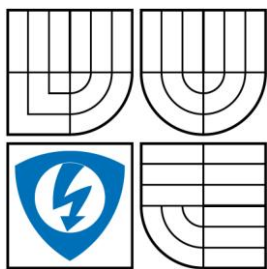


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

# VLIV INTEGRACE VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN DO ES

INFLUENCE OF WIND FARM INTEGRATION TO POWER SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETR POSPÍŠIL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ MALÝ

BRNO 2008

>>Vložit zadání práce<<

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Petr Pospíšil  
Bytem: Felberova 677/11, 56802, Svitavy - Lány  
Narozen/a (datum a místo): 9. 5. 1986, Boskovice  
(dále jen „autor“)

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,  
se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno,  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.  
(dále jen „nabyvatel“)

## Čl. 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
  - ☐ diplomová práce
  - ☐ bakalářská práce
  - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Vliv integrace větrných elektráren do ES  
Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jiří Malý  
Ústav: Ústav elektroenergetiky  
Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v\*:

- |                                             |   |                 |   |
|---------------------------------------------|---|-----------------|---|
| <input type="checkbox"/> tištěné formě      | – | počet exemplářů | 1 |
| <input type="checkbox"/> elektronické formě | – | počet exemplářů | 1 |

---

\* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ☐ ihned po uzavření této smlouvy
  - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
  - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
  - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
  - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

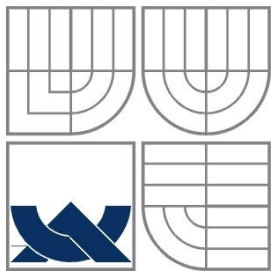
Bibliografická citace práce:

POSPÍŠIL, P. Vliv integrace větrných elektráren do ES. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 53 stran. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Malý.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Zároveň bych na tomto místě chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Malému za cenné rady a připomínky k mé práci, poskytnutou literaturu a svým rodičům za podporu během celé doby mého studia.

.....



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav elektroenergetiky**

**Bakalářská práce**

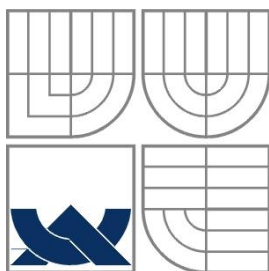
# **Vliv integrace větrných elektráren do ES**

**Petr Pospíšil**

**vedoucí: Ing. Jiří Malý**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2008**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**



**Faculty of Electrical Engineering and Communication**  
**Department of Electrical Power Engineering**

**Bachelor's Thesis**

# **Influence of Wind Farm Integration to Power System**

**by**

**Petr Pospíšil**

**Supervisor: Ing. Jiří Malý**

**Brno University of Technology, 2008**

**Brno**

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce je rozdělena do čtyř hlavních bodů. První bod obsahuje popis vzniku větru, princip a rozdělení větrných motorů a popis větrné elektrárny jako celku. Druhá část se zabývá rozborem vlivů větrné elektrárny na elektrizační soustavu a analyzuje problémy vznikající v sítích s velkým množstvím instalovaných větrných motorů. V dalším bodě jsou analyzovány síťové kodexy zahraničních soustav (Německo, Dánsko, Irsko). Na základě této analýzy jsou v poslední části shrnuty návrhy úpravy síťového kodexu distribuční soustavy České republiky.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Větrná elektrárna/park; Integrace větrných elektráren; Síťový kodex



## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis is divided into four main parts. The first point includes a characterization of the origin of wind, a principle and a division of the wind – mill motors and a characterization of a wind power plant. The second part analyses effects which the wind power plants have on the power system and also analyses grid problems with large amount of installed wind – mill motors. In the other point national grid codes are analysed (such as Germany, Denmark, and Ireland). On the bases of these analyses the suggestions of the modifications of the Czech distribution grid code are summarized.

**KEY WORDS:** Wind power plant/farm; Wind power plants integration; Grid code

## OBSAH

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>                                                | <b>11</b> |
| <b>SEZNAM TABULEK .....</b>                                               | <b>13</b> |
| <b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>                                      | <b>14</b> |
| <b>1 ÚVOD .....</b>                                                       | <b>15</b> |
| <b>2 STRUČNÁ KLASIFIKACE VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN .....</b>                    | <b>16</b> |
| <b>2.1 VÍTR .....</b>                                                     | <b>16</b> |
| 2.1.1 VZNIK VĚTRU .....                                                   | 16        |
| 2.1.2 MĚŘENÍ RYCHLOSTI VĚTRU .....                                        | 16        |
| 2.1.3 VÍTR – ZDROJ ENERGIE .....                                          | 17        |
| <b>2.2 VĚTRNÉ MOTORY A JEJICH ROZDĚLENÍ.....</b>                          | <b>18</b> |
| 2.2.1 ODPOROVÉ VĚTRNÉ MOTORY .....                                        | 18        |
| 2.2.2 VZTLAKOVÉ VĚTRNÉ MOTORY .....                                       | 20        |
| 2.2.3 PRINCIP VĚRNÉHO MOTORU .....                                        | 20        |
| <b>2.3 VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA.....</b>                                         | <b>24</b> |
| 2.3.1 SESTAVA ZAŘÍZENÍ .....                                              | 24        |
| 2.3.2 NOVÉ TECHNOLOGIE.....                                               | 24        |
| 2.3.3 INTERAKCE S OKOLÍM .....                                            | 25        |
| <b>3 ROZBOR VLIVŮ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN NA ES .....</b>                     | <b>27</b> |
| <b>3.1 VLIV VÝROBY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN NA ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVU .....</b> | <b>28</b> |
| 3.1.1 NÁHLÉ ZMĚNY VÝROBY.....                                             | 28        |
| 3.1.2 VLIV KOLÍSÁNÍ VÝROBY NA REGULAČNÍ ODCHYLKU.....                     | 30        |
| 3.1.3 VLIV ZVÝŠENÍ VÝROBY NA MEZISTÁTNÍ PŘENOSY ELEKTRINY .....           | 30        |
| <b>4 ANALÝZA SÍŤOVÝCH KODEXŮ ZAHRANIČNÍCH SOUSTAV .....</b>               | <b>32</b> |
| <b>4.1 NĚMECKO .....</b>                                                  | <b>33</b> |
| <b>4.2 DÁNSKO .....</b>                                                   | <b>38</b> |
| <b>4.3 IRSKO .....</b>                                                    | <b>43</b> |
| <b>5 NÁVRH ÚPRAVY SÍŤOVÉHO KODEXU DS ČR.....</b>                          | <b>47</b> |
| <b>6 ZÁVĚR.....</b>                                                       | <b>50</b> |
| <b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>                                           | <b>51</b> |
| <b>PŘÍLOHA A   LOKALITY FUNKČNÍCH VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN.....</b>            | <b>52</b> |

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 2-1 Ruční miskový anemometr .....                                                                                                            | 17 |
| Obr. 2-2 Větrná mapa území ČR .....                                                                                                               | 18 |
| Obr. 2-3 Schéma rotoru s krycím štítem .....                                                                                                      | 19 |
| Obr. 2-4 Řešení rotoru s natáčivými lopatkami .....                                                                                               | 19 |
| Obr. 2-5 Obvyklá schémata uspořádání vrtulí větrných motorů: .....                                                                                | 20 |
| Obr. 2-6 Odběr výkonu z proudu v proudové trubici .....                                                                                           | 21 |
| Obr. 2-7 Zatížení od rotoru .....                                                                                                                 | 25 |
| Obr. 2-8 Detail uložení – přenos zatížení přes tři řádkové válečkové ložisko .....                                                                | 25 |
| Obr. 3-1 Časový průběh prudkého poklesu výroby německých větrných elektráren .....                                                                | 29 |
| Obr. 3-2 Časový průběh nárazové změny rychlosti větru při přechodu bouřkového mraku .....                                                         | 29 |
| Obr. 3-3 Průběh celkové regulační odchylky elektrizační soustavy Rakouska a odchylky způsobené větrnými elektrárnami .....                        | 30 |
| Obr. 3-4 Výrazné zvýšení výroby v německých větrných elektrárnách a toky výkonu [MW] přes sousední elektrizační soustavy .....                    | 31 |
| Obr. 4-1 Operační oblasti energetických společností v Německu .....                                                                               | 33 |
| Obr. 4-2 Příklad výpadků větrných elektráren v důsledku poruch v sítích .....                                                                     | 34 |
| Obr. 4-3 Příklad poklesů napětí v síti při zkratech a jejich vliv na provoz větrných elektráren ...                                               | 35 |
| Obr. 4-4 Požadavek německého kodexu na větrné elektrárny při blízkém zkratu se zdroji s vysokým zkratovým proudem z hlediska poklesu napětí ..... | 35 |
| Obr. 4-5 Požadavek německého kodexu na větrné elektrárny při blízkém zkratu se zdroji s nízkým zkratovým proudem z hlediska poklesu napětí .....  | 36 |
| Obr. 4-6 Požadavek německého kodexu podpory síťového napětí během zkratu .....                                                                    | 36 |
| Obr. 4-7 Požadavek na regulační rozsah jalového výkonu .....                                                                                      | 37 |
| Obr. 4-8 Omezení výkonu větrných elektráren při vysokých frekvencích .....                                                                        | 38 |
| Obr. 4-9 Mapa dánské elektrizační soustavy .....                                                                                                  | 39 |
| Obr. 4-10 Požadavek dánského kodexu na chování větrných elektráren během poruch v síti .....                                                      | 40 |
| Obr. 4-11 Požadavek dánského kodexu na výměna jalového výkonu mezi turbínou a sítí .....                                                          | 41 |
| Obr. 4-12 Požadavek dánského kodexu na omezení výkonu větrných elektráren při vysokých frekvencích .....                                          | 42 |
| Obr. 4-13 Požadavky dánského kodexu na odpojení větrných elektráren od sítě .....                                                                 | 43 |
| Obr. 4-14 Přehled větrných parků na irském ostrově .....                                                                                          | 44 |

---

|                                                                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Obr. 4-15 Požadavek irského kodexu na chování větrné elektrárny během poruchy v síti .....</i>           | <i>45</i> |
| <i>Obr. 4-16 Požadavek irského kodexu na chování větrných elektráren při změnách frekvence v síti .....</i> | <i>46</i> |
| <i>Obr. 4-17 Požadavek irského kodexu na větrné elektrárny z hlediska rozsahu jalového výkonu..</i>         | <i>46</i> |
| <i>Obr. 5-1 Požadavek kodexu přenosových sítí na větrné elektrárny z hlediska frekvence .....</i>           | <i>47</i> |
| <i>Obr. 5-2 Požadavek českého kodexu na regulační rozsah jalového výkonu .....</i>                          | <i>48</i> |

## SEZNAM TABULEK

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Tab. A-1</i> Přehled lokalit funkčních větrných elektráren v ČR [8] ..... | 52 |
|------------------------------------------------------------------------------|----|

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

### Zkratky:

|         |                                                                  |
|---------|------------------------------------------------------------------|
| VTE     | větrná elektrárna                                                |
| ES      | elektrizační soustava                                            |
| vn, vvn | hladina vysokého (35 kV) a velmi vysokého (110 kV a více) napětí |
| DS      | distribuční soustava (110 kV)                                    |
| PS      | přenosová soustava (220 kV, 400 kV)                              |
| PPDS    | pravidla provozování DS                                          |
| HDO     | hromadné dálkové ovládání                                        |
| ARSU    | automatický systém regulace napětí                               |
| UCTE    | unie pro koordinaci přenosu elektrické energie                   |

### Symbols:

|                |                            |                    |
|----------------|----------------------------|--------------------|
| $m_s$          | hmotnostní průtok          | $\text{kg.s}^{-1}$ |
| $\rho$         | hustota vzduchu            | $\text{kg.m}^{-3}$ |
| $v$            | rychlost proudícího vzduch | $\text{m.s}^{-1}$  |
| $A$            | plocha průřezu             | $\text{m}^2$       |
| $P$            | výkon                      | W                  |
| $\eta$         | účinnost                   | —                  |
| $\cos \varphi$ | účinník                    | —                  |

# 1 ÚVOD

Výrazný rozvoj technologie větrných elektráren (VTE) a jejich vyšší uplatňování v elektrizační soustavě (ES) je trend, který se v současnosti výrazně projevuje zejména v západoevropských zemích (hlavně v Německu) a nově se začíná prosazovat také ve středoevropském regionu (v ČR, na Slovensku, v Polsku). Větrné elektrárny patří mezi obnovitelné zdroje energie, a jsou proto výrazněji podporovány jak ze strany státní regulace, tak i ze strany Evropské unie. Dokladem toho je přijatý zákon o podpoře obnovitelných zdrojů nebo závazek ČR vůči Evropské unii pokrýt 8 % hrubé domácí spotřeby do roku 2010 z obnovitelných zdrojů.

Využívání větrných elektráren k výrobě elektrické energie dodávané do rozvodných sítí je na území ČR dosti mladou technickou oblastí. Provoz větrných elektráren a provoz elektrických sítí s podílem větrných elektráren přináší jistá technická rizika, k jejichž řešení, s ohledem na současný poměrně malý podíl větrných elektráren v ČR, bychom mohli využít bohatých zkušeností států severní a západní Evropy (spolková republika Německo, Dánsko, Nizozemí).

Tato bakalářská práce se ve své první části zabývá základními principy funkce větrných elektráren a jejich stručnou klasifikací. Dále pak analyzuje problémy vznikající v sítích vvn s velkým množstvím instalovaných větrných motorů (rozběr vlivů větrných elektráren na elektrizační soustavu). Aby nedocházelo k ohrožení stability elektrizační soustavy, musí větrné elektrárny plnit jisté požadavky, které jsou kladeny na jejich chování během různých provozních stavů. Tyto požadavky jsou shrnuty v síťových kodexech. Část této práce je tedy věnována analýze síťových kodexů zahraničních ES (Německo, Dánsko, Irsko). Z ní pak vychází návrhy úprav síťového kodexu distribuční soustavy ČR, které jsou shrnuty v závěrečném oddíle.

## 2 STRUČNÁ KLASIFIKACE VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

### 2.1 Vítr

Využívání větru, jako zdroje energie, sahá již do dob dávno minulých. Již před 5000 lety využívali lodě vítr pomocí plachty ke své plavbě. První zmínka o větrných mlýnech v Persii se datuje 2200 let zpátky. Ve středověku se větrné motory začali využívat kromě přečerpávání vody také k mletí obilí, výrobě oleje, papíru a k pohonu pil. K rozvoji ve využívání větrných motorů přispělo osidlování západních oblastí USA v polovině 19. století, kde se využívali hlavně k napájení dobytka a později k výrobě elektřiny.

#### 2.1.1 Vznik větru

Vítr vzniká vlivem nerovnoměrného ohřevu zemského povrchu slunečním zářením. Suché části povrchu se ohřívají mnohem rychleji než plochy vlhké. Od ohřátého povrchu se ohřívá i přilehlá vrstva vzduchu a teplý vzduch má snahu stoupat vzhůru, protože je lehčí než vzduch studený. Celý děj je silně ovlivněn rotací Země a střídáním dne a noci. Vznikají tím v zemské atmosféře tlakové rozdíly, tlakové níže a výše. Vyrovnáváním tlakových rozdílů vzniká vítr, vane vždy od tlakové výše k tlakové níži. Vlivem rotace Země není tento pohyb přímočarý, podobá se spíše pohybu po spirále. Kolem tlakové níže na severní polokouli jde spirální pohyb proti směru hodinových ručiček, u tlakové výše ve směru hodinových ručiček. Na jižní polokouli je smysl rotace u tlakové výše a níže opačný.

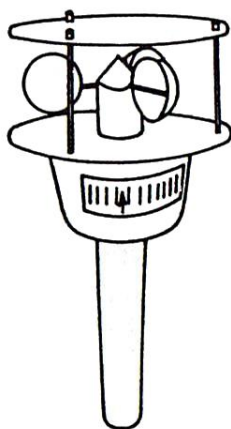
Vítr je tedy jev způsobený povrchem země. Ale neomezuje se jen na malou výšku, zasahuje do výšek středních a končí až ve výškách velkých, v našich zeměpisných šířkách přibližně v deseti kilometrech. Přízemní vítr nad pevninou je velmi silně ovlivněn tvarem povrchu, horstvem apod., na rozdíl od moře a pobřežní části pevniny, zvláště je-li pobřeží ploché. Kromě směru větru, který je nerovným zemským povrchem podstatně měněn, vznikají těsně u povrchu víry velkých rozměrů, které způsobují, že vítr nad pevninou je nestálý, co se týče intenzity, rychlosti, ale i směru. I nad pevninou existují místa, kde je vítr o větší intenzitě a je stálejší. Jsou to obvykle místa na temenech hor, v horských sedlech apod.

#### 2.1.2 Měření rychlosti větru

Chceme-li znát intenzitu větru v daném místě, musíme uskutečnit dlouhodobá měření rychlosti větru. K tomu lze v současné době použít automatické sondy, které měří rychlost pomocí běžného mističkového anemometru (obr. 2-1) [17], ve spojení s počítačem. Počítač řídí chod sondy a podle zadaného programu ve zvolených časových intervalech měří rychlost



a některé další veličiny a výsledky ukládá do paměti. Zařízení nepotřebuje trvalou obsluhu. Miskový anemometr začíná ukazovat od rychlostí 1 až 2  $m.s^{-1}$ .

