

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Pobřežní větrné elektrárny

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jiřina Mertlová, Ph.D.

2016

Autor: Bc. Martin Zoufalý

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

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

Jméno a příjmení: **Bc. Martin ZOUFALÝ**
Osobní číslo: **E13N0019K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Pobřežní větrné elektrárny**
Zadávající 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 pobřežní větrné elektrárny.
2. Navrhněte varianty technického řešení.
3. Integrujte do přenosové nebo distribuční soustavy.
4. Proveďte rozbor výhod a nevýhod instalace.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

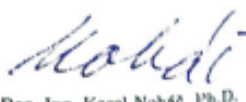
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

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

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


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




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

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku pobřežních větrných elektráren. V úvodní části je popsána historie a vývoj využívání větrné energie včetně přehledu největších postavených větrných farem na moři. Druhá část je zaměřena na popis fyzikálních principů funkce a složení větrné elektrárny. Další část práce popisuje technická řešení větrných farem postavených na moři, zejména problematiku integrace do rozvodné sítě. V poslední kapitole je vypracován rozbor výhod a nevýhod instalace.

Klíčová slova

Větrná elektrárna, pobřežní větrná elektrárna, větrná energie, větrný park, rotor, turbína, generátor, offshore, rychlost větru, regulace, polovodičový měnič, frekvenční měnič, přenos, elektrizační soustava, akumulace energie, účinnost, životní prostředí, obnovitelný zdroj energie.

Abstract

The submitted master thesis is focused on the issue of offshore wind power plants. In the beginning is being described history and development of the usage of wind energy, including a list of the largest wind farms built on the sea. The second part focuses on a description of physical principles regarding functions and composition of a wind farm. Next part of the work describes technical solutions of wind plants built on sea, especially issues regarding its integration into a distribution grid. The last chapter provides an analysis of the advantages and disadvantages of installation.

Key words

Wind power plant, offshore wind power plant, wind energy, windpark, rotor, turbine, generator, wind speed, regulation, semiconductor converter, inverter, transmission, electrification system, energy storage, efficiency, environment, renewable energy source.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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.

V Plzni dne

Bc. Martin Zoufalý

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce vážené Doc. Ing. Jiřině Mertlové, CSc. a konzultantovi panu Ing. Richardu Habrychovi, Ph.D. za cenné, užitečné rady a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	12
1 VĚTRNÁ ENERGIE	13
1.1 HISTORIE A VÝVOJ	13
1.1.1 Neelektrické větrné stroje	13
1.1.2 Elektrické větrné stroje	14
1.1.3 Současný stav instalovaného výkonu	15
1.1.4 Stav největších pobřežních větrných parků v Evropě	17
1.2 VÍTR	18
1.2.1 Vznik, směr a síla větru	18
1.2.2 Měření větru	19
1.2.3 Výpočet energie a výkonu	21
2 FYZIKÁLNÍ PRINCIP FUNKCE VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	22
2.1 VÝPOČET ÚČINNOSTI	22
2.2 ZÁKLADNÍ ČÁSTI VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	24
2.2.1 Rotor	24
2.2.1.1 Větrné rotory pracující na odporovém principu	24
2.2.1.2 Větrné rotory pracující na vztakovém principu	26
2.2.2 Gondola	29
2.2.2.1 Strojovna	29
2.2.2.2 Rám strojovny	30
2.2.2.3 Hřídel rotoru	31
2.2.2.4 Převodové ústrojí	31
2.2.2.5 Generátor	32
2.2.2.6 Brzda	32
2.2.2.7 Systém natáčení gondoly	33
2.2.2.8 Stožár	33
2.2.2.9 Základ	34

3	TECHNICKÉ PROSTŘEDKY POBŘEŽNÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY.....	36
3.1	NÁZVOSLOVÍ	36
3.2	ZÁKLADOVÉ KONSTRUKCE	36
3.2.1	Železobetonové základy	37
3.2.2	Monopile	37
3.2.3	Příhradová konstrukce	38
3.2.4	Tripod	39
3.2.5	Tripile	39
3.3	OCHRANA PŘED KOROZÍ	40
3.3.1	Elektrochemická protikorozi ochrana	40
3.3.2	Žárové pokovení	40
3.3.3	Nátěry	41
3.3.3.1	Bariérový efekt	41
3.3.3.2	Antikorozi pigmentová ochrana	42
3.4	STAVEBNÍ PRAVIDLA	42
3.4.1	Seajacks Zaratan	42
3.5	SERVIS	43
3.5.1	Servisní pravidla	44
4	INTEGRACE DO ENERGETICKÉ SOUSTAVY.....	45
4.1	ŘÍZENÍ ČINNÉHO VÝKONU VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	45
4.1.1	Regulace výkonu malých větrných elektráren	46
4.1.2	Regulace výkonu velkých větrných elektráren	47
4.1.2.1	Regulace typu STALL	47
4.1.2.2	Regulace typu PITCH	47
4.1.2.3	Regulace typu ACTIVE-STALL	48
4.2	SYSTÉMY VÝROBY ELEKTRICKÉ ENERGIE	49
4.2.1	Asynchronní generátor s kotvou nakrátko	49
4.2.2	Asynchronní generátor s vinutým rotorem	50
4.2.3	Asynchronní generátor s vinutým rotorem a frekvenčním měničem	51
4.2.4	Synchronní generátor s měničem frekvence	52
4.3	OMEZENÍ PROUDOVÝCH RÁZŮ PŘI PŘIPOJENÍ VTĚ NA SÍŤ	52
4.3.1	Připojení tyristorovým spouštěčem	53
4.3.2	Připojení přes rezistor	53
4.4	PŘENOS ELEKTRICKÉ ENERGIE NA PEVNINU	54
4.4.1	Model vedení	55

4.4.2	Vysokonapěťový přenos	56
4.4.2.1	HVDC (High Voltage Direct Current)	57
4.5	Vliv větrných elektráren na elektrizační síť	61
4.5.1	Přetěžování sítí	62
4.5.2	Flicker	62
4.5.3	Změny zkratových poměrů v síti	63
4.5.4	Napětí vyšších harmonických	63
4.5.5	Rušení HDO signálu	64
4.5.6	Regulace výkonu	64
4.5.6.1	Stabilita a řízení	65
4.6	AKUMULACE ENERGIE	66
4.6.1	Přečerpávací vodní elektrárny	68
4.6.2	Stlačený vzduch	68
4.6.3	Ostatní technologie	69
5	ROZBOR VÝHOD A NEVÝHOD INSTALACE VTE.....	70
5.1	VŠEOBECNÉ PŘÍNOSY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	70
5.1.1	Výhody pobřežních VtE	71
5.2	VŠEOBECNÉ PROBLÉMY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	72
5.2.1	Nevýhody přímořských VtE	73
5.3	ÚHEL POHLEDU A MÝTY	74
5.3.1	Hlučnost	74
5.3.2	Infrazvuk	75
5.3.3	Krajinný ráz	75
5.3.4	Ohrožení ptactva	75
5.3.5	Plašení zvíře	76
6	ZÁVĚR.....	77
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	79

Seznam symbolů a zkratk

A	Plocha (m^2)
B	Susceptance (Ω)
C.....	Kapacita (F)
c	Napěťový součinitel (-)
C_p	Účinnost stroje (-)
D	Rotorový průměr (m)
E	Kinetická energie (J)
f.....	Frekvence (Hz)
F_a	Axiální síla (N)
G	Svod (S)
I	Proud (A)
$I_k^{//}$	Zkratový proud (A)
L.....	Impedance (H)
l.....	Délka (m)
m.....	Hmotnost (kg)
n.....	Otáčky za minutu (ot/min)
P.....	Výkon (W)
Q	Joulovo teplo (J)
R	Odpor (Ω)
S.....	Plocha lopatky (m^2)
s	Dráha (m)
t.....	Čas (hodina)
U	Napětí (V)
U_h	Napětí h-tého řádu harmonické (V)
U_n	Jmenovité napětí (V)
U_v	Rychlost konce listu při otáčení (m.ot/min)
U_1	Efektivní hodnota napětí první harmonické (V)
v	Rychlost (m/s)
X	Reaktance (Ω)
Y.....	Admitance (S)

Z.....	Impedance (Ω)
Z_k	Výsledná impedance k místu zkratu (Ω)
β	Regulační úhel transformátoru ($^\circ$)
η_i	Účinnost ideální (-)
λ	Rychloběžnost (-)
ρ	Hustota vzduchu (kg/m^3)
ρ_{cu}	Rezistivita ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}^1$)
δ	Zátěžný úhel generátoru ($^\circ$)
ω	Úhlová rychlost (rad/s)
HDO	Hromadné dálkové ovládání
HVDC	High voltage direct current
THD	Celkové harmonické zkreslení (-)
THF	Činitel harmonického zkreslení (-)
VtE.....	Větrná elektrárna

Úvod

Od dob objevu elektrické energie se stále více uplatňuje její využívání. Dnes si nedovedeme představit situaci, kdy by nastal její nedostatek, protože lidstvu slouží a usnadňuje každodenní život. Výsledná forma elektřiny není na naší planetě dostupná, a proto se musí získat transformací z jiné formy energie. Nejčastější způsob získání elektrické energie je z přeměny neobnovitelných zdrojů. Klasické tepelné elektrárny využívají jako zdroj ke své činnosti fosilní paliva. Ty se spalují v kotli, který vytváří páru, a ta roztáčí turbínu spojenou s generátorem elektrického proudu. Jaderné elektrárny získávají teplo štěpením jader uranu. Tyto zdroje energie jsou neobnovitelné a s rostoucí poptávkou po zásobování celé planety elektřinou, drasticky klesají. Navíc přeměna fosilních paliv má neblahý vliv na životní prostředí a způsobuje globální oteplování. Proto je nezbytně nutné postupně nahrazovat klasické konvenční zdroje energie elektrárnami na obnovitelné zdroje energie. Voda, sluneční záření či vítr jsou obnovitelné zdroje přirozeně se vyskytující na naší planetě Zemi a jejich přeměna na elektrickou energii je mnohem šetrnější k přírodě. Nevýhodou využívání sluneční či větrné energie je nepredikovatelnost počasí, což způsobuje nestálou výrobu elektřiny.

Velkou pozornost přitahují větrné elektrárny, protože mají v celku dobrou účinnost. Na pevnině se stavějí do vyšších poloh kvůli lepším povětrnostním podmínkám, nebo tam kde by byli mimo dosah obydlených prostor. Větrný potenciál na souši je poměrně vyčerpaný a navíc kvalita větru je v porovnání s přímořským vzduchem nedostačující. Na moři fouká silnější a stálější vítr s téměř neměnným směrem a tak se v poslední době stávají farmy postavené na moři hlavním zájmem pro jejich výstavbu.

Tématem diplomové práce je právě využívání větrné energie jako zdroje pro výrobu elektřiny a budu se jí dále podrobně věnovat. Cílem práce je komplexní přehled a objasnění fyzikálních principů větrných elektráren s podstatným zaměřením na přímořské oblasti. Budou zde objasněny přínosy a nedostatky spojené s využíváním větrné energie a nepříznivé vlivy připojování větrných farem do elektrizační soustavy.

1 VĚTRNÁ ENERGIE

1.1 Historie a vývoj

1.1.1 Neelektrické větrné stroje

První zmínky o větrné energii sahají do zhruba 5000 let vzdálené historie do Egypta, kde se právě vítr používal jako zdroj kinetické energie pro pohánění lodí na řece Nilu. V principu šlo o jednoduché využití síly, která vznikla aerodynamickým odporem vzduchu, působícího na plachtu postavenou pod vhodným úhlem na směr větru. Jednalo se o prvopočátky lodní dopravy a využití nacházíme i v současnosti v podobě rekreačních či sportovních plachetnic. [2]

Dalším důležitým prakticky využitelným strojem byly větrné mlýny. V tomto případě je energie větru převáděna na rotační energii prostřednictvím lopatek. Tyto stroje běžně sloužily k mletí obilí, čerpání vody pro zavlažování či odvodňování půdy, nebo k přepravě vody. V Persii se začaly objevovat první vertikální větrné mlýny před 2200 lety. Velký rozmach nastává v 11. století na Středním východě, odkud se ve 13. století dále rozšířil do Evropy (Francie, Španělsko, Portugalsko, Nizozemsko, Německo, Čechy, Itálie, Velká Británie). Nejznámější větrné mlýny pocházejí z Holandska, kde byly hojně využívány na přečerpávání vody. Velká část pobřeží Holandska je pod úrovní hladiny moře a proto se stávalo pravidlem, že jsou tyto oblasti zaplavovány. V 16. století Jan Adriaancz vymyslel Leegbwater systém, který využívá okružní kanál kolem vodní plochy a větrné mlýny jsou použity jako přečerpávací stanice. V 17. století je odhadovaný počet větrných mlýnů kolem 60 000. [3]

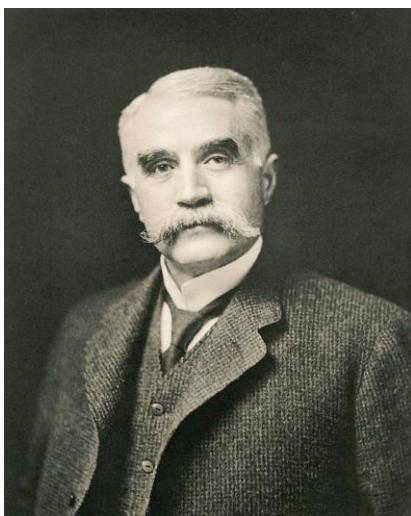
V České Republice je dokládán první vyrobený větrný mlýn v roce 1277 a za jeho naleziště se pokládá zahrada Strahovského kláštera. Na přelomu 19. a 20. století vyšplhal počet větrných mlýnů na území ČR téměř k 900. Tyto mlýny se využívaly převážně pro mletí obilí, nikoliv k výrobě elektrické energie. [2]



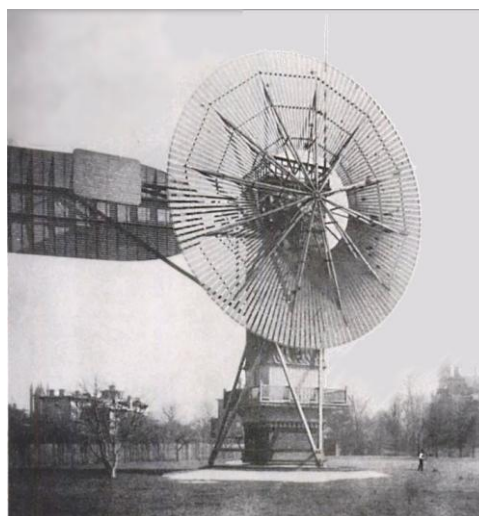
Obr. 1.1 Větrný mlýn v Holandsku [1]

1.1.2 Elektrické větrné stroje

V roce 1831 zásluhou Michaela Faradaye bylo vytvořeno první dynamo (generátor). Nastal přelom využití elektrické energie. Generátory a dynama se běžně začaly připojovat k dalším zdrojům hnací síly. Byla poháněná např. spalovacím motorem, parními stroji, nebo právě větrným kolem. V roce 1887 byla sestrojena historicky první větrná elektrárna na světě. Postavil ji Američan Charles F. Brush v Clevelendu. Jednalo se o samočinnou větrnou turbínu propojenou s generátorem elektrické energie. Průměr rotoru byl 17 m velký a byl složen ze 144 dílů lopatek. Maximální otáčky generátoru činily 500 min^{-1} a při této rychlosti dosahovala elektrárna výkonu 12 kW. [3]



Obr. 1.2 Charles F. Brush [3]



Obr. 1.3 První větrná elektrárna [3]

První větrnou elektrárnu v Evropě se podařilo sestrojít v roce 1891 fyzikovi Poulu la Courovi v Dánsku ve městě Askov. Podobala se konstrukcí větrnému mlýnu a byla tvořena šesti rameny, na kterých byly napnuté plachty. [3]

V České Republice se výroba novodobých větrných elektráren začala objevovat na konci 20. století v letech 1990 – 1995. Do této doby bylo postaveno celkem 24 větrných elektráren, ale celá třetina z nich nevyhovovala potřebě množství větrné energie nebo se u nich vyskytovala vysoká poruchovost. [2]

První uskutečnění pobřežních větrných elektráren se realizovalo v Dánsku v roce 1991, kdy byl postaven větrný park Vindeby (Ravnsborg) s instalovaným výkonem 4,95 MW. Ale opravdový vzrůst nastal o 10 let později stavbou větrných parků Middelgrunden (40 MW) a Horns Rev, který se stal ve své době největším projektem pobřežního větrného parku. Nachází se cca 14-20 km od dánského pobřeží, má celkový instalovaný výkon 160 MW a tvoří ho 80 větrných elektráren s turbínou Vestas V80-2.0 MW. [4]

Hlavní rozmach pobřežních větrných parků byl v posledním desetiletí zaznamenán kromě Dánska také v Irsku, Velké Británii, Švédsku, Finsku, Belgii, Nizozemsku, Německu, Číně a Japonsku. Další země jako USA, Francie, Kanada, Řecko a Tchaj-wan větrné projekty zatím spíše připravují. [4]

1.1.3 Současný stav instalovaného výkonu

V celosvětovém měřítku je Evropa předním lídrem instalovaných pobřežních elektráren. Největší větrná farma na světě je London Array s kapacitou 630 MW a roční produkcí 2500 GWh. Nachází se 20 km od pobřeží North Foreland v Kentu ve Velké Británii a je pojmenovaná po hlavním městě Anglie, protože vyprodukovaná energie z farmy je právě určena do Londýna. Další v pořadí je větrná farma Gwynt y Môr s kapacitou 576 MW. Nachází se nedaleko pobřeží Severního Walesu ve Velké Británii. Produkce této farmy je 1950 GWh ročně a dokáže poskytovat elektrickou energii pro zhruba 400 000 domů. Tím se zabrání uvolňování zhruba 1,7 Mt oxidu uhličitého do ovzduší ročně. Třetí v pořadí je větrná farma Greater Gabbard s kapacitou 504 MW. Je postavena 23 km od pobřeží Suffolku v Anglii. Tato farma se od roku 2013 rozšiřuje o 140 turbín, které farmu obohatí o dalších 504 MW. Dokončení stavby je naplánován v roce 2017. [5]

Další projektové záměry mají v plánu vybudovat více než 100 GW. Cílem Evropské asociace pro větrnou energii je realizace 40 GW instalovaného výkonu do roku 2020 a dalších 150 GW do roku 2030. [4]



Obr. 1.4 Pobřežní větrná farma London Array [5]

Ve Francii vláda rozhodla, že se na jejím pobřeží vybudují přímořské větrné parky s kapacitou 6 GW do konce roku 2020. [4]

Čína měla v květnu 2012 v provozu dva větrné parky na moři. První pobřežní park v Číně Donghai Bridge odstartoval svou produkci v dubnu 2009 v blízkosti Šanghaje. Park je tvořen z 34 větrných elektráren Sinovel 3 MW o celkovém výkonu 102 MW a je schopný zásobovat až 200 000 domácností. Druhý větrný park nese název Longyuan Rudong Intertidal s kapacitou 131 MW. Byl uveden do provozu v roce 2012 a je postaven na pobřeží v blízkosti Ťiang-su.[4]

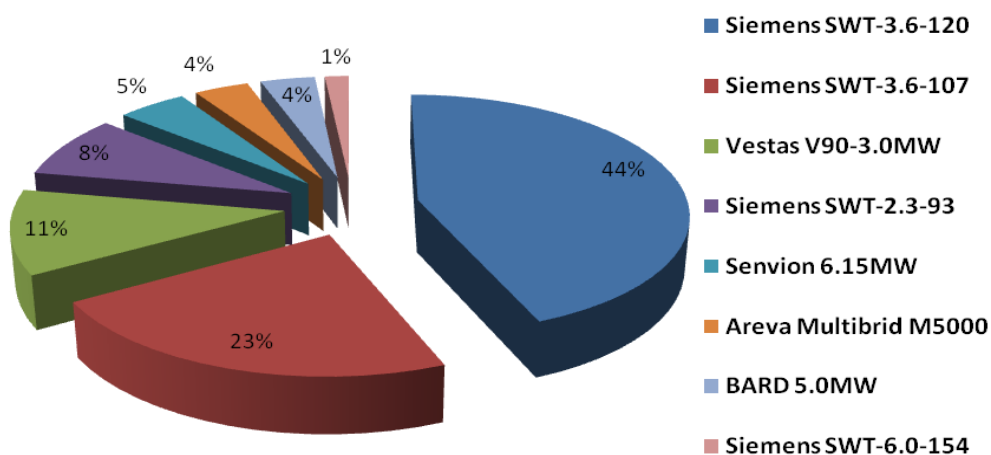
V provincii Ontario v Kanadě je několik vhodných lokalit v oblasti Velkých jezer. Další připravované kanadské projekty jsou u pobřeží Tichého oceánu. [4]

V roce 2012 sice v USA nebyla v provozu žádná pobřežní větrná elektrárna, ale ve stádiu projektu jich je řada a to na východním pobřeží, v oblasti Velkých jezer a pobřeží Tichého oceánu. Hlavním omezujícím faktorem výstavby je výskyt hurikánů a tajfunů a z toho vyplývající rizika zásadního technického poškození. [4]

1.1.4 Stav největších pobřežních větrných parků v Evropě

Větrný park	Kapacita [MW]	Země	Počet turbín [ks]	Typ turbíny	Uvedení do provozu
London Array	630	UK	175	Siemens SWT-3.6-120	2012
Gwynt y Môr	576	UK	160	Siemens SWT-3.6-107	2015
Greater Gabbard	504	UK	140	Siemens SWT-3.6-107	2012
Anholt	400	Dánsko	111	Siemens SWT-3.6-120	2013
BARD Offshore 1	400	Německo	80	BARD 5.0MW	2013
Global Tech I	400	Německo	80	Areva Multibrid M5000	2015
West of Duddon Sands	389	UK	108	Siemens SWT-3.6-120	2014
Walney	368	UK	102	Siemens SWT-3.6-107	2012
Thorntonbank	325	Belgie	54	Senvion 6.15MW	2013
Sheringham Shoal	315	UK	88	Siemens SWT-3.6-107	2012
Borkum Riffgrund 1	312	Německo	78	Siemens SWT-3.6-120	2015
Thanet	300	UK	100	Vestas V90-3.0MW	2010
Nordsee Ost	295	Německo	48	Senvion 6.15MW	2015
Amrumbank West	288	Německo	80	Siemens SWT-3.6-120	2015
Butendiek	288	Německo	80	Siemens SWT-3.6-120	2015
DanTysk	288	Německo	80	Siemens SWT-3.6-120	2015
EnBW Baltic 2	288	Německo	80	Siemens SWT-3.6-120	2015
Meerwind Süd	288	Německo	80	Siemens SWT-3.6-120	2015
Lincs	270	UK	75	Siemens SWT-3.6-120	2013
Humber Gateway	219	UK	73	Vestas V112-3.0MW	2015
Northwind	216	Belgie	72	Vestas V112-3.0MW	2014
Westermost Rough	210	UK	35	Siemens SWT-6.0-154	2015
Horns Rev 2	210	Dánsko	91	Siemens SWT-2.3-93	2009
Rødsand II	207	Dánsko	90	Siemens SWT-2.3-93	2010

Tab. 1.1 Přehled pobřežních větrných parků v Evropě [5]



Graf 1.1 Pobřežní větrné elektrárny podle typu použité turbíny

V grafu 1.1 jsou znázorněny typy turbín, které se používají na stavbu větrných elektráren. Nejrozšířenějším typem je Siemens SWT – 3.6 – 120 (44%)

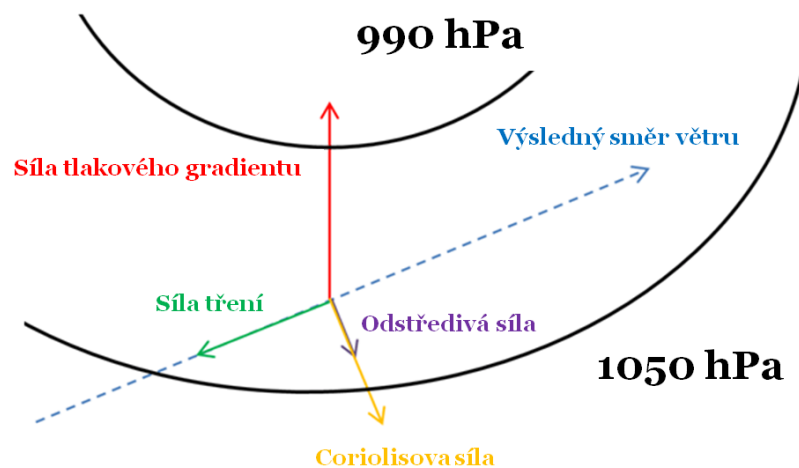
a na druhém místě je turbína od stejné firmy Siemens SWT – 3.6 – 107 (23%).

