



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

VLIVY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN NA KVALITU ELEKTRICKÉ ENERGIE

INFLUENCE OF WIND FARMS ON ELECTRICAL ENERGY QUALITY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN BARTKO

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ MALÝ

BRNO 2008

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

**VLIVY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN NA KVALITU
ELEKTRICKÉ ENERGIE**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

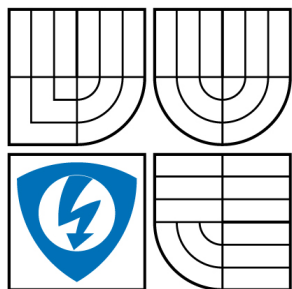
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN BARTKO

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Bartko Jan

ID: 83943

Ročník: 3

Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Vlivy větrných elektráren na kvalitu elektrické energie

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. stručná prezentace výrobců větrných elektráren a jejich zastoupení na světovém trhu,
2. způsoby vlivu VTE na kvalitu elektrické energie,
3. modelový příklad výpočtu vlivu VP,
4. zhodnocení vlivu integrace na cenu el. energie.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího.

Termín zadání: 17.12.2007

Termín odevzdání: 4.6.2008

Vedoucí práce: Ing. Jiří Malý

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Jan Bartko

Bytem:

Narozen/a (datum a místo): 7.6.1985, Uherské Hradiště

(dále jen "autor")

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno 2

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

(dále jen "nabyvatel")

Článek 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: Vlivy větrných elektráren na kvalitu elektrické energie

Vedoucí/školitel VŠKP: Ing. Jiří Malý

Ústav: Ústav elektroenergetiky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- tištěné formě - počet exemplářů 1
- elektronické formě - počet exemplářů 1

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

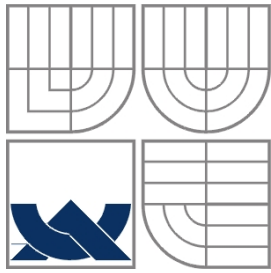
Bibliografická citace práce:

BARTKO, J. Vlivy větrných elektráren na kvalitu elektrické energie. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 53 s. 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 přiloženém seznamu.

Zároveň bych na tomto místě chtěl poděkovat svým rodičům za podporu během celé doby mého studia.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Bakalářská práce

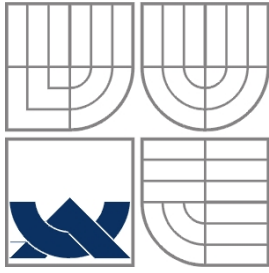
Vlivy větrných elektráren na kvalitu elektrické energie

Jan Bartko

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 Farms on Electrical Energy Quality

by

Jan Bartko

Supervisor: Ing. Jiří Malý

Brno University of Technology, 2008

Brno

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá vlivy větrných elektráren na kvalitu elektrické energie. Cílem práce bylo pomocí modelu konkrétní sítě vyhodnotit vliv těchto zdrojů při velkém zastoupení v energetickém mixu. První část práce byla věnována prezentaci výrobců větrných elektráren a jejich zastoupení na světovém a evropském trhu. Zároveň byly představeny nové technologie využívání větrné energie. Druhá část se zabývá způsoby vlivu větrných elektráren na kvalitu elektrické energie. V této části byl pomocí počítačového programu GLF vytvořen model sítě, do kterého byly připojovány větrné parky. Pomocí tohoto modelu byla zpracována analýza lokálních vlivů větrných elektráren na kvalitu elektrické energie. V poslední části byl zhodnocen vliv integrace větrných elektráren na cenu elektrické energie a náklady na stavbu a provoz, včetně prognózy do budoucna.

KLÍČOVÁ SLOVA: větrná elektrárna; větrný park; flickr; kvalita elektrické energie; jalový výkon; činný výkon; přípojný bod

ABSTRACT

This thesis is occupied by influences of wind farms on electrical energy quality. Object of thesis was analyse influence of these power plants in a large of number. The first part was attended to presentation of wind turbines producers and their agency on worldwide and European market. At the same time were introduced new technologies of wind power generate. The second part is occupied by influence of wind farms on electrical energy quality. In this part was created model of feed system by GLF software and wind farms were connected into it. By the help of this model was run analyze of local influences of wind power plants on electrical energy quality. In last part was assessed influence of wind power plants feed system integration on electrical energy price, build and operating costs, including the prognosis to the future.

KEY WORDS: wind power plant; wind farm; flicker; power quality; reactive power; active power; point of common coupling

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	12
SEZNAM TABULEK	13
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	14
1 ÚVOD	15
1.1 VÍTR	15
1.1.1 KOEFICIENT ROČNÍHO VYUŽITÍ.....	17
1.2 VĚTRNÉ MOTORY	18
1.2.1 VĚTRNÉ MOTORY PRACUJÍCÍ NA ODPOROVÉM PRINCIPU	18
1.2.2 VĚTRNÉ MOTORY PRACUJÍCÍ NA VZTLAKOVÉM PRINCIPU	18
1.2.3 VĚTRNÉ MOTORY S VODOROVNOU OSOU	19
1.2.4 REGULACE VĚTRNÝCH MOTORŮ.....	20
1.3 OSTATNÍ ČÁSTI VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY.....	22
2 SVĚTOVÝ TRH A NEJVĚTŠÍ VÝROBCI VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	24
2.1 VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA ENERCON E82.....	26
2.2 VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA VESTAS V90 V PROVEDENÍ 2,0 MW	28
3 KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE	30
3.1 PODMÍNKY PRO PŘIPOJENÍ VTE DO DS	32
3.2 FLICKER.....	33
3.2.1 FLICKER VZNIKAJÍCÍ SPÍNACÍMI POCHODY	33
3.2.2 FLICKER VZNIKAJÍCÍ ZA SOUVISLÉHO BĚHU	37
4 MODELOVÝ PŘÍKLAD VÝPOČTU VLIVU VP.....	38
4.1 MODEL SÍTĚ V REFERENČNÍM STAVU	39
4.2 MODEL SÍTĚ PO PŘIPOJENÍ VTE A VP NA INSTALOVANÝ VÝKON	41
4.3 ANALÝZA PROVOZNÍCH VLIVŮ VTE.....	44
5 ZHODNOCENÍ VLIVU INTEGRACE NA CENU ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	46
6 ZÁVĚR.....	48
POUŽITÁ LITERATURA	50
PŘÍLOHA A MODEL SÍTĚ VVN V REFERENČNÍM STAVU.....	51
PŘÍLOHA B MODEL SÍTĚ VVN PO PŘIPOJENÍ VTE A VP NA INSTALOVANÝ VÝKON...52	
PŘÍLOHA C MODEL SÍTĚ VVN PRO ANALÝZU PROVOZNÍCH VLIVŮ VP	53

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1-1 Výkon vzduchu vztažený na jednotku plochy, kterou vzduch prochází.....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 1-2 Větrná mapa ČR v 10 metrech nad zemí [7]</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 1-3 Schéma moderní větrné elektrárny pracující na vztlakovém principu</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 1-4 Způsob regulace vrtulových listů.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2-1 Podíl výrobců na německém trhu</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 2-2 Podíl výrobců na světovém trhu</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 2-3 Schéma gondoly větrné elektrárny Enercon E82</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 2-4 Výkonové charakteristiky turbíny Enercon.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 2-5 Schéma strojovny větrné elektrárny Vestas V90.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 2-6 Výkonová charakteristika Vestas V90 verze 2,0 MW [9]</i>	<i>29</i>
<i>Obr.3-1 Výkon během startu turbíny s regulací pitch a stálými otáčkami generátoru.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 3-2 Napětí během startu turbíny s regulací pitch a stálými otáčkami generátoru</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 3-3 Výkon během startu turbíny s proměnnými otáčkami generátoru.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 3-4 Výkon během odstavení turbíny s regulací stall a stálými otáčkami generátoru</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 3-5 Výkon během odpojování turbíny s proměnnými otáčkami</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 3-6 Kolísání výkonu během souvislého běhu VP s jmenovitým výkonem 225 kW [15]</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4-1 Vliv VTE na velikost napětí v přípojném bodě</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 4-2 Velikost napětí v PCC v závislosti na účinníku při různých provozních stavech VTE</i>	<i>45</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Přehled největších výrobců VTE včetně některých vyráběných typů zařízení</i>	25
<i>Tab. 2-2 Technická data větrné elektrárny Enercon E82</i>	27
<i>Tab. 2-3 Technická data větrné elektrárny Vestas V90 verze 2,0 MW</i>	29
<i>Tab.4-1 Sledované veličiny v jednotlivých uzlech modelu</i>	39
<i>Tab. 4-2 Velikost a dovolené odchylky napájecího napětí</i>	39
<i>Tab.4-3 Zatížení jednotlivých vedení v referenčním stavu</i>	40
<i>Tab. 4-4 Typy a délky vedení použité v modelu</i>	41
<i>Tab. 4-5 Změny napětí v uzlech po zapojení větrných elektráren do sítě</i>	42
<i>Tab. 4-6 Zatížení vedení po připojení VTE a VP na instalovaný výkon</i>	43
<i>Tab. 4-7 Změny velikosti napětí v přípojném bodě po připojení VTE</i>	45
<i>Tab. 5-1 Výkupní ceny a zelené bonusy pro větrné elektrárny [13]</i>	46

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

DS	distribuční soustava
ES	elektrizační soustava
EU	Evropská unie
GLF	Graphic Load Flow
HDO	hromadné dálkové ovládání
I	elektrický proud
P	činný výkon
P_i	instalovaný výkon
PCC	společný přípojný bod
PDS	provozovatel distribuční soustavy
PPDS	Pravidla provozování distribučních soustav
PS	přenosová soustava
S	plocha
U	elektrické napětí
VCS	Vestas Converter Systems
VP	větrný park
VTE	větrná elektrárna
W_{max}	maximální možná vyrobená energie
W_{skut}	skutečná vyrobená energie
c_p	součinitel výkonu
$\cos \varphi$	účiník
$k_r\%$	koeficient ročního využití vyjádřený v procentech
v	rychlost větru
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí
ρ	hustota vzduchu

1 ÚVOD

Využívání větrných elektráren k výrobě elektrické energie dodávané do rozvodných sítí je ve světě a zvláště na území ČR velmi mladou technickou oblastí. Intenzivní zájem o využití větrné energie se projevil na začátku sedmdesátých let minulého století. Bylo to období, kdy si společenství průmyslových zemí uvědomilo nebezpečí ekologické krize v globálním rozsahu a intenzivně začalo hledat cesty k jejímu překonání. Hrozba krize je spojena jak s možností vyčerpání neobnovitelných zdrojů, tak s produkcí skleníkových plynů a s napjatým stavem absorpční kapacity přírodních systémů pro odpadní látky, produkované při výrobě elektrické energie. Dalším důležitým impulsem pro rozvoj větrné energetiky bylo embargo zemí OPEC na vývoz ropy do průmyslově vyspělých zemí. Embargo bylo vyhlášeno na podzim roku 1973. Tehdy některé ohrožené země začaly pod tlakem prudkého zvýšení světových cen veškeré energie chápat omezenost přístupu ke klasickým energetickým zdrojům energie v širokém měřítku. K průkopníkům konstrukce větrných elektráren v rámci Evropy patřily Dánsko a tehdejší západní Německo [2].

Evropská Unie je lídrem na poli výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů, zvláště pak z energie větrné. Do roku 2006 byly v EU postaveny větrné elektrárny s celkovým instalovaným výkonem překračujícím 48 000 MW. Největší podíl vlastní Německo (20 622 MW), Španělsko (11 615 MW) a Dánsko (3 136 MW). V České republice se instalovaný výkon za rok 2006 téměř zdvojnásobil a do konce téhož roku disponovala 50 MW.

Dvacet sedm států EU se zavázalo dosáhnout snížení produkce skleníkových plynů nejméně o 20 % před rokem 2020 ve srovnání s hodnotami za rok 1990. EU také nabídla zvýšení tohoto cíle z 20 na 30 %, jestliže země jako USA, Čína a Indie k této dohodě přistoupí. Dohoda také stanoví jako povinný cíl do roku 2020 pokrýt 20 % z celkové spotřeby elektrické energie v EU z obnovitelných zdrojů.

1.1 Vítr

Vítr je pohyb vzduchu způsobený rozdíly atmosférického tlaku, které jsou samy důsledkem různých teplot a jim odpovídajících různých hustot vzduchu. Proudění vzduchu z míst vyššího tlaku vzduchu do míst nižšího tlaku vzduchu a tím i rychlosti větru závisejí na velikosti tohoto rozdílu. Nejdůležitějším údajem při využívání energie větru je jeho rychlost, neboť má největší vliv na celkový i využitelný výkon větru. Rychlost větru je ovlivňována zemským povrchem a v nejtěsnější blízkosti směrem k němu obecně klesá. V místech, kde je rovný terén, je závislost mezi rychlostí a výškou ovlivňována pouze drsností povrchu. Rychlost větru se obvykle udává v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, někdy se také odhaduje pomocí Beaufortovy stupnice.

