

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Metody objektivního porovnávání charakteristických
vlastností větrných elektráren při jejich připojení
v rámci distribuovaných energetických systémů**

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří MAREŠ**
Osobní číslo: **E12B0037P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Metody objektivního porovnání charakteristických vlastností větrných elektráren při jejich připojování v rámci distribuovaných energetických systémů**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

Bakalářská rešeršní práce bude zaměřena na tyto body:

1. Popište současný stav a základní typy používaných větrných elektráren v ČR.
2. Uveďte pracovní charakteristiky těchto větrných elektráren.
3. Ve vybraných případech uveďte údaje o roční produkci elektrické energie.
4. Připravte a prezentujte energetickou efektivnost a provozní náklady při připojování větrných elektráren do distribuční sítě.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

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

Seznam odborné literatury:

1. Fiala, V.: Větrné elektrárny - sborník Obnovitelné zdroje energie, část 6, Praha 1994
Pázral, E.: Metody vyhodnocování transformace energie větru na elektrickou - časopis Zemědělská technika, Praha 1995
2. Miessler, M.: Poruchovost větrných elektráren - Větrná energie, časopis České společnosti pro větrnou energii č. 1/95, Praha 1995
Pázral, E.: Větrné elektrárny - časopis Mechanizace zemědělství č. 5/94, Praha 1994
3. Pázral, E.: Dlouhodobá měření charakteristických vlastností větru - časopis Zemědělská technika, Praha 1995
4. Skripta a přednášky z předmětu Elektroenergetika I, II, VEN
5. Statistické metody v průmyslové praxi - ČSN 01 0250


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

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

Anotace

Mnou předkládaná bakalářská práce se zabývá technologií větrných elektráren, uvádí základní způsoby využití energie větru, sloužících k pohonu jednotlivých druhů větrných soustrojí. Dále jsem popsal princip na jakém větrné elektrárny (VTE) pracují a pomocí větrné mapy České republiky našel nejvhodnější místa pro výstavbu VTE. Cílem práce bylo podat ucelený přehled o stavu a typech větrných elektráren používaných v ČR. Dále porovnat pracovní charakteristiky větrných elektráren, ve vybraných případech uvést údaje o roční produkci elektrické energie jednotlivých větrných farem. V poslední části práce se zabývám problematikou připojování větrných elektráren k distribuční soustavě.

Klíčová slova

Větrné elektrárny, elektrická energie, větrné generátory, obnovitelné zdroje energie, větrný park, vítr

Abstract

The presented thesis deals with the technology of wind power, provides the basic ways of using wind energy used to drive different types of wind generator. I also described the principle on which wind turbines operate using a wind map of Czech Republic found the most suitable sites for construction of wind farms. The goal was to provide a comprehensive overview of the status and types of wind turbines used in the Czech Republic. To compare the performance characteristics of wind turbines, in selected cases, provide details of the annual electricity production of individual wind farms. And in the last part connecting wind turbines to the power grid.

Key words

Wind turbines, electrical energy, wind generators, renewable energy, wind farm, wind

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 1.6.2015

Jiří Mareš

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 VÍTR	12
1.1 VZNIK VĚTRU	12
1.2 RYCHLOST VĚTRU.....	13
1.3 ENERGIE VĚTRU	15
1.4 ÚČINNOST VĚTRNÉHO STROJE.....	16
2 ZÁKLADNÍ ČÁSTI VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	18
2.1 ROTOR	19
2.1.1 Vznik vztlakové síly	20
2.1.2 Aerodynamika rotoru větrné elektrárny.....	22
2.1.3 Konstrukce rotorového listu VTE.....	24
2.1.4 Indukovaný odpor na rotorovém listu VTE	25
2.2 STROJOVNA	25
2.2.1 Hřídel	26
2.2.2 Nosný rám strojovny	26
2.2.3 Převodovka	27
2.2.4 Generátor.....	28
2.2.5 Systém natáčení strojovny.....	28
2.2.6 Hydraulické systémy	29
2.3 STOŽÁR	29
2.3.1 Ocelové tubusové stožáry.....	29
2.3.2 Příhradové stožáry.....	30
2.3.3 Betonové stožáry	31
2.4 ZÁKLAD.....	31
3 SOUČASNÝ STAV A ZÁKLADNÍ TYPY POUŽÍVANÝCH VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN V ČR..	32
3.1 SOUČASNÝ STAV VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN V ČR.....	32
3.2 ZÁKLADNÍ TYPY POUŽÍVANÝCH VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN V ČR.....	34
3.2.1 Rozdělení VTE podle instalovaného výkonu	36
4 PRACOVNÍ CHARAKTERISTIKY VTE A ÚDAJE O ROČNÍ PRODUKCI ELEKTRICKÉ ENERGIE	39
5 PŘIPOJOVÁNÍ VTE DO DISTRIBUČNÍ SÍTĚ	43
5.1 ZPŮSOBY PŘIPOJENÍ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	44
5.1.1 Připojování přes soft-startér.....	44
5.1.2 Připojení přes externí rezistor	45
5.1.3 Kompenzace jalového výkonu	46
5.2 VLIV VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN NA ES	47
5.2.1 Lokální vlivy.....	47
5.2.2 Systémové vlivy	50
5.3 PROVOZNÍ NÁKLADY NA PŘIPOJENÍ VTE	51
5.4 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	52

ZÁVĚR	53
INFORMAČNÍ ZDROJE	55
LITERATURA.....	55
INTERNET	55
NORMY A PŘEDPISY	57
OBRÁZKY	57

Seznam symbolů a zkratk

VTE	Větrná elektrárna
PS	Přenosová soustava
DS	Distribuční soustava
ES	Elektrizační soustava
PDS	Provozovatel distribuční soustavy
OZE	Obnovitelné zdroje energie
POZE	Novela zákona o podporovaných zdrojích
HDO	Hromadné dálkové ovládání
E (J)	Kinetická energie tělesa
m (kg)	Hmotnost tělesa
v (m/s)	Rychlost tělesa
ρ (kg/m ³)	Hustota vzduchu
A (m ²)	Plocha protékána proudem vzduchu
P (W)	Výkon
c_p (-)	Součinitel výkonosti
D (m)	Průměr rotoru
π (-)	Ludolfovo číslo
c_y (-)	Aerodynamický součinitel vztlaku
c_x (-)	Aerodynamický součinitel odporu
n (ot/s)	Otáčky rotoru
GRP	Epoxidová pryskyřice
ČEPS	Česká přenosová soustava

Úvod

Mnou předkládaná práce je zaměřena na problematiku větrných elektráren a větrné energie, jako obnovitelného zdroje elektrické energie.

V dnešní době stále stoupají nároky lidstva na spotřebu energie. Tento trend je způsoben jak připojováním nových oblastí k elektrické síti, tak životním stylem lidí. Dnes už si málo kdo dovede představit byt' jediný den bez elektrické energie.

Elektrická energie se ve využitelné podobě v přírodě nevyskytuje, takže si ji musíme různými způsoby vyrábět. Základem pro výrobu elektrické energie je přeměna jiné formy energie, která je v přírodě dostupná. K tomuto účelu jsou stále nejvíce využívána fosilní paliva, zejména uhlí, ropa, zemní plyn. Protože však fosilních paliv jsou v přírodě jen omezená množství, nutí to lidi přemýšlet, jak tento zdroj energie v budoucnu nahradit. Jako jedna z možností se nabízí obnovitelné zdroje energie.

Obnovitelný zdroj energie je schopen teoreticky poskytovat energii do nekonečna. Obnovitelné zdroje energie na planetě Zemi mají svůj původ zejména v energii slunečního záření procházejícího atmosférou, dopadajícího na povrch Země. Sluneční záření vzniká termojadernou reakcí v nitru Slunce. Na Zemi pak dochází k jevům, jejichž energie se využívá přímo nebo je přeměňována na jinou formu využitelné energie. Mezi nejvýznamnější obnovitelné zdroje energie patří vodní energie, sluneční energie, energie biomasy, geotermální energie a energie větrná.

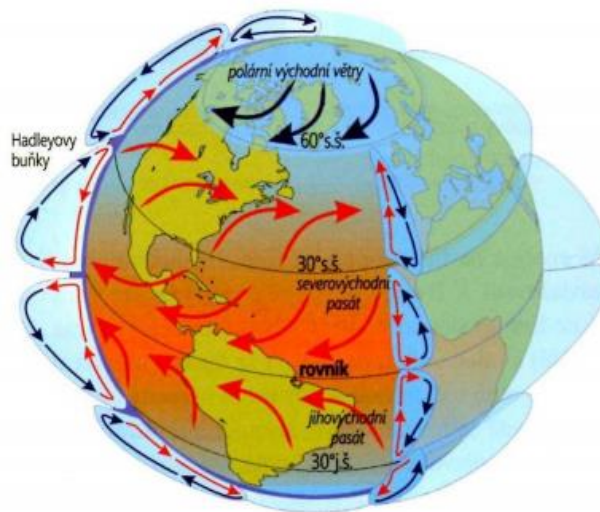
Energetický potenciál obnovitelných zdrojů je obrovský, avšak někdy jsou třeba velké počáteční náklady pro výkup půdy a vystavění zařízení na přeměnu různých forem energie na energii elektrickou, o kterou nám jde. Výhodou obnovitelných zdrojů je to, že nás nic nestojí a obklopují nás všude okolo. V poslední době získává větrná energie stále významnější zastoupení v celkovém objemu vyrobené energie.

1 Vítr

1.1 Vznik větru

Větrem nazýváme určité proudění vzduchu. Vznik větru je zapříčiněn působením slunečního záření. Slunce totiž vyzařuje ohromné množství energie a Země část této vyzařované energie přijímá. Přibližně 2% dopadající sluneční energie jsou přeměňovány na proudění vzduchu. Mezi množstvím sluneční energie dopadajícím na rovník a na póly je ovšem velký rozdíl. Tato nerovnováha je příčinou ohromného transportu energie od rovníku směrem k pólům.

Přenos tohoto tepla je uskutečňován zejména přesouváním hmoty vzduchu. Vznikají gigantické Hadleyovy cirkulační buňky (Obr. 1.1). Dále je proudění vzduchu odkláněno rotací Země, což je příčinou vzniku do značné míry rovnoměrných větrných proudů. Kromě globálního proudění působí i místní vlivy. K těm patří zejména působení oblasti tlakové níže a tlakové výše, které způsobují stáčení větrů.



Obr. 1.1 Globální cirkulace a vznik větru

V přímořských oblastech navíc působí chladný mořský vánek, který proudí od moře na pevninu, a pobřežní vánek, který proudí z pevniny k moři. Zářením Slunce je během dne zahřívána pevnina a vzduch, který se nad ní rozprostírá, se dokáže ohřát výrazně více než vzduch, který se rozprostírá nad mořskými vodami. Teplejší vzduch nad pevninou stoupá a na jeho místo vane chladný vzduch od moře. Během noci se tento cyklus otočí, protože pevnina chladne rychleji než moře. [2]

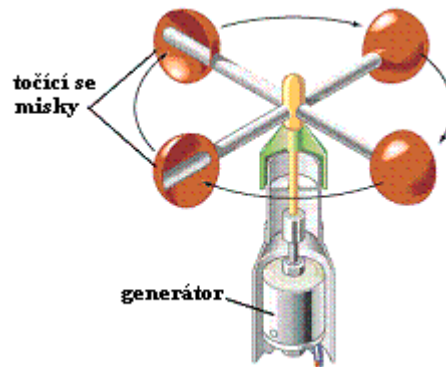
1.2 Rychlost větru

Rychlost větru je rychlost vzduchu měřená vůči zemi. Rychlost větru lze odhadnout podle jeho účinků na předměty poblíž zemského povrchu. Účinky větru se porovnávají s tzv. Beaufortovou stupnicí rychlosti větru (Tab. 1.2). Stupnici vytvořil roku 1806 anglický kontraadmirál Francis Beaufort pro námořní účely. Za dobu svého používání Beaufortova stupnice prodělala množství změn, které reagovaly na aktuální potřeby měření síly větru. Její hlavní výhodou je použitelnost bez jakýchkoliv dalších přístrojů. Tabulka se skládá z jednotlivých stupňů Beauforta, rychlosti větru, označení síly větru a popisu projevů účinku větru v přírodě. [1]

Tab. 1.2 Beaufortova stupnice [1]

Rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] od do	Stupeň Beauforta	Označení síly větru	Projev v přírodě
0 až 0,2	0	bezvětrí	kouř stoupá kolmo
0,3 až 1,5	1	vánek	kouř stoupá podle větru
1,6 až 3,3	2	slabý vítr	vítr je cítit na tváři, šelest listí
3,4 až 5,4	3	mírný vítr	pohyb větvíček stromů, čeří hladinu vody
5,5 až 7,9	4	dost čerstvý vítr	zvedá prach a papíry, napíná praporek
8,0 až 10,7	5	čerstvý vítr	napíná větší prapory, tvoří menší vlny
10,8 až 13,8	6	silný vítr	pohybuje větvemi, tvoří vlny na vodě
13,9 až 17,1	7	prudký vítr	pohybuje středními stromy, nesnadná chůze
17,2 až 20,7	8	bouřlivý vítr	láme větve stromů, pohybuje silnějšími stromy
20,8 až 24,4	9	vichřice	škody na střeších, ulamuje menší stromy
24,5 až 28,4	10	silná vichřice	vyvrací stromy, působí škody na obydlích
28,5 až 32,6	11	mohutná vichřice	velké škody na domech, poráží chodce
32,7 a více	12	orkán	ničivé účinky

Druhý způsob sledování je pomocí zařízení zvaného anemometr. Je to přístroj pro měření nejen rychlosti, ale i směru větru. Existuje celá řada typů anemometrů pracujících na různých principech. Nejznámější jsou mechanické anemometry. Jejich funkční část se skládá z rotoru, který se otáčí na svislé hřídeli, a je tvořen třemi či čtyřmi rameny, z nichž každé je zakončeno půlkruhovitými miskami. Otáčky rotoru se jednoduchým mechanismem přenášejí přímo na ručkový ukazatel, popřípadě je možné tento údaj zpracovat elektronicky. Dále je možné se setkat s anemometry aerodynamickými, značkovacími, akustickými, atd. Anemometr napojený na zapisovač se nazývá anemograf. Zde se vyčísľují střední hodnoty rychlosti a směru větru za dobu 60 minut, celkem 24krát denně. [8]



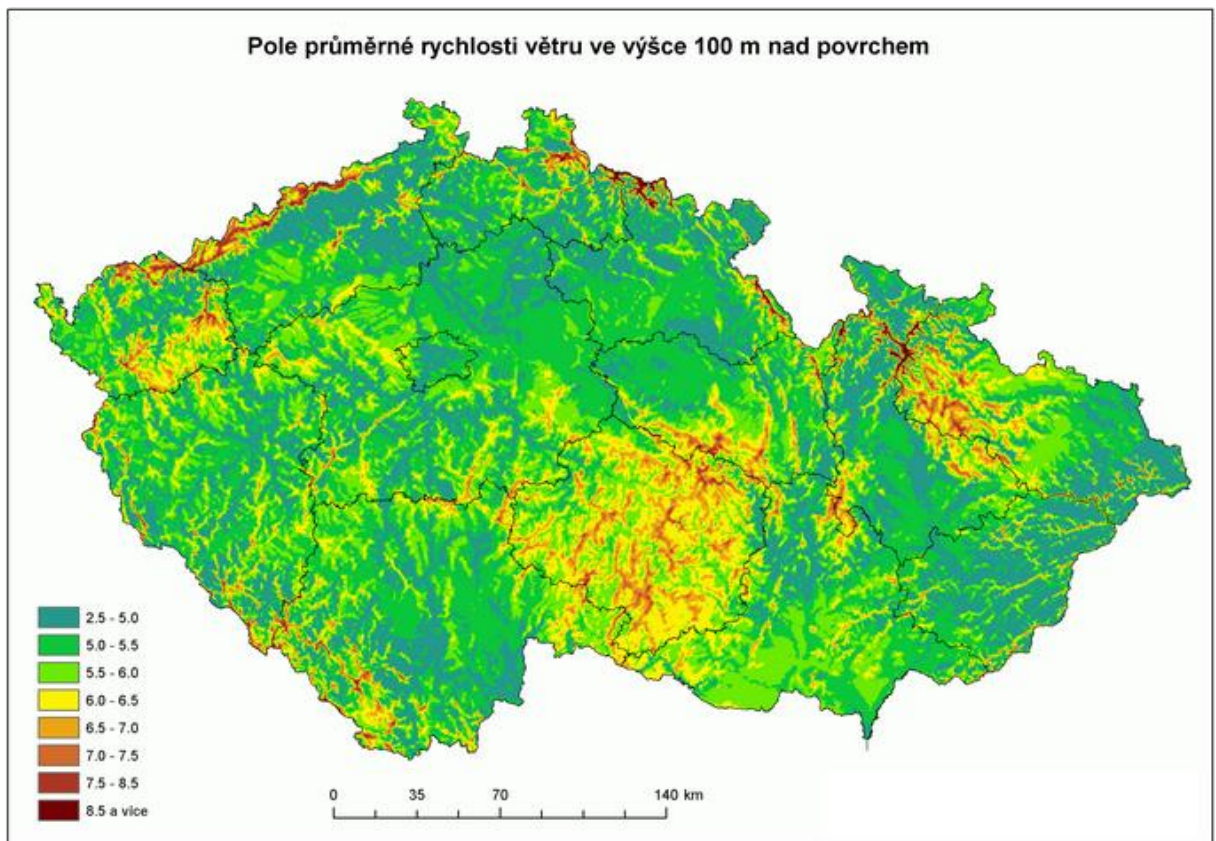
Obr. 1.3 Schéma miskového anemometru

Kromě uvedených jednoduchých zařízení na sledování rychlosti a směru větru jsou v současné době používány přístroje, které doplněné speciálním programovým vybavením dokáží dlouhodobě měřit, zpracovat, vyhodnotit a přehledně zobrazit požadované veličiny, a tím připravit základní podklady potřebné pro úvahy a výpočty týkající se provozu a návratnosti finančních prostředků na stavbu větrné elektrárny. [8]

Pohyb vzduchu se skládá z celé řady nárazů, náhlých zesílení a zeslabení větru, neustále následujících za sebou. Poměrně rychlé změny rychlosti a směru větru se udávají nárazovitostí větru.