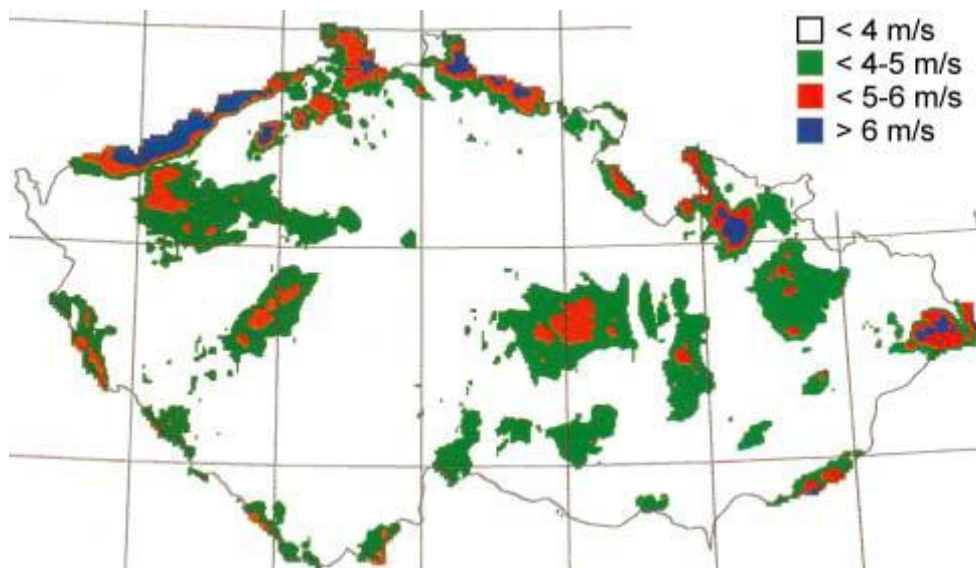


Obr. 2-1 Ruční miskový anemometr

### 2.1.3 Vítr – zdroj energie

Dolní, energeticky ještě využitelná hranice rychlosti větru je kolem 5  $m.s^{-1}$ . Vítr o menší rychlosti je u nás málo využitelný, zejména proto, že je nestálý. Svěží vánek za horkých letních dnů má právě tyto rychlosti, a jak víme, je nestálý, a tím energeticky téměř nevyužitelný. Horní využitelná hranice větru je kolem 25  $m.s^{-1}$ , tj. 90  $km.h^{-1}$ . Tato rychlost větru a ještě větší rychlosti jsou již nebezpečné a mohou způsobit škody na stromech i na budovách, ale i na větrných motorech. Proto jsou větrné motory při tak velkých rychlostech větru odstavovány.

Výběr vhodné lokality je možná největším problémem větrných elektráren. Moderní větrná turbína potřebuje k přifázování rychlost větru 3 až 4  $m.s^{-1}$ , ovšem v takovém případě je její účinnost velmi malá. Až při rychlostech větru vyšších než 10  $m.s^{-1}$  začíná větrník dosahovat optimálního výkonu. Z pohledu síly větru je situace u nás pro větrné elektrárny nepříznivá. Podle větrné mapy České republiky (obr. 2-2) [11], kterou sestavuje Ústav fyziky atmosféry Akademie věd, nepřesahuje na většině našeho území průměrná rychlost větru 4  $m.s^{-1}$ . Lokalit, kde fouká dostatečně je u nás velmi málo. Až na řídké výjimky se nacházejí v horských pohraničních pásmech a v oblasti Českomoravské vrchoviny. Rychlost větru stoupá s výškou nad povrchem země. Proto se staví i sloupy o výšce 70 metrů a více. Jako nejvhodnější lokality pro stavbu farem větrných elektráren lze považovat plochy 3×3 nebo 4×6 km v nadmořských výškách zpravidla nad 700 m.



Obr. 2-2 Větrná mapa území ČR

## 2.2 Větrné motory a jejich rozdělení

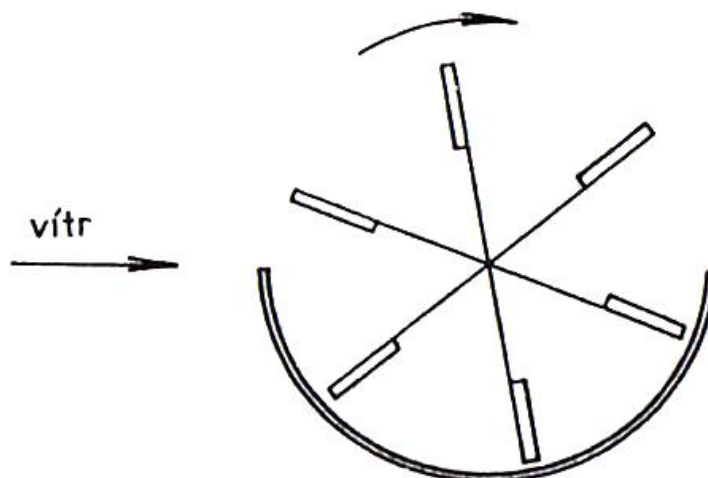
Větrné motory dělíme podle různých kritérií. Za nejdůležitější je třeba pokládat aerodynamický princip, který má pro činnost větrného motoru největší význam. Podle něj dělíme motory na vztlakové a odporové [17].

### 2.2.1 Odporové větrné motory

Větrné motory pracující na odporovém principu patří mezi nejstarší a mohou mít vodorovnou i svislou osu otáčení. Svoji konstrukcí se mohou značně lišit. Jejich podstatou však je, že plocha nastavená proti větru mu klade aerodynamický odpor, proud vzduchu zpomaluje a je na ní vyvozována síla, která je mechanicky přeměňována obvykle na rotační pohyb. Plocha nastavená proudu vzduchu se pohybuje přibližně v jeho směru rychlostí menší, než je rychlost větru, vzniká však problém, jak ji dostat na výchozí místo. To lze provést několika způsoby:

1. Funkční plocha má takový tvar, aby byl její odpor různý při různých směrech pohybu. Příkladem takového provedení je miskový anemometr. Polokoule orientovaná svojí dutinou proti větru mu klade odpor přibližně 3,5krát větší než polokoule nastavená proti směru větru svojí vypuklou částí. Síla působící na polokouli je při stejné rychlosti větru přímo úměrná odporu, takže na rotoru složeném ze 3 až 4 dutých polokoulí, pravidelně rozmístěných po obvodu, vzniká moment sil, který jím otáčí. Na podobném principu je založen i rotor typu „Savonius“, kde jsou kulové plochy nahrazeny plochami válcovými. Nejčastěji jsou to dvě poloviny válcové plochy s kruhovou základnou, navzájem přesazené, s různým poměrem výšky a průměru rotoru.

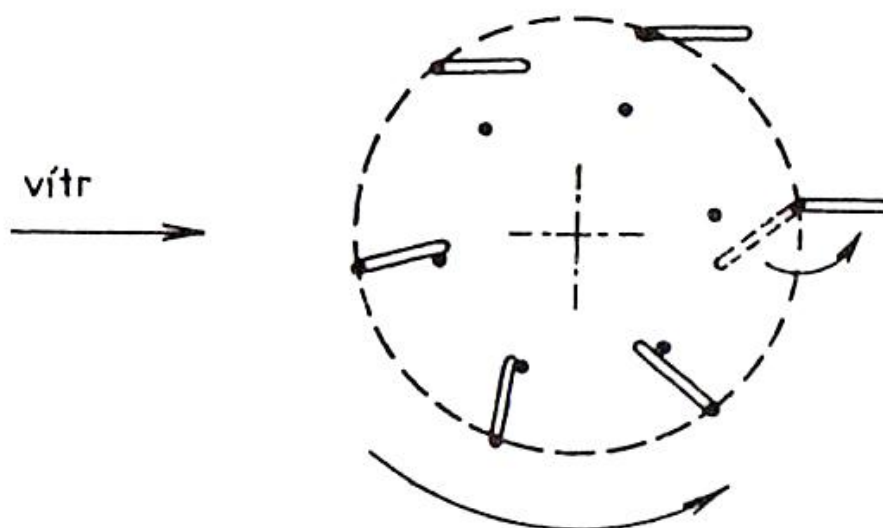
Vyskytují se i prizmatické rotory ve tvaru otevřeného písmene S v příčném řezu nebo jinak tvarované a profilované. Taková řešení však nepřinášejí žádné zvláštní výhody.



Obr. 2-3 Schéma rotoru s krycím štítem

2. Část rotoru, která se pohybuje proti větru, je kryta štítem, který se musí podle směru větru natáčet (obr. 2-3) [17]. Tento princip lze použít i v uspořádání s vodorovnou osou, kde je skryta spodní polovina rotoru. V tomto případě se však musí celý větrný motor natáčet podle směru větru.

3. Mění se velikost plochy rotoru vystavená větru podle toho, zda se pohybuje v jeho směru nebo ve směru opačném. Tohoto principu se používalo u starých čínských větrných motorů. Vyžaduje však zvláštní mechanismus, který umožňuje samočinné natáčení lopatek rotoru nebo sám jejich natáčení ovládá (obr 2-4) [17].

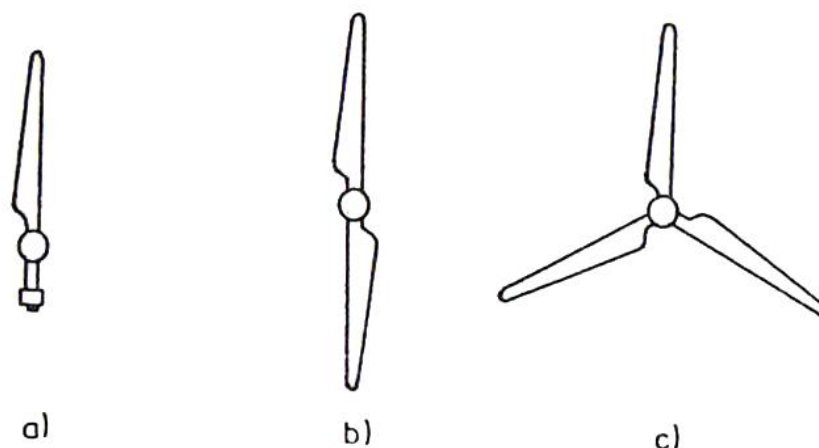


Obr. 2-4 Řešení rotoru s natáčivými lopatkami

### 2.2.2 Vztlakové větrné motory

Mezi větrné motory pracující na vztlakovém principu patří vrtule a větrná kola s vodorovnou osou, které jsou orientovány svojí rovinou otáčení kolmo ke směru větru. Vrtule se vyskytují nejčastěji ve dvou nebo třílistém provedení, byly však též vyrobeny jednolísté vrtule s protizávažím (obr. 2-5) [17]. Čtyřlísté vrtule bývají používány spíše z technologických důvodů v souvislosti s výrobou hlavy rotoru. U některých rotorů jsou vrtulové listy kolem své podélné osy natáčivé a umožňují tak snadnější rozběh rotoru, lepší regulaci otáček a výkonu, aerodynamické brzdění a případně snížení odporu vrtule při zastaveném rotoru.

Byly navrženy i další typy větrných motorů, které však není možné jednoduše zařadit do žádného ze zmíněných typů. Občas se objeví zcela nový typ motoru, avšak tyto inovace nepřinášejí výrazné výhody.



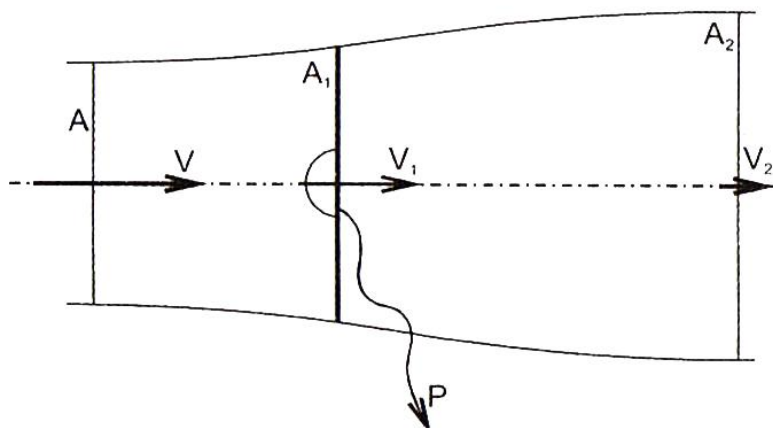
Obr. 2-5 Obvyklá schémata uspořádání vrtulí větrných motorů:

a) jednolístá, b) dvoulístá, c) třílístá

### 2.2.3 Princip větrného motoru

Větrné motory se používají k přeměně kinetické energie větru na mechanickou práci. Základní princip jejich funkce spočívá v tom, že zpomalují proud vzduchu, který protéká jejich pracovní plochou, a tím odnímají část jeho energie. To znamená, že nelze odebrat z jednotkové plochy více energie, než vítr obsahuje.

Na obrázku obr. 2-6 [14] je obecné schéma přeměny kinetické energie větru na výkon. Přitékající vzduch o rychlosti  $v$  má vyšší kinetickou energii než odtékající vzduch daleko za větrným motorem. Rozdíl těchto energií byl přeměněn v práci na hřídeli motoru a též na rozvíření proudu vzduchu a nakonec na teplo.



Obr. 2-6 Odběr výkonu z proudu v proudové trubici

Protékající vzduch má po délce proudové trubice konstantní hmotnost. Daleko před větrným motorem je jeho rychlost v proudové trubici dána rychlostí větru, kterou označíme písmenem  $v$ . V místě kolem větrného motoru se zmenšuje, tuto rychlost označíme  $v_1$ . Daleko za větrným motorem budeme rychlost v proudové trubici označovat  $v_2$ . Můžeme tedy pro vybrané řezy v proudové trubici sestavit rovnici popisující zákon zachování hmotnosti

$$m_s = \rho v A = \rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 \quad (2.1)$$

kde

$\rho$  je hustota vzduchu ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $\rho = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$   
 $A, A_1, A_2$  plochy průřezu podél proudové trubice ( $\text{m}^2$ )

Veličina  $m_s$  je hmotností průtok v proudové trubici (její rozměr je  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Číselnou hodnotu tohoto průtoky neznáme, protože daleko před větrným motorem známe rychlost větru  $v$  a neznáme plochu  $A$ , v místě větrného motoru známe plochu  $A_1$  a neznáme rychlost  $v_1$  a daleko za větrným motorem obecně neznáme žádnou z veličin kromě hustoty, která je nekonstantní po celé délce proudové trubice. Plocha  $A_1$  je dána rozměry větrného motoru, např. u vrtule je to kruh opsaný listy o průměru  $D_1$ . Číselné hodnoty hmotnostního průtoky lze vypočítat, ale poměry průřezů nejsou konstantní a závisejí na rychlosti větru a velikost odebíraného výkonu. Tuto nesnáz nejčastěji obcházíme tak, že uvažujeme přibližně hmotnostní průtok daný součinem hustoty, rychlosti větru daleko před větrným motorem a průřezem v místě větrného motoru. Dostaneme tak hmotnostní průtok, který je větší než skutečný, údaj je správný pouze při nulovém odběru výkonu z proudové trubice.

Z toho dále vyplývá, že i výkon daný skutečným hmotnostním průtokem vzduchu je menší než výkon určený z přibližného výpočtu hmotnostního průtoky. Rychlosti  $v_1$  a  $v_2$  obecně neznáme, z teorie však vyplývá, že  $v_1$  je střední rychlost mezi  $v$  a  $v_2$ , tj. platí vztah

$$v_1 = \frac{v + v_2}{2} \quad (2.2)$$

a mezi rychlostmi platí nerovnost  $v \geq v_1 \geq v_2$ . Rovnost mezi rychlostmi platí pouze při nulovém odběru výkonu z proudové trubice.

Výkon vstupující do proudové trubice je dán součinem hmotnostního průtoku a druhé mocniny rychlosti na vstupu neboli rychlosti větru. Výkon vystupující z proudové trubice daleko za větrným motorem je dán podobně, pouze použijeme výstupní rychlost  $v_2$ . Rozdíl těchto výkonů je to, co se objeví na hřídeli větrného motoru jako jeho výkon (až na nepříliš vysoké ztráty třením, které výstupní výkon na hřídeli snižují). Můžeme tedy pro výkon na hřídeli větrného motoru psát

$$P = m_s \frac{v^2 - v_2^2}{2} \quad (2.3)$$

kde

|               |                                   |
|---------------|-----------------------------------|
| $P$           | je výkon (W)                      |
| $m_s$         | hmotnostní průtok ( $kg.s^{-1}$ ) |
| $v_1$ a $v_2$ | rychlosti ( $m.s^{-1}$ )          |

Účinnost přeměny protékajícího výkonu větru na výkon na hřídeli větrného motoru je potom dána poměrem tohoto výkonu k celkovému výkonu na vstupu do proudové trubice. Po úpravách dostaneme vztahy pro výpočet účinnosti z rychlostí  $v_2$  i  $v_1$

$$\eta_t = 1 - \frac{v_2^2}{v^2} = 4 \cdot \left( \frac{v_1}{v} - \frac{v_1^2}{v^2} \right) \quad (2.4)$$

kde  $\eta_t$  je teoretická účinnost větrného motoru

Maximální účinnosti dosáhneme, je-li  $v_2$  nulová a poměr  $v_1/v = 0,5$ . Potom dosáhneme teoretické účinnosti 1, tj. 100%. V praxi je tato hodnota nedosažitelná z mnoha důvodů, hlavně však proto, že i daleko za větrným motorem musí vzduch v proudové trubici proudit a odtékat, rychlost  $v_2$  nemůže být zcela nulová. Protože skutečný hmotnostní průtok můžeme určit pouze dosti složitým výpočtem, při odhadu maximální účinnosti použijeme hmotnostní průtok též maximální. Potom pro účinnost můžeme psát

$$\eta = \frac{\rho A_1 v_1}{\rho A_1 v} \left( \frac{v^2 - v_2^2}{v^2} \right) = 4 \cdot \frac{v_1}{v} \left( \frac{v_1}{v} - \frac{v_1^2}{v^2} \right) \quad (2.5)$$

Maxima účinnosti v tomto případě dosáhneme při poměru rychlosti  $\frac{v_1}{v} = \frac{2}{3}$ . Maximální účinnost je (po dosazení  $\frac{2}{3}$  za  $\frac{v_1}{v}$  do předcházející rovnice)

$$\eta = \frac{16}{27} \approx 0,593 \quad (2.6)$$

Maximální účinnost větrného motoru určená z rychlosti větru  $v$  a aktivní plochy větrného motoru je téměř 60%. Tento výsledek je někdy nazýván Betzova účinnost. Uvedená hodnota poměru rychlosti dosazená do vzorce pro  $\eta_t$  dává

$$\eta = \frac{8}{9} \approx 0,89 \quad (2.6)$$

Skutečné účinnosti větrných motorů jsou obvykle ještě trochu menší a v případě Betzovy účinnosti dosahují hodnot maximálně kolem 50%.

