

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Regionální park větrných elektráren

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

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

Jméno a příjmení: **Bc. Marek HAJNÝ**
Osobní číslo: **E14N0119P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Regionální park větrných elektráren**
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 :

Provedte komplexní návrh farmy větrných elektráren.

1. Popište základní technický princip funkce větrných elektráren, dispoziční požadavky parku větrných elektráren a požadavky na integraci do distribuční soustavy.
2. Specifikujte technickou realizaci typového regionálního větrného parku vhodného pro poměry České republiky.
3. Vytvořte ekonomický model financování výstavby regionálního větrného parku se zapojením drobných investorů.
4. Navrhněte marketinkový projekt zajištění vstupu drobných investorů do financování výstavby větrného parku.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Podle doporučení konzultanta práce.

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 19. května 2017

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



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

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Tato diplomová práce se zaměřuje na návrh parku větrných elektráren. Úvod práce se zabývá principem fungování větrné elektrárny a technické specifikace jednotlivých částí větrné elektrárny. Dále je práce zaměřena na samotný návrh větrného parku, který zahrnuje vše od návrhu vhodné lokality až po výběr typu větrné turbíny. Závěr práce se zabývá myšlenkou vstupu drobných investorů do financování větrných elektráren a tím zlepšení pohledu obyvatel na stavbu větrných elektráren.

Klíčová slova

Větrná elektrárna, větrný park, drobný investoři, výkon, návrh

Abstract

The presented thesis is focused on design of wind power plant park. The introduction of the thesis deals with the principle of operation of the wind power plant and the technical specification of individual part of the wind power plant. Further work is focused on the design of the wind park, which includes everything from the design of a suitable site to select the type of wind turbine. The last part of thesis is focused on an idea of small investors entering into the financing of wind power plant and improving the view of residents on the construction of wind power plant.

Keywords

Wind power plant, wind park, small investors, power, design

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 18.5.2017

Bc. Marek Hajný

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Karlu Noháčovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat konzultantovi z firmy Orgrez a.s. Ing. Richardovi Habrychovi, Ph.D za cenné materiály pro tvorbu mé diplomové práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	11
1.1 HISTORIE.....	11
1.2 PRINCIP VZNIKU VĚTRU.....	13
1.3 HLAVNÍ ČÁSTI VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY.....	17
1.3.1 Druhy turbín.....	17
1.3.2 Rotor.....	18
1.3.3 Gondola.....	20
1.3.4 Převodovka.....	20
1.3.5 Generátor.....	21
1.3.6 Natáčení strojovny.....	23
1.3.7 Stožár.....	24
1.3.8 Betonové základy.....	26
1.4 ŘÍZENÍ ČINNÉHO VÝKONU.....	26
1.4.1 Strategie řízení činného výkonu.....	28
1.4.2 Přímé řízení.....	30
1.4.3 Odpovědnost za výchylku.....	31
1.4.4 Nepřímé řízení.....	31
1.4.5 Virtuální elektrárna.....	34
2 NÁVRH VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	35
2.1 VÝBĚR LOKALITY.....	35
2.2 PŘIPOJENÍ K ROZVODNÉ SÍTI.....	38
2.2.1 Napětové změny.....	38
2.2.2 Flicker.....	39
2.2.3 Útlum signálu HDO.....	39
2.2.4 Vyšší harmonické.....	40
2.3 NÁVRH TYPU VĚTRNÉHO PARKU.....	41
2.3.1 Enercon E-101.....	42
2.3.2 Enercon E-82 E2.....	50
2.4 EKONOMICKÁ NÁVRATNOST.....	55
2.4.1 Náklady.....	55
2.4.2 Zisk.....	56
3 VSTUP DROBNÝCH INVESTORŮ DO FINANCOVÁNÍ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	57
3.1 POTENCIÁLNÍ PROBLÉMY S VÝSTAVBOU VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY.....	57
3.2 MOŽNÉ BENEFITY PRO OBCE DÍKY REALIZACI VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY.....	58
3.3 METODIKA ZAPOJENÍ DROBNÝCH INVESTORŮ.....	60
3.3.1 Postup výstavby.....	60
3.3.2 Příkladová případová studie rozdělení investic.....	60
3.3.3 Zřejmé výhody.....	61
ZÁVĚR	62
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	63

Úvod

Diplomová práce se zaměřuje na problematiku výstavby parků větrných elektráren v České republice. Zaměřuje se jak na technickou problematiku výstavby větrných parků, tak i na problematiku nesouhlasu občanů obcí, v jejichž blízkosti by se měla větrný park stavět.

V první kapitole bude popsána historie větrných elektráren, která sahá až do Mezopotámie. Následovat bude popis principu vzniku větru. V další části první kapitoly detailně popíší všechny části, ze kterých se větrná elektrárna skládá od turbíny až po betonové základy. Kapitulu uzavřu popisem metod, které se využívají při regulaci činného výkonu větrné elektrárny.

Ve druhé kapitole se budu zabývat vlastním návrhem větrného parku. Návrh bude obsahovat výběr vhodné lokality s ohledem na rychlost větru a také možnosti připojení k rozvodné síti. Dále budou popsány podmínky, které je nutné splnit pro úspěšné připojení k rozvodné síti. Následně budou popsány dvě varianty větrných motorů od firmy Enercon a jejich porovnání roční využitelnosti a celkové vyrobené energie.

Ve třetí a poslední kapitole se zaměřím na možnost vstupu drobných investorů do financování větrných elektráren. Budou popsány možnosti jak motivovat občany obcí, u kterých se větrné elektrárny budou stavět. Krátce bude popsán i modelový příklad zapojení občanů obcí do financování větrných elektráren.

Seznam symbolů a zkratek

P	.....	Výkon
S	.....	Plocha rotoru
r	.....	Poloměr rotoru
C_p	.....	Výkonový součinitel
v	.....	Rychlost větru
ρ	.....	Hustota vzduchu
E	.....	Energie
m	.....	Hmotnost
A	.....	Plocha
s	.....	Dráha
P_v	.....	Výkon větru
HDO	.....	Hromadné dálkové ovládání
OZE	.....	Obnovitelné zdroje energie
VVN	.....	Velmi vysoké napětí
P_{it}	.....	Flikr
c	.....	Činitel flikru
U_f	.....	Náběhové napětí
$i_{vpř}$	.....	Vztažné proudy
S	.....	Zdánlivý výkon
v_{ave}	.....	Průměrné rychlosti
v_{ref}	.....	Maximální rychlosti
t	.....	Čas
N_0	.....	Počet hodin v roce
f	.....	Četnost rychlosti větru
a	.....	Bezrozměrný součinitel určující polohu maxima
b	.....	Bezrozměrný tvarový součinitel
k_r	.....	Koeficient ročního využití výkonu
P_{inst}	.....	Instalovaný výkon větrné elektrárny

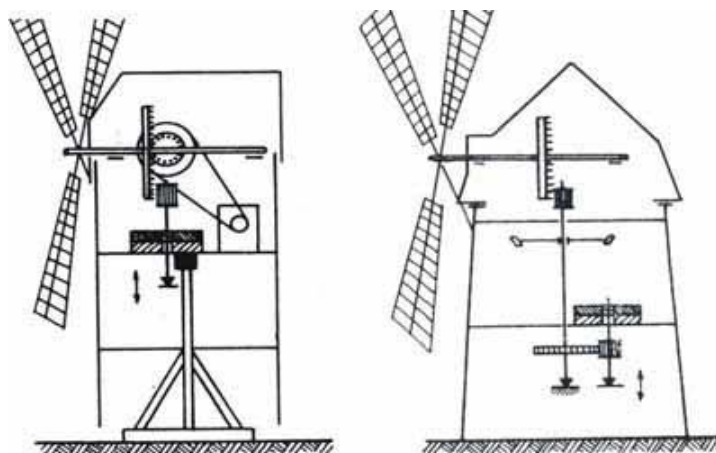
1 Větrné elektrárny

Elektrická energie získávána pomocí větru je s rostoucím tlakem na snižování emisí a zvyšování podílu obnovitelných zdrojů při výrobě elektrické energie čím dál více aktuální. Stavbě větrných elektráren napomáhá fakt, že dopady na životní prostředí jsou oproti elektrárnám využívající fosilních paliv minimální. Naproti tomu vlastností, která brzdí jejich masivní využití, je nestálost dodávky elektrické energie a v neposlední řadě také odpor občanů obcí, v jejichž blízkosti by větrné elektrárny měly stát.

1.1 Historie

První zmínky o využití větrné energie se datují až do doby několika tisíc let před naším letopočtem a to z oblasti Mezopotamie. V Evropě se větrná energie začala využívat až kolem 13. století. Nejvíce začalo využívat větrné motory Holandsko, které je využívalo nejenom za účelem odvodnění mokřin, ale také k mletí obilí, papíru, výrobě oleje a pohonu pil. V 19. století mělo Holandsko už více než 9000 větrných motorů, které většinou dosahovaly výkonu pohybujícím se okolo desítek kW [1].

V České republice můžeme stále nalézt několik starých větrných mlýnů nebo jejich pozůstatky. Z velké části jde o dva typy větrných mlýnů. Prvním typem větrného mlýnu je německý, který je specifický tím, že celý mlýn leží na středovém sloupu, okolo kterého lze mlýn natáčet tak, aby perutě byly vždy natočeny proti větru. Druhým typem je holandský větrný mlýn, který má kruhové zděný tvar a natáčet proti větru lze jenom střechou s perutěmi [2].



Obr 1.1: Německý a holandský typ větrného mlýnu, převzato z [2]

Vlivem rozšíření parních strojů, spalovacích motorů a fakt, že ceny kapalinných paliv byli velmi nízké, přestaly být větrné motory výhodné. Přesto se ve světě dále pokračovalo ve vývoji různých větrných motorů. Příkladem může být Německo, kde v letech 1957 až 1968 byl provozován větrný motor Hütter-Algaier o výkonu 100kW, jehož rotorové listy byly vyrobeny ze skelného laminátu, díky čemuž byla celá konstrukce velmi lehká [1].

Změna názoru na využívání větrných motorů nastala v 70. letech, kdy prudce vzrostla cena ropy a lidé si začali více uvědomovat potřebu chránit životní prostředí a v neposlední řadě i omezenost zdrojů fosilních paliv. O stavbu nových větrných elektráren projeví největší zájem země, které mají nejvhodnější podmínky pro stavbu nových větrných elektráren, jako jsou silný průmysl a příznivé větrné podmínky. Mezi takové země můžeme řadit například Dánsko, Holandsko, Velká Británie, Francie, Německo, Kanada a USA. Právě Spojené státy americké ještě v 70. letech stihly instalovat okolo 6000 větrných motorů s průměrným výkonem 100 kW [1].

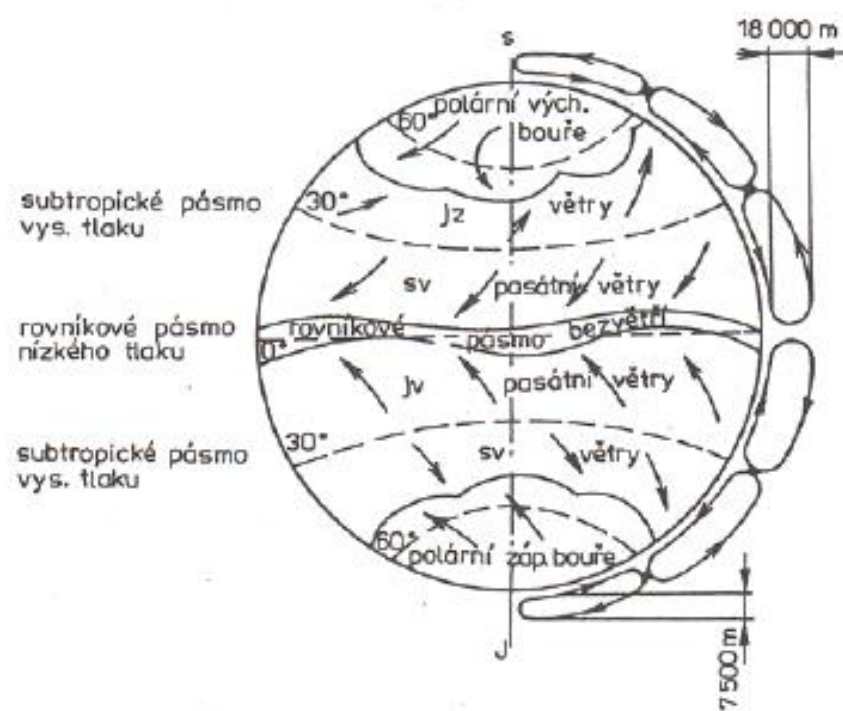
Jedním z největších skoků při vývoji větrných elektráren je stavba na tu dobu neuvěřitelně vysoké a výkonné větrné elektrárny. Byla postavena v obci Tvinde v Dánsku v letech 1975 až 1977 pomocí studentů a učitelů tamní školy. Se svojí výškou 53 metrů a délkou lopatek 27 metrů se jednalo o největší větrnou elektrárnu na světě. Původně instalovaný výkon 2 MW musel být kvůli místní síti omezen na 960 kW, ze kterého je polovina výkonu využívána pro potřeby školy [3].



Obr 1.2: Větrná elektrárna v Dánsku [3]

1.2 Princip vzniku větru

Vítr je důsledkem rozdílů atmosférických tlaků, které jsou způsobeny různými teplotami. Suché povrchy se v porovnání s mokřými povrchy rychleji ohřívají, to má za důsledek, že teplota vrstvy vzduchu nad povrchy není vždy stejná a dochází k tomu, že teplejší vzduch stoupá vzhůru, jelikož je lehčí než studenější vzduch. Rozdílem teplot vzduchu vznikají teplotní níže a výše. Při jejich vyrovnávání vzniká vítr od tlakové výše k tlakové níži, který se pohybuje spirálově díky rotaci země. Právě rotací země působí na vzduchovou vrstvu další síly, které ovlivňují výslednou rychlost a směr proudění. Na zeměkouli můžeme označit dvě pásma vysokého tlaku, která leží mezi 30° a 40° severní a jižní šířky a pásmo nízkého tlaku, které se nachází u rovníku. Z míst vysokého tlaku proudí vzduch k rovníku a k pólům. Vlivem tvaru země, se obvodová rychlost povrchu mění a to má za následek, že vzduchová vrstva se zpožďuje nebo předbíhá otáčející se zemský povrch.



Obr 1.3: Schéma směru větrů na zeměkouli [1]

Jelikož je vítr jeden ze zdrojů obnovitelné energie, snažíme se jeho energii využít co možná nejefektivněji. Při výpočtu výkonu větru se vychází z elementárního vztahu

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

kde v charakterizuje rychlost větru a za m můžeme dosadit objem a hustotu vzduchu

$$m = \rho \cdot V. \quad (1.2)$$

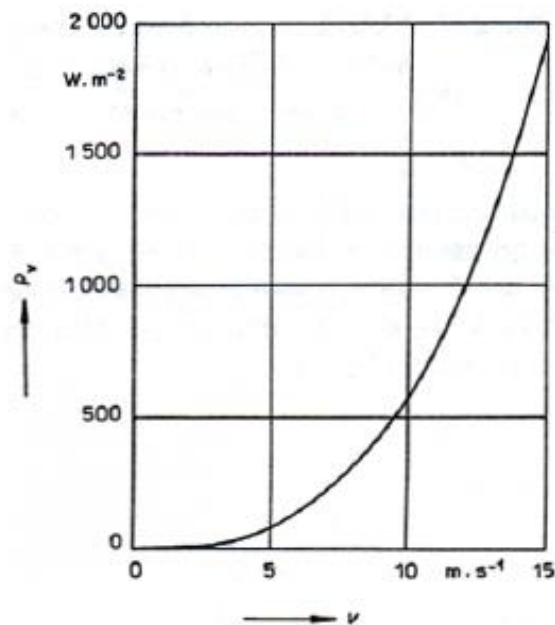
Po dosazení plochy A a dráhy s za objem V dostaneme vztah

$$Pv = \frac{E}{At} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{As}{At} \cdot v^2, \quad (1.3)$$

ze kterého po dosazení za $s/t = v$ dostaneme finální vzorec

$$Pv = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3. \quad (1.4)$$

Z tohoto vzorce vyplývá, že výkon větru je závislý na hustotě větru a třetí mocnině jeho rychlosti. Právě závislost výkonu větru na jeho rychlosti je lépe patrné na obr 1.4 [4].



Obr 1.4: Závislost Pv na rychlosti větru [1]

Rovnici 1.4 dále využijeme při výpočtu činného výkonu větrné elektrárny. Jelikož rovnice výkonu větru je vztažena pouze na 1 m^2 , musíme do rovnice pro činný výkon větrné elektrárny zahrnout i plochu, která opisuje konce listů rotoru a v neposlední řadě i účinnost větrného motoru [4].