Pro výstavbu a rentabilitu větrné elektrárny je nedůležitější výběr správného místa. Proto jsem si našel větrnou mapu České republiky (Obr. 1.3), která byla vytvořena ústavem fyziky atmosféry Akademie věd ČR, a využil ji pro nalezení nejlepších oblastí z hlediska větrných podmínek. Nejlepší oblasti můžeme pozorovat v místech, kde nebrání pohybu větru žádné přírodní překážky, to jsou zejména pohoří a vrchoviny. Přirozeně se tu projevuje také vyšší nadmořská výška a s ní spojená vyšší průměrná roční rychlost větru.

Pro správnou činnost větrné elektrárny jsou požadovány rychlosti větru od 4 m/s – 24 m/s. Toto rozmezí se různí podle použití jednotlivých typů větrných soustrojí. Při vyšších rychlostech nad 12 m/s začne většina větrných elektráren automaticky natáčet listy vrtule, aby nedošlo ke zničení, vlivem odstředivé síly. Jakmile rychlost větru dosáhne 25 m/s aktivuje se obvykle automatická brzda, čímž dojde k úplnému zastavení vrtule a elektrárna je odpojena od sítě. [27][4]



Obr. 1.3 Větrná mapa České republiky

1.3 Energie Větru

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

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (J) \quad (1.1)$$

Pro hmotnost vzduchu platí vztah (1.2), kde ρ je hustota vzduchu, V je objem, A je plocha a s je dráha, kterou urazí pohybující se vzduch.

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot s = \rho \cdot A \cdot v \cdot t \quad (kg) \quad (1.2)$$

Dosadíme-li za hmotnost m ve vztahu (1.1) výraz z pravé strany rovnice (1.2), dostaneme vzorec pro stanovení energie větru vanoucího plochou A . Je-li A v m^2 , ρ v kg/m^3 a v v m/s dostaneme energii větru E v joulech.

$$E = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot t \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot t \cdot v^3 \quad (J) \quad (1.3)$$

Pro výkon větru P ve wattech využijeme obecné známý vztah mezi P a E

$$P = \frac{E}{t} \quad (W) \quad (1.4)$$

úpravou dostaneme:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (W) \quad (1.5)$$

Vztah (1.6) nebo (1.8) vyjadřuje, že je energie větru respektive výkon větru přímo úměrný hustotě vzduchu a třetí mocnině jeho rychlosti. Energie větru je tedy velice závislá na rychlosti větru. Malá změna rychlosti větru způsobí velkou změnu energie větru. [17]

1.4 Účinnost větrného stroje

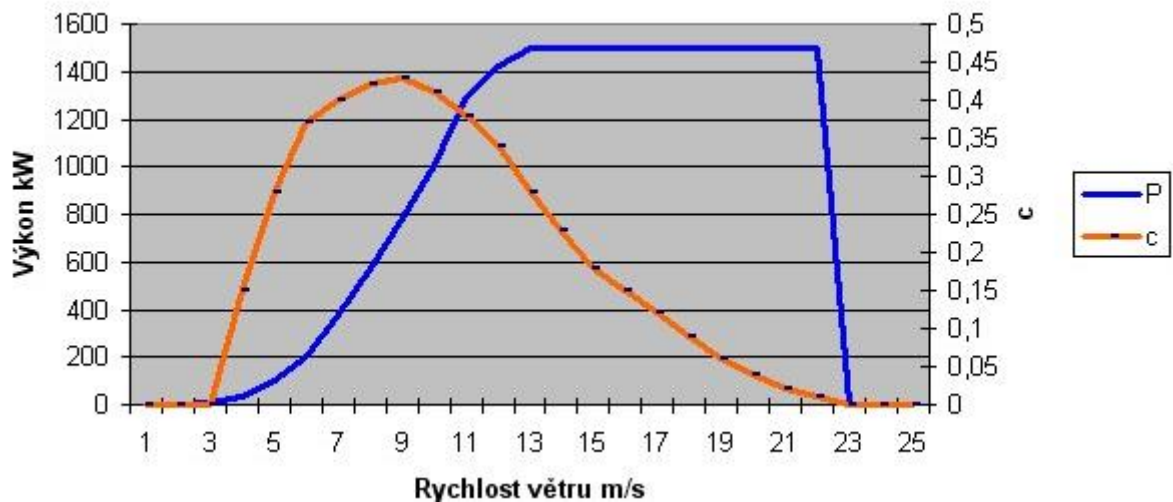
Albert Betz v roce 1919 odvodil teoreticky maximální dosažitelnou účinnost větrného stroje (Betzovo pravidlo). Kinetická energie větru se v turbíně mění na energii otáčivého pohybu a následně v generátoru na energii elektrickou.

Pro reálné turbíny s průměrem rotoru D (tedy délkou lopatky $D/2$) se používá vztah:

$$P = c_p \cdot \rho \cdot \frac{v^3}{2} \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (W), \quad (1.6)$$

kde c_p je součinitel výkonnosti

Součinitel výkonnosti je sám o sobě funkcí rychlosti větru a je dán konstrukčním řešením turbíny, konkrétně převodní křivkou úhlu natočení lopatek turbíny v závislosti na rychlosti větru. To v kombinaci s kubickou závislostí na rychlosti větru způsobuje pronikavou závislost skutečného výkonu na rychlosti větru. Podstatnou roli ve výpočtu účinnosti hraje také účinnost jednotlivých komponent VTE, jako jsou rotor, převodovka, generátor. V dnešní době se pohybuje účinnost větrných elektráren v rozmezí 35-45%, dle typu a velikosti. [22]



Obr. 1.4 Typický průběh generovaného výkonu a součinitele výkonosti VTE v závislosti na rychlosti větru

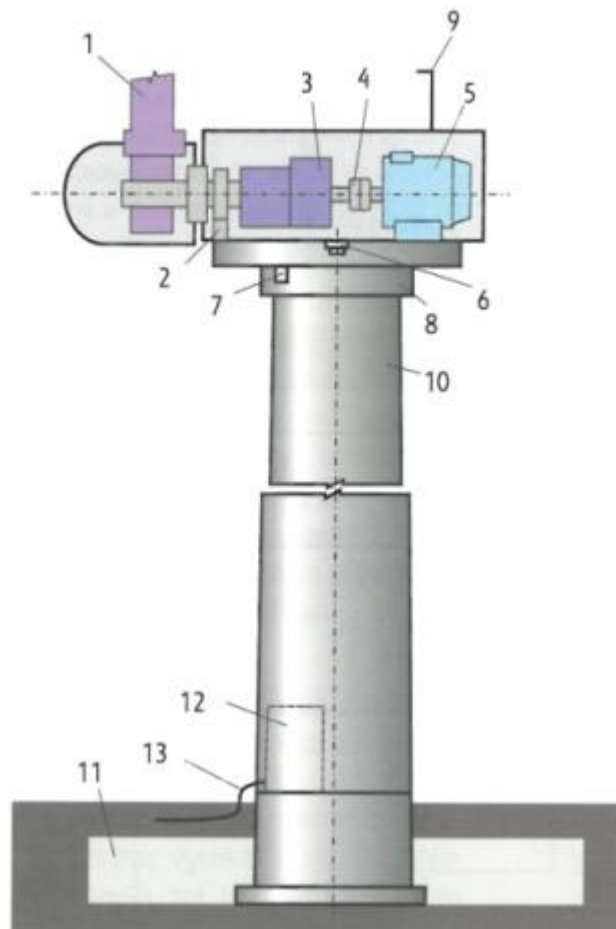
Další podstatnou hodnotou, definující účinnost větrného stroje je koeficient ročního využití k , definovaný jako poměr skutečně odvedeného výkonu k teoreticky možnému výkonu stroje za rok. V českých podmínkách se k pohybuje v mezích 0.1-0.2, pro velmi větrné lokality dosahuje teoreticky až 0.28. [10]

2 Základní části větrných elektráren

Větrné elektrárny mají zpravidla tyto základní části:

- Rotor
- Gondola
- Stožár
- Základ

Typická konstrukce větrné elektrárny je zobrazena na obrázku 2.1. Větrná elektrárna se skládá z následujících základních částí: 1 – větrný motor s rotorovou hlavou, 2 – brzda rotoru, 3 – převodovka, 4 – spojka, 5 – generátor, 6 – servopohon pro natáčení strojovny, 7 – brzda strojovny, 8 – ložiska, 9 – senzor pro snímání rychlosti a směru větru, 10 – tubus elektrárny (stožár), 11 – betonový základ elektrárny, 12 – elektrorozvaděče silnoprůdého zařízení a řídicího obvodu, 13 - elektrická přípojka. [20]



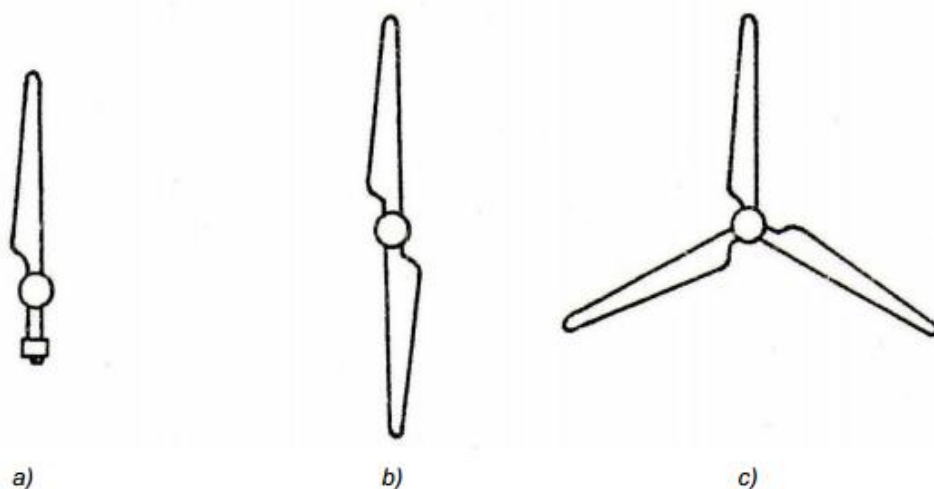
Obr. 2.1 Konstrukce větrné elektrárny

2.1 Rotor

Větrná soustrojí dělíme podle různých kritérií. Za nejdůležitější je třeba pokládat aerodynamický princip, který má pro činnost větrného soustrojí největší význam. Podle něj dělíme větrné soustrojí na vztlakové a odporové. [3]

Větrné soustrojí pracující na odporovém principu patří mezi nejstarší a mohou mít vodorovnou i svislou osu otáčení. Jejich podstatou je to, že plocha nastavená proti větru mu klade aerodynamický odpor a tím je na rotor VTE vyvozována síla. Odporový princip má také využití pro anemometry, přístroje pro měření rychlosti větru. Tyto větrné elektrárny se už dlouho nepoužívají, proto se s nimi nebudu dále zabývat.

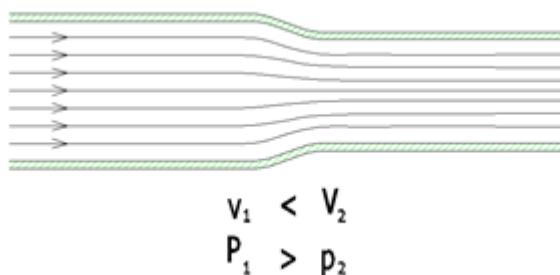
V České republice a všude ve světě se pro výstavbu větrných elektráren využívá nejčastěji rychloběžných větrných soustrojí pracujících na vztlakovém principu. Mezi takto pracující stroje patří moderní rychloběžná větrná soustrojí s vodorovnou osou otáčení, která jsou orientována rovinou otáčení kolmo ke směru větru. Toto natočení zajišťují hydraulické či elektrické motory. Řízení provozu větrné elektrárny zajišťuje centrální řídicí jednotka, která ve spolupráci s meteorologickou stanicí vyhodnocuje povětrnostní podmínky a rozhoduje o natáčení vrtulových listů i celého větrného rotoru. Vrtule se nejčastěji vyskytují ve třílistém provedení (Obr. 2.5 c). Natáčením listů se napomáhá rozběhu větrné elektrárny, nebo naopak při regulaci otáček vlivem vysoké rychlosti větru. Pokud bychom nechali vrtuli roztočit moc rychle, hrozí zničení celého stroje vlivem neúměrné odstředivé síly.



Obr. 2.2 Vrtule s vodorovnou osou
a) jednolistá vrtule s protizávažím
b) dvoulistá vrtule
c) třílistá vrtule

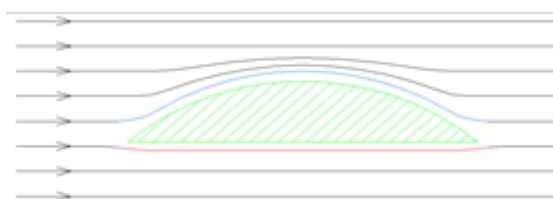
2.1.1 Vznik vztlakové síly

Pro vysvětlení vzniku vztlakové síly, musíme znát fyzikální podstatu proudění. Máme trubici se zúžením (Obr. 2.3), ve které proudí plyn. V užším místě trubice je větší rychlost proudění a menší tlak, než v širším místě trubice. Obecně platí, že kde je větší rychlost proudění vzduchu, tam je nižší tlak. [19]



Obr. 2.3 Zúžená trubice

Vznik vztlakové síly na aerodynamickém profilu (Obr. 2.4). Těleso ve tvaru kruhové výseče je umístěno do proudu vzduchu. Zajímá nás proudění vzduchu v okolí tělesa.

