a na místo instalace dopravili pokud možno celý celek a na místě se provedli jen nezbytné práce. To je možné zejména v případě plně plovoucích offshore elektráren, které lze prakticky celé sestavit v suchém doku, který se následně zaplaví vodou a elektrárna začne plout na hladině. Následně je možné ji nebo její největší část odtáhnout pomocí tažných lodí na předem určené místo, kde bude přikotvena k mořskému dnu a připojena do sítě.



Obr. 20: Plovoucí VtE u pobřeží Fukušimy (Japonsko) je tažena na místo určení. [17]

V případě nearshore (pobřežních) větrných elektráren nelze celou stavbu zhotovit na pevnině. Protože základ je vždy pevně spojen s mořským dnem, zvláště se připravuje instalace těchto základů na mořské dno tak, aby fundament budoucí větrné elektrárny byl v dostatečné výšce nad hladinou. Na souši se většinou připraví kompletní rotorová hlava s listy, gondola a stožár. Tyto tři části pak specializovaná loď odveze na místo určení, kde se všechny čtyři části elektrárny smontují v celek. Sestavená větrná elektrárna se pak připojí do energetické sítě.

Jedním z těchto specializovaných plavidel je instalační loď Seajacks Zaratan (obr. 21). Loď má vysoký jeřáb a čtyři hydraulické nohy o délce až 85 m, které umožňují nadzvednout loď z vody a stabilizovat tak její polohu při instalaci největších větrných elektráren.



Obr. 21: Instalační loď Seajacks Zaratan kompletuje pobřežní větrnou elektrárnu. [39]

3.3.4 Připojení do sítě

Tuto problematiku blíže popíší v kapitole 4, která je na ni zaměřena.

3.3.5 Provoz, řízení a údržba

Během provozu plovoucí větrné elektrárny je žádoucí minimalizovat úkony, které je nutné provádět fyzicky přímo na místě. Tím, že je zařízení nesnadno přístupné, je vhodné, aby tato zařízení proto byla maximálně automatizována za podmínky, že všechny důležité parametry mohou sledovat a upravovat vzdáleně. Potřebují proto zajistit stabilní (i náhradní) spojení s plošinou, aby její vzdálená správa a monitoring mohly být kontinuální. Protože ne všechny servisní úkony mohou provést vzdáleně, musí být na servis těchto zařízení vyčleněna skupina techniků, kteří se na danou problematiku při práci v těchto podmínkách specializují. Nadále platí, že v rámci již nutného servisu by mělo být provedeno maximum prací a preventivních opatření, aby se minimalizovalo riziko dalších servisních zásahů.

3.3.6 Likvidace

Jak jsem uvedl v kapitole 2.4, nedílnou součástí každé plánované výstavby plovoucí větrné elektrárny je její detailní projektová dokumentace včetně ekologické studie. V té musí být jasně uvedeno, jaký ekologický dopad bude zařízení mít, včetně způsobu, jakým bude zařízení po skončení své životnosti ekologicky zlikvidováno. Vše musí být schváleno v rámci procesu EIA [14].

V současné době se při likvidaci VtE zpracovává betonový fundament na drť, která se využívá především při silniční výstavbě. Kov z tubusu se vrací do výrobního procesu v ocelárnách. Generátor a pohon se obvykle použijí na náhradní díly.

Specifickou činností pak bude likvidace mořských VtE zapuštěných do mořského dna. Jisté však je, že bude finančně mnohem nákladnější, než obdobná likvidace pevninských VtE. Stávající koncepce navíc předpokládá, že piloty, zapuštěné do mořského dna, z něj budou při demontáži elektrárny vyříznuty pouze do hloubky dvou metrů pod povrchem dna. Zda koroze zbytků oceli, které v mořském dně zůstanou, nebude ekologicky závadná a nevyžádá si nakonec kompletní odstranění, není v současnosti nikdo schopen odhadnout. [19]

V případě plně plovoucích VtE by naopak náklady na likvidaci nemusely být výrazně vyšší, neboť takovou VtE lze zpětně odtáhnout do suchého doku, ve kterém bude zlikvidována stejně, jako jiná pevninská VtE a za téměř stejné náklady.

Vzhledem k projektovaným životnostem VtE kolem 25 let a faktu, že rozvoj této oblasti ve větší míře je otázka zejména posledních 15 let, nemají odborníci zatím v této oblasti tolik zkušeností a do jisté míry se tyto postupy aktuálně plánují.

4 Integrace plovoucí větrné elektrárny do energetické soustavy

Abychom mohli každý nový elektrický zdroj efektivně využívat v rámci elektrizační soustavy, je nutné jej do ní vhodným způsobem připojit. Určujícími faktory pak jsou vzdálenost elektrického zdroje (v našem případě plovoucí větrné elektrárny) do místa připojení elektrizační soustavy a stávající provozní podmínky v tomto místě připojení. Protože z principu jsou plovoucí větrné elektrárny umístěny ve vzdálenosti několika desítek kilometrů od pobřeží, používá se pro přenos vyrobené elektřiny vysoké nebo velmi vysoké napětí, které vykazuje menší přenosové ztráty. Nejčastěji se využívá přenos pomocí střídavého napětí, které je i v běžných elektrizačních soustavách a je proto jednodušší připojení tohoto nového zdroje do sítě. Střídavý proud mění podle svojí frekvence neustále směr toku proudu v obvodu. V současnosti se však investoři a provozovatelé vracejí k modernizovanému přenosu pomocí stejnosměrného proudu, který vykazuje ještě menší přenosové ztráty a s rostoucí délkou vedení pak roste efektivita tohoto typu přenosu. V tomto stejnosměrném obvodu teče proud vždy stejným směrem, případně se jen mění jeho velikost. Podstatné informace o vysokonapětovém přenosu popíši dále v této kapitole.

4.1 Teorie vysokonapětového přenosu a ztrát

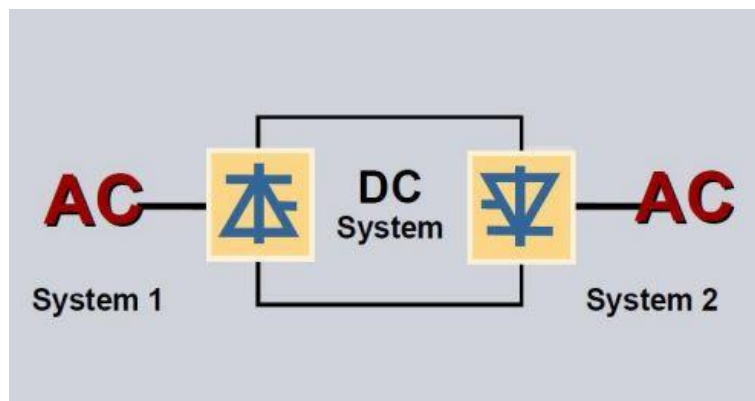
Hlavním důvodem používání vysokonapětových přenosů je eliminace ztrát při přenosu. Podle vzorce $Q = R \cdot I^2 \cdot t$ platí, že průchodem elektrického proudu I v čase t se každý vodič zahřívá, vodič klade odpor R a část elektrické energie se proto změní na teplo Q . Velikost těchto tepelných ztrát Q závisí nejen na odporu vodiče, ale zejména na druhé mocnině procházejícího proudu. Protože v našem případě je R a t prakticky konstantní, je pro snížení ztrát nutné snížit procházející proud I (snížením velikosti proudu na polovinu se sníží tepelné ztráty na čtvrtinu). Aby však došlo k přenesení stejného (požadovaného) množství elektrického výkonu dle vzorce $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$, je nutné zvýšit přenosové napětí.