Údaje o směru větru mohou být významné v některých případech při volbě vhodných lokalit pro větrné motory, leží-li například ve směru převládajících větrů nějaká překážka nebo způsobuje-li reliéf zemského povrchu v některém směru zvýšení rychlosti větru. Rovněž při rozmisťování více větrných motorů ve skupině je důležité znát převládající směr větru, aby se minimalizovalo jejich vzájemné ovlivňování.

Výkon větru protékajícího jednotkovou plochou vyjádříme

$$P_v = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}; \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}), \quad (1.1)$$

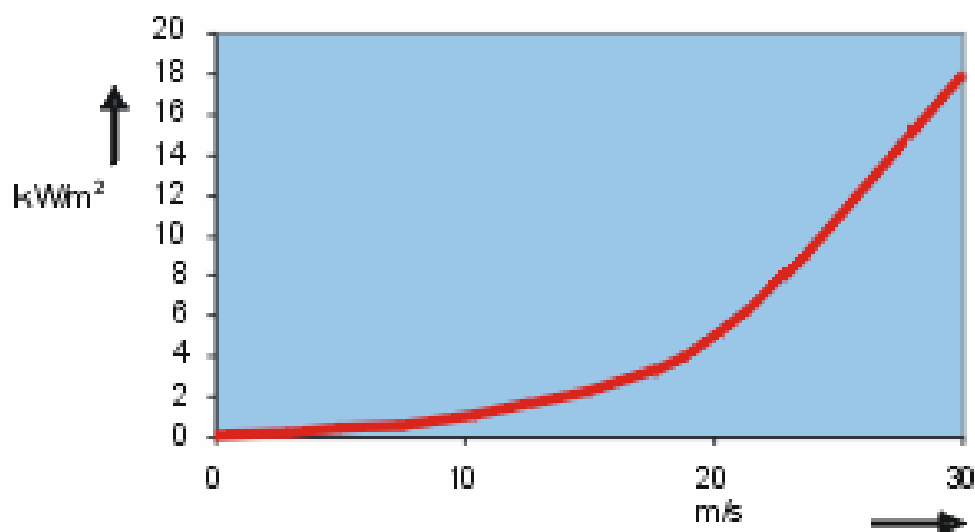
kde P_v je hustota výkonu větru, ρ je hustota vzduchu a v je rychlost větru.

Ze zákona zachování energie víme, že za žádných okolností nelze z větru odebrat více energie, než v něm je. Ve skutečnosti nelze ani větrným motorem přeměnit všechnu energii větru, aniž by nevznikaly ztráty. Z tohoto důvodu je velmi důležité pečlivé měření atmosférických podmínek v lokalitách, kde mají být větrné elektrárny umístěny.

Výkon odebraný proudícímu vzduchu rotorem turbíny P_s je určen vztahem

$$P_s = \frac{1}{2} S c_p \rho v^3 \quad (\text{W}; \text{m}^2, -, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}), \quad (1.2)$$

kde c_p je součinitel výkonu, který je závislý na tom, v jaké míře rotor snižuje rychlost protékajícího vzduchu. Výkonový součinitel má teoretické maximum $c_{p,\max} = 0,593$.



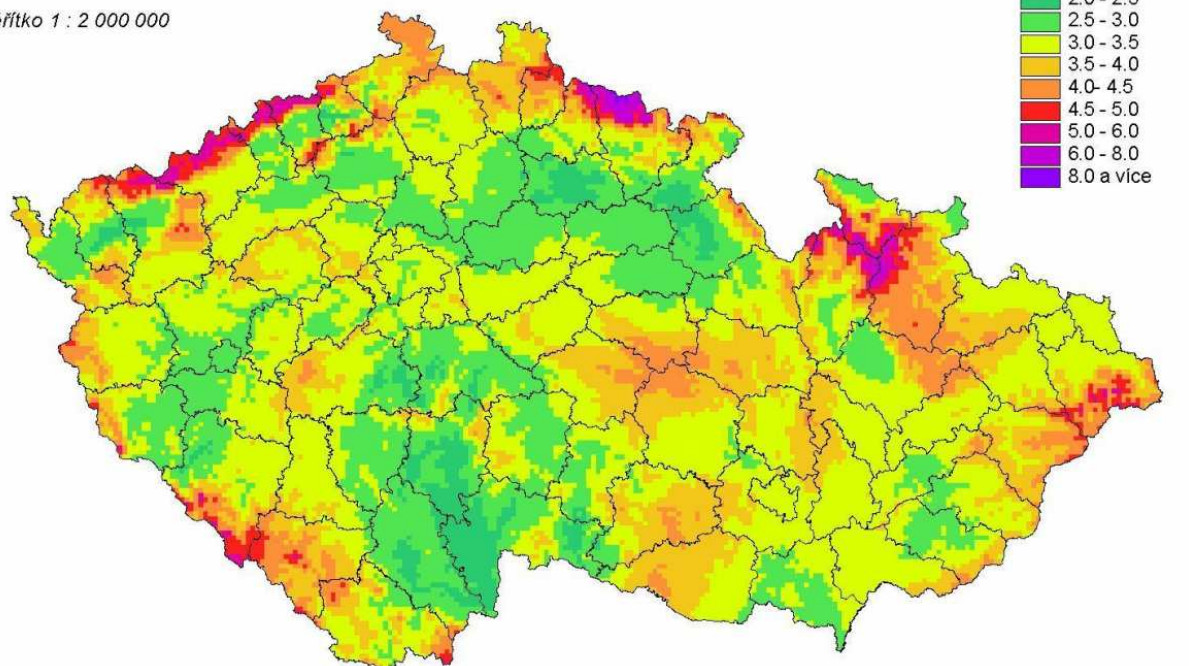
Obr. 1-1 Výkon pohybujícího se vzduchu vztahovaný na jednotku plochy, kterou vzduch prochází

Z uvedených vztahů vyplývá, že výkon větrné elektrárny je závislý mimořádně citlivě na rychlosti větru. Je zřejmé, že i chyby určení rychlosti větru při hodnocení větrného potenciálu se z toho důvodu mohou nepříznivě promítnout do výsledku.

Větrná mapa ČR

průměrná rychlost větru v 10 m

měřítko 1 : 2 000 000



Obr. 1-2 Větrná mapa ČR v 10 metrech nad zemí [7]

Rychlost větru, při které elektrárna začíná dodávat energii do sítě je 3 až 5,5 m.s⁻¹. Jmenovitého výkonu se dosahuje při rychlosti větru 12 až 14 m.s⁻¹. Nad touto rychlostí již výkon elektrárny nestoupá a při rychlostech větru nad 23 m.s⁻¹ se větrný motor zabrzdí a odstaví.

Měřené údaje se musí přepočítávat na výšku, ve které je umístěn rotor.

1.1.1 Koeficient ročního využití

Vzhledem k tomu, že rychlost větru kolísá a po většinu doby práce nedosahuje své jmenovité hodnoty, dodává i větrný agregát podstatně méně energie než by odpovídalo jeho jmenovitému výkonu. Energetická výtěžnost větrné elektrárny, někdy také reprezentovaná koeficientem ročního využití, je definovaná jak poměr množství energie skutečně vyrobené k množství energie, kterou by stroj vyrobil při běhu na plný jmenovitý výkon nepřetržitě po celý rok .

$$k_{r\%} = \frac{W_{skut}}{W_{max}} \cdot 100 = \frac{W_{skut}}{P_i \cdot 8760} \cdot 100 \quad (\%; \text{ kWh, kWh}), \quad (1.3)$$

kde $k_{r\%}$ je koeficient ročního využití vyjádřený v procentech, W_{skut} skutečná vyrobená energie za rok, W_{max} maximální možná vyrobená energie a P_i je instalovaný výkon.

V České republice jsou příznivé větrné podmínky převážně v horských oblastech a na vrchovinách. Podle provedeného posouzení větrné situace u nás by bylo možné vyrobit ročně větrnými elektrárnami 1 000 až 3 000 GW.h. Pro srovnání jaderná elektrárna Dukovany s instalovaným výkonem 1 776 MW vyrobila v roce 2006 více než 14 000 GW.h [4] a celková vyrobená elektrická energie v České republice netto představovala 77 884 GW.h [3]. Podíl větrných elektráren na celkovou výrobu by tedy byl i při maximálním využití větrného potenciálu zanedbatelný.

1.2 Větrné motory

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. Tuto skutečnost popisuje první termodynamický zákon (také první termodynamická věta), která představuje ve fyzice formulaci zákona zachování energie.

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

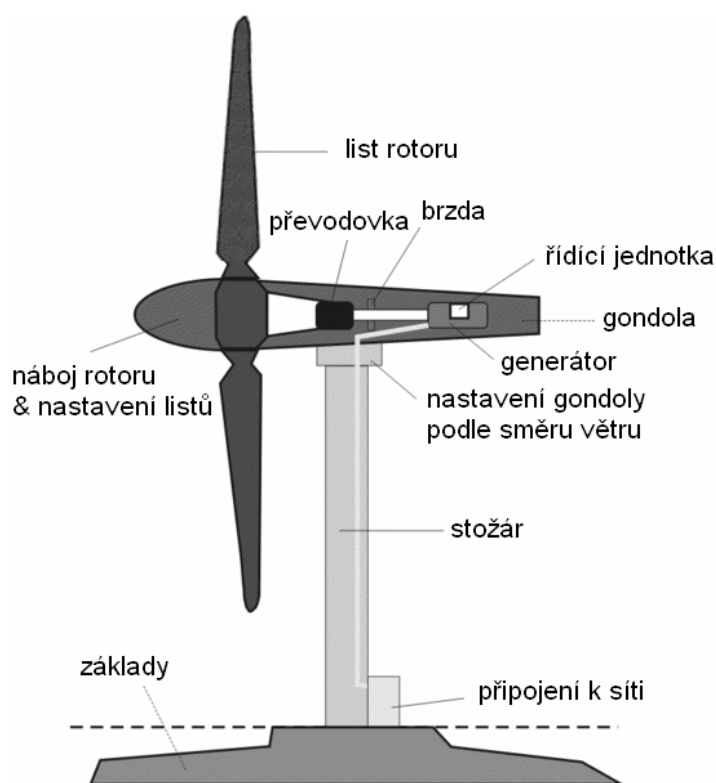
1.2.1 Větrné motory pracující na odporovém principu

Patří mezi nejstarší a mohou mít vodorovnou i svislou osu otáčení. Svoji konstrukcí se mohou značně lišit, jejich podstatou však zůstává, 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 menší rychlostí než je rychlost větru. Z konstrukčního hlediska mohou být tyto větrné motory řešeny několika způsoby.

1.2.2 Větrné motory pracující na vztlakovém principu

Větrné motory s vodorovnou osou pracující na vztlakovém principu jsou nejrozšířenějším typem motorů pro přeměnu větrné energie. Mezi tyto motory patří vrtule a větrná kola, které jsou svojí rovinou otáčení kolmo ke směru proudění větru (obr. 1-3). Vrtule se nejčastěji vyskytují ve dvou nebo třílistém provedení, byly však též vyrobeny jednolísté vrtule s protizávažím. 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 brždění a případně snížení odporu vrtule při zastaveném rotoru.



Obr. 1-3 Schéma moderní větrné elektrárny pracující na vztlakovém principu

Byly instalovány i větrné elektrárny s protiběžnými vrtulemi z nichž jedna byla spojena s rotorem a druhá se statorem generátoru, které se proti sobě otáčely a vyráběly střídavý proud prakticky s dvojnásobnou frekvencí než v případě pevného statoru.

Na principu vztlaku pracují také větrné motory s vertikální osou, které patentoval francouzský inženýr Darrieus. Jejich rotor může mít dvou, tří i čtyřlísté provedení a listy s aerodynamickým profilem mohou být tvarovány tak, aby jejich namáhání odstředivými silami na ohyb bylo minimální.

Větrná kola mají místo vrtulových listů jednoduché, obvykle plechové lopatky, jejichž počet se pohybuje od čtyř do několika desítek podle velikosti větrného kola a podle požadované rychloběžnosti. V zásadě platí, že frekvence otáčení při stejném průměru rotoru nepřímo závisí na počtu lopatek, při větším počtu lopatek se větrný motor zase snadněji rozbíhá a má při rozběhu větší moment síly.

1.2.3 Větrné motory s vodorovnou osou

Tyto větrné motory se vyrábějí do výkonů až několika megawattů a některé jejich typy jsou velmi rozšířené. Lze je rozdělit do tří skupin:

- pomaloběžné větrné motory
- rychloběžné větrné motory

1.2.3.1 Pomaloběžné větrné motory

Rotor je tvořen velkým počtem nejčastěji plechových, jednoduše tvarovaných lopatek. Maximální momentový součinitel a tedy i moment síly při stojícím rotoru zajišťoval snadný rozběh i při malých rychlostech větru (2 až $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) a při větších pasivních odporech pracovního stroje.