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

kde P – výkon větrné elektrárny [W]

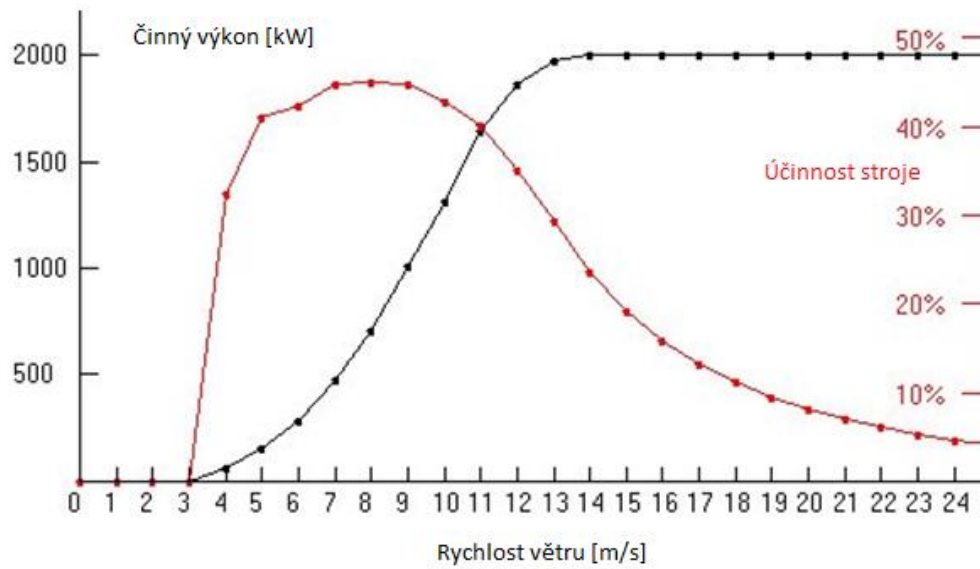
ρ – hustota vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

v – rychlost větru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

c_p – účinnost větrného motoru [-]

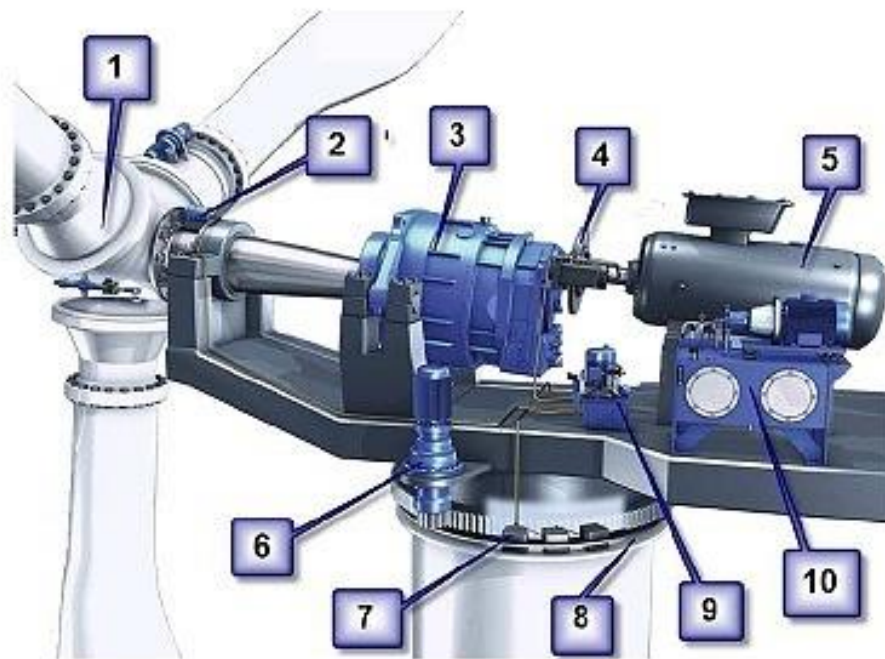
S – plocha rotoru [m^2]

Jak je patrné z rovnice 1.5 a obrázku 1.4, výkon větrné elektrárny bude s rostoucí rychlostí větru silně stoupat, naopak s malými rychlostmi větru její výkon půjde strmě dolů. Na obrázku 1.5 ale můžeme vidět, že v důsledku změny účinnosti větrné elektrárny v závislosti na rychlostech větru, kdy nejvyšší účinnost nastává při rychlostech větru pohybující se v blízkosti 9 m/s, jsou vysoké rychlosti větru pro větrnou elektrárnu nevyhovující. Nejvýhodnější je provozovat větrnou elektrárnu při rychlosti větru pohybující se v rozmezí 9-13 m/s, jelikož výkon elektrárny se blíží svému maximu, přičemž účinnost je stále dostatečně vysoká. Z důvodu nehospodárnosti provozu a z důvodu bezpečnosti se při rychlostech větru přesahujících 25 m/s větrná elektrárna odpojuje od sítě a zastavuje. Při rychlostech větru do 3 m/s mají větrné elektrárny tak mizivý výkon a účinnost, že se nevyužívají [2].



Obr 1.5: Účinnost a výkon větrné elektrárny

1.3 Hlavní části větrné elektrárny



Obr1.6: Hlavní části větrné elektrárny [6]

- | | |
|---|---|
| 1 – rotor | 7 – brzda otočného mechanismu |
| 2 – brzda rotoru | 8 – ložisko |
| 3 – převodové ústrojí | 9 – hydraulický agregát brzd |
| 4 – spojka a brzda generátorového hřídele | 10 – hydraulický agregát pro ovládání natočení lopatek rotoru |
| 5 – generátor | |
| 6 – servo motor pro otáčení turbíny | |

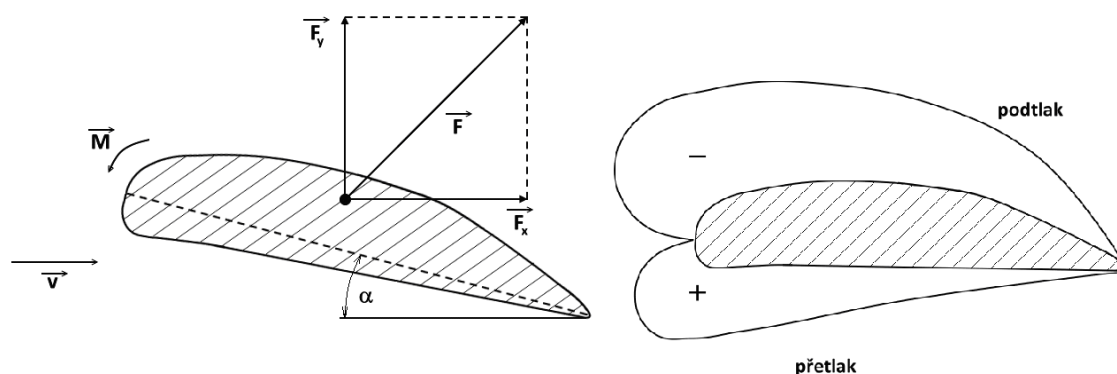
1.3.1 Druhy turbín

Turbíny dělíme na dva základní typy, podle principu, na kterém pracují. Jsou to turbíny odporové a vztlakové.

Odporové turbíny jsou jednodušší a z historického hlediska i starší. Jejich výhodou je fakt, že se dají využívat už od 2 m/s. V porovnání se vztlakovými mají ale menší účinnost (15-23 %), a proto je jejich využití v dnešní době minimální. Tyto turbíny pracují na principu různého odporu vůči proudícímu vzduchu, který může být docílen dvěma způsoby. Prvním způsobem je odporu docíleno odlišným tvarem lopatek, kdy se využívá rozdílný součinitel odporu zakřivených ploch při obtékání větrem. Jako příklad můžeme použít anemometr, který se skládá z polokulových lopatek. Ten využívá Robinsonův jev, jelikož proud vzduchu, který směřuje do dutiny lopatky, je kladen 3,5 krát větší odpor než vzduchu, který dopadá na vypuklou část polokoule. Druhý způsob, jak vytvořit odporovou

turbínu, spočívá v natáčení lopatek. Lopatky jsou natáčeny podle pozice rotoru a směru proudění větru. Toto řešení je sice v porovnání s prvním komplikovanější, zato dosahuje větších účinností [1].

Vztlakové turbíny mají jako hlavní část list nebo lopatky, které mohou být považovány za rotující křídlo. Nejčastěji jsou využívány jako dvoulisté nebo třílisté, zřídka se můžeme setkat i s provedením jednolistým s protizávažím. Tyto druhy turbín využívají aerodynamických vztlakových sil, které vznikají při obtékání vzduchu okolo rotorových listů. Tato síla je zapříčiněna profilem lopatek, které jsou speciálně tvarované a připomínají křídla u letadel [1].



Obr 1.7: Princip vztlakové turbíny [4]

1.3.2 Rotor

Rotor větrné elektrárny je složen z několika částí. Na náboji, který je spojen s gondolou, jsou připevněny rotorové listy (nejčastěji 3) pomocí šroubů a laminátu. Jelikož na listy jsou kladeny velké nároky co se odolnosti týče, jsou vyráběny z kompozitních materiálů. Pouze vnitřní nosník sloužící pro přenos hlavního zatížení, je složen z uhlíkových nebo kevlarových vláken.

Velikost rotorového listu volíme podle průměrné rychlosti větru v dané lokalitě a požadovaného výkonu větrné elektrárny. Výpočet velikosti rotorového listu vychází z rovnice 1.5, ze které po úpravě dostaneme finální vzorec:

$$r = \sqrt{\frac{2 \cdot P}{\rho \cdot V^3 \cdot c_p \cdot \pi}} \quad (1.6)$$

V lokalitách, kde jsou listy rotoru vystaveny tuhé zimě a vlhkému vzduchu, by docházelo k častým námrazám a s tím spojenému odstavení větrných elektráren kvůli bezpečnosti okolí. Aby k tomuto nedocházelo a mohly být větrné elektrárny budovány i v takovýchto lokalitách, jsou listy rotoru vybaveny systémem vyhřívání, které je zajištěno pomocí ventilátoru s topným tělesem. Teplý vzduch se fouká na náběžnou hranu, ze které pokračuje na vrchol listu, kde se proudění obrátí a vrací se zpět po odtokové straně listu k ventilátoru [7].

Jak již bylo zmíněno výše, vztlkové turbíny pracují na principu rozdílu tlaků, kdy nad listem rotoru je podtlak a pod listem přetlak. Tento fakt sebou přináší i negativní vlivy na list rotoru. Jelikož na konci listu se tlaky vyrovnávají směrem ze spodní hrany na horní a v důsledku pohybu listu, vzniká na konci vír, který nazýváme okrajový vír a má za následek indukovaný odpor. To zapříčiňuje zvýšení celkového odporu listu a je jednou z největších složek hluku, který listy vytvářejí. Jelikož je kladen velký důraz na co možná nejnižší provoz, jelikož jsou větrné parky často stavěny v blízkosti obcí, jsou konce listů upravovány tak, aby byli zaoblené nebo do špičky. V posledních letech se začalo využívat i tzv. wingletů, které se jako první začaly používat u letadel [7].



Obr 1.8: Rotorový list zakončený wingletem [7]

1.3.3 Gondola

V gondole se nachází hlavní část větrné elektrárny – strojovna. Gondola je vždy vyrobená ze sklolaminátu a její vybavení se liší podle typu výrobce. Nejčastěji zde můžeme nalézt hřídel, která spojuje rotor s převodovkou. Hřídel je vybavena brzdou pro případ nutnosti zastavení rotoru. Převodovka zvyšuje otáčky pro generátor, který se nejčastěji používá buď synchronní nebo asynchronní. Ve strojovně dále můžeme nalézt servomotory, které slouží pro natáčení gondoly a příslušenství pro hydraulické ovládání zařízení, jako jsou brzda, aretace natáčení gondoly a natáčení lopatek [7].

1.3.4 Převodovka

Převodové ústrojí větrných elektráren se liší podle typu větrné elektrárny. Jedná se o velmi namáhanou část ať už kolísavým zatížením od rotoru nebo rázy, které způsobují větrné porывy. Z tohoto důvodu musí být převodovky navrhovány s vysokým koeficientem bezpečnosti. Jako hlavní kritéria pro převodovku do větrných elektráren bývají minimální hlučnost a rozsah teplot, při které bude pracovat v rozmezí minimálně -40°C až $+45^{\circ}\text{C}$.

U výkonů do 50 kW se pracovní otáčky rotoru pohybují v rozmezí 40 – 80 ot/min. V závislosti na použitém generátoru bývá u těchto výkonů převodový poměr v rozmezí 1:12 – 1:25. Nejčastěji je převodovka používána s čelním převodem se šikmými zuby. Můžeme se setkat i s převodovkami planetovými, ale jenom v minimální míře, jelikož má tento typ problémy s přílišným zahříváním a jejím chlazením. Jelikož jde o elektrárny malých výkonů, nepoužívá se cirkulace vzduchu ve strojovně z důvodu přílišné energické náročnosti v porovnání s instalovaným výkonem.

U výkonů nad 500 kW klesají otáčky až na rozmezí 5 -20 ot/min. U těchto výkonů se používají generátory pracující při pracovních otáčkách 1000, 2000 nebo 3000 ot/min. Z toho důvodu musí převodové poměry dosahovat až na hodnoty v rozmezí 1:70 – 1:200. Pro takto vysoké výkony, daném převodovém poměru a zachování kompaktních poměrů je využívána několikastupňová planetová převodovka nebo kombinace, kdy první stupně jsou planetové a poslední koaxiální [7].

1.3.5 Generátor

Větrné elektrárny v současné době využívají jednu ze čtyř druhů koncepcí. První koncepce využívá kombinaci převodovky s asynchronním generátorem s kotvou nakrátko nebo vinutým rotorem. Druhou koncepcí je synchronní generátor s přímým připojením na síť tentokrát ovšem s převodovkou s variátorem. Další koncepce pracuje bez využití převodovky, přičemž synchronní generátor pracuje pouze ve spojení s frekvenčním měničem. Tyto tři koncepce jsou doposud nejvíce využívané. Poslední koncepci využívající mnohapolové generátory, můžeme vidat u větrných elektráren pouze sporadicky [7].

1.3.5.1 Asynchronní generátor s převodovkou

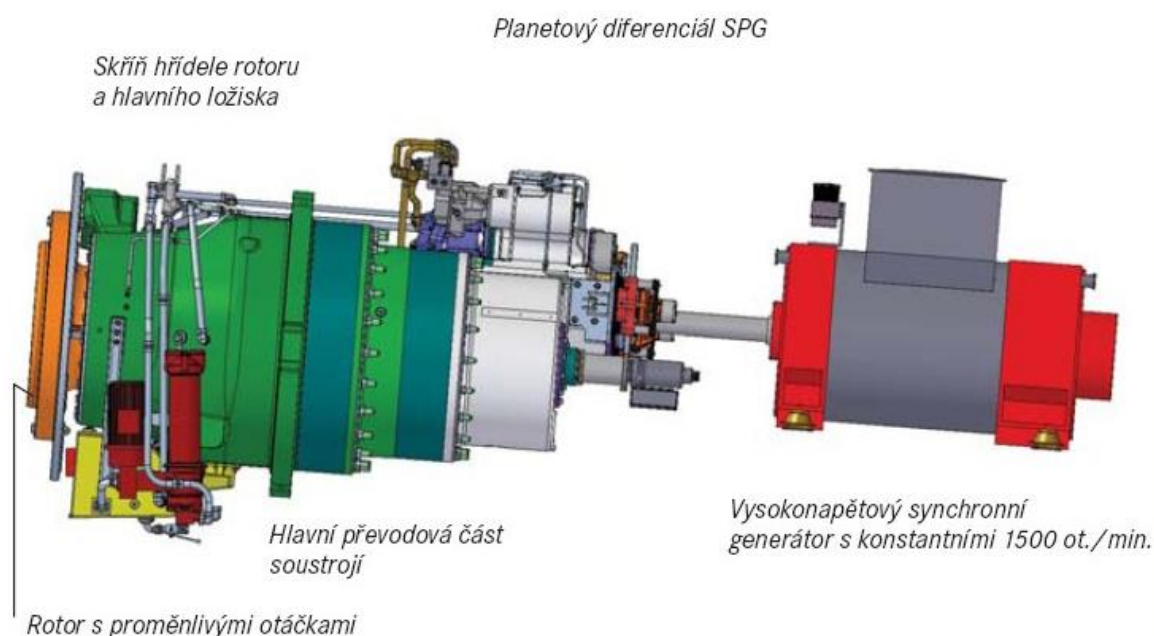
U tohoto zapojení větrných elektráren používáme dva druhy rotorů - s kotvou nakrátko a s kotvou kroužkovou. Uspořádání s kotvou nakrátko se nejvíce využívá u větrných elektráren, které nepřesahují výkon 300 kW. Jeden z důvodů upřednostňování asynchronního generátoru s kotvou nakrátko je jednodušší řídicí systém a možnost absence synchronizačního zařízení pro připojení do elektrické soustavy. Jednou z nevýhod použití asynchronních generátorů je nutnost magnetizačního proudu a jemu odpovídající jalový výkon, který je odebírán ze sítě a zhoršuje účinnost sítě. Proti tomu se bojuje pomocí kondenzátorů, které jsou připojeny paralelně v několika stupních. Tyto stupně jsou spínané automaticky v závislosti na zatížení tak, aby hodnota účinnosti neklesla pod 0,95. Další ochranou asynchronních motorů jsou tyristorové spouštěče, které omezují proudové nárazy na hodnotu menší než dvojnásobek jmenovitého proudu.