Shrnutím dosavadních výsledků vyplývá odhad výkonu, který lze získat z větrného motoru při dosazení za  $\eta = 0,5$  a za  $\rho = 1,2$ . Činitel 0,3 klesá s účinností.

$$P = \frac{\rho \eta A_1 v^3}{2} \approx 0,3 A_1 v^3 \quad (2.7)$$

## 2.3 Větrná elektrárna

### 2.3.1 Sestava zařízení

K odvodu energie z větrného motoru a správné funkci celého zařízení potřebujeme vytvořit sestavu celé větrné elektrárny.

Do sestavy patří stojan, stožár, na kterém jsou všechny další systémy umístěny. Stožár umísťuje větrný motor do větší vzdálenosti od povrchu země, kde je vyšší rychlost větru. Současně stožár musí odolat všem silám, které působí na vrtuli nebo na rotor. U velkých elektráren se nejčastěji používá kónický tubusovitý stožár, jehož výhody jsou v jednoduchosti tvaru při současné dostatečné pevnosti, stabilitě a tuhosti, neboť působící síly jsou velké.

Další velmi namáhanou součástí větrného motoru je vrtulová hlava, která přenáší všechny síly a momenty z vrtulových listů na hřídel. Někdy navíc obsahuje i systém nastavování listů, otáčení listu kolem jeho podélné osy, čímž se reguluje výkon vrtule.

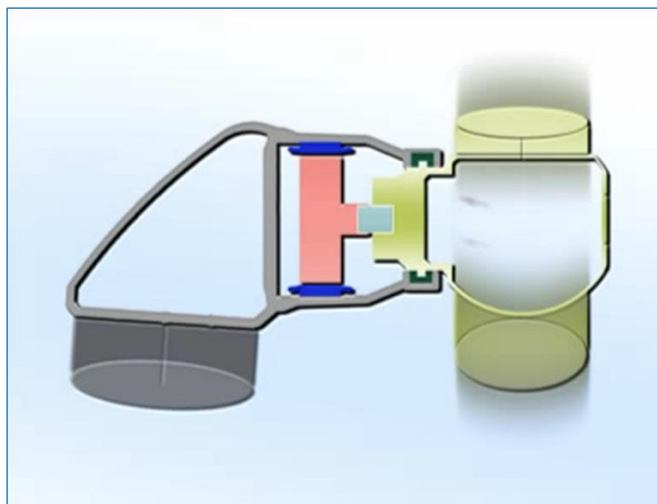
Mezi větrný motor a elektrický generátor se vkládá převodovka, které zvyšuje otáčky vrtule, které jsou u velkých motorů nízké až velmi nízké. Elektrická energie se vyrábí v generátorech, odkud je odváděna do elektrorozvodné sítě. Mezi převodovkou a generátorem je obvykle ještě umístěna mohutná disková brzda, která musí zastavit otáčení rotoru za všech okolností.

Celý tento systém, tj. vrtule s vrtulovou hlavou, převodovkou a generátorem, je umístěn v tzv. gondole, která je otočná na stožáru. Všechny tyto součásti jsou velké a těžké a v gondole jsou umístěny na dosti mohutné základně, která je tvořena ocelovými nosníky, a je spojena s točnou na speciálním ložisku. Při montáži jednotlivých dílů na základnu je nutné vložit protihlukové izolace mezi jednotlivé stroje a základnu. Kryt gondoly bývá též odhlučněn.

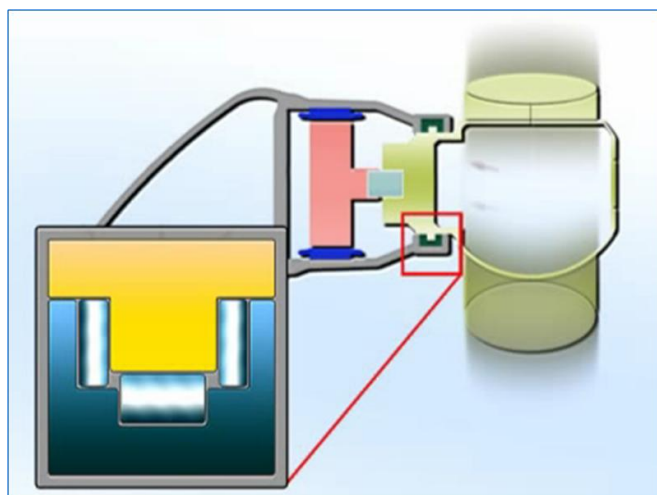
### 2.3.2 Nové technologie

Mezi nové technologie patří řešení planetové převodovky s pomaloběžným synchronním generátorem (systém Multibrid) finského výrobce Winwind, kde je rotor spojen s převodovkou za pomoci speciálně navrženého ložiska, které přenáší zatížení od rotoru přímo na hlavní nosný díl (odlitek) mimo převodovku a generátor. Tímto řešením se udržuje celý pohon v chodu bez deformací a bez zatížení od rotoru. Tato novinka je použita u nové větrné elektrárny Pchery na Kladensku, která je se svým instalovaným jednotkovým výkonem  $2 \times 3 \text{ MW}$  největší větrnou elektrárnou v ČR [4].





Obr. 2-7 Zatížení od rotoru



Obr. 2-8 Detail uložení – přenos zatížení přes tři řádkové válečkové ložisko

### 2.3.3 Interakce s okolím

Vybudováním větrné elektrárny učiníme určitý zásah do přírody a nejbližší okolí bude elektrárnou ovlivněno (případný hluk, vliv na ekosystém). Stejně tak budou působit přírodní jevy na elektrárnu (vítr, námraza, déšť, úder blesku).

Již při konstrukci a výrobě větrného motoru jsou uvažována jistá namáhání vyvolaná změnami jeho směru rychlosti. Při vyšších rychlostech větru než  $25 \text{ m.s}^{-1}$  bezpečnostní systém motor zastavuje a případně mění polohu rotoru, aby se snížil jeho odpor, který rotor proudícímu větru klade a aby nedošlo k destrukci motoru.

Dále může být elektrárna ovlivněna vznikem námraz, které znečišťují rotorové listy a které mohou porušit vyvážení rotoru a vyvolat vibrace celého motoru s destrukčními následky. Zároveň mohou odlétávat kousky ledu z listů rotoru, a proto se elektrárna odstavuje.

Např. elektrárna Dlouhá Louka v Krušných horách byla v období 1994 - 1997 skoro 11 % času neschopná provozu právě z důvodu námrazy.

Větrné motory musí mít ochranu vůči zasažení bleskem tím spíše, že jsou většinou postaveny na vyvýšeném místě. U větrných elektráren může blesk poškodit celý ovládací systém, aniž by byla zasažena samotná větrná elektrárna.

Námitky ve smyslu újmy na estetickém vzhledu krajiny mají vždy subjektivní charakter a vnímání symbiózy přírodních a umělých prvků je vždy věcí zvyku. Ekologové dosti často větrnou energetiku prosazují protože neprodukuje tuhé či plynné emise a odpadní teplo, nezatěžuje okolí odpady, ke svému provozu nepotřebuje vodu. Větrná elektrárna nepředstavuje významný zábor zemědělské půdy, minimální jsou i nároky na plochu staveniště.

Ochránci přírody bývá v mnoha případech nadhodnocován negativní vliv akustických emisí na okolí. Jde přitom o hluk, jehož zdrojem je strojovna elektrárny, popř. interakce proudícího vzduchu s povrchem listů rotoru a uvolňováním vzduchových vírů za hranou listů. Tento hluk je snižován modernějšími technologiemi. Hladina hluku na úrovni 500 m od stroje se pohybuje okolo 35–40 dB, což je zhruba hladina hluku v obývacím pokoji. Agentura ochrany přírody a krajiny uvádí [8], že les ve vzdálenosti 200 metrů vydává při rychlostech větru 6–7 m.s<sup>-1</sup> přibližně stejný hluk jako větrná elektrárna ve stejné vzdálenosti. Povolené hladiny hluku v místě nejbližší budovy jsou podle českých zákonů na úrovni 50 dB (den) a 40 dB (noc). Tyto limity dodrží větrné elektrárny zcela bez problémů.

Chování ptáků ale i divokých zvířat v blízkosti větrných elektráren je rozdílné. Zatímco některé druhy ptáků staví svá hnízda částečně v úkrytu generátorových skříní, jiné druhy se okolí elektráren vyhýbají. K zajímavému závěru došel tříletý výzkum [8], který sledoval jak rozsáhlé území s celkem 36 větrnými elektrárnami, tak i oblasti, kde turbíny nejsou. Hustota zvěře na území s elektrárnami zůstávala stejná, nebo se dokonce zvyšovala.

### 3 ROZBOR VLVŮ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN NA ES

Jak již bylo řečeno v úvodu této práce, rozvoj technologie větrných elektráren a jejich výraznější uplatnění v elektrizační síti se stává trendem, který se nejvíce projevuje v zemích západní Evropy (hlavně Německo) a nově se začíná projevovat v zemích Evropy střední (ČR, Slovensko, Polsko).

V České republice jsou větrné elektrárny o jednotkovém instalovaném výkonu vyšším než 100 kW provozovány ve 35 lokalitách. Přehled těchto lokalit je uveden v příloze A. Celkový instalovaný výkon těchto elektráren dosahuje 106 MW [10]. Takový výkon je téměř patnáctinásobný oproti instalovanému výkonu z konce roku 2002, kdy instalovaný výkon dosahoval hodnoty 7 MW [10]. Do roku 2015 lze očekávat nárůst instalovaného výkonu až na 1100 MW [15].

Připojením větrné elektrárny nebo větrné farmy k elektrizační soustavě se začnou projevovat jisté vlivy na provoz soustavy, které se dají rozdělit na lokální a systémové [16].

Lokálním vlivům nelze zcela zamezit, protože se uplatňují vždy. Dají se však omezit použitím vhodných technologií a způsobem připojení k elektrizační síti.

Systémové vlivy se projevují až u většího počtu větrných elektráren v soustavě, proto se v elektrizační soustavě ČR vliv českých větrných elektráren zatím výrazněji neprojevuje. Příkladem země v jejíž elektrizační soustavě dochází k výraznému výskytu systémových vlivů může být Německo, které je s instalovaným výkonem 22 247 MW [12] soustředěným na severu území lídrem ve využití větrné energie na světě.

#### **Projevy lokálních vlivů na síť:**

- Přetěžování sítí – prvním kritériem pro vyvedení výkonu elektrárny do sítě je dostatečně dimenzované přípojné místo (rozvodna vn nebo vvn) a související síť až k transformační stanici mezi sítí 110 kV a přenosovou sítí.
- Kolísání napětí – větrný park může pracovat v celé řadě provozních režimů. Výsledné napětí v oblasti sítě je ovlivněno kompenzací nejen jednotlivých strojů, ale celé farmy větrných elektráren.
- Zvyšování zkratových poměrů – větrný park se z vnějšího pohledu chová jako jakákoli jiná elektrárna vyvedená do jednoho bodu sítě, takže je třeba v tomto přípojném místě počítat se změnou zkratových poměrů.
- Kvalita dodávky - větrné elektrárny jsou vybaveny regulací založenou na výkonové elektronice a jsou tedy často i rušivými zdroji v elektrické síti. Jak při návrhu, tak i provozu je třeba věnovat pozornost okolnostem součinitele dlouhodobého flickeru, vyšších

harmonických, a posoudit, zda větrná elektrárna negeneruje frekvence, které by rušili signál HDO.

### **Projevy systémových vlivů na síť:**

- Začlenění větrné elektrárny do pokrývání diagramu zatížení – dodávka z elektrárny je nestabilní a závisí na povětrnostních podmínkách. Při výskytu většího počtu elektráren v soustavě se zvyšují požadavky na velikost regulačního výkonu potřebného pro vyrovnávání odchylek způsobených větrnými elektrárnami.
- Chování větrných elektráren při blízkých zkratech v přenosové soustavě a při velkých poruchách – hrozí nebezpečí plošných výpadků větrných elektráren připojených do přenosové soustavy.
- Dopad na stabilitu elektrizační soustavy – velké větrné parky (o výkonu stovek MW) mohou mít výrazný vliv na stabilitu chodu soustavy v případě poruch a nárazových větrů (kývání).
- Snížení přenosové schopnosti na mezistátních profilech. Tyto vlivy se již projevují v Německu, kde je zastoupení větrných elektráren velké.

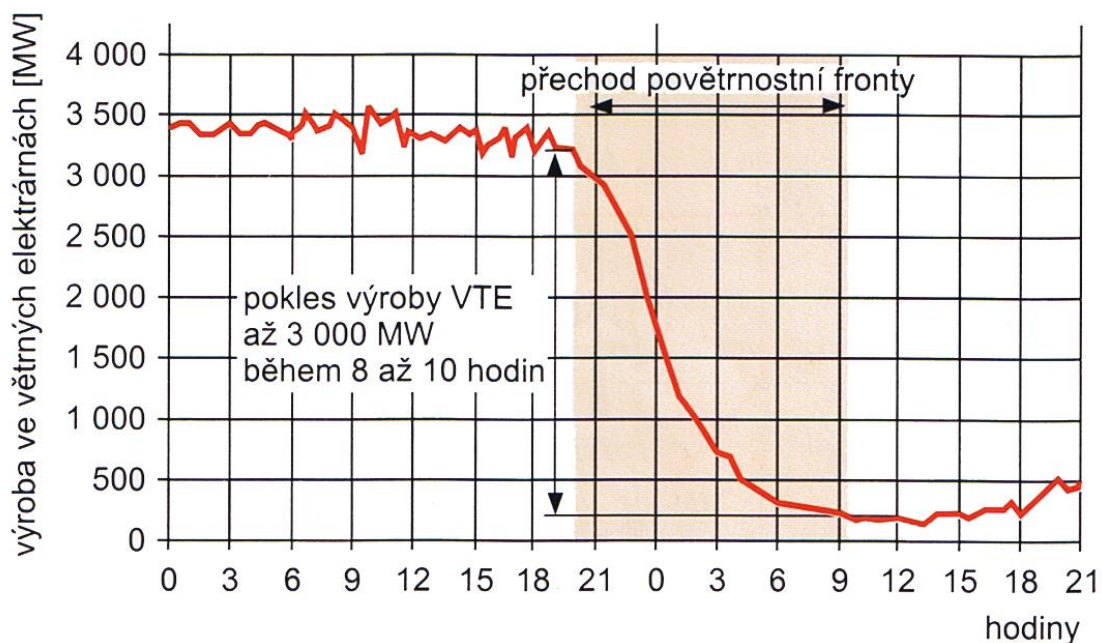
## **3.1 Vliv výroby větrných elektráren na elektrizační soustavu**

V mnoha zemích světa dochází neustále ke většímu využívání větrné energie. Díky tomu je třeba řešit problémy, které bylo možné při malém zastoupení větrných elektráren v síti považovat za zanedbatelné. Výkon větrné elektrárny závisí na rychlosti větru (závislost na třetí mocnině podle vztahu 2.7), a proto se mění s každou změnou rychlosti větru. Změny výkonu potom mohou mít nepříznivý vliv na mezinárodní elektrizační systém.

### **3.1.1 Náhlé změny výroby**

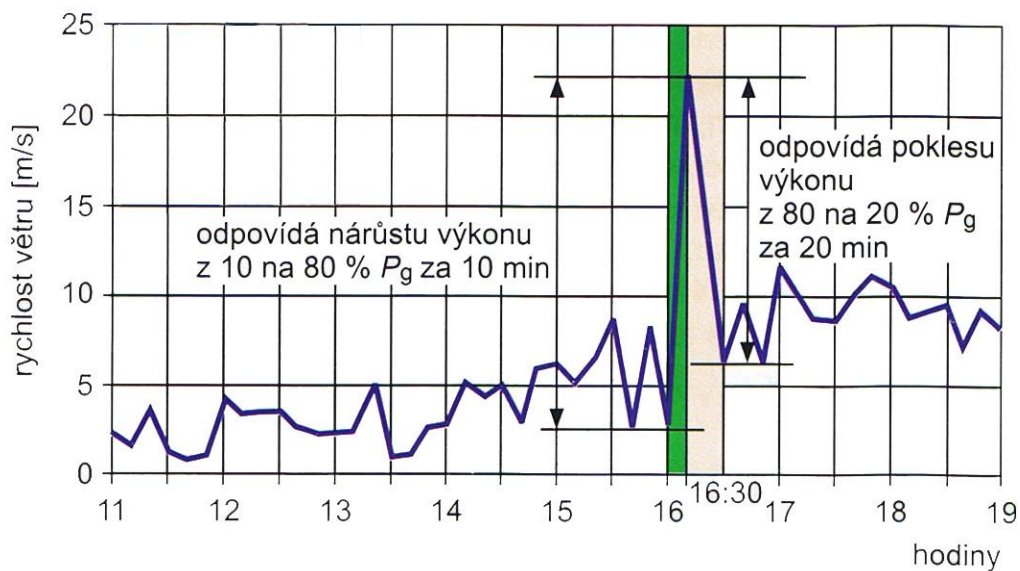
Při prudkých změnách rychlosti větru, způsobených přechodem povětrnostní fronty, může dojít k náhlým změnám výroby větrných elektráren. Tyto změny jsou vyvolány prudkým poklesem nebo prudkým nárůstem výkonu elektrárny, nebo jejím úplným odstavením v důsledku překročení maximální dovolené hodnoty rychlosti větru, aby nedošlo k destrukcím na zařízení. Takové náhlé změny ve výrobě způsobují velké problémy v regulaci soustav.