U moderních pomaloběžných větrných motorů používaných pro pohon vodních čerpadel se dochází k přechodovému řešení, kdy počet rotorových lopatek je omezen (například 6 až 8) podle velikosti rotoru. Tento větrný motor se bude rozbíhat při vyšších rychlostech větru, ztráta nevyužitě energie při nízkých rychlostech větru však bude zanedbatelná.

1.2.3.2 Rychloběžné větrné motory

Tyto motory mají rotor provedený nejčastěji jako dvou nebo třílistou vrtuli, s pevnými nebo natáčecími listy. U větrných elektráren větších výkonů jsou při dosažení optimálních hodnot v některých režimech práce celkové účinnosti i přes 40% z výkonu větru protékajícího rotorem. Současné rychloběžné větrné motory se používají převážně na výrobu elektrické energie, mohou však pohánět přímo také kompresory, odstředivá čerpadla a jiné pracovní stroje.

Vrtulové listy mají u všech větších větrných motorů velmi kvalitní aerodynamický profil, který se mění po celé délce listu tak, aby byla dosažena vysoká účinnost v co největším rozsahu pracovních výkonů a současně, aby byly respektovány požadavky pevnosti a provozní spolehlivosti. Výhodou těchto rychloběžných větrných motorů je jejich relativně malá hmotnost.

Nevýhodou rychloběžných rotorů je jejich špatný rozběh při malých rychlostech větru. Pokud nejsou opatřeny zařízením pro jeho usnadnění, rozbíhají se teprve při rychlostech větru kolem $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Jsou-li již v chodu, postačí na jejich provoz i menší rychlost větru. Při rychlostech větru pod $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ lze počítat s využíváním energie větru u těchto motorů jen zcela výjimečně a množství vyrobené energie je jen velmi malé.

Řešení rotoru s natáčecími listy, které je možné vzhledem k jejich malému počtu, umožňuje také regulovat otáčky rotoru podle potřeby v širokém rozmezí rychlostí větru. Podle použitého způsobu regulace lze dosáhnout v některých případech plné provozní spolehlivosti i při rychlostech větru přesahujících 50 až $70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, aniž by bylo třeba rotor zastavovat. Otáčky rotoru totiž nemusí nijak výrazně stoupnout a tím zůstanou setrvačné síly, které jsou pro namáhání rotoru rozhodující, na přijatelné úrovni.

1.2.4 Regulace větrných motorů

Vzhledem ke značně proměnlivým rychlostem větru, musí být, až na nepatrné výjimky, větrné motory chráněny proti překročení maximálních bezpečných otáček, v mnoha případech pak jsou omezeny otáčky i výkon pracovního stroje. Podle provedení rotorů existují v podstatě dvě základní skupiny regulačních principů:

- pro rotory s pevnými lopatkami nebo listy,
- pro vrtule s natáčecími listy.

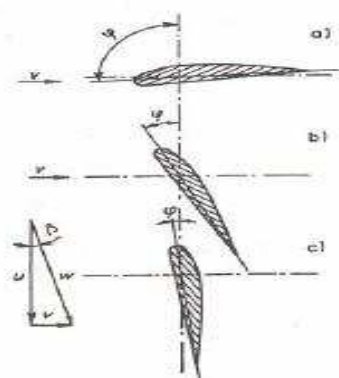
1.2.4.1 Rotory s pevnými lopatkami nebo listy („stall“)

Jedná se o regulaci odtržením proudu na listech vrtule s konstantním úhlem nastavení listů. Poloha rotoru se vzhledem ke směru větru nemění. Tyto principy využívají k regulaci aerodynamických brzd. Jako aerodynamické brzdy mohou být použity samostatné desky, které jsou při nízkých otáčkách rotoru nastaveny tak, aby nekladly velký odpor, při vyšších otáčkách se buď samočinně vlivem odstředivých sil nebo v součinnosti s regulačním zařízením natácejí a jejich odpor se zvětšuje. Tím výrazně zhoršují účinnost rotoru jako celku a omezují jeho maximální otáčky. Někdy se tyto brzdy umisťují přímo na lopatky vrtule, které při normálním chodu mají tětivu ve směru relativní rychlosti větru. Při brždění se jejich tětiva otočí o 90° ve směru radiálním, kdy kladou maximální odpor. Používají se rovněž principy běžné jako aerodynamické brzdy na křídlech letadel, různé klapky nebo vysouvateľné výstupky na profilech. U větrných elektráren s asynchronními generátory připojených k síti, které pracují s málo proměnlivými otáčkami, se často výkon reguluje tím, že u vhodně navrženého listu se při zvyšující se rychlosti větru mění rychlostní poměr u/v , tím i úhel náběhu na profil, na podtlakové straně profilu se proud začne odtrhávat a účinnost rotoru klesá tak, že výkon zůstává přibližně po dosažení svého maxima konstantní nebo mírně klesá. I takové rotory však bývají vybaveny aerodynamickou brzdou, která pomáhá zastavit rotor při překročení maximálních přípustných rychlostí větru.

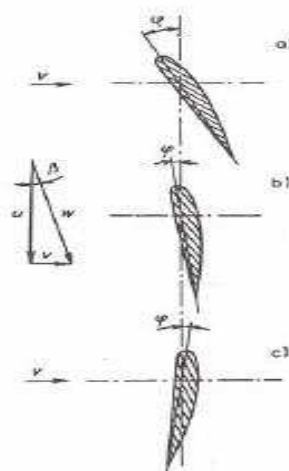
1.2.4.2 Vrtule s natáčivými listy („pitch“)

Velmi kvalitní regulace lze dosáhnout při použití rotorů s natáčivými vrtulovými listy. Tento princip zajišťuje chod větrného motoru při konstantních nebo málo proměnných otáčkách v relativně velkém rozsahu rychlostí větru, aniž by se výrazně měnila jeho účinnost. Současně umožňuje tento princip snadnější rozběh větrného motoru při vhodném natočení vrtulových listů na stojícím rotoru. Podle způsobu natáčení vrtulových listů existují dva způsoby, které lze na první pohled rozeznat na stojícím větrném motoru.

První způsob nastavuje při zastaveném větrném motoru vrtulové listy „do praporu“, tj. náběžnou hranou proti větru tak, aby kladly větru minimální odpor a nevznikala na nich síla, která by roztáčela rotor. Přestavování vrtulového listu v celkovém rozsahu 120° a při změně smyslu natáčení, klade větší nároky na konstrukční provedení regulačního mechanismu (obr. 1-5).



Obr. 1-4 Způsob regulace vrtulových listů „do praporu“



Obr. 1-5 Způsob regulace vrtulových listů „na odtržení“

Tuto nevýhodu odstraňuje druhý způsob regulace, kdy po dosažení jmenovitých otáček vrtulový list nemění svůj smysl natáčení, ale při vzrůstu rychlosti větru se natáčí dále ve stejném směru až do polohy, kdy tětíva profilu zaujme polohu prakticky rovnoběžnou s rovinnou vrtule (obr. 1-6b). Rozsah úhlu natáčení vrtulového listu je proti předchozímu principu přibližně třetinový.

Vlastní natáčení vrtulových listů nebo brzdících klapek může být zajišťováno hydraulicky, pneumaticky nebo elektricky. Při poruše regulačního a ovládacího zařízení musí být vždy zajištěno automatické zastavení větrného motoru, aby nedošlo k jeho havárii.

1.3 Ostatní části větrné elektrárny

Převodovka

Jak již bylo uvedeno, otáčky větrných motorů stejného druhu klesají s nárůstem jejich jmenovitého výkonu. Generátory přímo spojené s rotorem takového větrného motoru jsou pomaloběžné a mají speciální konstrukci. U větrné elektrárny velkého výkonu s rychloběžným generátorem je větrný motor spojen s generátorem přes mechanickou převodovku.

Víme, že otáčky větrného motoru jsou relativně nízké a jen výjimečně vyhovují požadovaným otáčkám pracovního stroje. Platí to zejména pro pracovní stroje umístěné přímo v gondole větrného motoru, kdy je třeba, aby měli co nejmenší hmotnost a pracovaly při vyšších otáčkách, než jsou otáčky motoru. Je tedy nutné mezi rotor větrného motoru a pracovní stroj zařadit převodové ústrojí s relativně velkým převodovým poměrem do rychla.

Generátor

Elektrická energie se ve větrných elektrárnách vytváří většinou asynchronními nebo synchronními generátory trojfázového střídavého proudu. Jejich základní vlastnosti se mění podle toho, zda elektrárna pracuje samostatně a dodává elektrickou energii spotřebičům v samostatné místní síti, nebo je připojena na rozvodnou elektrickou síť a spolupracuje s dalšími zdroji.

Synchronní generátor přímo připojený na rozvodnou elektrickou síť má otáčivou rychlost konstantní, danou kmitočtem sítě a počtem pólů. Při kmitočtu sítě 50 Hz jsou otáčky dvoupólového stroje 3000 min^{-1} , čtyřpólového 1500 min^{-1} , šestipólového 1000 min^{-1} .

Asynchronní generátor má otáčivou rychlost skoro konstantní. Při nulovém zatížení se jeho rychlost shoduje s otáčivou rychlostí synchronního generátoru o stejném počtu pólů a s nárůstem výkonu dodávaného do sítě se nepatrně zvyšuje. Při jmenovitém zatížení se zvýší přibližně o 2%.

Mechanická brzda

Impuls k zabrzdění větrného motoru může vycházet od snímače otáček rotoru, snímače rychlosti větru a musí být rovněž možné zabrzdit větrný motor jeho obsluhou. U větrných elektráren pracují tyto zabezpečovací soustavy na elektrickém principu řízeny počítačem, který kontroluje ještě řadu dalších údajů o chodu celého zařízení (teploty, vibrace) a chrání jej před poškozením. Tam, kde není elektrická energie k dispozici, používají se většinou různé mechanické principy s omezenými možnostmi. U malých větrných motorů se složité zabezpečovací soustavy nepoužívají. Čidla pro snímání vibrací signalizují vznik nadměrných vibrací, způsobených například námrazou nebo poškozením rotoru a dávají impuls k zastavení větrného motoru.

Větrné elektrárny jsou opatřeny mechanickou brzdou, většinou umístěnou za převodovkou na straně generátoru, která je schopna zabrzdit rotor za jakýchkoliv povětrnostních podmínek. Tato brzda je disková a spouští se pružinou při poklesu hydraulického tlaku. Dále se při nárůstu otáček vlivem velké rychlosti větru používají aerodynamické brzdy. Tyto brzdy neubrzdí větrný motor k úplnému zastavení, ale zabrání nebezpečnému mechanickému přetížení rotoru. Stojící větrná elektrárna musí odolávat rychlosti větru až $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

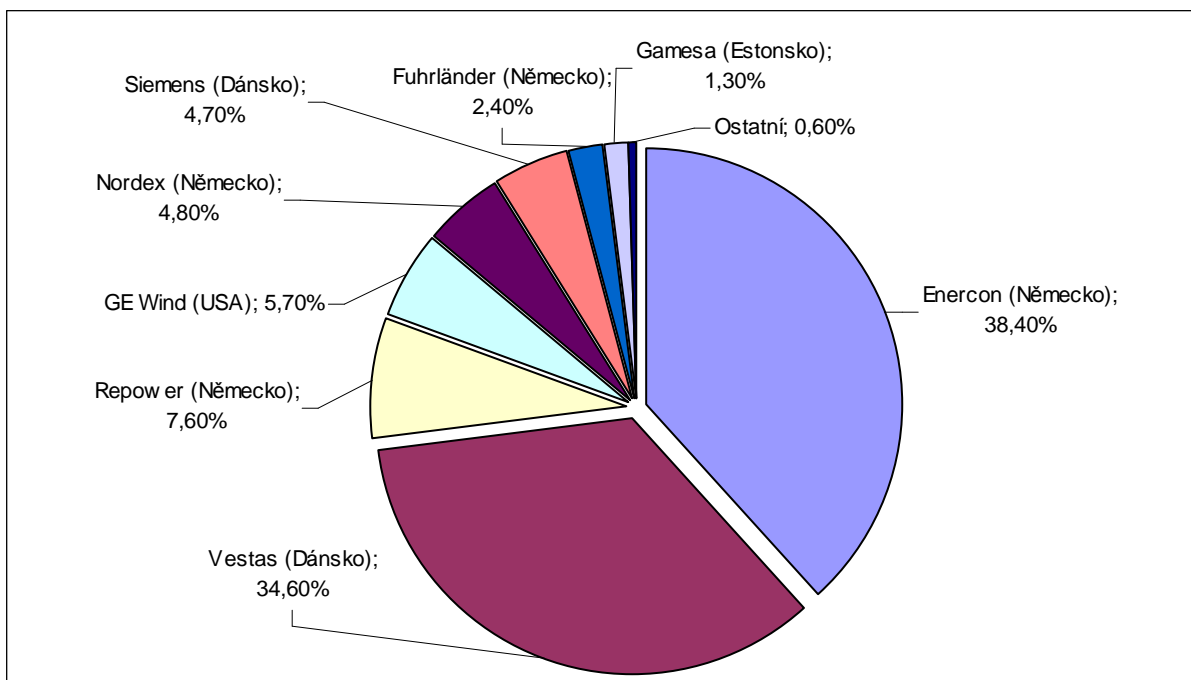
Větrné elektrárny, dodávající energii do rozvodné sítě, se běžně vyrábějí v rozsahu výkonů od desítek kW až do výkonu 5MW(Repower)[5].