Při realizaci větrných elektráren vysokých výkonů je upřednostňován asynchronní motor s kroužkovou kotvou. Tohoto typu generátoru také nejvíce využívá největší výrobce větrných elektráren, Dánská firma Vestas. Její největší předností je snazší regulace. Pokud systém pracuje v kaskádě, je rotor generátoru pomocí kroužků napájen frekvenčním měničem a stator je připojen přímo do elektrické soustavy pomocí NN/VN transformátoru. Pro omezení proudových rázů a jejich negativních účinků, je využíváno přepínání zapojení generátoru Y-D. Aby větrná elektrárna byla provozována při optimálním výkonu při všech rychlostech větru, zařazuje se mezi asynchronní generátor a síť elektrický měnič kmitočtu, který plynule mění pracovní otáčky [1,7].

1.3.5.2 Synchronní generátor s převodovkou a variátorem

Tento typ uspořádání strojovny využívá česká firma Wikov a měl by teoreticky dosahovat nejvyšší účinnosti ze všech zde prezentovaných řešení, jelikož využívá převodovku s variátorem, která se odborně nazývá SPG převodovka. Největší předností tohoto uspořádání je stálost otáček synchronního generátoru a s tím spojené možnosti přímého připojení do rozvodné sítě. Stálost otáček synchronního generátoru zajišťuje SPG převodovka, která i přes proměnlivé otáčky rotoru udržuje výstupní otáčky konstantní.

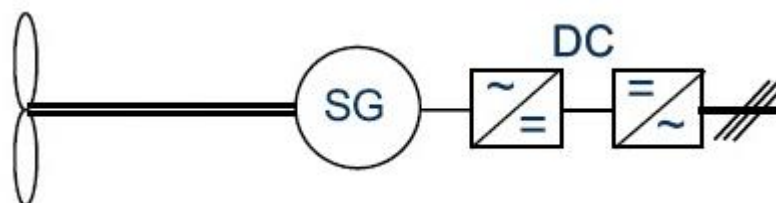
Převodovka SPG (super positron gear) pracuje na principu proměnlivého převodového poměru, který je zajištěn vysoce sensitivním hydraulickým regulačním systémem. Při zvýšení rychlosti větru dojde k nárůstu krouticího momentu rotoru. Na to zareaguje SPG převodovka snížením převodového poměru, což zapříčiní možnost zvýšení rychlosti otáčení rotoru. Pomocí této změny převodového poměru lze kompenzovat náhlé změny rychlosti větrné energie a zajišťuje nám to ochranu pohonného soustrojí před příliš vysokým krouticím momentem, který by mohl mít destruktivní účinky na větrnou elektrárnu [1,7].



Obr 1.9: Pohonné soustrojí W2000 s převodovkou SPG [7]

1.3.5.3 Synchronní generátor bez převodovky

Koncept synchronního generátoru bez převodovky používá německá firma Enercon, která tento typ uspořádání využívá již od svého založení. Tím, že v tomto konceptu je vynechána převodovka, jsme dosáhli toho, že klesly jak zvukové emise, tak hmotnost a v neposlední řadě se snížily také ztráty, které vznikají na převodovce. Synchronní generátor je v tomto případě sestaven ze dvou prstenců, jeden mnohopólový je umístěn na rotoru generátoru a druhý na statoru. S rostoucí silou větru a v závislosti na to se zvyšujícím se krouticím momentem jsou zapojovány jednotlivé pólové dvojice. Jelikož výstupní napětí a frekvence synchronního generátoru se mění v závislosti na rychlosti větru, je třeba výstupní veličiny upravit pro elektrickou soustavu. Tuto úpravu zajišťují usměrňovače a střídače umístěné za synchronním generátorem [1,7].



Obr 1.10: Připojení větrné elektrárny bez převodovky[7]

1.3.6 Natáčení strojovny

Jelikož větrná elektrárna musí využívat sílu větru ze všech stran, je její součástí systém natáčení strojovny, který pomocí elektropohonu natočí strojovnu tak, aby byl rotor vždy proti směru větru. Strojovna leží na otočném ložisku, kde jedna klec tohoto ložiska je napevno umístěna na stožáru a druhá klec je umístěna na strojovně. Jak na straně strojovny, tak na straně stožáru je vytvořeno ozubení, které do sebe zapadá. Řídící systém větrné elektrárny vyhodnotí data získaná z ultrazvukového anemometru a vyšle podle potřeby povel elektropohonům, které jsou umístěny po obvodu ozubeného kola na straně strojovny. Počet elektropohonů je závislý na velikosti větrné elektrárny. Výkony těchto elektropohonů se pohybují mezi 2 – 2,5 kW a jsou složeny z elektromotoru, planetové převodovky a pastorku. Ve strojovně se využívají i čelistové brzdy, které po natočení strojovny zaaretují danou polohu [7].

1.3.7 Stožár

V dnešní době se nejvíce využívají stožáry, jejichž výška se pohybuje od 40 do 100 metrů. U stožárů nepřesahujících 100 metrů jsou v Evropě upřednostňovány ocelové tubusové stožáry, které se skládají ze segmentů, které lze snadněji dopravit na místo stavby. Při stavbě větrné elektrárny, při které výška stožáru přesahuje 100 metrů, se již vyplatí uvažovat o příhradovém stožáru, který potřebuje menší množství oceli než tubusový stožár a jeho přeprava na stavbu je též snadnější. Posledním typem používaných stožárů je stožár betonový. O tomto typu stožáru se uvažuje na stavbách, kde se staví větší množství větrných elektráren a to z důvodu ekonomické zajímavosti pro daný region [7].

1.3.7.1 Ocelový tubusový stožár

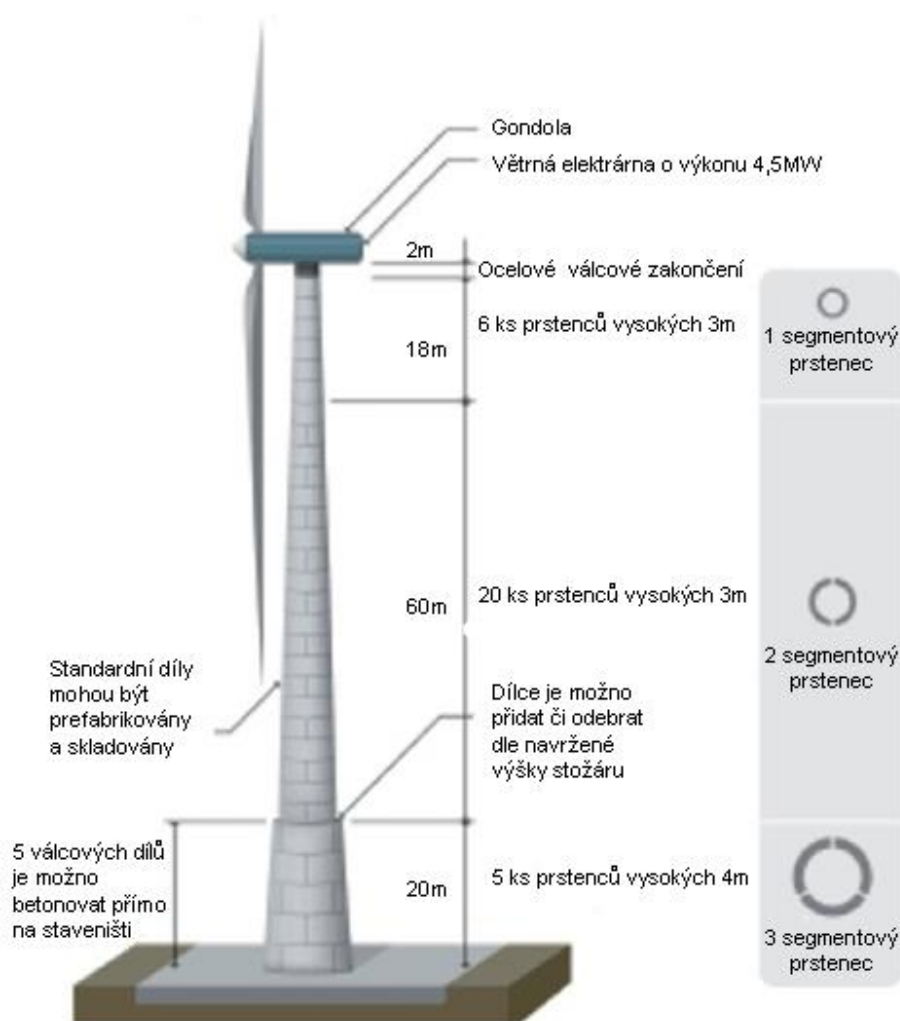
Jelikož výška stožárů se může blížit až 100 metrům a bylo by nemožné takto velký díl dopravit až na stavbu, jsou ocelové tubusové stožáry děleny na segmenty, které jsou vhodnější na přepravu. Každý tento segment je vyroben ze svařené oceli. Tloušťka plechu, v závislosti na poloze segmentu na stožáru, se pohybuje v rozmezí 12 - 45 mm. V závislosti na velikosti stožáru jsou segmenty povrchově upravovány. Pro menší typy stožárů se používá žárový zinek. U větších stožárů již nelze využít žárový zinek z důvodu omezených rozměrů vany pro žárové zinkování, proto se používá pouze nátěr barvou. V České republice vyrábí tento typ stožárů Chrudimská firma SIAG, která dokáže vyrobit až 150 stožárů ročně a zásobuje hlavně střední a jižní Evropu [7].

1.3.7.2 Příhradový stožár

V Evropě se můžeme s tímto typem stožáru setkat pouze výjimečně. Nejvíce rozšířený je tento stožár v Číně a Indii. Oproti ocelovému tubusovému stožáru má příhradový stožár dvě výhody. Jednou z nich je ekonomická výhodnost u stožárů přesahujících 100 metrů a to z toho důvodu, že spotřebované množství materiálu na stavbu stožáru je podstatně menší než u tubusového stožáru. Další výhodou je i přeprava stožáru na stavbu, jelikož se příhradový stožár montuje až na místě z nosníků a vzpěr, které jsou na rozdíl od segmentů tubusových stožárů lehčí a rozměrově příznivější. Za možnou výhodu lze brát i fakt, že z větší dálky více splývá s okolím a snižuje tím zásah do krajiny, který je pro mnoho lidí důvodem, proč větrné elektrárny ve svém okolí nechtějí [7].

1.3.7.3 Betonový stožár

Technologie stožárů vyráběných z prefabrikovaného betonu je poměrně novou technologií, která se rozvíjí hlavně v Evropě. Stožár se skládá z dílců, které jsou k sobě připevněny vnitřní ocelovou výztuží. Rozměry jednotlivých dílců závisí na místě stavby, jelikož jedním z kritérií při volbě velikosti segmentů je snadná přepravitelnost na místo stavby. Jednotlivé prstence mohou být sestaveny z kruhových, polokruhových, čtvercových skořepin. Na místě stavby jsou sestaveny jednotlivé prstence pomocí jeřábu. Provázanost všech prstenců ve svislém spoji zajišťují ocelové výztuže. Stožár se poté staví po sekcích, kdy každá sekce obsahuje 4 prstence. Žádná sekce nesmí přesahovat 12 metrů. Prstence jsou v sekci propojeny předepínacími lany a výsledná sekce se poté jeřábem dopravuje na definitivní polohu. Vrchol stožáru má ocelové zakončení, na kterém je zabudované otočné ložisko gondoly. Celý stožár je na několika místech propojen předepínacími lany. Celý stožár je poté natřen, aby odolal povětrnostním vlivům [7].



Obr 1.11: Předepjatý betonový stožár[7]

1.3.8 Betonové základy

Jednou z velmi důležitých částí větrné elektrárny jsou základy. Jelikož stožár s gondolou a rotorem mohou vážit až několik set tun, musí být základy velmi pevné. Před tím, než se zahájí samotná stavba, musí se provést geologický průzkum, jelikož i ve spodních vrstvách zeminy je důležitá stabilita prostředí. V důsledku toho, jak je větrná elektrárna vysoká stavba a jak má rozloženou svou hmotnost, je velmi citlivá na vychýlení, které by způsobilo nestabilitu celé elektrárny [7].

1.4 Řízení činného výkonu

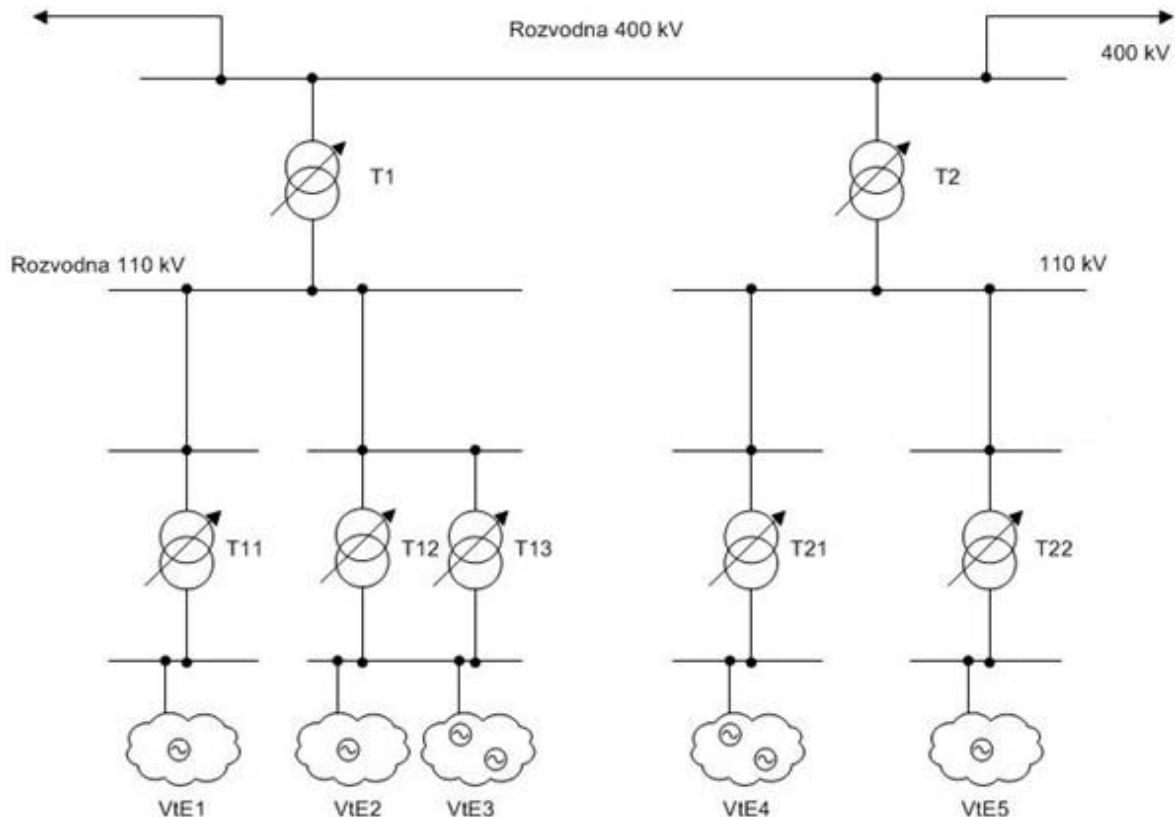
Mezi hlavní parametry kvality při dodávce elektrické energie odběrateli řadíme frekvenci a velikost napětí. Aktuální frekvence je závislá převážně na činném výkonu, přesněji na vyrovnané bilanci činného výkonu v celé propojené soustavě. Naopak napětí je hodnota lokálního charakteru a její velikost je rozdílná v každém uzlu soustavy v závislosti na změně jalového výkonu.

Právě vyrovnaní bilance činného výkonu je aktuálně zásadní problém při provozování propojených soustav. Mezi hlavními důvody zhoršujícího se průběhu frekvence v soustavě je zvýšení počtu výroben se špatně plánovatelnou výrobou elektřiny, rostoucí objem obchodované elektřiny, výpadky velkých bloků a náhodná fluktuace zatížení. Se zhoršujícím se průběhem frekvence roste riziko odpojení velkého počtu výroben frekvenčními ochranami a následný kolaps soustavy z důvodu nevyrovnané bilance činného výkonu. Z tohoto důvodu je hlavním úkolem konstruktérů a projektantů větrných elektráren možnost efektivního řízení činného výkonu při všech stavech soustavy.

Z rovnice činného výkonu (1.5) je patrné, že jediná veličina, kterou můžeme řídit činný výkon větrné elektrárny, je plocha rotoru, přesněji natáčení lopatek rotoru. Natáčení listů rotoru a tím řízení činného výkonu zajišťuje prvek Pitch Controller. Ostatní veličiny není možné dostatečně ovlivňovat. Účinnost stroje je daná konstrukcí a mění se pouze v důsledku stárí, či nedostatečné údržby. Rychlost proudění vzduchu i hustota vzduchu závisí na lokalitě elektrárny a na aktuálních podmínkách.

V dnešní době je preferovaná spíše výstavba velkých větrných parků namísto jednotlivých elektráren. Tyto větrné parky jsou do přenosové soustavy vyvedeny přes dvojí transformaci, například jak je znázorněno na obr 1.12, kde jsou transformace 110kV/400kV a vn/110kV. U takto velkých větrných parků je řízení činného výkonu prováděno centrálně řídicím systémem, který podle nastavených poměrových kritérií rozdělí požadovaný činný výkon na jednotlivé větrné elektrárny. Z teoretického hlediska je možné, aby velké větrné elektrárny udržovaly určitou regulační rezervu činného výkonu, kterou by mohl dispečink využívat jako podpůrnou službu. V praxi se to zatím nevyužívá a tuto rezervu drží fosilní a plynové elektrárny.