4.2 HVDC technologie pro přenos energie na pevninu

HVDC (z anglického High-Voltage Direct Current) [20] [21] technologie byla vyvinuta pro přenos stejnosměrného proudu velmi vysokého napětí na dlouhou vzdálenost (300 – 1 400 km), nejčastěji pomocí visutých nadzemních nebo podzemních vodičů nebo prostřednictvím podmořských kabelů. Tato technologie se komerčně využívá od roku 1954, kdy byla

představena firmou ABB. Společnost ABB následně představila i odlehčenou verzi, tzv. HVDC Light (pro vzdálenosti od desítek km do cca 300 km), která slouží pro malé a středně velké přenosy elektrické energie a je velmi často použita nejen pro připojení offshorových větrných farem do elektrizační soustavy.

Princip činnosti spočívá v usměrnění vyrobeného střídavého napětí (AC) na vstupu na napětí stejnosměrné (DC), které je transportováno přenosovým vedením na jeho výstup, kde je zpětně převedeno na napětí střídavé (AC). Celý proces přehledně znázorňuje obrázek 22.



Obr. 22: Zjednodušené schéma HVDC technologie. [40]

Podle způsobu transformace a přenosu elektrické energie mohou HVDC technologie dělit na:

- monopolární
- bipolární
- back to back systém
- systém s více terminály

Každá z výše uvedených konfigurací má charakteristické užití a s ním i související náklady na provoz a výstavbu stejnosměrné přenosové sítě. Podle budoucího umístění HVDC linky musím zvolit vhodnou variantu.

Výhody HVDC přenosu jsou:

- stejnosměrné vedení umožňuje přenos výkonu mezi střídavými sítěmi o různých frekvencích nebo sítích, které z jiných důvodů nelze přiřazovat
- indukční a kapacitní jevy platící pro přenos střídavým napětím jsou zde eliminovány, není proto omezena přenosová kapacita ani délka kabelu
- neexistuje jev zhuštěného povrchového proudu, průřez vodičů je plně využit pro přenos
- pro přenos je nutný menší počet vodičů, v případě nadzemního vedení stačí konstrukčně jednodušší stožáry, odpadají problémy s dodržením a údržbou

ochranného pásma (zejména v případě podmořských kabelů)

Nejčastější aplikace HVDC přenosu:

- dodávka elektřiny do vzdálených měst a odlehlých míst na pevnině (páteří linky dlouhých vedení)
- připojení a dodávka vyrobené elektrické energie z větrných mořských farem do elektrizační soustavy, zásobování elektřinou těžebního a ropného průmyslu na moři (podmořský přenos)
- přenos energie pod povrchem
- připojení střídavých linek různé frekvence

Nejvýznamnější HVDC projekty ve světě:

Název	Stanice 1	Stanice 2	Délka [km]	U [kV]	P [MW]
Gezhouba - Shangai	Čína - Gezhouba	Čína - Nan Qiao	1046	500	1200
Ekibastuz - Tambov	Kazachstán - Ekibastuz	Rusko - Tambov	2414	750	6000
Xiangjiaba - Shanghai	Čína - Fulong	Čína - Fengxia	1980	800	6400
Yunnan - Guangdong	Čína - Yunnan	Čína - Zengcheng	1418	800	5000
North - East Agra	Indie - Mundra	Indie - Biswanath	1728	800	6000
Skagerrak 4	Norsko - Kristiansand	Dánsko - Tjele	244	500	700
Nelson River Bipole 1	Kanada - Gilam	Kanada - Rosser	1835	500	1000
Rio Madeira	Brazílie - Porto Velho	Brazílie - Araraquara	2375	600	7100

Tab. 3: HVDC projekty ve světě.



Obr. 23: HVDC linky v Evropě [40]
(červené - existující, zelené - ve výstavbě, modré - navrhované)

4.3 HVAC technologie pro rozvod energie dále do vnitrozemí

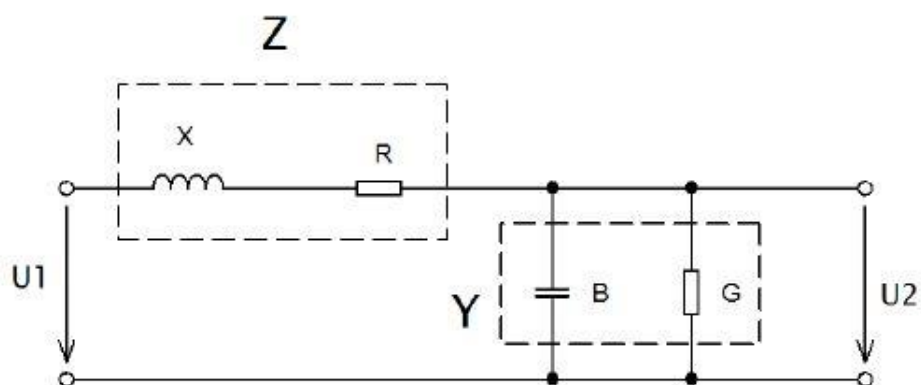
HVAC (z anglického High-Voltage Alternating Current) [22] technologie se běžně používá pro přenos vysokonapětového střídavého proudu. Jde o klasický rozvod elektrické energie pomocí střídaného napětí a proudu určité frekvence (nejčastěji 50 nebo 60 Hz, příp. jiných). V závislosti na frekvenci napětí se neustále mění směr proudu v obvodu. Proto se též nazývá harmonický proud a napětí. Využívá se nejen v České republice, ale v mnoha dalších, nejen evropských zemích.

Zásadní výhody střídavého proudu (ve srovnání se stejnosměrným) jsou:

- jednodušší průmyslová výroba a distribuce
- generátory střídavého proudu nepoužívají komutátory, jsou proto konstrukčně jednodušší na výrobu a následnou údržbu
- pomocí transformátorů lze snadno měnit napětí na požadovanou úroveň
- konstrukčně menší silové součástky (odpínače, chrániče apod.)

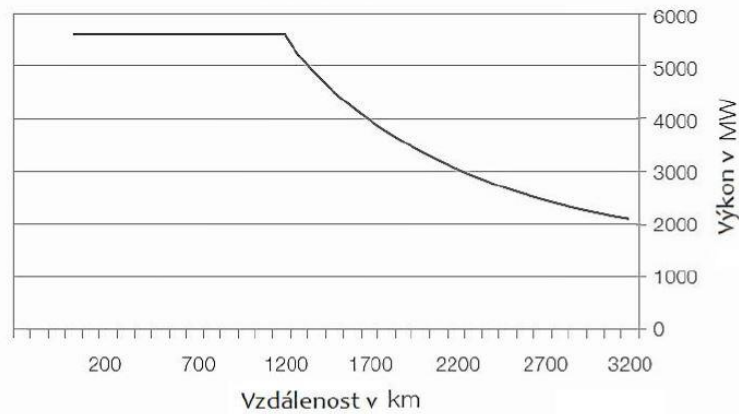
Podstatné nevýhody střídavého proudu (ve srovnání se stejnosměrným) naopak jsou:

- nutnost plně synchronizovat všechny elektrické generátory v síti
- nutnost vyvažovat nejen toky činného výkonu, ale i jalového
- některé silové součástky jsou konstrukčně složitější, větší a dražší
- vliv rozložení příčných a podélných parametrů na přenosové vedení:
 - podélná impedance ($Z = R + jX$ [Ω ; Ω ; Ω])
 - indukční reaktance ($X = 2 * \pi * f * L$ [Ω ; Hz; H])
 - příčná admittance ($Y = G + jB$ [S; S; Ω])
 - kapacitní susceptance ($B = 2 * \pi * f * C$ [S; Hz; F])



Obr. 24: Model vedení s jeho charakteristickými parametry.

Z pohledu přenosu elektrické energie a výkonu na větší vzdálenost jsou proto limitními ukazateli zejména podélné parametry vedení, které s rostoucí délkou vedení snižují jeho přenosovou a kapacitní schopnost:



Obr. 25: Přenosová schopnost vedení při 1000 kV AC.