Ve větrných elektrárnách středních a velkých výkonů se k výrobě elektrické energie nejčastěji používají běžné asynchronní generátory s kotvou nakrátko a synchronní generátory s budícím vinutím na rotoru. Svorkové napětí trojfázových generátorů je vesměs 380 V pro výkony asi do 300 kW. U vyšších výkonů se používá napětí 690 V, případně i vyšší.

Větrné elektrárny pracující při konstantních nebo téměř konstantních otáčkách využívají maximálního výkonu větru pouze při jeho jedné rychlosti. **Změnu otáček, potřebnou k využití maximálního výkonu větru při všech jeho rychlostech umožní vložení elektronického měniče kmitočtu mezi svorky generátoru a síť.** [1]

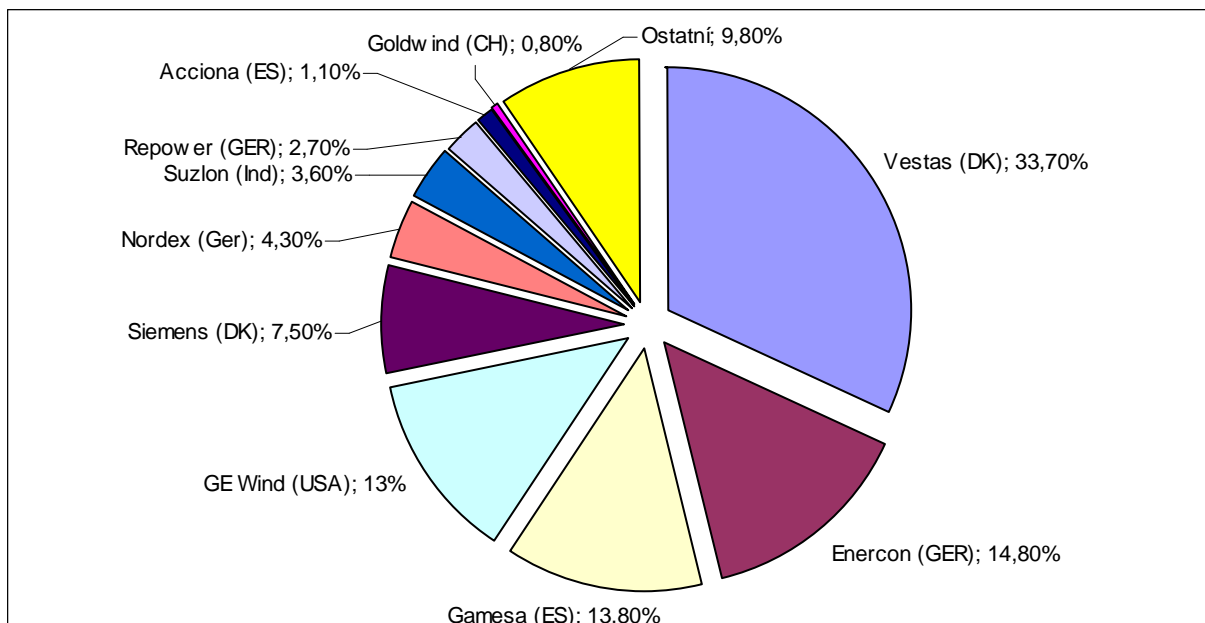
2 SVĚTOVÝ TRH A NEJVĚTŠÍ VÝROBCI VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

Z katalogu Windenergie 2006 (Bundesverband Windenergie e.V.) byli vybráni přední výrobci VTE, kteří dodali v Německu v r. 2005 cca 94 % instalovaných zařízení. Sortiment nabízených strojů jednotlivých firem charakterizovaných jmenovitým výkonem, průměrem rotoru a výškou věží, je zřejmý z tab. 2-1. Pouze dvě z uvedených firem nabízejí zařízení s nominálním výkonem pod 1 MW. Naproti tomu není nabídka VTE s nominálním výkonem 2500 kW a vyšším žádnou zvláštností. Řada firem nabízí pro generátory stejného výkonu vrtule s více variantami jejich průměru. V katalogové nabídce lze nalézt zařízení s výkonem 5000 kW firmy Repower 5M s průměrem rotoru 126 m a výšce věže 100 až 120 m. Není uvedeno zařízení firmy Enercon E-112 4500 kW s průměrem rotoru 114 m na věži o výšce 124 m, které je vybudováno u Magdeburgu [2].



Obr. 2-1 Podíl výrobců na německém trhu

Německý trh na obr. 2-1 je zmiňován právě kvůli jeho dominantnímu postavení na poli instalovaného výkonu VTE v Evropě. Při srovnání tohoto specifického trhu s trhem celosvětovým na obr. 2-2, jsou patrné lokační odlišnosti. Zatímco ve světovém měřítku se objevují i jiní významní výrobci, jako americká firma GE Wind, působící spíše v zámoří, a estonská Gamesa, na trhu evropském jasně dominují větrné elektrárny firem Enercon a Vestas.



Obr. 2-2 Podíl výrobců na světovém trhu

Oba posledně zmiňované subjekty se mohou pyšnit vlastním výzkumem a konstrukčním řešením prakticky celé elektrárny od použitých materiálů a tvaru větrné turbíny až po vyvedení výkonu. Rozdíly mezi vybranými produkty těchto výrobců jsou detailněji popsány v následujících podkapitolách.

Tab. 2-1 Přehled největších výrobců VTE včetně některých vyráběných typů zařízení

Enercon GmbH			
Dreekamp 5, D-26605 Aurich			
typové označení	jmenovitý výkon [kW]	průměr rotoru [m]	výška věží [m]
E-33	330	33,4	49
E-44	900	44	49
E-48	800	48	49, 55, 64, 75
E-53	800	53	72, 92
E-70	2300	71	63, 84, 98, 112
E-82	2000	82	69, 77, 97, 107
VESTAS Deutschland GmbH			
Otto-Hahn-Strasse 2, D-25813 Husum			
typové označení	jmenovitý výkon [kW]	průměr rotoru [m]	výška věží [m]
V 52	850	52	65, 74, 86
V 80	2000	80	60, 85, 95, 100
V 90	2000	90	80, 95, 105
V 100	2750	100	100
V 90	3000	90	80, 105

2.1 Větrná elektrárna Enercon E82

Na evropském trhu první místo v prodeji zaujímá německá firma Enercon, která vyrábí bezpřevodkové větrné elektrárny. Větrná elektrárna Enercon E82 2,0 MW je uvedena jako představitel tohoto konstrukčního směru.

Koncepce těchto strojů vychází ze zmenšení počtu hnacích soustrojí, když rotor je přímo spojen s multipólovým generátorem, který má otáčky shodné s otáčkami rotoru. Tento konstrukční princip umožňuje redukovat ztrátu energie mezi rotorem a generátorem, snížit hlukové emise od mechanických částí stroje, snížit pravděpodobnost opotřebení mechanických částí, snížit ztrátu energie třením v převodovce, odbourat potřebu oleje a pravidelné výměny oleje v převodovce. Připojovací systém Enercon zabezpečuje splnění požadavků vstupu do sítě z generátoru, který je založen na principu synchronního stroje. Firma Enercon vyvinula rotory pracující režimem „pitch“, které, jak uvádí výrobce, mají vysokou účinnost, dlouhou životnost a malou emisi hluku.



- | | |
|-------------------------------|-----------------|
| 1. Nosič stroje | 5. Hlava rotoru |
| 2. Motor pro natáčení gondoly | 6. List rotoru |
| 3. Generátor | |
| 4. Adaptér pro natáčení listu | |

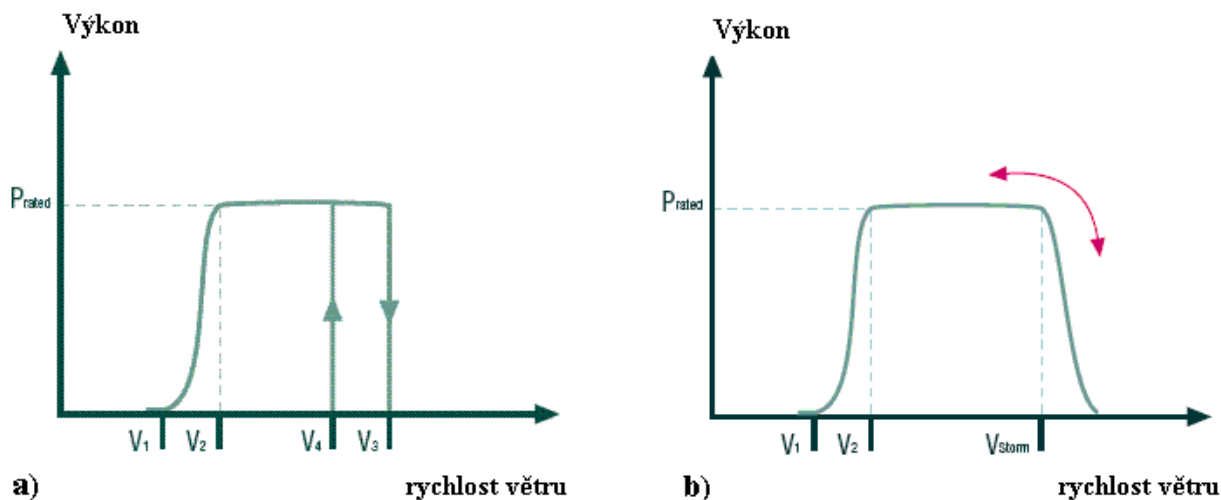
Obr. 2-3 Schéma gondoly větrné elektrárny Enercon E82

Větrné turbíny Enercon jsou vybaveny bouřkovým kontrolním systémem (special storm control system), který umožňuje snížení výkonu v případě extrémně vysokých rychlostí větru. Tento systém by měl zabránit předčasnému odstavení elektrárny a následným ztrátám.

Tab. 2-2 Technická data větrné elektrárny Enercon E82

Jmenovitý výkon	2000 kW
Jmenovitá rychlost větru	12,0 m.s ⁻¹
Zapojovací rychlost větru	2,0 m.s ⁻¹
Odpojovací rychlost větru	22,0-28,0 m.s ⁻¹
Průměr rotoru	82,0 m
Plocha rotoru	5281 m ²
Počet listů rotoru	3
Počet otáček rotoru	6–19,5 ot/min
Hmota včetně náby	37,2 t
Hmota gondoly (bez rotoru)	67,5 t
Generátor	synchronní, prstencový
Počet otáček generátoru	6 – 19,5 ot/min
Napětí	400 V
Regulace výkonu	„pitch“
Regulace otáček	aktivní naklápěním listů vrtule
Hlavní brzdový systém	nastavení listů
Vedlejší brzdový systém	nastavení listů
Natáčení gondoly	6 elektrických motorů
Výšky věží:	
kónická ocelová	70,0 m
kónická ocelová	78,0 m
kónická betonová	98,0 m
kónická betonová	108,0 m

Na obr. 2-4a je znázorněno odstavení elektrárny při překročení maximální rychlosti větru V_3 na listech turbíny. Ta se opět spustí, klesne-li rychlost větru pod tuto hodnotu (V_4). Při nárazovém větru se tento děj může opakovat i několikrát za sebou. Použitím bouřkového kontrolního systému (obr. 2-4b) se elektrárna ani za těchto podmínek neodstaví, pouze nastavením listů rotoru sníží výkon. Jakmile rychlost větru poklesne, listy se vrátí do své původní polohy a výkon se opět zvýší na jmenovitou hodnotu.