U velkých větrných parků může docházet k poklesu větrné energie z důvodu blízkosti jednotlivých elektráren a to ze dvou důvodů. Jednak elektrárna odebírá energii vzdušného proudění, což má za následek, že na elektrárnu za ní proudí vítr s menší průměrnou rychlostí a tím i menší energií. Druhým faktorem, který ovlivňuje blízké elektrárny, jsou turbulence, které elektrárna nedokáže tak efektivně zpracovat a tím snižuje výkon a zvyšuje celkové opotřebení všech komponentů.



Obr 1.12: Schéma velkého větrného parku[]

1.4.1 Strategie řízení činného výkonu

Aby větrná elektrárna efektivně pracovala, je třeba využívat jak technických, tak i obchodních nástrojů. Mezi základní vlastnosti větrných elektráren bezesporu patří proměnnost jejich výroby v řádech několika sekund. Z tohoto důvodu existuje několik strategií řízení, které s proměnností výrob počítají.

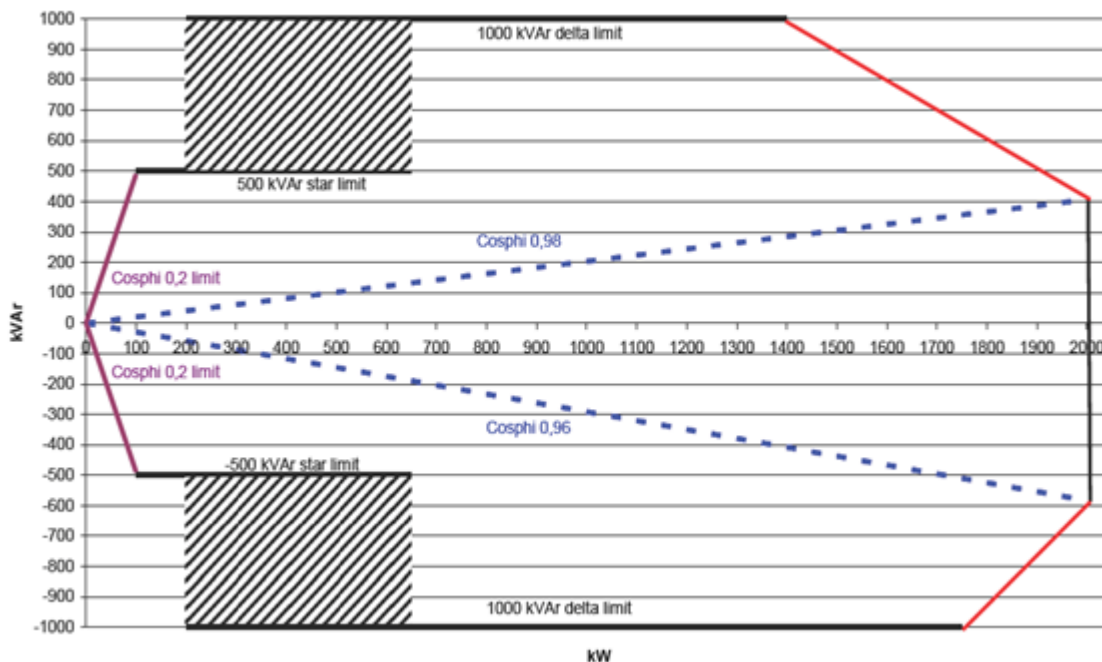
Strategie řízení:

- Stupňovité řízení
- Přímé řízení
- Odpovědnost za odchylku
- Nepřímé řízení
- Virtuální elektrárny

Použití jednotlivých strategií lze porovnávat podle různých kritérií. Mezi tato kritéria patří reálný vliv na běžnou odchylku frekvence v síti, náklady na vybudování, provoz a modernizaci potřebných technických prostředků a v neposlední řadě i praktická využitelnost v konkrétní národní soustavě.

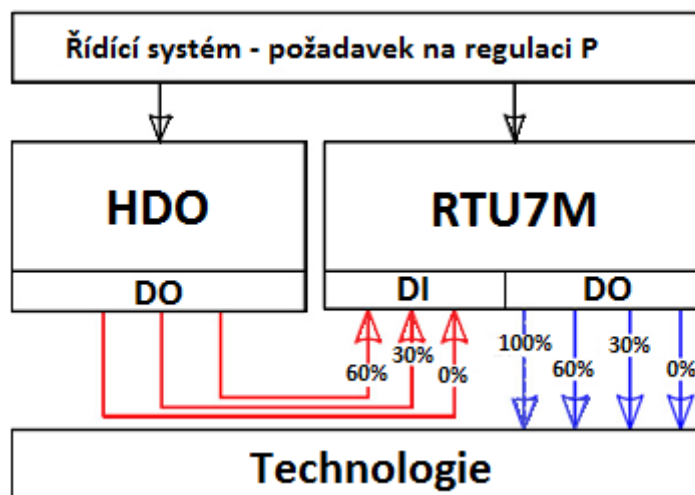
1.4.1.1 Stupňovité řízení

Každá větrná elektrárna má provozní diagram (obr. 1.13), který vyznačuje závislost činného a jalového výkonu. Pomocí tohoto diagramu dokážeme určit, jak se nám změní činný a jalový výkon při regulaci pomocí stupňovitého řízení.



Obr 1.13: Provozní diagram větrné elektrárny[]

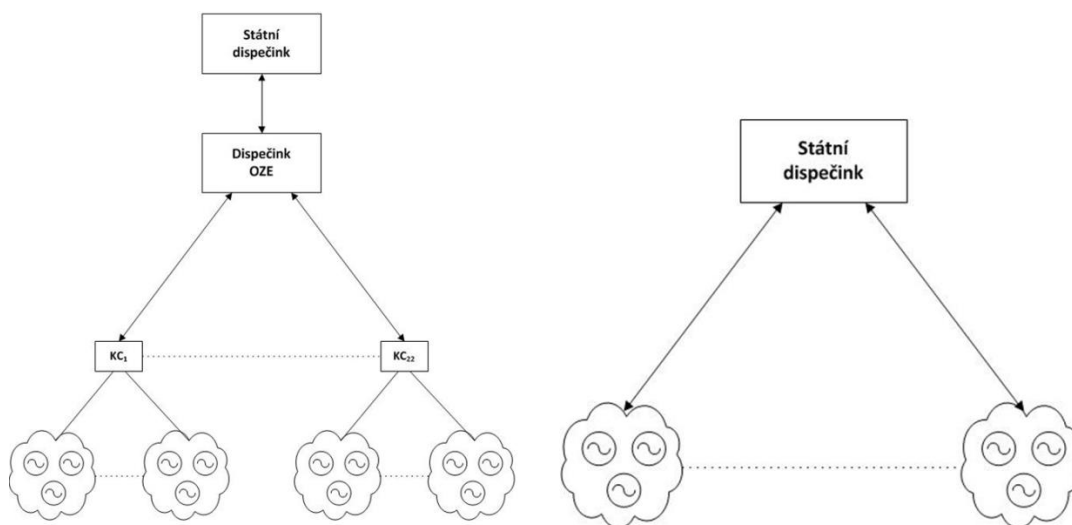
U výkonů od 30 do 100 kW se v české distribuční soustavě využívá pro řízení činného výkonu hromadné dálkové ovládání známé pod zkratkou HDO. Pomocí tohoto zařízení, který se nachází mezi výrobnou a distribuční soustavou, se ovládá relé, které připojuje a odpojuje větrnou elektrárnu od soustavy pro udržení stability provozu soustavy. V případech kdy není k dispozici HDO signál, využívá se pro odpojení větrné elektrárny jednotka RTU. Pokud výkon větrné elektrárny přesahuje 100 kW, musí se HDO přijímač vybavit 3 přepínacími relé, které podle povelu dispečera omezí výkon elektrárny na 0%, 30% nebo 60% jmenovitého výkonu, podle potřeby soustavy (obr. 1.14). Tato varianta řízení činného výkonu větrné elektrárny je výhodná zejména z důvodu snadné technické realizaci, nízkých nákladů na údržbu a minimálního zatížení dispečera soustavy. Při tomto řízení je také eliminováno riziko zvýhodnění některých výrobců. Velká nevýhoda tohoto řešení je v nepřesnosti řízení a také v tom, že dopředu nelze určit, k jak velké změně činného výkonu dojde a proto je vhodná pouze pro nouzové řízení. Další negativní dopad tohoto řešení je neschopnost vyřazení z tohoto výkonového omezování ty větrné elektrárny, které pracují jako automatická regulace napětí v místech s rizikem přepětí nebo podpětí.



Obr 1.14: Stupňovité řízení větrné elektrárny[]

1.4.2 Přímé řízení

Větrné parky pracující na principu přímého řízení jsou řízeny dispečerem nadřazené soustavy, který ze svého uživatelského rozhraní nebo pomocí dispečinku distribuční soustavy nastavuje, jakou maximální hodnotu činného výkonu mohou větrné parky aktuálně vyrábět. Tento model přímého napojení na státní dispečink je využíván například v Rumunsku. Velká výhoda přímého řízení je v omezení výroby pouze na tu hodnotu, která je nutná. Tuto hodnotu lze průběžně upravovat podle požadavků sítě. Mezi výhody také patří možnost selektivního omezení pouze vybraných větrných parků. Tuto výhodu lze z jistého pohledu též brát jako nevýhodu, a to z důvodu subjektivního rozhodování dispečera a tím rizika většího nespravedlivého omezování určitých parků. Tato metoda je nákladnější oproti stupňovitému řízení a je vhodnější v soustavách, kde je dostatek regulačního výkonu z jiných typů zdrojů.



Obr 1.15: Rozdíl Španělského a Rumunského přímého řízení[]

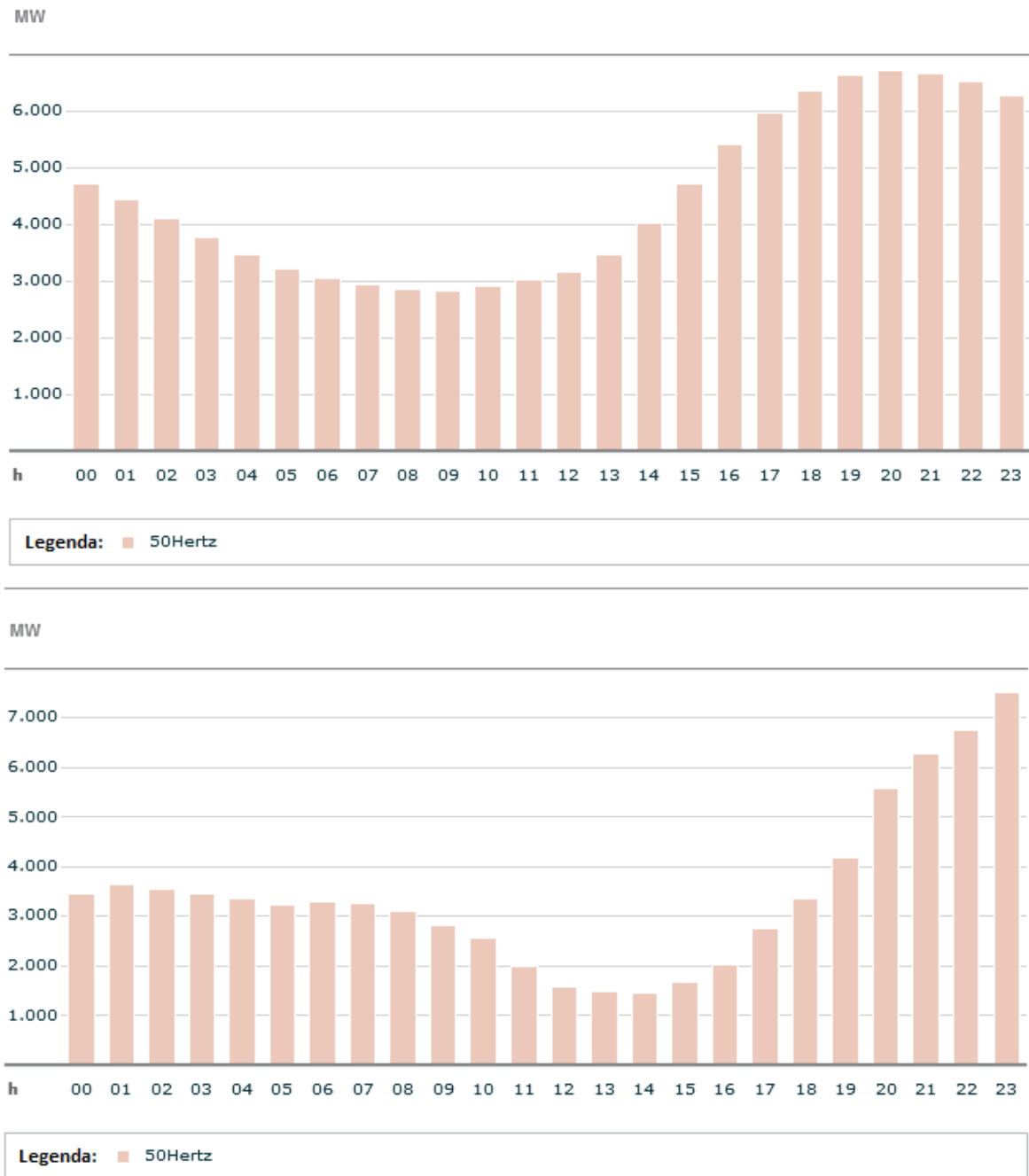
Přímé řízení lze aplikovat několika způsoby. Dalším způsobem aplikace přímého řízení se můžeme inspirovat ve Španělsku, kde na rozdíl od rumunského modelu neřídí činný výkon větrných parků přímo státní dispečink. Státní dispečink využívá podřízeného dispečinku, který má v kompetenci pouze obnovitelné zdroje. Státnímu dispečinku zajišťuje podklady o výrobě, která je plánována a zabezpečuje řízení výroby dle plánu. Pod tímto dispečinkem pro obnovitelné zdroje se nachází lokální centra, jejichž prostřednictvím se optimálně rozdělují případné změny výkonu. Těchto center se ve Španělsku nachází okolo 22. Rozdíl mezi rumunským a španělským řízením výkonu můžeme vidět na obrázku 1.15. Tento španělský model přímého řízení je výhodný zejména z důvodu snížení zatížení státního dispečinku a detailnější informovanosti lokálních center o krátkodobých výhledech výroby větrných elektráren. Největší nevýhoda tohoto řešení jsou vysoké finanční náklady na vybudování a provoz všech lokálních center a dispečinku pro obnovitelné zdroje.

1.4.3 Odpovědnost za výchylku

Tato metoda přímo neovlivňuje činný výkon větrné elektrárny, jde spíše o obchodní nástroj, který využívá denního trhu s elektřinou a pomocí něho snižuje odchylku proti plánované výrobě. Plán výroby se vytváří v závislosti na předpokládaných větrných podmínkách. Dispečerovi soustavy sice stále zůstává možnost upravovat činný výkon větrné elektrárny, ale využívá jí pouze v případě anomálního provozu soustavy, což je v praxi velmi ojedinělé. Tato metoda minimalizuje zatížení dispečera soustavy a zajišťuje, že větrné elektrárny nejsou prakticky vůbec omezovány ve výrobě činného výkonu. Možnou komplikací může být, že provozovatel větrné elektrárny musí být účastníkem trhu a tím pádem je metoda vhodná spíše pro větší větrné parky.