K takovým jevům došlo např. v Německu nebo v Irsku. V případě Německa došlo k poklesu výroby z větrných elektráren až o 3 000 MW během osmi až deseti hodin, což způsobilo problémy v provozu ostatních zdrojů a celé elektrizační soustavy (obr. 3–1) [16]. Pokles výkonu v Irsku představoval 74 % snížení aktuální výroby větrných farem během čtyř hodin.



Obr. 3-1 Časový průběh prudkého poklesu výroby německých větrných elektráren

Podobné povětrnostní vlivy se uplatňují i v České republice. Například při přechodu bouřkového mraku nad meteorologickou stanicí Milešovka došlo k náhlé změně rychlosti proudění větru (obr. 3-2) [16], která by také byla doprovázena prudkou změnou výroby větrné elektrárny.

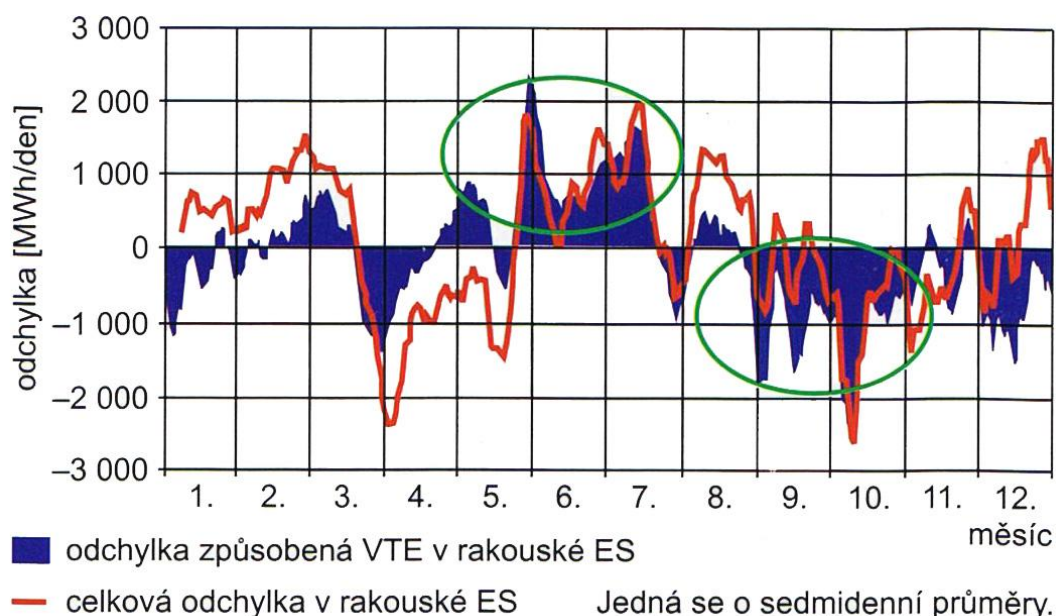


Obr. 3-2 Časový průběh nárazové změny rychlosti větru při přechodu bouřkového mraku

### 3.1.2 Vliv kolísání výroby na regulační odchylku

V rámci spolupráce elektrizačních soustav v UCTE je třeba dodržovat regulační odchylky za jednotlivé soustavy. Začlenění větrných elektráren do pokrývání diagramu zatížení je s ohledem na kolísavý a obtížně předpověditelný průběh jejich výroby problematické a v soustavách s vyšším výskytem větrných elektráren zhoršuje regulační odchylku.

Příklad průběhu regulační odchylky je znázorněn na obr. 3-3 [16]. Obrázek zachycuje celkovou regulační odchylku elektrizační soustavy Rakouska a odchylky způsobené větrnými elektrárnami. Z obrázku je patrné, že odchylky byly způsobeny převážně provozem větrných elektráren a že k větším odchylkám došlo v letním období.



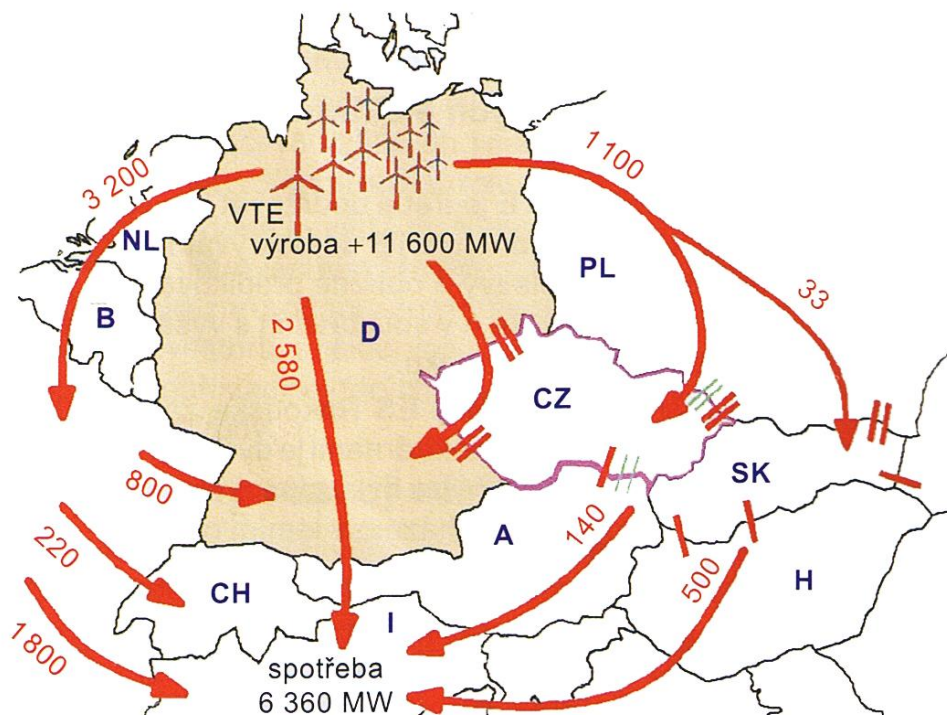
Obr. 3-3 Průběh celkové regulační odchylky elektrizační soustavy Rakouska a odchylky způsobené větrnými elektrárnami

### 3.1.3 Vliv zvýšení výroby na mezistátní přenosy elektřiny

Při velmi příznivých povětrnostních podmínkách, kdy vane stálý, rovnoměrný a rychlý vítr, dochází v dané oblasti k velikému nárůstu výroby větrných elektráren. V takovém případě elektrárny pracují téměř za plného výkonu. Výroba velkého výkonu v dané oblasti přináší požadavky na přenos značných výkonů do oblastí spotřeby. Tyto požadavky jsou kladeny především na přenosové sítě, které ale v současnosti již přesahují na území jiných států.

Jako příklad takového prudkého zvýšení výroby větrných elektráren poslouží opět sousední Německo (obr. 3-4) [16], kde prudké zvýšení výroby na severu území vyvolalo značné přenosy směrem na jih, při kterých nastaly okruhové toky energie přes elektrizační soustavy sousedních

států, hlavně přes Nizozemí, Belgie, Polsko, Českou republiku a Slovensko, přičemž je značně ovlivněna stabilita evropské elektrizační soustavy jako celku. Řešením takovýchto problémů je posilování přenosových sítí v závislosti na velikosti výroby větrných elektráren.



Obr. 3-4 Výrazné zvýšení výroby v německých větrných elektrárnách a toky výkonu [MW] přes sousední elektrizační soustavy



## 4 ANALÝZA SÍŤOVÝCH KODEXŮ ZAHRANIČNÍCH SOUSTAV

V posledních deseti letech se v mnoha zemích světa objevují snahy o co největší využití energie větru, což vede k neustále se zvětšujícímu počtu větrných farem připojených k elektrizačním sítím. Současně dochází k rozvoji samotných větrných turbín, jejichž nominální výkon se nyní pohybuje v rozsahu 3-5 MW. Z celosvětového hlediska dochází v Evropě zřejmě k největšímu nárůstu v celkovém instalovaném výkonu větrných elektráren – v Dánsku a severním Německu dochází k největšímu využívání větrné energie na světě. V roce 2006 více jak 20 % z celkové spotřeby elektrické energie v Dánsku bylo kryto využitím energie větru.

V dnešní době dochází k nahrazování velkého počtu malých turbín moderními větrnými turbínami s nominálním výkonem několik MW. Tento proces se nazývá repowering. Pro ještě větší využití větru pro výrobu elektrické energie je v poslední době věnována značná pozornost větrným farmám či parkům typu offshore, hlavně kvůli vyšší průměrné rychlosti větru a žádným prostorovým omezením (výhoda pro lidnaté země). Tyto větrné parky jsou vystavovány v mělkých vodách do třiceti hloubkových metrů. Dále pak vyžadují připojení k přenosové soustavě a musí na ně být nahlíženo jako na konvenční elektrárenské bloky.

Díky neustálému rozvoji ve využívání energie větru již vlivy větrných elektráren na elektrizační síť nemohou být považovány za zanedbatelné. Proto mnoho zemí vydalo síťové kódy nebo kodexy, které zahrnují základní pravidla pro připojování a odpojování větrných elektráren do sítí a dále požadavky, týkající se jejich chování v sítích, jako je chování při zkratech, při změnách frekvence v síti s ohledem na kvalitu dodávaného výkonu. Některé síťové kodexy vyžadují podporu poskytovanou sítím během zkratů.

Kodexy vycházejí z mnoha studií prováděných pomocí modelů větrných elektráren a mají omezovat vlivy větrných elektráren na síť.

Na získané výsledky může být nahlíženo ze dvou stran, a to jak větrné elektrárny reagují při poruchách v sítích a jak větrné elektrárny ovlivňují stabilitu napájecí sítě. Plněním požadavků stanovených v síťových kodexech je zajištěna bezpečnost dodávky větrných elektráren do napájecí sítě.

V následujících odstavcích budou podrobněji shrnuty síťové kódy některých evropských zemí, které obsahují požadavky pro úspěšné začlenění větrných elektráren do sítí bez následků na její stabilitu a kvalitu přenášené energie.

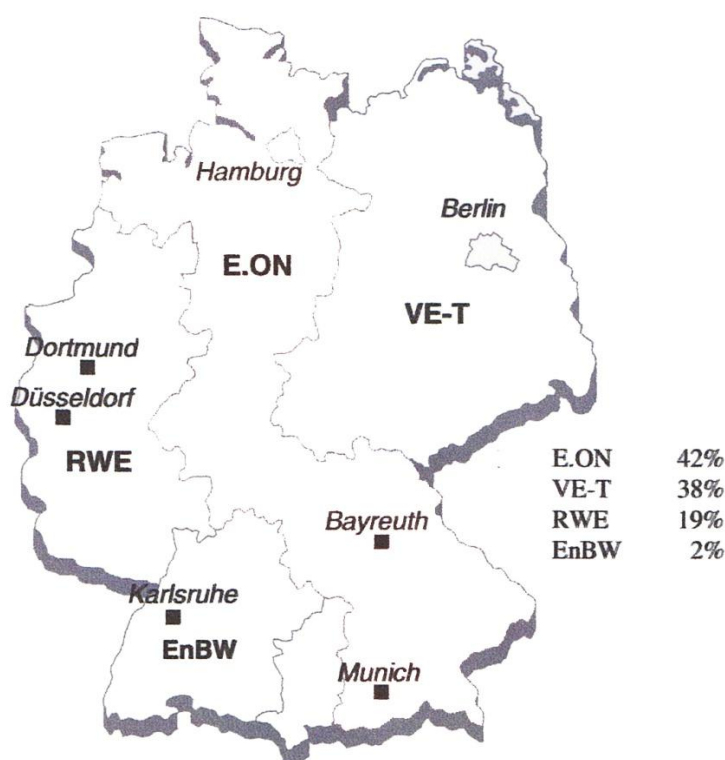


## 4.1 Německo

Jak již bylo řečeno, Německo je se svými 22 247 MW [12] instalovaného výkonu světovým lídrem ve využívání energie větru. Do roku 2020 se dá očekávat nárůst kapacity větrných elektráren na 45 000 MW [12], což zhruba odpovídá polovině množství celkové vyrobené elektrické energie. Takový veliký očekávaný nárůst vyústí ve značnou koncentraci dodávané větrné energie v severním Německu. To znamená, že stále větší množství elektrické energie bude muset být přenášeno na velké vzdálenosti.

Již nyní má integrace větrných elektráren značné následky i na mezinárodní elektrizační soustavu. Například výše uvedený problém s okruhovými toky (loop flows) elektrické energie přes elektrizační soustavy okolních států vyprodukované větrnými elektrárnami na severu území. Aby nedocházelo k takovému ohrožování sítí, je nutné počítat s jistými investicemi na rozvoj a posílení stávající distribuční a přenosové soustavy. V případě vzniku tohoto přetížení musí být energie vyráběná větrníky redukovatelná na určitou hodnotu pro zajištění bezpečnosti a stability soustavy.

Elektrizační soustava Německa je provozována několika různými energetickými společnostmi - E.ON, VE-T, RWE, a EnBW. Protože jsou větrné elektrárny v Německu rozprostřeny nerovnoměrně je i každá z energetických společností ovlivněna jejich provozem různě. Nejvíce zasažené společnosti těmito vlivy jsou E.ON a Vattenfall Europe Transmission (VE-T), které absorbují 42 % respektive 38 % vyrobené energie větrnými elektrárnami. Operační oblasti energetických společností v Německu a jejich procentuální absorpce energie získané pomocí větrných elektráren jsou znázorněny na obrázku obr. 4-1 [1].



Obr. 4-1 Operační oblasti energetických společností v Německu

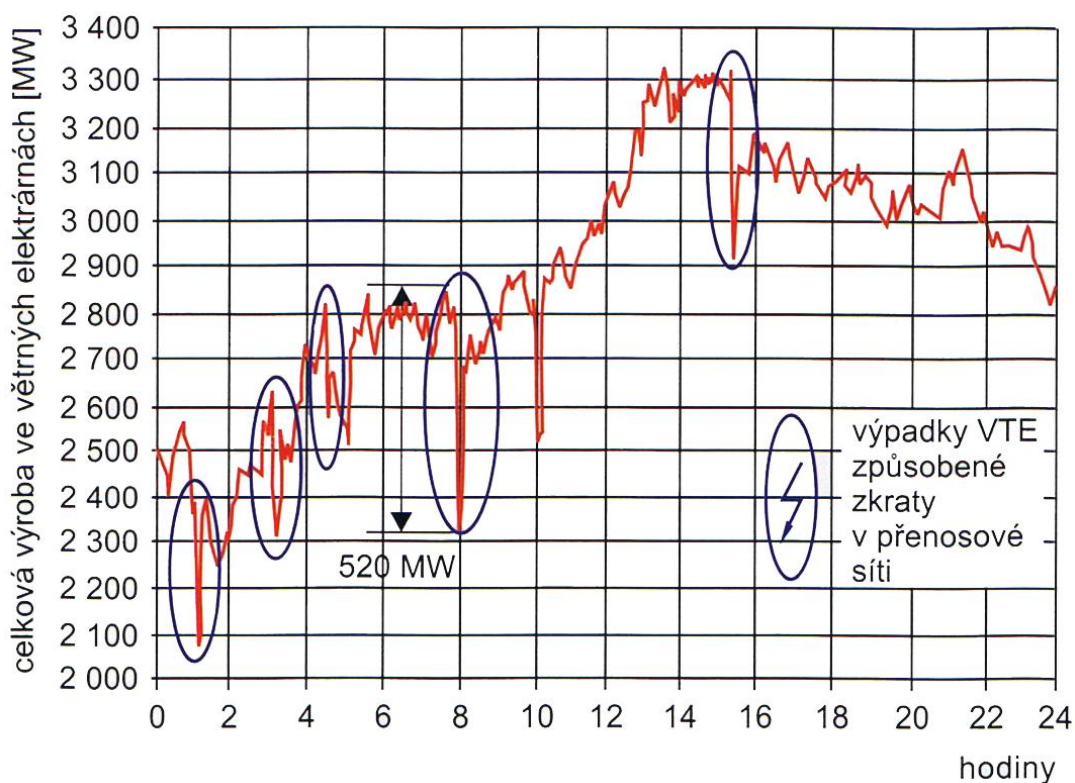
V minulých letech se síťové kódy primárně zaměřovaly na ochranu turbíny samotné a nebraly v potaz vlivy, které mohly turbíny mít na soustavu. Přesto, se zvětšujícím se jejich podílem na výrobě elektrické energie a připojením větrných parků k síti velmi vysokého napětí, ztráty velkého počtu větrných generátorů již není možné akceptovat.

Během provozu elektrizačních soustav dochází k jejich poruchám – zkratům. Zkraty se nevyhnou žádnému elektrickému systému, mohou být způsobeny přírodními vlivy (úder blesku) nebo poškozením způsobeným cizím zaviněním. U obvodů s relativně malými přenosovými impedancemi mohou zkraty způsobit velké poklesy napětí.