Z tabulky 1.1 je patrné, že nejvíce rozšířené větrné farmy jsou na pobřeží Spojeného království, Německa, Dánska a Belgie. Spojené království má obrovský větrný potenciál, zejména díky větrnému a dlouhému pobřeží, které ke stavbě větrných farem na moři přímo vybízí. Další vhodnou podmínkou pro stavby na pobřeží je mělké mořské dno.

1.2 Vítr

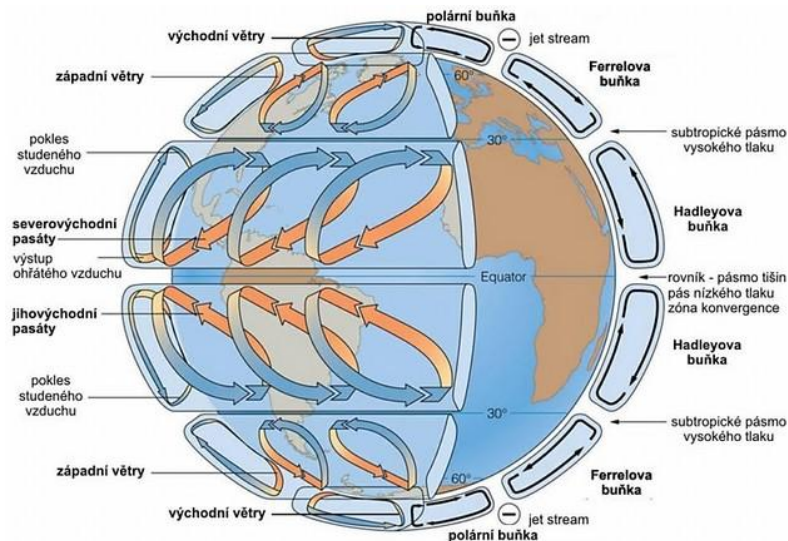
1.2.1 Vznik, směr a síla větru

Vítr vzniká z důvodu nerovnoměrně zahřívání atmosféry na různých částech naší planety. Tím vznikají rozdíly atmosférického tlaku, protože ohřátý vzduch je lehčí oproti studenému vzduchu. Při rozdílných hodnotách tlaku na dvou a více místech vzniká síla tlakového gradientu, která se snaží tyto difference vyrovnat. Obecně lze říci, že vítr fouká z místa, kde je tlaková výše (studený vzduch), do míst kde se vyskytuje tlaková níže (ohřátý vzduch). Dalšími faktory ovlivňující směr větru jsou Coriolisova síla (setrvačná síla zemské rotace), odstředivá síla proudícího vzduchu po určité křivce a síla tření. Komplex výše zmíněných čtyř faktorů nám udává výsledný směr větru. [6]



Obr. 1.5 Síly působící na vzduch na zemském povrchu

Síla větru je závislá na rozdílu atmosférických tlaků – čím větší rozdíly, tím bývá intenzita větru vyšší. V tropickém pásmu je teplota po celý rok stejná a je v něm poměrně stálá tlaková níže, proto v chladnější polovině roku vznikají mnohem větší mezi-šířkové rozdíly atmosférických tlaků. V tomto období je zaznamenán v zásadě četnější a silnější výskyt vichřic, nežli je tomu v létě, kdy není rozdíl polárních teplot oproti rovníku tak markantní. [6]



Obr. 1.6 Cirkulace atmosféry na zeměkouli [29]

1.2.2 Měření větru

Vítr je vektorová veličina, a proto měříme jak směr, tak i jeho rychlost. Směr větru je určen místem odkud vane (světová strana) a udává se v úhlových stupních. Stanovuje se pomocí větrného pytle, jehož postavení se mění se směrem foukajícího větru, nebo ho měříme obvykle anemometrem, jehož součástí je i větrná směrovka. Rychlost je měřena v metrech za sekundu a je možno ji změřit dvěma různými postupy. První postup je jen vizuální a pro porovnávání dosažených výsledků je použita tzv. Beaufortova stupnice rychlosti větru, kterou vytvořil v roce 1805 sir Francis Beaufort. Protože byla stupnice původně vytvořena pro námořní účely, prošla za svoji existenci velkým počtem změn. Největší výhodou této metody měření rychlosti větru je její jednoduchost bez použití drahých měřících přístrojů. [7]

Stupeň	Rychlost větru [m/s]	Slovní označení	Znaky na souši	Znaky na moři
0	0 - 1	Bezvětří	Kouř stoupá svisle vzhůru	Moře je zrcadlově hladké
1	0,3 - 1,5	Vánek	Kouř už nestoupá úplně svisle, korouhev nereaguje.	Malé šupinovitě zčežené vlny bez pěnových vrcholků
2	1,6 - 3,3	Větřík	Vítr je cítit ve tváři, listí šelestí, korouhev se pohybuje.	Malé vlny, ještě krátké, ale výraznější, se sklovitými hřebeny, které se nelámou.
3	3,4 - 5,4	Slabý vítr	Listy a větvičky v pohybu, vítr napíná prapory.	Hřebeny vln se začínají lámat, pěna převážně skelná. Ojedinelý výskyt malých pěnových vrcholků.
4	5,5 - 7,9	Mírný vítr	Vítr zvedá prach a papíry, pohybuje větvičkami a slabšími větvemi.	Vlny ještě malé, ale prodlužují se. Hojný výskyt pěnových vrcholků.
5	8,0 - 10,7	Čerstvý vítr	Hýbe listnatými keři, malé stromky se ohýbají.	Dostí velké a výrazně prodloužené vlny. Všude bílé pěnové vrcholy, ojedinelý výskyt vodní tříště.
6	10,8 - 13,8	Silný vítr	Pohybuje silnějšími větvemi, telegrafní dráty sviští, používání deštníku se stává obtížným.	Velké vlny. Hřebeny se lámou a zanechávají větší plochy bílé pěny. Trochu vodní tříště.
7	13,9 - 17,1	Mírný vichr	Pohybuje celými stromy, chůze proti větru obtížná.	Moře se bouří. Bílá pěna vzniklá lámáním hřebenů vytváří pruhy po větru.
8	17,2 - 20,7	Čerstvý vichr	Láme větve, vzpřímená chůze proti větru je již nemožná.	Dostí vysoké vlnové hory s hřebeny výrazné délky od jejich okrajů se začíná odtrhávat vodní tříšť, pásy pěny po větru.
9	20,8 - 24,4	Silný vichr	Vítr působí menší škody na stavbách (strhává komíny, tašky ze střechy).	Vysoké vlnové hory, husté pásy pěny po větru, moře se začíná valit, vodní tříšť snižuje dohlednost.
10	24,5 - 28,4	Plný vichr	Na pevnině se vyskytuje zřídka, vyvrací stromy a ničí domy.	Velmi vysoké vlnové hory s překlápějícími a lámajícími se hřebeny, moře bílé od pěny. Těžké nárazovité valení moře. Viditelnost ztlačně omezena vodní tříští.
11	28,5 - 32,6	Vichřice	Rozsáhlé zpuštění plochy.	Mimořádně vysoké pěnové hory. Dohlednost znehodnocena vodní tříští.
12	32,7 a více	Orkán	Ničivé účinky odnáší domy, pohybuje těžkými hmotami.	Vzduch plný pěny a vodní tříště. Moře zcela bílé. Dohlednost velmi snížena. Není výhled.

Tab. 1.2 Beaufortova stupnice rychlosti větru [30]

Druhý postup měření rychlosti větru je prostřednictvím již zmíněného přístroje anemometru. Dokáže změřit rychlost i směr větru a bývá součástí každé meteorologické stanice. Tento přístroj se připojuje na záznam, který se nazývá anemograf. Rychlost větru se měří běžně v desetimetrové výšce. Důležitost měření větrných podmínek v souvislosti s větrnými elektrárnami spočívá v tom, že příznivé podmínky pro výrobu elektrické energie jsou kolem 12 m/s rychlosti větru. Kritické okolnosti nastávají, pokud vítr přesáhne rychlost 25 m/s, kdy je elektrárna ohrožena jejím poškozením. Proto se při dosažení kritického bodu elektrárna odpojuje. Při rychlostech pod 3 m/s se větrný rotor ani neroztočí. [7]

1.2.3 Výpočet energie a výkonu

Vztah pro výpočet kinetické energie E tělesa, které se volně pohybuje rychlostí v a má hmotnost m .

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

Hmotnost vzduchu vypočítáme dle vztahu (2), kde ρ je hustota vzduchu, A je plocha, s je dráha, kterou vzduch urazí a V je objem vzduchu.

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

Po dosazení rovnice (3) do rovnice (1), získáme vztah pro výpočet energie větru, procházejícího plochou A . Výsledek dostaneme v joulech [J].

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

Přepočteme energii větru E v joulech [J] na výkon P ve watech [W] pomocí všeobecně známého vztahu pro převod mezi E a P .

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

Rovnice po úpravě:

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

Rovnice (3) nebo (5) vyjadřují, že energie (výkon) větru je přímo závislá na hustotě proudícího vzduchu a třetí mocnině jeho rychlosti. Z toho vyplývá, že malé změny v rychlosti větru nám vyvolají velké změny energie větru.

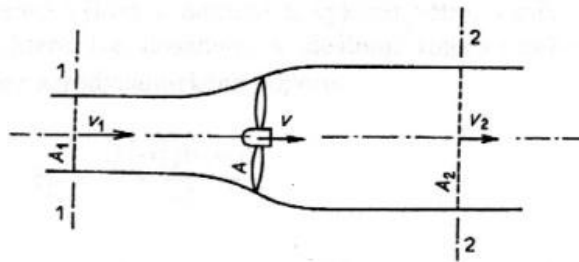
V praxi se dlouhodobější charakteristiky energie větru stanovují z větrné mapy, kde jsou znázorněny průměrné hodnoty hustoty vzduchu v měřených lokalitách a nadmořských výškách.

2 Fyzikální princip funkce větrné elektrárny

Kinetická energie větru, která působí na lopatky rotoru, je přeměněna pomocí turbíny na mechanickou rotační energii. Vzniklá mechanická energie roztáčí generátor, který vyrábí elektrickou energii.

2.1 Výpočet účinnosti

Problematiku jsem převzal z knihy *Větrné motory a elektrárny*. [8] Na obrázku 2.1 je ukázka proudu větru, který protéká ideálním rotorem. Horizontální směr je vymezen dvěma plochami 1 a 2. Každá plocha má svoji rychlost v_1 a v_2 s průřezem A_1 a A_2 .



Obr. 2.1 Proud vzduchu procházející rotorem [8]

Prostorem, který je omezen proudovými plochami, není přenášena hmota ani energie, proto platí rovnice kontinuity:

$$v_1 \cdot A_1 = v \cdot A = v_2 \cdot A_2 \quad (6)$$

Axiální sílu působící na rotor lze odvodit ze zákona o zachování hybnosti:

$$F_a = \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \quad (7)$$

Výkon:

$$P = F_a \cdot v = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) \quad (8)$$

Výkon, který je vypočten z kinetické energie proudu, protékajícího plochou za určitý čas:

$$P = \frac{\Delta E}{t} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (9)$$

Porovnáním rovnic (8) a (9) vyplývá:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (10)$$

Axiální síla působící na rotor:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (11)$$

Výkon rotoru:

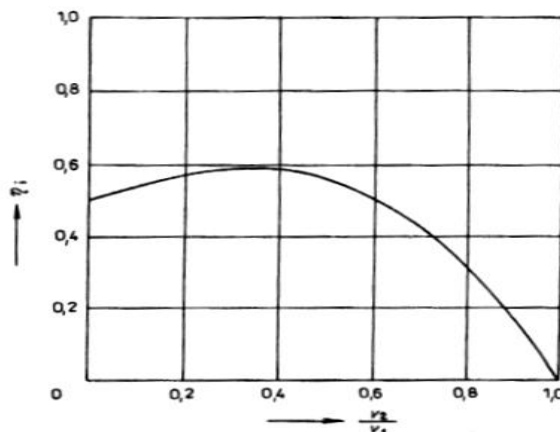
$$P = \frac{1}{4} \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2) \quad (12)$$

Porovnáme-li výkon rotoru v poměru k výkonu větru, dostaneme ideální účinnost:

$$\eta_i = \frac{(v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2)}{2v_1^3} \quad (13)$$

Maximálně dosažitelná ideální účinnost (Betzova) je získána derivováním funkce podle proměnné v_2 . Při $v_2/v_1=1/3$:

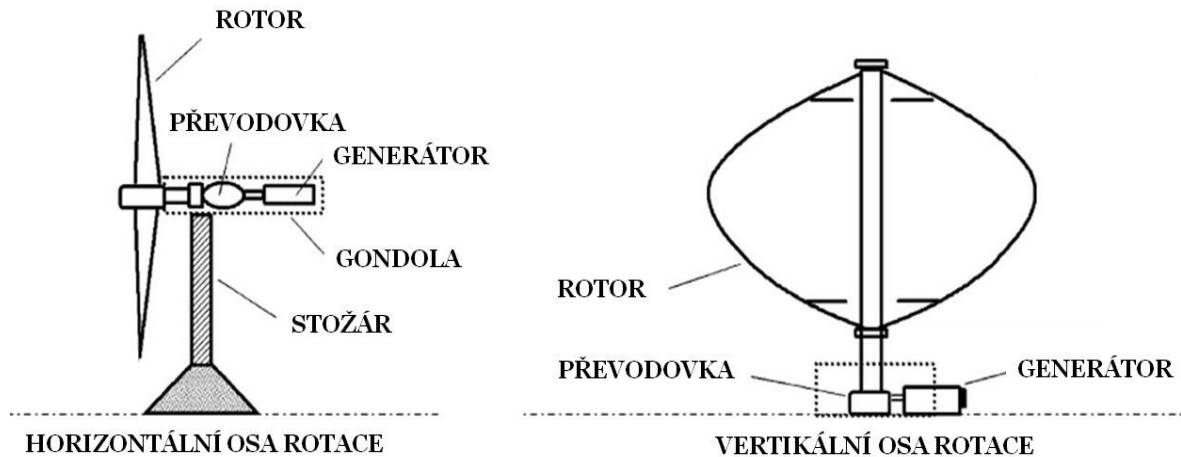
$$\eta_i = \frac{16}{27} = 0,592 \quad (14)$$



Obr. 2.2 Závislost ideální účinnosti na poměru rychlosti za rotorem a před ním (v_2/v_1) [8]

2.2 Základní části větrné elektrárny

Na obrázku 2.1 je znázorněno uspořádání částí větrné elektrárny jak pro horizontální, tak i pro vertikální rotaci turbíny.



Obr. 2.3 Základní části větrné elektrárny

2.2.1 Rotor

Základní rozdělení rotoru se běžně provádí podle aerodynamického principu funkce rotoru (odporové a vzlakové) a podle osy rotace (horizontální a vertikální).

2.2.1.1 Větrné rotory pracující na odporovém principu

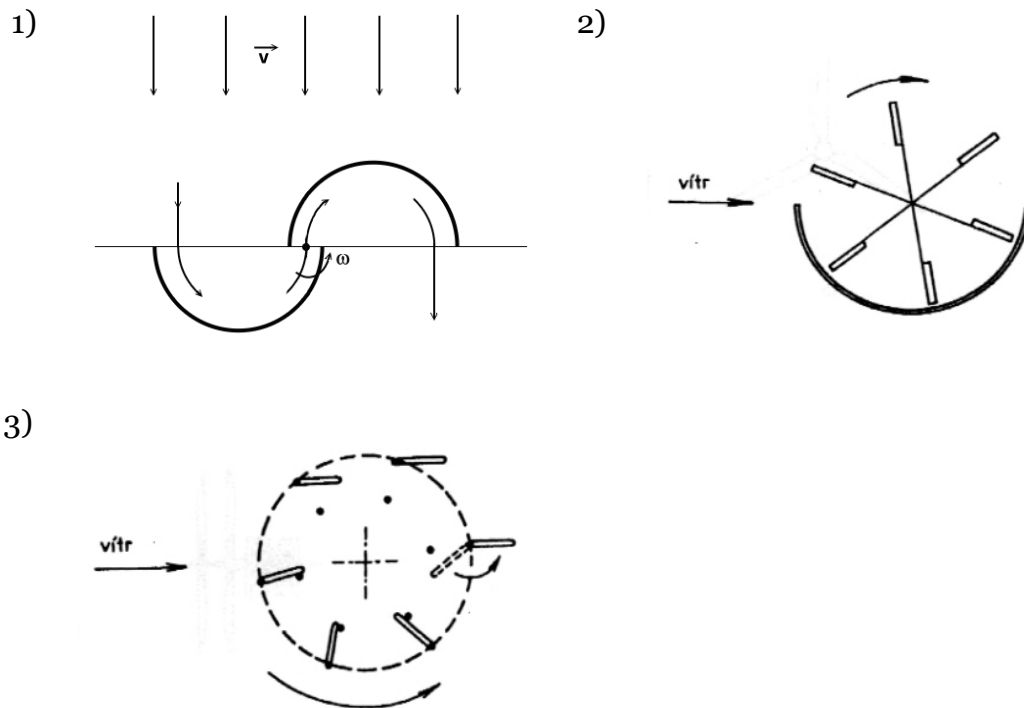
Tyto rotory jsou historicky nejstarší a jejich osa otáčení může být horizontální i vertikální. V současné době se téměř nevyužívají, protože jejich účinnost je velmi malá. Hlavní podstata funkce je, že na plochu nastavenou proti větru působí aerodynamický odpor, který tok vzduchu zbrzdí a na plochu listu rotoru je vyvinutá síla, která vytváří rotační pohyb. Rychlost otáčení je vždy menší, než je rychlost proudícího vzduchu a plocha rotoru se pohybuje se směrem větru. Problém nastává v případě, že proud vzduchu změní jeho směr a je zapotřebí dostat rotor do výchozí polohy. [8]

Rozdělení větrných rotorů založených na odporovém principu:

- Plocha rotoru je vytvářena tak, že proud vzduchu, který na ní působí, vytváří

různý odpor v závislosti na směru jeho pohybu. Nejnámějším motorem pracujícím na tomto principu je Savoniův rotor, který má dvě půlválcové plochy o kruhové základně. Dutá plocha ve směru proudění vzduchu klade 3 – 4 krát větší odpor než vypuklá část. Účinnost tohoto rotoru je malá (do 23 %), ale náklady jsou oproti moderním strojům zanedbatelné. [8]

- Část plochy rotoru je v zákrytu, který se otáčí ve směru působícího větru.
- Plocha rotoru mění svoji velikost v závislosti na směru působení proudu vzduchu. Pokud je ve směru působení, chceme, aby byla plocha co největší a v protisměru co nejmenší. Zde se využívá principu automaticky natáčivých lopatek nebo s říditelným otáčením lopatek rotoru.