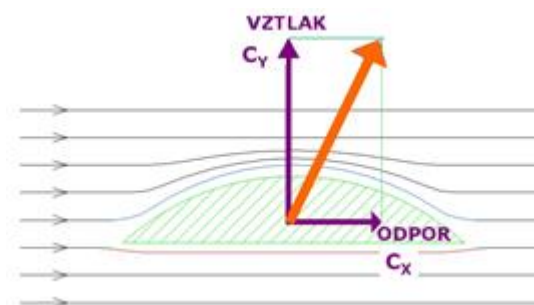


Obr. 2.4 Aerodynamický profil

Nyní porovnáme červenou proudnici pod tělesem a modrou proudnici nad tělesem. Červená proudnice je kratší, než modrá. Proud vzduchu se ve stejný okamžik před tělesem rozdělí a za stejný časový úsek se za tělesem spojuje. Při rozdílné délce proudnice je tedy potom jasně vidět, že rychlost v proudění modré proudnice nad profilem, musí být větší, než u červené proudnice pod profilem. [19]

Kde je vyšší rychlost proudění, tak tam je i nižší tlak. Z toho důvodu se nám vytváří vztlaková síla. Nad profilem je tlak nižší, vzniká podtlak. Pod profilem je tlak vyšší, vzniká přetlak. Výslednicí těchto dvou tlakových polí je pak jedna síla, která se nazývá vztlaková síla C_y , která má svou velikost a přesnou orientaci (Obr. 2.5).

Samozřejmě, že na profilu, který je umístěn v proudu vzduchu, vzniká i odporová síla C_x , která je ale vůči vztlakové síle mnohem menší.



Obr. 2.5 Vztlaková síla

Výslednicí těchto dvou sil je pak síla, která je využívána pro celou řadu strojů pracujících na aerodynamickém principu, jako jsou větrné elektrárny.

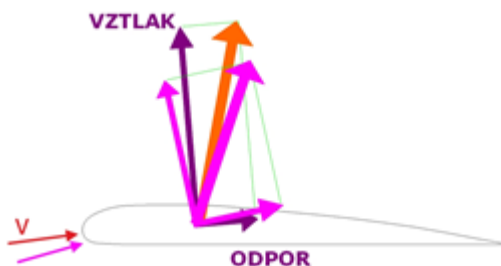
Skutečný aerodynamický profil listu může mít třeba tvar jako na (obr. 2.6). Vztlaková síla, která vzniká na profilu, je vždy kolmá k nabíhajícímu proudu vzduchu.



Obr. 2.6 Skutečný aerodynamický profil

Aerodynamický profil je citlivý na to, pod jakým úhlem je ofukován. Se změnou úhlu nabíhajícího proudu vzduchu se mění i velikost vztlaku a odporu. [19]

Vztlaková síla dosáhne svého maxima jen tehdy, když je profil ofukován pod jedním konkrétním úhlem náběhu. Každý profil má tento úhel jiný.

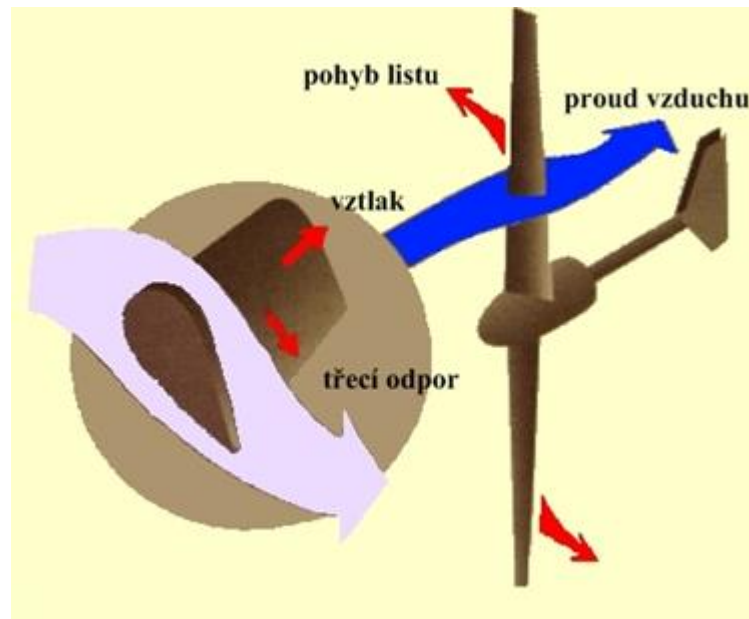


Obr. 2.7 Změna nabíhajícího toku proudu vzduchu

Pokud se jen trochu změní úhel nabíhajícího proudu vzduchu (Obr 2.7), mění se směr působení vztlaku, který je vždy kolmý na nabíhající proud vzduchu. Dále se mění velikost

působení vztlaku a velikost aerodynamického odporu. Tak se nám mění i výsledná vztlaková síla. [19]

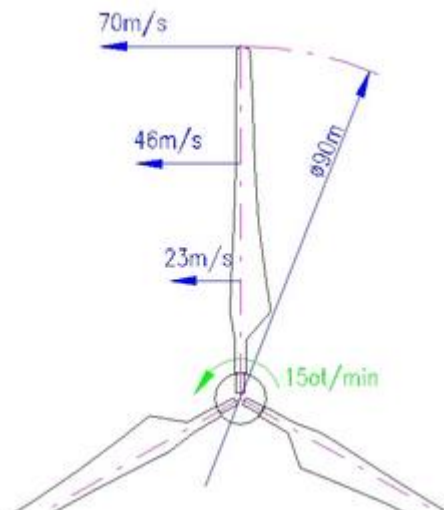
Vítr pomocí vztlakové síly otáčí rotor s vrtulí (Obr. 2.8). Energie větru se mění v rotační mechanický pohyb a mechanickou energii.



Obr. 2.8 Působení vzduchu na lopatku turbíny

2.1.2 Aerodynamika rotoru větrné elektrárny

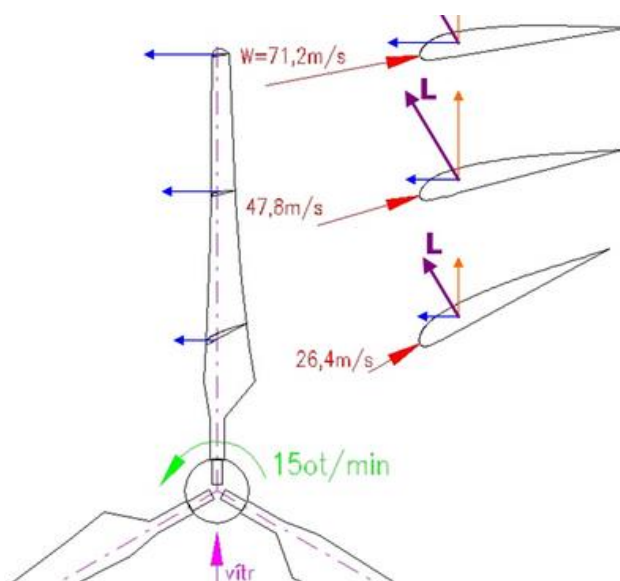
Aerodynamiku rotoru budu přibližovat na rotoru VTE Vestas V90 o výkonu 2 MW. Průměr rotoru je 90 m a pracovní otáčky 15 ot/min, při rychlosti větru 13 m/s. Na (Obr. 2.9) jsou vyobrazeny rychlosti pohybu rotorového listu ve vzdálenosti 1/3, 2/3 délky a na konci listu. Je jasně vidět, že po délce rotorového listu se výrazně mění obvodová rychlost. Mě ale zajímá hlavně rychlost a směr, pod kterým proud vzduchu nabíhá na rotorový list. Nabíhající rychlost vzduchu se vektorově skládá z rychlosti pohybu rotorového listu a rychlosti větru. Vektorovým součtem těchto rychlostí tedy získám výslednou rychlost nabíhajícího proudu vzduchu na rotorový list pro konkrétní vzdálenost od středu rotoru. Po délce listu se nemění jen velikost výsledné rychlosti obtékání, ale také úhel nabíhajícího proudu vzduchu na rotorový list k rovině rotoru β .



Obr. 2.9 Obvodové rychlosti, které jsou v 1/3, 2/3 a na konci listu, při pracovních otáčkách 15 ot/min

Aerodynamický profil dosahuje svých maximálních hodnot vzlaku pouze pod jediným určitým úhlem náběhu proudícího vzduchu. Pokud chci, aby aerodynamický profil pracoval po celé délce listu co nejefektivněji, musím profil natočit tak, aby byl stále optimálně ofukován větrem (Obr. 2.10).

Jak jsem již zmínil při popisu vzlakové síly, výslednice vzlaku je vždy kolmá na nabíhající proud vzduchu. Na následujícím obrázku (Obr. 2.10) je vidět, jak je to se vzlakem u aerodynamického profilu ve 3 místech po délce rotorového listu. Při ofukování aerodynamického profilu vzniká vzlak L , kolmý na nabíhající proud vzduchu. Tento vzlak ještě rozložím vektorově do osy x a osy y . Složka vzlaku v ose x (značená modře) je složka vzlaku, která otáčí rotorem. [21]



Obr. 2.10 Vznik vzlaku na profilu rotorového listu

Vlastní aerodynamický profil rotorového listu je vždy velmi utajovanou věcí každého výrobce větrných elektráren. Aerodynamická profiláž listů totiž významně ovlivňuje výkon větrné elektrárny a také hlukové emise, které větrná elektrárna vydává. [21]

2.1.3 Konstrukce rotorového listu VTE

Rotorový list je kompozitní skořepina, která je uvnitř vyztužena nosníkem (obr. 2.11). Nosník přenáší hlavní zatížení. Tato skořepina je laminována z mnoha vrstev skelné tkaniny. Mezi tkaniny se ještě někdy vkládá výplňový materiál – tvrzená pěna, která zvyšuje plošnou tuhost. Na nosník listu bývá použito kromě skelné tkaniny také kevlaru nebo uhlíku.

Návrh vnitřní konstrukce listu, tedy vrstvení různých druhů tkanin s různou orientací vláknů a tvrzených pěn, je velice složitý proces. Tento proces podléhá pevnostním výpočtům. Výpočty jsou složité, protože každá vrstva kompozitní konstrukce má jinou pevnost a různou směrovou orientaci této pevnosti. Dnes už se standardně používají výpočtové metody, které donedávna byly používány pouze v leteckém průmyslu. Pevnostní analýza se dělá pomocí metody konečných prvků. Podstata metody konečných prvků je, že tvarově složitou součást rozdělíme na velký počet malých prvků, u kterých jsme schopni jednotlivě vypočítat napětí a deformaci. Pokud máme součást rozdělenou na jednotlivé elementy, pak je už výpočet relativně jednoduchý, protože napětí a deformaci v každém elementu spočítáme podle jednoduchých vztahů. Je ovšem třeba mít velmi výkonný počítač, dochází k výpočtům obrovských matic a výpočet pak trvá i několik hodin. Výstupem je pak hodnota napětí a deformací pro každý element. Z těchto informací jsme pak schopni vytvořit napěťové a deformační mapy. [22]



Obr. 2.11 Řez rotorovým listem VTE

2.1.4 Indukovaný odpor na rotorovém listu VTE

Jak jsem zmiňoval ve stati o vzniku vztlakové síly, je na horní straně profilu lopatky podtlak a na spodní straně přetlak. Tato tlaková pole jsou po celé délce rotorového listu a rozdíl těchto tlaků se vyrovnává až v úplavu za listem. Jiný případ nastává ale na konci listu, kdy k vyrovnání tlaků dochází přes horní hranu listu. V důsledku vyrovnávání tlaku na konci rotorového listu směrem ze spodní strany k horní a pohybu listu v prostoru vzniká na jeho konci větrný vír. Tento okrajový vír je původcem indukovaného odporu.

Indukovaný odpor zvyšuje celkový odpor rotorového listu, ale také tvoří podstatnou část hluku, který rotor VTE vydává. Proto se výrobci snaží co nejvíce zredukovat indukovaný odpor. Při snížení indukovaného odporu se také zvýší výkon rotoru. Pokud je velká hloubka profilu na konci listu, dochází tak k velkým vyrovnávání tlaků a vzniká velký větrný vír. Výrobci konce rotorových listů zaoblují, dělají do špičky, nebo využívají wingletů (Obr. 2.12). [24]

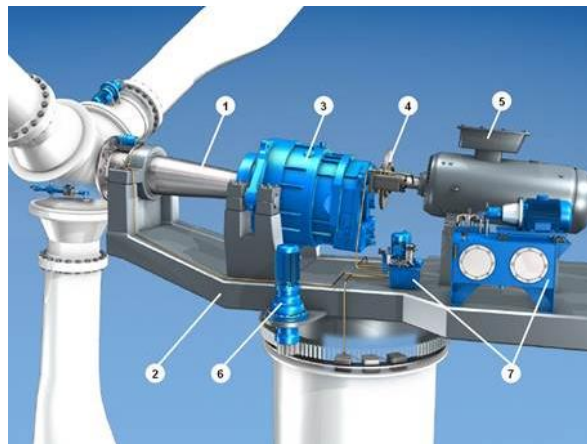


Obr. 2.12 Winglet VTE

2.2 Strojovna

Strojovna (Obr. 2.13) tvoří srdce větrné elektrárny, pro každého výrobce jsou v jednotlivých detailech rozdíly, ale v principu obsahuje vždy ty samé komponenty. Jako pouzdro strojovny se používá gondola.

Rotor je umístěn na hřídeli, která přenáší výkon od rotoru do převodovky. Převodovka zvyšuje otáčky pro generátor, který pohání. Dále je na hřídeli, mezi převodovkou a generátorem brzda, která v případě potřeby dokáže během několika sekund zastavit rotor. K nosnému rámu strojovny jsou připevněny elektropohony, které natáčejí celou strojovnu do nejvýhodnější pozice proti větru. V gondole se skrývá také hydraulický okruh, kterým lze ovládat systémy, jako natáčení lopatek a brzda.



Obr. 2.13 Strojovna VTE

- 1) Hlavní hřídel větrné elektrárny
- 2) Nosný rám strojovny
- 3) Převodovka větrné elektrárny
- 4) Spojení mezi převodovkou a generátorem
- 5) Generátor větrné elektrárny
- 6) Systém natáčení strojovny
- 7) Hydraulické systémy větrné elektrárny

2.2.1 Hřídel

Česká republika se řadí mezi největší světové výrobce hřídelí pro VTE. Firmy Škoda Plzeň a Vítkovice Steel jsou úspěšně zavedení výrobci hřídelí pro většinu světových výrobců VTE. Hřídel je vyrobena jako výkovek a při její výrobě je kladen velký důraz na přesnost. [26]



Obr. 2.14 Hřídel VTE vyrobena ve firmě Škoda Steel

2.2.2 Nosný rám strojovny

Jde o mohutnou část VTE, která slouží k nesení veškerých komponent strojovny. Je vyroben z ocelových plátů, které jsou k sobě přivařeny. Plochy sloužící jako dosedací části pro další komponenty, jsou obrobena na horizontální fréze. V České republice je jeden

výrobce nosných rámu pro velké větrné elektrárny, jedná se o chrudimskou společnost SIAG. [26]

2.2.3 Převodovka

Převodové ústrojí větrných elektráren bývá velmi rozmanitých konstrukcí. Vždy se jedná o velmi namáhanou součást, protože zatížení od rotoru je velice nestálé. Při určitých poryvech větru mívají rázy od rotoru několikanásobně vyšší hodnotu, než je standardní provozní zatížení. Proto jsou převodovky pro VTE navrhovány s vysokým koeficientem bezpečnosti. Dalším velice důležitým požadavkem na převodovky VTE je jejich tichost. Aby bylo dosaženo tichého chodu, bývají kola kalena, cementována a nitrídována a povrch zubů obrušován. Převodovka musí být schopna pracovat v širokém rozmezí provozních teplot od -40 do +45 °C, někdy i více.