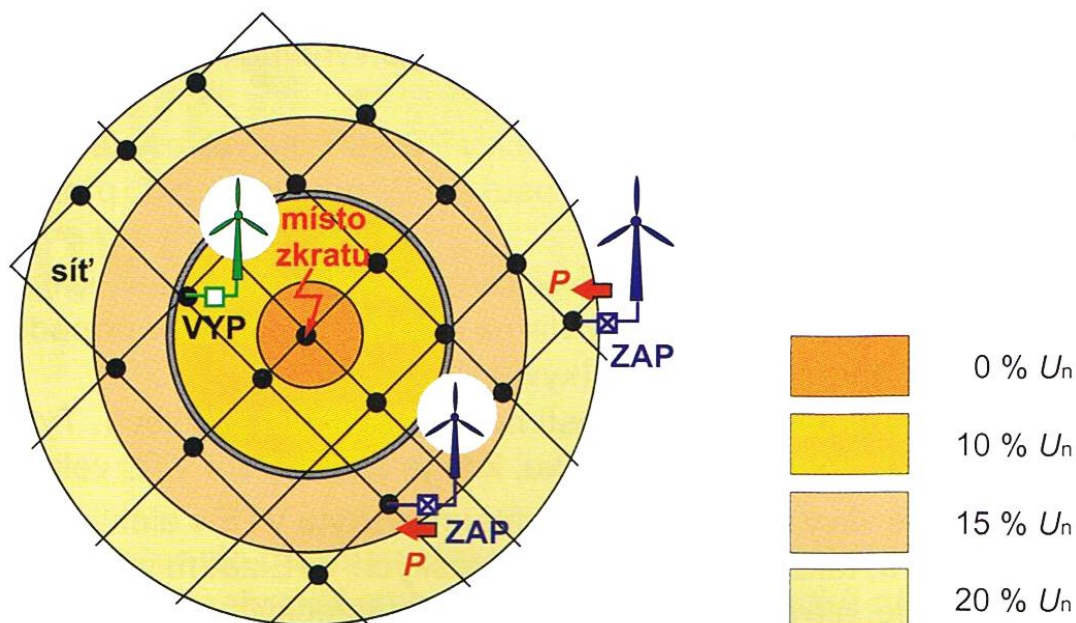
Pokud jsou větrné elektrárny připojovány do sítí vysokého napětí, je většinou požadováno, aby se při výskytu zkratu co nejrychleji odpojili od sítě. Cílem tohoto požadavku je omezit zkratové poměry (snížit příspěvky od větrné elektrárny), a tím zabránit poškození zařízení.

V případě vyššího zastoupení větrných elektráren připojených do přenosových sítí je požadováno, aby zůstávaly během trvání zkratů stabilně připojeny k síti.

Při zkratech v přenosové síti dochází k hlubokým poklesům napětí, které mohou způsobovat až plošné výpadky připojených větrných elektráren. Příklad takového případu, kdy došlo k výpadkům větrných elektráren dosahujících až 520 MW v důsledku poruch v přenosové síti je znázorněn na obrázku obr. 4-2 [16]. Z těchto důvodů je na větrné elektrárny kladen požadavek odolnosti proti odpojení při zkratech. Poklesy napětí v síti při zkratech a jejich vlivu na větrné elektrárny jsou uvedeny na obrázku obr. 4-3 [16].

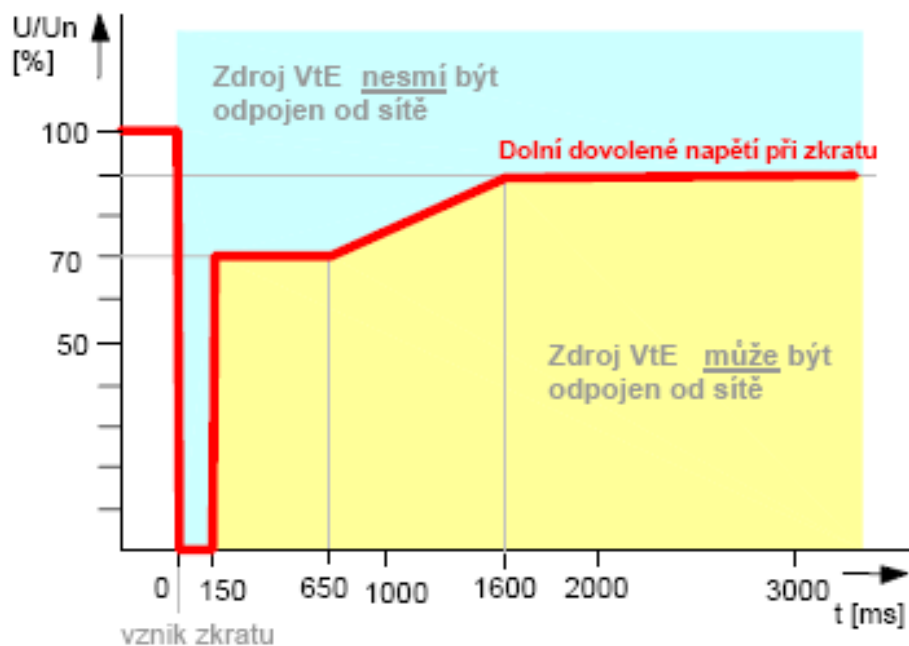


Obr. 4-2 Příklad výpadků větrných elektráren v důsledku poruch v sítích

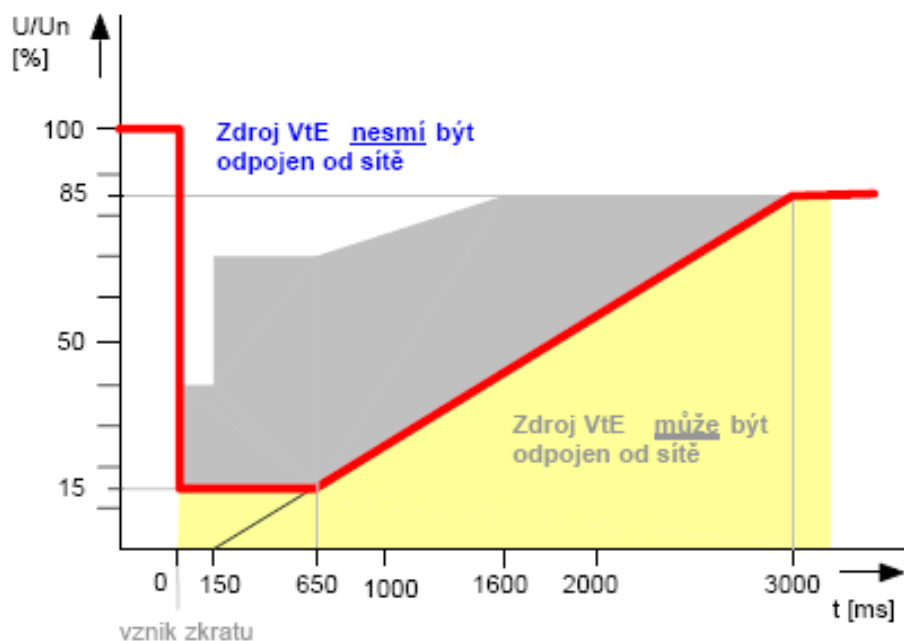


Obr. 4-3 Příklad poklesů napětí v síti při zkratech a jejich vliv na provoz větrných elektráren

Podle poklesu napětí v předacím místě při zkratu můžeme rozdělit zkraty na blízké a vzdálené. A z hlediska příspěvku zdrojů větrných elektráren do zkratu se rozlišují zdroje s vysokým a nízkým zkratovým proudem. Příklady požadavků na chování větrné elektrárny při blízkých zkratech z hlediska poklesu napětí jsou graficky znázorněny na obrázcích obr. 4-4 [5] a obr 4-5 [5]. Z nich lze snadno vyčíst, kdy k odpojení musí a kdy nesmí dojít.

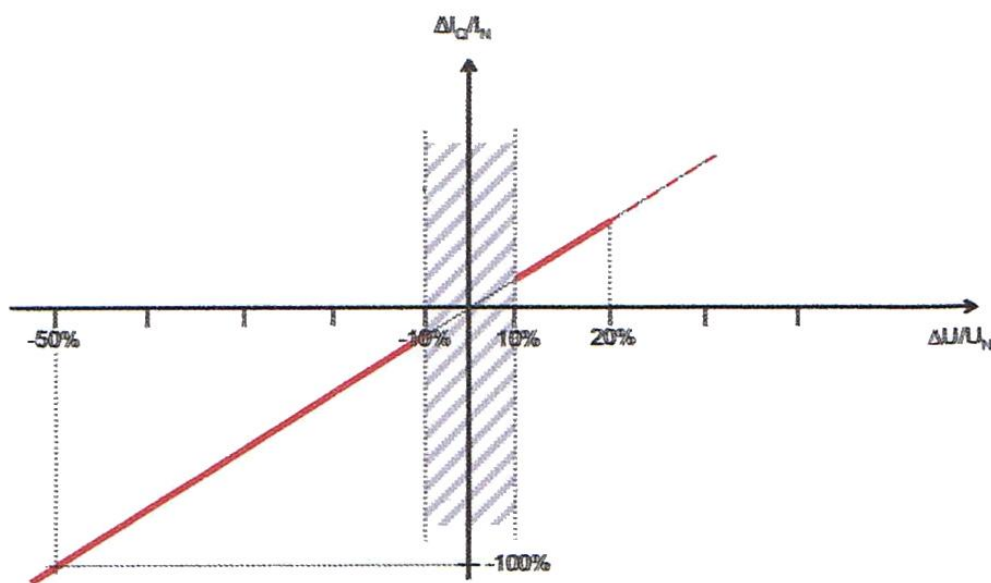


Obr. 4-4 Požadavek německého kodexu na větrné elektrárny při blízkém zkratu se zdroji s vysokým zkratovým proudem z hlediska poklesu napětí



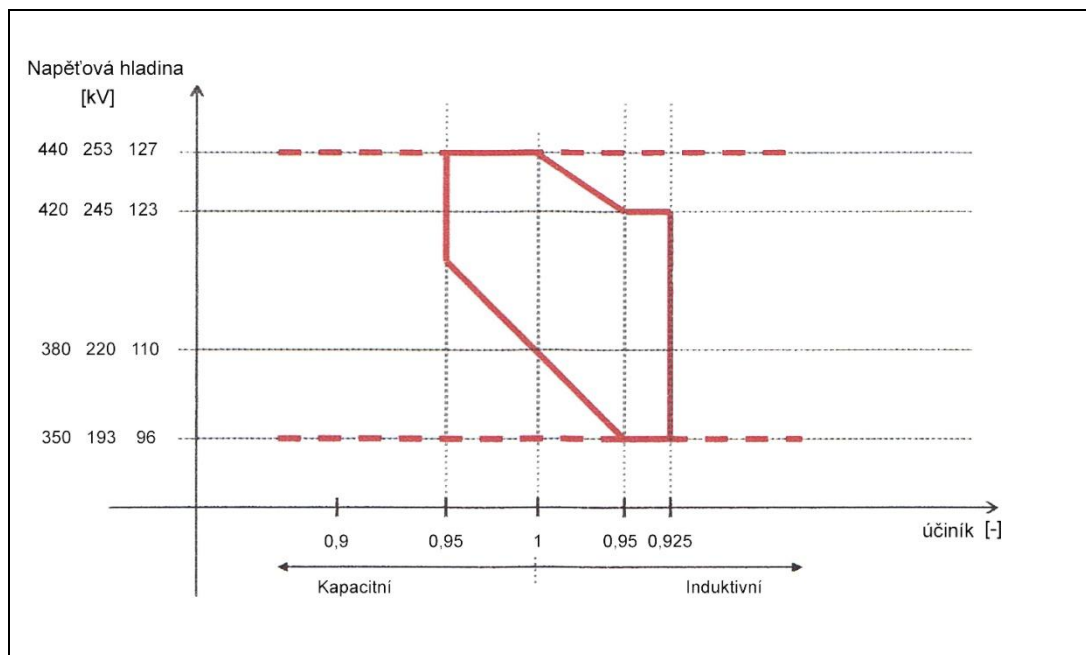
Obr. 4-5 Požadavek německého kodexu na větrné elektrárny při blízkém zkratu se zdroji s nízkým zkratovým proudem z hlediska poklesu napětí

Po všech větrných elektrárnách, které zůstaly během zkratu připojeny k síti, je požadována podpora síťového napětí zvýšenou dodávkou jalového proudu, který je navíc oproti jalovému proudu elektrárny před zkratem, během napěťového poklesu. Zvýšená dodávka proudu musí následovat během 20 ms od výskytu poruchy a její velikost je definována 2 % nárůstem proudu při 1 % poklesu napětí. Poté, co se napětí vrátí do normálního pracovního rozsahu musí být dodávka proudu udržována po 500 ms. Zotavení síťového napětí musí proběhnout během 3000 ms, poté následuje přechod na standardní režim. Tento požadavek je znázorněn na obrázku obr. 4-6 [1].



Obr. 4-6 Požadavek německého kodexu podpory síťového napětí během zkratu

Podle dalších požadavků by větrné elektrárny měly být schopny v určitém rozsahu řídit účinník dodávky, a to jak ve směru induktivním, tak i ve směru kapacitním. Tento požadavek je graficky znázorněn na obrázku obr. 4-7 [5]. Rozsah účinníku závisí na hladině síťového napětí. Z pohledu provozovatele sítě je důležité, aby byly větrné parky schopny měnit účinník dodávky, čímž přizpůsobují svoji výrobu jalového výkonu požadavkům sítě.



Obr. 4-7 Požadavek na regulační rozsah jalového výkonu

Pro zajištění systémové bezpečnosti a zabránění napěťovému kolapsu může dojít k odpojení větrné elektrárny. K odpojení dochází, pokud napětí v místě připojení větrné elektrárny kleslo pod 85 % nominální hodnoty síťového napětí a větrné elektrárny spotřebovávají jalový výkon. Odpojení musí proběhnout během 0,5 s.

Pokud napětí větrné turbíny klesne pod 80 % minimální stálé hodnoty povoleného napětí, odpojení větrné turbíny je požadováno v časových krocích 1,5 s, 1,8 s, 2,1 s, a 2,4 s. V každém časovém kroku se musí odpojit 25 % jednotek z celého větrného parku, pokud se mezitím napětí opět nezvýší na 80 % stálé minimální hodnoty.

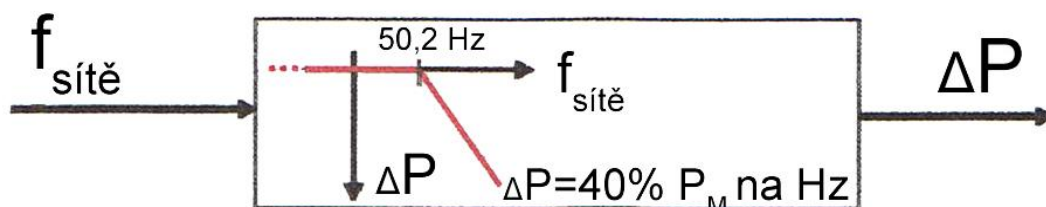
Při provozu elektrárny nedochází jen k podpětí zmíněného v předešlém odstavci, ale také k přepjetí, které vede také k odpojení generátoru od sítě. Pokud napětí dosáhne 120% maximální stálé hodnoty povoleného napětí, musí dojít k odpojení během 100 ms.

K odpojení elektrárny od sítě musí také dojít, pokud frekvence síťového napětí nabývá hodnot menších než 47,5 Hz nebo větších než 51,5 Hz. Z hlediska změny frekvence a chování větrné elektrárny je důležité, aby i při kolísající frekvenci zůstaly větrné elektrárny připojeny do soustavy a pomáhaly vyrovnávat bilanci výkonů.

Při rozsahu frekvence 47,5 až 50,2 Hz se nepředpokládá žádná změna aktuální výroby větrné elektrárny z důvodu frekvence. Každá odchylka od plánované výroby nebo spotřeby způsobuje



kolísání frekvence. Čím větší odchylka je, tím více frekvence kolísá a ohrožuje spolehlivost sítě. Při vysokých frekvencích se zvyšuje teplota vinutí generátoru, čímž ohrožuje izolaci (může dojít k jejímu poškození) – může dojít k poškození výkonové elektroniky. Při zvýšení frekvence nad 50,2 Hz je nutné omezení výroby větrných elektráren a není možné spouštět nebo připojovat do sítě další nové větrné elektrárny. Omezování výkonu odpovídá 40 % aktuálního výkonu na 1 Hz. Toto omezení výkonu je znázorněno na obrázku obr. 4-8 [1].



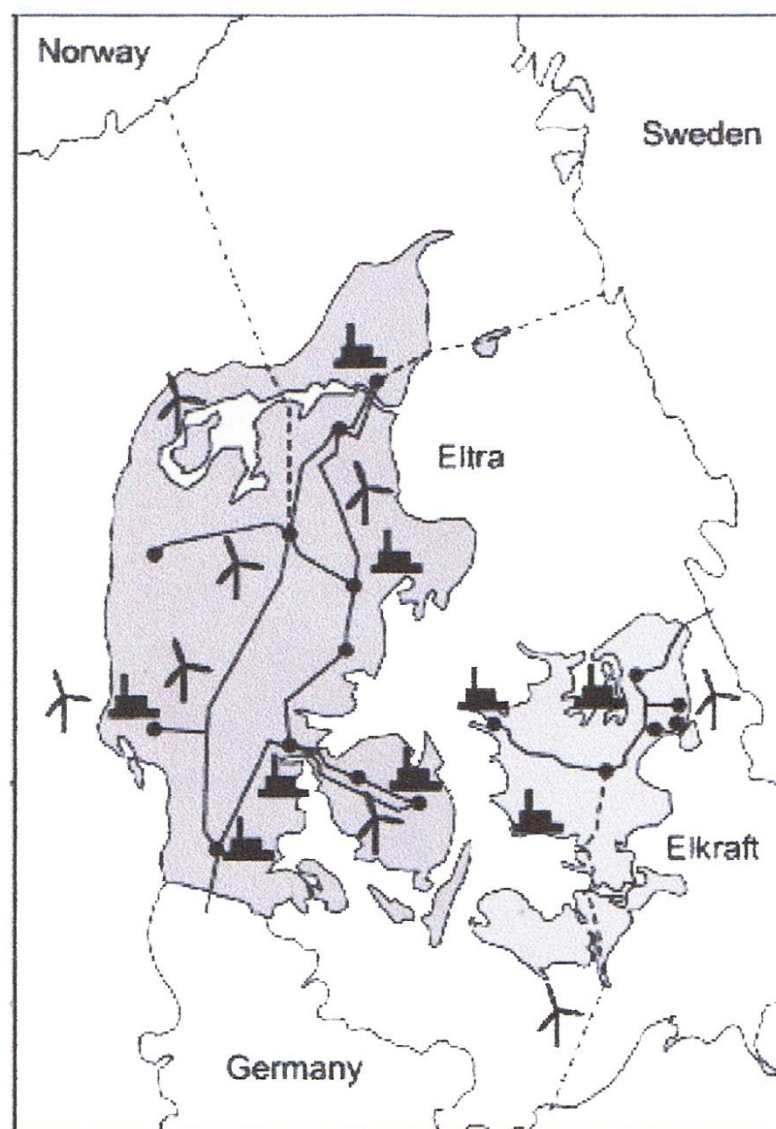
Obr. 4-8 Omezení výkonu větrných elektráren při vysokých frekvencích

## 4.2 Dánsko

V souladu s výše uvedenými fakty, Dánsko kryje 20 % ze své celkové spotřeby elektrické energie pomocí větrných elektráren, což Dánsku zabezpečuje světovou vedoucí pozici ve využívání energie větru.