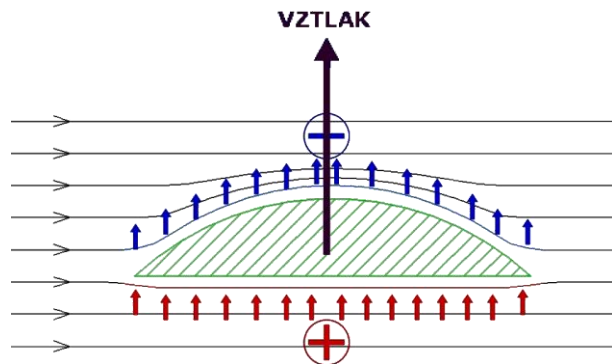
Obr. 2.4 1) Savoniův rotor 2) Rotor s krycím štítem 3) Rotor s natáčivými lopatkami [8]

2.2.1.2 Větrné rotory pracující na vztlakovém principu

Vznik dynamické vztlakové síly

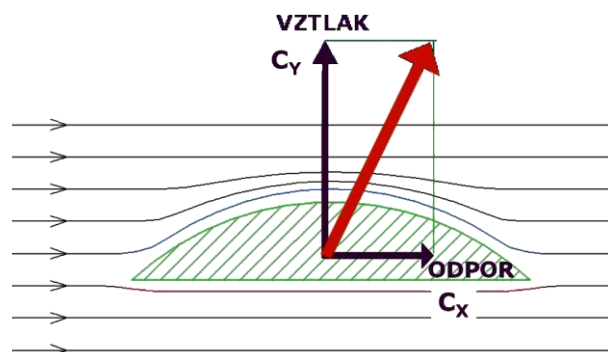
Abychom mohli s největší účinností využít aerodynamických účinků větru působících na lopatky rotoru, musíme lopatky vhodně tvarovat. Speciálně vytvořený profil je navržen tak, aby list obtékáný vzduchem vyvinul dostatečnou vztlakovou sílu pro roztočení rotoru turbíny.

V trubici, ve které proudí plyn, dochází k zásadní změně v místě zúžení. Tlak klesá a naopak rychlost proudu vzduchu stoupá. V širším místě trubice je tlak vyšší, ale rychlost proudění vzduchu menší. [9]



Obr. 2.5 Výslednice dvou tlakových polí [9]

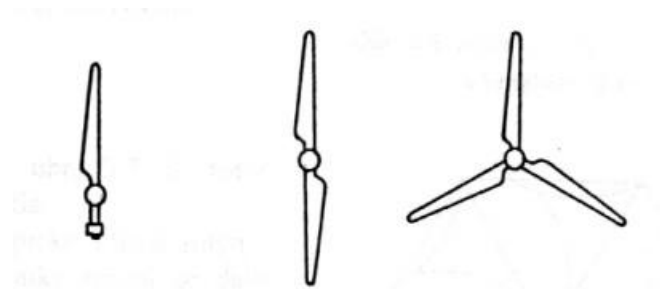
Z obrázku 2.5 a z uvedené teorie vyplývá, že kratší proudnice pod objektem má menší rychlost než delší proudnice nad objektem. To znamená rozdíl tlaků. Pod objektem se vytváří přetlak a nad objektem podtlak. Sečtením těchto dvou polí vznikne výsledná vztlaková síla s přesnou velikostí a orientací. V praxi působí na profil samozřejmě i odporová síla, která je ale mnohonásobně menší, než vztlaková síla. Výslednice je pak dána vektorovým součtem těchto sil. [9]



Obr. 2.6 Vektorový součet vztlakové a odporové síly [9]

Vrtule

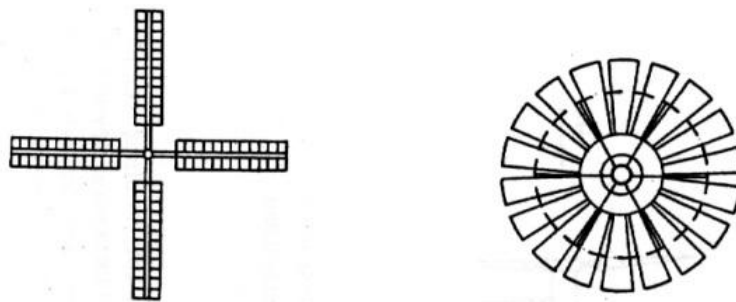
Jsou to rychloběžné rotory pracující na vztlakovém principu s horizontální osou rotace, které mají rovinu otáčení kolmo na směr proudění větru. Vrtule se v praxi provádí nejčastěji ve tří-lopátkovém nebo dvoulopátkovém provedení. Speciálním druhem jsou vrtule s jednou lopatkou, které mají na druhé straně protizávaží. Pro hladší rozběh, regulaci výkonu či otáček, aerodynamické brzdění se vyrábí lopatky, které umožňují natáčení po své celé podélné ose. Účinnost vrtulových rotorů může dosahovat až 59 %. [8]



Obr. 2.7 Jedno, dvou a tří-lopátková vrtule rotoru [8]

Větrná kola

Větrná kola jsou pomaloběžné rotory s horizontální osou rotace, které mají namísto vrtulových lopatek obyčejné plechové lopatky a jejich počet je podřízený požadovanému výkonu či rychlosti rotace. Zachováme-li stejný průměr rotoru, tak jeho frekvence otáčení je nepřímo úměrná počtu lopatek. Více větrných lopatek znamená, že se rotor bude lépe rozbíhat a bude mít větší činitel momentu, ale tím bude mít menší rychloběžnost. Účinnost větrných kol se pohybuje mezi 19 % až 43 %.



Obr. 2.8 Typická větrná kola [8]

Rychloběžnost a počet listů rotoru

Předpokládejme větrnou elektrárnu s rotorovým průměrem 100 m a otáčkami 20 ot/min při větrné rychlosti 15 m/s. Orientační výpočet koeficientu rychloběžnosti rotoru λ bude následující:

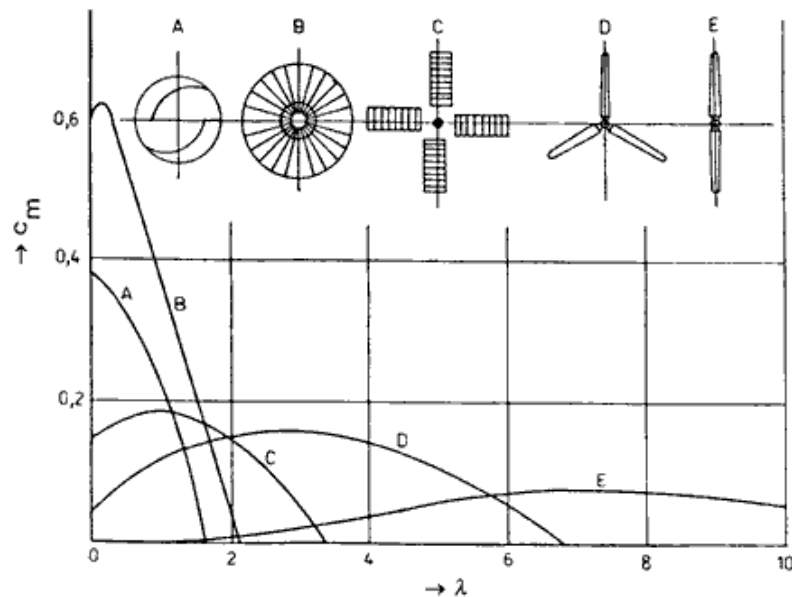
$$\lambda = \frac{U_v}{v} = \frac{\pi \cdot D \cdot \frac{n}{60}}{v} = \frac{\pi \cdot 100 \cdot \frac{20}{60}}{15} \cong 7 \quad (15)$$

U_v – rychlost konce listu při otáčení

v – rychlost větru

D – rotorový průměr

n – otáčky za minutu



Obr. 2.9 Činitel momentu v závislosti na rychloběžnosti [8]

Ideální rotor by byl složen z nekonečně mnoho lopatek a měl nulový odpor. Při takových parametrech by měl rotor maximální teoreticky možnou účinnost. Říkáme ji Betzova účinnost a je stanovena na 59,3 %. V grafu by to byla vodorovná přímka na hranici 0,593 činitele momentu.

Z grafu je patrné, že rychloběžné vrtule s malým počtem rotorových listů mají velký činitel rychloběžnosti, ale poměrně malý činitel momentu. U větrných kol složených z více lopatek je tomu naopak.

Rotor Darrieus

Jedná se o rychloběžný vztlakový rotor s vertikální osou rotace, který si nechal patentovat francouzský inženýr Georges Jean Marie Darrieus. Rotor se vyrábí v 1 až 4 listém provedení, který má tvar trojúhelníku, řeckého písmene pí nebo písmene H. Jsou vhodné spíše do přímořských krajů, protože pro svoji činnost potřebují silnější a rychlejší vítr. Účinnost těchto moderních větrných elektráren dosahuje 35 – 38 %.



Obr. 2.10 Darrierův rotor ve tvaru pí [31]

2.2.2 Gondola

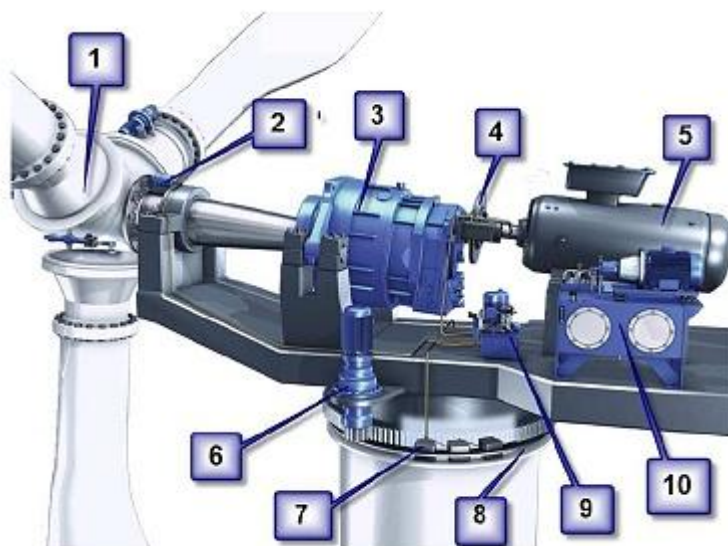
Gondola je sklolaminátový kryt pro strojovnu větrné elektrárny, kde se zpravidla nachází převodovka, generátor, brzda, systém pro natáčení lopatek a aretace natáčení gondoly.

2.2.2.1 Strojovna

Strojovna má za úkol přenášet výkon od rotoru ke generátoru pomocí převodovky, která zvyšuje otáčky a ty pohání generátor, který vyrábí střídavý elektrický proud. Brzda, která se nachází mezi převodovkou a rotorem, dokáže během krátké chvíle zabrzdit ústrojí rotoru. Pro natáčení celé gondoly podle potřeb

směru větru jsou na rámu strojovny umístěny pohony. Brzdný systém, natáčení gondoly či lopatek rotoru je obvykle ovládán hydraulickým a elektronickým systémem. [10]

Na obrázku 2.9 je zjednodušený model strojovny větrné elektrárny. Uspořádání hlavních komponentů se trochu liší podle výrobce.



Obr. 2.11 Strojovna větrné elektrárny : 1 – systém natáčení lopatek rotoru; 2 – brzda; 3 – převodovka; 4 – spojka generátorové hřídele; 5 – generátor; 6 – systém natáčení gondoly; 7 – brzda točny gondoly; 8 – ložisko točny gondoly; 9, 10 – hydraulický systém [32]

2.2.2.2 Rám strojovny

Po lopatkách rotoru a převodovce je rám strojovny nejsložitějším prvkem větrné elektrárny, který navrhují konstruktéři ocelových konstrukcí. Musí odolávat statickým silám dané konstrukcí a dynamickým silám větru. Značně velká část síly, která není užitečná a nepřevádí se na elektrickou energii, se přenáší na gondolu přes nosné ložisko. Pro optimální rozložení sil a zajištění pevnosti konstrukce rámu se obvykle volí tzv. U-profil. Délka profilu je kolem 6 m, která pokryje potřebu osazení všech komponentů ve strojovně. Celek rámu je složen z menších konstrukčních prvků (základní rám, nosník regulačního kormidla, pracovní plošina, plošina otočného věnce a ložiskové bloky), které se vhodně svařují k sobě. [11]

2.2.2.3 Hřídel rotoru

Hřídele větrných elektráren se musejí mnohonásobně naddimenzovat, protože zde hraje důležitou roli moment setrvačnosti, v případě nutnosti zabrzdění rotujícího kola. Příkladem může být osa osobního automobilu, která přenáší na jeho kola výkon 55 kW. Ve srovnání s hřídelí větrné elektrárny o výkonu 1 kW je osa osobního automobilu příliš slabá a nápor setrvačných sil rotoru neunes. K největším výrobcům rotorových hřídelí pro český i světový trh se řadí Česká Republika. [11]



Obr. 2.12 Hřídel rotoru vyrobená ve firmě Vítkovice Steel [10]

2.2.2.4 Převodové ústrojí

Převodovka vyrovnává rozdíl otáček a momentových sil mezi rotorem a generátorem. Generátory mají obvykle otáčky v pracovním režimu 1000, 1500 nebo 3000 ot/min, pomaloběžné rotory 30 – 80 ot/min a rychloběžné rotory 5 – 20 ot/min. Podíl otáček před a za převodovkou se nazývá převodový poměr, který se pohybuje v rozmezí 1:12 – 1:200. Při přenášení velkých výkonů se volí několikastupňové planetové převodovky. Vyrábějí se rozmanité konstrukce podle konkrétního typu větrné elektrárny. Obvykle jsou to převodovky s ozubenými koly, řetězové převody, ploché řemenice nebo klínové řemenice. Soupis technických požadavků, které se používají při návrhu a určení typu převodového ústrojí, je následující:

- Maximum přeneseného točivého momentu
- Požadavek na převodový poměr
- Frekvence a druh zatížení

- Nároky na klidný běh
- Účinnost
- Vhodné montážní předpoklady

Doplňková kritéria:

- Odolnost nepříznivého počasí
- Životnost
- Údržba
- Cena

Nejlépe vyhovující převodové ústrojí je ozubená převodovka, která dosahuje účinnosti kolem 98 % při jmenovitém zatížení. [11]

2.2.2.5 Generátor

Jedná se o točivý stroj, využívající točivého magnetického pole vytvořeného v rotoru, které indukuje v cívkách statoru elektrické napětí. Z mechanického hlediska je přimontování a připojení generátoru vcelku snadná úloha. Zvolí se vhodný převodový poměr tak, aby splňoval jmenovité otáčky a tím i požadovaný výkon. V dnešní době se používají jak synchronní, tak asynchronní generátory, podle typu a návrhu větrné elektrárny. Začínají se objevovat i více-pólové generátory pracující na pomaloběžném principu, ale tyto stroje jsou drahé.

2.2.2.6 Brzda

Instalace brzdy je vhodná při potřebě údržby či montáže ve strojovně. Tyto práce se i přesto provádějí při slabém nebo žádném větru. Ve strojovně je brzda umístěna před či za převodovkou. V případě umístění za převodovkou, je síla točivého momentu mnohonásobně menší než na hlavní hřídeli rotoru, v závislosti na převodovém poměru. Proto je na hřídel rotoru a převodové ústrojí vyvíjen obrovský tlak a je vhodné brzdou umístit přímo na náboj rotoru, nebo hlavní hřídel rotoru. [11]

2.2.2.7 Systém natáčení gondoly

Celá gondola a rotor větrné elektrárny se natáčí se směrem větru. Strojovna se usazuje na otočné kuličkové ložisko, které má na vnější straně ozubené kolo. Toto kolo se připevňuje přímo na stožár a elektropohony umístěné ve strojovně mnohou otáčejí gondolou podle potřeby směru. Zpravidla se používají 2, 4 nebo 6 elektropohonů podle velikosti větrné elektrárny.



Obr. 2.13 Elektropohon pro natáčení gondoly [10]

2.2.2.8 Stožár

V dnešní době se stavějí průmyslové stožáry s průměrnou výškou od 30 do 100 m, ale mohou dosahovat i větších rozměrů. Nejčastěji používaný typ pro evropský trh je ocelový tubusový stožár, který se skládá z cca 20 m dlouhých dílů. Je rozdělen pro snadnější manipulaci a transport na místo stavby. Jednotlivá část je zhotovena z plechových desek ve tvaru prstence, které se při stavbě stožárů k sobě svařují. [12]



Obr. 2.14 Segment tubusového stožáru [12]

U stožárů které přesahují výšku 100 m, se často využívají tzv. příhradové stožáry. Stavba tohoto typu se provádí až na místě, proto odpadají problémy s přepravou jednotlivých částí, jako je tomu u tubusových stožárů. [12]

V případě montáže větších větrných farem se vyplatí stavba betonového stožáru, protože je ekonomicky výhodné vyrábět beton pro velký počet větrných elektráren z jedné místní betonárky. Vyrábějí se tzv. segmentové prstence, které se na místě stavby skládají dohromady. [12]



Obr. 2.15 Příhradový stožár [12]



Obr. 2.16 Betonový stožár [12]

2.2.2.9 Základ

Dosti opomíjenou problematikou v oblasti stavby větrných elektráren je jejich základ. Před samotnou instalací těla VtE se musí několik týdnů předem vybudovat betonový základ. Tato část je nejméně vidět, ale přitom je nejhmotnější a váží až čtyřnásobek samotného těla VtE. [13]

Před výstavbou je důležitý průzkum terénu kvůli stabilitě prostředí půdy. Mnohdy je nutno upravit podloží např. když je místní zeminou spraš. Má totiž tendenci ve styku s vlhkostí měnit svůj objem a to až o 12 %. V takových případech je zapotřebí zhutnit podkladové spáry tím, že se promíchají s cementem. Musí se odebrat až 60 cm hloubky půdy. Tato promíchaná půda s cementem vytvoří pevnou základovou spáru. [13]

Pro představu hmotnosti a rozměrů betonového základu zde uvádím parametry větrné elektrárny VESTAS V90 o jmenovitém výkonu 2 MW: [13]

Gondola:

- Hmotnost – 67 tun

Rotor:

- Průměr – 90 m
- Hmotnost – 37 tun

Stožár:

- Ocelový tubus – 104 m
- Hmotnost – 224 tun

Betonový základ:

- Rozměry – 15,8 x 15,8 m, výška 1,9 m
- 500 m³ betonu
- 1103 tun betonu
- 39 tun ocelových výztuží



Obr. 2.17 Betonový základ větrné elektrárny [13]

3 Technické prostředky pobřežní větrné elektrárny

S rostoucím zájmem o využívání obnovitelných zdrojů energie se kladou i větší nároky na technické řešení větrných elektráren. V případě pobřežních VtE se klade důraz na využití co největší kapacity větru, vhodnou lokalitu (mělké moře, dostupnost pro stavební prostředky), vhodné připojení k elektrizační soustavě a vzdálenost větrné farmy od pevniny. V dnešní době je potenciál VtE na pevnině téměř vyčerpaný, proto si myslím, že je ve stavbě větrných farem na moři budoucnost.

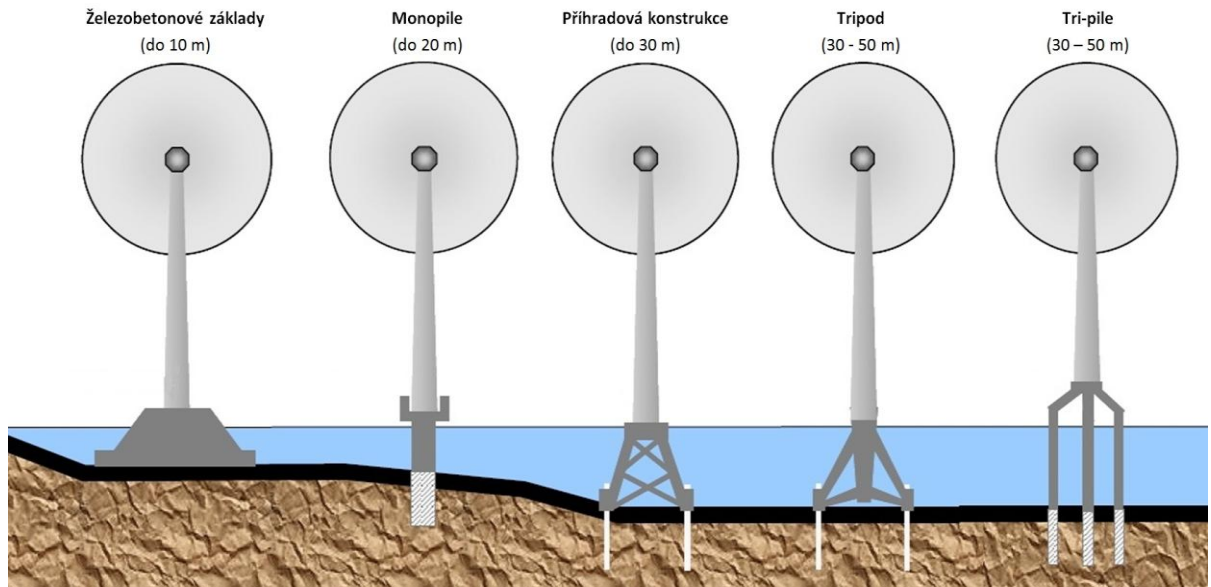
3.1 Názvosloví

Základem pro anglické pojmy, které se běžně v praxi využívají, je slovíčko SHORE. V doslovném překladu znamená břeh či pevnina. Přidáním vhodné předložky vznikne následující rozdělení větrných elektráren:

- Offshore – přímořský typ větrné elektrárny
- Onshore – vnitrozemský typ větrné elektrárny
- Nearshore – pobřežní větrná elektrárna postavená v mělké vodě
- Deep offshore - plovoucí větrná elektrárna postavená v hluboké vodě

3.2 Základové konstrukce

V současnosti jsou technologie pro základové konstrukce offshore elektráren usazovány do nepřítliš hluboké vody a to od 10 do 50 m hloubky moře. Jejich minimální životnost představuje 20 let a musejí odolávat agresivním vlivům slané vody, mořským vlnám, silnému větru a v neposlední řadě i mořským proudům. Podle hloubky vody, do které instalujeme větrnou elektrárnu, se nejčastěji používá 5 typů základových konstrukcí – železobetonové základy, monopile, příhradové konstrukce, tripod a tri-pile. [4]



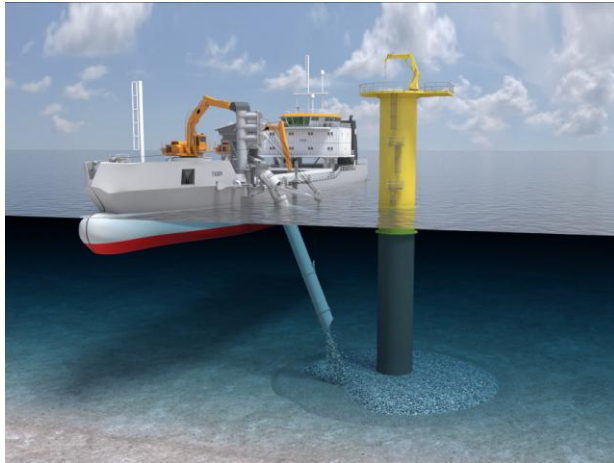
Obr. 3.1 Typy základových konstrukcí offshore VtE [13]

3.2.1 Železobetonové základy

Tyto základy se používají především v mělčinách a to do cca 10 m hluboké vody. Jejich skladba spočívá v masivním betonovém bloku usazeném přímo na mořském dně, na jehož hřbetě je umístěno ocelové tělo přímořské větrné elektrárny. Zásadními výhodami těchto základů je jejich cena za výstavbu a menší složitost při montáži. Jsou však limitovány nízkou hladinou mořského dna.