U VTE s výkonem do 50 kW, mívá rotor pracovní otáčky v rozmezí 40-80 ot/min. Dle použitého generátoru pak bývá převodový poměr 1:12-1:25. Nejčastěji je převodovka navrhována s čelním převodem se šikmými zuby. Občas se používá i převodovek planetových. Planetové převodovky se při provozu ale více zahřívají a nastává problém s jejich chlazením. U malých VTE se neužívá nucená cirkulace vzduchu ve strojovně, protože by tak docházelo k značnému zvýšení vlastní spotřeby. [26]

U VTE nad 500 kW se pracovní otáčky rotoru pohybují v rozmezí 5-20 ot/min. Generátory pak podle typu mají pracovní otáčky 1000, 1500 či 3000 ot/min. Převodové poměry jsou pak 1:70 – 1:200. Pro přenesení výkonu v řádu megawattů při daném převodovém poměru a zachování kompaktních rozměrů se používá několikastupňová planetová převodovka nebo kombinovaná několikastupňová převodovka. [26]



Obr. 2.15 Dvoustupňová planetová převodovka pro výkon 2 MW

2.2.4 Generátor

Větrné elektrárny používají technologii synchronního i asynchronního generátoru. Záleží na konkrétním výrobcí, jakou zvolí celkovou koncepci větrné elektrárny. U malých VTE do 10 kW se používají více pólové synchronní generátory s permanentními magnety, díky jejich dostatečné rychlosti otáčení. U VTE středních a větších výkonů se používají převážně asynchronní motory s kotvou na krátko, pracující v generátorickém režimu. [5][26]

V případě asynchronních generátorů se používají 4 pólové generátory, které mají ve spojení se sítí o kmitočtu 50 Hz synchronní otáčky 1500ot/min nebo 6 pólové, které mají synchronní otáčky 1000ot/min. [26]

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (\text{ot} / \text{min}) \quad (2.16)$$

2.2.5 Systém natáčení strojovny

Na směr větru závisí natočení celé strojovny včetně rotoru. Abychom byli schopni vyrábět maximální možné množství elektrické energie, potřebujeme rotor větrné elektrárny držet stále v optimální pozici vůči větru.

Celá strojovna je usazena na kotoučové kulové ložisko. Vnější klec tohoto ložiska je přišroubována ke stožáru a na vnějším povrchu je vytvořeno přímé ozubení. Vnitřní klec je připevněna k nosnému rámu strojovny. Na nosném rámu jsou umístěny elektropohony, které dle pokynů řídicího systému natáčí se strojovnou doprava či doleva. Dle velikosti VTE jsou elektropohony ve strojovně v počtu 2,4 nebo 6 kusů. Elektropohon je složen z elektromotoru o výkonu 2-2,5 kW, několikastupňové planetové převodovky a pastorku. [26]



Obr. 2.16 Elektropohon pro natáčení strojovny VTE

2.2.6 Hydraulické systémy

Ve strojovně větrné elektrárny je mnoho hydraulických systémů jako brzda generátorového hřídele, brzda systému otáčení strojovny kolem svislé osy, brzda rotoru. Také natáčení rotorových listů VTE, může být realizováno hydraulicky, záleží vždy na konkrétním výrobcu. Pokud je natáčení rotorových listů hydraulické, bývá ve strojovně ještě druhý hydraulický okruh, právě jen pro pohony listů. To z důvodu, že natáčení listů musí být velice citlivé a rychlé, zatím co na ostatní okruhy nejsou tak náročné požadavky.

2.3 Stožár

V důsledku navyšování instalovaných výkonů VTE, se zvyšuje i průměr rotoru. To má vliv na velikost stožáru. U nově stavěných větrných elektráren s instalovanými výkony v řádu MW se pohybuje s výška stožáru i nad 100 m. Rozlišujeme tři základní druhy stožárů. Ocelový tubusový stožár, který je nejčastěji instalován v Evropě, příhradový stožár a betonový stožár.

2.3.1 Ocelové tubusové stožáry

Mají výšku většinou 40-105 m, výjimečně i více. V těchto délkách by je nebylo možné přepravovat, proto jsou rozděleny na díly, jejichž doprava se dá již realizovat. Každý jednotlivý díl je ocelový svařenec. Jednotlivé díly jsou povrchově upravovány nátěrem zabraňujícím degradaci materiálu.

V České republice je firma SIAG, která se zabývá výrobou ocelových stožárů pro VTE. Výrobní kapacita této firmy je 150 ks stožárů ročně, přičemž tyto stožáry jsou nejčastěji instalovány v zemích střední a jižní Evropy. [26]

Základem ocelových stožárů je plech tloušťky 12-45 mm, výjimečně 70 mm. U paty stožáru bývá tloušťka stěny největší 30-45 mm. U vrcholu bývá tloušťka stěny minimálně 12 mm. Plechy jsou dodávány většinou jako polotovary v tabulích velkých rozměrů, neboť u paty stožáru bývá jeho obvod i 12,5 m. Před vlastním zpracováním je povrch plechů tryskán litinovými broky, aby se odstranily případné nečistoty a povrchová koroze. Z takového plechu se pak pálí kyslíko-acetylenovým plamenem polotovary pro skružování. Vypalovaný tvar je rozvinem kužele. Skružováním těchto plechů se tvoří jednotlivé skružené prstence

(Obr 2.17) ocelového stožáru. Tyto prstence se vaří k sobě a vytváří tak jednotlivé díly stožáru.



Obr. 2.17 Skružené prstence

2.3.2 Příhradové stožáry

V Evropě málo používaný druh stožárů, ale má dvě podstatné výhody oproti klasickému ocelovému tubusovému stožáru. Je ekonomicky výhodnější při výškách stožáru nad 100 m. Přeprava na místo je bezproblémová, protože příhradový stožár se skládá jen z jednotlivých nosníků a vzpěr o malé hmotnosti a rozměrech. Tento typ stožáru je velmi rozšířený v Číně a Indii. Jak jsem již zmiňoval, VTE se staví stále větších rozměrů a se stále většími stožáry. Proto se stává příhradový stožár stále více a více ekonomicky výhodnější. Je spočítáno, že každý metr výšky stožáru VTE v rozmezí od 80-100 m vytvoří přídavek 0,9% k ročnímu vyrobenému množství elektřiny. Stožár o výšce 160 m představuje zvýšení roční výroby elektrické energie o 35 - 45%, oproti 100 m stožáru. V těchto výškových hladinách je nárůst roční výroby na jeden metr výšky stále si 0,67%, takže se s tímto typem konstrukce stožáru budeme pravděpodobně setkávat stále častěji. [26]



Obr. 2.18 VTE s příhradovým stožárem

2.3.3 Betonové stožáry

Technologie betonových stožárů, složených z jednotlivých dílů až na místě stavby VTE, je poměrně novou technologií, která má rychlý rozvoj hlavně v Evropě. Je to i z důvodu, že jednotlivé díly jsou malých rozměrů a velice snadno se dopravují do jakékoliv lokality.

Stožár je složen z dílů, což jsou betonové skořepiny s vnitřní ocelovou výztuží. Jejich rozměry jsou přizpůsobeny snadné přepravě na místo stavby. Jeden prstenec může být složen z 1, 2, 3 i více částí. Po umístění jednotlivých betonových skořepin dochází mezi nimi ihned k propojení dlouhými šrouby. Na vrchol stožáru je umístěno ocelové zakončení, na které již dosedá ložisko gondoly.



Obr. 2.19 Sestavování betonového stožáru VTE

2.4 Základ

Již několik týdnů před vlastní instalací VTE se na daném místě začíná se stavbou jejího betonového základu. Je to nejtěžší a přitom nejméně viditelná část. Před vlastním zahájením stavby se musí provést důkladný geologický průzkum, aby se zjistila stabilita prostředí ve spodních vrstvách zeminy. Aby bylo vidět, o jaké hmotnosti se jedná, vybral jsem parametry VTE VESTAS V90 s jmenovitým výkonem 2MW: [26]

Gondola a rotor:

- Průměr rotoru – 90 m
- Hmotnost gondoly – 68 tun
- Hmotnost rotoru – 38 tun

Stožár:

- ocelový tubus vysoký 105 m
- hmotnost stožáru 225 tun

Betonový základ:

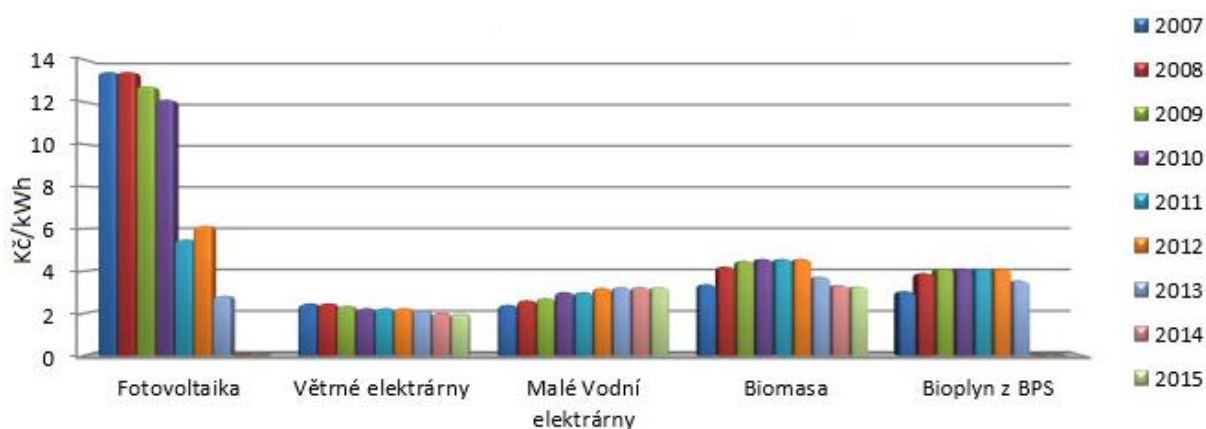
- čtvercový základ 15,9 x 15,9 m, výška 1,8 – 2,0 m
- 500m³ betonu
- 1 104 tun betonu
- 40 tun ocelové armovací výztuže
- celková hmotnost betonového základu 1 144 tun

3 Současný stav a základní typy používaných větrných elektráren v ČR

3.1 Současný stav větrných elektráren v ČR

Díky novele zákona o podporovaných zdrojích energie (POZE) č. 165/2012, s účinností od 1.1.2013, došlo k zastavení provozní podpory novým fotovoltaickým a bioplynovým zdrojům. Tento termín se měl původně týkat i větrných zdrojů a malých vodních elektráren. Nakonec však u větrných a malých vodních elektráren došlo k posunu o 2 roky. To znamená, že tyto zdroje by měly mít nadále nárok na provozní podporu státu, pokud získají autorizaci státu do konce roku 2014 a zprovozněny budou do konce roku 2015. Cílem zmiňované novely (POZE) je zamezit zvyšování spotřebitelských cen elektřiny, do kterých se promítá nárůst dotací pro OZE. [27]

Ekonomika větrných elektráren, jakož to i ostatních zdrojů OZE je závislá na státní podpoře.



Obr. 3.1 Srovnání výkupních cen elektrické energie z obnovitelných zdrojů v ČR v Kč/kWh

Jak je vidět z obrázku srovnání výkupních cen elektrické energie z OZE v České republice (Obr. 3.1) ceny pro výkup z jednotlivých zdrojů se neustále snižují a u větrných elektráren jsou dokonce ceny za kWh nejnižší ze všech. Výkupní cena pro rok 2015 byla stanovena Energetickým regulačním úřadem na pouhých 1,98 CZK/kWh, plus zelený bonus 1,45 CZK/kWh.

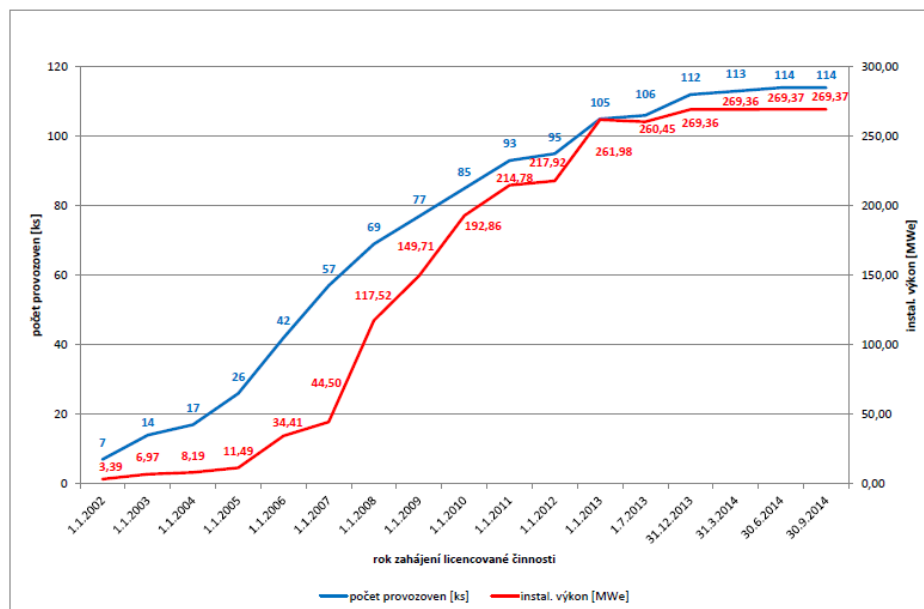
Pro výrobní uvedené do provozu do konce roku 2012 byly výkupní ceny vypočteny s ohledem na znění ustanovení § 6 zákona č. 180/2005 Sb. v platném znění a ustanovení § 4 vyhlášky č. 475/2012 Sb., kterou se provádějí některá ustanovení zákona o podpoře

využívání obnovitelných zdrojů, ve znění pozdějších předpisů. Výkupní ceny byly nastaveny tak, aby po dobu životnosti jednotlivých typů výroben elektřiny z OZE byla výrobcům zaručena patnáctiletá návratnost vložených investic. Zelené bonusy pro jednotlivé kategorie OZE zohledňují alespoň výši tržní ceny elektřiny.

Pro výroby a zdroje uvedené do provozu po 31. 12. 2012 byla výše podpory nastavena na základě podmínek daných zákonem č. 165/2012 Sb. Hlavním kritériem pro stanovení výše výkupních cen je podmínka patnáctileté doby prosté návratnosti. V případě stanovení výše zelených bonusů je stejně jako podle zákona č. 180/2005 Sb. zohledněna alespoň očekávaná průměrná hodinová cena elektřiny a skutečná hodinová cena v případě hodinového zeleného bonusu. [27]

Garance patnáctileté doby prosté návratnosti se vztahuje pouze na výroby využívající podporu formou výkupních cen.

Ani posunutí termínu zrušení státní podpory pro větrné elektrárny nemůže pomoci k výstavbě dalších. Současný trend stavění větších elektráren s větším instalovaným výkonem není reálný uskutečnit do 2 let od počátku projektu. Proto výstavba nových větrných elektráren, ale i dalších OZE v roce 2014 zamrzla.



Obr. 3.2 Stav větrných elektráren k 1.10.2014

Tuto situaci nejlépe popíše obrázek, stav větrných elektráren k 1.10.2014 (Obr. 3.2), který jsem vybral pro objasnění současné situace větrné energetiky v České republice.

V neprospěch větrné energie hraje v Česku více aspektů, jako je geografická poloha a nedávné regulace provedené státem. Nejlépe z hlediska větru jsou na tom zahraniční přímořské státy, kde koeficient ročního využití může být i přes 40%, na rozdíl od České republiky, kde se pohybuje okolo 10-20%.