1.4.4 Nepřímé řízení

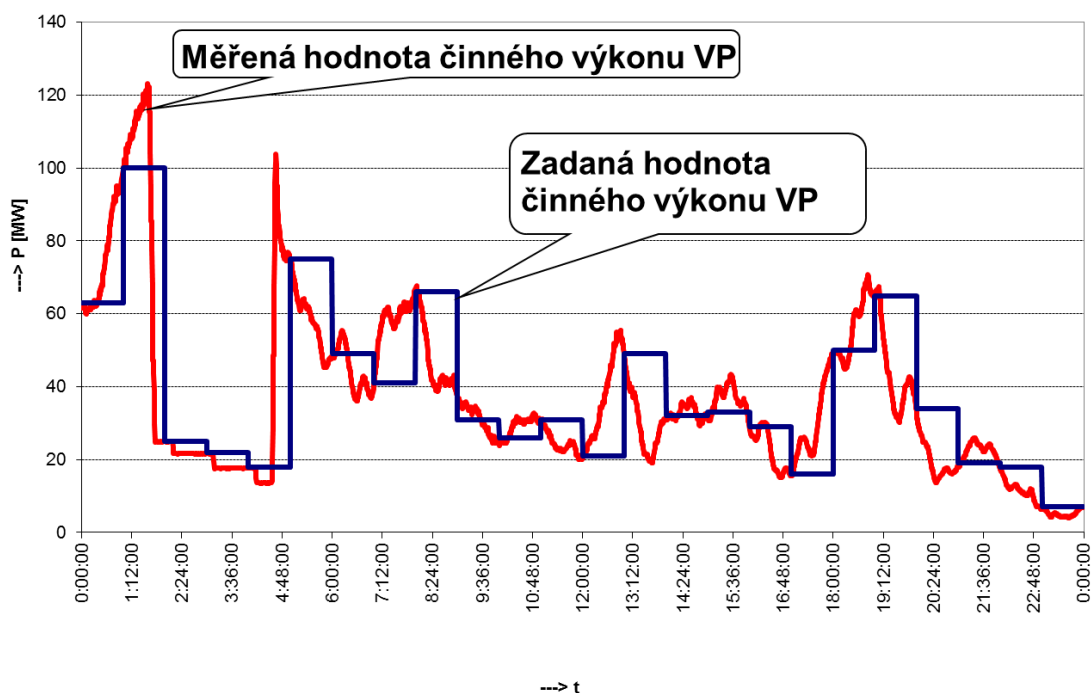
Nepřímé řízení je založeno na schopnosti předpovídat rychlost větru a s tím spojenou výrobu činného výkonu větrných elektráren. Právě predikce výroby je nejdůležitější částí této metody: Predikce však pracuje s určitou nejistotou, která závisí na několika faktorech. Mezi hlavní faktory se řadí délka předpovědi. S rostoucí délkou předpovědi roste i nejistota. Mezi dalšími ovlivňujícími faktory jsou klimatické podmínky sledovaného místa a technické vlastnosti konkrétních větrných parků. Jak je patrné z obrázku 1.16, rozdíl mezi predikovanou a skutečnou výrobou činného výkonu větrných parků se může lišit až o několik MW.



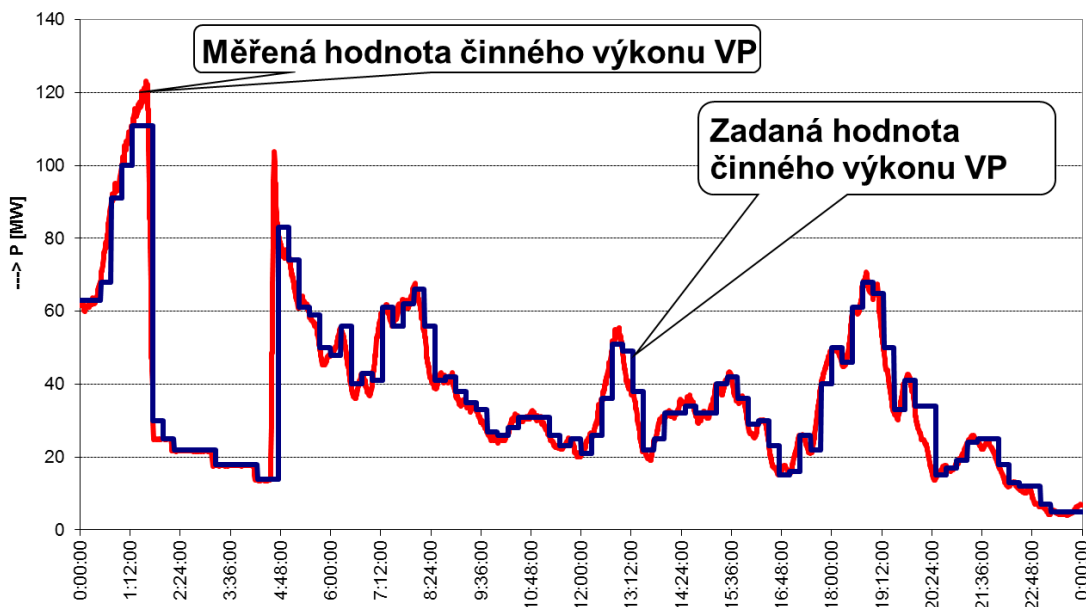
Obr 1.16: Rozdíl predikované a skutečné výroby činného výkonu[]

Pomocí predikce výroby se do databáze řídicího systému nastaví maximální činný výkon, který určený větrný park nesmí překročit. Nastavené maximální hodnoty jsou zadávané v určitém časovém intervalu. Na obrázku 1.17 můžeme vidět rozdíl přesnosti při intervalu 15 minut a 60 minut. Jak je vidět z obrázku, šedesátiminutový interval je pro větrnou elektrárnu příliš hrubý a zbytečně omezuje výrobu větrného parku.

Zadaná hodnota činného výkonu po 60 minutách



Zadaná hodnota činného výkonu po 15 minutách



Obr1.17: Rozdíl zadaných hodnot po 15 minutách a 60 minutách []

Takto řešené řízení činného výkonu má několik výhod. Mezi ně bezesporu patří nižší náklady na pořízení podpůrných služeb v soustavě a pozitivní vliv při obchodování s elektřinou z větrných elektráren v důsledku lepší predikce vyrobené elektřiny. Dále odpadá nutnost rozsáhlého dispečinku obnovitelných zdrojů a snižují se dopady skokových změn výroby větrných elektráren. Naopak zde roste závislost na přesnosti predikce větru

v soustavě a to může být zejména v rozsahu rychlostí větru 3-12 m/s problém, jelikož v tomto rozsahu dochází i při relativně malé změně rychlosti k velké změně výroby elektrické energie, jak je patrné i na obrázku 1.5. Jako negativní vlastnost tohoto typu řízení můžeme považovat i prakticky neustálé omezování a s tím spojenou efektivitu výroby elektřiny.

1.4.5 Virtuální elektrárna

Princip virtuální elektrárny je v podstatě velmi jednoduchý. Jednotlivé elektrárny jsou propojeny pomocí speciálních komunikačních a informačních technologií do jednoho řídicího systému. Tento řídicí systém ovládá všechny elektrárny jako celek a vůči elektrizační soustavě tak vystupují, jako kdyby šlo o jednu elektrárnu. Pomocí ovládání celého celku se stane větrná elektrárna součástí skupiny různých zdrojů a je možné využívat různých obchodních nástrojů. Tato skutečnost zajišťuje eliminaci negativních důsledků proměnné výroby činného výkonu.



Obr1.18: Virtuální elektrárna []

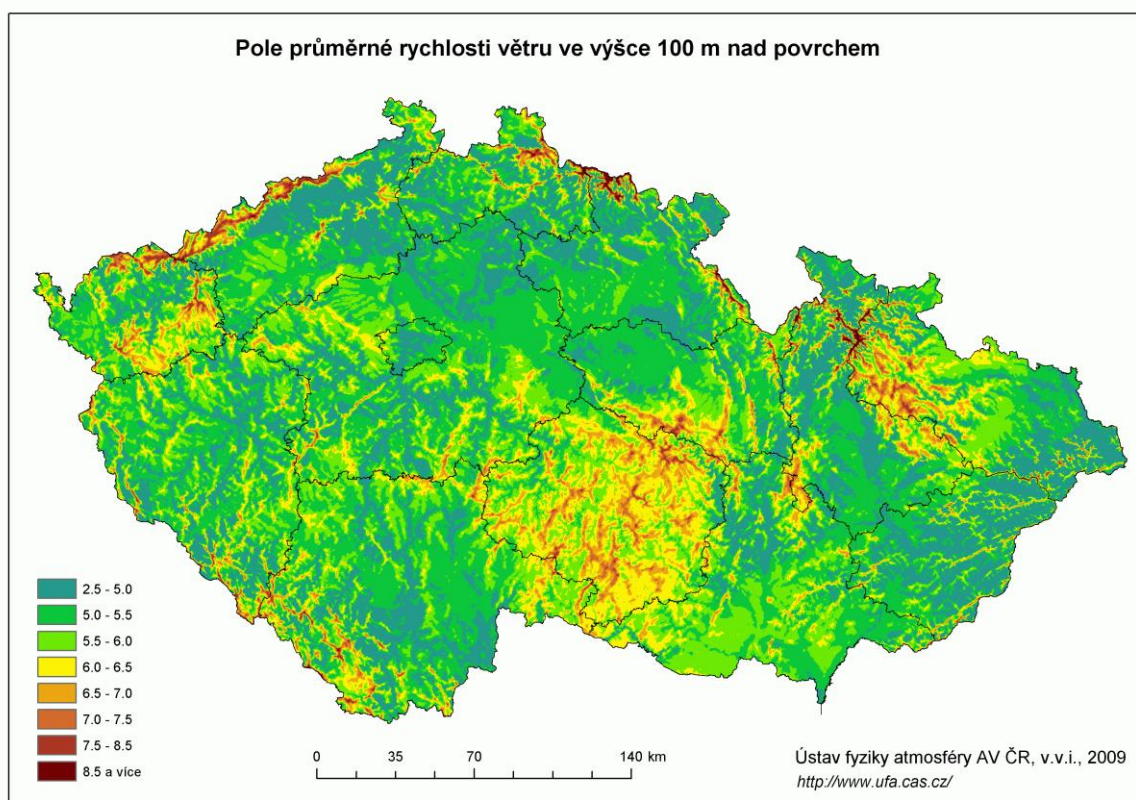
Tato varianta dává možnost zapojení do obchodování s regulační energií i menším výkonům, které by díky své velikosti o tuto možnost přišly. Právě obchodování s elektřinou je největší výhodou této varianty, jelikož má výrazný vliv na snížení negativních dopadů nestability výroby činného výkonu. Ne vždy je možné variantu virtuální elektrárny použít, neboť ne vždy je technologicky možné nebo vhodné náhle zastavit turbínu.

2 Návrh větrné elektrárny

V této kapitole popíšu návrh větrné elektrárny od výběru vhodné lokality až po návrh konkrétního typu větrné elektrárny.

2.1 Výběr lokality

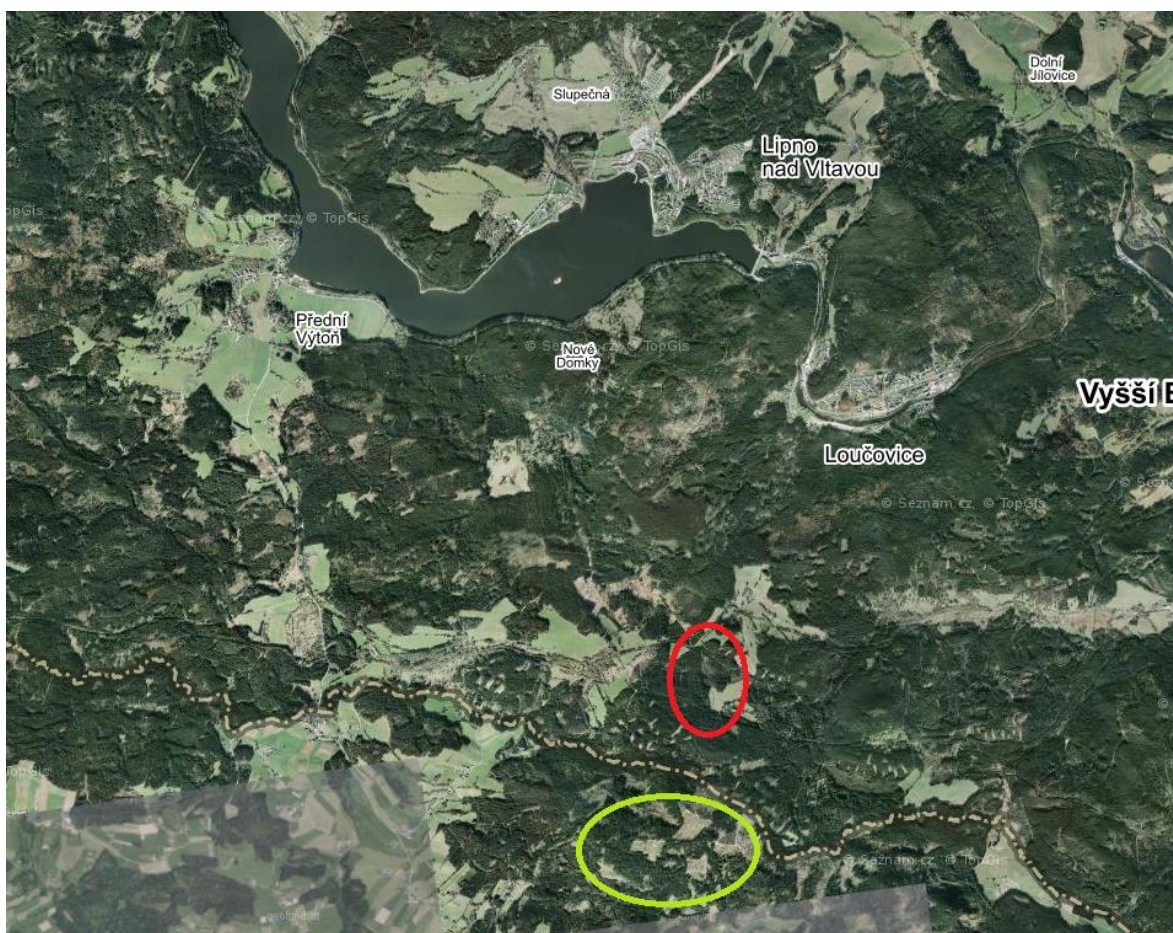
Jako vhodnou lokalitu pro mnou navrhovaný větrný park jsem zvolil oblast lipenské přehrady v jižních Čechách. Hlavní kritérium při výběru dané lokality byl fakt, že v jižních Čechách tento druh výroby elektrické energie chybí, přičemž podle mapy průměrných rychlostí ve výšce 100 metrů nad povrchem, kterou můžete vidět na obrázku 2.1, je zde dostatek lokalit pro výstavbu větrného parku.



Obr 2.1: Mapa průměrných rychlostí větru ve 100 metrech nad povrchem – převzato z [8]

Dalším faktorem pro volbu dané lokality je skutečnost, že pár kilometrů od mnou navrhované farmy, již jedna větrná farma stojí od roku 2003. Jde o rakouskou větrnou farmu Sternwald, která se postupem let rozrůstala a v současné době disponuje devíti větrnými elektrárnami o celkovém výkonu 20000 kW.

Větrný park jsem umístil kilometr od hranic s Rakouskem a více jak dva kilometry od větrného parku Sternwald. Jde o místo v nadmořské výšce pohybující se okolo 950 metrů nad mořem. Na obrázku 2.2 je zeleně znázorněný větrný park Sternwald. Červeně je zde znázorněná mnou vybraná lokalita pro větrný park. Podle mapy průměrných rychlostí větru zde vítr dosahuje rychlostí v průměru okolo 7,5 m/s.



Obr 2.2: Mapa umístění větrného parku – převzato z [9]

Zvolená lokalita je výhodná i z toho důvodu, že již několik let vláda uvažuje o projektu přečerpávací vodní elektrárny, která by propojila přehradu Lipno na řece Vltavě a rakouskou přehradu Aschach na Dunaji. Tunel, který by propojil obě strany, by měl dosahovat až 27 kilometrů. Převýšení mezi oběma přehradami se pohybuje mezi 442 a 456

metry a přečerpávací elektrárna by mohla dosahovat výkonu až 1000 MW, což je výkon jednoho bloku jaderné elektrárny Temelín. Spolu s větrnými elektrárnami by zde byl velký potenciál pro pokrývání výkonů právě jaderné elektrárny Temelín. Celý projekt zatím naráží na nevoli ochranářů životního prostředí, kteří se obávají míchání studené vody z Dunaje a kyslejší a teplejší vody z Lipna. Další překážkou jsou vysoké investiční náklady, které by se mohly vyšplhat až k 55 miliardám Kč. Příznivci tohoto projektu poukazují na fakt, že kromě energetických výhod by tento projekt pomohl i při povodních a zvýšila by se splavnost Dunaje [13].



Obr 2.3: Uvažovaná přečerpávací vodní elektrárna mezi Vltavou a Dunají – převzato z [13]

2.2 Připojení k rozvodné síti

Umístění větrného parku je výhodné i z toho důvodu, že v blízkosti se nachází rozvodna Lipno, ze které vede vedení 110 kV. K rozvodně Lipno by větrný park byl připojen pomocí vedení 22 kV, které by vedlo lesním výsekem. Před samotným připojením větrné farmy do distribuční soustavy musí být provedena studie připojitelnosti dané větrné farmy do distribuční soustavy. Tato studie posuzuje vliv připojení větrné farmy na distribuční soustavu a odhaluje případné nežádoucí vlivy.