Přes některé své nevýhody, ztráty během přenosu a nutnou kompenzaci, je stále harmonická elektrizační soustava naším primárním přenosovým a distribučním médiem. Stále se dle mého názoru jedná a ověřenou a funkční soustavu, která je de facto celosvětově, ač o různých frekvencích, zavedena již mnoho let a nelze tak předpokládat její obměnu v blízké budoucnosti.

Vzhledem k charakteru a vlastnostem stejnosměrného a střídavého proudu však mohu říci, že v současné době má zřejmě největší smysl rozvod střídavého proudu po pevnině v kombinaci se stejnosměrným proudovým podmořským spojením na velké vzdálenosti. Tuto domněnku potvrzuje i skutečnost, že převážná většina stejnosměrných sítí slouží pro podmořské spojení oblastí, států nebo kontinentů. Vznik rozsáhlých stejnosměrných sítí na pevnině lze očekávat zatím jen u experimentálních nebo speciálních projektů, u nichž je stejnosměrný proud zřejmým přínosem, nikoliv však v běžném užití.

4.4 Kvalita elektrické energie

Nejčastěji se VtE vzhledem k provozované napěťové hladině připojují do distribučních soustav (6,5 – 110 kV), výjimečně do soustav přenosových (110 kV a více – zejména v zahraničí). Každá VtE před připojením do elektrizační soustavy prochází podrobnou kontrolou na jakost vyrobené elektrické energie a na kontrolu vzájemných vlivů VtE a soustavy. Určujícím místem pro vyhodnocení kvalitativních parametrů vyrobené elektřiny je předávací místo, kde se VtE (nezávisle na typu) připojuje do místní energetické soustavy. [23]

Jednotlivé charakteristiky napětí elektřiny, popisující kvalitu elektřiny pro hladinu napětí 110 kV a předávací místa přenosové nebo distribuční soustavy, jsou:

- kmitočet sítě
- harmonická a meziharmonická napětí
- rychlé změny napětí
 - velikost
 - míra vjemu flikru
- vlivy napájecího napětí
 - velikost a odchylky
 - krátkodobé poklesy
 - přerušení
 - nesymetrie
 - úrovně napětí signálů

4.5 Kvalitativní a ochranné prvky VtE

Pro **omezení vyšších harmonických**, které nejčastěji produkuje polovodičový spouštěč nebo měnič kmitočtu, se VtE doplňuje o filtrační členy (kapacitory a induktory v sérii) volené tak, aby pro případné frekvence harmonických způsobovaly zkrat a vyrušily je.

Výpadek napájecí sítě (napájecího napětí) je považován za běžný stav. V daný moment musíme VtE automaticky odpojit od soustavy, neboť se ztrátou napájecího napětí se ztrácí i zátěžný moment na hřídeli a mohlo by dojít k nebezpečnému zvyšování otáček rotoru. Elektrárna musí být zabrzděna a zastavena. Po obnovení napájecího napětí lze opět po rozběhu elektrárny připojit generátor do sítě. Principiálně stejné odpojení a připojení k síti se provádí i v situacích, kdy není možné VtE z jiných (povětrnostních, technických a obecně bezpečnostních) důvodů provozovat.

Zkrat v síti způsobuje nebezpečná rázová zatížení vinutí a pulsace momentu na hřídeli. Při návrhu VtE proto provádíme kontrolu namáhání při dvoufázovém a trojfázovém zkratu na svorkách generátoru. Každý točivý stroj, tedy včetně generátoru, musí mechanicky vydržet otáčivou rychlost min. o 20 % vyšší, než má jmenovitou. Při extrémních provozních podmínkách může být tato rychlost i vyšší. Standardně jsou generátory jištěny proti zkratu a přetížení pojistkami nebo jističi s nadproudovým relé. Generátory větších výkonů jsou dále opatřeny odporovými teploměry pro měření vinutí a ložisek.

Zabezpečovací systém VtE tak musí automaticky reagovat na:

- ztrátu zatížení při výpadku napájecí sítě

- přetížení generátoru včetně zkratu
- překročení maximálních povolených otáček
- nadměrné vibrace
- výpadek kontrolního a řídicího systému
- přetočení přívodního kabelu do gondoly

Větrné elektrárny vyššího výkonu (5 MW a vyšší, ve specifických případech 1 MW a vyšší) musí být vybaveny některým z režimů **řízení jalového výkonu**, nejčastěji:

- udržování zadaného účinníku
- udržování zadané hodnoty jalového výkonu (odběr / dodávka) v rámci provozního diagramu stroje (PQ diagram)
- udržování napětí v předávacím bodě z důvodu omezení daných PQ diagramem stroje

Je definováno, že generátor s výkonem 5 MW a vyšším musí být schopen dodávat jmenovitý činný výkon v rozmezí induktivního účinníku $\cos \varphi = 0,85 - 1$ (odběr jalového výkonu induktivního charakteru) a kapacitního účinníku $\cos \varphi = 1 - 0,95$ (chod generátoru v podbuzeném stavu) při dovoleném rozsahu napětí na svorkách generátoru $\pm 5 \% U_n$ a při kmitočtovém rozmezí 48,5 - 50,5 Hz. Tento regulační rozsah jalového výkonu lze podle potřeby modifikovat, nejčastěji z důvodu potřeby regulace jalového výkonu v daném místě distribuční soustavy. Veškeré informace o povolených hodnotách jalového výkonu vůči činnému výkonu, i mimo výše uvedené optimální pásmo, najdeme v tzv. provozních diagramech alternátoru, které jsou nedílnou součástí provozně-technické dokumentace.

4.6 Energie a výkonová bilance elektrizační soustavy

Elektrizační soustava jako celek (přenosové medium) má omezenou přenosovou a kapacitní schopnost. Prioritou a stěžejním úkolem každého jejího provozovatele je zejména její bezpečný chod a udržení v rovnováze. V této souvislosti se nejčastěji zmiňují činné a jalové výkony, jež jsou formy energie, které přenáší.

Základní tezí elektrizační soustavy je, že množství energie do ní dodávané (vyrobené) je z ní zároveň nutné ve stejný moment odebrat (spotřebovat). Nelze tak jednostranným přísunem nebo odběrem energie tuto rovnováhu podstatně narušit. Ideální energetický stav je, pokud $\text{dodávka} = \text{odběr}$, neboli $\text{výroba} = \text{spotřeba}$. Protože ale ani na jedné straně nejsou konstanty, nýbrž proměnné, snažíme se pro zachování stability k této rovnici maximálně přiblížit.

4.7 Akumulace energie

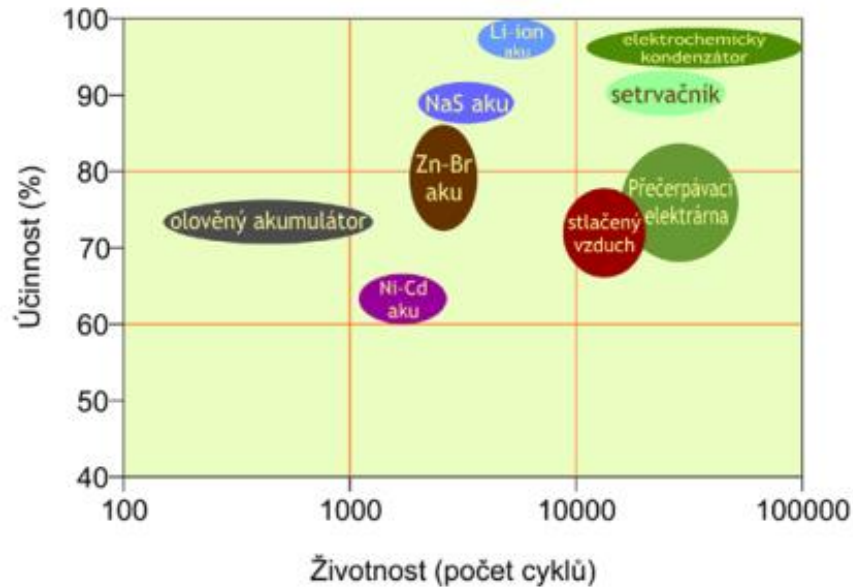
Energetickou a výkonovou bilanci elektrizační soustavy komplikují právě i VtE, neboť jde o časově proměnné energetické zdroje. Výše jsem již uvedl faktory, které limitují kontinuální provoz VtE, zejména se jedná o počasí. Cílem každého investora však je plně využít potenciál VtE, tedy zajistit, aby byla v provozu maximum možné doby, což lze, vzhledem k nákladům spojeným s výstavbou a uvedením VtE do provozu, považovat za pochopitelné. Pokud je však v daný moment energie v síti přebytek, přesněji více, než jaká je aktuální spotřeba, je nutné tuto další energii jinak využít. A protože se energie nemůže sama o sobě nikam ztratit, dochází k nejčastěji k její akumulaci. Akumulace (neboli ukládání) energie získané z větrných elektráren (a nejen z nich) je proto v současnosti velkou výzvou a s přibývajícím množstvím těchto energetických zdrojů bude její význam stále vyšší.