Ze směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 2009/28ES ze dne 23. Dubna 2009 o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů vyplývá pro Evropskou unii jako celek v roce 2020 cíl 20% podílu energie z obnovitelných zdrojů a cíl 10% podílu energie z obnovitelných zdrojů v dopravě. Pro Českou republiku byl evropskou komisí stanoven minimálně 13% podíl energie z obnovitelných zdrojů na hrubé konečné spotřebě energie. Splnění tohoto cíle musí zároveň zajistit minimálně 10% podíl obnovitelných zdrojů v dopravě.[27]

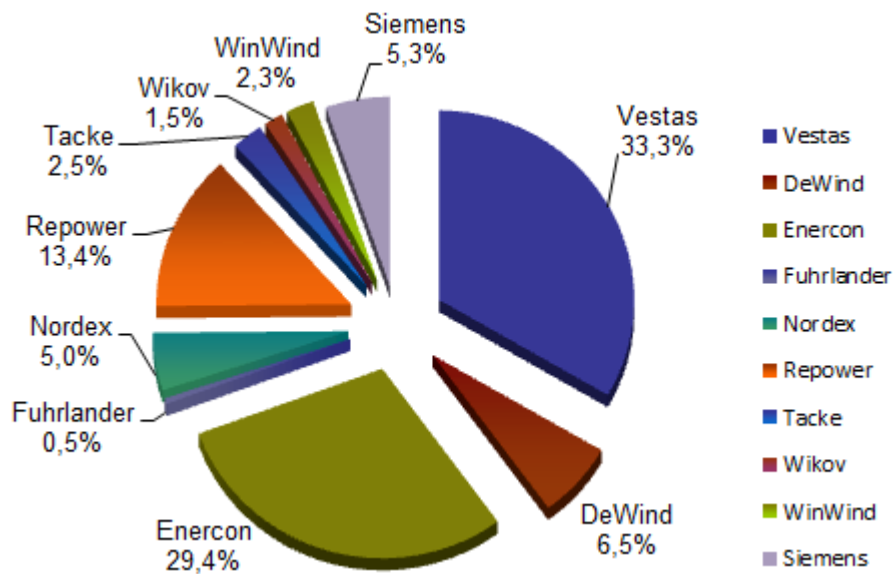
Tab. 3.3 Vývoj výroby elektřiny z OZE [28]

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Malé vodní elektrárny do 10 MW *)	903 200	1 070 710	964 400	1 001 845	966 884	1 082 683	1 238 819	1 017 878	1 026 254	1 236 978
Vodní elektrárny nad 10 MW	1 115 900	1 309 200	1 586 330	1 077 493	1 057 451	1 346 937	1 550 655	945 276	1 102 912	1 497 762
Větrné elektrárny *)	9 900	21 280	49 375	125 098	244 661	288 067	335 493	397 003	415 817	480 519
Fotovoltaika *)	100	68	170	1 754	12 937	88 807	615 702	2 182 018	2 148 624	2 032 654
Bioplyn + skládkový plyn	37 400	85 400	172 589	182 699	213 632	414 235	598 755	932 576	1 472 142	2 241 300
Biomasa	533 400	552 300	728 526	993 360	1 231 210	1 436 848	1 511 911	1 682 563	1 802 591	1 670 327
BRKO **)	10 031	10 612	11 260	11 260	11 684	10 937	35 580	90 190	86 686	83 842
Celkem OZE [MWh]	2 609 931	3 049 570	3 512 650	3 393 509	3 738 459	4 668 514	5 886 915	7 247 504	8 055 026	9 243 382
Tuzemská spotřeba elektřiny brutto [MWh]	68 615 700	69 944 500	71 729 500	72 045 200	72 049 267	68 600 000	70 961 700	70 516 541	70 453 278	70 177 356
Podíl OZE [%]	3,80%	4,36%	4,90%	4,71%	5,19%	6,81%	8,30%	10,28%	11,43%	13,17%

Z tabulky vyplývá (Tab. 3.3), že Česká republika už v roce 2013 začala splňovat minimální požadavky na hrubou spotřebu elektrické energie z obnovitelných zdrojů, takže pokud to nebude rentabilní, a zbytečně by to zvyšovalo cenu pro koncové spotřebitele, není nijak nucena do OZE dále investovat.

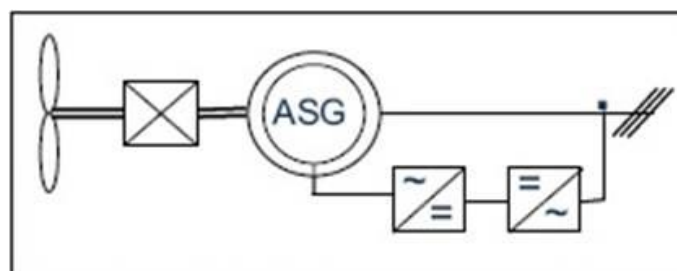
3.2 Základní typy používaných větrných elektráren v ČR

Hlavními výrobci VTE v Evropě jsou firmy Vestas, Enercon, Repower, Siemens a DeWind. Česká republika má také jednoho výrobce VTE a to je firma Wikov. Každá firma vyrábí VTE jiným způsobem, ty se pak liší ve výkonech, provedeních a použití synchronního nebo asynchronního generátoru. Dále je-li elektrárna s převodovkou, nebo bez.



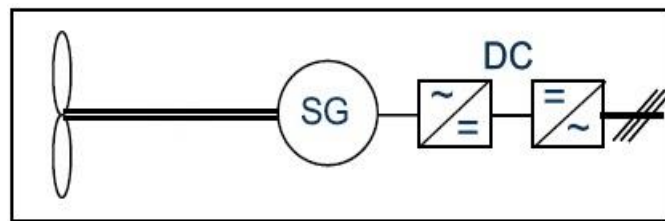
Obr 3.4 Poměr větrných elektráren podle instalovaného výkonu na výrobce v ČR

Z obrázku (obr. 3.4) rozdělení VTE podle výrobce a podílu na celkovém instalovaném výkonu ČR, je vidět, že největší podíl na instalovaném výkonu v ČR má dánská firma Vestas. Na druhém místě je německá firma Enercon. Tyto dvě firmy mají dohromady bezmála dvou třetinový podíl na instalovaném výkonu VTE v ČR. Česká firma Wikov Wind má pouze 1,5% podíl na instalovaném výkonu VTE v ČR. Všichni světoví výrobci používají s drobnými odchylkami jeden z 3 základních uspořádání větrného soustrojí.



Obr. 3.5 Schéma VTE s převodovkou a asynchronním generátorem

System s převodovkou a asynchronním generátorem (Obr. 3.5) používá největší světový výrobce VTE dánská firma VESTAS. Uspořádání rotor – převodovka – asynchronní generátor. Jedná se o spolehlivé konstrukční spojení, kdy asynchronní generátor je schopen činnosti v určitém rozmezí otáček, a tedy regulace celého systému je jednodušší. Frekvenční měnič spolupracuje s asynchronním generátorem s kroužkovou kotvou. Rotorové vinutí je napájeno přes kroužky z frekvenčního měniče. Pro omezení proudových nárazů je využito přepínání zapojení generátoru Y-D.[14]



Obr. 3.6 Schéma VTE bez převodovky s multipólovým synchronním generátorem

Tento systém (Obr. 3.6) využívající princip mnohapólového generátoru, používá již od začátku svojí existence německý výrobce VTE Enercon. Úplně vynechal převodovku a snížil tak hmotnost, hluk a možnost potenciálních poruch a také eliminoval ztráty vznikající v převodovce. Na rotoru je přímo umístěn jeden prsteneček cívek (pólů), druhý prsteneček je satorový. Podle síly větru, tedy podle velikosti vyvozeného kroučícího momentu se zapínají jednotlivé pólové dvojice. Čím je rychlost větru vyšší, tím více je zapnuto pólových dvojic. Nevýhodou je, že vyrobená elektrická energie se ještě musí upravovat výkonovou elektronikou, než je dodána do sítě. [15]

Český výrobce větrných elektráren firma Wikov použila systém, který by měl mít teoreticky největší účinnost. Proměnlivé otáčky rotoru zpracovává převodovka s proměnlivým převodovým poměrem. Její výstupní otáčky jsou stále konstantní. Díky tomu můžeme použít synchronní generátor, který při těchto stálých otáčkách vyrábí elektrickou energii, kterou již není třeba nijak upravovat a je možné ji při dodržení parametrů kvality elektrické energie, dodávat přímo do rozvodné sítě. [16]

3.2.1 Rozdělení VTE podle instalovaného výkonu.

V České republice je v současné době celkově instalován výkon ve VTE 283 MW. Průměry rotoru jednotlivých elektráren jsou úměrné instalovanému výkonu a liší se dle jednotlivých výrobců. U instalovaných výkonů v řádu stovek kW se průměry rotoru pohybují okolo 30 m. Pokud se podíváme naopak na největší elektrárny, které jsou v České republice s instalovaným výkonem 3 MW, dosahuje průměr rotoru až 112 m.

Elektrárna s největším jednotkovým instalovaným výkonem v České republice leží ve Středočeském kraji u obce Pchery (Tab. 3.7), byla uvedena do provozu v dubnu roku 2008 s instalovaným výkonem 2x3 MW. Celková investice dosáhla 190 milionů korun. Pro pohon turbín jsou použity rotory s průměrem 100 metrů, které nabízí finská firma WinWinD jako jeden z mála výrobců. Turbíny s rotorem D100 jsou vhodné zejména pro projekty ve

vnitrozemí s nižší průměrnou rychlostí větru. Tato větrná elektrárna je řešena pomocí planetové převodovky a pomaluběžného synchronního generátoru, také disponuje optimalizací výkonu pomocí natáčení listů rotoru a online komunikací se servisním střediskem. Pomocí systému dálkové kontroly lze ovládat turbínu VTE a přijímat využitelné informace přes internet. Výroba elektřiny je řízená dvou-cestným IGBT střídavým měničem, jenž dodává přes transformátor napětí potřebné k připojení do rozvodné sítě.

Tab. 3.7 Vybrané větrné elektrárny v České republice [29]

Lokalita	Kraj	Výrobce	Typ elektráren	Rotor	Výška náboje	Výkon (kW)	Počet	Celkový výkon	Instalace
Dožice	Plzeňský	Enercon	E48	48	50	800	1	800	2013
Janov	Pardubický	Wikov	W2000spg	80	80	2000	2	4000	2009
Kryštofovy Hamry-Přisečnice	Ústecký	Enercon	E- 82	82	85	2000	21	42000	2007
Pchery	Středočeský	WinWind	WWD-3	100	100	3000	2	6000	2008
Pavlov	Vysočina	Vestas	V90	90	105	2000	2	4000	2006

Další zajímavá větrná farma Kryštofovy Hamry leží v Ústeckém kraji v oblasti Krušných hor, kde lemují 100 kilometrů česko-německých hranic. Je v oblasti s nejlepšími větrnými podmínkami v České republice a skládá se z 21x2 MW instalovaného výkonu. Nadmořská výška této lokality je 800-850 m. Vlastníkem je německá firma Ecoenerg Windkraft GmbH & Co. KG. Jedná se o typ elektrárny ENERCON E-82, což je bezpřevodový systém s proměnlivým počtem otáček od 6 do 19,5 ot/min a synchronním generátorem. Průměr rotoru je 82 m, tomu odpovídá plocha otáčejícího se rotoru 5281 m². K automatickému odpojení a zastavení elektrárny dochází při rychlosti větru od 28 do 34 m/s.

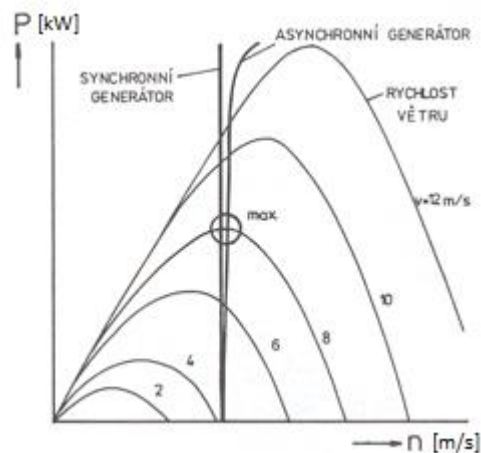
V druhé polovině roku 2009 byl zahájen provoz dvojice moderních VTE u obce Janov poblíž Litomyšle. Technologii obou soustrojí W 2000 SPG o jednotkovém instalovaném výkonu 2 MW zajistila česká společnost Wikov Wind. Lokalita u Litomyšle se nachází v nadmořské výšce 400 metrů a disponuje příznivými větrnými podmínkami. Rychlost větru pro větrné soustrojí umístěné do výšky 100 m zde dosahuje průměrně 6-7 m/s. Každá z těchto elektráren má rotor ve výšce 80 m a průměr rotoru je také 80 m. Hmotnost elektrárny je 275,7 tun a průměr paty věže 4,3 metru. Provozovatelem těchto dvou VTE je společnost ČEZ. Firma Wikov využívá technologii plynule proměnné převodovky a synchronního generátoru.

V létě roku 2006 byly uvedeny do provozu 2 VTE u obce Pavlov s celkovým instalovaným výkonem 4 MW. Díky vzájemné dohodě investora s obcí, byl projekt a výstavba tohoto větrného parku velice rychlá. Obec Pavlov se zhruba 500 obyvateli dostává každoročně od provozovatele KV VENTI s.r.o. statistické částky. VTE pro tuto farmu dodala dánská firma Vestas. Výška stožárů těchto dvou elektráren je 105 m a průměr rotoru 90 m. Firma Vestas pracuje s technologií asynchronního generátoru s kroužkovou kotvou a frekvenčního měniče. Náklady na výstavbu provozovatel odhaduje na 210 milionů korun a návratnost celé investice na 8-9 let.

Poslední mnou vybraná VTE leží v Plzeňském kraji u obce Dožice s instalovaným výkonem 0,8 MW. Tuto VTE dodala německá firma Enercon. Byla uvedena do provozu v roce 2013. Elektrárna má výšku stožáru 50 m a průměr rotoru 48 m.

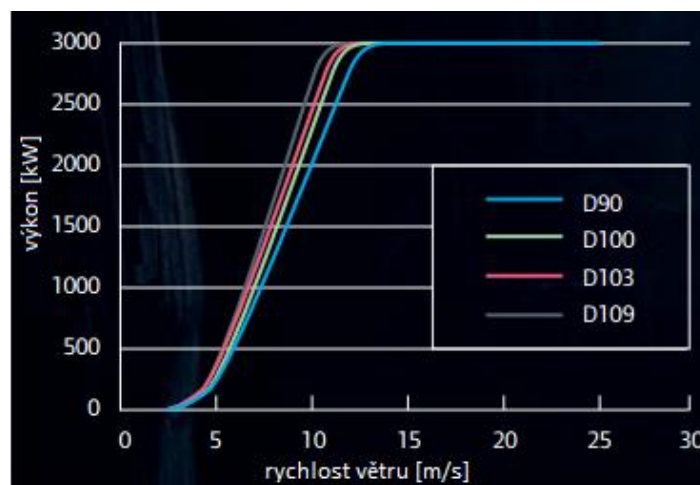
4 Pracovní charakteristiky VTE a údaje o roční produkci elektrické energie

VTE pracující při konstantních nebo skoro konstantních otáčkách využívají maximálního výkonu větru jen při jeho jedné rychlosti (Obr. 4.1).



Obr. 4.1 Výkon a pracovní otáčky generátoru pro různé rychlosti větru

První pracovní charakteristiku jsem vybral pro větrné soustrojí firmy WinWinD u obce Pchery. Na jmenovitý výkon se elektrárna s průměrem rotoru 100 m dostává někde okolo 11 m/s. Pro rotor s průměrem 90 m dochází k automatickému odstavení při rychlostech větru nad 25 m/s, pro rotor s průměrem 100 m dochází k automatickému odstavení už při rychlostech nad 20 m/s. Celková průměrná roční výroba elektrické energie se pohybuje okolo 11 GWh/rok a zajišťují jí dvě VTE o výkonu 3 MW.