3.2.2 Monopile

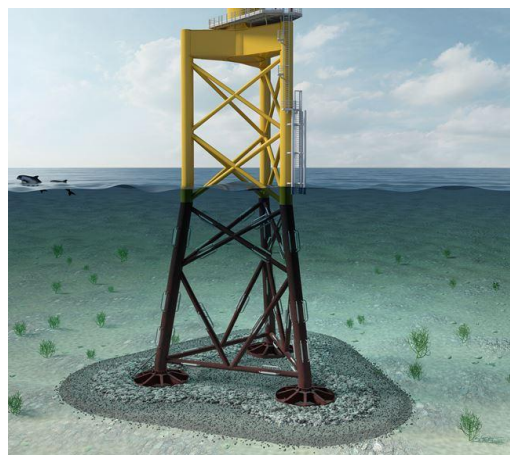
Základy typu monopile jsou určeny především do hloubky zhruba 20 m. Současné moderní technologie umožňují tuto hranici překonávat, ale při větší hloubce je vhodnější volit základy k tomu určené. Jedno-bloková konstrukce je složena z ocelové duté trubky o průměru od 4 do 8 m. K ukotvení do mořského dna je zapotřebí speciálního hydraulického kladiva, které konstrukci zatluče. Jedná se o nejběžněji dnes používaný typ základů pro Evropské offshore větrné parky do 3 MW. Jejich předností je celkem rychlá a snadná montáž. Navíc robustnost ocelového bloku je silně odolný proti podpovrchovým erozím či nárazům cizích objektů. Mezi nevýhody tohoto typu konstrukce patří, že je zapotřebí mnoho oceli a nedají se ukotvit na skalnaté podloží mořského dna. [4]



Obr. 3.2 Konstrukce typu monopile [33]

3.2.3 Příhradová konstrukce

Příhradové konstrukce se používají do hloubky 30 m a její vzhled je obdobný stožárům venkovního vedení vysokého a velmi vysokého napětí. Jedná se o 3 až 4 pilíře zakotvené do mořského dna, na kterých je usazena příhradová konstrukce. Konstrukteři se mohli inspirovat z oblasti ropného průmyslu, kde se tyto konstrukce hojně využívají i do větších hloubek. Hlavním smyslem je odlehčení použité oceli na výstavbu. Oproti monopile konstrukci lze ušetřit 40 až 50 % materiálu. Díky tomu je možno jednotlivé díly základů sestavit na pevnině a po větších částech převážet pomocí konstrukční lodi na místo stavby. Značnou nevýhodou je nízká odolnost proti nárazům. [4]



Obr. 3.3 Příhradová konstrukce [34]

3.2.4 Tripod

Tripod je název inspirovaný stativy pro fotoaparáty, protože je jím funkčně i vzhledově velmi podobný. Tyto základy jsou použity v hloubce přesahující hranice 30 m. Jsou vyrobeny z kulatých ocelových trubek menšího průměru, které se sestaví a svařují k sobě tak, aby vznikl stabilní tripod. Jejich největší předností je, že se dají využívat v případě písčitého mořského dna. Pro skalnaté podloží se naopak nehodí.



Obr. 3.4 Konstrukce typu tripod [35]

3.2.5 Tripile

Konstrukce tripile je zjednodušeně řečeno spojení tří monopile konstrukcí dohromady, které jsou pod vodou ukotveny. Stejně jako tripod je vhodný do větších hlubin nad 30 m. Limit hloubky mořského dna je někde kolem 50 m. Na výstavbu je použito mnoho tun oceli, proto se prodraží. Na druhou stranu může být konstrukce upravena tak, aby vyhovovala lokalitě i geologickému podloží.



Obr. 3.5 Konstrukce typu tripile [36]

3.3 Ochrana před korozí

Jak už bylo zmíněno, větrné elektrárny postavené na moři, by měly odolávat agresivním účinkům slané vody, aby se zpomalil proces oxidace a stárnutí ocelových konstrukcí. Tento problém řeší použití speciálních ochran a nátěrů:

- Elektrochemické katodové ochrany
- Žárové pokovování
- Akrylátový nátěr
- Epoxidový nátěr
- Siloxanový nátěr
- Polyuretanový nátěr

3.3.1 Elektrochemická protikorozní ochrana

Pro prevenci ocelových konstrukcí se používá katodová ochrana galvanickou anodou. Hlavní výhodou této metody je, že není potřeba zdroje stejnosměrného proudu. Propojíme-li dvě odlišné kovové složky a uložíme do příhodného elektrolytu (mořská voda), tak bude kov, který má zápornější korozní potenciál (anoda) pro daný elektrolyt chránit kov s méně záporným potenciálem (katoda) – říkáme obětovaná anoda.

Pro prostředí mořské vody se jako anoda nejčastěji používá hliník, protože jeho samovolný korozní proces není příliš rychlý, ale zároveň není ani pasivní. Další vhodný materiál do vodního prostředí je hořčík a zinek. Nevýhodou obětovaných anod spočívá v tom, že se musí po vyčerpání ochranného potenciálu (úbytek materiálu) vyměnit.

3.3.2 Žárové pokovení

Jedná se o nejstarší způsob dosažení kovového povlaku. Je využíván pro jeho snadnou aplikaci, ekonomickou výhodnost oproti galvanickému pokovení a dostatečnou tloušťkou nánosu s malou pórovitostí. Nutnou podmínkou aplikace je, že chráněný kov musí mít vyšší tavicí teplotu nežli kov ochranný.

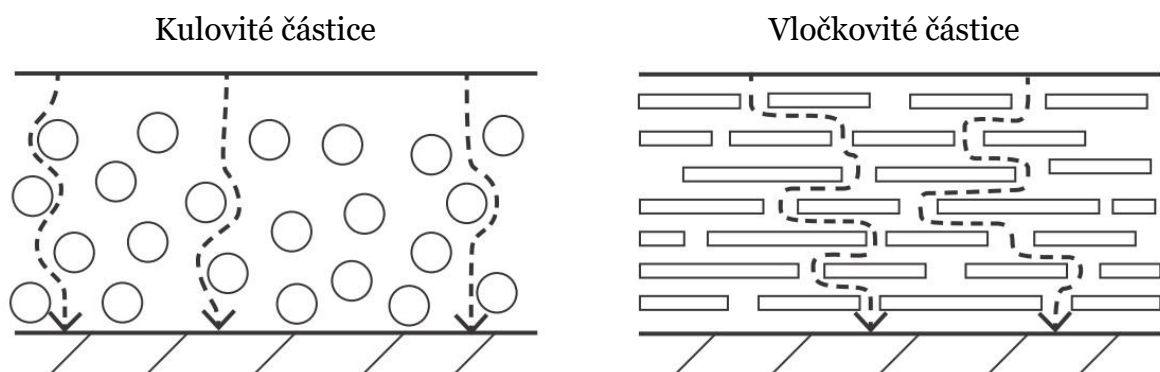
K zajištění důkladného nánosu je zapotřebí, aby byl povrch pokovovaného materiálu co nejčistší a aby měl dobrou smáčivost. Nejdříve se za pomoci moření odstraní oxidy železa tzv. okuje z povrchu kovu, který chceme pokovovat. Poté se nechají působit tavidla, která vážou povrchové nečistoty a zajišťují vhodnou smáčivost. Když je materiál takto ošetřen, může se přejít k vlastnímu pokovení. Pro materiály určené do mořské vody se používá žárové pokovení zinkem a hliníkem, nebo jejich slitiny.

3.3.3 Nátěry

Další vhodnou volbou v oblasti protikorozní ochrany jsou ochranné nátěry. Jsou často aplikované kvůli jejich obnovitelnosti, dostupnosti a ekonomické přijatelnosti. Používá se systém tvořený ze základního nátěru hmoty, který obsahuje antikorozi pigment a je dobře přilnavý na kov a z vrchního nátěru, který je odolný proti UV záření a klimatickým podmínkám. Ochranný nátěr má tedy antikorozi funkci a bariérový efekt. [14]

3.3.3.1 Bariérový efekt

Vrchní nátěr má za úkol zabránit pronikání vnějších činitelů k základovému nátěru a rychlost průniku je závislá na jeho tloušťce. Čím větší vrstva, tím je bariérový efekt větší. Dalším ukazatelem rychlosti difuze korozních činitelů skrze nátěr je použitý tvar částic vnitřního pigmentu. Kulovité částice propouští rychleji než vločkovité částice. [14]



Obr. 3.6 Tvar částic pigmentu nátěru

3.3.3.2 Antikorozi pigmentová ochrana

Hlavní ochranný nátěr obsahuje antikorozi pigmenty a ty působí rozdílnými mechanismy. Některé pigmenty reagují s koroziními činiteli a tím je eliminují. Jiné vytvoří takové podmínky, že k žádné oxidaci nedochází. Určitý druh pigmentu umí v reakci s koroziními činiteli vytvořit pevnou inertní vrstvu. [14]

3.4 Stavební plavidla

Stavba větrných farem na moři je mnohem složitější záležitost, nežli stavba na souši. Je zapotřebí specificky upravených plavidel, která mají speciální jeřáby a zdvihací systémy. Na místě určení se pomocí pilířů dokážou vyzdvihnout nad vodní hladinu a přebírají funkci pohyblivé pracovní plošiny. S takto upraveným plavidlem je stavba na vodní hladině ulehčena a jsou vytvořeny stabilní podmínky bez ohledu na pohyb mořské vody. [4]

V dnešní době se spíše setkáváme s předělanými tankery na plyn či ropu, ale značný potenciál a budoucnost přímořských větrných farem láká investory a začínají se objevovat plavidla, která jsou speciálně vyrobená pro stavbu farem v mořských lokalitách. [4]

Během samotné stavby je kladen důraz i na životní prostředí. Kontaminace mořské vody musí být snížena na minimum, čehož se docílí použitím maziv, která jsou šetrná, ale zároveň stejně výkonná jako běžně používaná maziva. [15]

3.4.1 Seajacks Zaratan

Jedna z instalačních lodí nese název Seajacks Zaratan. Je speciálně upravená pro stavbu ocelových konstrukcí v Severním moři. Obří plavidlo obsahuje jeden vysoký jeřáb a čtveřici hydraulických noh, které dosahují délky 90 m. Na místě stavby se nohy ukotví na dno moře a poté je možno loď vyzdvihnout nad hladinu a stabilizovat polohu. Dokáže postavit větrnou elektrárnu dosahující až 150 m.

Technické specifikace:

- Hrubá nosnost lodi (celkový objem) - 9704 t
- Čistá nosnost lodi (pro náklad) - 2911 t
- Celková nosnost (plná kapacita) - 3597 t
- Délka x šířka - 81 m x 41 m



Obr. 3.7 Seajacks Zaratan během instalace VtE [4]

3.5 Servis

K provozu větrné elektrárny je zapotřebí její pravidelná údržba a servis, který je velmi nákladný. Protože je postavená na moři nezbyvá technikům než se k elektrárně dopravit lodí nebo vrtulníkem, včetně nutného materiálu na odstranění závad. V ideálním případě se servis provádí, když panuje bezvětří a moře je klidné. Při nouzovém zásahu se musí technici dostat na místo i v extrémních klimatických podmínkách a doprava je tedy značně komplikovaná. Na rozbouřeném moři je problematický a riskantní přechod z lodi na samotnou plošinu podstavce VtE. V případě použití helikoptéry se zásah prodraží a navíc je omezeno množství nářadí a materiálu, který chceme dopravit. Tento způsob dopravy je volen výjimečně pro jeho rychlost. Největší současné projekty mají

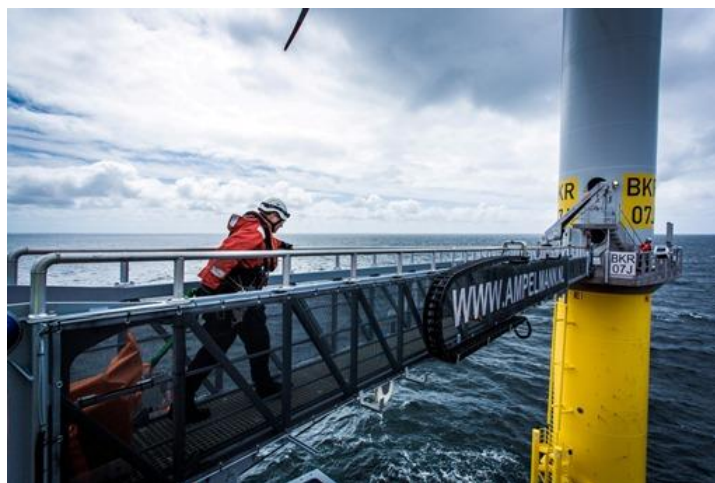
dokonce heliport, umístěný na gondole větrné elektrárny.



Obr. 3.8 Gondola s heliportem od společnosti 2-B Energy [4]

3.5.1 Servisní plavidla

Společnost Siemens vytvořila speciálně navrženou loď určenou pro servis mořských větrných elektráren. Plavidlo má specificky upravenou příď a může tedy dosahovat poměrně vysokých rychlostí při současném zachování stability na rozbouřeném moři. Loď slouží také jako ubytovna pro personál a servisní techniky po dobu až několika týdnů. Je vybavena šesti kontejnery, kde je uskladněno tisíce servisního materiálu a součástek. Hlavní předností lodi je přítomnost 25 m dlouhé lávky, která zajišťuje bezpečný a stabilní přechod pracovníků na servisní plošinu elektrárny i v případě neklidné mořské hladiny. Lávka má hydraulický systém, který řídí speciální počítač, co neustále počítá polohu lodi vůči servisní plošině a rozdíly vyrovnává. Dokáže vyrovnat pohyb lodi při 2,5 m vysokých vlnách a udržet konstantní polohu vůči elektrárně. [16]



Obr. 3.9 Servisní lávka s hydraulickým systémem [16]

4 Integrace do energetické soustavy

Vyroběný činný výkon větrné elektrárny je nejvíce závislý na rychlosti větru, jak jsem vysvětlil v kapitole č. 1.2.3. Protože se rychlost větru neustále mění, dochází tím i ke kolísání vyrobeného činného výkonu během dne. Tyto odchylky je zapotřebí regulovat a tím zefektivnit integraci do přenosové soustavy, která si udržuje konstantní kmitočet 50 Hz.

V této kapitole podrobněji popíši způsoby regulace činného výkonu větrných elektráren, druhy systémů pro výrobu elektrické energie, problematiku přenosu výkonu na pevninu, zásadní vlivy VtE na elektrizační síť a způsoby akumulace přebytečné energie.

4.1 Řízení činného výkonu větrné elektrárny

Vzorec pro výpočet činného výkonu, který je vyráběn větrnou elektrárnou:

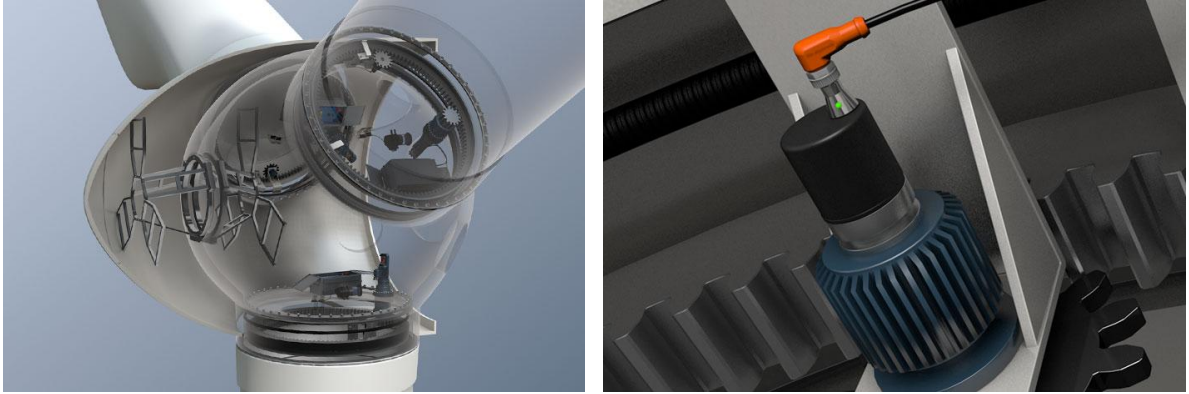
$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot c_p \cdot S \quad (16)$$

P -	činný výkon VtE	[W]
ρ -	hustota vzduchu	[kg.m ⁻³]
v -	rychlost proudění vzduchu	[m.s ⁻¹]
C_p -	účinnost stroje	[-]
S -	plocha rotoru	[m ²]

Během provozu větrné elektrárny je ovlivnitelná pouze jedna veličina a to plocha rotoru, kterou lze regulovat vhodným natáčením lopatek. Mimo provoz lze ovlivnit účinnost stroje, ale to již nevypovídá o regulační schopnosti VtE. Zbylé parametry jsou neovlivnitelné a jsou dány aktuální rychlostí větru a typem VtE. Mořský vzduch má totiž menší hustotu než vzduch na pevnině.

U moderních větrných turbín vyšších výkonů lze řídit rychlost otáček rotoru pomocí systému natáčení lopatek. Systém mění úhel natočení lopatky tak, aby byla rychlost otáčení přizpůsobená jmenovitému výkonu generátoru a aby nedošlo

k překročení maximálních (destruktivních) hodnot. Čidla polohy dávají zpětnou vazbu o úhlu listu rotoru do systému natáčení. Lopatky natáčí motor, který je složen z několika převodových stupňů.