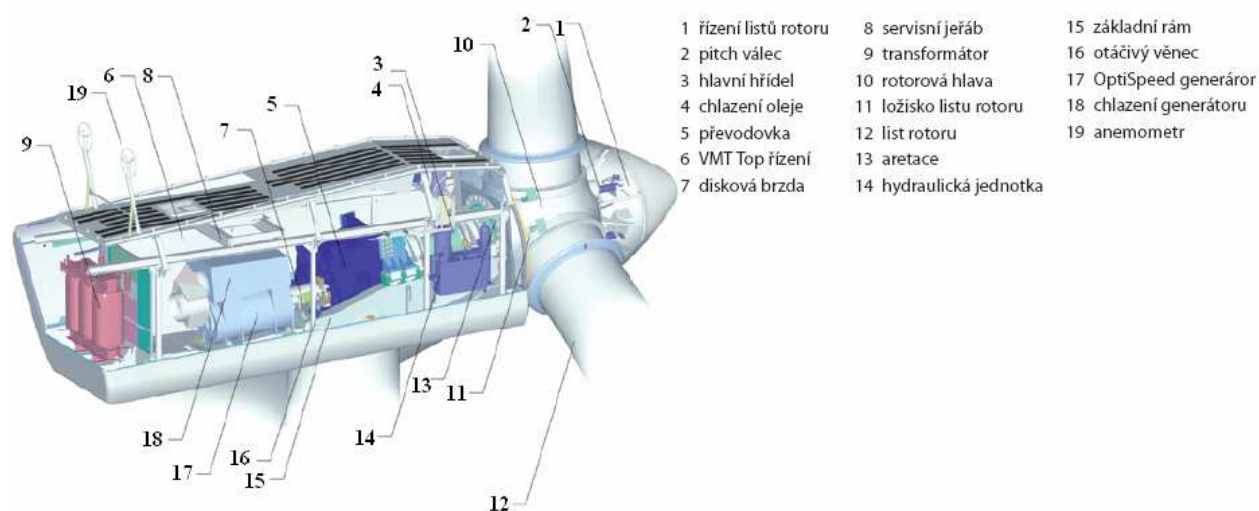


Obr. 2-4 Výkonové charakteristiky turbíny Enercon

2.2 Větrná elektrárna Vestas V90 v provedení 2,0 MW

Jako představitel skupiny větrných elektráren s převodovkou byla zvolena větrná elektrárna Vestas V90 – 2,0 MW. Jedná se o typ větrné elektrárny s moderní technologií a řadí se svým výkonem do kategorie největších.

Hlavní segmenty strojovny a rotorové hlavy jsou uvedeny na obr. 2-5. Rotor generátoru je vybaven zařízením OptiSpeed, které umožňuje, aby rotor pracoval s variabilním počtem otáček. Větrná elektrárna je regulována naklápěním listů trojlístého rotoru (regulace pitch) pomocí zařízení OptiTip, což je zvláštní regulační systém naklápění listů firmy Vestas, kdy úhel nastavení listů je vždy optimálně přizpůsoben příslušným větrným podmínkám. Tímto je optimalizována výroba energie i hladina hluku. Mechanická energie je od rotoru přenášena hlavní hřídelí přes převodovku na generátor.



Obr. 2-5 Schéma strojovny větrné elektrárny Vestas V90

Přenos výkonu z převodovky na generátor se uskutečňuje pomocí kompozitní spojky. Generátor je speciální, čtyřpólový, asynchronní s vinutým rotorem. Při vyšších rychlostech větru zajišťuje OptiSpeed systém a regulace naklápění OptiTip, aby odevzdávaný výkon ležel nezávisle na hustotě vzduchu v oblasti jmenovitého výkonu. Při nízkých rychlostech větru optimalizují systémy OptiTip a OptiSpeed výkon nastavením počtu otáček a vhodného úhlu listů rotoru.

Generátor OptiSpeed umožňuje změnu otáček rotoru o asi 60 % vzhledem ke jmenovitým otáčkám. Tímto způsobem lze pomocí generátoru OptiSpeed změnit otáčky rotoru až o 30 % nad nebo pod synchronní otáčky. Tak se výrobce snaží minimalizovat nežádoucí kolísání v napájecí síti a zatížení, které působí na důležité konstrukční díly. Zabrzdění větrné elektrárny je prováděno nastavením listů rotoru do praporu. Parkovací brzda je na vysokorychlostní hřídeli převodu. Veškeré funkce větrné elektrárny jsou kontrolovány a řízeny řídicími jednotkami na bázi mikroprocesorů. Změny úhlu nastavení jsou aktivovány hydraulickým systémem, který umožňuje pohyb listů rotoru axiálně až o 95°. Čtyři elektricky poháněné převodovky zajišťují nastavení osy gondoly do směru větru.

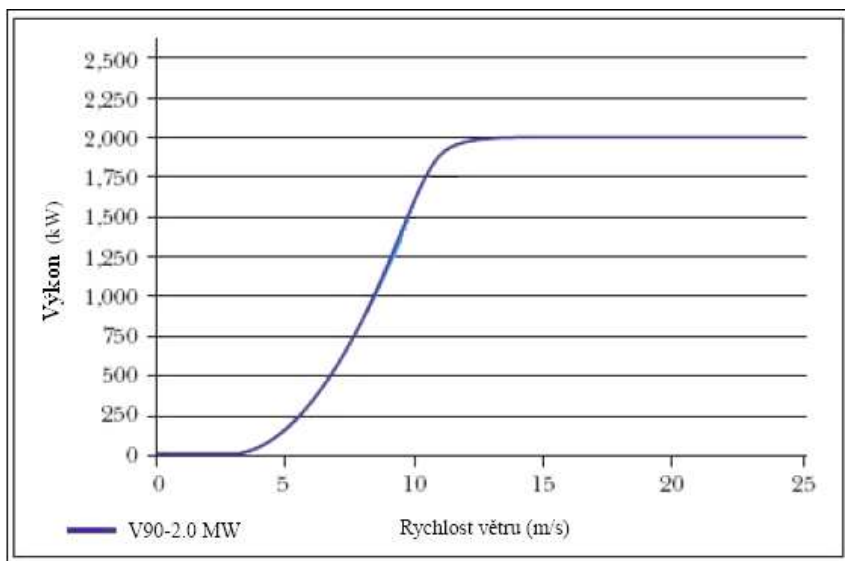
Nízkonapěťové kabely se vedou z venkovní kompaktní stanice chráničkami skrz základ a napojí se na výkonovou jednotku v patě věže. Standardně je venkovní kompaktní stanice dimenzována na jmenovité vysoké napětí 20 kV a obsahuje malou rozvodnu izolovanou plynem pro použití do jmenovitého napětí 24 kV. Napětí vysokonapěťové sítě by nemělo kolísat více než +5/-5%. Stálé kolísání +1/-3 Hz (50 Hz) je přípustné. Kolísavé nebo rychlé poklesy síťové

frekvence mohou větrnou elektrárnu vážně poškodit. K výpadkům sítě smí docházet jen v průměru jednou týdně po celou dobu životnosti větrné elektrárny. Musí být zajištěno uzemnění s maximálním odporem 2 Ω . Systém uzemnění musí být přizpůsoben místním půdním podmínkám. Odpor nulového zemnicího vodiče musí splňovat požadavky orgánů státního dozoru [6].

Tab. 2-3 Technická data větrné elektrárny Vestas V90 verze 2,0 MW

Jmenovitý výkon	2000 kW
Jmenovitá rychlost větru	14,0 m.s ⁻¹
Zapojovací rychlost větru	4,0 m.s ⁻¹
Odpojovací rychlost větru	23,0 m.s ⁻¹
Průměr rotoru	90,0 m
Plocha rotoru	6362 m ²
Počet listů rotoru	3
Počet otáček rotoru	8,2–17,3 ot/min
Hmota včetně náby	36,3 t
Hmota gondoly (bez rotoru)	68,0 t
Generátor	asynchronní, zdvojené napájení
Počet otáček generátoru	1680 ot/min
Napětí	690 V
Regulace výkonu	„pitch“
Regulace otáček	aktivní naklápěním listů vrtule
Hlavní brzdový systém	nastavení listů do praporu
Vedlejší brzdový systém	kotoučové brzdy
Natáčení gondoly	4 elektrické motory
Výšky a hmotnosti kónických ocelových věží	80,0 m – 147 t
	95,0 m – 200 t
	105,0 m – 224 t

Technologie OptiSpeed nakonec pomocí rychlejší synchronizace, sníženého činitele harmonického zkreslení a menšího kolísání proudu přispívá k lepší kvalitě sítě. VCS (Vestas Converter Systems) reguluje proud v rotorovém proudovém obvodu generátoru. To umožňuje přesné řízení jalového výkonu a přesné spojení generátoru s rozvodnou sítí [2].



Obr. 2-6 Výkonová charakteristika Vestas V90 verze 2,0 MW [9]

3 KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE

Kvalita elektřiny je definována charakteristikami napětí v daném bodě ES, porovnávány s mezními příp. informativními velikostmi referenčních technických parametrů.

Výrobní dodávající elektřinu do DS ovlivňují parametry kvality jednak dodávaným proudem a jeho kolísáním, proudovými rázy při připojování zdroje k síti, dodávkou nebo odsáváním harmonických proudů a proudů signálu HDO ze sítě, dodávkou nebo odsáváním zpětné složky proudu. Projevuje se současně jako zátěž i jako zdroj.

Větrná elektrárna před připojením na veřejnou síť prochází podrobnou kontrolou a musí splňovat požadavky na jakost dodávané elektrické energie a na ovlivňování rozvodné elektrické sítě. Zároveň se ale také musí zkontrolovat vlivy zpětného působení poruch sítě na větrnou elektrárnu.

Jednotlivé charakteristiky napětí elektřiny, popisující kvalitu elektřiny pro hladinu napětí 110 kV a předávací místa přenosové nebo distribuční soustavy, jsou: [12]

- kmitočet sítě
- velikost napájecího napětí
- odchylky napájecího napětí
- rychlé změny napětí
 - velikost rychlých změn napětí
 - míra vjemu flikru
- krátkodobé poklesy napájecího napětí
- přerušení napájecího napětí
- nesymetrie napájecího napětí
- harmonická napětí
- meziharmonická napětí
- úroveň napětí signálů v napájecím napětí

Polovodičový spouštěč nebo měnič kmitočtu může způsobovat zkreslení vyššími harmonickými. Pro omezení vyšších harmonických se větrná elektrárna doplňuje o filtrační členy, složené z kapacit a indukčností v sérii, volených tak, aby pro frekvence jednotlivých harmonických způsobovaly zkrat.

Výpadek elektrické sítě se uvažuje jako normální stav. Elektrárna se při něm musí automaticky odstavit, protože větrný motor ztrácí zátěžný moment působený generátorem a jeho otáčky by se prudce zvyšovaly až k nebezpečným hodnotám. Po obnovení napětí v síti se znovu provede rozběh a připojení generátoru k síti.

Zkrat v síti poblíž generátoru způsobuje nebezpečná rázová zatížení vinutí a pulsace momentu na hřídeli. Proto se při návrhu elektrárny provádí kontrola namáhání při dvoufázovém i trojfázovém zkratu na svorkách generátoru. Každý točivý elektrický stroj, tedy i použitý generátor musí mechanicky vydržet otáčivou rychlost o 20 % vyšší než jmenovitou. Pokud může

nastat při extrémních podmínkách provozu větrné elektrárny vyšší otáčivá rychlost, musí být generátor navržen tak, aby vydržel i tuto zvýšenou rychlost. Naprostá většina dnes vyráběných točivých elektrických strojů tyto podmínky splňuje.

Generátory jsou jištěny proti zkratu a přetížení pojistkami nebo jističi s pomocí nadproudového relé. Dále jsou jištěny proti nebezpečnému poklesu napětí a proti přepětí.

Generátory větších výkonů jsou opatřeny odporovými teploměry pro měření teploty vinutí a ložisek.

Zabezpečovací systém VTE musí automaticky reagovat na:

- přetížení generátoru včetně zkratu
- překročení maximálních otáček
- nadměrné vibrace
- ztrátu zatížení při výpadku sítě
- výpadek kontrolního a řídicího systému
- přetočení přívodního kabelu do gondoly, pokud nejsou použity kluzné kontakty.

VTE s výkonem 5 MW a vyšším (ve specifických případech 1 MW a vyšším) musí být vybaveny pro některý z následujících režimů řízení jalového výkonu:

- **udržování zadaného účinníku**
- **udržování zadané hodnoty jalového výkonu (odběr/dodávka) v rámci provozního diagramu stroje (PQ diagramu)**
- **udržování napětí v předávacím místě (na výstupu generátoru, za blokovým transformátorem nebo v pilotním uzlu DS) v rámci omezení daných PQ diagramem stroje.**

Generátor s výkonem 5 MW a vyšším musí být schopen dodávat jmenovitý činný výkon v rozmezí induktivního účinníku $\cos \varphi=0,85$ až 1 (odběr jalového výkonu induktivního charakteru) a kapacitního účinníku $\cos \varphi=1$ až 0,95 (chod generátoru v podbuzeném stavu) při dovoleném rozsahu napětí na svorkách generátoru $\pm 5 \% U_n$ a při kmitočtu v rozmezí 48,5 až 50,5 Hz.