2.2.1 Napěťové změny

Připojování nebo odpojování farmy větrných elektráren může vyvolat změny napětí. Pro síť VVN jsou stanovené limity přípustné změny napětí rozděleny na běžný provoz a poruchový stav:

a) Běžný provoz

- Připojení nebo odpojení jedné větrné elektrárny

$$\Delta U_{max} \leq 0,5 \% \quad (2.1)$$

- Připojení nebo odpojení celého větrného parku

$$\Delta U_{max} \leq 2 \% \quad (2.2)$$

b) Poruchový stav

$$\Delta U_{max} \leq 5 \% \quad (2.3)$$

2.2.2 Flickr

Dalším kritériem při posuzování připojitelnosti větrného parku do distribuční sítě je kolísání napětí, které má za následek vyvolání flickru, který je nežádoucí. Pro síť 110 kV v předávacím místě je mezní hodnota:

$$P_{lt} \leq 0,37 \quad (2.4)$$

Dlouhodobá míra flickru se u jednoho zdroje určuje za pomoci činitele flickru c , kde hodnota S_{nE} je jmenovitá hodnota zařízení, konkrétně pro větrné elektrárny se tato hodnota označuje S_{nG} .

$$P_{lt} = c \cdot \frac{S_{nE}}{S_{kV}} \quad (2.5)$$

Pokud se jedná o větrný park s více větrnými elektrárnami, je zapotřebí spočítat míru flickru pro každou elektrárnu zvlášť a následně celkovou míru flickru dopočítat pomocí vztahu

$$P_{ltres} = \sqrt{\sum_i P_{lti}^2} \quad (2.6)$$

Pro větrný park, který disponuje stejnými generátory, se výsledný vzorec zjednoduší do tvaru:

$$P_{ltres} = \sqrt{n} \cdot P_{lt} = \sqrt{n} \cdot c \cdot \frac{S_{nE}}{S_{kV}} \quad (2.7)$$

2.2.3 Útlum signálu HDO

HDO neboli hromadné dálkové ovládání je z části přizpůsobeno na zatížení, které vychází ze zatížení sítě při 50 Hz. Připojená větrná farma zařízení HDO částečně ovlivňuje přidavným zatížením, které pochází z vlastní spotřeby a zvýšeného zatížení sítě v důsledku připojení nové výroby.

Pomocí informace PDS se hlídá zatížení a jmenovitý proud. U sítě VVN je dovolené zvýšení zatížení zařízení HDO do výše 5 % jmenovitého proudu. Druhou podmínkou, určující připojitelnost větrného parku, je dosažení alespoň minimální přípustné úrovně signálu HDO. Pro rozsah frekvencí 194 - 283,3 Hz se minimální úroveň signálu HDO udává $200\% U_f$. U_f neboli náběhové napětí přijímače se obvykle pohybuje v rozmezí $0,8 - 0,9 U_n$ [16].

2.2.4 Vyšší harmonické

Celkové maximální přípustné harmonické proudy v předávacím místě lze určit pomocí vztažných proudů $i_{vpř}$, které se vynásobí zkratovým výkonem, který je v místě připojení.

$$I_{vpř} = i_{vpř} \cdot S_{kV} \quad (2.8)$$

V případě, že v napájecím bodu je připojeno více zařízení, určí se přípustné harmonické proudy jednotlivých zařízení pomocí vynásobení poměru zdánlivého výkonu S_A k celkovému plánovanému výkonu S_{AV} . V tabulce 2.1 je přehled přípustných harmonických proudů na vedení 110 kV [15].

$$I_{vpř} = I_{vpř} \cdot \frac{S_A}{S_{AV}} \quad (2.9)$$

Tab. 2.1 Tabulka přípustných vztažných proudů – převzato z [15]

Řád ν, μ	Přípustný vztažný proud harmonických $i_{\nu, \mu př}$ v A/GVA
5	2,6
7	3,75
11	2,4
13	1,6
17	0,92
19	0,7
23	0,46
25	0,32
> 25 nebo sudé	5,25/ ν
$\mu < 40$	5,25/ μ
$\mu > 40$	16/ μ

2.3 Návrh typu větrného parku

K tomu, abychom zvolili správný typ větrné elektrárny pro danou lokalitu na Šumavě, je třeba tabulka větrných tříd. Tabulka se skládá ze čtyř tříd, kde každá třída zastupuje průměrné rychlosti, které jsou měřeny v 10 minutových intervalech V_{ave} (m/s) a maximální rychlosti V_{ref} (m/s), která byla naměřena za 50 let.

Tab. 2.2 Tabulka větrných tříd [10]

WTGS Class	I.	II.	III.	IV.
V_{ref} (m/s)	50	42,5	37,5	30
V_{ave} (m/s)	10	8,5	7,5	6

Jelikož ve mnou navrhované oblasti výstavby větrného parku je průměrná rychlost větru okolo 7,5 m/s, zvolil jsem III. třídu, která sahá od 6 m/s do 7,5 m/s. Při výběru typu větrné elektrárny jsem upřednostnil německou firmu Enercon, jelikož nabízí koncepty s mnohapólovými synchronními generátory bez převodovky s frekvenčním měničem. Mnou navrhovaný větrný park se bude skládat ze tří větrných elektráren. Vybírat budu ze dvou typů větrných elektráren, které dále porovnám a vyberu vhodnější variantu. Jednou z variant je větrná elektrárna s označením E-101 o výkonu 3050 kW, druhá z uvažovaných elektráren má označení E-82 a její výkon dosahuje 2300 kW. Celkový výkon větrného parku by tedy u první z variant dosahoval 9150 kW a u druhé varianty 6900 kW.

2.3.1 Enercon E-101

Technická data

Jmenovitý výkon:	3050 kW
Průměr rotoru:	101 m
Výška osy náboje:	99 m
Třída větrné turbíny:	III.
Koncept zařízení:	Bezpřevodový Variabilní otáčky Natáčení lopatek
Rotor	
Typ rotoru:	Proti větru s aktivním natáčením lopatek
Směr otáčení:	Ve směru hodinových ručiček
Počet lopatek:	3
Plocha rotoru:	8012 m ²
Materiál listů:	Epoxidový sklolaminát s bleskosvodem
Počet otáček:	Proměnný, 4 – 14,5 ot/min
Natáčení lopatek:	Automatický systém ENERCON Lopatky se záložním
napájením poruchy	v případě
Hnací ústrojí s generátorem	
Hlavní ložisko:	Dvouřadé kuželové/Válečkové ložisko
Generátor:	Mnohapólový prstencový synchronní generátor
Dodávka do sítě:	ENERCON střídače
Brzdový systém:	3 nezávislé systémy pro případ poruchy Hlavní brzda rotoru Aretace rotoru
Vypínací rychlost:	28 - 34 m/s
Vzdálený monitoring:	ENERCON SCADA

2.3.1.1 Roční energetická bilance

Pro určení ekonomické návratnosti, kterou se budu zabývat v další kapitole, je nutné spočítat celkovou energii, kterou je mnou navrhovaný větrný park schopný vyrobit za rok. S pomocí výkonové charakteristiky větrného motoru, ze které odečteme výkon P pro jednotlivé rychlosti větru v , dostaneme hodnotu výkonu větrné elektrárny pro jednotlivé rychlosti větru. Tuto hodnotu poté vynásobíme dobou t , po kterou vítr danou rychlostí vanul. Výslednou energii získáme součtem všech energií při jednotlivých rychlostech [11].

$$E = \sum E v_i = \sum_{v_{min}}^{v_{max}} t v_i \cdot P v_i \quad (2.10)$$

kde E - celková energie [Wh]
 v_{min} - minimální rychlost rozběhu [m/s]
 v_{max} - maximální rychlost rozběhu [m/s]
 t - čas kdy vítr vane danou rychlostí [s]
 P - výkon při jednotlivých rychlostech větru [W]

Jelikož časové rozdělení rychlostí větru je velmi těžké získat, zvolil jsem pro můj případ jiný druh výpočtu, při kterém potřebujeme výkonovou charakteristiku větrné elektrárny Enercon E-101 a tabulku četností rychlostí větru při roční průměrné rychlosti větru ve mnou zvolené lokalitě. Výpočet tabulky četností rychlostí bude popsán dále.

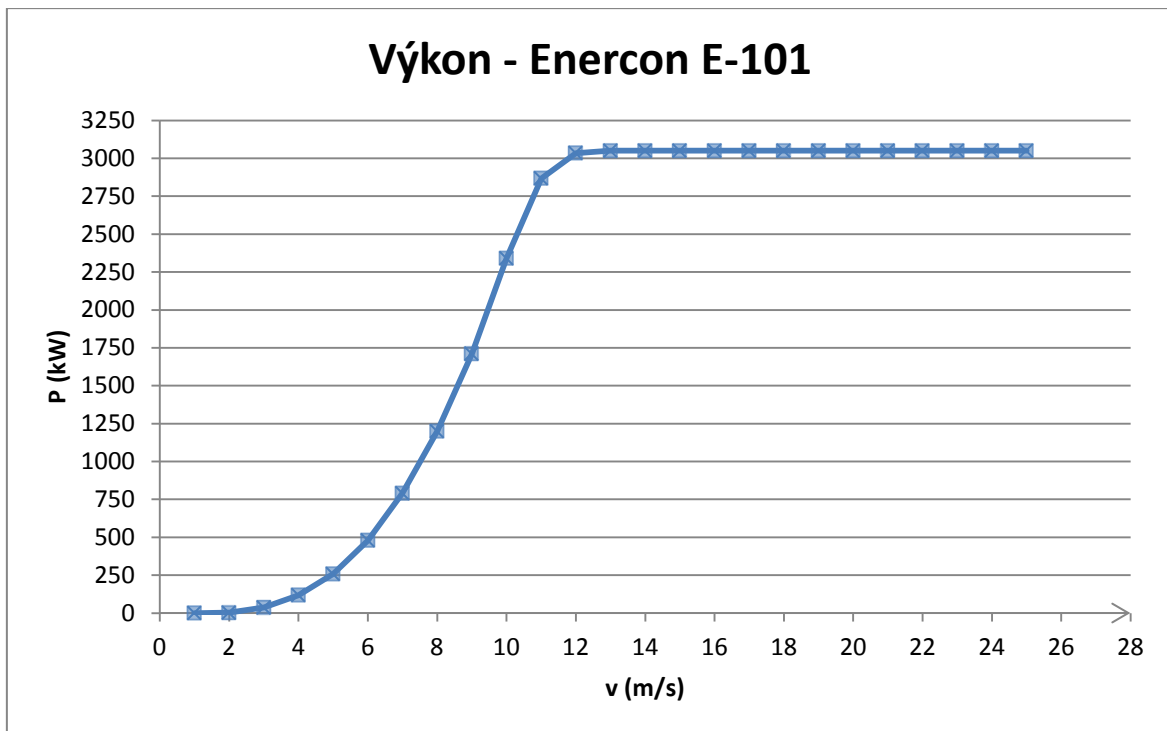
$$E_R = N_0 \cdot \sum_i P(v_i) \cdot f(v_i) \quad (2.11)$$

kde E_R - celková energie za rok [Wh]
 N_0 - počet hodin v roce [h]
 P - výkon [W]
 f - četnost rychlosti větru[%]

Hodnoty výkonu větrného motoru při různých rychlostech větru získáme od firmy Enercon (Tab. 2.3). Z těchto hodnot jsem sestavil výkonovou charakteristiku, kterou můžete vidět na grafu 2.3.1.1

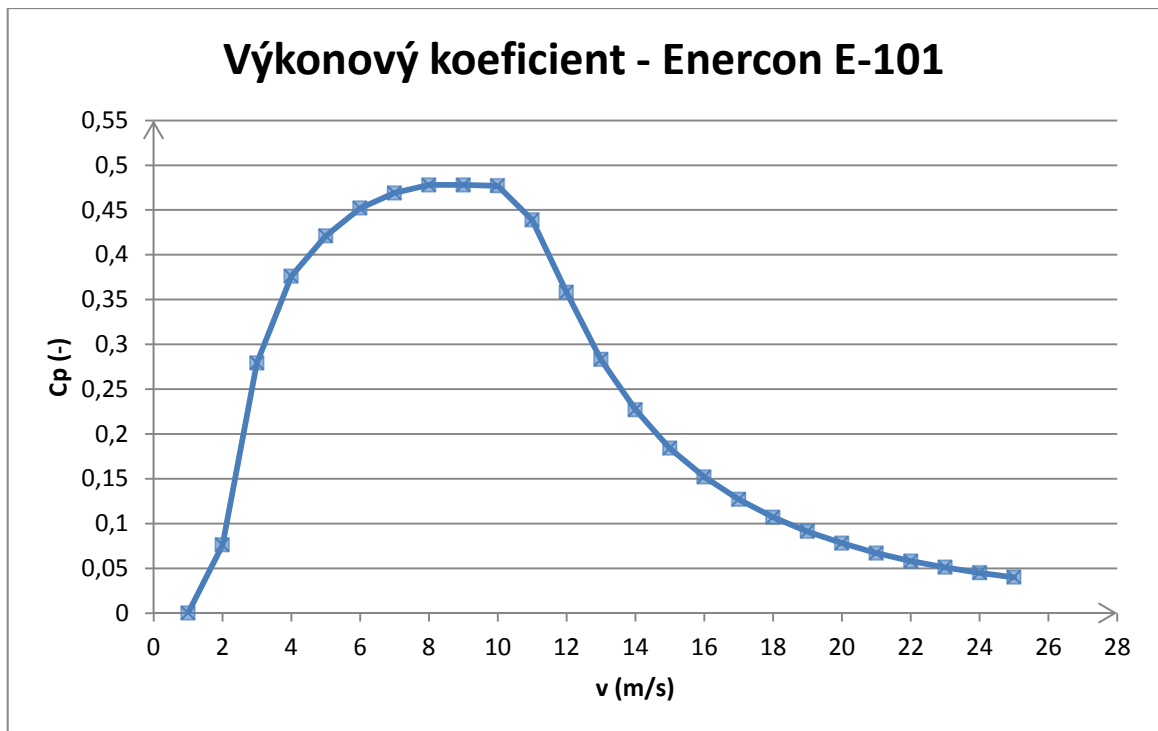
Tab. 2.3 Tabulka výkonu a výkonového součinitele motoru Enercon E-101 [12]

Rychlost větru (m/s)	Výkon P (kW)	Výkonový koeficient C_p (-)
1	0	0
2	3	0,076
3	37	0,279
4	118	0,376
5	258	0,421
6	479	0,452
7	790	0,469
8	1200	0,478
9	1710	0,478
10	2340	0,477
11	2867	0,439
12	3034	0,358
13	3050	0,283
14	3050	0,227
15	3050	0,184
16	3050	0,152
17	3050	0,127
18	3050	0,107
19	3050	0,091
20	3050	0,078
21	3050	0,067
22	3050	0,058
23	3050	0,051
24	3050	0,045
25	3050	0,04



Graf 2.3.1.1: Výkon větrného motoru Enercon E-101 [12]

Spolu s výkonem motoru jsme od firmy Enercon získali i charakteristiku výkonového koeficientu C_p , ze které je patrné, jakou má větrný motor účinnost při různých rychlostech větru. Z této charakteristiky lze určit, při jakých rychlostech větru je nejefektivnější větrnou elektrárnu provozovat. Hodnota, kterou lze maximálně dosáhnout v závislosti na mechanických a elektrických ztrátách, se pohybuje okolo 0,59, přesněji $16/27$. Nejmodernější větrné elektrárny při optimálních podmínkách dosahují okolo 75 % až 85 % této hodnoty. Na grafu 2.3.1.2 můžeme vidět závislost výkonového součinitele na rychlosti větru přímo pro mnou zvolenou větrnou elektrárnu Enercon E-101 [11].



Graf 2.3.1.2: Výkonový součinitel větrného motoru Enercon E-101 [12]

2.3.1.2 Četnost rychlosti větru

Jelikož nebylo možné použít naměřené hodnoty četnosti rozdělení rychlosti větru, použil jsem Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti. Weibullovo rozdělení lze vyjádřit pomocí rovnice 2.12.

$$f(x) = \frac{bx^{b-1}}{a^b} \exp \left[- \left(\frac{x}{a} \right)^b \right] \quad (2.12)$$

kde b - bezrozměrný tvarový součinitel [-]

a - bezrozměrný součinitel určující polohu maxima [-]

$$a = \frac{v^p}{0,88} \quad (2.13)$$

kde v^p – průměrná rychlost větru v mnou zvolené lokalitě [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Pro můj větrný park jsem určil jako průměrnou rychlost větru 7,5 m/s a z této hodnoty dopočítal součinitel a , který poté vyšel 8,52. Pro tvarový součinitel b jsem zvolil hodnotu 2.

Tab. 2.4 Četnost rychlosti větru v procentech

Rychlosti větru (m/s)	Průměrná rychlost větru 7,5 m/s
0,5	1,37
1	2,72
2	5,21
3	7,30
4	8,84
5	9,76
6	10,06
7	9,82
8	9,13
9	8,12
10	6,95
11	5,73
12	4,55
13	3,49
14	2,59
15	1,87
16	1,30
17	0,88
18	0,57
19	0,36
20	0,22
21	0,13
22	0,08
23	0,04
24	0,02
25	0,01

Pomocí vzorce pro celkovou vyrobenou energii za rok (2.11) a dosazených hodnot z tabulek výkonů větrného motoru Enercon E-101 (tab. 2.3) a četností rychlostí větru (tab. 2.4) jsem sestavil tabulku vyrobené energie za rok (tab. 2.5) pro jednotlivé rychlosti větru. Po součtu těchto vyrobených energií jsem získal celkovou vyrobenou energii jak jedné větrné elektrárny, tak i následně celého větrného parku.