Možností ukládání elektřiny je celá řada. [24] [25] [26] [27] Mnohé jsou velmi dobře vyzkoušené a běžně používané, jiné jsou naopak ve fázi testování a jde spíše o experimentální projekty. Všechny bez výjimky také něco stojí. Na systémy ukládání elektřiny jsou často protichůdné nároky i názory, žádané vlastnosti jsou však společné, nezávisle na technologii:

- velikost, kapacita, hustota energie (kolik kWh může uchovat na kilogram hmotnosti)
- doba, po jakou může energii uchovat a kolik energie se při tom ztratí
- maximální dostupný výkon a rychlost, za jakou dokáže energii uvolnit
- účinnost a její případný pokles
- počet cyklů a celková životnost
- náklady a cena za 1 akumulovanou kWh
- bezpečnost provozu a vliv na životní prostředí

Technologií na akumulaci vyrobené energie je mnoho, nejpodstatnější z nich jsou:

- metoda Ruths a Marguerre (uskladnění energie ve formě tepla do tepelné kapacity látek)
- metody CAES a AA-CAES (uskladnění do plynného média - stlačený vzduch)
- přečerpávací vodní elektrárny (využívá potenciální tlakové energie)
- palivový článek založený na vodíko-kyslíkové konverzi (metoda založená na vodíkovém hospodářství)
- superkapacitory (uskladnění energie prostřednictvím elektrostatického pole (hustota energie až 10 Wh/kg))
- setrvačníky (Flywheel) (metoda založená na energii setrvačných hmot)
- redox baterie (metoda založená na redukčně-oxidační vlastnosti prvků)
- baterie Sodium – Sulfur (NaS) (baterie založená na reaktivitě sodíku)
- Lithiové baterie (baterie založená na reaktivitě Lithia)
- Superconducting magnetic energy storage (SMES) (energie uchovaná ve formě magnetického pole)



Obr. 26: Srovnání důležitých parametrů vybraných technologií akumulace energie. [26]

Nejběžnější metodou akumulace velkého množství energie jsou přečerpávací vodní elektrárny (PVE). Prakticky se jedná o vodní elektrárnu, která spojuje dvě vodní nádrže v různých výškových hladinách a jejíž turbíny a k nim připojené generátory mohou pracovat jak v režimu turbína/generátor, tak v režimu motor/čerpadlo. V době mimo špičky přebytečná energie ze sítě roztáčí turbíny (ve funkci čerpadel) a voda se přečerpává z dolní nádrže do horní. Ve chvíli, kdy je v síti třeba více energie, je voda přepouštěna z horní nádrže do dolní nádrže přes turbínu (ve funkci generátor) a akumulovaná energie se vrací zpět do sítě. Velice efektivně se tak využívá elektrické energie v kombinaci s potenciální energií velké masy vody. Tento typ akumulace je vhodný pro denní vyrovnávání spotřeby v síti a velmi vhodný pro spojení s akumulací energie získané z větru. Pro jejich stavbu je však nutný podstatný zásah do krajiny a jsou proto jen omezená místa, kde je lze stavět. Stavba PVE je zároveň velmi velkou investiční akcí. Dle mého názoru se však jedná o velmi dobře fungující technologii akumulace energie s celkovou energetickou účinností cca 70-85% v závislosti zejména na typu turbín, generátorů a rozdílu vodních hladin. Výkon všech instalovaných přečerpávacích elektráren na světě je kolem 105 GW, což jsou skoro 3 % instalovaného výkonu elektráren.

Nejznámější přečerpávací elektrárnou v České republice je elektrárna Dlouhé stráně, kterou provozuje Skupina ČEZ. Elektrárna leží uvnitř CHKO Jeseníky.

Hlavní technické údaje PVE Dlouhé stráně:

Výkon elektrárny: 650 MW (2 x 325 MW)

Počet soustrojí: 2 ks

Typ turbín: FR 100

Průměr oběžného kola: 4540 mm

Turbínový spád: 534,3 m

Typ generátorů: HV 812 830/14 – VA

Horní nádrž – celkový objem: 2,7208 mil. m³

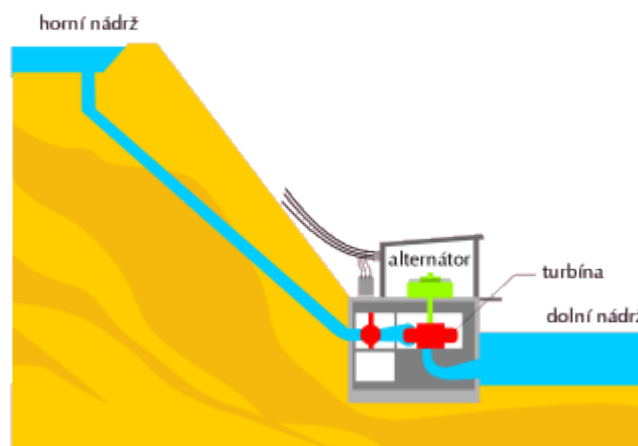
Kóta koruny hráze horní nádrž: 1 350 m n. m.

Dolní nádrž – celkový objem: 3,405 mil. m³

Kóta koruny hráze dolní nádrž: 824 m n. m.

Roční výroba energie cca: 997,8 GWh

Přechodový čas z klidu do max. turbínového provozu: 100 s

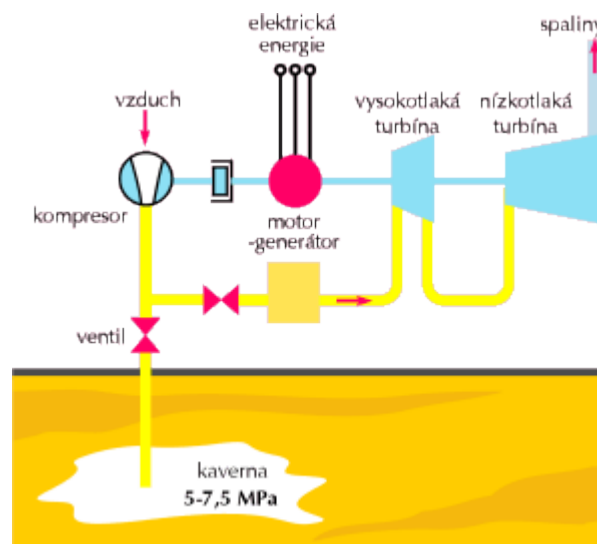


Obr. 27: Schéma přečerpávací vodní elektrárny. [24]

Další, zatím podstatně méně užívanou technologií je metoda na stlačený vzduch (CAES, z anglického Compressed Air Energy Storage). Technologie využívá přeměny elektrické energie na tlakovou energii vzduchu, který je uložen ve vhodném rezervoáru (nejčastěji vrty, doly nebo podzemní jeskyně). Energetický (systémový) princip je zároveň podobný přečerpávacím elektrárnám – v době přebytku elektřiny je vzduch pomocí kompresorů (režim čerpadlo) natlačen do rezervoáru, abychom později mohli jeho tlakovou sílu opět využít (režim generátor). Je však zapotřebí mít vhodný a dostatečně velký rezervoár, zajistit jeho bezpečnost a následný provoz. Tato technologie má většinou středně velké investiční náklady na zřízení a lze ji opět využít pro velké kapacity, řádově desítky až stovky MW, proto je vhodná pro spojení s VtE. V okamžiku, kdy se začnou objevovat nové experimentální instalace v jednotlivých státech odhaduji, že se tato technologie během několika následujících let podstatně rozšíří, neboť si myslím, že jde o vhodný ekvivalent přečerpávacích elektráren. Další výhodou vidím v tom, že jako rezervoár by šlo využít například dříve uzavřené doly a štoly, které by stejně nemohly být jinak využity.