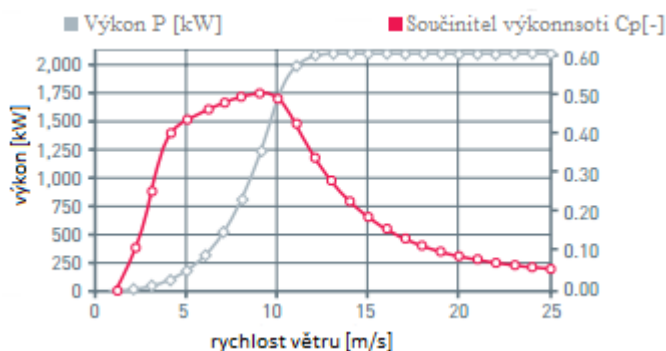
Obr. 4.2 Výkonové křivky jednotlivých produktových řad firmy WinWinD

Enercon E-82 2000 kW

Další typ větrné elektrárny je Enercon E-82, který slouží jako základ pro největší větrnou farmu v České republice. Tato větrná farma se rozléhá po 100 kilometrovém pásu v Krušných Horách od Kryštofových Hamrů až po Přísečnici. Průměr rotoru pro tento typ větrné elektrárny je 82 m. Otáčí se po směru hodinových ručiček, materiál lopatek je stejně jako u menšího typu E-48 z kovu a epoxidové pryskyřice. Optimální rychlost větru je 13 m/s, při vyšších rychlostech už dochází k automatickému natáčení lopatek a omezování rychlosti. Enercon využívá synchronního generátoru bez převodovky a pomocí výkonové elektroniky upravuje elektrickou energii ještě před přivedením do ES. Čistá roční výroba netto větrné farmy je 102 GWh, což stačí na zásobování 30 000 domácností.

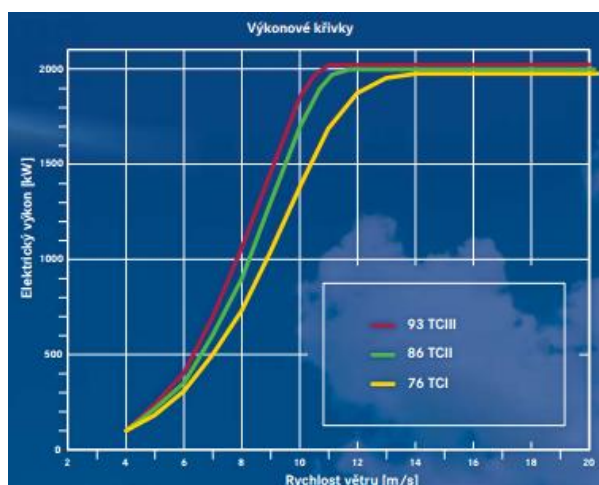
Tab. 4.3 Závislost výkonu na rychlosti větru Enercon E-82 [9]

Rychlost větru [m/s]	Výkon [kW]	Součinitel výkonnosti C_p [-]
1	0.0	0.00
2	3.0	0.12
3	25.0	0.29
4	82.0	0.40
5	174.0	0.43
6	321.0	0.46
7	532.0	0.48
8	815.0	0.49
9	1,180.0	0.50
10	1,580.0	0.49
11	1,810.0	0.42
12	1,980.0	0.35
13	2,050.0	0.29
14	2,050.0	0.23
15	2,050.0	0.19
16	2,050.0	0.15
17	2,050.0	0.13
18	2,050.0	0.11
19	2,050.0	0.09
20	2,050.0	0.08
21	2,050.0	0.07
22	2,050.0	0.06
23	2,050.0	0.05
24	2,050.0	0.05
25	2,050.0	0.04



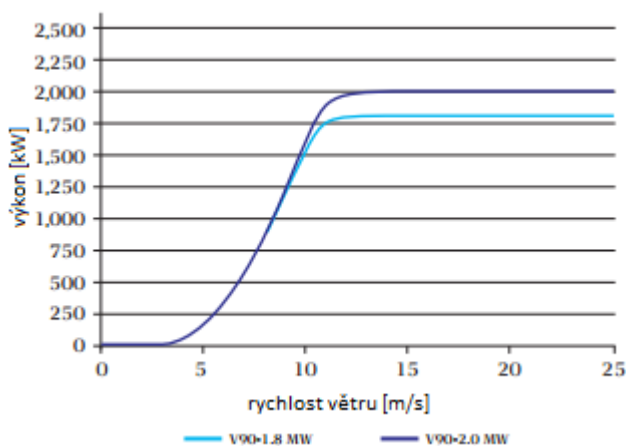
Obr. 4.4 Výkonová křivka Enercon E-82

Další mnou uvedené výkonové křivky jsou pro českou firmu Wikov Wind. Tato firma vyrábí produktovou řadu VTE se jmenovitým výkonem 2 MW a třemi typy průměru rotorů. Ve větrném parku Janov složeném z 2 VTE o průměru rotoru 80 m se energetická produkce obou strojů pohybuje okolo 8 GWh/rok a pokrývá roční spotřebu zhruba 2300 východočeských domácností.



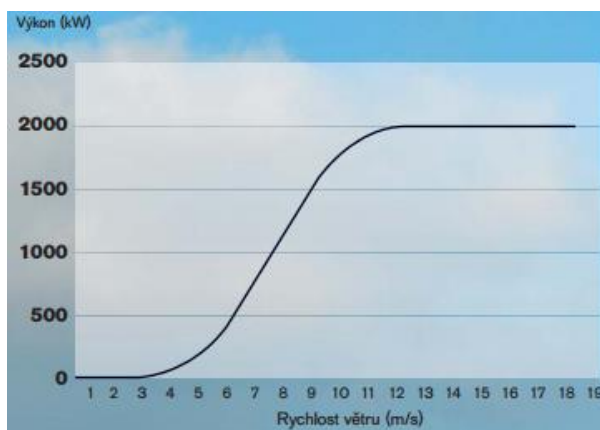
Obr 4.5 Výkonové křivky jednotlivých produktových řad firmy Wikov Wind

Výkonové křivky větrného soustrojí použitého u větrné farmy Pavlov, jsou následující (Obr. 4.6). Tyto VTE dodala dánská firma Vestas a jedná se o 2 větrná soustrojí s průměrem rotoru 90 m a instalovaným výkonem 2 MW. Při rychlosti větru okolo 13 m/s se elektrárna dostává na jmenovitý výkon. Větrná farma Pavlov má roční produkci elektrické energie okolo 5 GWh, což zajišťuje pokrytí roční spotřeby pro více než 1500 domácností. Vestas používá asynchronní generátor s kroužkovou kotvou a frekvenční měnič.



Obr 4.6 Výkonové křivky větrného soustrojí Vestas V90

Další mnou uvedené výkonové křivky (Obr. 4.7) jsou pro větrnou farmu Věžnice na Vysočině. Jedná se o větrnou farmu, jejíž díly byly vyrobeny švýcarskou firmou Repower. Použité větrné soustrojí MM92 má instalovaný výkon 2050 kW a průměr rotoru 92 m. Výška nosného stožáru je 80 m. Roční výroba pro tento větrný park se pohybuje kolem 9 GWh, což odpovídá roční spotřebě 2500 domácností. Firma Repower použila stejnou technologii, jako největší světový výrobce VTE Vestas a to asynchronní generátor s převodovkou.



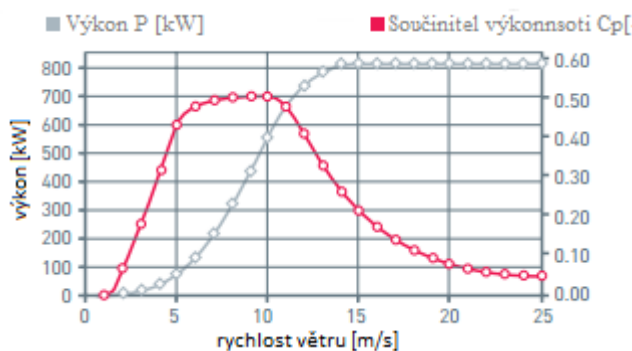
Obr. 4.7 Výkonová křivka Repower MM92

Enercon E-48 800 kW:

Typ větrné elektrárny Enercon E-48 jsem vybral, protože je to jediná větrná elektrárna stojící v Plzeňském kraji. Jedná se o větrnou elektrárnu Dožice se jmenovitým výkonem 800 kW. Průměr rotoru je 48 m a lopatky jsou vyrobeny z GRP (epoxidová pryskyřice). Má 3 nezávislé brzdomové systémy, které jsou aktivovány při rychlosti větru od 28 m/s do 34 m/s. A samozřejmě funkční dálkový monitoring Enercon Scada. Na jmenovitý výkon se dostane při rychlosti větru okolo 14 m/s.

Tab. 4.8 Závislost výkonu na rychlosti větru
Enercon E-48 [9]

Rychlost větru [m/s]	Výkon [kW]	Součinitel výkonnosti C_p [-]
1	0.0	0.00
2	0.0	0.00
3	5.0	0.17
4	25.0	0.35
5	60.0	0.43
6	110.0	0.46
7	180.0	0.47
8	275.0	0.48
9	400.0	0.50
10	555.0	0.50
11	671.0	0.45
12	750.0	0.39
13	790.0	0.32
14	810.0	0.27
15	810.0	0.22
16	810.0	0.18
17	810.0	0.15
18	810.0	0.13
19	810.0	0.11
20	810.0	0.09
21	810.0	0.08
22	810.0	0.07
23	810.0	0.06
24	810.0	0.05
25	810.0	0.05



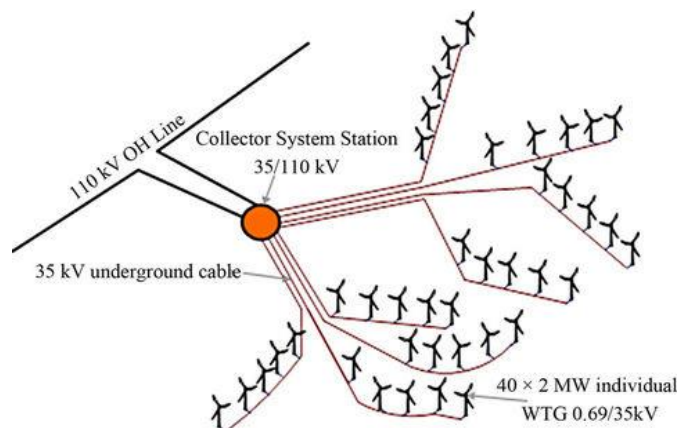
Obr. 4.8 Výkonová křivka Enercon E-48

5 Připojování VTE do distribuční sítě

Aby bylo možné větrnou elektrárnu nebo farmu větrných elektráren připojit do distribuční sítě (DS), musí výrobce zažádat o připojení, podstoupit přihlašovací řízení s danými zákonnými normami a dále splnit podmínky pro připojení, které jsou dány provozovatelem distribuční sítě (PDS). Žádost o připojení musí obsahovat technické specifikace připojovaného výrobního zdroje a dále je třeba znát konfiguraci sítě a místo, připojení nového zdroje. Na základě těchto technických specifikací je třeba vypracovat studii připojitelnosti, kdy se zkoumá, zdali nový výrobní zdroj na základě pravidel pro paralelní provoz zdrojů může být připojen do distribuční sítě.

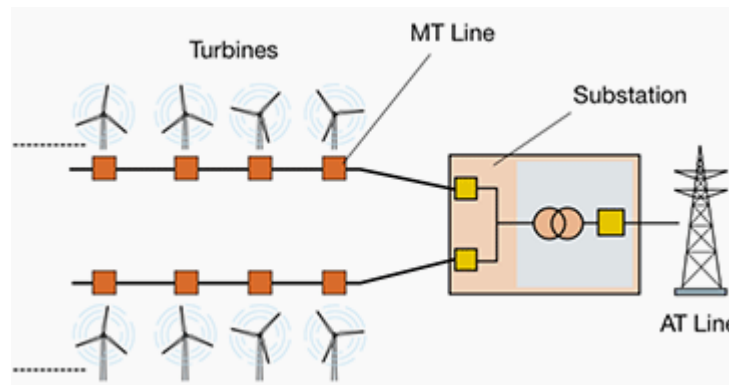
Parametry dodávané elektřiny, určující její kvalitu pro odběratele, jsou dány charakteristikami v daném předávacím místě elektrizační soustavy (ES) a jejich porovnáním s mezními velikostmi referenčních technických parametrů. Tyto charakteristiky napájecího napětí, popisující kvalitu elektřiny dodávané z veřejných distribučních sítí a z přenosové sítě za normálních provozních podmínek, jsou stanoveny pravidly vycházejícími z norem a týkají se jeho kmitočtu, velikosti, tvaru vlny a symetrie třífázových napětí.

Připojení větrných farem na DS se různí podle konkrétního místa a možností. Záleží na rozsáhlosti farmy a počtu jednotlivých větrných soustrojí a na tom jestli větrná farma vyrábí pro danou oblast, nebo se z ní energie transportuje na delší vzdálenost. Na Obr. 5.1 je připojení takové, že každá jednotlivá VTE má svůj vlastní transformátor, který mění výstupní napětí z generátoru na hladinu vysokého napětí 22 nebo 35 kV a dále, na hladinu 110 kV a energie je přenášena do vzdálenějšího místa spotřeby.



Obr 5.1 Připojení větrné farmy k DS 110 kV, přenos přes 2 transformátory

Další možností (Obr. 5.2) je vyvedení výkonu z jednotlivých VTE na společnou sběrnici a transformování na hladinu vysokého napětí přes jeden společný transformátor. V tomto případě jsou ale větší ztráty na vedení, kde přenášíme výkon s malým napětím a velkým proudem.



Obr 5.2 Připojení větrné farmy k DS přenos přes 1 transformátor

Stejné možnosti vyvedení výkonu jsou i pro VTE, umístěné na moři (offshore), jen místo podzemních kabelů jsou použity podmořské.

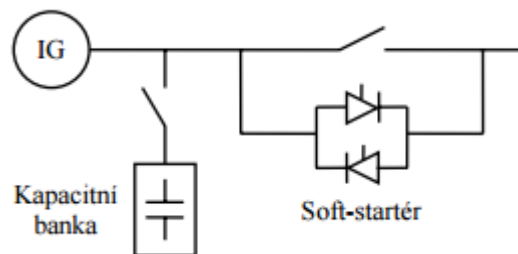
5.1 Způsoby připojení větrných elektráren

Za normálních podmínek jsou zařízení s asynchronním strojem připojena svým státorem přímo k ES a pro napájení rotoru je využíván frekvenční měnič. Zařízení se synchronním generátorem jsou připojena přes prvek výkonové elektroniky. Při startu VTE, tedy pro účely jejího připojení k síti při dosažení odpovídajících otáček, je však třeba zamezit některým jevům, které tento proces doprovázejí, zejména vzniku rázového proudu vlivem magnetizace stroje. S ohledem na to, že elektrárny se synchronním generátorem jsou vybaveny měničem na straně statoru, řešení této problematiky se jich netýká, neboť vše je zajištěno pomocí tohoto měniče. Pro elektrárny s asynchronním generátorem jsou potom popsány v podstatě dva způsoby jejich připojování k ES.

5.1.1 Připojování přes soft-startér

Nejvíce využívaným systémem je připojování generátoru přes tzv. soft-startér, který se skládá ze dvou antiparalelně zapojených tyristorů v každé fázi, jak ukazuje (Obr. 5.3), jež jsou elektronicky řízeny. Celý systém zahrnuje dále ještě hlavní vypínač, který zajišťuje odpojení

soft-startéru a také vypínač pro kompenzační kapacitní banku. Proces připojení větrné elektrárny může začínat při úhlové rychlosti generátoru v rozsahu mezi 5 a 30 procenty pod úrovní rychlosti synchronní. V tomto okamžiku začíná pracovat soft-startér, který spínáním tyristorů řídí velikost napájecího napětí a vytváří jeho plynulý nárůst až na jmenovitou hodnotu. Díky tomuto spínání je omezována velikost proudu tekoucího do generátoru a nedochází tak k překročení jmenovité hodnoty v řádu jejích násobků, jako v případě přímého přifázování, kde se mohou objevit až 7mi násobné proudy. Celý tento proces může trvat maximálně několik sekund a po dosažení jmenovité velikosti napětí dochází k sepnutí hlavního vypínače a k přemostění soft-startéru, který se nadále nepodílí na provozu elektrárny. Nakonec je připojena kapacitní banka, zajišťující kompenzaci jalového výkonu.