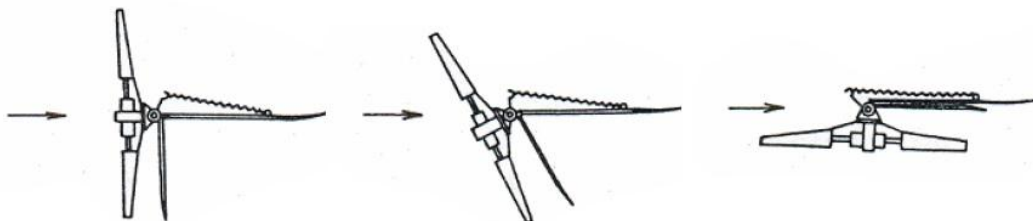


Obr. 4.1 Elektrický systém natáčení lopatek [37]

4.1.1 Regulace výkonu malých větrných elektráren

Tento typ regulace rotoru s pevnými lopatkami se vyskytuje u malých elektráren s nízkým výkonem do 1 kW. Regulace otáček je zde zajištěna naklápěcím čepem, kterým je nastavená rovina rotoru ve směru rovnoběžném s osou regulačního kormidla. V bezpečném režimu rychlosti větru je sklopení rotoru zamezeno pružinou nebo protizávažím. Při dosažení kritických hodnot rychlosti větru je vyvinutá potřebná síla k překonání závaží nebo pružiny a dojde k vyosení rotoru, což může vést i k zastavení. [17]

Výhodou je levná a snadná konstrukce, která je nenáročná na servis, protože nemá zdaleka tak velký počet soustrojí a řídicích systémů, jako je tomu u velkých větrných elektráren. Naopak má řadu nevýhod, hlavně špatnou účinnost při vyšších otáčkách rotoru. Další nevýhodou je, že se rotor nemůže samovolně rozběhnout, proto musí mít přídavný elektromotor. [17, 18]

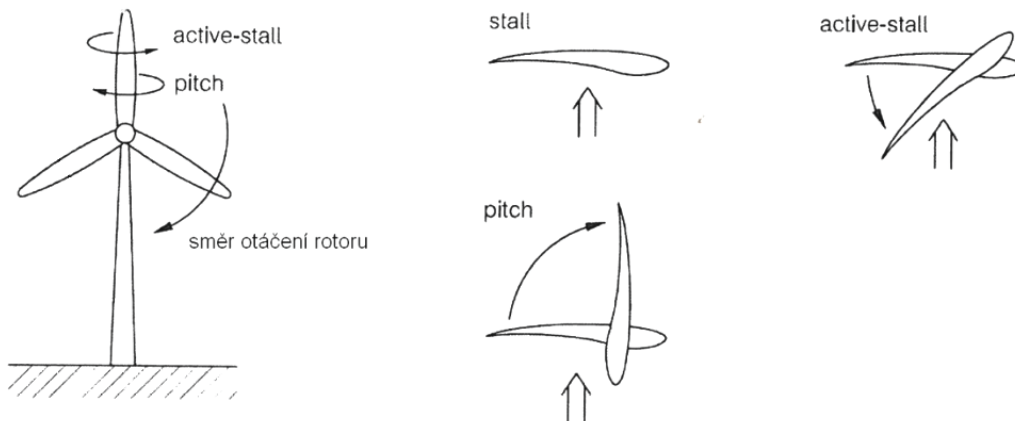


Obr. 4.2 Regulace rotoru s pevnými lopatkami [8]

4.1.2 Regulace výkonu velkých větrných elektráren

U elektráren větších výkonů se používají tyto typy regulace:

- regulace STALL
- regulace PITCH
- regulace ACTIVE STALL



Obr. 4.3 Způsob natáčení lopatek rotoru [17]

4.1.2.1 Regulace typu STALL

Jako v předchozím případě je zde rotor s pevnými lopatkami, ale výkon je regulován proměnlivým tvarem konce lopatek. Konec lopatky se geometricky mění se vzrůstající rychlostí větru a tím se zvyšuje náběžný úhel. Se zvyšujícím úhlem se postupně odtrhává proudící vzduch od lopatky a z rovnoběžných proudnic se stane nepravidelné tzv. turbulentní proudění vzduchu. Tím klesne vztlaková síla působící na lopatku rotoru a sníží se i moment na hřídeli. U stall regulace nelze samovolně rotor rozeběhnout, proto se využívá k roztočení elektromotor. Další nevýhodou je, že s rostoucími otáčkami klesá účinnost rotoru. [17]

4.1.2.2 Regulace typu PITCH

Jde o aktivní typ regulace, který využívá vstupního signálu požadovaného výkonu generátoru. Pokud by výkon dosahoval kritických hodnot, elektrický signál dá povel systému natáčení lopatek, který zajistí vychýlení lopatek rotoru. Vychýlením dosáhneme snížení vztlakové síly a zvětšení radiálního odporu lopatky, což vede ke zpomalení rotoru. Pitch regulace využívá rozsah úhlů natočení

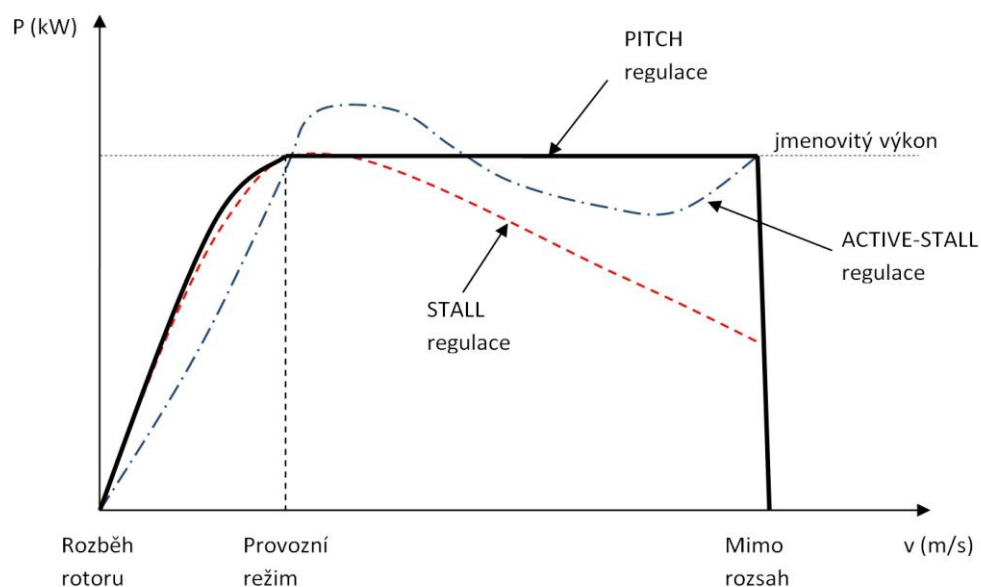
lopatek až 120° a dovoluje samovolné roztočení motoru. V momentě roztočení se lopatky natočí do provozního režimu, kdy se mění úhel natočení od 0° do 30° podle požadavku a udržení jmenovitého výkonu generátoru. Brzdění a udržení konstantního výkonu je dosaženo zvětšováním úhlu nastavení lopatek. [17, 18]

4.1.2.3 Regulace typu ACTIVE-STALL

Active-stall je svým principem podobná jako pitch regulace a při rozběhu či malých rychlostech větru se chová stejně. V případě brzdění a udržení jmenovitého výkonu elektrárny se úhel lopatek oproti pitch regulaci naopak snižuje. V tomto momentě je zde princip stejný jako u stall regulace a dochází ke zvětšování náběžného úhlu proudícího větru přes lopatku, odtržení listu od proudnice a tím snížení vztlačových sil. Úhly natáčení lopatek nejsou tak velké jako u regulace pitch a proto lze reagovat rychleji na okamžité změny rychlosti. [17]

Výhody pitch a active-stall regulace:

- aktivní řízení požadovaného výkonu v celé škále rychlosti větru
- potřeba menší hmotnosti lopatek
- menší zátěž na lopatku
- oproti STALL regulaci je větší výtěžnost energie
- samovolný a snadný rozběh rotoru
- snadné brzdění rotoru (není potřeba silných brzd pro náhlé zabrzdění)



Obr. 4.4 Výkonová křivka VtE u stall, pitch a active-stall regulace

4.2 Systémy výroby elektrické energie

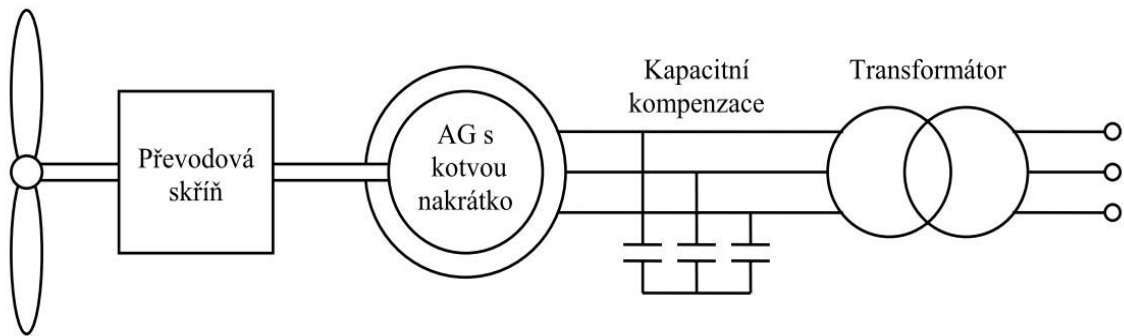
Větrné elektrárny malých výkonů využívají pro výrobu elektrické energie pomaloběžné synchronní generátory, které mají více pólů s permanentními magnety. Další možností je použití dynama vytvářející stejnosměrný proud. [17, 18]

U moderních větrných elektráren středních a vyšších výkonů jsou použity asynchronní motory s kotvou nakrátko nebo s vinutým rotorem, které pracují v generátorickém chodu. Výhody asynchronních generátorů jsou jejich nízké ceny, jednoduchost provozu a menší požadavky na servis. Naopak jsou charakteristické horší regulovatelností otáček a větší potřebou jalové energie. [17]

Pro větrné elektrárny vysokých výkonů se používají synchronní generátory, které jsou specifické vysokou regulační schopností, které umožňují řídit napětí, frekvenci či výkon. [18]

4.2.1 Asynchronní generátor s kotvou nakrátko

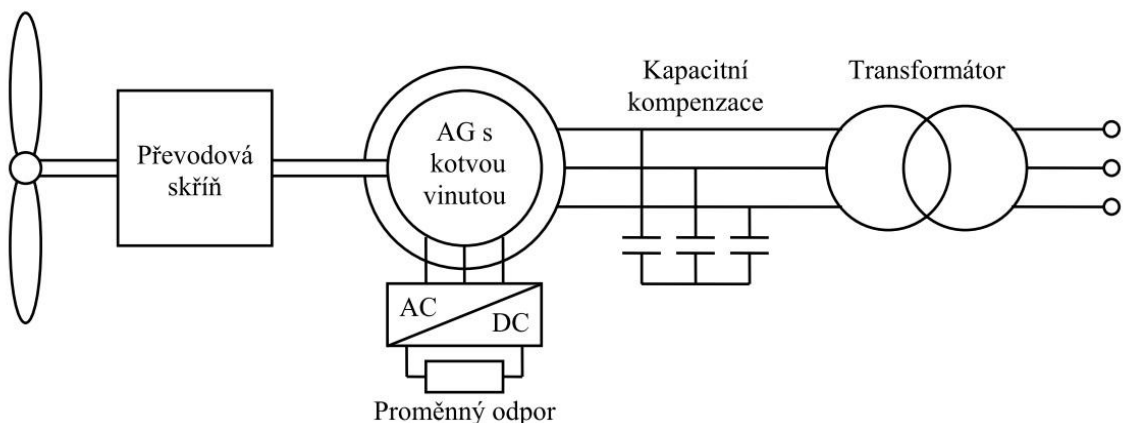
Systémy využívající asynchronní generátory s kotvou nakrátko pracují s konstantními otáčkami. Obvykle mají dvě statorová vinutí a jsou připojovány přímo k síti. Rotorová rychlost je určena frekvencí sítě a je podřízena počtu pólů generátoru. Pohybuje se v mezích 1 až 2 % od synchronních otáček. Protože je stator dvou-vinuťový, může generátor pracovat se dvěma režimy výkonu. Při nižších rychlostech větru je využito vinutí s větším počtem pólů a naopak při vyšších rychlostech větru vinutí s nižším počtem pólů. S rostoucím výstupním výkonem generátoru roste i spotřebovaná jalová energie induktivního charakteru, proto je potřeba instalace kompenzačních kondenzátorů. Pro jednoduchost tohoto systému se používá pro větrné elektrárny středních výkonů. [18, 19]



Obr. 4.5 Systém AG s kotvou nakrátko [18]

4.2.2 Asynchronní generátor s vinutým rotorem

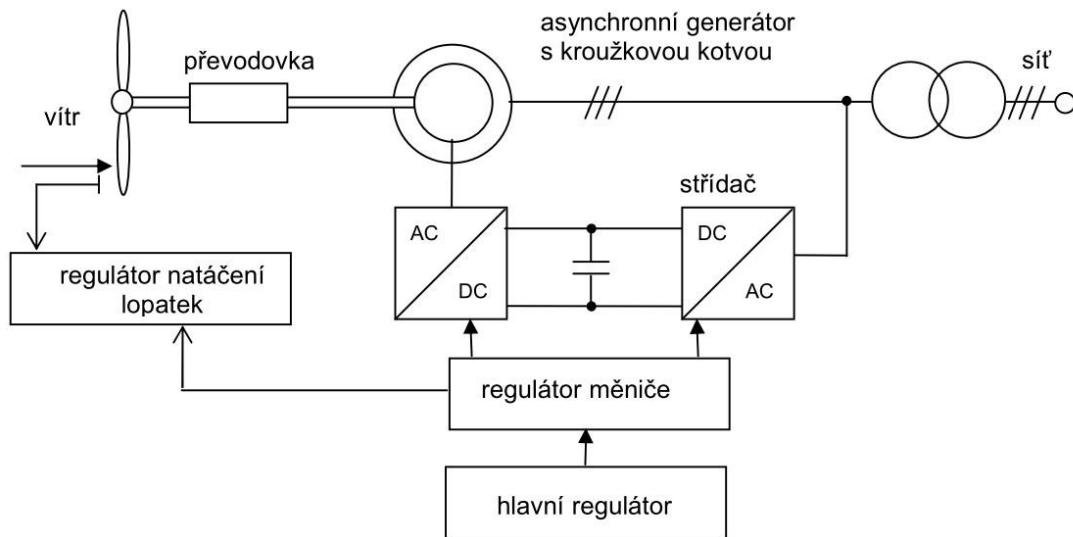
Tento typ systému je velmi podobný asynchronním generátorům s kotvou nakrátko a také pracuje s téměř konstantními otáčkami. Hlavním rozdílem je, že lze pracovat s rotorovou rychlostí v rozmezí 0 až 10 % od synchronních otáček. To je dosaženo přidáním třífázových proměnlivých odporů do statorové části vinutí generátoru. Vhodným spínáním těchto odporů zajišťujeme proměnlivý skluz a lepší ovládání krouticího momentu. Koncept vinutých rotorů lze použít i pro větrné elektrárny vyšších výkonů, ale nese stále nevýhodu jalových ztrát a kolísání výkonu, který je závislý na změně mechanického momentu rotoru větrné elektrárny. Negativní vlivy mechanického momentu je možné eliminovat vhodnou regulací natáčení rotorových lopatek. [18, 19]



Obr. 4.6 Systém AG s vinutou kotvou [18]

4.2.3 Asynchronní generátor s vinutým rotorem a frekvenčním měničem

Systémy založené na asynchronním generátoru lze provozovat i s proměnlivými otáčkami rotoru. Tím se zefektivní produkce elektrické energie a částečně se omezí negativní vlivy připojení větrné elektrárny do sítě. Rotorová rychlost se pohybuje od -40 do +30 % synchronních otáček, což je docíleno přidáním frekvenčního měniče do rotorové části vinutí generátoru. Jedná se o tzv. kaskádní napájení, kdy je statorové vinutí přímo připojené přes transformátor k síti a rotorové vinutí je napájené měničem kmitočtu. [18, 20]

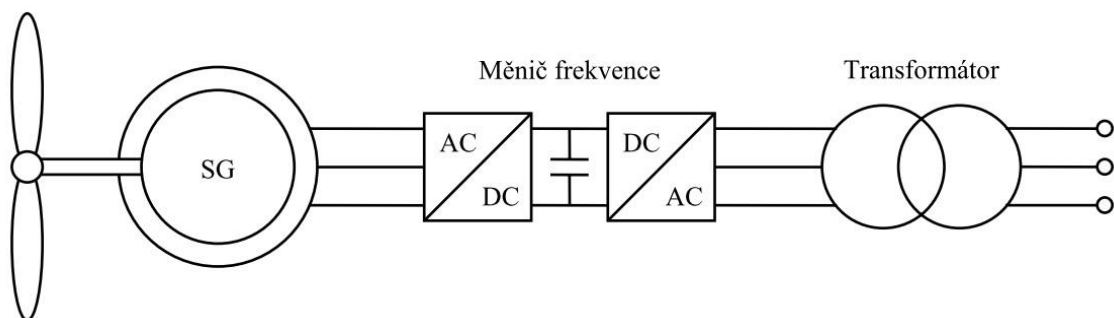


Obr. 4.7 Systém AG s vinutým rotorem a měničem kmitočtu [38]

Řízení vyhodnocuje rychlost větru a otáčky rotoru větrné elektrárny a tomu se adaptuje momentová charakteristika generátoru. Amplituda napětí a proudu či frekvence a fázový posuv vůči magnetickému toku statoru je řízeno tak, aby se využívala větrná energie s maximální efektivitou a zároveň se minimalizovali negativní účinky na distribuční síť. Polovodičové měniče u kaskádního zapojení řídí jen 20 až 30 % celkového výkonu stroje, proto jsou ztráty tohoto prvku malé a vliv na distribuční soustavu minimální. Další výhodou je potřeba měniče menších rozměrů a tím i ekonomická přijatelnost. Tento typ systému umožňuje regulovat jalový výkon vhodným rotorovým proudem, a proto odpadá nutnost kompenzačních zařízení. Regulace výkonu rotoru větrné elektrárny je zajištěna PITCH systémem natáčení lopatek. [18, 20]

4.2.4 Synchronní generátor s měničem frekvence

Pro moderní větrné elektrárny velkých výkonů se v současnosti uplatňuje systém s proměnlivými otáčkami složený ze synchronního generátoru a měniče frekvence. V tomto případě polovodičové měniče kmitočtu přebírají jmenovitý výkon v celém rozsahu větrné elektrárny, a proto je jejich pořizovací cena vyšší. Synchronní stroj může být složen z více pólových dvojic, čímž odpadá nutnost převodového ústrojí, které je velmi konstrukčně složité. Buzení je zajištěno buďto permanentními magnety nebo elektromagnety. Pomocí budícího proudu lze regulovat jalový výkon generátoru a není potřeba přídatných kompenzačních zařízení. Frekvenční měnič zároveň plní úlohu nekomplikovaného připojení elektrárny k síti, a protože je plně regulovatelný, nevznikají nárazové proudy. Velkou nevýhodou měniče kmitočtu je vznik harmonických, které se složitě filtrují frekvenčními filtry. Regulace výkonu rotoru větrné elektrárny je opět zajištěna PITCH systémem natáčení lopatek. [18]



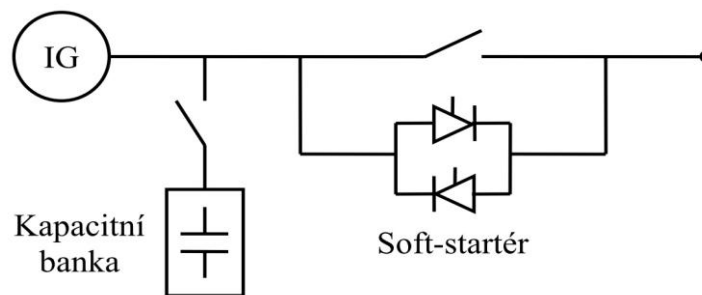
Obr. 4.8 Systém SG s měničem frekvence bez převodovky [18]

4.3 Omezení proudových rázů při připojení VtE na síť

Při jmenovitém provozu větrné elektrárny odpovídá připojení na síť předchozí kapitola, kdy je stator asynchronního generátoru připojen přímo k síti a rotor je napájen přes měnič kmitočtu, nebo synchronní generátor, který je plně připojený k síti přes výkonové prvky. Horší situace nastává při spouštění větrné elektrárny, kdy dochází k negativním vlivům při připojení k síti. Před dosažením jmenovitých otáček rotoru vznikají proudové rázy vlivem magnetizace stroje, které je zapotřebí eliminovat na minimum. U synchronních generátorů, které jsou plně regulovatelné měničem kmitočtu, tento problém odpadá, protože je řešen právě tímto výkonovým prvkem. U asynchronních strojů se využívají k rozběhu dva způsoby připojování k síti. [21]

4.3.1 Připojení tyristorovým spouštěčem

Pro připojení asynchronních generátorů k síti je zapotřebí minimalizovat jejich nárazový proud. Jedním ze způsobů je použití tyristorového spouštěče tzv. soft-startéru. Jedná se o dvojici elektronicky říditelných tyristorů, které jsou zapojeny antiparalelně a jsou připojeny ke každé fázi generátoru. Vhodnou změnou řídicího úhlu tyristoru měníme velikost napětí za soft-startérem a dochází k plynulé regulaci až ke jmenovitým hodnotám. Díky tomu je omezen i proud, který teče do generátoru a jeho velikost tak nepřesahuje násobky jmenovité hodnoty jako v případě přímého připojení k síti. Větrná elektrárna se připojuje k síti při 70 až 95 % synchronních otáček generátoru a v tomto rozmezí pak pracují tyristorové spouštěče. Po ukončení rozběhu generátoru je soft-startér překlenut vypínačem, který je součástí systému. Další součástí je kompenzační zařízení, které zajišťuje kompenzaci jalového výkonu a je připojováno v jednom nebo několika stupních.

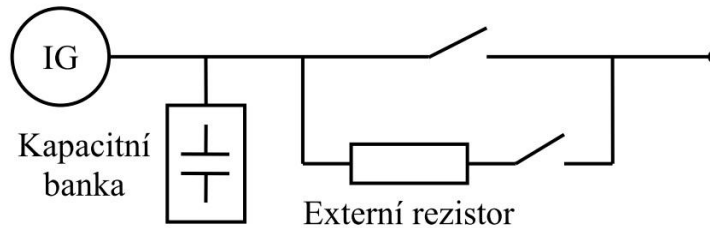


Obr. 4.9 Připojení k síti tyristorovým spouštěčem [21]

4.3.2 Připojení přes rezistor

Druhou možností připojení asynchronních generátorů k síti je pomocí externího rezistoru. Jako v případě přímého připojení generátoru k síti je zde kompenzační zařízení připojené trvale. Elektrárna se přifázuje k síti při 75 až 100 % synchronních otáček generátoru, což je velmi podobné případu použití soft-startéru. V tomto rozmezí je připojen do obvodu externí rezistor a v krátké době dochází k magnetizaci stroje. Kompenzační zařízení zajišťuje potřebný jalový výkon pro magnetizaci stroje po celou dobu startu. Se zvyšujícím se napětím na kapacitním prvku klesá proud, který teče přes externí rezistor. Klesne-li proud k téměř nulové hodnotě, bude napětí na svorkách generátoru blížíci se jmenovitým

hodnotám napětí sítě. V této chvíli se odpojí externí rezistor a zároveň připojí generátor přímo k síti pomocí vypínače. Podobně jako u tyristorového spouštěče je zde omezen proudový ráz tekoucí do generátoru a dosahuje maximálně 2,5 násobku jmenovité hodnoty proudu. Značná výhoda použití externího rezistoru je, že nezpůsobuje zkreslení proudu při připojení na síť jako je tomu v případě použití soft-startéru. [21]



Obr. 4.10 Připojení k síti externím rezistorem [21]

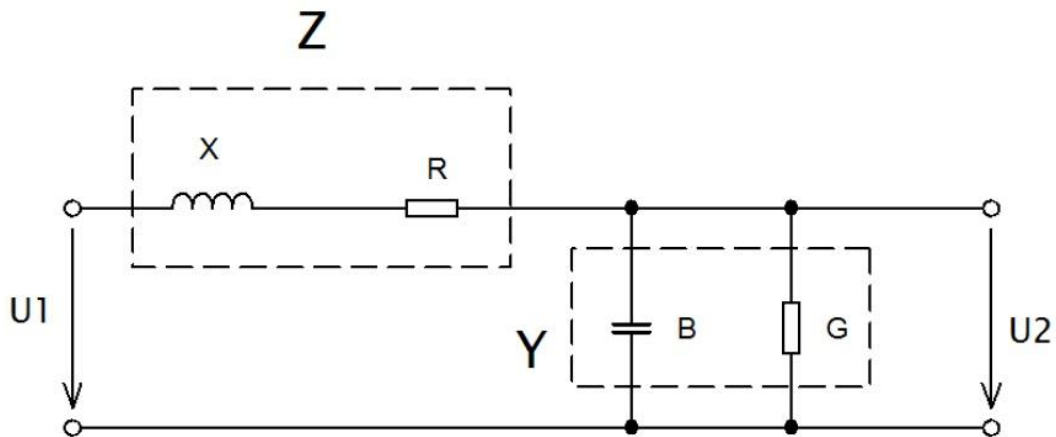
4.4 Přenos elektrické energie na pevninu

V oblasti větrných farem stavěných na moři hraje důležitou roli i přenos elektrické energie na pevninu. V případě krátkých vzdáleností od pobřeží a to do 5 km je přenos elektrické energie zajištěn pomocí střídavého kabelového vedení a transformace napětí na hladinu napětí distribuční sítě probíhá až na pevnině. U větrných parků středních vzdáleností od pevniny do 25 km je transformace napětí prováděna v těsné blízkosti větrného parku a jsou připojena opět střídavým kabelovým vedením. U větrných parků vyšších vzdáleností nad 25 km je přenos elektrické energie na pevninu zajištěn stejnosměrným kabelovým vedením, a transformace napětí probíhá až na pobřeží.