Jedna z prvních akumulacních elektráren na principu stlačování vzduchu byla spuštěna v roce 1974 v německém Hundorfu, kterou provozuje německá energetická společnost E.ON Kraftwerke GmbH. Vzduch je čerpán do dvou hlubinných solných jeskyní o objemu 150 000 m³ a plynová turbína v době potřeby je schopna po dobu tří hodin dodávat do sítě výkon 321 MW. Udávaná účinnost se pohybuje kolem 45 %. Největším snižovatelem účinnosti v tomto případě jsou tepelné ztráty (teplo), které vznikají během opakovaného snižování a zvyšování tlaku plynu.

Vylepšením technologie CAES vznikla její druhá verze – AA-CAES (z anglického Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage). Přidanou hodnotou této technologie je okruh pro lepší využití tepla vedoucí ke snížení tepelných ztrát - teplo stlačeného vzduchu tak nepřichází vniveč, ale skladuje se pro opětovné zahřátí stlačeného vzduchu. Tím bylo dosaženo zvýšení účinnosti celého procesu na 70 %, což je srovnatelné s přečerpávacími elektrárnami.



Obr. 28: Schéma technologie na stlačený vzduch. [26]

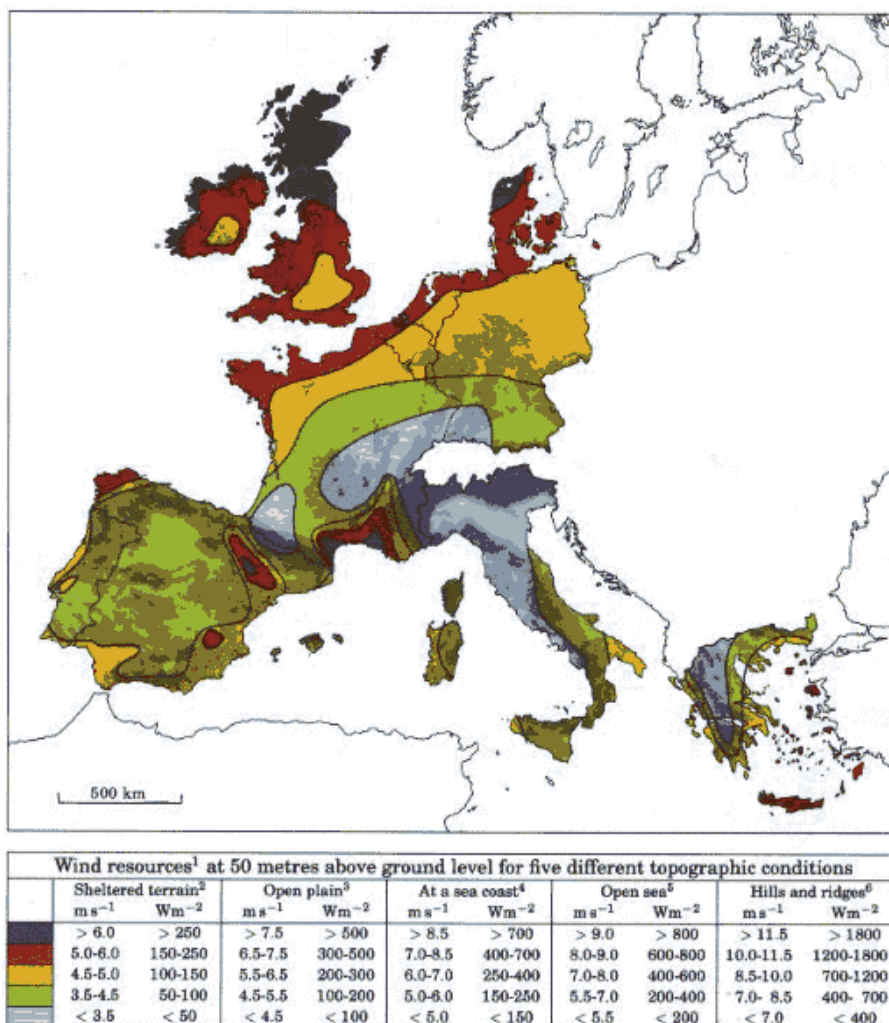
Ostatní, výše uvedené, systémy akumulace energie jsou spíše nízkokapacitního charakteru. Nejsou proto vhodné pro spojení s akumulací větrné energie a nebudou proto v této práci dále popisovány.

Aktuálně jsou stále uplatňovány systémy pro krátkodobou akumulaci energie s cílem zlepšit stabilitu sítě zejména na denní bázi. Pro podstatný nárůst kapacity energie z VtE je proto klíčové hledat prvky pro dlouhodobou a levnou akumulaci, kterou v tuto chvíli postrádáme.

5 Offshore větrné elektrárny a větrné farmy v Evropě

5.1 Větrný potenciál Evropy

Na základě bližšího seznámení s větrnou mapou Evropy mohu nyní určit vhodné lokality umístění větrné nebo plovoucí větrné elektrárny v Evropě.



Obr. 29: Větrná mapa Evropy s průměrnými rychlostmi větru. [41]

Jako jednoznačně nejvhodnější místa s obrovským větrným potenciálem se jeví oblasti Severního moře a jeho pobřeží, kde je průměrná rychlost větru větší než 8 m/s. Značný větrný potenciál má také Velká Británie a vody Atlantského oceánu. Podle [28] jsou jako celosvětově uznávány vhodné lokality s průměrnou rychlostí větru alespoň 4,8 m/s. Na základě tohoto kritéria pak mohu říci, že vhodných míst je po celé Evropě mnoho. Stále je však třeba dodržovat dané legislativní a ekologické podmínky, které omezují stavbu na specifických místech (národní parky, přírodní rezervace apod.).

5.2 Statistiky EWEA

Vývoji větrné energetiky v Evropě se již dlouhodobě věnuje Asociace evropské větrné energetiky (EWEA, z anglického The European Wind Energy Association [11]). Tato organizace neustále sleduje vývoj na poli větrné energetiky a monitoruje její stav a potenciál na území Evropy. Rozvoj offshore VtE v Evropě nejlépe dokládají vybraná čísla níže z reportu [29] [30] zpracovaným právě touto agenturou:

Rok 2014 – offshore VtE

- připojeno 9 nových větrných parků + 1 experimentální projekt – celkem 408 nových větrných turbín o celkové hodnotě 4,2 - 5,9 miliardy euro
- nárůst instalované kapacity v síti o 1 483,3 MW (pokles o 5,34 % oproti roku 2013)
- denní nárůst instalované kapacity v síti v průměru o 5,9 MW
- postaveno 536 nových turbín, z nichž 373 očekává na připojení do sítě
- aktuálně rozpracováno 12 projektů větrných parků

Souhrn instalací do roku 2014

- 74 větrných farem v 11 evropských zemích
- 2488 turbín o celkovém výkonu 8 045,3 MW

Predikce na rok 2015 a 2016

- připojení aktuálních projektů do sítě a navýšení celkové evropské instalované kapacity na 10,9 GW (+2,9 GW)