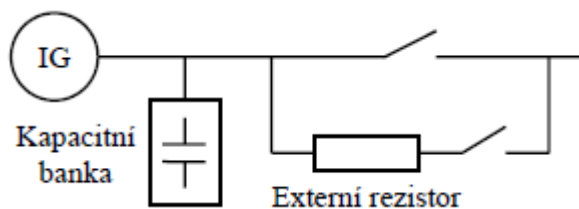


Obr. 5.3 Připojení přes soft-startér

5.1.2 Připojení přes externí rezistor

Další možností, pro připojování větrných elektráren s asynchronními generátory, je využití externího rezistoru. Externí rezistor je na (Obr. 5.4). Je z něj patrné, že v tomto obvodu je kapacitní kompenzace připojena ke generátoru trvale, jako v případě přímého přifázování. Větrná elektrárna vybavená externím rezistorem se připojuje k soustavě při otáčkách mezi 75 a 100 procenty otáček synchronních, podobně jako u využití soft-startéru. V tuto chvíli dochází k sepnutí vypínače rezistoru, připojení elektrárny přes tuto součástku a během maximálně několika sekund k magnetizaci stroje. Potřebný jalový proud pro magnetizaci je během celého startu dodáván stále připojenou kapacitní bankou. Navyšováním napětí na kapacitě se proud tekoucí externím rezistorem snižuje. Ve chvíli, kdy se proud rezistorem sníží na hodnotu blízkou nule, je napětí na generátoru velice blízko ke jmenovité hodnotě napětí sítě. Vypínač sepne zároveň s rozepnutím obvodu s externím rezistorem, čímž se připojení k síti mění na přímé. Použitím externího rezistoru dosahujeme stejně jako u soft-startéru snížení proudového rázu. Proudový ráz v tomto případě dosahuje maximálně 2,5

násobku jmenovitého proudu. Výhoda oproti soft-startéru je, že tento způsob připojení nezpůsobuje vznik vyšších harmonických proudů a neovlivňuje tak negativně síť.



Obr. 5.4 Připojení přes externí rezistor

5.1.3 Kompenzace jalového výkonu

Pro udržování stability napětí v síti je třeba, při připojování generátoru do ES, použít také kompenzační zařízení. Kompenzační zařízení je třeba, protože generátor vyžaduje jalovou energii. Pro tento účel se dají využít kondenzátorové baterie, statický proměnný kompenzátor, nebo statický synchronní kompenzátor. Nejjednodušším způsobem je připojení kondenzátorové baterie udržující správnou hladinu napětí, pomocí připínání a odpínání kondenzátorů. Tímto způsobem jsme však schopni provádět pouze skokové změny v dodávce jalové energie a je tak nejméně účinný. Reakce na náhlé změny napětí je pomalá.

Díky výkonové elektronice se nabízí další způsob kompenzace, který dokáže reagovat na rychlé změny napětí a plynule regulovat jalový výkon. Jedná se o proměnný kompenzátor. Skládá se z kondenzátorů a reaktorů, které jsou spínány a ovládány pomocí tyristorů. Velkou výhodou je schopnost nejen dodávky, ale také spotřeby jalového výkonu.

Nejvíce rozšířený je v dnešní době statický synchronní kompenzátor, který řídí dodávku a spotřebu jalové energie pomocí regulace velikosti výstupního třífázového napětí ze střídavého napětíového generátoru. Při generování nižšího napětí, než napětí sítě, dojde ke vzniku induktivního proudu a kompenzátor odebere ze sítě jalovou energii, v důsledku čehož se napětí na přípojnicí sníží na požadovanou hodnotu. Při generování vyššího napětí než napětí sítě, dojde ke vzniku kapacitního proudu a kompenzátor dodá do sítě jalovou energii, v důsledku čehož se napětí na přípojnicí zvýší na požadovanou hodnotu. Statický synchronní generátor poskytuje plynulou regulaci jalového výkonu s nižšími reakčními časy, než u proměnného kompenzátoru.

5.2 Vliv větrných elektráren na ES

Obecně je možné tuto problematiku rozdělit na dvě oblasti, a to na vlivy lokální a systémové. Lokálními vlivy lze označit ty, které se negativně projevují v distribučních soustavách a které se týkají zejména připojovacích podmínek a zajištění nezbytné kvality dodávky elektřiny. Systémovými vlivy je naopak možné označit ty, které se negativně projevují při provozu přenosových soustav a které zahrnují hlavně dopady na stabilitu ES a zajištění dostatečné spolehlivosti dodávky elektřiny.

5.2.1 Lokální vlivy

Mezi nežádoucí vlivy působící v rámci distribuční části ES patří zejména přetěžování sítí, které vzniká následkem kolísání výroby vlivem změny rychlosti větru, kolísání napětí, které je ovlivněno nejen kompenzací VTE, a také zvyšování zkratových poměrů v důsledku jejich připojování. Dále vlivem použití výkonové elektroniky jsou VTE zdrojem rušení v elektrické síti, které je spojeno se vznikem vyšších harmonických, flikru, nebo útlumem signálu hromadného dálkového ovládání (HDO).

5.2.1.1 Změny napětí

První vliv způsobený připojováním a provozem VTE jsou změny napětí. Kromě stálého zvýšení napětí, způsobeného samotným připojením zdroje k síti, to mohou být také krátkodobé změny napětí, které vznikají jako důsledek připínání a odpínání jednotlivých výrobních zařízení, nebo komutační poklesy, které mají svou příčinu ve struktuře a principu činnosti některých elektronických prvků pro připojení k síti.

Při hodnocení změn napětí vyvolaných připojením a odpojením distribuovaného zdroje (DZ), je třeba brát v potaz druh generátoru a způsob jeho připojení k síti. Za předpokladu, že je dodávka uskutečňována přes měnič nebo střídač, je změna zatížení stejná jako hodnota jmenovitého výkonu výrobní jednotky, přičemž horší situace nastává při odpojení, kdy zpravidla dochází ke skokovému výpadku dodávky. Připojení je většinou provázeno plynulým nárůstem v oblasti částečného výkonu. Připojování synchronních generátorů, při dodržení synchronizačních kritérií žádnou významnou změnu zatížení nevyvolá. V případě asynchronních generátorů, které se připojují s téměř synchronními otáčkami, je změna zatížení, při zanedbání prvních dvou kmitů, obvykle nižší než čtyřnásobek

výkonu generátoru, přičemž v první půlčluně mohou proudové špičky vyskočit na hodnotu až osminásobku jmenovitého proudu.

5.2.1.2 Kolísání napětí

Vzhledem k nestálosti dodávky do ES způsobují VTE sled rychlých změn napětí ve společném přípojném bodě. Kolísání napětí v síti může vyvolat kolísání světelného toku u zdrojů světla, které se označuje jako blikavý jev, neboli flickr. Tento jev negativně působí na lidský zrak a může ovlivnit také psychickou pohodu člověka. Příčiny vzniku flickru mohou být v podstatě dvě, a sice vliv poryvů větru, který je částečně snižován setrvačností rotačních částí turbíny a vliv věže, který způsobuje stálý pokles výkonu, při zákrytu listu turbíny s věží. Následkem takto vzniklých periodických poklesů činného a jalového výkonu se na impedanci sítě objevuje napěťový úbytek o velikosti, která je závislá především na počtu listů rotoru.

5.2.1.3 Harmonická a mezipharmonická napětí

Vznik sinusových průběhů o vyšších frekvencích je spojen hlavně se zařízeními využívajícími frekvenční měniče a střídače, kterými jsou VTE vybaveny z důvodu produkovaní střídavého napětí rozdílné frekvence od frekvence sítě. Napětí produkované těmito prvky totiž obsahuje, kromě první harmonické napětí, také množství vyšších harmonických, které sinusový průběh zkreslují.

Zkreslení průběhů křivky napětí má za následek dodatečné namáhání zařízení ostatních uživatelů sítě a může docházet k poruchám jejich funkce, nebo ke zkrácení životnosti zařízení. Kvůli těmto negativním vlivům je nutné stanovit, pro každou nově připojovanou VTE, podíl vyšších harmonických emitovaných do sítě.

VTE jsou většinou také zdrojem mezipharmonických napětí, které vznikají při provozu asynchronních strojů a vzhledem k proměnlivosti výroby, způsobují zkreslení, neperiodické vůči kmitočtu sítě a přispívají tak ke vzniku flickru.

5.2.1.4 Harmonické proudy

Složitější situace je při posuzování harmonických proudů, které mohou být emitovány zařízeními, zejména opětovně v případech použití střídačů a měničů frekvence a jejichž hodnoty musí udávat výrobce těchto zařízení například ve zprávě o typové zkoušce.

5.2.1.5 Přetěžování sítí

Hlavním předpokladem pro připojení jakéhokoliv zdroje elektřiny do elektrické soustavy je její dostatečné dimenzování, a to od místa připojení zdroje až po místo spotřeby, případně po místo transformace sloužící pro dálkový přenos. Proto, aby nedocházelo k přetěžování sítě zvýšenou dodávkou elektřiny při vysokých rychlostech větru, musí být VTE připojena do správně zvoleného přípojného místa a její výkon vyveden do části sítě s odpovídající strukturou a uspořádáním. Pokud je VTE připojena do sítě, která je nedostatečně dimenzována, je potřeba provést její posílení, abychom zamezili poškození jednotlivých provozních prostředků v důsledku nežádoucích vlivů, jako je nadměrné oteplení nebo nedovolené změny napětí.

5.2.1.6 Zkratové poměry

Při připojování nových zdrojů do ES je dále třeba brát v úvahu jejich ovlivňování zkratových poměrů, které jsou příčinou nárůstu zkratového výkonu v přípojném bodě, a také možnost změny směru výkonového toku v síti, protože hlavně změna zkratových poměrů může způsobit překročení hodnot zkratové odolnosti některých zařízení DS a způsobit tak jejich zničení. Zároveň je nutné zhodnotit připojení také z hlediska zkratové odolnosti zařízení samotného zdroje, aby nedošlo k jeho poškození kvůli zkratovému proudu sítě, k níž je připojeno. Při výpočtu zkratového proudu chceme zjistit efektivní hodnotu zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu. Pro výpočet maximálního zkratového proudu uvažujeme, že napětí sítě se pohybovalo na hodnotě nejvyššího dovoleného napětí. Proto je ve vztahu napěťový součinitel c , který má hodnotu 1,05 pro vedení 400 kV a 1,1 pro ostatní vedení. Dále je ve vztahu X_c , což je celková impedance zkratového obvodu.

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot X_c} \quad (A) \quad (5.1)$$

5.2.1.7 Ovlivnění signálu HDO

Hromadné dálkové ovládání je soubor technických prostředků umožňujících vysílat povely nebo signály pro zapínání a vypínání spotřebičů nebo tarifů. Tento systém využívá pro přenos informace vedení energetické sítě a jeho správná funkce tak může být ovlivněna provozem jiných zařízení, zejména zdroji rušivých harmonických napětí v jím používaném

frekvenčním pásmu. VTE také zapříčiňují, stejně jako ostatní rozptýlená výrobní zařízení, přídatná zatížení přijímačů HDO. Síla signálu pak může být ovlivněna i kondenzátory usměrňovačů s kapacitní filtrací nebo kondenzátorovými bateriemi. Proto jsou u VTE hlídány emise harmonických a mezipharmonických napětí, aby toto rušení nenastávalo a systém HDO byl plně funkční.

5.2.2 Systémové vlivy

Vlivy, které se negativně projevují v rámci PS, se týkají hlavně elektrizačních soustav s velkým podílem VTE na celkové dodávce elektřiny, kde výkony velkých větrných farem prakticky nahrazují podstatnou část výkonu dodávaného dříve stabilnějšími zdroji, jako generátory tepelných elektráren, které také zajišťovaly dostatečnou schopnost regulace. V těchto ES pak vlivem závislosti na aktuálních povětrnostních podmínkách, dochází ke vzniku rychlých změn energetických toků s různými směry a velikostmi. Na soustavu se zvyšují nároky na zajištění přenosové schopnosti a velikosti regulačního výkonu.

5.2.2.1 Spolehlivost dodávky elektřiny

Připojování velkého počtu VTE působí, vzhledem k vysoké míře nestability jejich výkonu, nepříznivě na spolehlivost dodávky elektřiny, která normálně závisí zejména na maximální přenosové schopnosti ES.

Protože VTE jsou nespolehlivé zdroje elektrické energie, je nezbytné zálohovat jejich výkon jinými zdroji, které jsou schopné reagovat na náhlé změny výroby. Významnou roli pro zajištění celkové spolehlivosti dodávky hraje tedy také spolehlivost těchto elektráren v záloze. Při neočekávaném odpojení velkého počtu VTE, je třeba rychle nahradit jejich výkon, což výrazně zvyšuje riziko nepokrytí spotřeby.

5.2.2.2 Stabilita a řízení soustavy

Definici stability provozu soustavy lze najít v kodexu přenosové soustavy [30], jako její schopnost udržet rovnovážný stav, a to jak za normálního chodu, tak i po přechodových dějích způsobených vnějšími vlivy, poruchovými výpadky zařízení a také dispečerským řízením.

Tato schopnost je závislá na zabezpečení dostatečného množství regulačního výkonu. Ve srovnání s klasickými, dobře regulovatelnými zdroji, se tak vlivem připojování VTE zvyšují nároky na velikost rezerv výkonu pro regulaci a objem dispečerských záloh, zejména na rychle startující rezervy, jako jsou vodní elektrárny.

Dispečerské řízení však musí také řešit opačný problém a to přebytku výkonu, do kterého se VTE také zapojují, když začnou vyrábět velké množství elektrické energie v době nízkého odběru. To zvyšuje nároky na provoz klasických bloků z hlediska nutnosti jejich častějšího odstavování, které způsobuje větší míru opotřebení a snížení jejich životnosti.

5.2.2.3 Energetické toky v propojených ES

Problematika nepříznivých vlivů způsobených provozem VTE je ještě komplikovanější v důsledku propojení ES mezi jednotlivými státy v Evropě. To znamená, že provozem VTE nejsou ovlivněny jen soustavy, do nichž jsou zdroje připojeny, ale i soustavy okolní. Česká republika má s těmito energetickými přetoky vlivem VTE na severu Německa vlastní nemilé zkušenosti, kdy se dostala několikrát na pokraj blackoutu. Tento problém se teď snaží vyřešit Česká přenosová soustava (ČEPS), kdy je rozhodnuto o instalaci transformátoru s posunem fáze v rozvodně Hradec. Tyto transformátory by takovýmto nechtěným přetokům, které ohrožují stabilitu českých sítí, měly zamezit.

5.3 Provozní náklady na připojení VTE

V některých případech může připojení nového výkonu vyvolat důsledky i ve vzdálenějších místech sítí, kde to nemusí být očekáváno. Instalace VTE vyvolá v sítích tři typy investic:

- Investice do sítí, které připojí VTE do nejbližšího vhodného uzlu PS nebo DS.
- Investice do stávajících sítí distribučních soustav, vyvolané změnou výkonu v uzlech připojení VTE a následně v sítích připojených k danému uzlu, včetně úprav řídicích systémů a ochran.
- Investice do dosavadních sítí přenosové soustavy, včetně přenastavení řídicích systémů a ochran.

5.4 Ekonomické zhodnocení

Výroba elektrické energie z větru je přibližně třikrát dražší v porovnání s uhelnými nebo jadernými elektrárnami. Proto musí stát podporovat obnovitelné zdroje zvýhodněními výkupními cenami, aby se do nich vůbec vyplatilo investovat.

Výkupní cena je nastavena tak, aby garantovala investorovi návratnost do 15 let. Konkrétní doba návratnosti je pak při daných investičních nákladech ovlivněna především roční průměrnou rychlostí větru na lokalitě a také použitou technologií. Náklady spojené s výstavbou VTE představuje mnoho věcí kromě nákupu stroje také projekční a schvalovací aktivity, náklady spojené se zajištěním pozemků, stavební práce a vyvedení výkonu do sítě. Dále je nutné počítat s dalšími náklady na údržbu a příspěvky okolním obcím. Celkové náklady na postavení jedné VTE se pohybují okolo 40 milionů za instalovaný megawatt výkonu v závislosti na celkovém počtu strojů, rozsahu úprav přístupových cest, vzdálenosti a provedení elektrické přípojky.