Přenos elektrické energie pomocí střídavého kabelového vedení ve větším množství a na vyšší vzdálenosti sebou nese jisté technické či ekonomické problémy. Patří sem hlavně velké zkratové výkony, velká kapacita kabelu, nutnost kompenzace jalového výkonu a ztráty, které dosahují až 40 % přenášeného výkonu. Proto je vhodné použití stejnosměrných kabelových vedení, které tyto problémy eliminují.

4.4.1 Model vedení

Přenos elektrické energie na krátké vzdálenosti nevyžaduje žádné speciální metody přenosů a je využívána klasická střídavá síť, která je v mnoha ohledech lepší než stejnosměrná. Není potřeba polovodičových prvků k usměrnění a rozstředění napětí, není jen pro propojení dvou míst a na kratší vzdálenosti má menší ztrátovost. Opačná situace nastane při přenosu elektrické energie na velké vzdálenosti.



Obr. 4.11 Model vedení s charakteristickými parametry

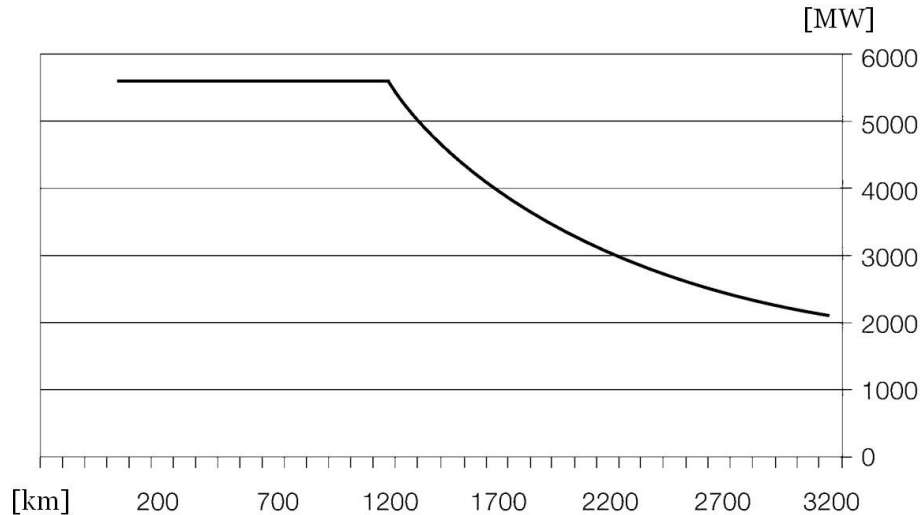
$$Z = R + jX \quad (\Omega; \Omega; \Omega) \quad (17)$$

$$X = 2\pi \cdot f \cdot L \quad (\Omega; \text{Hz}; H) \quad (18)$$

$$Y = G + jB \quad (S; S; \Omega) \quad (19)$$

$$B = 2\pi \cdot f \cdot C \quad (S; \text{Hz}; F) \quad (20)$$

Na obrázku 4.11 je typický model vedení s jeho charakteristickými parametry – (Z) podélná impedance, (Y) příčná impedance, (X) indukční reaktance a (B) kapacitní susceptance. Z uvedených rovnic (18, 20) vyplývají prvky vedení, které jsou závislé na frekvenci a zvláště při použití kabelu, který se vyznačuje mnohonásobně větší provozní kapacitou, nežli je tomu u holých vedení. Tyto rovnice jsou využívány k počítání modelů střídavých vedení. Parametry jsou udávány v jednotkách na kilometr, proto se zvyšující délkou parametry rostou a tím se zvyšují i ztráty. Vzniklý jalový výkon je zapotřebí kompenzovat a od určité délky vedení je i přes kompenzaci ztrátovost vysoká. [22]



Obr. 4.12 Ztráty na vedení při 1000 kV AC

4.4.2 Vysokonapěťový přenos

Důvodem zavádění vysokonapěťových přenosů elektrické energie je minimalizace Jouleovo ztrát. Jedná se o tepelné účinky procházejícího proudu vodičem, kdy volné elektrony předávají část své kinetické energie částicím s pevnou vazbou – vodič se zahřívá.

Jouleovo teplo Q , které vzniká ve vodiči, jímž prochází elektrický proud I po dobu t a na jeho koncích je přiložené napětí U :

$$Q = U \cdot I \cdot t \quad (J; V; A; s) \quad (21)$$

Známe-li odpor R , dosadíme vztah $U=R \cdot I$ a dostaneme:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (J; \Omega; A; s) \quad (22)$$

Z uvedeného vztahu (22) je zřejmé, že Jouleovo ztráty jsou přímo úměrné odporu použitého vodiče a také kvadrátu procházejícího proudu vodičem. Pro viditelné snížení přenosových ztrát na vedení je tedy nutné snížit procházející proud na minimum. Abychom zachovali velikost přenášeného výkonu $P=U \cdot I \cdot \cos\varphi$ u střídavého přenosu, nebo $P=U \cdot I$ u stejnosměrného přenosu, musíme úměrně zvýšit přenášené napětí.

Pro příklad uvedu přenos výkonu 200 MW větrné farmy pomocí 110 kV a 400 kV stejnosměrného rozvodu o délce jednoho kilometru:

Proud, který poteče vedením při použití napěťového přenosu 110 kV:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{200 \cdot 10^6}{110 \cdot 10^6} = 1818,18 \text{ A} \quad (23)$$

Proud, který poteče vedením při použití napěťového přenosu 400 kV:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{200 \cdot 10^6}{400 \cdot 10^6} = 500 \text{ A} \quad (24)$$

Použijeme-li kabel s měděným vodičem a rezistivitou $0,0179 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, průřezem 240 mm^2 a délkou 1 km, budou ztráty následující:

Napěťový přenos 110 kV:

$$\Delta P = R \cdot I^2 = \rho_{cu} \cdot \frac{l}{S} \cdot I^2 = 0,0179 \cdot \frac{1000}{240} \cdot 1818,18^2 = 246,55 \text{ kW} \quad (25)$$

Napěťový přenos 400 kV:

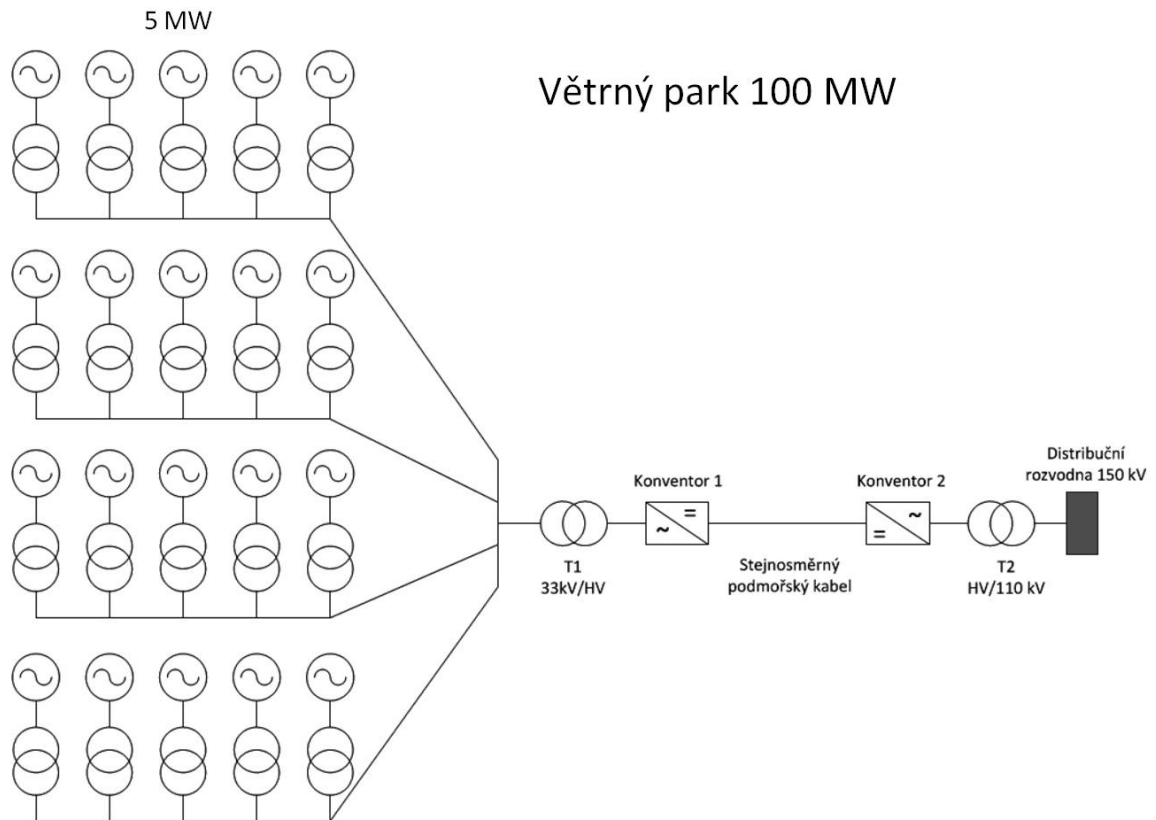
$$\Delta P = R \cdot I^2 = \rho_{cu} \cdot \frac{l}{S} \cdot I^2 = 0,0179 \cdot \frac{1000}{240} \cdot 500^2 = 18,65 \text{ kW} \quad (26)$$

Z porovnání ztrát je zřejmé, že v případě 3,63 násobném zvýšení napěťové hladiny klesnou ztráty v podobě Jouleovo tepla cca 13 x.

4.4.2.1 HVDC (High Voltage Direct Current)

Protože u kabelového vedení roste s jeho délkou i kapacita kabelu, tečou vodičem při připojení střídavého napětí velké nabíjecí proudy. Tato jalová energie kapacitního charakteru je velmi ztrátová a snižuje se tím přenášený činný výkon. Vzniklý problém je možné částečně vyřešit pomocí paralelně připojené indukčnosti v určitých intervalech po celé délce kabelu.

Lepší řešení nabízí systémy přenosu vysokého napětí stejnosměrným proudem tzv. HVDC (z anglického High Voltage Direct Current). Světově známá firma ABB vyvinula tuto technologii pro komerční využití již v roce 1954, kdy byla použita pro spojení švédského pobřeží s ostrovem Gotland o délce 100 km. Protože se zvyšuje poptávka po alternativních zdrojích energie, zejména v podobě fotovoltaiky a větrných farem, technologie se stále vyvíjí a zlepšuje její efektivita.



Obr. 4.13 Použití HVDC technologie u přímořského větrného parku

Hlavní výhody stejnosměrného přenosu:

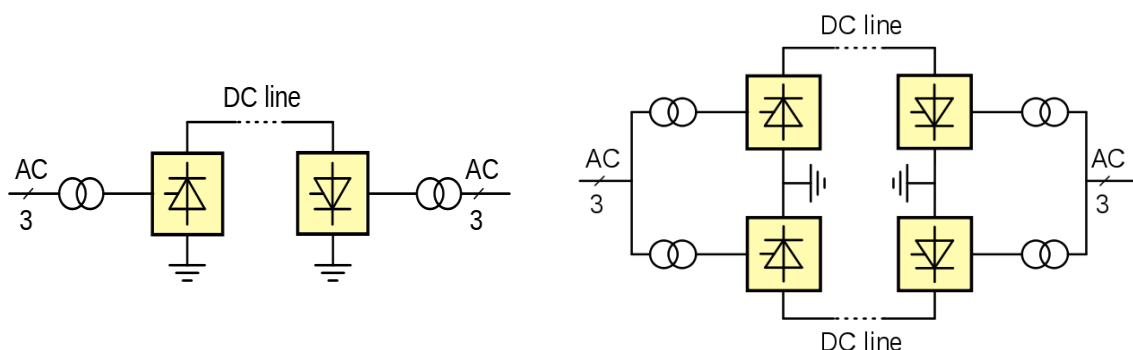
- Hlavní výhodou stejnosměrného vedení je, že frekvenčně závislé parametry (kapacita, indukčnost) nevytváří ztráty na vedení a jeho délka není omezena.
- Stejnoseměrný přenos může propojit dvě přenosové soustavy o různých frekvencích.
- Plné využití průřezu vodiče, protože nedochází ke skin efektu.
- Ztráty HVDC přenosu jsou přibližně 3 % na 1000 km kabelu.
- Při stejnosměrném rozvodu je potřeba jen dvou vodičů, popřípadě jednoho při zemním návratu proudu.
- Oproti střídavé variantě menší izolační vzdálenost mezi kabely.
- Absence kompenzačních zařízení jalového výkonu.
- Kontrola směru a velikosti přenášeného výkonu.
- Ze stávajícího střídavého vedení lze vytvořit stejnosměrné a třetí vodič může sloužit jako záloha – zvyšuje spolehlivost systému.

Hlavní nevýhody stejnosměrného přenosu:

- Hlavní nevýhoda stejnosměrného přenosu je nutnost použití polovodičových výkonových měničů. Střídavý proud se nejprve pomocí usměrňovače usměrní a na konci vedení rozstřídá střídačem. Tyto prvky jsou mnohonásobně dražší a složitější než transformátory, které zajišťují spolehlivou změnu napětí u střídavých vedení. Transformátory mají i lepší účinnost kolem 99 %.
- Stejnosměrný přenos slouží k propojení pouze dvou míst. Každá další odbočka vyžaduje vybudování nové výkonové měřírny – citelně rostou pořizovací náklady.
- Na krátké vzdálenosti se výrazně projevují ztráty koncových polovodičových měničů.

Topologie HVDC technologie

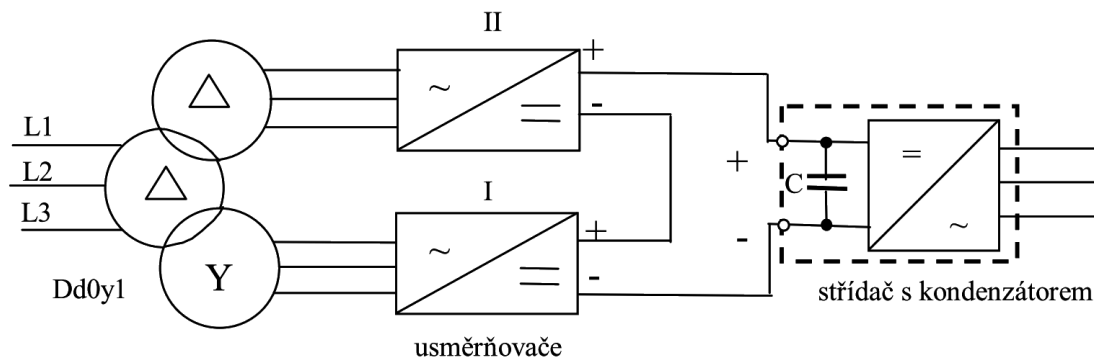
HVDC technologii dělíme na monopolární a bipolární topologii. Jejich rozdíl spočívá v provedení přeměny a přenosu elektrické energie, odlišnosti ekonomického hlediska a spolehlivosti systému. Topologie monopolární používá pro přenos elektrické energie jeden kabel a dokáže usměrnit pouze kladnou složku střídavého proudu, záporná složka je v podobě potenciálu země. Při poruše dochází k odpojení celého systému. Bipolární topologie pracuje s kladnou, tak zápornou složkou střídavého proudu a přenos elektrické energie je řešen pomocí dvou kabelů. Výhodou je, že při poruše jedné větve klesne přenášený výkon na 50 % a nedojde k odpojení celého systému. Značnou nevýhodou je vyšší pořizovací cena. [23]



Obr. 4.14 Monopolární a bipolární topologie HVDC systému [23]

HVDC rozvodna

- **Měničový transformátor** – jedná se o výkonový transformátor, který navyšuje napětí na hodnotu požadovaného vstupu měniče. Ten je nutno napájet dvěma 3-fázovými vstupy a fázový posun mezi oběma sekundárními vinutími činí 30° nebo 150° , což je docíleno zapojením dvojvinuťového transformátoru do Y₀ a D_{y1} nebo trojvinuťového D_{d0y1}, D_{d0y11} a Y_{d11y0}. Zapojení se používá kvůli potlačení 5. a 7. harmonické složky vstupního proudu. Další funkcí transformátoru je galvanické oddělení mezi stejnosměrnou a střídavou stranou systému. [24]
- **Usměrňovače a střídače** – obecně se používá 12-ti pulzní měnič, který se skládá ze dvou sériově nebo paralelně zapojených 6-ti pulzních měničů v můstkovém provedení. Moderní technologie současnosti využívá vypínatelné součástky a to IGCT tyristory nebo IGBT tranzistory, které se vyznačují velmi rychlou spínací frekvencí a jsou konstruovány pro velké výkony. [24]

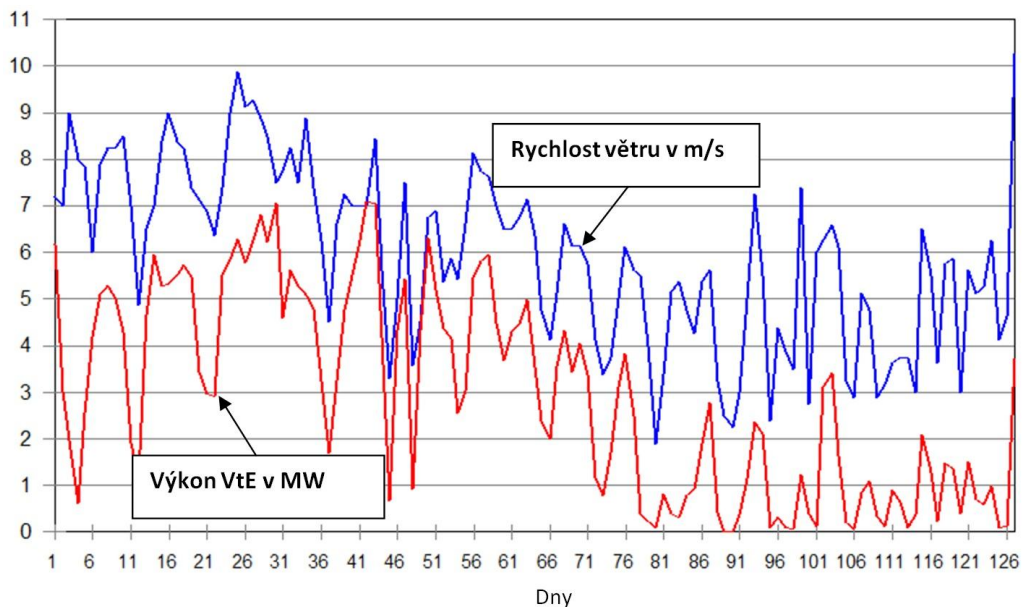


Obr. 4.15 Příklad zapojení 12-ti pulzního měniče

- **Tlumivky** – pokud je vedení nezátížené, může docházet k přerušovaným proudům, které způsobují vysoké přepětí, a to vede k poškození na částech vedení. Tlumivky tyto přerušované proudy omezují díky své akumulární schopnosti, kdy se proud pomalu vybíjí. Dále plní funkci ochrany při vzniku poruchových proudů, které značně omezují. Také mohou zabránit rezonanci obvodu při určitých frekvencích a v podobě sériové impedance potlačují vyšší harmonické a omezují tak rušení. [24]

4.5 Vliv větrných elektráren na elektrizační síť

Jak jsem již dříve uvedl, tak větrné elektrárny jsou závislé na rychlosti větru a její provozní režim je v rozmezí od 3 m.s^{-1} do 25 m.s^{-1} . Pod hranicí 3 m.s^{-1} se rotor větrné elektrárny nedokáže roztočit a nad hranicí 25 m.s^{-1} může dojít až k destrukci a proto se elektrárna musí odpojit. Dalším kritériem je činný výkon, který roste či klesá s třetí mocninou rychlosti větru. Z těchto důvodů není možné zajistit konstantní vyvedení výkonu VtE do místa připojení a působí negativně na elektrizační soustavu. Dalším problémem je stále více používaných polovodičových výkonových měničů, které způsobují rušení a snižují kvalitu dodávané energie.