Trendy

- průměrný výkon nově instalované turbíny je 3,7 MW
- průměrná hloubka instalací je 22,4 m ve vzdálenosti 32,9 km od pevniny
- 49,3 % (730,9 MW) výkonu bylo instalováno v Severním moři, 50,7 % (752,4 MW) výkonu pak v Atlantském oceánu
- nejvíce jsou osazovány turbíny výrobce Siemens (86,2 %), následně již menšinové MHI Vestas (9,5 %), Areva (3 %), Senvion (0,8 %) a Samsung (0,5 %)

5.3 Vybrané offshore VtE instalace v Evropě

V následující tabulce jsou přehledně shrnuta důležitá fakta o několika významných offshore větrných elektrárnách v Evropě. [31] [32] [33]

	Horns Rev 1	Alpha Ventus	London Array Phase 1
Základní údaje:			
Země:	Dánsko	Německo	Spojené království
Umístění:	Severní moře	Severní moře	Severní moře
Souřadnice:	55 ° 31 '47 "N, 7 ° 54' 22" E	54° 1' 0" N, 6° 36' 0" E	51° 37' 33.6" N, 1° 29' 42" E
Provozní stav:	aktivní	aktivní	aktivní
Uvedení do provozu:	2002	2009	2013
Vlastník:	Vattenfall (60%) DONG Energy (40%)	EWE, E.ON, Vattenfall	E.ON, DONG Energy a Masdar
Větrná farma:			
Typ:	Offshore	Offshore	Offshore
Max. hloubka vody:	14 m	30 m	23 m
Základy:	Monopile (pevné)	Tripod / Jacket (pevné)	Monopile (pevné)
Vzdálenost od pobřeží:	14 km	56 km	20 km
Výška do středu rotoru:	70 m	92 m	87 m
Průměr rotoru:	80 m	116 m	120 m
Celková výška:	110 m	150 m	147 m
Operační rychlost větru:	4 – 25 m/s	4 - 25 m/s	3 - 25 m/s
Výroba energie:			
Značka a model turbín:	V80-2.0 (Vestas)	M5000-116 (Areva)	SWT-3.6-120 (Siemens)
Počet turbín:	80	12	175
Výkon turbíny:	2 MW	5 MW	3,6 MW
Celkový výkon parku:	160 MW	60 MW	630 MW
Roční výroba:	600 GWh	220 GWh	> 2 000 GWh
Připojení do sítě:	HVAC, 220 kV	HVAC, 110 kV	HVAC, 150 kV
Další informace:			
Webové stránky:	www.hornsrev.dk/en	www.alpha-ventus.de	www.londonarray.com
Cena:	278 mil. EUR	250 mil. EUR	2 200 mil. EUR
Plánovaná životnost:	25 let	20 let	24 let

Tab. 4: Srovnání základních parametrů vybraných větrných parků v Evropě.

Dánsko patří v oblasti mořských větrných elektráren dlouhodobě ke světové špičce. Právě větrná farma Horns Rev 1 (také známa jako Horns Reef) o celkovém výkonu 160 MW bývá často označována za první velkou mořskou větrnou farmu, jelikož svými rozměry je 4krát větší než její předchůdce v dané oblasti. Je schopna pokrýt spotřebu přibližně 150 tisíc domácností. Stala se tak jednou z nejpodstatnějších dánských větrných farem. Transport techniků na jednotlivé větrné elektrárny je zajišťován zejména pomocí vrtulníků Eurocopter

EC-135, ze kterých se pracovníci spouští na bezpečně ohrazenou plošinu na vrcholu gondoly. Z důvodu nestabilního počasí a zejména velké mořské aktivité v oblasti jsou transporty lodí možné jen minimálně. Vzhledem k dosavadním pozitivním zkušenostem došlo v roce 2009 k vybudování farmy Horns Rev 2 o výkonu 209 MW (91 turbín o jednotkovém výkonu 2,3 MW) a je dále plánována výstavba farmy Horns Rev 3 o instalovaném výkonu 400 MW (přesný počet a typ turbín zatím není znám). Projekt je dánskou vládou schválený a ve fázi příprav. V současnosti se již větrné elektrárny v Dánsku podílí přibližně 20 % na skladbě národního energetického mixu a lze očekávat další navýšení podílu. Dánsko tak potvrzuje, že na větrnou energii klade a bude dále klást velký důraz. [33]



Obr. 30: Transport techniků na mořskou VtE vrtulníkem Eurocopter EC-135. [15]

Německo je obecně považováno za technicky velmi vyspělou a ekologickou zemi. Je známo, že přístup k větrné energii je v Německu vesměs pozitivní, což dále podporuje místní propracovaný systém dotací a podpory výkupu elektřiny. Tomu odpovídá velké množství pevninských instalací VtE. Po havárii jaderné elektrárny Fukušima v Japonsku v roce 2011 se německá vláda dokonce rozhodla do roku 2022 ukončit provoz svých jaderných elektráren. Důsledkem této skutečnosti je fakt, že se Německo ještě intenzivněji zaměřilo právě na větrnou energii, zejména na mořské větrné parky. V roce 2009 otevřelo Německo první větrnou farmu na moři ve vzdálenosti 45 kilometrů od pobřeží. Alpha Ventus dokáže svým výkonem zásobovat zatím přibližně jen 50 tisíc domácností, je však podstatná z důvodu získání dalších zkušeností a ověření správného fungování technologie. V současnosti se skládá pouze z 12 turbín (dva různé typy základny) o jednotkovém výkonu 5 MW, celkem tedy 60 MW, je však zamýšleno podstatné navýšení počtu turbín, respektive celkového výkonu - na místě větrné farmy Alpha Ventus vyrostou v příštích 10 letech 400 nových turbín.

"Tady shromáždíme první zkušenosti a využijeme je při stavbě dalšího projektu, už připravujeme druhý mořský větrný park," říká předseda společnosti EWE Werner Brinker.



Obr. 31: Německá větrná farma Alpha Ventus s viditelným rozdílem v použitých typech základové konstrukce. [42]

Dosud celosvětově největší mořská větrná farma London Array Phase 1 vznikla v roce 2013 u břehů Spojeného království Velké Británie a Severního Irska. Skládá se celkem ze 175 turbín o jednotkovém výkonu 3,6 MW. Farma tak dodává do sítě rekordní výkon 630 MW a za rok 2013 vyrobila přes 2 TWh elektrické energie, přičemž z toho byla ještě na přibližně 100 dní nuceně odstavena pro údržbu. Farma má ročně snížit emise CO₂ o přibližně 900 tisíc tun, což odpovídá emisím 300 tisíc osobních automobilů. Druhá fáze (Phase 2), čítající přístavbu dalších 166 turbín a zvýšení celkového výkonu nad 1 000 MW, byla plánována, nicméně od ní bylo v únoru 2014 ustoupeno z důvodu obav z vlivu na místní ptactvo.



Obr. 32: Větrná farma London Array u břehu Spojeného království. [43]

6 Nutné podmínky rozvoje větrné energetiky na moři

V roce 2013 byl v rámci projektu Evropská větrná iniciativa (EWI, z anglického European Wind Initiative) stanoven cíl zvýšit podíl větrné energetiky v evropské rozvodné soustavě (ENTSO-E) na 20% v roce 2020, 33% v roce 2030 a 50% v roce 2050. Pro další rozvoj větrné energetiky v rámci EU je třeba dle projektu EWI agentury EWEA [11] splnit řadu zejména legislativních, ekonomických a technických podmínek. [17] [35] [36] Nejpodstatnější z nich uvádím v následujícím přehledu.