Při nižších hodnotách činného výkonu se dovolené hodnoty jalového výkonu zjistí podle tzv. „Provozních diagramů alternátoru“, které musí být součástí provozně-technické dokumentace bloku. Pokud technologie vlastní spotřeby elektrárny a zajištění napájení vlastní spotřeby neumožňuje využití výše uvedeného dovoleného rozsahu (napětí vlastní spotřeby by se dostalo mimo dovolené meze), lze zvýšit regulační rozsah generátoru např. použitím odbočkového transformátoru napájení vlastní spotřeby s regulací pod zatížením.

Uvedený základní požadovaný regulační rozsah jalového výkonu může být modifikován, tedy zúžen nebo rozšířen. Důvodem případné modifikace může být např. odlišná (nižší/vyšší) potřeba regulačního jalového výkonu v dané lokalitě DS nebo zvláštní technologické důvody (např. u výroby s asynchronními generátory).

Při silně kolísajícím výkonu pohonu (např. u starších typů větrných elektráren) musí být kompenzace jalového výkonu automaticky a dostatečně rychle regulována.

3.1 Podmínky pro připojení VTE do DS

Podmínky pro připojení nejen větrných elektráren do distribuční soustavy popisuje Příloha 4 Pravidel provozování distribučních soustav: Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí nízkého nebo vysokého napětí provozovatele distribuční soustavy. [11]

Zde se mimo jiné uvádí:

„K zabránění zavlečení zpětného napětí do sítí PDS je zapotřebí zajistit technickými opatřeními, aby připojení vlastní výroby k síti PDS bylo možné pouze tehdy, když jsou všechny fáze sítě pod napětím.

K připojení může být použit jak spínač, který spojuje celé zařízení odběratele se sítí, tak i spínač, který spojuje generátor popř. více paralelních generátorů se zbylým zařízením odběratele. Zapnutí tohoto vazebního spínače musí být blokováno do té doby, dokud není na každé fázi napětí minimálně nad rozběhovou hodnotou podpěřové ochrany. K ochraně vlastní výroby se doporučuje časové zpoždění mezi obnovením napětí v síti a připojením výroby v rozsahu minut.

Časové odstupňování při připojování více generátorů v jednom společném předávacím místě je zapotřebí odsouhlasit s PDS.“

V praxi to pro VTE znamená, že se připojuje k síti až po dosažení minimálních provozních otáček rotoru. Ty jsou dosaženy při tzv. zapojovací rychlosti větru. Za těchto povětrnostních podmínek je však výkon větrné elektrárny jen nepatrný.

Změny napětí ve společném napájecím bodě, způsobené připojováním, provozem a odpojováním jednotlivých generátorů nebo zařízení, nevyvolávají nepřípustné zpětné vlivy, pokud největší změna napětí pro výroby s předávacím místem v síti vn nepřekročí 2 %, tj.

$$dU_{\max \text{ vn}} \leq 2\% \text{ (V; -)}, \quad (3.1)$$

pro výrobu s předávacím místem v síti nn pak 3% tedy

$$dU_{\max \text{ vn}} \leq 3\% \text{ (V; -)}. \quad (3.2)$$

Pro výroby v síti 110 kV platí pro změnu napětí mez 2 % za předpokladu, že četnost spínání není větší než desetkrát za hodinu, pro větší počet sepnutí je dovolená mezní změna 1,5 % .

Pro posouzení jedné nebo více výroben v jednom předávacím místě je zapotřebí se zřetelem na kolísání napětí vyvolávající flicker dodržet ve společném napájecím bodě mezní hodnotu dlouhodobého flickeru

$$P_{fl} \leq 0,46 \text{ (-;-)}. \quad (3.3)$$

Dlouhodobý flicker je definován jako míra světelného vjemu, v časovém intervalu dlouhém 2 hodiny.

Dalším faktorem, který může nepříznivě ovlivnit kvalitu elektrické energie v DS, jsou proudy harmonických. Tyto parazitní proudy vznikají u VTE používajících střídače, nebo měniče napětí a mohou mj. ovlivňovat signál HDO. [11]

3.2 Flicker

Větrná energie je mezi odborníky považována za možný zdroj nekvalitní elektrické energie. Nestabilní výroba energie a často připojení na konci dlouhého vedení jsou některé z důvodů těchto negativních názorů. Nejen tyto, ale i další faktory přispívají ke kvalitě elektrické energie z větrných turbín. Jeden z těchto faktorů je tzv. flicker. Flicker je měřené kolísání napětí, které může způsobit poruchu u odběratelů.

Flicker vznikající připojením větrných elektráren do elektrizační soustavy byl předmětem několika výzkumů. Nejvíce z těchto prací se soustředilo na flicker během plynulého chodu elektrárny. Ten je vytvořený kolísáním výkonu díky nestálé rychlosti větru a mechanickými vlastnostmi větrné turbíny. Ta je totiž i v případě regulace pitch omezena šířkou regulace nastavení listů.

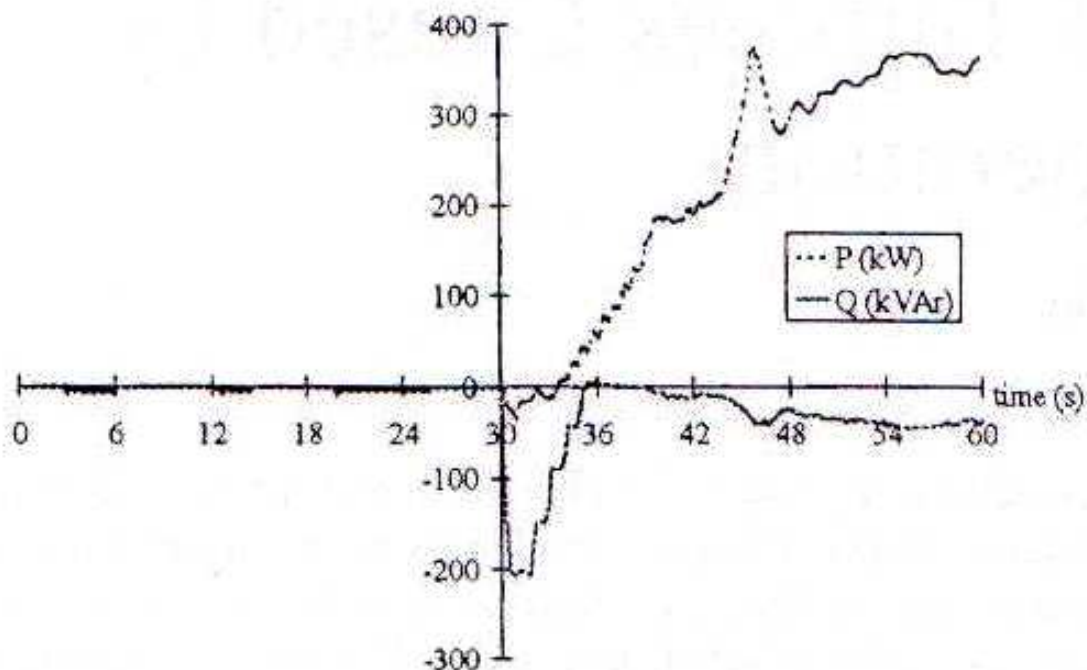
3.2.1 Flicker vznikající spínacími pochody

Kromě flickerů vznikajících za souvislého běhu, vznikají i flickery spínacími pochody elektrárny. Spouštění a odpojování a spínání mezi generátory nebo jejich vinutími způsobuje změnu výkonu a ta zapříčiní změny napětí v bodě připojení do sítě. Tyto napěťové změny způsobují flicker. Spínací pochody musí být z tohoto důvodu zohledněny při konstrukci větrné turbíny.

Startovací sekvence turbíny s proměnnými a stálými otáčkami jsou rozdílné. S proměnnými otáčkami jsou obvykle opatřeny regulací pitch, která umožňuje kontrolovatelnou rychlost větrného motoru a tím i hladší spouštění. Větrné turbíny se stálou rychlostí zvyšují při startovací sekvenci svou rychlost až do selektivních synchronních otáček generátoru.

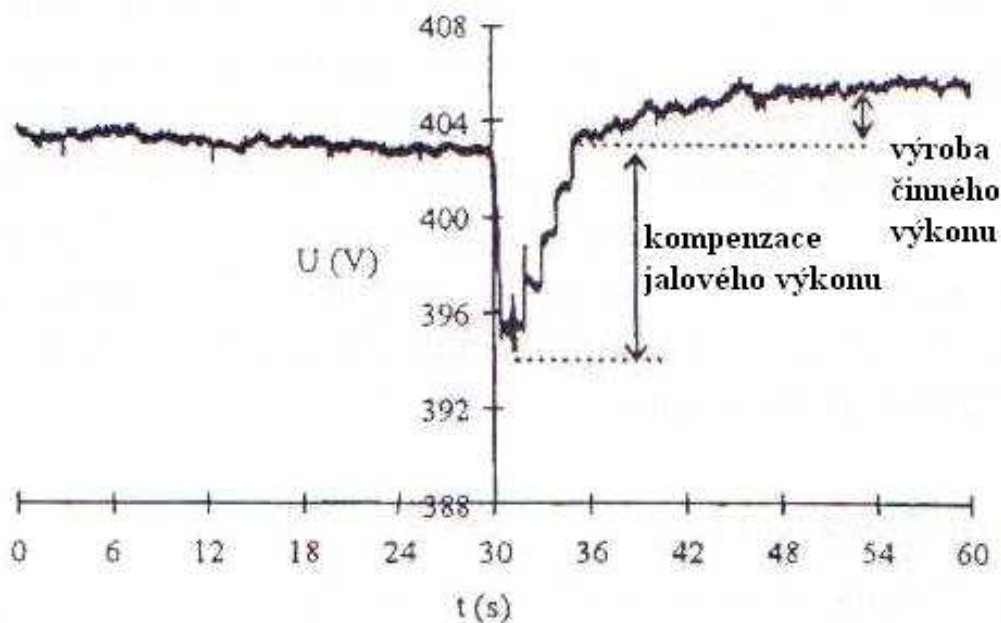
V případě regulace stall musí být generátor přifázován k síti rychle, aby točivý moment rotoru nepřevýšil maximální točivý moment generátoru. Měkký start v tomto případě trvá 0,2 s a na vedení tím vzniká poměrně velký zapínací proud.

U regulace pitch může být točivý moment větrného motoru regulován. Z tohoto důvodu může být spouštění provedeno pozvolněji. Měkký start trvá 2 až 3 s a zapínací proud je menší než u turbíny s regulací stall. Na obr. 3-1 můžeme vidět naměřený výkon během startu turbíny s regulací pitch s instalovaným výkonem 600 kW. Turbína spotřebovává jalový výkon k magnetizaci generátoru. Měkký start probíhá 2 až 3 s, aby omezil proud na jmenovitou hodnotu. Jalový výkon je pak kompenzován prostřednictvím kondenzátorové baterie. Tyto kondenzátory se spínají postupně ve čtyřech krocích s časovým zpožděním asi 1 s. Po zapojení celé kondenzátorové baterie jsou listy vrtule nastaveny tak, aby se zvýšil výkon větrné elektrárny. Zvýšením výkonu dojde také k větší spotřebě jalového výkonu generátorem.



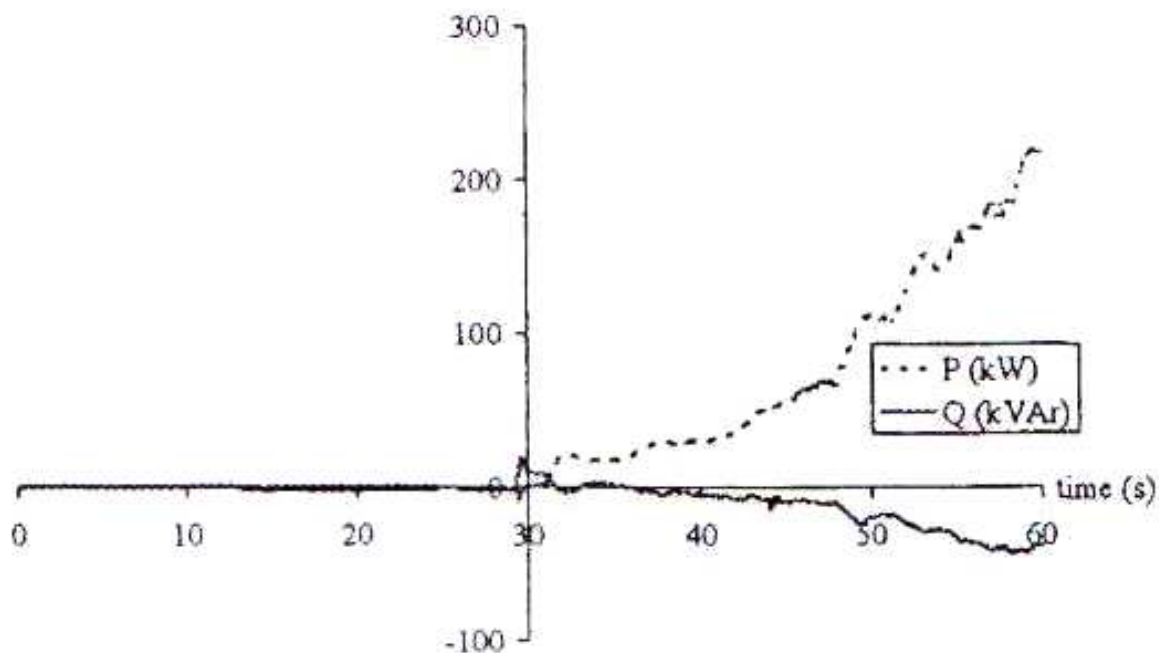
Obr.3-1 Výkon během startu turbíny s regulací pitch a stálými otáčkami generátoru

Na obr. 3-2 je znázorněn průběh napětí během startu stejného typu turbíny. Změny napětí způsobené startem turbíny mohou být rozděleny do dvou částí. První část je způsobena odebíráním jalového výkonu generátorem, což způsobuje pokles napětí. Po zapojení kondenzátorové baterie se odběr jalového výkonu vrátí na nulu a velikost napětí se obnoví. Druhá část je způsobena výrobou energie. Když začne výkon narůstat, zvyšuje se i napětí.