Obr. 4.16 Změny výkonu VtE a rychlosti větru [39]

Vlivy na elektrizační soustavu:

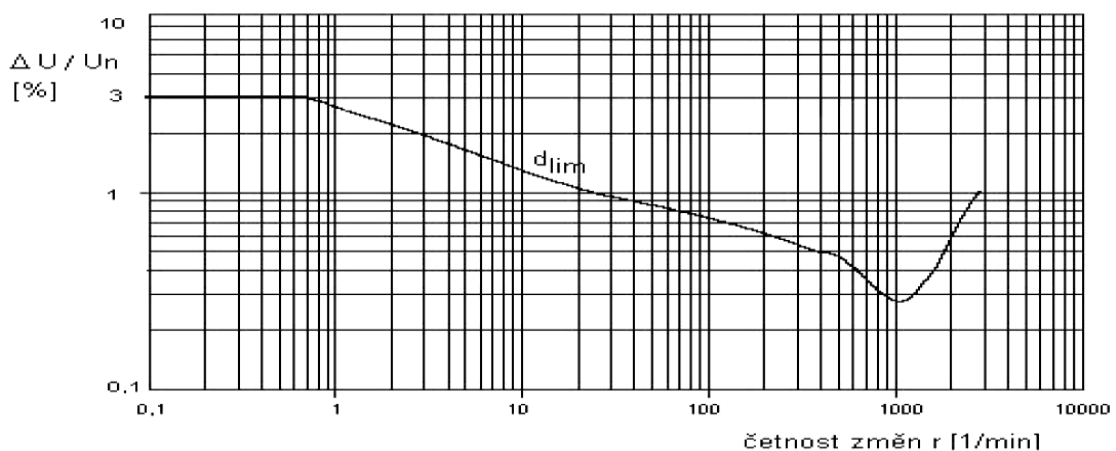
- Přetěžování sítě
- Kolísavé napětí (flicker)
- Změna zkratových poměrů sítě
- Vyšší harmonické
- Rušení signálu HDO
- Horší regulovatelnost výkonu

4.5.1 Přetěžování sítí

Před připojením všeobecného zdroje energie, kterým může být právě větrná elektrárna, do elektrizační soustavy je zapotřebí tuto síť dostatečně dimenzovat od přípojného bodu ke spotřebiteli, nebo v případě dálkového přenosu k místu transformace. Vzhledem ke kolísavému výkonu VtE je nutné je připojovat do konkrétní přípojky a její výkon předávat jen do úseků, na které je navržena. Jestliže je soustava poddimenzována, mohlo by připojení VtE způsobit nadměrné oteplování vodičů nebo přesáhnout přípustné napětí v síti a měla by se posílit. [18]

4.5.2 Flicker

Jako důsledek proměnlivé dodávky elektrické energie do přípojného místa, způsobují větrné elektrárny rychlé periodické změny napětí – $\Delta U/U_N$. Světelné spotřebiče vyžadují pro správnou funkci napětí konstantní, a proto toto kolísání vytváří míhání světelného toku tzv. flicker, který může nepříznivě ovlivňovat zrak nebo psychický stav lidského organismu. Příčina vzniku flickeru nastává vlivem nárazového větru, ale ta je zčásti odstraněna regulací větrného rotoru a z části setrvačnými silami působící na rotor. Dalším důvodem vzniku je moment, kdy je lopatka rotoru v zákrytu s věží větrné elektrárny, což způsobuje pravidelně opakující se poklesy výkonu. Omezení vlivu kolísání napětí může být dosaženo snížením impedance sítě v bodě připojení a tím zvýšením zkratového výkonu. Další možnost je použití zařízení pro dynamickou kompenzaci úbytku napětí tzv. linkového kondicionéru.



Obr. 4.17 Přípustné hladiny pro periodické změny napětí [40]

4.5.3 Změny zkratových poměrů v síti

Připojováním zdrojů elektrické energie do elektrizační soustavy má za následek zvýšení zkratových výkonů v přípojném bodě. Další neduh je v podobě schopnosti změn toku zkratových výkonů v síti. V distribuční soustavě jsou zařízení dimenzována na určitou odolnost zkratového proudu a vlivem změn zkratových poměrů po připojení větrné elektrárny může dojít ke zničení těchto zařízení. Současně je nezbytné posoudit vhodnost připojení z hlediska odolnosti proti zkratům právě připojovaného zdroje, který může být také zničen. Při výpočtu zkratových výkonů se vychází z provozních stavů sítě, kdy jsou jejich hodnoty minimální a mimořádné přechodné stavy v síti se zanedbávají. Nejprve se určí výsledná impedance k místu zkratu, dále se stanoví napětí ekvivalentního zdroje a nakonec se vypočte zkratový proud v okamžiku jeho vzniku. Uvažujeme maximální dovolenou hodnotu napěťového zdroje při poruše, kterou určuje tzv. napěťový součinitel.

$$I_k^{//} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \quad (A) \quad (27)$$

c – napěťový součinitel

U_N – jmenovité napětí sítě v místě zkratu

Z_k – výsledná impedance k místu zkratu

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

Tab. 4.1 Napěťový součinitel c pro výpočet zkratových proudů dle ČSN EN 60909-0

4.5.4 Napětí vyšších harmonických

Vlivem používání polovodičových měničů, zejména frekvenčních měničů či střídačů, dochází ke generování zkresleného sinusového napětí, které sebou nese násobky frekvence první harmonické. Tyto harmonické mohou více namáhat připojená zařízení do stejné sítě a ovlivňovat jejich přirozený chod, nebo dokonce zkracovat jejich životnost. Proto je nutné před připojováním větrné elektrárny do

distribuční soustavy určit vyšší harmonické, které budou vyzařovány do sítě. Pro posuzování harmonických se využívají následující vztahy:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} \quad (28)$$

$$THF_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U} \quad (29)$$

- U_h - napětí h-tého řádu harmonické
- U_1 - efektivní hodnota napětí první harmonické
- THD - celkové harmonické zkreslení
- THF - činitel harmonického zkreslení

4.5.5 Rušení HDO signálu

Hromadné dálkové ovládání (HDO) je druh řízení dálkového odběru elektrické energie, které využívá silových rozvodů energetických sítí. Informace je vysílána v podobě impulsního kódu o určité frekvenci, na kterou reagují spotřebiče v domácnostech nebo firmách, které jsou HDO přijímačem vybaveny. Signálem lze spínat a vypínat zařízení, nebo řídit tzv. noční proud, který zajistí lepší efektivitu spotřeby. HDO signály mohou být ovlivňovány zdroji napětí vyšších harmonických, které se shodují s frekvencí signálu. Další problém může nastat v případě, že kompenzační zařízení jsou naladěné na frekvenci určité harmonické, která je shodná s frekvencí HDO signálu.

4.5.6 Regulace výkonu

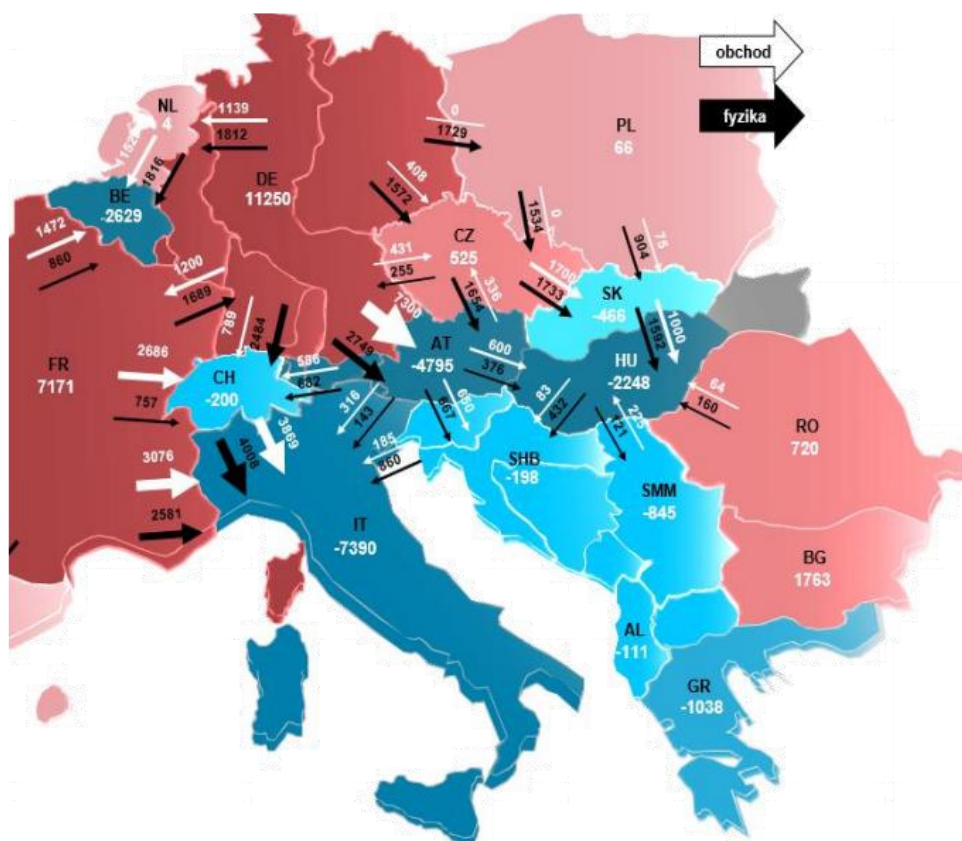
Připojování větrných farem je díky jejich proměnlivému výkonu nepříznivé pro spolehlivost dodávky energie do elektrizační soustavy, která má určitou maximální přenosovou schopnost v momentě připojení všech zdrojů. Vzhledem k tomu je nutné tyto nespolehlivé zdroje energie zálohovat jinými zdroji, aby v případě výpadku větrné elektrárny je mohli zastoupit a nedošlo tak k nepokrytí potřeby dodávky energie.

4.5.6.1 Stabilita a řízení

Kodex přenosové soustavy definuje stabilitu provozu soustavy tak, že jde o schopnost zachování rovnovážného stavu, jak v případě běžného provozu, tak v případě neobvyklých stavů, které jsou způsobeny externími vlivy, poruchami zařízení nebo dispečinkem. [25]

Rovnovážný stav lze zajistit jen v případě, pokud bude mít elektrizační soustava dostatek regulovatelného výkonu. Připojování proměnlivých zdrojů elektrické energie zvyšuje nároky na velikost regulačního výkonu soustavy a zálohy v podobě rychle připojitelných zdrojů, které dorovnávají nedostatečné pokrytí dodávky elektrické energie. [21]

V elektrizační soustavě může nastat opačný stav, kdy je dodáván přebytek výkonu v momentě nízké spotřeby. Klasické zdroje energie se musejí častěji odpojovat, což snižuje jejich životnost. Tento problém lze do jisté míry řešit akumulací elektrické energie, která je více rozebrána v další kapitole č. 4.6.



Obr. 4.18 Neobvyklé přetoky energie na konci roku 2014 [26]

Velký počet větrných elektráren připojovaných do sítě má nepříznivý vliv nejen na lokální soustavu, ale i na propojené elektrizační soustavy s okolními státy Evropy v rámci UCTE. Dochází tak k nekontrolovaným přetokům elektrické energie, kdy nastává velký rozdíl mezi obchodními a skutečnými toky jak je patrné z obrázku č. 4.18. Česká Republika byla již 2x na pokraji black-outu díky přetokům energie hlavně z Německých větrných farem. ČEPS použila nápravná opatření v podobě redukce maximálního obchodního toku a rekonfigurací rozvodny Hradec Východ, kde se instaluje transformátor s řízeným posuvem fáze, tzv. PST (Phase Shifting Transformers). Tyto transformátory aktivně řídí tok činného výkonu díky posunu úhlu fáze napětí (β) mezi vstupem a výstupem transformátoru a tak pohotově mění zátěžný úhel generátoru (δ). Rovnice přenášeného výkonu s PST transformátorem je následující: [26]

$$P = \frac{U_1 U_2}{X + X_{PST}} \cdot \sin(\delta + \beta) \quad (30)$$

- U_1 – přenášené napětí na začátku vedení
- U_2 – přenesené napětí na konci vedení
- X, X_{PST} – podélná reaktance vedení a PST transformátoru
- δ – zátěžný úhel generátoru
- β – regulační úhel PST transformátoru

4.6 Akumulace energie

Velké klasické elektrárny jsou známy svou omezenou regulační schopností a obecně lze říci, že uhelné elektrárny dosáhnou plného výkonu zhruba za půl dne a jaderné elektrárny v rádech dnů až týdnů. Tyto špatně regulovatelné, ačkoli levné bloky, pokrývají převážnou část diagramu zatížení a zbylé špičky pokryjí vodní elektrárny nebo větrné, sluneční a další nekonvenční zdroje energie. Zejména větrné a sluneční elektrárny jsou závislé na počasí, které se nedá ovládat, a proto dochází k nerovnoměrnému rozložení výkonu těchto bloků. V případě přebytku výkonu je vhodné energii akumulovat a využívat ji v době jejího nedostatku, což může efektivněji vykrýt energetické špičky v distribuční soustavě. Dnes je mnoho známých technologií využívající uchovávání energie, ale z důvodu jistých hranic a nedostatků jsou použitelná jen pro určité aplikace. S rostoucí poptávkou po

obnovitelných zdrojích energie roste i zájem o technologie akumulace energie a jejího výzkumu.

Princip akumulace elektrické energie spočívá v její přeměně na jinou podobu, ve které je dále efektivně uchována a v momentě potřeby je transformována zpět na energii elektrickou.

Hlavní aspekty technologie pro akumulaci energie:

- Hustota energie (Wh/kg)
- Účinnost (%)
- Životnost
- Výkon (W/kg)
- Vliv na životní prostředí

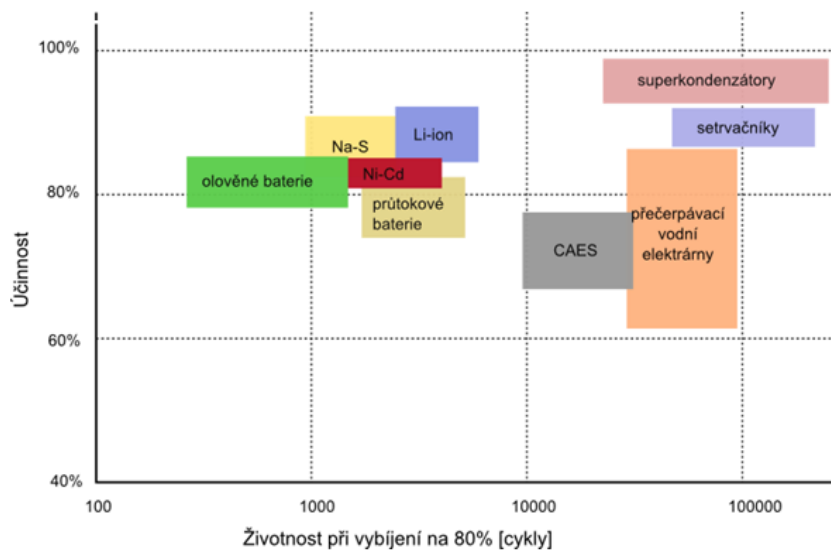
Rozdělení dle způsobu uchování energie:

1) Chemické akumulátory [27]

- Lithium-Iontové baterie – hustota energie až 200 Wh/kg, životnost 500 – 1200 cyklů, účinnost 80 – 90 %
- NaS baterie (Sodík-Síra) – hustota energie přes 100 Wh/kg, životnost 2 – 3 tisíce cyklů, účinnost 89 %
- Průtokové redoxní baterie – hustota energie až 30 Wh/kg, životnost do 5 tisíc cyklů, účinnost 85 %
- Superkapacitory – hustota energie 10 - 30Wh/kg, životnost až 100 tisíc cyklů, účinnost 95 - 98 %
- Vodík (Power to Gas) – na principu elektrolýzy vody – enormní hustota energie více než 30 kWh/kg, nízká účinnost 35 - 50 %

2) Fyzikální princip – přeměna potenciální a kinetické energie [27]

- Setrvačníky (uchování kinetické energie) – hustota energie cca 130 Wh/kg, životnost desítky tisíc cyklů, účinnost kolem 90 %
- Přecherpacovací vodní elektrárny – životnost 50 – 100 tisíc cyklů, účinnost 70 – 80 %
- CAES - uchování energie v podobě stlačeného vzduchu – hustota energie až 100 Wh/kg, účinnost kolem 70 %



Obr. 4.19 Účinnost vs. životnost technologií pro uchovávání energie [41]

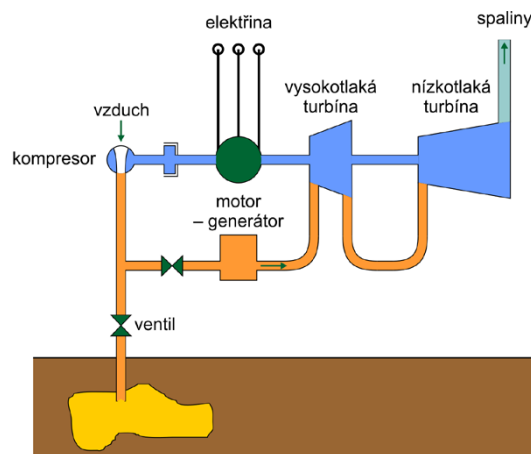
4.6.1 Přečerpávací vodní elektrárny

Nejznámější formou uchovávání energie užívanou v širokém měřítku a pro velké výkony je přečerpávací vodní elektrárna. Je založena na principu využití zemské gravitace. Jedná se o dvě nádrže, které jsou polohou v rozdílné výšce a jsou mezi sebou propojené spádovým potrubím. V případě, kdy je v elektrizační soustavě nízká spotřeba (přebytek energie), je voda z dolní nádrže přečerpávaná do horní, kde je vodní médium uchováno v podobě potenciální energie. Lze tak uchovat velké množství energie na velmi dlouho dobu. Při nedostatku energie v ES je voda vypouštěna z akumulární nádrže spádovým potrubím přes turbínu roztáčející alternátor, který vyrábí a dodává elektřinu do sítě. Tato technologie je vhodná pro uchovávání energie získané z větrných a fotovoltaických elektráren. Rychlost dodávky výkonu do sítě je 15 až 100 s a cena provozu je velmi nízká. PVE dokáže dodávat výkon až 1000 MW po dobu několika hodin. Značnou nevýhodou je nalezení vhodné lokality pro výstavbu, zásah do přírody a velká pořizovací cena.

4.6.2 Stlačený vzduch

Další vhodnou technologií pro uchování energie s velmi rychlým náběhem je tzv. CAES (z anglického Compressed Air Energy Storage). Princip CAES je obdobný jako je tomu u přečerpávacích vodních elektráren, kdy v momentě nízké

spotřeby v ES je elektřina využita pro stlačování vzduchu kompresorem do vhodného úložiště pod tlakem 20 MPa, které je zpravidla umístěno v podzemí (tlakové nádoby, podzemní útroby). V případě potřeby je uskladněný vzduch čerpán na povrch a tam pohání turbíny, které roztáčí alternátor vyrábějící elektřinu. V raných fázích vývoje CAES technologie dosahovala účinnosti pouze 40 až 50 %, protože při stlačování vzduchu dochází k jeho zahřívání (musí se chladit) a naopak při pohánění na povrch se musí zase zahřívát. V USA byla vyvinuta technologie ve spolupráci s vědeckým týmem společnosti RWE s názvem AA-CAES (z anglického Advanced Adiabatic CAES), která dosahuje účinnosti až 70 %. Vyzářené teplo po kompresi vzduchu je dále uskladněno a využito pro opětovné zahřívání stlačeného vzduchu. Pro velkou kapacitu zásobárny energie je tato technologie vhodná pro ukládání přebytku vyrobené elektřiny z větrných a fotovoltaických elektráren. Skladovací kapacita se pohybuje v rozmezí 40 až 290 MW, doba využití je kolem 2 až 3 hodin a rychlost dodání výkonu do ES je za 9 až 12 minut, v závislosti na použitých zařízeních a prostor pro stlačený vzduch. [28]



Obr. 4.20 Princip technologie stlačeného vzduchu [42]

4.6.3 Ostatní technologie

Další zmíněné technologie jsou zatím pro využití přebytku energie získané z větrných zdrojů nevyužitelné, protože jejich poměr velikosti uskladněné energie během životnosti a energie vložené do výroby je oproti PVE a CAES elektrárnám zanedbatelný. Pro budoucí konkurenceschopnost je nezbytné pracovat na prodlužování jejich životnosti, kapacity a doby uložení energie. Naděje se vkládá do metody Power to Gas, kdy se využívá elektrolýzy vody k přeměně na vodík a metan.

5 Rozbor výhod a nevýhod instalace VtE

Známým faktem je, že kterákoliv technologie pro výrobu elektrické energie s sebou nese záporné ekologické vlivy. Avšak využívání obnovitelných zdrojů se jeví v mnoha ohledech přívětivěji s minimálním dopadem na životní prostředí v porovnání s konvenčními zdroji energie.

5.1 Všeobecné přínosy větrných elektráren

- Vítr je teoreticky nevyčerpatelný obnovitelný zdroj energie, proto šetří zásoby neobnovitelných fosilních paliv pro konvenční výrobu. V České Republice, se např. za rok 2015 ušetřilo zhruba 460 tisíc tun uhlí výrobou elektřiny z VtE.
- Při provozu větrných elektráren neunikají žádné škodlivé emise (SO_2 , CO_2 , NO_x , nebo popílek) a tak neohrožují planetu skleníkovým efektem - jde o tzv. zdroj čisté energie.
- Výstavba, provoz a servis VtE vytváří nové pracovní místa a zdroj příjmů pro obce či města.
- Větrná energie je oproti fosilním palivům zcela zdarma.
- V případě havárie nehrozí zamoření nebo zničení velké části krajiny oproti jaderným a tepelným elektrárnám, proto je provoz VtE bezpečnější.
- Velké výkonové bloky klasických elektráren jsou v podobě VtE roztroušeny na mnoho menších zdrojů energie a proto nehrozí velkoplošný výpadek při nehodě.
- Nižší požadovaný přenášený výkon z jednotlivých VtE a tím se snižují nároky přenosu výkonu na velké vzdálenosti.
- Díky obnovitelným zdrojům energie se pracuje na vývoji stávajících a nových technologií pro efektivní ukládání přebytečné energie.
- Moderní VtE dokážou pracovat bez využití převodového ústrojí a tak částečně odpadá celková hlučnost VtE. Aerodynamický hluk ale nadále zůstává.
- VtE se stávají novým zdrojem turistického ruchu.
- Oproti neobnovitelným zdrojům energie nezasahují VtE tolik do krajiny. Jak

vzhledově, tak i svým dopadem.

- VtE o výkonu 1,5 MW dokáže vyrobit za 20 let provozu až 80 milionů kWh elektrické energie a tak ušetřit 90 tisíc tun hnědého uhlí.
- Po ukončení životnosti lze VtE rozebrat a většinu použitého materiálu dále recyklovat. Další výhodou je snadné uvedení místa do původního stavu.
- V některých oblastech je stavba VtE jedinou možností jak pokrýt poptávku po elektrické energii z důvodu nedostatku energetických zdrojů či náročnosti stavby velkých elektráren.
- Snižuje se závislost na odkupování elektřiny ze sousedních států.