Legislativní podmínky:

- Klíčová je podpora jednotlivých národních vlád a Evropské unie, abychom měli zajištěný stabilní rámec podpory větrné energetiky pro období po roce 2020 na základě schváleného závazného cíle pro rok 2030.
- Zjednodušení povolovacích a schvalovacích procesů, případné posílení administrativních pracovníků.
- Jednoznačné vymezení mořského teritoria v rámci mezinárodních vod.
- Měly by být vyvinuty a popsány nové technické standardy specifické pro větrné plovoucí elektrárny.
- Efektivní přístup k financování projektů pobřežních větrných elektráren.
- Společný evropský výzkum, který bude podporovat rozvoj větrné energetiky na moři. Informace získané z výzkumu budou sloužit všem zainteresovaným.
- Lepší spolupráce mezi subjekty podílející se na výstavbě. Výměna informací, často i mezi konkurencí, je ziskem pro obě strany.

Ekonomické podmínky:

- Snížení nákladů na výrobu 1 MWh z větru.
- Vhodné stanovení výkupních cen energie z větru nebo jiná kompenzace, která bude motivovat investory k účasti na projektech VtE.
- Větší motivace odběratelů k odběru elektřiny v době nadvýroby elektrické energie (dynamické tarify elektřiny).
- Kurzy pro získávání kvalifikovaných odborníků na oblast plovoucích VtE.

Technické podmínky:

- Nalezení vhodné lokality k instalaci offshore větrné farmy.
- Zlepšení návrhu, projektu a matematických výpočtů větrné elektrárny pro zajištění její správné funkce a zejména stability na mořské hladině.
- Zefektivnění výstavby a zejména samotné montáže na moři.
- Zefektivnění vysokonapěťového přenosu (AC i DC).
- Zvyšování celkové efektivity VtE.
- Vývoj (úprava) řídicích systémů vhodných pro plovoucí VtE.
- Zajištění dostatečného množství regulačních parametrů (činný a jalový výkon).
- Sledování životnosti současných VtE a prodlužování životnosti jejich údržbou a

modernizací.

- Navržení nových měřících postupů a zařízení specifických pro tuto oblast.
- Plán recyklace dosloužených VtE.
- Výzkum v oblasti turbulentních efektů a jejich konkrétních dopadů na zatížení a pohyby plovoucí plošiny. Tomuto výzkumu by značně pomohlo nasazením plovoucí demonstrační farmy plovoucích větrných elektráren se čtyřmi nebo pěti jednotkami.

Požadavky a doporučení ve vztahu k veřejnosti (Public relations):

- Zlepšení celkového povědomí veřejnosti ve vztahu k plovoucím VtE a k větrné energetice obecně.
- Veřejnosti snadno dostupné informace o projektech a dalším vývoji.
- Webové stránky projektů.
- Online monitoring výroby elektrické energie.

Výše uvedené požadavky a doporučení jsou teoretické předpoklady pro další rozvoj oblasti plovoucích VtE.

Zcela zásadní je dle mého názoru postoj EU, respektive postoje vlád členských zemí k větrné energetice a k OZE obecně. Vlády členských zemí jsou primárně zodpovědné za to, zda a jakým způsobem bude tato energetická oblast dotována. Větrná energetika se zatím bez finančních dotací neobejde a je proto jejich trvalé získávání nezbytné. Je proto nutné, aby příslušní jednatelé a rozhodující osoby měly dostatečné a správné informace o problematice a všechna podstatná fakta k dispozici.

Podstatný bude zároveň další vývoj investičních nákladů na nové projekty. Klíčové je, aby se náklady postupně snižovaly a aby tyto projekty byly zajímavé pro možné investory. Pokud bude zajištěno financování, státem bude garantována podpora a budou stanoveny dostatečné výkupní ceny za vyrobenou elektřinu, bude tato oblast jistě zajímavým investičním potenciálem pro mnoho velkých společností. Snížení investičních nákladů lze zároveň predikovat na základě množství výroby - pokud budou jednotlivé komponenty efektivně vyráběny a ve větším počtu odebírány, bude klesat jejich cena, což se pozitivně projeví na celkové ceně stavby. Primárním cílem každého investora a provozovatele VtE pak je snížení ceny za vyrobenou MWh.

Vzhledem k množství financí, které jsou zatím v této oblasti energetiky potřebné, se jako možné řešení aktuálně ukazuje dříve nemyslitelné partnerství více, často i konkurenčních firem. V únoru 2014 došlo například k zahájení tzv. joint-venture partnerství (podíl 50/50)

společností Areva a Gamesa [34], které jsou předními hráči ve svých oborech. Společnost Areva se specializuje na výrobu výkonných větrných turbín, zatímco společnost Gamesa je komplexním dodavatelem staveb větrných parků na pevnině a na moři. Obě firmy si od partnerství slibují větší klientelu a následnou spolupráci na výrobě a dodávce zařízení, z čehož budou profitovat obě společnosti. Velmi trefně toto popsal p. Ignacio Martin, předseda představenstva společnosti Gamesa: „*Společný podnik připraví cestu pro vytvoření přední společnosti v off-shore segmentu s velmi širokým know-how.*“ Bude zajímavé dále sledovat, jaké výsledky přinese toto partnerství oběma společnostem.

V neposlední řadě je nutné udržovat pozitivní vztah veřejnosti k oblasti mořských větrných parků a větrné energetice obecně. Myslím si, že veřejnost by měla být vždy v čas a v potřebné výši seznámena s fakty, které ji mohou pomoci lépe pochopit princip tohoto energetického zdroje a uvést fakta na pravou míru. Zároveň je nutné, aby tyto informační zdroje byli transparentní a snadno dostupné. V případě potřeby je vhodné diskutovat nad spornými body a společně si objasnit rozdílné názory. V zájmu všech zúčastněných je, aby stavba byla ekologicky nezávadná a aby svým charakterem bezemisní výroby elektrické energie mohla přispět k lepšímu životnímu prostředí nás všech.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo představení principu větrné energetiky se zaměřením na plovoucí větrné elektrárny a mořské větrné farmy. Potvrdil se předpoklad, že se jedná o velmi dynamicky se rozvíjející odvětví, které skrývá ohromný ekologický i ekonomický potenciál. S tímto názorem se plně ztotožňuji. Vzhledem ke skutečnosti, že Česká republika je vnitrozemský stát a nemá vlastní moře, je logické, že toto téma nebude mezi tuzemskou veřejností tolik aktuální. Přesto si však myslím, že je vhodné mít obecný přehled o tom, co se děje v této oblasti jinde v Evropě a případně dále ve světě. Evropské větrné velmoci jako Dánsko, Německo nebo třeba Velká Británie potvrzují, že větrná energetika je a bude i nadále jejich nedílnou součástí. Vzhledem k počtu plánovaných nových projektů a otevřenému trhu v rámci EU se tak mohou i české firmy ucházet o specializované zakázky, které jsou v tomto odvětví běžné a žádané. Zároveň se zvedne poptávka po specialistech v oboru a všem se naskytne nová možnost uplatnění v rámci evropského trhu práce. Podobný růst mořských větrných parků se v současnosti odehrává zejména i v Číně a Indii, kde však neočekávám takové uplatnění, jako v Evropě, ačkoliv to samozřejmě není vyloučené.

Myslím si, že OZE a zejména energie z větrných mořských parků se v současnosti jeví jako možná energetická budoucnost a právem je této oblasti věnována podstatná část výzkumu a zejména financí. Protože se jedná o přírodně dostupné zdroje, není jejich získání pro společnost takovou ekonomickou a zejména ekologickou zátěží, jako je tomu u běžných fosilních paliv. Zároveň i provoz samotného zařízení je následně podstatně šetrnější k přírodě, což je při současných klimatických podmínkách a při neustále omílaném globálním oteplování podstatným a stěžejním argumentem pro větrnou energetiku.