Obr. 3-2 Napětí během startu turbíny s regulací pitch a stálými otáčkami generátoru

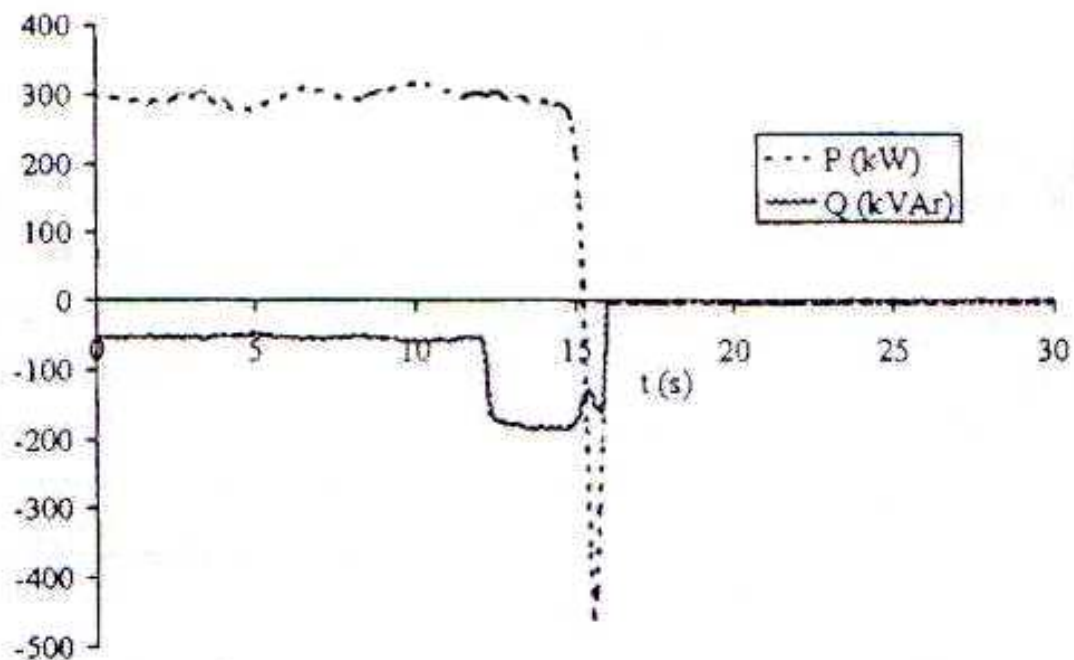
Obdobně je na obr. 3-3 zaznamenán průběh jalového a činného výkonu během startu větrné elektrárny s jmenovitým výkonem 500 kW, osazené generátorem s proměnnými otáčkami a za silného větru. Generátor je zapojen do sítě přes měnič ve 30 vteřinách od startu. Činný výkon roste hladce a zlehka z nuly na polovinu instalovaného výkonu za 30 vteřin od připojení k síti. Zatímco činný výkon roste, jalový výkon je udržován na takové hladině, aby neovlivnil účinník, který byl již zvolen.



Obr. 3-3 Výkon během startu turbíny s proměnnými otáčkami generátoru

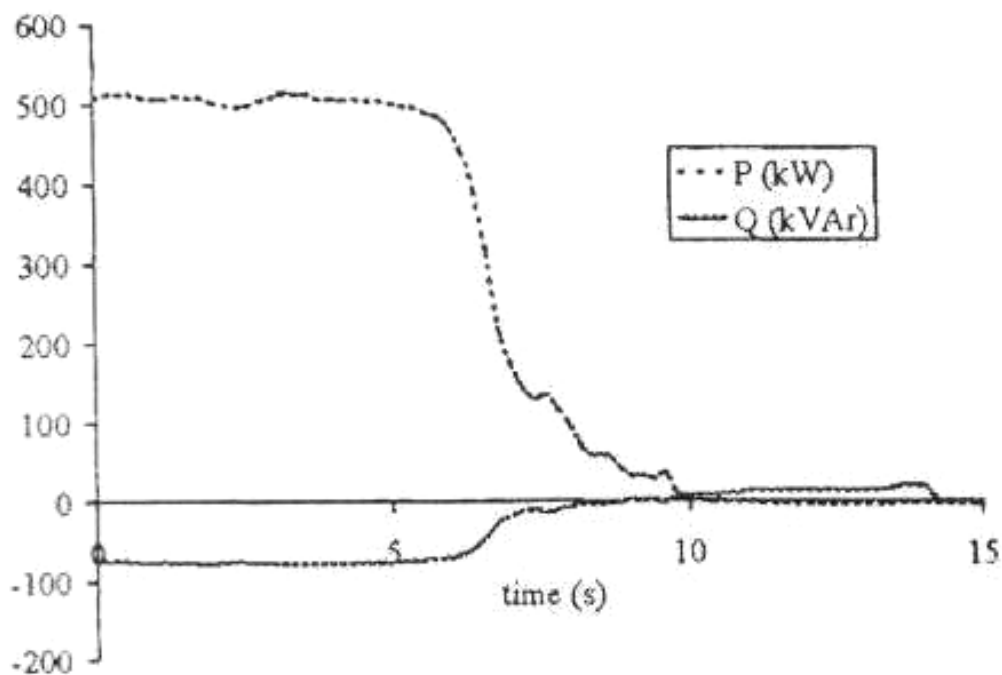
Jestliže je rychlost větru buď příliš nízká nebo naopak příliš vysoká, větrná elektrárna se automaticky odstaví. V prvním případě se turbína zastaví aby se předešlo zpětnému toku energie, ve druhém kvůli nadměrnému mechanickému namáhání. Při nízké rychlosti větru (okolo $3-4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) je činný výkon téměř nulový. Zastavení bývá pomalé a dopad na velikost napětí nízký. Odstavení větrné elektrárny za příliš silného větru (nad $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) však probíhá za jmenovitého výkonu generátoru a po zastavení turbíny a snížení dodávaného výkonu až na nulu bývá napětí v přípojném bodě PCC (point of common coupling) značně ovlivněno.

Na obr. 3-4 je znázorněna výkonová křivka při odstavení turbíny s regulací stall, stálými otáčkami generátoru a jmenovitým výkonem 600 kW. Při odstavování turbíny je její výkon přibližně poloviční a kompenzační kondenzátorová baterie se vypne. Po několika sekundách je rychlost turbíny snížena brzdami, v tomto případě asi po 15 sekundách. Aby odstavení větrné elektrárny bylo bezpečné, odpoj se po otočení toku výkonu generátor.



Obr. 3-4 Výkon během odstavení turbíny s regulací stall a stálými otáčkami generátoru

Odstavení turbíny s proměnnými otáčkami za silného větru je na obr. 3-5. Větrná elektrárna pracuje na jmenovitý výkon 500 kW. Výkon z větrné turbíny začne klesat asi za 6 sekund a asi po dalších 4 sekundách klesne dodávaný výkon až na nulu. Odstavení je stejně jako v případě startu turbíny s proměnnými otáčkami velmi mírné a jemné.[14]



Obr. 3-5 Výkon během odpojování turbíny s proměnnými otáčkami

Spínacími pochody vzniká flicker. Typickými spínacími pochody jsou připojování nebo odstavení turbíny a různé typy větrných elektráren se při těchto pochodech chovají odlišně.

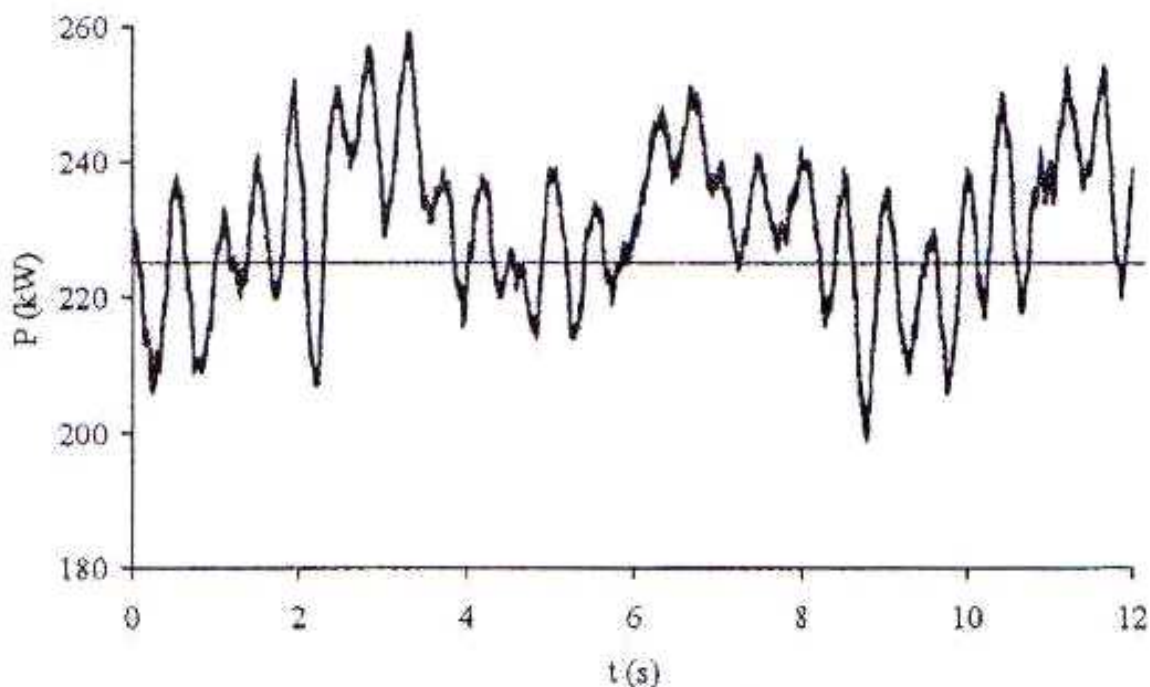
Jestliže se větrný park skládá z malého počtu větrných elektráren se stálými otáčkami, kdy regulace stall způsobuje nekontrolovatelný točivý moment během startu, bude produkovat větší emise flickeru. Stejně tak při velkém počtu větrných elektráren se stálými otáčkami a regulací pitch budou emise flickeru větší.

3.2.2 Flicker vznikající za souvislého běhu

Flicker vzniká nejen během spínacích pochodů, ale také při běžném provozu větrných elektráren. Flicker je způsobován kolísáním výkonu, které je většinou způsobeno výkyvy rychlosti větru, efektem stožárového stínu a mechanickými vlastnostmi větrné turbíny. Větrné elektrárny s regulací pitch se navíc potýkají s kolísáním výkonu způsobeným omezením natáčení listů větrné turbíny. Metoda měření okamžitého flickeru a algoritmus požadovaný pro výpočet krátkodobého flickeru je dost komplikovaný. Všeobecná analytická metoda výpočtu určující krátkodobý flicker libovolně zvolené soustavy napětí je nemožná.

Použitím činitele flickeru je možné vypočítat produkci flickeru větrnou elektrárnou v místě společného připojení se sítí.

Naměřené kolísání výkonu větrné elektrárny s regulací pitch se stálými otáčkami a jmenovitým výkonem 225 kW za silného větru reprezentuje obr. 3-6. Na obrázku je patrná pulsace výkonu způsobené kolísáním síly větru a efektu stožárového stínu.



Obr. 3-6 Kolísání výkonu během souvislého běhu VP s jmenovitým výkonem 225 kW [15]

4 MODELOVÝ PŘÍKLAD VÝPOČTU VLIVU VP

K podrobnějšímu zkoumání a vyhodnocení vlivu VTE nebo VP na kvalitu elektrické energie bylo zapotřebí namodelování konkrétní situace v síti DS nebo PS. K tomuto účelu byla sestavena elektrická síť s reálným ekvivalentem na napěťové hladině 110 kV.