5.1.1 Výhody pobřežních VtE

Seznam v kapitole 5.1 je aplikovatelný na každý druh větrné elektrárny. Pobřežní VtE skrývají další přínosy.

- Na moři fouká stabilnější a silnější vítr, než je tomu na souši, a proto jsou větrné turbíny postavené na moři efektivnější a mají výrazně vyšší výkonnost na instalovanou jednotku nežli VtE postavené na pevnině.
- Moře nabízí lepší podmínky i pro logistiku dopravy a tak lze instalovat rozměrnější větrné turbíny s mnohem vyšším výkonem než VtE na pevnině.
- Základové konstrukce pod mořskou hladinou mohou poskytovat nová stanoviště a úkryty pro kraby či jiné korýše a mořské živočichy.
- Větrné farmy postavené na moři bývají hodně vzdálené od pobřeží, proto vzbuzují výrazně menší odpor okolních obyvatel. Existují výjimky, kdy se výstavba plánuje v oblastech s velmi vysokou turistickou návštěvností, jako tomu bylo v případě stavby přímořské VtE u ostrova Mont Saint Michel ve Francii.
- Není potřeba dělat speciální protihlukové opatření. Hluk z VtE postavených na moři vadí svému okolí jen ojediněle kdy je větrný park postaven příliš blízko pevnině.
- Na moři je snadnější predikce větru a lze tak lépe předpovídat výrobu elektřiny pobřežních VtE. Stoupá tím i koeficient využitelnosti větrných zdrojů energie.

5.2 Všeobecné problémy větrných elektráren

- Zásadním problémem větrných elektráren je jejich nepredikovatelná výroba elektrické energie a s tím spojené dopady na distribuční soustavu, do které jsou připojovány. Tato problematika je podrobně rozebrána v kapitole č. 4.
- Celkový instalovaný výkon větrných elektráren je prozatím příliš nízký, a proto budou klasické konvenční elektrárny dále primárními zdroji elektrické energie.
- VtE způsobují tzv. stroboskopický efekt, který vytváří otáčející lopatky rotoru vystavené proti slunci (kmitající stín). Aby byl pozorovatel vystaven tomuto jevu, musí být v poloze kolmo proti rotoru VtE a jeho účinky působí do vzdálenosti okolo 600 m. Tato skutečnost se zohledňuje při plánování projektu a VtE se tak stavějí v dostatečné vzdálenosti od obydlených destinací.
- Odraz slunce od rotorových lopatek způsobuje nepříjemné a rušivé záblesky – tzv. diskoeffekt. Tento problém se odstraní použitím vhodného matného nátěru lopatky.
- VtE mohou mít dopad na kvalitu televizního a radiového signálu. Rotor rozptyluje a odráží šíření elektromagnetického toku signálu a dochází tak k jeho útlumu. Pokud díky umístění VtE hrozí tento fakt, instalují se v její blízkosti posilovače signálu.
- Ochránci přírody poukazují na hluk způsobený VtE. Jedná se o hluk vytvořený především převodovým ústrojím, který odpadá v případě stavby větrného rotoru v kombinaci s pomaloběžným synchronním generátorem a výkonovým polovodičovým měničem. Dalším zdrojem šíření je aerodynamický zvuk, který způsobuje tření lopatky rotoru a vzduchu. Tento fakt se musí zohlednit již při projektování a dodržet tak stanovené limity hluku. V denním provozu nesmí překročit práh 50 decibelů a v nočním provozu 40 decibelů. Modernizace a vývoj VtE klade důraz na optimalizaci tvaru listu lopatky a tím zajistit lepší izolaci hlučnosti.
- Větrné elektrárny vytváří infrazvuk. Jedná se o podélné vlnění s frekvencí do 20 Hz (lidské ucho ho není schopné slyšet), které může u člověka způsobovat ztrátu pozornosti či agresivitu. Limitní hranice infrazvuku není pevně stanovena, ale doporučení je nepřekračovat 90 decibelů.

- Stavba větrných farem má dopad na krajinný ráz. Tento vliv je zapotřebí zhodnotit již ve fázi projekce, kdy se dělá podrobný průzkum v podobě vizualizace, okruhu viditelnosti a odborných posudků. K posouzení zásahu do krajiny se může vyjádřit i obyvatelstvo v okolí plánované stavby.
- S klesající viditelností roste nebezpečí střetu větrného rotoru s prolétajícím ptactvem, které hlavně na podzim migruje v hojném množství do teplých krajín. VtE se proto stavějí mimo místa s přirozeně častým výskytem ptactva, nebo mimo jejich předpokládané migrační cesty.
- Plašení zvěře v okolí větrné elektrárny.
- VtE lze stavět jen ve vhodně zvolené lokalitě, která má dostatečný větrný potenciál.
- V zimě se na lopatkách rotoru může tvořit námraza. To vede ke snížení využitelnosti efektivního tvaru lopatky a ke zhoršení účinnosti celého bloku. Odtržení ledu z lopatky ohrožuje životy nebo majetek nacházející se v prostoru VtE. Aby se námraze předcházelo, instalují se při výrobě do listu rotorové lopatky ventilátory s topným tělesem.

5.2.1 Nevýhody přímořských VtE

- Značnou nevýhodou offshore větrných farem spočívá ve složitosti jejich výstavby, provozu a zajištění servisu. Tato problematika je více rozebrána v kapitole č. 3. S tímto faktem rostou jak pořizovací náklady, tak i náklady na provoz. Částečná kompenzace je možnost postavení turbín větších rozměrů oproti VtE stavěným na pevnině, a tak dosáhnout větších hodnot instalovaného výkonu. Další kompenzací je silný a v celku neměnný mořský vítr.
- Přímořské VtE jsou často stavěny desítky až stovky kilometrů od pevniny a tak nastává problém s přenosem elektrické energie na pevninu (viz. kapitola č. 4.4).
- U VtE stavěných blízko břehu hrozí vznik společenského odporu z hlediska pohledu na estetiku pobřeží, omezení rybolovu a možnosti využití pobřežních oblastí pro vodní sporty.
- Současná rozvodná síť se musí přizpůsobit změnám v infrastruktuře výroby elektřiny, aby velký rozvoj větrné energie nezpůsobil v této síti značné problémy. Evropská unie uvažuje o dotacích pro výstavbu vedení, která propojí pobřežní elektrárny a místa s velkou koncentrací výroby elektřiny.

- Drsné pracovní podmínky a velké pracovní zatížení při stavbě VtE na moři má za následek velkou fluktuaci pracovníků.
- Nedostatečný počet zkušených inženýrů a projektových manažerů, což celkově omezuje výstavbu elektrárny.
- Při havárii na větrné elektrárně hrozí únik oleje do moře.
- Při instalaci základové konstrukce se využívají speciální kladiva, která při své činnosti mohou generovat hluk na úrovni až 160 decibelů. To negativně ovlivňuje březost velryb.
- Potenciální hrozba poškození mořského dna.
- Vzhledem k celkově nové oblasti výroby elektřiny, nedostatečné dotaci, složitosti stavby a provozu, roste cena elektřiny na straně konečného odběratele.

5.3 Úhel pohledu a mýty

Některé ze zmíněných nevýhod větrných elektráren, jsou založené pouze na pocitu, nežli na objektivním posouzení daného problému. Strana odpůrců proto mate svými výroky širokou veřejnost neznalých lidí a vznikají tak mýty, které nejsou prokazatelné nebo jsou dokonce tyto nepřesné informace vyvráceny.

5.3.1 Hlučnost

Zatěžuje provoz VtE opravdu okolí svou hlučností? Toto tvrzení vychází z prvních elektráren, které byly vyrobeny v jejich průkopnické fázi vývoje na počátku 90. let. Moderní turbíny dosahují mnohem nižších hodnot naměřeného akustického výkonu a jejich vývoj se stále zlepšuje. S rostoucí vzdáleností od zdroje šíření rychle klesá přenášený hluk do svého okolí. Již 350 m od větrné farmy je hlučnost kolem 35 až 40 dB, což odpovídá běžnému hluku v obývacím pokoji. Vanoucí vítr způsobuje často větší hluk ve svém okolí než samotná VtE (např. koruny stromů). Aby nedocházelo k pochybnostem, dělají se přísné hygienické měření hlučnosti VtE. Projekty se plánují na minimální vzdálenost 400 m od obydlených částí, a proto jsou hygienické limity hlučnosti s rezervou dodrženy.

5.3.2 Infrazvuk

Dlouholeté podrobné výzkumy v oblasti infrazvuku, který může vytvářet větrná elektrárna, dokazují, že naměřené hodnoty jsou hluboko pod hygienickými limity a tak neexistují žádné důkazy o nepříznivých vlivech na lidský organismus. Větrné elektrárny zvyšují ve svém okolí přirozený infrazvuk maximálně o 2 dB, ale spíše vůbec. Kritických hodnot bylo zaznamenáno pouze ojediněle v případě nějaké technické závady na VtE a jednalo se pouze o stav dočasný. Zdroje přirozeného infrazvuku v životním prostředí, jsou např. bouřky, vodopády, větrné turbulence vysokých budov nebo šum stromů.

5.3.3 Krajinný ráz

Stavění větrných farem má nesporně určitý dopad na krajinu, ale myslím si, že zasahuje mnohem šetrněji nežli výstavba tepelných či jaderných elektráren. Jde o názor každého jedince a někdo dominantní stavby VtE obdivuje, jinému můžou vadit. VtE zvláště postavené na moři dokonce přitahují pozornost lidí a pořádají se turistické zájezdy do těchto lokalit. Dalším úhlem pohledu je dopad elektrárny na životní prostředí. VtE jsou zdrojem čisté energie a tak nevypouštějí žádné škodlivé emise do ovzduší, nepotřebují skladovat vzniklé odpadní produkty při přeměně paliva na elektrickou energii a nehydří krajinu těžbou paliva pro svůj chod. Odpadní produkty velkých elektráren mají za následek i vznik kyselých dešťů, který je pro hyzdění krajiny neméně zásadní.

5.3.4 Ohrožení ptactva

Dosavadní průzkumy ukazují, že riziko usmrcení ptáků zapříčiněného střetem s větrnou elektrárnou je ve srovnání s úmrtností zapříčiněné se střetem jiných překážek (automobily, okna, výškové budovy, vysokonapěťové vedení, vysílače atd.) velmi mizivé. Vývoj VtE přináší rostoucí průměry vyráběných rotorů a tím se snižuje jejich rychlost otáčení, což výrazně redukuje riziko střetu ptactva s turbínou. Navíc se kolem listu lopatky při otáčení vytváří vzduchový polštář, který ptáka pouze vychýlí a nemusí tak dojít ani k jeho zranění. Horší situace nastává, když je mlha či noc, ale ani v tomto případě nejsou zaznamenány fatální dopady na životech opeřenců.

5.3.5 Plašení zvěře

Veterinární univerzita v Hannoveru provedla tříletý výzkum na problematiku plašení divoké zvěře v okolí VtE či jejich stavby. Sledované území čítalo 36 větrných farem a bylo srovnáváno s lokalitou, kde žádné VtE nejsou. Hustota zvěře v okolí větrných farem po dobu výzkumu zůstala stejná, nebo se dokonce i trochu zvětšila a to i v případech, kdy v této lokalitě probíhala výstavba nových turbín. Nehrozí tak riziko spojené s odchodem zvěře z lokalit, kde jsou postavené větrné parky, což je často uváděný argument z řad ochránců přírody a odpůrců větrné energie.

6 Závěr

Cílem bylo vytvořit komplexní přehled a vysvětlit fyzikální principy větrných elektráren s podstatným zaměřením na přímořské oblasti, objasnit přínosy a nedostatky spojené s využíváním větrné energie a vysvětlit nepříznivé vlivy připojování větrných farem do elektrizační soustavy.

Úvod mé diplomové práce je zaměřen na historii a vývoj v oblasti využívání větrné energie jak na pevnině, tak v přímořských oblastech. Nechybí ani stručný rozbor vzniku větru, jeho měření a výpočtu výkonu. Je zde ucelený přehled dosud největších pobřežních farem v Evropě spolu s poměrem zastoupených turbín použitých na jejich výstavbu a celkový instalovaný výkon jednotlivých farem. Z tohoto přehledu vyplývá, že největší zastoupení pobřežních větrných elektráren je na území Spojeného království, Německa, Dánska a Belgie. Jedná se o velice perspektivní zdroj čisté energie, což potvrzují projektové záměry a cíle plánované Evropskou asociací pro větrnou energii, které chtějí oblast větrných farem na moři rozšířit o zhruba 190 GW do roku 2030.

V další části jsem měl za úkol popsat fyzikální princip větrné elektrárny. Do této oblasti jsem zahrnul mimo jiné výpočet účinnosti, vznik vztlakové síly a detailněji jsem popsal základní složení větrných elektráren.

V kapitole č. 3 popisuji technická řešení pobřežních větrných farem. Protože je nutné tyto elektrárny stavět na moři, popsal jsem druhy používaných základových konstrukcí, které se liší podle hloubky mořského dna a jeho složení. Mořská voda agresivně atakuje základové konstrukce a tak je nutné je před účinky oxidace vhodně chránit. Stavba větrných farem na moři je komplikovanější oproti stavbě na pevnině a je zapotřebí vhodného stavebního plavidla. Mořská poloha má za následek i složitější dopravu a samotný přechod servisních pracovníků na plošinu elektrárny.

Velmi podstatná část mé diplomové práce je zaměřena na integraci větrné elektrárny do elektrizační soustavy. Povedlo se mi vytvořit ucelený přehled a rozbor této problematiky. Zahrnuje druhy regulace činného výkonu větrných elektráren, systémy přeměny větrné energie na elektrickou včetně omezení

proudových rázů v případě připojení VtE k síti, přenos elektrického výkonu na pevninu, zásadní vlivy větrných elektráren na elektrizační soustavu a možnosti v oblasti uchovávání přebytečné energie.

Poslední část pojednává o rozboru výhod a nevýhod instalace větrné elektrárny. Zde jsem nemohl ani opominout fakt, že některé často uváděné kritiky proti větrným elektrárnám jsou nepřesné nebo diskutabilní a vznikají z řad ochránců přírody či samotných odpůrců větrné energie. Proto jsem se snažil o nezaujatý pohled na zažité mýty a předsudky a uvedl je na pravou míru.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Bahnová, V. *Větrné mlýny - romantické Holansko* [online], 2008. SME [cit. 2016-01-16]. Dostupné z: <http://bahnova.blog.sme.sk/c/150382/Veterne-mlyny-romanticke-Holandsko-II-cast.html>.
- [2] *Z historie využívání energie větru v českých zemích* [online], ČSVE. [cit. 2016-01-25]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/z-historie-vyuzivani-energie-vetru-v-ceskych-zemich/36>.
- [3] Koč, B. *Z historie větrných elektráren* [online], 2005. Odborné časopisy. [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/z-historie-vetrnych-elektren--13364>.
- [4] Habrych, R. *Pobřežní větrné parky*; Invicta BOHEMICA, s.r.o.: Analýzy energetického komplexu ČR a SR, 2014 [cit. 2016-02-14].
- [5] *List of offshore wind farms* [online], 2016. Wikipedia. [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_offshore_wind_farms.
- [6] Žák, M. *Jak vzniká vítr* [online], 2015. [cit. 2016-02-26]. In-počasi. Dostupné z: <http://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/vitr-jak-vznika/>.
- [7] *Větrná energie* [online], SŠ-COPTH: Praha 9, Poděbradská 1/179 [cit. 2016-02-30]. Dostupné z: <http://naucimevas.cz/wp-content/uploads/2013/12/vetrna-energie.pdf>.
- [8] RYCHETNÍK, Václav, Jiří PAVELKA a Josef JANOUŠEK. *Větrné motory a elektrárny*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997, 199 s. ISBN 80-10-01563-7 [cit. 2016-03-06].
- [9] *Vznik vztlaku* [online], ČSVE. [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/vznik-vztlaku/307>.
- [10] *Gondola* [online], ČSVE. [cit. 2016-03-14]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/detail-kategorie/gondola/85>.
- [11] CROME Horst. *Technika využití energie větru*. 1. vyd. HEL, 2002, 144 s. ISBN 80-86167-19-4 [cit. 2016-03-18].

- [12] *Stožár* [online], ČSVE. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/detail-kategorie/stozar/86>.
- [13] *Betonový základ* [online], ČSVE. [cit. 2016-03-23]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/Betonovy-zaklad/305>.
- [14] *Protikorozní nátěry* [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://static.barvy-eternal.upgates.com/f/fg85yzjqon503f4bebe39cf.pdf>.
- [15] *Účinné mazivo šetrné k životnímu prostředí* [online], 2013. KLÜBER LUBRICATION CZ s.r.o.. [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: http://www.klueber.com/cz/cs/news_detail/2859/.
- [16] Siemens: *Speciální lodě pro servis mořských větrných elektráren* [online], 2015. Elektrotechnika pro odborníky. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/obnovitelne-zdroje/79.php>.
- [17] *Obnovitelné zdroje elektrické energie* [online], ČVUT v Praze [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: https://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-2-OZE.pdf.
- [18] ŠANTÍN, Vlastimil. *Simulace jevů způsobených připojováním a provozem větrných elektráren a farem*. Plzeň, 2012. [cit. 2016-04-07]. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická.
- [19] DUDÍK, Tomáš. *Návrh větrné elektrárny*. Plzeň, 2013. [cit. 2016-04-10]. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická.
- [20] *Větrné elektrárny s asynchronními generátory v sítích VN* [online], Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:u3FEhjx-2EgJ:www.elektrorevue.cz/cz/download/vetrne-elektrarny-s-asynchronnimi-generatory-v-sitich-vn/+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz>.
- [21] MAREŠ, Jiří. *Metody objektivního porovnávání charakteristických vlastností větrných elektráren při jejich připojování v rámci distribuovaných energetických systémů*. Plzeň, 2015. [cit. 2016-04-15]. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická.
- [22] MIČKA, Dominik. *Model HVDC spojky pro laboratorní úlohu*. Brno, 2013. [cit. 2016-04-16]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechnická.

- [23] MARTINEC, Roman. *Měniče pro HVDC přenos elektrické energie*. Brno, 2014. [cit. 2016-04-18]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechnická.
- [24] Majling, E. *HVDC – stejnosměrný přenos elektrické energie* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/hvdc-stejnosmerny-prenos-elektricke-energie>.
- [25] Švejnar, P. *Stabilita elektrizační soustavy* [online], 2007. Vesmír. [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: <http://casopis.vesmir.cz/clanek/stabilita-elektrizacni-soustavy>.
- [26] Budín, J. *Analýza enormních přetoků výkonu z Německa na přelomu roku 2014/2015* [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/analyza-enormnich-pretoku-vykonu-z-nemecka-na-prelomu-roku-20142015>.
- [27] Dvořák, P. *Akumulace elektřiny* [online], 2013. TZB-info. [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/7435-akumulace-elektriny>.
- [28] Jančar, R. *ČEZ zkoumá skladování elektřiny pod zemí. Podívejte se, jak to funguje* [online]. Technet. [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: http://technet.idnes.cz/cez-zkouma-skladovani-elektriny-pod-zemi-podivejte-se-jak-to-funguje-1jd-/tec_tecnika.aspx?c=A091022_140139_tec_tecnika_rja.
- [29] *Všeobecné cirkulace atmosféry*. www.google.com: obrázky [online]. [cit. 2016-02-26]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/pics/obro4-06.jpg.
- [30] *Beaufortova stupnice* [online], 2016. Wikipedie. [cit. 2016-02-30]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Beaufortova_stupnice.
- [31] *Darrierův rotor ve tvaru pí*. www.google.com: obrázky [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/co/Darrieus-Rotor_Ennabeuren-3256.jpg/340px-Darrieus-Rotor_Ennabeuren-3256.jpg

- [32] *Struktura větrné elektrárny* [online]. HW.cz. [cit. 2016-03-18]. Dostupné z: http://automatizace.hw.cz/files/images/image/smallvetrna_elektrarna_struktura.jpg.
- [33] *Monopile konstrukce* [online]. [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://subseaworldnews.com/wp-content/uploads/2014/09/Tiger-during-armour-rock-installation-with-inclined-fall-pipe-at-the-Butendiek-monopiles.jpg>.
- [34] *Příhradová konstrukce* [online]. [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://www.bladt.dk/Storage/cache/img/UserFiles/image/News/ff389a15cd88a140fd648d86d5731a3d.jpg>.
- [35] *Tripod konstrukce* [online]. [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: http://www.hadel.net/autos/assets/2012/akt/akt_sl_tripod_blg_premiere2012_131.jpg.
- [36] *Tripile konstrukce* [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: https://c2.staticflickr.com/4/3468/3400738277_70cde9f67c_b.jpg.
- [37] *Elektrický systém natáčení lopatek* [online]. [cit. 2016-03-30]. Dostupné z: http://www.ifm.com/ifmus/web/apps-by-industry/cat_060_010_010.html.
- [38] *Systém AG s vinutým rotorem a měničem kmitočtu* [online]. [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: http://automatizace.hw.cz/files/images/image/smallrizeni_vetrne_elektrarny2_cz.jpg.
- [39] *Změny výkonu VtE a rychlosti větru* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://oi61.tinypic.com/29liqyr.jpg>.
- [40] *Přípustné hladiny pro periodické změny napětí* [online]. [cit. 2016-04-24]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~tesarova/PE/Soubory/Kap8.pdf>.
- [41] *Účinnost vs. životnost technologií pro uchovávání energie* [online]. [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/docu/clanky/0074/007435026.png>.

- [42] *Princip technologie stlačeného vzduchu* [online]. [cit. 2016-05-03].
Dostupné z:
<http://www.nazeleno.cz/Files/FckGallery/Nov%C3%BD%20WinRAR%20ZIP%20archiv.zip/obr7.png>.