Celkový instalovaný výkon dánských větrných elektráren dosahuje 3 125 MW [13]. Do roku 2010 se počítá s jeho navýšením na hodnotu okolo 5000 MW [13]. Kvůli poměrně malé rozloze dánského území se docílí zvyšování větrného výkonu pomocí větrných offshore farem vystavovaných v mělkých vodách severního moře.

Dánská elektrizační soustava byla vždy provozována dvěma nezávislými síťovými operátory: energetickými společnostmi Eltra na západě a Elkraft na východě. V roce 2005 však došlo k jejich sloučení a vytvořili tak jednu, novou, státem vlastněnou společnost Energinet Denmark. Dva nezávislí síťoví operátoři vznikli díky geograficky a elektricky navzájem oddělených částí dánského území, což je znázorněno na obrázku obr. 4-9.

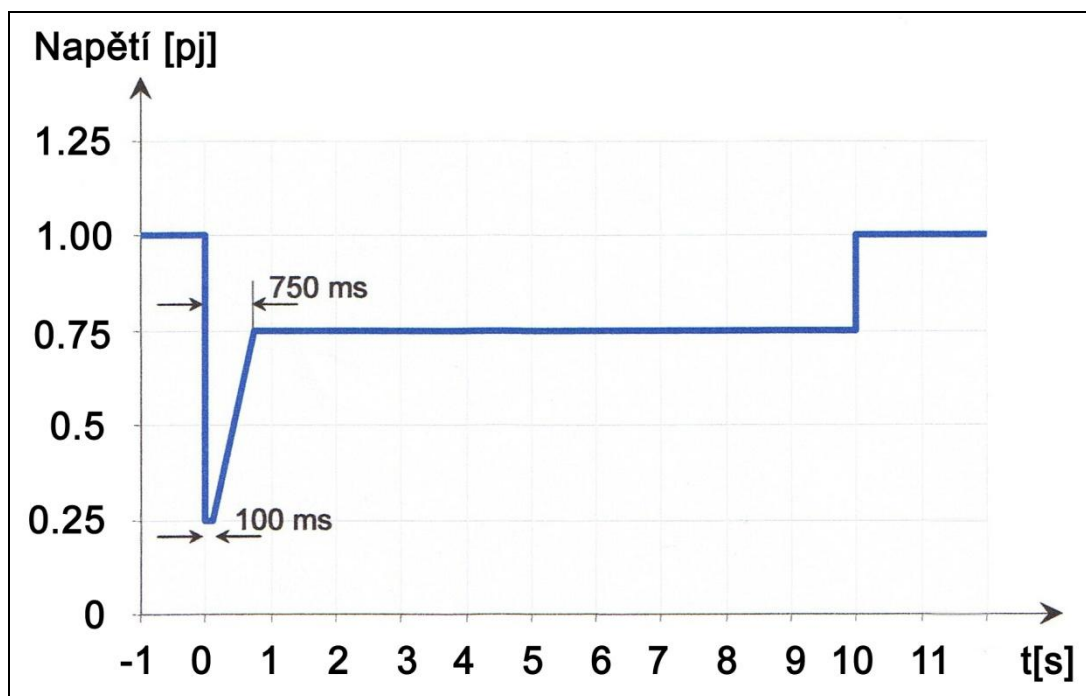


Obr. 4-9 Mapa dánské elektrizační soustavy

I když nejsou tyto části navzájem propojeny, jsou obě spojeny se sítěmi sousedních zemí. Západní Dánsko je spojeno s Německem, Norskem a Švédskem. Východní část dánského území je propojena s Německem a Švédskem.

Největší problém, kterému musí větrné elektrárny čelit jsou napěťové poklesy v síti. Jak již bylo výše uvedeno, takovéto přechodné a krátkodobé poruchy sítě se mohou šířit přes velmi rozlehlé oblasti a odpojení elektráren od sítě během poruch by mohlo značně ohrozit bezpečnost soustavy a dodávky, protože by mohlo dojít k současnému odpojení velkého množství větrných elektráren, čímž by došlo k velkým výkonovým ztrátám.

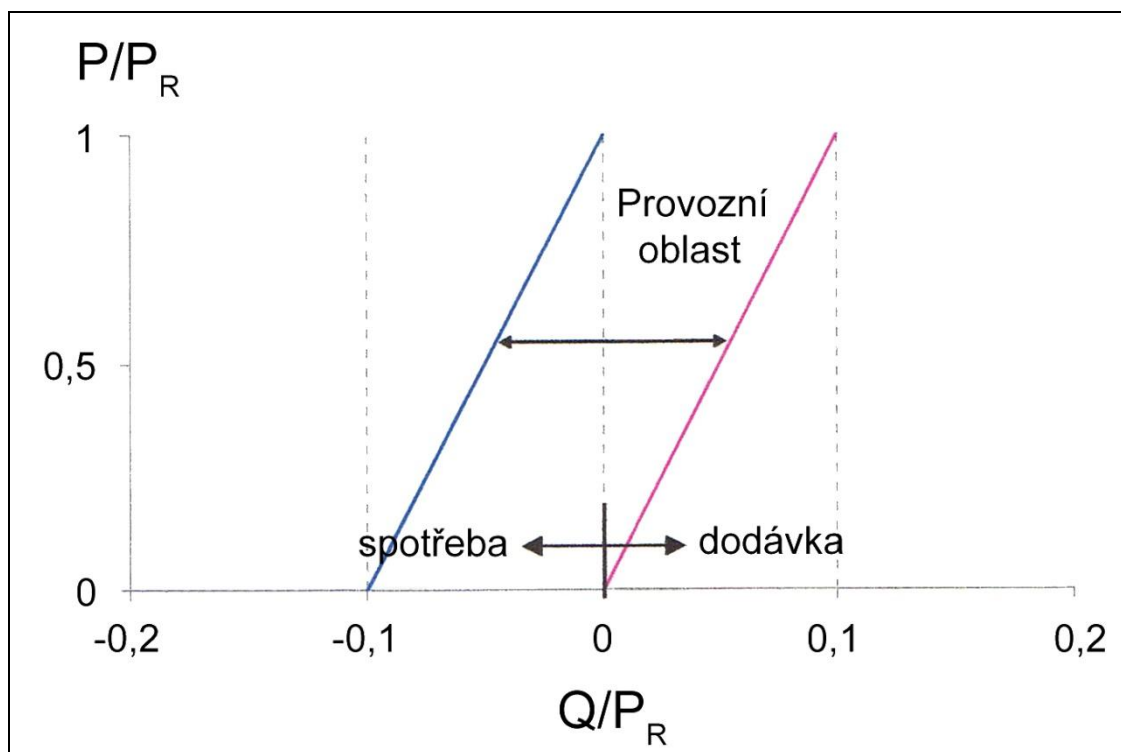
Dánský síťový kodex, stejně jako německý, proto vyžaduje, aby elektrárny zůstaly během poruch v síti připojeny. Průběh napětí během poruchy je znázorněn na obrázku obr. 4-10 [6]. Z obrázku lze zjistit, že doba trvání poruch je ve srovnání s Německem kratší – 100 ms. Ale doba obnovení počáteční hodnoty napětí je delší, trvá až 10 sekund.



Obr. 4-10 Požadavek dánského kodexu na chování větrných elektráren během poruch v síti

Větrné turbíny musí zůstat připojeny i při výskytu většího počtu poruch, které po sobě následují, např. tři zkraty během dvou minut nebo šest zkratů následujících vždy po pěti minutách. Aby mohly být takové požadavky splněny, musí být turbíny podporovány dostatečnou pomocnou dodávkou výkonu. Proto během napětového poklesu dochází k maximální podpoře napětí dodávkou jalového výkonu, aby se napětí v síti co nejrychleji obnovilo. Výměna jalového výkonu mezi turbínou a sítí se vrací do deseti vteřin po zvýšení napětí nad 90 % původní hodnoty do normálního provozního pásma znázorněného na obrázku obr. 4-11 [6]. Pokud se nepodaří během dvou až deseti sekund po zkratu v síti rychlým snížením činného výkonu a rychlým zvýšením jalového výkonu úspěšně obnovit síťové napětí, větrná elektrárna musí být odpojena.

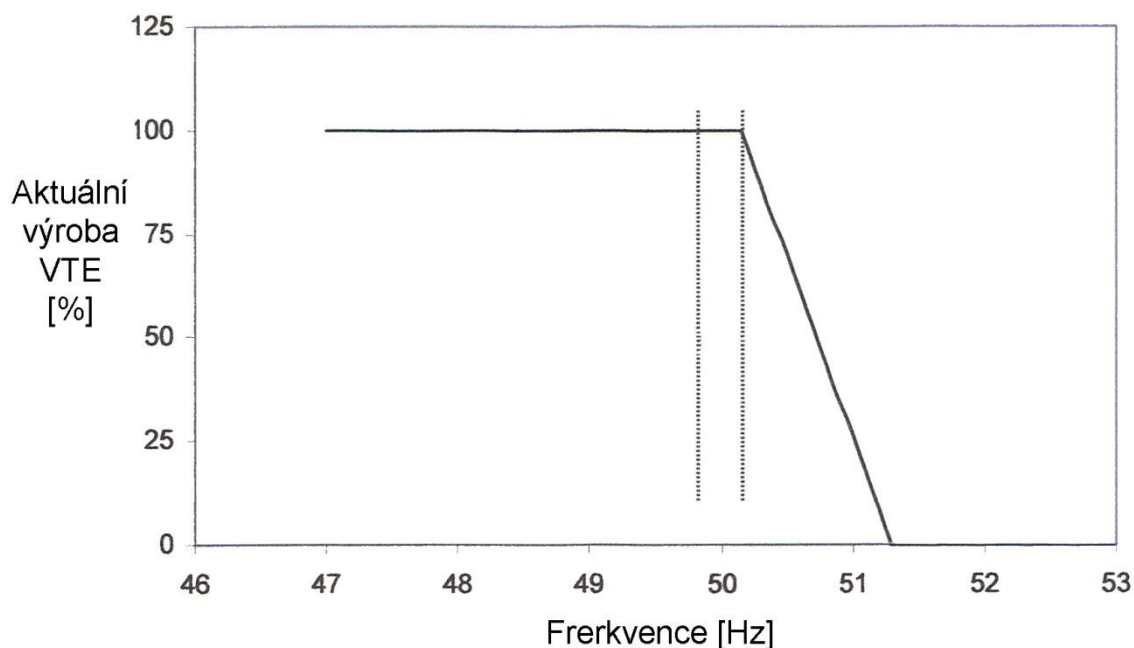




Obr. 4-11 Požadavek dánského kodexu na výměna jalového výkonu mezi turbínou a sítí

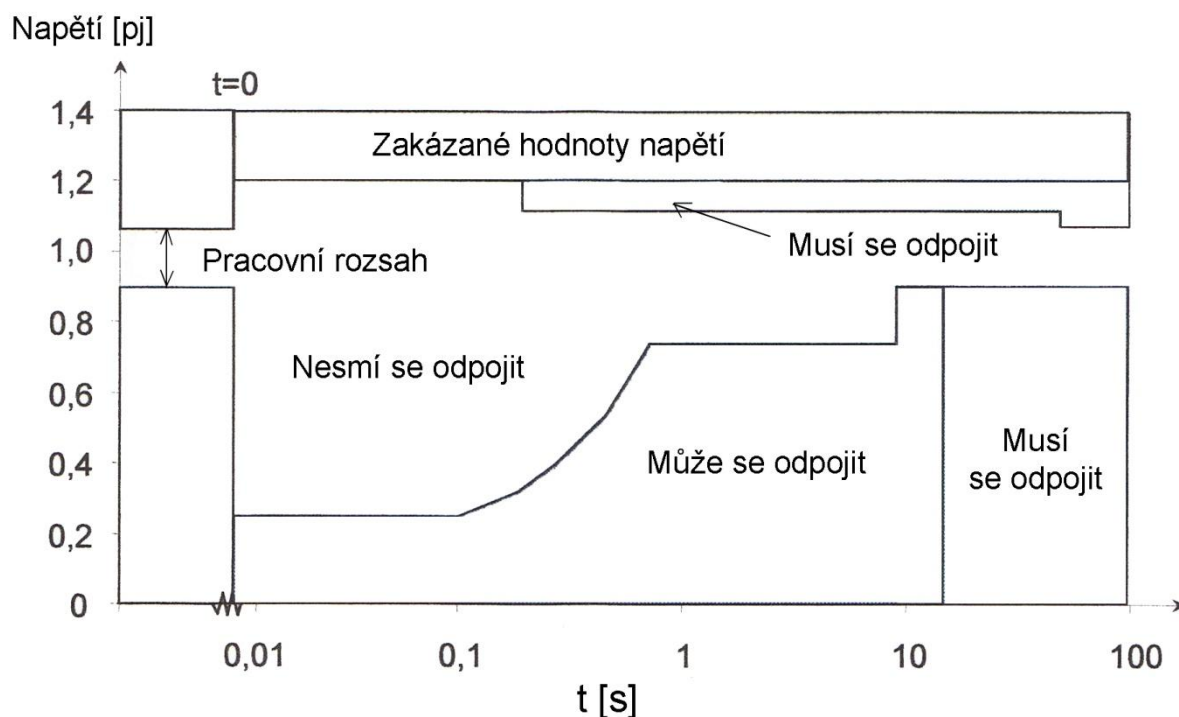
Dalším požadavkem je možnost měnit velikost dodávaného výkonu větrné elektrárny. Kontrolovatelná změna činného výkonu je mimo jiné důležitá k omezení požadovaného jalového výkonu elektrárnou po poruše. Možnosti změny rozsahu výkonu se využívá k zabezpečení dodávky stability v síti, pokud se část Dánska kvůli poruše stane ostrovem. Musí být možné zmenšit výkon na méně než 20 % nominální hodnoty během dvou sekund. Během přechodné poruchy v síti musí úplné omezení a následné zvýšení výkonu nastat během 30 sekund.

Stejně jako v německém síťovém kodexu i v tom dánském je třeba, aby větrná elektrárna byla schopna měnit velikost aktuálního výkonu i během kolísání frekvence. Elektrárna se nachází v normálním pracovním provozu při rozsahu frekvence 49 Hz – 50,3 Hz. Pokud se frekvence zvýší nad hodnotu 50,3 Hz dochází k omezování výkonu elektrárny, aby nedošlo k žádnému poškození. Po dosažení 51,5 Hz nastává odpojení od sítě během 300 ms. K odpojení elektrárny během 300 ms dochází také při poklesu síťové frekvence pod 47 Hz. V rozsahu 47 Hz až 49 Hz nedochází k žádné změně aktuálního výkonu elektrárny. Tento požadavek zachycuje obrázek obr. 4.-12 [6].



Obr. 4-12 Požadavek dánského kodexu na omezení výkonu větrných elektráren při vysokých frekvencích

K odpojení větrné elektrárny od sítě dochází i v jiných případech, než jen při nízké nebo naopak vysoké frekvenci síťového napětí nebo při neobnovení napětí v síti po poruše během vymezeného času. Elektrárna může být odpojena, stejně jako v případě německého kodexu, při výskytu přepětí nebo podpětí. Pokud hodnota napětí klesne pod 90 % původního napětí, dojde k odpojení během 10 až 60 sekund. Při výskytu napětí s hodnotou 106 %, dochází k odpojení po 60 vteřinách. Napětí se může zvýšit i na větší hodnotu než je 110 % síťového napětí. V takovém případě dojde k odpojení elektrárny během 200 ms. Tyto požadavky na odpojení větrných elektráren od sítě jsou graficky znázorněny na obrázku obr. 4-13. Obrázek také zachycuje skutečnost, že okamžikové poklesy napětí nemusí hned znamenat okamžité odpojení elektrárny od sítě (vysvětleno výše) a že nesmí dojít k výskytu napětí většího jak 120 % hodnoty síťového napětí.