Tab. 2.5 Roční vyrobená energie elektrárny Enercon E-101

Rychlost větru (m/s)	Výkon P (kW)	Četnost rychlostí větru f (%)	Vyrobená energie za rok E_R (MW)
1	0	2,72	0,00
2	3	5,21	1,37
3	37	7,30	23,65
4	118	8,84	91,34
5	258	9,76	220,54
6	479	10,06	422,30
7	790	9,82	679,41
8	1200	9,13	959,39
9	1710	8,12	1217,08
10	2340	6,95	1424,61
11	2867	5,73	1437,94
12	3034	4,55	1209,49
13	3050	3,49	933,62
14	3050	2,59	693,31
15	3050	1,87	498,31
16	3050	1,30	346,88
17	3050	0,88	233,99
18	3050	0,57	153,02
19	3050	0,36	97,06
20	3050	0,22	59,72
21	3050	0,13	35,66
22	3050	0,08	20,67
23	3050	0,04	11,63
24	3050	0,02	6,35
25	3050	0,01	3,37
Celková vyrobená energie za rok jedné větrné elektrárny Enercon E-101 (MW)			10780,69
Celková vyrobená energie větrného parku (MW)			32342,08

Výpočet:

$$\begin{aligned}
 E_R = N_0 \cdot \sum_i P(v_i) \cdot f(v_i) = & (8760 \cdot (0 \cdot 2,72 + 3 \cdot 5,21 + 37 \cdot 7,3 + 118 \cdot \\
 & 8,84 + 258 \cdot 9,76 + 479 \cdot 10,06 + 790 \cdot 9,82 + 1200 \cdot 9,13 + 1710 \cdot 8,12 + \\
 & 2340 \cdot 6,95 + 3050 \cdot 0,88 + 3050 \cdot 0,57 + 3050 \cdot 0,36 + 3050 \cdot 0,22 + 302867 \cdot \\
 & 5,73 + 3034 \cdot 4,55 + 3050 \cdot 3,49 + 3050 \cdot 2,59 + 3050 \cdot 1,87 + 3050 \cdot 1,3 + \\
 & 50 \cdot 0,13 + 3050 \cdot 0,08 + 3050 \cdot 0,04 + 3050 \cdot 0,02 + 3050 \cdot 0,01)) / (100 \cdot \\
 & 1000) = \mathbf{10780,69 \text{ MWh}}
 \end{aligned}$$

Skutečné využití větrného parku můžeme spočítat pomocí takzvaného kapacitního faktoru, kterému se jinak také říká koeficient ročního využití výkonu k_r . Tento koeficient narozdíl od výkonového součinitele C_p neurčuje účinnost dané větrné elektrárny, ale ukazuje procentuální využití jmenovitého výkonu za rok. Výpočet je pouze orientační, jelikož v něm nejsou zohledněny ztráty, které vznikají jak v motoru, tak při cestě elektrické energie do sítě přes střídače.

$$k_r = \frac{E_r}{P_{inst} \cdot t_r} \cdot 100 \quad (2.14)$$

- kde k_r - koeficient ročního využití výkonu [%]
 E_r - skutečně vyrobená energie za rok [MWh]
 P_{inst} - instalovaný výkon větrné elektrárny [MWh]
 t_r - počet hodin v roce [h]

Jelikož mnou navrhovaný větrný park disponuje třemi větrnými elektrárnami o stejném výkonu, mohu výpočet provést pouze pro jednu větrnou elektrárnu.

$$k_r = \frac{E_r}{P_{inst} \cdot t_r} \cdot 100 = \frac{10780,69}{3,05 \cdot 8760} \cdot 100 = 40,35 \%$$

V dnešní době se hodnota koeficientu ročního využití výkonu k_r pohybuje u nejmodernějších větrných elektráren v rozmezí 25 – 28 %. Mnou vypočítaná hodnota toto rozmezí přesahuje z několika důvodů. Hlavním důvodem jsou již zmíněné ztráty v motoru a ve střídači, které velmi ovlivňují konečnou hodnotu využití. Dalším důvodem takto vysoké hodnoty může být fakt, že četnost rychlostí větru pro mnou zvolenou lokalitu jsou dopočítávány pomocí Weibullovo rozdělení a nejsou měřeny po celý rok v daném místě.

2.3.2 Enercon E-82 E2

Technická data

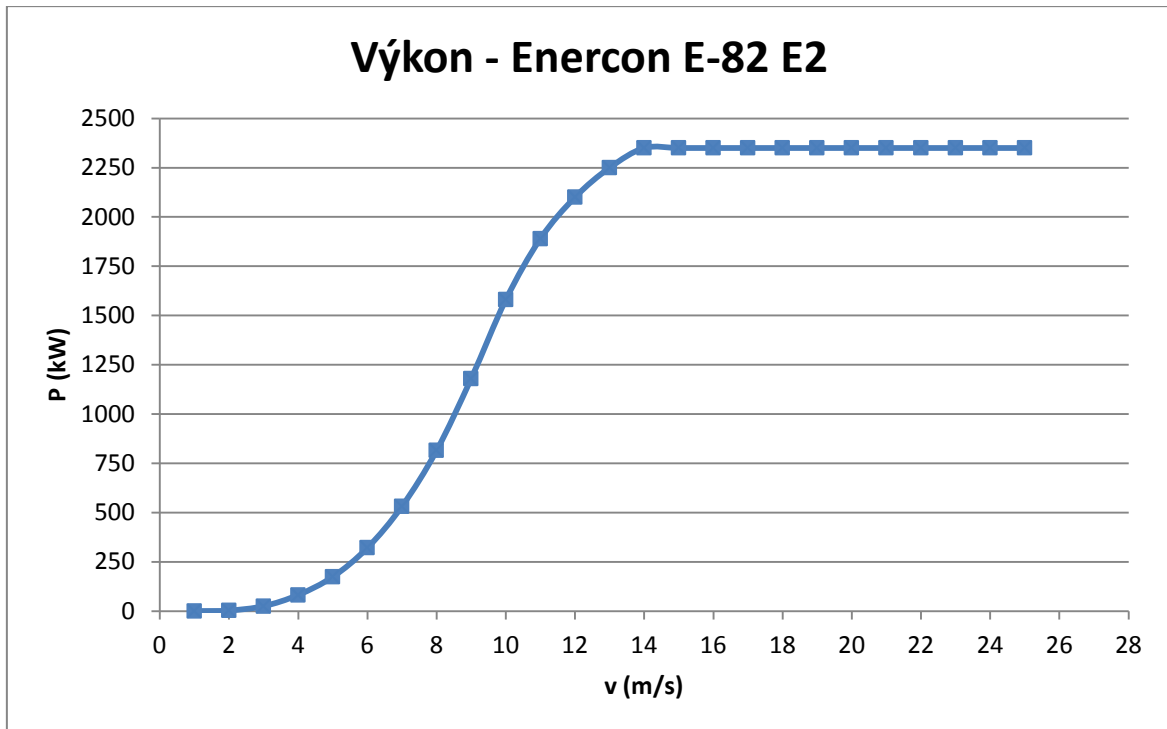
Jmenovitý výkon:	2300 kW
Průměr rotoru:	82 m
Výška osy náboje:	85 m
Třída větrné turbíny:	III.
Koncept zařízení:	Bezpřevodový Variabilní otáčky Natáčení lopatek
Rotor	
Typ rotoru:	Proti větru s aktivním natáčením lopatek
Směr otáčení:	Ve směru hodinových ručiček
Počet lopatek:	3
Plocha rotoru:	5281 m ²
Materiál listů:	Epoxidový sklolaminát s bleskosvodem
Počet otáček:	Proměnný, 6 – 18 ot/min
Natáčení lopatek:	Automatický systém ENERCON Lopatky se záložním
napájením poruchy	v případě
Hnací ústrojí s generátorem	
Hlavní ložisko:	Dvouřadé kuželové/Válečkové ložisko
Generátor:	Mnohapólový prstencový synchronní generátor
Dodávka do sítě:	ENERCON střídače
Brzdový systém:	3 nezávislé systémy pro případ poruchy Hlavní brzda rotoru Aretace rotoru
Vypínací rychlost:	28 - 34 m/s
Vzdálený monitoring:	ENERCON SCADA

2.3.2.1 Roční energetická bilance

Stejně jako u větrného motoru Enercon E-101 i zde spočítám celkovou energii, kterou je větrná elektrárna Enercon E-82 E2 schopna vyrobit za rok. Pro tento výpočet jsem sestavil tabulku 2.6, ve které jsou uvedeny výkony elektrárny Enercon E-82 E2 pro jednotlivé rychlosti větru a také výkonový koeficient C_p , který budeme dále také potřebovat.

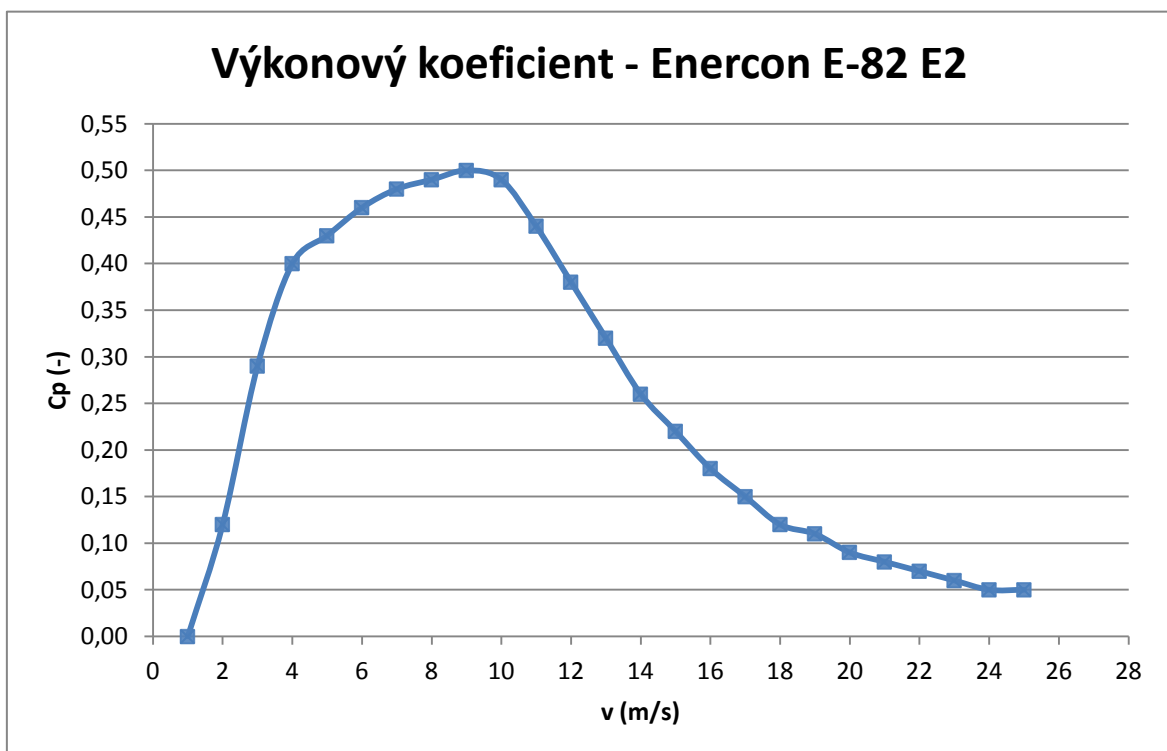
Tab. 2.6 Tabulka výkonu a výkonového součinitele motoru Enercon E-82 E2 [12]

Rychlost větru (m/s)	Výkon P (kW)	Výkonový koeficient C_p (-)
1	0	0,00
2	3	0,12
3	25	0,29
4	82	0,40
5	174	0,43
6	321	0,46
7	532	0,48
8	815	0,49
9	1180	0,50
10	1580	0,49
11	1890	0,44
12	2100	0,38
13	2250	0,32
14	2350	0,26
15	2350	0,22
16	2350	0,18
17	2350	0,15
18	2350	0,12
19	2350	0,11
20	2350	0,09
21	2350	0,08
22	2350	0,07
23	2350	0,06
24	2350	0,05
25	2350	0,05



Graf 2.3.2.1: Výkon větrného motoru Enercon E-82 E2 [12]

Pomocí dat získaných od firmy Enercon jsem i u tohoto typu větrné elektrárny sestavil grafy jak pro výkon elektrárny (Graf 2.3.2.1), tak pro výkonový koeficient (Graf 2.3.2.2).



Graf 2.3.2.2: Výkon větrného motoru Enercon E-82 E2 [12]

Použitím již spočítaných četností rychlosti větru (tab. 2.4) a pomocí hodnot z tabulky výkonu větrného motoru a výkonového koeficientu (tab. 2.6) jsem sestavil tabulku (tab. 2.7) vyrobené energie za rok pro větrnou elektrárnu Enercon E-82 E2.

Tab. 2.7 Roční vyrobená energie elektrárny Enercon E-82 E2

Rychlost větru (m/s)	Výkon P (kW)	Četnost rychlostí větru f (%)	Vyrobená energie za rok E_R (MW)
1	0	2,72	0
2	3	5,21	1,37
3	25	7,30	15,98
4	82	8,84	63,47
5	174	9,76	148,74
6	321	10,06	283,00
7	532	9,82	457,53
8	815	9,13	651,58
9	1180	8,12	839,85
10	1580	6,95	961,91
11	1890	5,73	947,93
12	2100	4,55	837,15
13	2250	3,49	688,74
14	2350	2,59	534,19
15	2350	1,87	383,94
16	2350	1,30	267,27
17	2350	0,88	180,29
18	2350	0,57	117,90
19	2350	0,36	74,78
20	2350	0,22	46,01
21	2350	0,13	27,47
22	2350	0,08	15,92
23	2350	0,04	8,96
24	2350	0,02	4,90
25	2350	0,01	2,60
Celková vyrobená energie za rok jedné větrné elektrárny Enercon E-82 E2 (MW)			7561,49
Celková vyrobená energie větrného parku (MW)			22684,48

Výpočet:

$$E_R = N_0 \cdot \sum_i P(v_i) \cdot f(v_i) = (8760 \cdot (0 \cdot 2,72 + 3 \cdot 5,21 + 25 \cdot 7,3 + 82 \cdot 8,84 + 174 \cdot 9,76 + 321 \cdot 10,06 + 532 \cdot 9,82 + 815 \cdot 9,13 + 1180 \cdot 8,12 + 1580 \cdot 6,95 + 1890 \cdot 5,73 + 2100 \cdot 4,55 + 2250 \cdot 3,49 + 2350 \cdot 2,59 + 2350 \cdot 1,87 + 2350 \cdot 1,3 + 2350 \cdot 0,88 + 2350 \cdot 0,57 + 2350 \cdot 0,36 + 2350 \cdot 0,22 + 2350 \cdot 0,13 + 2350 \cdot 0,08 + 2350 \cdot 0,04 + 2350 \cdot 0,02 + 2350 \cdot 0,01)) / (100 \cdot 1000) = \mathbf{7561,49 \text{ MWh}}$$

Dalším kritériem při určování vhodného typu větrné elektrárny bude kapacitní faktor neboli koeficient ročního využití výkonu k_r . Vzorec pro jeho výpočet již byl zmíněn výše (2.14).

$$k_r = \frac{E_r}{P_{inst} \cdot t_r} \cdot 100 = \frac{7561,49}{2,35 \cdot 8760} \cdot 100 = 36,73 \%$$

Jak již bylo zmíněno při výpočtu kapacitního faktoru větrné elektrárny Enercon E-101, vypočtená hodnota je větší než bývá obvyklá z důvodů nezapočítání ztrát jak ve střídači, tak i v motoru.

Tab. 2.8 Porovnání větrných parků

	Celková vyrobená energie větrného parku E_R (MW)	Koeficient ročního využití k_r výkonu (%)
Enercon E-101	32342,08	40,35
Enercon E-82 E2	22684,48	36,73

Při porovnání kapacitního faktoru u větrných elektráren Enercon E-82 E2 a Enercon E-101 (tab. 2.8) vychází jako výhodnější využití větrné elektrárny s označením Enercon E-101, jelikož její roční využití je o 3,62 % vyšší než je tomu u větrné elektrárny s označením Enercon E-82 E2.

2.4 Ekonomická návratnost

Otázka ekonomické návratnosti je jedna z nejdůležitějších částí při návrhu větrného parku a to z důvodu toho, že na ní závisí případná realizace celého projektu. Samotná návratnost a případná doba návratnosti je podmíněna mnoha parametry, které jí ovlivňují. Některé z těchto parametrů nemůžeme ovlivnit. Jsou jimi například výkupní cena za kWh, závady na větrné elektrárně, atmosférické vlivy, při kterých musí být elektrárna odpojena nebo rychlost větru, která nedosahuje námi předpokládané úrovně. Tyto skutečnosti mohou zvýšit dobu návratnosti a v nejhrošším případě způsobit nevýhodnost celého projektu.