Objektivně však musím říci, že OZE a větrná energie jsou zatím stále jen alternativním zdrojem. Hlavním energetickým zdrojem prozatím zůstávají tepelné elektrárny, neboť jejich výkonový potenciál jsme zatím nedokázali (a v řádu několika příštích let jistě nedokážeme) obnovitelnými zdroji plně nahradit. Přesto však se podíl tepelných elektráren neustále snižuje právě na úkor například větrných elektráren, což je pro budoucnost tohoto odvětví podstatné.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] *Z historie využívání energie větru v českých zemích* [online]. Česká společnost pro větrnou energii © 2013 [cit. 28.2.2015]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/z-historie-vyuzivani-energie-vetru-v-ceskych-zemich/36>
- [2] *Vítr* [online]. Wikipedie – otevřená encyklopedie [cit. 28.2.2015]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%ADtr>
- [3] *Beaufortova stupnice* [online]. Wikipedie – otevřená encyklopedie [cit. 28.2.2015]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Beaufortova_stupnice
- [4] *Větrná energie* [online]. Wikipedie – otevřená encyklopedie [cit. 28.2.2015]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C4%9Btrn%C3%A1_energie#cite_note-3
- [5] *Větrná mapa ČR* [online]. Ústav fyziky atmosféry AV ČR [cit.28.2.2015]. Dostupné z: <http://www.ufa.cas.cz/struktura-ustavu/oddeleni-meteorologie/projekty-egp/vetrna-energie/vetrna-mapa.html>
- [6] *Větrná turbína* [online]. Wikipedie – otevřená encyklopedie [cit. 28.2.2015]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C4%9Btrn%C3%A1_turb%C3%ADna
- [7] ČERVENÁ, Martina. *Využití obnovitelných zdrojů pro výrobu elektrické energie*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická.
- [8] *Velikost větrné elektrárny a její vývoj* [online]. Česká společnost pro větrnou energii [cit. 4.3.2015]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/velikost-vetrne-elektrarny-a-jeji-vyvoj/110>
- [9] *Jaký mají větrné elektrárny vliv na životní prostředí?* [online]. ekoporadna.cz [cit. 4.3.2015]. Dostupné z: http://www.ekoporadna.cz/wiki/doku.php?id=energie:jaky_maji_vetrne_elektrarny_vliv_na_zivotni_prostredi
- [10] Česká společnost pro větrnou energetiku [cit. 6.4.2015]. Dostupné z: www.csve.cz

- [11] European Wind Energy Association [cit. 6.3.2015]. Dostupné z: www.ewea.org
- [12] Global Wind Energy Council [cit. 6.3.2015]. Dostupné z: <http://www.gwec.net/>
- [13] KRÁL, Ondřej. *Větrná energie*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav.
- [14] *Posuzování vlivů na životní prostředí (EIA)* [online]. Ministerstvo životního prostředí [cit. 7.3.2015]. Dostupné z: http://www.mzp.cz/cz/posuzovani_vlivu_zameru_zivotni_prostredi_eia
- [15] CHROMEČEK, Tomáš. *Větrné elektrárny pobřežního a vnitrozemského typu*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav.
- [16] HABRYCH, Richard. Větrné elektrárny nabízejí nové možnosti. In: *Energie21*. ProfiPress, č. 5/2013. Dostupné z: <http://energie21.cz/vetrne-elektrarny-nabizeji-nove-moznosti/>
- [17] HABRYCH, Richard. Plovoucí větrné elektrárny se stávají realitou. In: *Alternativní energie*. ProfiPress, č. 5/2014, 26.
- [18] *Deep water - A report by the European Wind Energy Association - July 2013* [report]. The European Wind Energy Association [cit.]. Dostupné z: <http://www.ewea.org/publications/reports/the-european-wind-initiative/>
- [19] *Byznys budoucnosti: recyklace větrných elektráren* [online]. TZB-info [cit. 7.3.2015]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/12418-byznys-budoucnosti-recyklace-vetrnych-elektraren>
- [20] MIČKA, Dominik. *Model HVDC spojky pro laboratorní výuku*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektroenergetiky.

- [21] *AC/DC - Stejnoseměrný proud zažívá svou renesanci* [online]. Lumius: Svět plný energie [cit. 9.3.2015]. Dostupné z: <http://www.lumius.cz/ac-dc-stejnosmery-proud-zaziva-svou-renesanci0>
- [22] *Střídavý proud* [online]. Wikipedie – otevřená encyklopedie [cit. 10.3.2015]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/St%C5%99%C3%ADdav%C3%BD_proud
- [23] BARTKO, Jan. *Vlivy větrných elektráren na kvalitu elektrické energie*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektroenergetiky.
- [24] KRATOCHVÍL, Tomáš, Bc. *Akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav.
- [25] *Cesty k akumulaci elektrické energie* [online]. Skupina ČEZ [cit. 13.3.2015]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/06/cesty_1.html
- [26] *Ukládání elektřiny z fotovoltaických a větrných elektráren* [online]. Nalezno.cz: Chytrá řešení pro každého [cit. 13.3.2015]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/ukladani-elekriny-z-fotovoltaickych-a-vetrnych-elekraren.aspx>
- [27] Energy Storage Association [cit. 13.3.2015]. Dostupné z: <http://energystorage.org/>
- [28] *Europe's onshore and offshore wind energy potential: An assessment of environmental and economic constraints* [report]. Europe's energy portal 2009-06 [cit. 14.3.2015]. Dostupné z: <https://www.energy.eu/publications/a07.pdf>
- [29] *The European offshore wind industry: Key trends and statistics 2014* [report]. The European Wind Energy Association [cit. 20.3.2015]. Dostupné z: <http://www.ewea.org/publications/reports/the-european-wind-initiative/>

- [30] *Building a stable future, Annual report 2013* [report]. The European Wind Energy Association [cit. 20.3.2015]. Dostupné z: <http://www.ewea.org/publications/reports/the-european-wind-initiative/>
- [31] 4Coffshore [cit. 20.3.2015]. Dostupné z: <http://www.4coffshore.com/>
- [32] *Mořské větrné elektrárny: Ekologická energie pro Evropu* [online]. EkoBonus [cit. 20.3.2015]. Dostupné z: <http://www.ekobonus.cz/morske-vetrne-elektrarny-ekologicka-energie-pro-evropu>
- [33] *5 nejzajímavějších větrných elektráren* [online]. EkoBonus [cit. 20.3.2015]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/energie/vetrna-energie/5-nejzajimavejsich-vetrnych-elektraren.aspx>
- [34] *AREVA urychluje rozvoj větrné energie na moři* [online]. Prekon.cz [cit. 21.3.2015]. Dostupné z: <http://www.prekon.cz/1392191482/areva-urychluje-rozvoj-vetrne-energie-na-mori.html>
- [35] HABRYCH, Richard. Výstavba větrných pobřežních parků. In: *Energie21*. ProfiPress, č. 1/2013, 36, č. 2/2013, 36.
- [36] STEJSKALOVÁ, Eva. Větrná energetika ve světě kráčí dál. A v České republice? In: *Energie21*. ProfiPress, 1/2015, 28-29, ISSN 1803-0394
- [37] Směr větru na zemi. *www.google.com: obrázky* [online]. [cit. 28.2.2015]. Dostupné z: <https://www.google.cz/webhp>
- [38] Větrné elektrárny. *www.google.com: obrázky* [online]. [cit. 7.3.2015]. Dostupné z: <https://www.google.cz/webhp>
- [39] Seajacks Zaratán. *www.google.com: obrázky* [online]. [cit. 7.3.2015]. Dostupné z: <https://www.google.cz/webhp>
- [40] High-voltage direct current. *www.google.com* [online]. [cit. 10.3.2015]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/High-voltage_direct_current

[41] European Wind Speed Map. <http://www.esru.strath.ac.uk/> [online]. [cit. 20.3.2015].
Dostupné z: http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/03-04/wind/content/eu_windmap.html

[42] Alpha Ventus. *www.google.com: obrázky* [online]. [cit. 20.3.2015]. Dostupné z:
<https://www.google.cz/webhp>

[43] London Array. *www.google.com: obrázky* [online]. [cit. 20.3.2015]. Dostupné z:
<https://www.google.cz/webhp>