Cena elektřiny vyrobená větrnou elektrárnou rychle klesá s novými technologiemi. Náklady na výrobu 1 kWh se za posledních dvacet let zmenšili pětkrát a tento trend stále pokračuje. Avšak i státní podpora se úměrně tomu snižuje. Často je uváděno, že na zhotovení stavby a konstrukce VTE se spotřebuje tolik energie, že takové množství nedokáže sama vyrobit ani za několik let svého provozu. Měřením bylo zjištěno, že pokud je VTE správně umístěna, tak energetická návratnost (doba, za kterou elektrárna vyrobí tolik energie, kolik bylo potřeba na její výrobu), se pohybuje od tří do šesti měsíců.

Závěr

Větrné elektrárny v byly v posledních letech nejdynamičtěji se rozvíjející obnovitelné zdroje energie. Větrná energetika se stala celosvětově významným průmyslovým odvětvím, které zajišťuje práci tisícům lidí. Jedna z největších výhod takto vyrobené energie je, že je naprosto šetrná k životnímu prostředí a negeneruje žádný nebezpečný zbytkový odpad. V České republice jsou do značné míry vhodné oblasti pro výstavbu větrných elektráren vyčerpány a díky regulaci státní podpory, už není další výstavba větrných elektráren ani tak výhodná z ekonomického hlediska.

Míra technické úrovně dnešních větrných elektráren je vysoká. Pořád se zvedají velikosti stožárů větrných elektráren a průměry rotorů. Díky pokročilým technologiím na výrobu materiálů, není dnes problém postavit větrné elektrárny s instalovaným výkonem 7 MW. Další růst velikosti a tedy i výkonu by ale znamenal neúměrný finanční nárůst na výstavbu a použité materiály VTE. Rozhodujícím faktorem je vždy cena vyrobené energie, proto podle mého názoru směr vývoje větrných elektráren bude spočívat ve zvyšování efektivnosti, snižování pořizovacích nákladů a umístování větrných parků na moře.

U mnou vybraných větrných parků je dobře vidět, že jednotlivé větrné farmy mají různou roční produkci elektrické energie, i když by se jednalo o větrné parky se stejným počtem VTE o stejném instalovaném výkonu. Největším rozdílovým prvkem je výběr lokality a tedy průměrná rychlost a stálost větru. Další drobné rozdíly jsou pak způsobeny zvládnutím použité technologie výroby dle jednotlivých výrobců. Dále je vidět z pracovních charakteristik, že u elektráren o stejném instalovaném výkonu dosahují při nejmenších rychlostech větru nejrychleji jmenovitého výkonu ty s největším průměrem rotoru.

U vybraných větrných elektráren jsem uváděl údaje o roční produkci elektrické energie. Tyto údaje odpovídaly velikosti a počtu jednotlivých větrných elektráren použitých ve vybraných větrných farmách. Největší větrná farma v České republice je schopna zásobovat 30 000 domácností a její čistá výroba energie je přes 100 GWh za rok.

Připojování VTE na DS vyvolá v elektrických sítích další investice s tím spojené. Investice do sítí pro připojení VTE do nejbližšího vhodného uzlu DS. Investice do stávajících

sítí DS vyvolané změnou výkonu v uzlech připojení VTE, včetně úprav řídicích systémů a ochran. Investice do stávajících sítí PS, včetně přenastavení řídicích systémů a ochran.

Z ekonomického hlediska je státní podpora nastavena tak, aby projekt VTE zaručoval dobu prosté návratnosti investice do 15 let. Bez státní podpory by nebylo ekonomicky možné VTE vůbec stavět, protože energie jimi vyrobená je třikrát dražší než energie vyrobená v uhelných elektrárnách.

Z hlediska výroby elektrické energie pomocí větrných elektráren je problém hlavně v jejich nestálosti výroby vlivem nepředvídatelnosti rychlosti větru. To je příčina nesnadného začleňování větrných elektráren do ES a přináší s sebou další dodatečné náklady související s nutností rezervy v jiných elektrických zdrojích, které se dají v případě potřeby rychle spustit a také s posilováním elektrických sítí.

Informační zdroje

Literatura

- [1] RYCHETNÍK, Václav, Jiří PAVELKA a Josef JANOUŠEK. Větrné motory a elektrárny. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997, 199 s. ISBN 80-10-01563-7.
- [2] QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. 1. vyd. Praha: Grada, 2010, 296 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [3] RYCHETNÍK, Václav. Větrné motory. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1995, 61 s. ISBN 80-7078-281-1.
- [4] KAMINSKÝ, Jaroslav a Mojmír VRTEK. Obnovitelné zdroje energie. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Strojní fakulta, 1999, 96 s. ISBN 80-7078-445-8.
- [5] ŠKORPIL, Jan, Jiřina MERTLOVÁ a Bedřich WILLMANN. Obnovitelné zdroje a jejich začleňování do energetických systémů: publikace ke grantovému projektu GAČR 102/06/0132. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008, 50 s. ISBN 978-80-7043-733-9.
- [6] HALLENGA, Uwe. Malá větrná elektrárna: návod ke stavbě s konstrukčními výkresy. 2. přepr. a rozš. vyd. Ostrava: HEL, 2006, 95 s. ISBN 80-861-6727-5.
- [7] RYCHETNÍK, Václav. Větrné motory. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1995, 61 s. ISBN 80-707-8281-1.

Internet

- [8] Anemometr: www.jerrycb.wz.cz/schemata/sche17.htm [cit. 2015-03-27]
- [9] Enercon: http://www.enercon.de/p/downloads/ENERCON_PU_en.pdf [cit. 2015-03-27]
- [10] Větrná turbína: http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C4%9Btrn%C3%A1_energie [cit. 2015-03-27]
- [11] Větrná mapa: <http://www.ufa.cas.cz/struktura-ustavu/oddeleni-meteorologie/projekty-egp/vetrna-energie/vetrna-mapa.html> [cit. 2015-03-27]
- [12] Výkupní ceny energie: <http://www.csve.cz/clanky/graf-vyvoje-vykupnich-cen/278> [cit. 2015-03-27]

- [13] Větrné elektrárny: <http://www.epenergy.cz/segmenty/obnovitelne-zdroje/vetrne-elektrarny/> [cit. 2015-03-27]
- [14] Asynchronní generátor Vestas: [http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-s-prevodovkou-a-asynchronnim-generatorem-\(vyrobce-vestas\)/332](http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-s-prevodovkou-a-asynchronnim-generatorem-(vyrobce-vestas)/332) [cit. 2015-03-27]
- [15] Synchronní generátor Enercon: [http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-bez-prevodovky-s-multipolovym-synchronnim-generatorem-\(vyrobce-enercon\)/333](http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-bez-prevodovky-s-multipolovym-synchronnim-generatorem-(vyrobce-enercon)/333) [cit. 2015-03-27]
- [16] Wikov: [http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-s-prevodovkou-variatozem-a-synchronnim-generatorem-\(cesky-vyrobce-wikov\)/334](http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-s-prevodovkou-variatozem-a-synchronnim-generatorem-(cesky-vyrobce-wikov)/334) [cit. 2015-03-27]
- [17] Vítr a jeho energie: <http://profipress.cz/archiv/energie-022008/#page/37> [cit. 2015-03-27]
- [18] Park větrných elektráren Věžnice: http://www.spinvest.cz/files/PP_Veznice_2013_CZ.pdf [cit. 2015-03-27]
- [19] Vznik vztlaku: <http://www.csve.cz/cz/clanky/vznik-vztlaku/307> [cit. 2015-03-27]
- [20] OZE: http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-2-OZE.pdf [cit. 2015-03-27]
- [21] Aerodynamika rotoru VTE: <http://www.csve.cz/cz/clanky/aerodynamika-rotoru-vetrne-elektrarny/308#prettyPhoto> [cit. 2015-03-27]
- [22] Konstrukce rotorového listu: <http://www.csve.cz/cz/clanky/konstrukce-rotoroveho-listu-vetrne-elektrarny/311> [cit. 2015-03-27]
- [23] Rotorový list: <http://www.csve.cz/cz/clanky/indukovany-odpor-na-rotorovem-listu-vetrne-elektrarny/312> [cit. 2015-03-27]
- [24] Zakončení listu rotoru: www.wikimedia.org/wiki/File:WindTurbine_Rotor_Winglet [cit. 2015-03-27]
- [25] VTE: <http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny/324> [cit. 2015-03-27]
- [26] Z čeho se skládá větrná elektrárna: <http://www.csve.cz/cz/detail-kategorie/z-ceho-se-sklada-vetrna-elektrarna/82> [cit. 2015-03-27]
- [27] Často kladené dotazy ERU: <http://www.eru.cz/poze/casto-kladene-dotazy> [cit. 2015-03-27]
- [28] Roční zpráva o provozu ES - ERU: http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2013.pdf/20c3f587-a658-49f7-ace9-56be8a66b7b9 [cit. 2015-03-27]

- [29] Aktuální instalace VTE v ČR:
<http://www.csve.cz/clanky/aktualni-instalace-vte-cr/120> [cit. 2015-03-27]

Normy a předpisy

- [30] Kodex přenosové soustavy, 2011

Obrázky

Obr. 1.1 Globální cirkulace a vznik větru – převzato:
QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. 1. vyd. Praha: Grada, 2010, 296 s.
Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.

Obr. 1.2 Schéma miskového anemometru – převzato:
<http://www.jerrycb.wz.cz/schemata/sche17.htm>

Obr. 1.3 Větrná mapa České republiky – převzato:
<http://www.ufa.cas.cz/struktura-ustavu/oddeleni-meteorologie/projekty-egp/vetrna-energie/vetrna-mapa.html>

Obr. 1.4 Typický průběh generovaného výkonu a součinitele výkonnosti VTE v závislosti na rychlosti větru – převzato:
[//cs.wikipedia.org/wiki/V%C4%9Btrn%C3%A1_turb%C3%9Cn%C3%99](http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C4%9Btrn%C3%A1_turb%C3%9Cn%C3%99)

Obr. 2.1 Konstrukce větrné elektrárny – převzato:
http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-2-OZE.pdf

Obr. 2.2 Vrtule s vodorovnou osou – převzato:
RYCHETNÍK, Václav. Větrné motory. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1995, 61 s. ISBN 80-7078-281-1. (oskenováno vygenerováno)

Obr. 2.3 Zúžená trubice – převzato:
<http://www.csve.cz/cz/clanky/vznik-vztlaku/307>

Obr. 2.4 Aerodynamický profil – převzato:
<http://www.csve.cz/cz/clanky/vznik-vztlaku/307>

Obr. 2.5 Vztlaková síla – převzato:
<http://www.csve.cz/cz/clanky/vznik-vztlaku/307>

Obr. 2.6 Skutečný aerodynamický profil - převzato:
<http://www.csve.cz/cz/clanky/vznik-vztlaku/307>

Obr. 2.7 Změna nabíhajícího toku proudu – převzato:
<http://www.csve.cz/cz/clanky/vznik-vztlaku/307>

Obr. 2.8 Působení vzduchu na lopatku turbíny – převzato:
HALLENGA, Uwe. Malá větrná elektrárna: návod ke stavbě s konstrukčními výkresy. 2. přepr. a rozš. vyd. Ostrava: HEL, 2006, 95 s. ISBN 80-861-6727-5. (oskenováno vygenerováno)

Obr. 2.9 Obvodové rychlosti, které jsou v 1/3, 2/3 a na konci listu, při pracovních otáčkách 15 ot/min – převzato:

<http://www.csve.cz/cz/clanky/aerodynamika-rotoru-vetrne-elektrarny/308#prettyPhoto>

Obr. 2.10 Vznik vztlaku na profilu rotorového listu – převzato:

<http://www.csve.cz/cz/clanky/aerodynamika-rotoru-vetrne-elektrarny/308#prettyPhoto>

Obr. 2.11 Řez rotorovým listem VTE – převzato:

<http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny/324>

Obr. 2.12 Winglet VTE – převzato:

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:WindTurbine_Rotor_Winglet_unmounted_2.JPG

Obr. 2.13 Strojovna VTE – převzato:

<http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny/324>

Obr. 2.14 Hřídel VTE vyrobena ve firmě škoda steel – převzato:

<http://www.vetрнаelektrarna.cz/KomponentyVE.html>

Obr. 2.15 Dvoustupňová planetová převodovka pro výkon 2 MW – převzato:

<http://www.csve.cz/cz/clanky/prevodovka-vetrne-elektrarny/327>

Obr. 2.16 Elektropohon pro natáčení strojovny – převzato:

<http://www.csve.cz/cz/clanky/system-nataceni-strojovny/330>

Obr. 2.17 Skružené prstence – převzato:

<http://www.csve.cz/cz/clanky/ocelovy-tubusovy-stozar/229>

Obr. 2.18 VTE s příhradovým stožárem – převzato:

<http://www.csve.cz/cz/clanky/prihradovy-stozar-vetrne-elektrarny/228>

Obr. 2.19 Sestavování betonového stožáru VTE – převzato:

<http://www.csve.cz/cz/clanky/prefabrikovany-betonovy-stozar-vetrne-elektrarny/227>

Obr. 3.1 Srovnání výkupních cen elektrické energie z obnovitelných zdrojů v ČR v Kč/kWh – převzato:

<http://www.csve.cz/clanky/graf-vyvoje-vykupnich-cen/278>

Obr. 3.2 Stav větrných elektráren k 1.10.2014 – převzato:

<http://www.eru.cz/clanky/stav-vetrnych-elektraren/194>

Obr. 3.4 Poměr větrných elektráren podle instalovaného výkonu na výrobce v ČR – převzato:

<http://www.csve.cz/clanky/grafy/280>

Obr. 3.5 Schéma VTE s převodovkou a asynchronním generátorem – převzato:

<http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-s-prevodovkou-a-asynchronnim-generatorem/332>

Obr. 3.6 Schéma VTE bez převodovky s multipólovým synchronním generátorem – převzato:
<http://www.csve.cz/cz/clanky/strojovna-vetrne-elektrarny-bez-prevodovky-s-multipolovym-synchronnim-generatorem>

Obr. 4.1 Výkon a pracovní otáčky generátoru pro různé rychlosti větru – převzato:
www.ueen.feec.vutbr.cz/~mastny/vyuka/mmze/prednasky/04_pr.pps

Obr. 4.2 Obr. 4.2 Výkonové křivky jednotlivých produktových řad firmy WinWinD –
převzato:
<http://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/SMG-4500/2012/winwind3.pdf>

Obr. 4.4 Výkonová křivka Enercon E-82 – převzato:
http://www.enercon.de/p/downloads/ENERCON_PU_en.pdf

Obr 4.5 Výkonové křivky jednotlivých produktových řad firmy Wikov Wind – převzato:
<http://www.wikov.cz/cs/vetrne-a-prilivove-elektrarny>

Obr 4.6 Výkonové křivky větrného soustrojí Vestas V90 – převzato:
http://www.vestas.com/files%2Ffiler%2Fen%2Fbrochures%2Fproductbrochurev901_8_2_0_uk.pdf

Obr. 4.7 Výkonová křivka Repower MM92 – převzato:
http://www.spininvest.cz/files/PP_Veznice_2013_CZ.pdf

Obr. 4.8 Výkonová křivka Enercon E-48 – převzato:
http://www.enercon.de/p/downloads/ENERCON_PU_en.pdf

Obr 5.1 Připojení větrné farmy k DS 110 kV, přenos přes 2 transformátory – převzato:
<http://file.scirp.org/Html/12-6201410%5C5af5bfc0-73bb-45aa-84f6-fc06ad2972b3.jpg>

Obr 5.2 Připojení větrné farmy k DS přenos přes 1 transformátor - převzato:
<http://electrical-engineering-portal.com/wp-content/uploads/connection-high-voltage-grid-wind-power-plant-onshore.gif>