2.4.1 Náklady

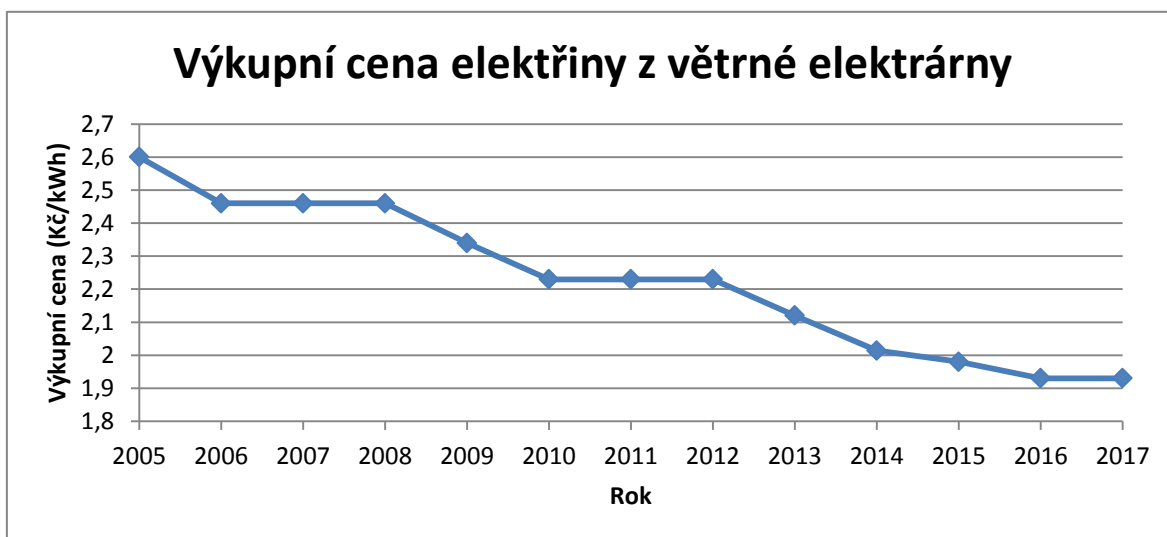
Náklady můžeme rozdělit na dva typy, na provozní, které nás provází celou životnost větrného parku a pořizovací, které vynaložíme pouze na začátku při budování větrného parku.

Mezi pořizovací náklady můžeme počítat plno věcí, jako jsou například technologie větrné elektrárny (tubus, gondola, rotorové listy, elektronické měniče, atd.), výstavba betonového základu, úprava okolí větrného parku. Nezanedbatelnou částkou při budování větrného parku je i samotný pozemek, na kterém celý větrný park stojí. Při připojování do distribuční sítě musíme počítat s náklady spojené s úpravou rozvodny. Pokud námi zvolený větrný park neleží v blízkosti distribuční sítě, je nutné vybudovat elektrické vedení, které může náklady velmi zvednout.

Provozní náklady jsou náklady, které větrný park účtuje neustále, přesněji se tyto náklady účtují jako roční provozní náklady. Mezi tyto náklady se počítá jak servis větrného parku, tak administrativní služby, jako jsou mzdy zaměstnanců nebo zabezpečení větrného parku. Mezi dalšími náklady, které můžeme počítat mezi provozní, se řadí pojištění a vlastní spotřeba větrného parku, která se spotřebovává na elektropohonech, komunikaci, signalizaci a měření. Celkově provozní náklady představují mezi 1-3 % celkových nákladů větrného parku.

2.4.2 Zisk

Pro úspěšnost celého projektu je jedním z nejdůležitějších aspektů ziskovost větrného parku. Jedním z faktorů ovlivňující zisk celého projektu je výtěžnost větrného parku za rok, která nám v obou variantách vyšla oproti republikovému průměru nadstandardně přesahující 30 %. Tento faktor můžeme ovlivnit správným návrhem větrného elektrárny s přihlédnutím na zvolenou lokalitu a povětrnostní podmínky. Druhým faktorem, který nám určuje ziskovost větrného parku, je výkupní cena za kWh, kterou stanovuje Energetický regulační úřad. Jak je vidět z grafu 2.4.2.1 od roku 2005, výkupní cena za kWh rapidně klesá a zabraňuje tak masivnější výstavbě větrných parků. Pro tento rok cena za kWh zůstala na stejné hodnotě jako v roce 2016 a to 1,93Kč za kWh. Oproti roku 2005 jde tedy o pokles o 0,67 Kč za kWh.



Graf 2.4.2.1: Výkupní cena elektřiny [14]

3 Vstup drobných investorů do financování větrných elektráren

Větrná energetika se neseťkává u občanů České republiky s příliš velkou oblibou a to převážně z důvodu špatné informovanosti o výhodách využívání větru pro výrobu elektrické energie a fámách, které její provozování provázejí. Jelikož v minulosti zde proběhla kauza fotovoltaických elektráren, nelze očekávat, že obyvatelé, v jejichž blízkosti by se větrná elektrárna měla stavět, uslyší pouze na argumenty ukazující na ochranu životního prostředí a snížení emisí CO₂. Ani argument vytvoření nových pracovních míst není dost silný na to, aby lidé přijali větrné elektrárny ve své blízkosti.

3.1 Potenciální problémy s výstavbou větrné elektrárny

Jelikož v mnoha případech o stavbě větrného parku rozhodují občané obcí, v jejichž katastru se daný větrný park plánuje, je důležité tyto občany správně informovat o připravovaném projektu. Obce často vypisují referenda a tím nechávají rozhodnout občany o tom, jestli ve svém okolí takto velkou stavbu chtějí nebo ne. Občané se ve většině případů kvůli chybějícím informacím rozhodují takový projekt nepodpořit. Investor, který připravuje projekt větrné farmy, by měl mimo legislativní a technické přípravy zapracovat na Public relations neboli vztahu s veřejností a už od začátku s občany komunikovat a ukázat pozitiva, které může větrný park pro ně nebo pro obec přinést. Mezi lidmi se vyskytuje plno argumentů proti výstavbě, některé tyto argumenty jsou objektivní a musí se uznat jako oprávněné, na druhou stranu převažují argumenty, které jsou spíše fámami a dezinformacemi. Mezi tyto argumenty patří například:

- Syndrom větrných turbín – Spočívá v tvrzení, že turbíny narušují spánek, způsobují zdravotní a duševní problémy nebo že zapříčiňují závratě a srdeční onemocnění.

Celá záležitost byla prošetřena nezávislými odborníky na hygienu a lidské zdraví, kteří odmítli, že by větrné turbíny jakkoliv ovlivňovaly vestibulární systém. Odlesky a blikání listů rotorů nezapříčiňují epileptické záchvaty. Neexistuje žádný vztah mezi elektrárnami a bolestmi kloubů, vysokým krevním tlakem a cukrovkou.

- Velká úmrtnost ptáků a netopýrů díky srážce s otáčejícím se listem rotoru

Tento problém je již řešen vybavením větrných elektráren radary, které sledují pohyb letadel a ptáků, a dokážou větrnou elektrárnu zastavit, pokud by v blízkosti bylo velké hejno ptáků.

- Odletování kusů ledu z listů rotoru v zimních měsících

Listy rotorů jsou vybavené ohřevem, což má za následek průběžné odtávání námrazy.

- Silně proměnná výroba elektřiny

Čím dál více se snaží využívat k akumulaci elektřiny baterie a setrvačníky.

- Riziko bezpečnosti dodávek elektrické energie při skokovém zastavení větrné elektrárny při rychlostech větru nižších jak 3 m/s a vyšších jak 25 m/s

Při nízkých rychlostech větru zastavení elektrárny nevadí z důvodu nízkého výkonu elektrárny. Při rychlostech větru přesahujících 25 m/s jsou k dispozici technická řešení, která postupně snižují výrobu až do rychlosti větru 35 m/s a eliminují tak skokovou změnu.

3.2 Možné benefity pro obce díky realizaci větrné elektrárny

Jak jsem již psal výše, důležitou částí, jak motivovat občany, aby podpořili stavbu větrného parku, je nabídnou jim takové benefity, aby výstavba větrného parku byla výhodná i pro ně. Tento benefit musí být možné přesně kvantifikovat a průběžně kontrolovat, avšak musí být v ekonomických možnostech investora. Samotný benefit nemusí pouze zvýhodňovat občany jednotlivě, ale může přispět k celkovému zvýšení kvality života v obci. Obecně můžeme tyto benefity rozdělit do několika skupin.

a) Finanční podpora občanské výstavby

Tato podpora spočívá v prodeji pozemků, na kterém bude stát větrný park za velmi výhodné podmínky pro obec. Tyto prostředky může obec následně využít k stavbě nebo modernizaci silnic, chodníků, kanalizace, vodovodu, sportovního hřiště a jiných věcí. Tato podpora může být buď formou jednorázového příspěvku nebo každoročního příspěvku do obecního rozpočtu. Jednou z možností je i vybudování jedné elektrárny navíc, kterou by i se servisem a provozováním převzala obec.

b) Garantované finanční produkty

Firmy, které připravují stavbu větrných farem, mají obvykle kapitál pouze v řádech milionů korun. Proto o financování se ve většině případů stará banka, která schvaluje vše, co se kolem výstavby větrného parku děje. Banka tedy může ve finančním projektu vytvořit místo pro cizí kapitál s výhodnými podmínkami pro jeho vložení a garantovat jeho návratnost. Tento garantovaný výnos z vložení kapitálu do větrného parku může být finančně zajímavý pro občany dotčené obce a změnit tak postoj ke stavbě. Tento způsob již několik let využívají v sousedním Německu, kde dokonce je pravidlo, které zavazuje investora nabídnout alespoň 20 % akcií lidem z okolí stavby.

c) Snížení ceny elektřiny a tepla

Tato forma benefitu není zcela organizačně jednoduchá, jelikož podle platné legislativy vyžaduje zapojení obchodníka s elektřinou. Lidé by nemuseli souhlasit s přechodem k jednomu konkrétnímu obchodníkovi, který by nakupoval a následně jim prodával silovou elektřinu s požadovanou slevou. U slevy za teplo spočívá problém v tom, že v nynější situaci nejde konkurovat cenou tepla z obnovitelných zdrojů ceně tepla z uhlí nebo plynu.

3.3 Metodika zapojení drobných investorů

Při zapojení drobných investorů, kterými jsou myšleny v tomto konkrétním případě obyvatelé dotčených obcí, vzroste zájem o větrné elektrárny, jelikož sami občané obcí v blízkosti větrného parku budou vydělávat na provozu větrného parku. Obyvatelé by se na výstavbě podíleli koupí akcií větrného parku. Maximální akciový podíl jednotlivých investorů by byl omezen tak, aby se dosáhlo většího počtu individuálních investorů a tím změny pohledu obyvatel na větrné elektrárny. Snahou při realizaci takového projektu je minimalizovat riziko drobných investorů a tím ještě zatraktivnit investici.

3.3.1 Postup výstavby

Celý proces výstavby by začínal stavebním povolením, o tento proces by se postaral investor. Následoval by výběr vhodné banky, která by nám pomohla s financováním. Následně by občané dotčených obcí dostali možnost koupě prioritní akcie za 1 Kč, tím by se stali občané oficiálně akcionáři větrného parku. Investor by následně vyhlásil úpisy a každý z akcionářů nahlásil, o jaký počet akcií má zájem. Cena jedné akcie by byla stanovena na 1000 Kč. Po koupi akcií by následovalo zahájení stavby, které by měl na starosti investor. Stejně tak uvedení větrného parku do provozu a následné naplnění rezervních fondů banky. Pomocí dividend by po spuštění větrného parku občané inkasovali zisk.

3.3.2 Příkladová případová studie rozdělení investic

Celý projekt větrného parku by byl tedy financován ze tří stran. Největší výši investice by poskytla banka, která by pokryla celých 80 % finančních prostředků na realizaci. Zbylých 20 % investice by poskytl investor a občané a to v poměru 15 % investor a 5 % občané. V tabulce 3.1 je modelová situace financování větrného parku. Z této tabulky je patrné, že při výši investice 400 000 000 Kč se občané podílí na její realizaci částkou 20 000 000 Kč. Tato částka by představovala 20 000 vydaných akcií s cenou jedné akcie 1000 Kč.

Tab. 3.1 Modelový příklad financování větrného parku

Výše investice	400 000 000 Kč
Vlastní kapitál 20 %	80 000 000 Kč
- z toho investor	60 000 000 Kč
- z toho občané	20 000 000 Kč
Bankovní úvěr	320 000 000 Kč
Doba splatnosti úvěru	13 let
Počet vydaných akcií pro občany	20000 ks

3.3.3 Zřejmé výhody

Tato forma financování větrného parku se zapojením občanů přilehlých obcí by mohla výrazně pomoci dlouhodobě neprůchodným projektům výstavby větrných elektráren. Pro občany jakožto silně konzervativní investory by tato forma mohla být vhodným zhodnocováním svých peněz s minimálním rizikem. Tím, že svoje investované peníze budou mít každodenně na očích a tak pod kontrolou, zvýší se jejich důvěra ve svojí investici na rozdíl od investic do různých projektů, které jsou realizované tisíce kilometrů od jejich domovů.

Závěr

V první části této práce jsem se zabýval historií větrných elektráren a technickým popisem všech částí větrné elektrárny. Popsal jsem princip vzniku větru i s ukázkou odvozením vzorce pro výkon větru. Dále jsem se v první části zabýval všemi částmi větrného motoru a jednotlivé části jsem detailně popsal. V závěru této části jsem se zaměřil na řízení činného výkonu a na strategie při jeho řízení.

Druhá část diplomové práce byla zaměřena na návrh větrného parku. Jako vhodnou lokalitu jsem zvolil oblast Lipenské přehrady, v jejíž blízkosti na Rakouské straně již několik let stojí větrný park Sternwald. Návrh počítal s třemi větrnými elektrárnami. Při návrhu typu větrné elektrárny jsem vybíral ze dvou typů turbín od firmy Enercon. Jednalo se o turbíny s označením Enercon E-101 o jmenovitém výkonu 3050 kW a Enercon E-82 E2 s jmenovitým výkonem 2300 kW. Nakonec jsem zvolil jako vhodnější variantu turbínu Enercon E-101, jelikož její koeficient ročního využití výkonu byl o 3,62 % vyšší a celkovou vyrobenou energií za rok předčila turbínu Enercon E-82 E2 téměř o 1/3.

Ve své poslední části diplomové práce jsem se zabýval možností vstupu drobných investorů do realizace větrných elektráren. V této kapitole jsem nastínil problémy, které má Česká republika při snaze realizace větrných elektráren s negativním postojem občanů, v jejichž blízkosti by se větrná elektrárna stavěla. Ukázal jsem možnou cestu, jak stavbu větrné elektrárny ztraktivnit i pro obyčejné občany. Závěrem jsem na modelovém příkladu ukázal, jak by takové zapojení občanů pomocí koupě akcií mohlo fungovat.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] RYCHETNÍK, Václav, Josef JANOUŠEK a Jiří PAVELKA. *Větrné motory a elektrárny*. Praha: ČVUT, 1997. ISBN 8001015637.
- [2] Nové poznatky o technologickém vybavení větrných mlýnů v ČR. In: *Povětrník* [online]. 2008 [cit. 2016-11-18]. Dostupné z: <http://povetrnik-cz.svethosting-tmp.cz/rs/view.php?cislocclanku=2008051201>
- [3] *Časopis Elektro*. [online]. [cit. 2016-11-21] Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/z-historie-vetrnych-elektren--13364>
- [4] BROŽ, Karel a Bořivoj ŠOUREK. *Alternativní zdroje energie*. Praha: ČVUT, 2003. ISBN 90-01-02802-X.
- [5] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 254 s. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [6] VOBOŘIL, David. Větrné elektrárny – princip, rozdělení, elektrárny v ČR. In: *O energetice* [online]. 2015 [cit. 2016-12-06]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/typy-elektren/vetrne-elektrarny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni/>
- [7] Česká společnost pro větrnou energii. [online]. [cit. 2016-12-07]. Dostupné z: <https://www.csve.cz>
- [8] Ústav fyziky atmosféry AV ČR [online]: [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: <http://www.ufa.cas.cz/struktura-ustavu/oddeleni-meteorologie/projekty-egp/vetrna-energie/vetrna-mapa.html>
- [9] Mapy. [online]. [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: <https://mapy.cz/letecka?x=14.2313913&y=48.5864772&z=14>
- [10] BAU, Erich. *Windkraftanlagen : Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*. Berlin: Springer Vieweg, 2014. ISBN 9783642288760.
- [11] *Tzbinfo: Roční využití výkonu větrných elektráren v České republice Zdroj: http://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/11077-rocni-vyuziti-vykonu-vetrnych-elektren-v-ceske-republice* [online]. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/11077-rocni-vyuziti-vykonu-vetrnych-elektren-v-ceske-republice>
- [12] Enercon: Energie für die Welt. ENERCON. [online]. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://www.enercon.de/en/products/ep-3/e-101>

- [13] *Obří tunel z Lipna do Dunaje se dostal na český seznam investic pro EU* [online]. MAFRA, 2015 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: http://budejovice.idnes.cz/precerpavaci-vodni-elektrarna-lipno-dunaj-fjf-/budejovice-zpravy.aspx?c=A150109_2129705_budejovice-zpravy_jkr
- [14] *Tzbinfo: Vývoj výkupních cen větrné energie a ostatních obnovitelných zdrojů* [online]. [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: <http://csve.cz/clanky/vyvoj-vykupnich-cen-ventrne-energie-a-ostatnich-obnovitelnych-zdroju/278>
- [15] ČSN EN 61000-3-2 ed.3. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 3-2: Meze – Meze pro emise proudu harmonických (zařízení se vstupním fázovým proudem ≤ 16 A)*. vyd. Praha, 2006. Dostupné z: <https://csnonlinefirmy.unmz.cz/default.aspx>
- [16] Pravidla provozování distribučních soustav: Příloha 4: Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy. Dostupné z: www.eon-distribuce.cz/cs/distribuce-elektriny/predpisy.shtml.2011.