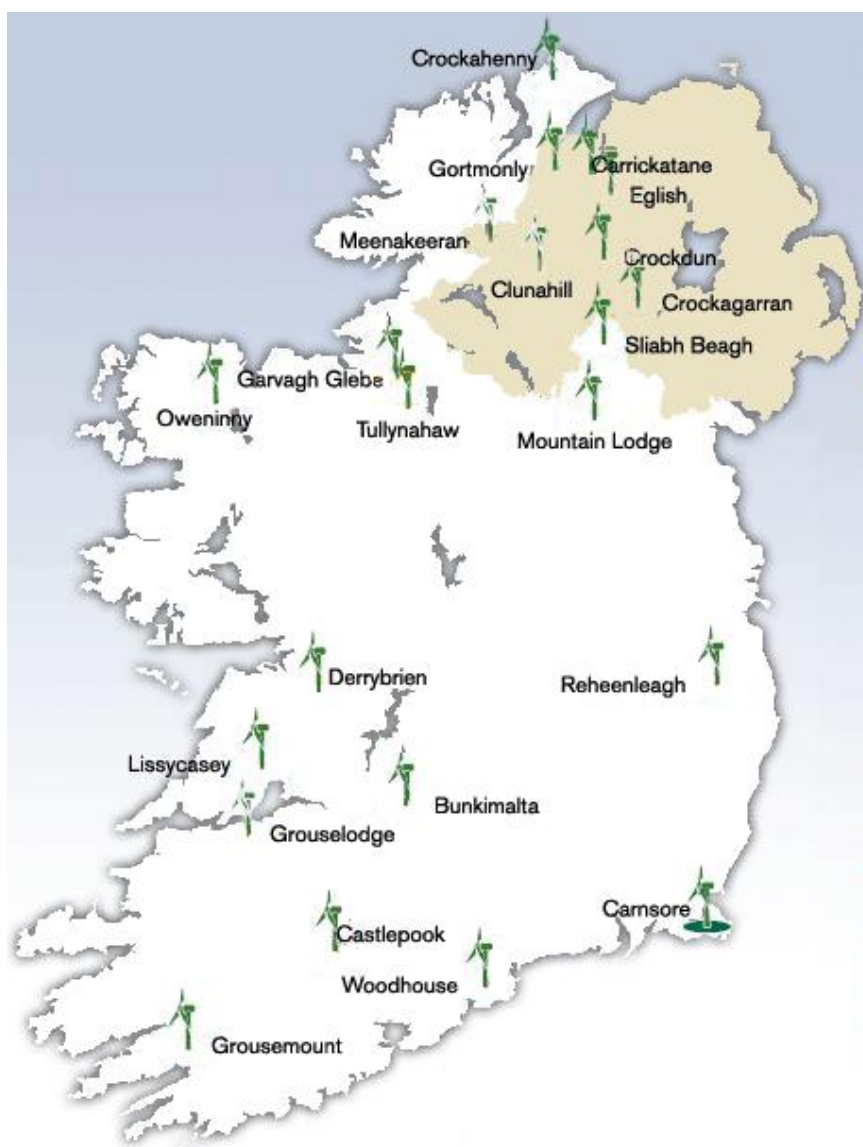


Obr. 4-13 Požadavky dánského kodexu na odpojení větrných elektráren od sítě

### 4.3 Irsko

Irská republika leží společně se Severním Irskem na irském ostrově, který díky svému oceánskému podnebí zajišťuje jedny z nejlepších podmínek pro využívání energie větru v Evropě. Proto vznikají snahy o co nejúčinnější využití tohoto potenciálu. Celkový instalovaný výkon větrných parků dosahuje hodnoty 866 MW, ze kterých je 120 MW produkováno parky instalovanými v Severním Irsku. Přehled větrných parků provozovaných na irském ostrově je znázorněn na obrázku obr. 4-14 [9].

V dnešní době se irské větrné parky svojí dodávkou elektrické energie podílejí z 15 % na celkové spotřebě. Do roku 2020 se počítá s nárůstem tohoto podílu na 33 %. Při tomto předpokládaném vývoji se počítá s výstavbou offshore parků v takové míře, aby se jejich instalovaný výkon rovnal výkonu onshore (ostrovních) větrných parků.

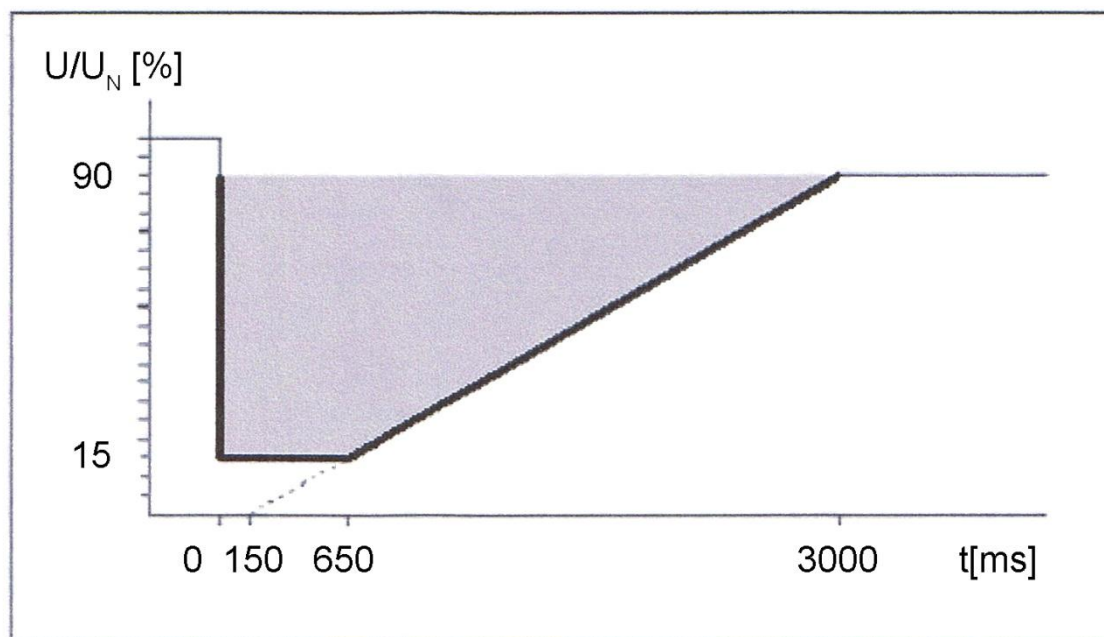


Obr. 4-14 Přehled větrných parků na irském ostrově

Stejně jako v předcházejících případech je i irským kodexem vyžadováno, aby větrná elektrárna zůstala připojená k síti i během její poruchy. Požadavek na chování elektrárny při poruše v síti zachycuje obrázek obr. 4-15 [2].

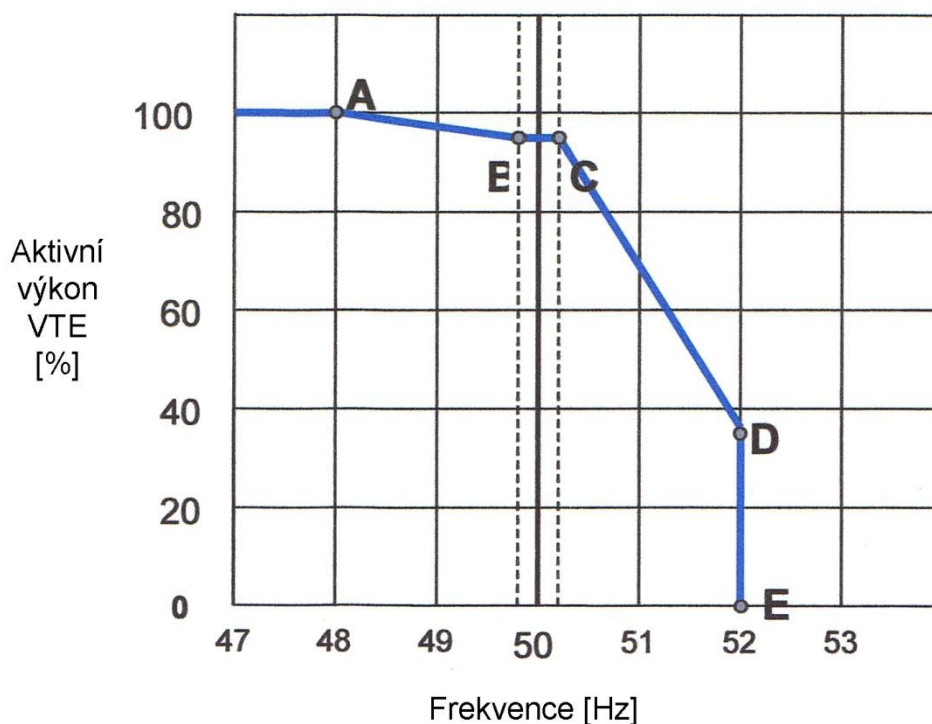
Během poklesu napětí, ke kterému při poruše dochází, musí větrná elektrárna dodávat do sítě činný výkon na podporu její napětí a pro co největší zvětšení dodávky jalového výkonu do sítě. Maximalizace jalového výkonu musí přitom trvat minimálně 600 ms, což se dá vyčíst z obrázku, nebo dokud se síťové napětí nezotaví na hodnotu spadající do normálního pracovního rozsahu. Elektrárna musí být schopna poskytovat 90 % svého maximálního výkonu jak nejrychleji je to technicky možné a také kdykoli během první vteřiny, kdy došlo k navýšení hodnoty síťového napětí na pracovní hodnotu. Pokud během stanovené doby k obnově napětí nedorazí, musí se větrná elektrárna odpojit od sítě.

K odpojení větrných turbín dochází také v případě výskytu přepětí a podpětí během jejich provozu. Přepětí znamená, že napětí dosahuje 110 % a více původní hodnoty. Naproti tomu podpětí znamená pokles napětí pod 90 % dřívější úrovně trvající déle než 3 vteřiny, což je také znázorněno na obrázku obr. 4-15. Z této podmínky vyplývá, že větrná elektrárna musí zůstat připojena k síti při výskytu napětí v rozsahu ohraničeném výše uvedenými hodnotami.



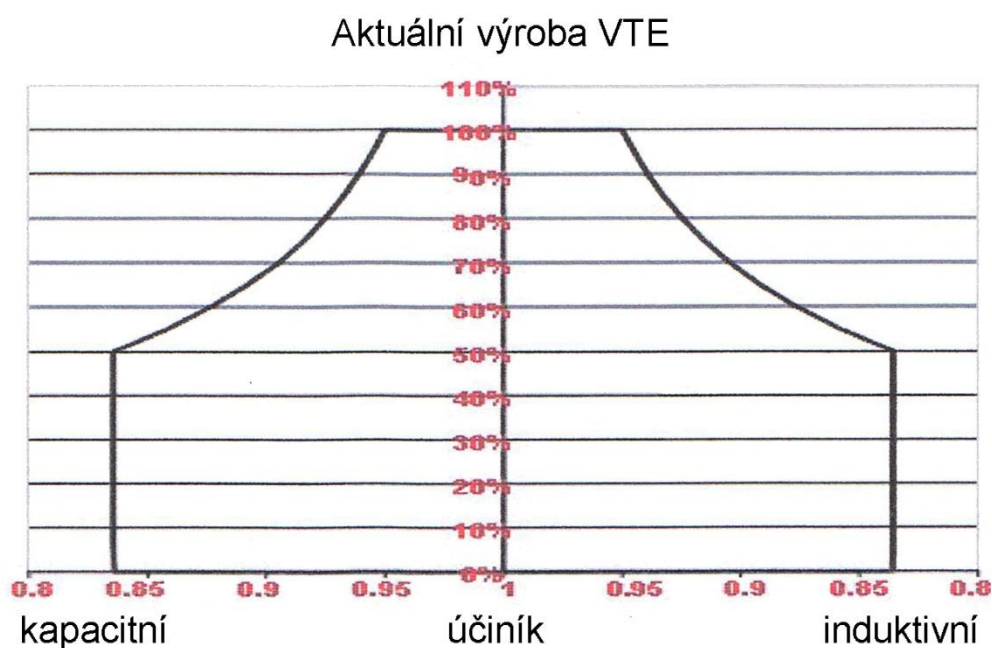
Obr. 4-15 Požadavek irského kodexu na chování větrné elektrárny během poruchy v síti

Větrné elektrárny musí zůstat připojena k soustavě i při kolísání frekvence v rozsahu 47 Hz až 52 Hz, aby pomáhaly vyrovnávat bilanci výkonů. Tento požadavek kodexu na jejich chování při změnách frekvence v síti. Je zachycen na obrázku obr. 4-16 [2]. Spojnice bodů B a C představuje normální pracovní frekvenční rozsah, při kterém elektrárna pracuje se stálým aktivním výkonem. Jak bylo dříve uvedeno, každá odchylka od plánované výroby nebo spotřeby způsobuje kolísání frekvence. Čím větší odchylka je, tím více frekvence kolísá a ohrožuje spolehlivost sítě. Pokud frekvence klesne pod bod B, nastává nárůst výkonu elektrárny na možné maximum, znázorněný spojnici bodů B – A, pro zachování jejího připojení (dodávky) do sítě. Tím se zamezí případným velkým ztrátám výkonu, ke kterým by mohlo dojít při odpojení elektrárny od sítě. Zvýšením hladiny frekvence nad bod C musí dojít k omezení výkonu a není možné spouštět nebo připojovat do sítě další nové větrné elektrárny. Podle výše uvedeného, se při vysokých frekvencích zvyšuje teplota vinutí generátoru, čímž je ohrožena izolace (může dojít k jejímu poškození) – může dojít k poškození výkonové elektroniky. Při překročení hranic povoleného frekvenčního rozsahu 47 Hz a 52 Hz dochází k opojení větrné elektrárny od soustavy.



Obr. 4-16 Požadavek irského kodexu na chování větrných elektráren při změnách frekvence v síti

Stejně jako u německého kodexu je i v irském vyžadováno, aby větrné elektrárny byly schopny v určitém rozsahu řídit účinník dodávky, a to jak ve směru induktivním, tak i ve směru kapacitním. Tento požadavek je graficky znázorněn na obrázku obr. 4-17 [2]. Z pohledu provozovatele sítě je důležité, aby byly větrné parky schopny měnit účinník dodávky, čímž přizpůsobují svoji výrobu jalového výkonu požadavkům sítě.



Obr. 4-17 Požadavek irského kodexu na větrné elektrárny z hlediska rozsahu jalového výkonu



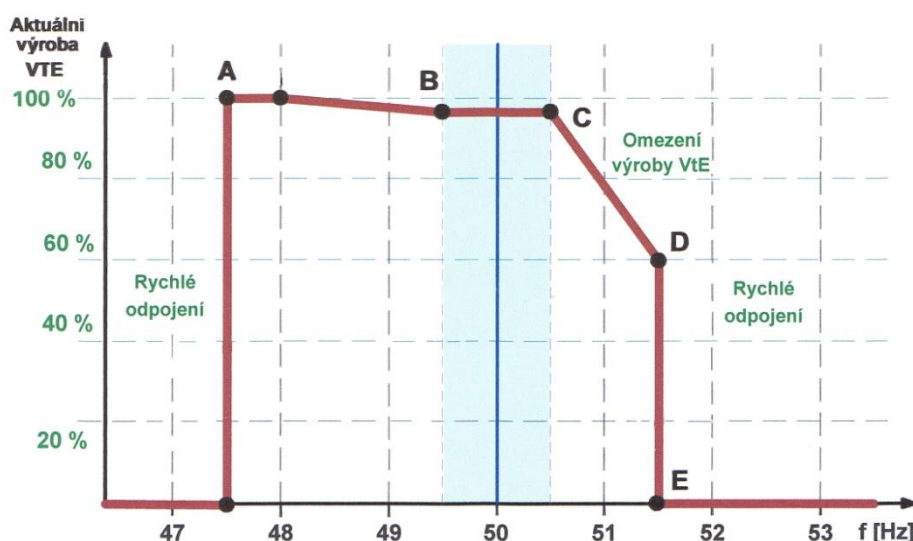
## 5 NÁVRH ÚPRAVY SÍŤOVÉHO KODEXU DS ČR

Stejně jako ve výše uvedených zemích, dochází i u nás, v České republice, k významnému rozvoji technologie větrných elektráren. Během letošního roku se dá očekávat nárůst celkového instalovaného výkonu větrných elektrárnám na hodnotu pohybující se okolo 370 MW [15]. Uskutečnění tohoto předpokladu by znamenalo navýšení větrného výkonu o více jak 250 MW oproti současnému stavu. Jak již bylo dříve poznamenáno, do roku 2015 je předpovídan nárůst na hodnotu okolo 1100 MW [15]. Větší rozšíření větrných elektráren je stále spojeno se širokým spektrem názorů, od výrazné podpory ze strany ekologických aktivistů, potenciálních investorů a některých provozovatelů až po pesimistické přístupy například některých místních úřadů, zastupitelstev nebo ochránců přírody.

Velká většina současných větrných elektráren je připojena do sítě s hladinou vysokého napětí (vn - 22 kV, 35 kV). S uvažovaným rozvojem se již počítá s projekty větrných parků, které mají být vyvedeny do distribučních (DS) a přenosových (PS) soustav - soustavy s velmi vysokým napětím (vvn – 110 kV a více).

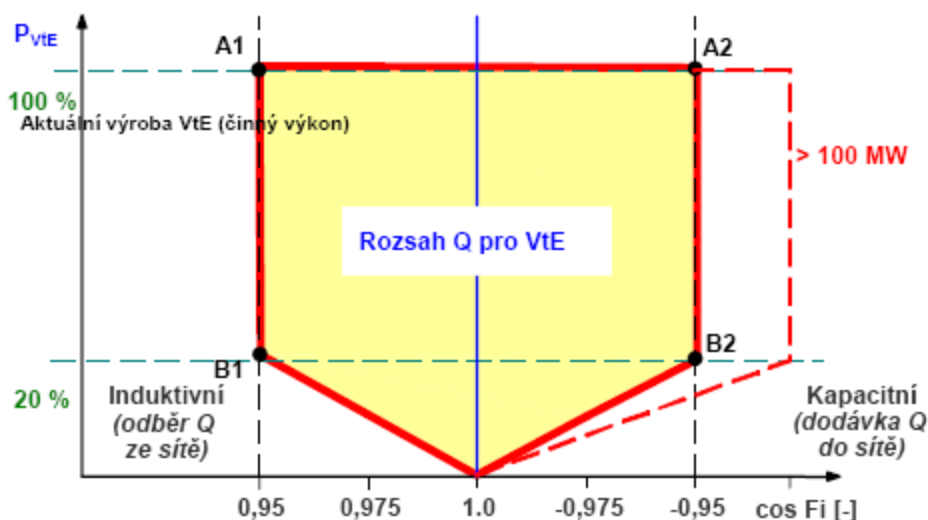
Pro připojení větrných elektráren do přenosové soustavy platí stejná pravidla jako pro připojení konvenčních elektrárenských bloků. Tato pravidla jsou dále doplněna požadavky vyplývajícími ze specifických vlastností a způsobu jejich provozu a jsou zaznamenána v kodexu přenosových soustav ČR. Dá se říct, že český kodex vychází a přejímá různé požadavky z kodexů zahraničních zemí, které mají větší zkušenosti s provozem větrných elektráren.

Například požadavky na chování při poruchách v síti jsou totožné s německým kodexem uvedeným výše. Stejně tak požadavky na dodávku jalového výkonu během poruchy pro podporu síťového napětí jsou totožné. Požadavky na chování při frekvenčním kolísání jsou zase velmi podobné irskému včetně nutnosti snižování a zvyšování výkonu elektrárny při frekvenčním kolísání. Rozsah frekvence, při kterém musí zůstat elektrárna připojena je přitom 47,5 Hz až 51,5 Hz. Pro ilustraci je tento požadavek znázorněn na obrázku obr. 5-1 [3].



Obr. 5-1 Požadavek kodexu přenosových sítí na větrné elektrárny z hlediska frekvence

Jak již bylo řečeno, přizpůsobování výroby jalového výkonu větrné elektrárny potřebám sítě je dáno schopností řídit účinník dodávky jak ve směru induktivním, tak i ve směru kapacitním. Po českých větrnicích je požadován rozsah účinníku do 0,95 v obou směrech. Pro větrné parky s instalovaným výkonem větším, jak 100 MW je požadován vyšší rozsah dodávky jalového výkonu a to do hranice  $\cos\varphi = 0,9$ . Vše je znázorněno na obrázku obr. 5-2 [2].



Obr. 5-2 Požadavek českého kodexu na regulační rozsah jalového výkonu

Pravidla pro připojování větrných elektráren do distribučních sítí (napěťová hladina 110 kV) nejsou v žádném síťovém kodexu zpracována. Protože se elektrárny během provozu chovají vždy naprosto stejně bez ohledu na velikost síťového napětí v síti, ke které jsou připojeny, je možné aplikovat požadavky obsažené v kodexu přenosových soustav (220 kV a 400 kV) i pro nižší síťová napětí.

Jak už bylo uvedeno, při provozu soustav dochází k poruchám, které vyvolávají hluboké poklesy síťového napětí. Větrné elektrárny by proto měly být schopny dodávky výkonu do sítě pro podporu jejího napětí. Odpojením by tedy došlo ke výkonovým ztrátám, které by při dnešních velkých instalovaných výkonech jednotlivých turbín (až 5 MW) nebyly zanedbatelné. Kvůli tomu by elektrárny měly zůstat připojeny k síti pro podporu její stability. Stejně tak by měla být vyžadována podpora napětí během poruchy zvýšenou dodávkou jalového výkonu do sítě, která by se po zvýšení napětí do standardního pracovního rozsahu vrátila do normálního režimu. Je tedy třeba, aby větrná elektrárna byla schopna měnit velikost aktuálního výkonu podle potřeb sítě, čehož se nejvíce využívá právě během poruch v síti pro zabezpečení dodávky a stability sítě.

Pro stabilitu sítě je také důležité zajistit regulaci síťového napětí. Cílem regulace napětí je, aby napětí pokud možno nabývalo stálé hodnoty bez jakéhokoli kolísání. K tomu je možné využít schopnosti větrných elektráren řídit v určitém rozsahu účinník dodávky ve směru kapacitním i induktivním. V ideálním případě, když je napětí stálé, je účinník dodávky  $\cos\varphi$  roven jedné a dochází k minimálním ztrátám činného výkonu. Při poklesu napětí je třeba, aby došlo, stejně jako v případě poruch, k dodávce jalového proudu do sítě při kapacitním účinníku. V opačném



případě, když je třeba síťové napětí snížit, by mělo dojít k pohlcování jalového výkonu ze sítě elektrárnou, přičemž účinník odběru  $\cos\varphi$  je induktivní.

Věrná elektrárna by měla být také schopná se účastnit sekundární regulace napětí (regulace napětí na úrovni jednoho uzlu soustavy), která je pro provoz elektrizační soustavy nepostradatelná. Tato regulace je realizována v předacích místech přenosových i distribučních soustav pomocí automatických regulačních procesů. Úkolem automatického systému regulace napětí (ARSU) je automaticky, bez nutnosti zásahu obsluhy, udržovat žádaná napětí v předacích místech soustavy. Přínosy automatické regulace napětí jsou zvýšení bezpečnosti provozu soustav a snížení nároků na obsluhu.

Ke změně napětí dochází i vlastním provozem větrné elektrárny nebo při jejích spínání (připojování, odpojování). Aby tyto změny neohrozily stabilitu soustavy a nevyvolávaly nepřipustné zpětné vlivy na soustavu, nesmí být podmínky, stanovené pro tyto změny provozními pravidly pro DS (PPDS), překročeny. Mezi zpětné vlivy na síť patří změny napětí, flicker, proudy harmonických a vlivy na řízení HDO (hromadné délkové ovládání). Zpětné vlivy se mohou projevit zhoršením účinníku a nebo zvýšením přenosových ztrát. V PPDS je také zohledněno, zda dochází ke spínání jedné výrobní jednotky (jednoho generátoru větrné elektrárny) nebo celého zařízení (větrného parku). Při připojení větrného parku by měla být stanovena doba nabíhání na maximální výkon, aby nedocházelo k velkým nárazům na síť a změnám napětí v síti a mohlo dojít k plynulému začlenění výkonu poskytovaného větrným parkem. Jako příklad větrného parku mohou posloužit větrné elektrárny instalované na malém území na severu Moravy s celkovým instalovaným výkonem okolo 300 MW, což je výkon poskytovaný konvenční elektrárnou.

Při kolísání frekvence by se měla větrná elektrárna chovat stejně, jako je to vyžadováno síťovým kodexem pro PS. To znamená, že při zvýšení frekvence nad hodnotu 50,5 Hz by mělo dojít ke snížení aktuálního výkonu VTE a žádné další by se do soustavy neměly připojovat. Při poklesu frekvence pod 49,5 Hz by měl naopak výkon narůstat na maximální možnou hodnotu. Jak bylo dříve uvedeno, z hlediska změny frekvence a chování větrné elektrárny je důležité, aby i při kolísající frekvenci zůstaly větrné elektrárny připojeny do soustavy a pomáhaly vyrovnávat bilanci výkonů.

## 6 ZÁVĚR

V poslední době dochází k výraznému rozvoji větrné energetiky a dá se lehce odhadnout, že nastolený trend bude pokračovat i v letech neledujících. Studie evropské asociace větrné energie předpokládá, že v roce 2030 bude 20 % z celkové spotřeby elektrické energie kryto dodávkou energie vyrobené pomocí větrných elektráren. Se zvyšujícím se počtem integrovaných větrných elektráren do elektrizační soustavy se objevují jisté technické problémy, které je nutné řešit pro zajištění spolehlivého chodu ES. Tyto problémy jsou také v této bakalářské práci analyzovány.

V první části této práce je proveden popis vzniku větru, popis větrných elektráren, rozdělení větrných motorů, stručný popis jejich principu a vzájemná interakce větrných elektráren a okolí v místě, kde je postavena.

V dalším bodě jsou popsány vlivy na elektrizační soustavu vznikající v sítích vvn s velkým množstvím instalovaných větrných motorů (rozběr vlivů větrných elektráren na elektrizační soustavu). Tyto vlivy se dají rozdělit na systémové a lokální. Lokálním vlivům nelze zcela zabránit, protože se uplatňují vždy. Systémové vlivy se projevují až u většího počtu větrných elektráren v soustavě, proto se v elektrizační soustavě ČR vliv českých větrných elektráren zatím výrazněji neprojevuje.

Následující část analyzuje síťové kodexy zahraničních soustav (Německo, Dánsko, Irsko), ve kterých jsou shrnuty požadavky kladené na větrné elektrárny připojené do soustavy. Tyto požadavky říkají, jak se má větrná elektrárna chovat během poruch v síti, při kolísání frekvence a jiných stavech soustavy, aby nedošlo k ohrožení její stability.

Z analýzy zahraničních síťových kodexů vychází návrhy úprav síťového kodexu distribuční soustavy ČR pro větrné elektrárny popsané v posledním bodě. Protože se elektrárny během provozu v chovají vždy naprosto stejně bez ohledu na velikost síťového napětí v síti, ke které jsou připojeny, je možné aplikovat požadavky obsažené v kodexu přenosových soustav i pro nižší síťová napětí.

Větrné elektrárny v současnosti nejsou výrazným prvkem elektrizační soustavy České republiky, a proto jejich vlivy na chod soustavy jsou jen lokální a s jejich provozem je prozatím spojeno málo praktických zkušeností (velká většina současných větrných elektráren je připojena do sítě s hladinou vysokého napětí). V souvislosti s očekávaným rozšířením jejich uplatnění v ES ČR je potřeba počítat s některými technickými problémy, které jejich rozvoj přinese. Současná rozsáhlá projektová příprava nových větrných parků vyústí v konkrétní projekty, které budou vyvedeny do distribučních (DS) a přenosových (PS) soustav.

Větší rozšíření větrných elektráren je stále spojeno se širokým spektrem názorů, od výrazné podpory ze strany ekologických aktivistů, potenciálních investorů a některých provozovatelů, až po pesimistické přístupy například některých místních úřadů, zastupitelstev nebo ochránců přírody. I když má větrná energetika nepopíratelný podíl na ochraně životního prostředí, snížení závislosti na těžbě uhlí a na dovozech energie bude u nás kvůli poměrně nízkému větrnému potenciálu i v budoucnu jen doplňkovým zdrojem.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BACHMANN, U., ERLICH, I., WINTER, W. Advanced Grid Requirements for the Integration of Wind Turbine into the German Transmission System [on line]. 2006, [www.uni-duisburg.de/FB9/EAUN/downloads/papers/bachmann2006.pdf](http://www.uni-duisburg.de/FB9/EAUN/downloads/papers/bachmann2006.pdf)
- [2] COMMISSION FOR ENERGY REGULATION. Wind Farm Transmission Grid Code Provisions [on line]. 2004, [www.cer.ie/CERDocs/cer04237.pdf](http://www.cer.ie/CERDocs/cer04237.pdf)
- [3] ČEPS a.s., Pravidla provozování přenosové soustavy [on line]. 2008, [www.ceps.cz/doc/kodex/ČástIV\\_08\\_fin1.pdf](http://www.ceps.cz/doc/kodex/ČástIV_08_fin1.pdf)
- [4] ČKD Blansko Holding, a. s., Presentace - Wind [on line]. <http://www.ckdblansko.cz/download-wind/-/>
- [5] E.ON Netz GmbH. Grid Code for high and extra high voltage [on line]. 2006, [ieeexplore.ieee.org/iel5/9893/32012/01489534.pdf?arnumber=1489534](http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9893/32012/01489534.pdf?arnumber=1489534)
- [6] ELKRAFT SYSTEM AND ELTRA. Wind turbines connected to grids with voltages below 100 kV [on line]. 2004, [www.folkecenter.net/.../pdf/GRID\\_Windturbines\\_connected\\_to\\_grids\\_with\\_voltages\\_below\\_100kV\\_2004.pdf](http://www.folkecenter.net/.../pdf/GRID_Windturbines_connected_to_grids_with_voltages_below_100kV_2004.pdf)
- [7] EWEA Report. Large scale integration of wind energy in the European power [online]. 2005, [http://www.ewea.org/fileadmin/ewea\\_documents/documents/publications/grid/051215\\_Grid\\_report.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/grid/051215_Grid_report.pdf)
- [8] <http://www.alternativni-zdroje.cz/vetrne-elektrarny>
- [9] <http://www.hibernianwindpower.ie/windfarms/overview.htm>
- [10] <http://www.vetrneelektrarny.bestweb.cz>
- [11] <http://www.vetrnyserver.cz>
- [12] <http://www.wind-energie.de/en/wind-energy-in-germany/overview/>
- [13] IOV, F., HANSEN, A., D., SØRENSEN, P., CUTULUTIS, N., A. Mapping of grid faults and grid codes [on line]. Technical university of Denmark, 2007, [www.risoe.dk/rispubl/reports/ris-r-1617.pdf](http://www.risoe.dk/rispubl/reports/ris-r-1617.pdf)
- [14] KOLEKTIV AUTORŮ. *Obnovitelné zdroje energie*. Praha: FCC PUBLIC, 2001, 208 stran
- [15] PAZDERA, L. Role větrné energetiky v ČR. *Větrná energie v ČR a SR 2007*, Praha 18.10. 2007, na CD-ROM
- [16] PTÁČEK, J., MODLITBA, P. Rizika provozu elektrických sítí a soustav s velkým podílem větrných elektráren. *Energetika*, říjen 2005
- [17] RYCHETNÍK, V., JANOUŠEK, J., PAVELKA, J. *Větrné motory a elektrárny*. Praha: Vydavatelství ČVUT Praha, 1997, 186 stran

## Příloha A Lokality funkčních větrných elektráren

Tab. A-1 Přehled lokalit funkčních větrných elektráren v ČR [8]

| Lokalita                 | Typ VE                         | Počet turbín | Instalovaný výkon    | Rok výstavby |
|--------------------------|--------------------------------|--------------|----------------------|--------------|
| Mladoňov                 | Vítkovice VE 315-1,2           | 1            | 315kW                | 1993 -1995   |
| Mravenečník              | W-2500, EWT 315, EWT 630       | 3            | 220, 315, 630kW      | 1993 - 1996  |
| Poutní vrch Svatý Hostýn | Vestas V27                     | 1            | 225kW                | 1994         |
| Velká Kraš               | Vestas V29                     | 1            | 225kW                | 1994         |
| Ostružná                 | Vestas V39                     | 6            | 6 x 500kW            | 1994         |
| Nový Hrádek              | EKOV E 400                     | 4            | 4 x 400kW            | 1995         |
| Boží Dar - Neklid        | EWT 315                        | 1            | 315kW                | 2001         |
| Protivanov I             | FL 100                         | 1            | 100kW                | 2002         |
| Protivanov II            | MD77                           | 2            | 2 x 1,5MW            | 2006         |
| Jindřichovice pod Smrkem | ENERCON E - 40                 | 2            | 2 x 600kW            | 2003         |
| Nová Ves v Horách        | MD 77                          | 2            | 2 x 1,5MW            | 2003 - 2004  |
| Loučná                   | DeWind D4                      | 3            | 3 x 600kW            | 2004         |
| Lysý vrch                | Tacke TW 500                   | 5            | 5 x 500kW            | 2005         |
| Potštát                  | Bonus                          | 2            | 2 x 150kW            | 2005         |
| Břežany - Lopatov        | Vestas V52                     | 5            | 5 x 850kW            | 2006         |
| Hraničné Petrovice       | Vestas V52                     | 1            | 850kW                | 2005         |
| Hraničné Petrovice II    | Nordex N54                     | 1            | 850kW                | 2005         |
| Petrovice - Tisá         | ENERCON E - 70                 | 1            | 2,0MW                | 2006         |
| Pavlov                   | Vestas V90 - V52               | 4            | 2 x 2,0MW, 2 x 850kW | 2006         |
| Čižebná - Nový Kostel    | Vítkovice VE 315, Tacke TW 500 | 1 + 3        | 1 x 315kW, 3 x 510kW | 2004 - 2006  |

|                                              |                   |   |           |      |
|----------------------------------------------|-------------------|---|-----------|------|
| Podmílešská výšina - Rusová                  | Nordex N80        | 3 | 3 x 2,5MW | 2006 |
| Drahany                                      | Vestas V90        | 1 | 2MW       | 2006 |
| Větrný park Oderské vrchy<br>- Veselí – Odry | Vestas V90        | 2 | 2 x 2MW   | 2006 |
| Anenská Studánka                             | FL 250            | 2 | 2 x 250kW | 2006 |
| Pohledy u Svitav                             | FL 250            | 1 | 250kW     | 2004 |
| Gruna - Žipotín                              | De Wind D4        | 2 | 600kW     | 2006 |
| Horní Guntramovice                           | ENERCON<br>E - 70 | 1 | 2,0MW     | 2007 |
| Nové Město - Vrch Tří pánů -<br>Bouřňák      | ENERCON<br>E - 70 | 3 | 3 x 2MW   | 2006 |
| Boží Dar - Neklid                            | ENERCON<br>E - 33 | 3 | 3 x 330kW | 2006 |
| Kámen                                        | Vestas V90        | 1 | 2MW       | 2007 |
| Měděnec - Mědník                             | ENERCON<br>E - 70 | 8 | 8 x 2MW   | 2007 |
| Kryštofovy Hamry                             | ENERCON<br>E - 70 | 8 | 8 x 2MW   | 2007 |
| Pchery                                       | WWD-3             | 2 | 2 x 3MW   | 2007 |
| Maletín                                      | Vestas V90        | 1 | 2MW       | 2008 |
| Lipná                                        | Vestas V90        | 1 | 2MW       | 2008 |