Vzhledem k náročnosti výpočtu elektrické sítě s větším množstvím uzlů byla modelová elektrická síť vytvořena v počítačovém programu Graphic Load Flow (GLF). [8]

Tento program je určen k analýze a výpočtu modelů elektrických sítí. Přesněji byl program GLF využit:

- k výpočtu ustáleného chodu střídavé sítě vvn,
- k analýze napěťových poměrů v síti,
- ke grafickému zobrazení počítané sítě s vyhodnocením výsledku,
- ke kontrole dodržování dovolených napětí v síti,
- ke kontrole zatěžování vedení a transformátorů v síti,
- k rozboru ztrát činného i jalového výkonu v elektrické síti.

Část modelového příkladu sítě má základ v reálné elektrické síti ve slezsku. Tato oblast byla zvolena naprosto účelně z důvodu připravované výstavby několika VP s celkovým instalovaným výkonem téměř 170 MW. Tento výkon bude vyveden do soustavy o napětí 110 kV. Charakteristickým rysem této oblasti je malá koncentrace zdrojů a dlouhá vedení.

Model byl sestaven ve dvou variantách, tedy:

- v referenčním stavu, kdy do sítě dodávají pouze konvenční zdroje elektrické energie,
- ve stavu po připojení VTE a VP na instalovaný výkon.

U elektrické sítě vytvořené v programu GLF nebylo možné sledovat dynamické změny při spínání nebo zapojování a odpojování větrného motoru. Stejně tak nebylo možné analyzovat generování flickerů ať už v ustáleném stavu nebo při spínacích pochodech. Z těchto důvodů byl při analýze modelu sítě kladen největší důraz na

- dodržování maximální dovolené změny napětí,
- zatížení vedení,
- možnosti flexibilní změny účinníku VTE nebo VP.

4.1 Model sítě v referenčním stavu

V programu GLF byl sestaven model elektrické sítě pracující bez příspěvku VTE nebo VP na napěťové hladině 110 kV. Vzhledem k výkonům větrných parků v řádu desítek MW, bývá jejich příspěvek vyveden právě do této napěťové hladiny DS. Výkony nad 150 MW už bývají obvykle vyvedeny do přenosové soustavy. Na našem území je toto řešení reprezentováno připravovanou stavbou větrných parků v oblasti Krušných hor Chomutov I a II s instalovaným výkonem 182 MW, a VP Hradec u Kadaně (170 MW).

Jako bilanční uzel celého modelu byl zvolen uzel představující vnější síť o napětí 400 kV (PS). Kompletní schéma modelu v referenčním stavu včetně popisu se nachází v **Příloze A**.

Tab.4-1 Sledované veličiny v jednotlivých uzlech modelu

	název uzlu	modul napětí	P_g	Q_g	$\cos_g \varphi$	P_o	Q_o	$\cos_o \varphi$
		(kV)	(MW)	(MVar)	(-)	(MW)	(MVar)	(-)
1	UZL1	110,801	0	0	-	30	8,2	0,965
2	UZL2	112,28	0	0	-	7,2	2	0,965
3	UZL3	109,136	0	0	-	5	1,4	0,965
4	UZL4	108,943	2,2	0,7	0,95	10	2,7	0,965
5	UZL5	117,588	0	0	-	0	0	-
6	VP	116,426	0	0	-	20	5,4	0,965
7	VP1-2	116,081	0	0	-	28,7	7,8	0,965
8	VTE01	112,603	0	0	-	11,4	3,1	0,965
9	VTE02	109,056	0	0	-	35,8	9,7	0,965
10	VTE03	109,172	50	17,8	0,942	46	12,5	0,965
11	ZAVODNI	110,599	5,2	1,7	0,95	13,5	3,7	0,965
12	TEPLARNA	115,302	4,8	1,6	0,95	24,6	6,7	0,965
13	SIT400KV	400	174,852	58,08	0,948	0	0	-

Tento model z části vychází z reálné části DS v okolí Bruntálu. Konkrétní hodnoty sledovaných veličin v jednotlivých uzlech však byly vykonstruovány a jsou shrnuty v tabulce 4-1, kde sloupce s indexem i_g představují výrobu a i_o odběr v daném uzlu. Kromě dodávky elektrické energie z PS je spotřeba zajištěna i konvenčními zdroji v uzlech UZL4, TEPLARNA a ZAVODNI.

Podle Přílohy 3 PPDS, pojednávající o kvalitě elektřiny v distribuční soustavě, pro hladinu napětí 110 kV a předávací místa PS/DS mimo jiné platí, že:[12]

„Za normálních provozních podmínek musí být během každého týdne 95 % průměrných efektivních hodnot napájecího napětí v měřících intervalech 10 minut v rozsahu podle následující tabulky.“

Tab. 4-2 Velikost a dovolené odchylky napájecího napětí

Síť	Dovolený rozsah
110 kV	110 kV \pm 10%
220 kV	220 kV \pm 10 %
400 kV	400 kV \pm 5 %

V referenčním stavu modul napětí v žádném z uzlů nepřekračoval maximální odchylku napětí a to ani při změnách výkonů zdrojů a jejich účinníků.

Model se v referenčním stavu choval poměrně stabilně. Při výpadku některého vedení se zatížení ostatních sice znatelně zvýšila, ale nedosáhla přetížení, které by ohrozilo jejich funkci.

Tab.4-3 Zatížení jednotlivých vedení v referenčním stavu

Název vedení	Začátek vedení			Konec vedení					Poměrné zatížení vedení (%)
	Uz	Pz	Qz	Uk	Pk	Qk	I	ΔP	
	(kV)	(MW)	(MVar)	(kV)	(MW)	(MVar)	(A)	(MW)	
A01	110,8	4,2	0,2	110,6	4,2	1,0	22	0,006	3,8
A02	110,8	4,2	0,2	110,6	4,2	1,0	22	0,006	3,8
A03	110,8	22,6	2,0	109,1	22,3	3,0	118	0,265	20,6
A04	110,8	22,6	2,0	109,1	22,3	3,0	118	0,265	20,6
A05	109,2	0,1	2,1	109,1	0,1	2,5	13	0,001	2,8
A06	109,1	0,9	2,3	109,1	0,9	1,9	13	0,001	2,7
A07	109,2	4,1	3,2	109,1	4,1	3,3	28	0,001	5,8
A08	109,1	3,9	0,5	108,9	3,9	1,0	21	0,003	4,4
A09	109,1	3,9	0,5	108,9	3,9	1,0	21	0,003	4,4
A10	112,6	40,9	6,0	110,8	40,4	5,6	213	0,490	43,7
A11	112,3	43,5	6,5	110,8	43,0	6,1	226	0,426	46,6
A12	115,3	51,6	9,9	112,3	50,7	8,5	264	0,960	54,3
A13	115,3	53,2	10,5	112,6	52,3	9,1	272	0,876	56,0
A14	117,6	50,1	10,4	115,3	49,4	9,6	252	0,670	51,9
A15	117,6	50,1	10,4	115,3	49,4	9,6	252	0,670	51,9
A16	116,4	25,9	5,9	115,3	25,8	6,2	133	0,165	27,3
A17	117,6	46,2	11,6	116,4	45,9	11,3	235	0,269	40,5
A18	117,6	28,9	7,5	116,1	28,7	7,8	148	0,237	30,4

V tabulce 4-3 jsou barevně zvýrazněny poměrné zatížení vedení. Program GLF zobrazuje vypočtené výsledky zaokrouhlené na třetím desetinném místě, ale počítá s hodnotami přesnějšími. Proto se zde mohou vyskytovat menší nesrovnalosti. Při normálním provozu těchto vedení je jen několik z nich zatíženo na více než 50 % jmenovité hodnoty. Ostatní vedení pracují s menším zatížením. Tím nedochází k jejich nadměrnému zahřívání a ztrátám. Díky tomuto stavu se i celkové činné ztráty na vedeních pohybují okolo 5,313 MW. Jako nejvytíženější se ukázaly vedení A12 až A15. Ty přenášejí největší výkon dodávaný z PS, je na nich největší odchylka napájecího napětí a jsou také nejcitlivější na poruchové stavy.

V modelovém příkladě byly použity různé typy kombinovaných lan, jak popisuje tabulka 4-4. Společně s typy jsou uvedeny v tabulce i délky jednotlivých vedení. Typy lan byly vybrány na základě reálných vedení užívaných na této napěťové hladině.

Tab. 4-4 Typy a délky vedení použité v modelu

Název vedení	Typ použitého lana	Délka vedení
		(km)
A01	240 AIFe 6	34,29
A02	240 AIFe 6	34,29
A03	240 AIFe 6	51,90
A04	240 AIFe 6	51,90
A05	185 AIFe 6	14,10
A06	185 AIFe 6	12,10
A07	185 AIFe 6	2,00
A08	185 AIFe 6	13,40
A09	185 AIFe 6	13,40
A10	185 AIFe 6	23,20
A11	185 AIFe 6	17,80
A12	185 AIFe 6	29,50
A13	185 AIFe 6	25,30
A14	185 AIFe 6	22,60
A15	185 AIFe 6	22,60
A16	185 AIFe 6	2,20
A17	240 AIFe 6	13,50
A18	185 AIFe 6	23,30

4.2 Model sítě po připojení VTE a VP na instalovaný výkon

V § 4 zákona 180/2005sb. o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů se mimo jiné uvádí: [10]

„Provozovatelé regionálních distribučních soustav a provozovatel přenosové soustavy jsou povinni vykupovat veškerou elektřinu z obnovitelných zdrojů, na kterou se vztahuje podpora...“

Pro upřesnění nutno připomenout, že podpora výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů se vztahuje na všechny větrné elektrárny, s výjimkou větrných elektráren umístěných na rozloze 1 km² o celkovém instalovaném výkonu nad 20 MW. Pokud tento předpoklad splní, platí pro provozovatele DS tato povinnost výkupu.

Dále se v tomto zákoně uvádí, že:

„Provozovatel přenosové soustavy nebo provozovatelé distribučních soustav jsou povinni na svém licenci vymezeném území přednostně připojit k přenosové soustavě nebo distribučním soustavám zařízení za účelem přenosu nebo distribuce elektřiny z obnovitelných zdrojů, pokud o to výrobce elektřiny z obnovitelných zdrojů požádá...“

Znamená to, že například nastanou-li příznivé povětrnostní podmínky, kdy větrné turbíny mohou pracovat na plný výkon, je provozovatel PS nebo DS nucen vykoupit veškerou vyrobenou elektrickou energii.

V případě, že vlivem náhlé změny počasí dojde k masivnímu připojování VTE do soustavy se mohou během krátké doby výrazně změnit parametry sítě. Tato náhlá změna může vést až k destabilizaci soustavy mezinárodního rozsahu. Proto je provozovatel této soustavy v rámci regulace nucen snížit příspěvek z konvenčních zdrojů. V opačném případě, kdy větrné podmínky pro výrobu elektrické energie ustanou, může do doby než opět najedou konvenční zdroje nastat

v soustavě nepoměr výroby ke spotřebě. Na tuto skutečnost ukazuje model sítě, do něhož byly připojeny VTE a VP na instalovaný výkon.

V tomto modelovém stavu bylo do sítě zapojeno sedm VTE nebo VP s celkovým instalovaným výkonem 126,7 MW. Dva největší VP byly připojeny v uzlech ZAVODNI a VP1-2. Do posledně zmiňovaného uzlu byl připojen ještě druhý VP o výkonu 16 MW, celkový příspěvek do tohoto uzlu z větrných elektráren se tedy rovná součtu obou.

Kompletní schéma modelu po připojení větrných elektráren je v **Příloze B**.

Tab. 4-5 Změny napětí v uzlech po zapojení větrných elektráren do sítě

	název uzlu	modul napětí	P_g	Q_g	$\cos_g \varphi$	P_o	Q_o	$\cos_o \varphi$
		(kV)	(MW)	(MVar)	(-)	(MW)	(MVar)	(-)
1	UZL1	119,426	0	0	-	30	8,2	0,965ind
2	UZL2	119,783	0	0	-	7,2	2	0,965ind
3	UZL3	118,164	0	0	-	5	1,4	0,965ind
4	UZL4	117,956	2,2	0,7	0,95cap	10	2,7	0,965ind
5	UZL5	121,657	0	0	-	0	0	-
6	VP	121,472	0	0	-	20	5,4	0,965ind
7	VP1	123,396	42	13,8	0,95cap	0	0	-
8	VP1-2	123,395	0	0	-	28,7	7,8	0,965ind
9	VP-1	121,472	24	7,9	0,95cap	0	0	-
10	VP2	123,396	16	5,3	0,95cap	0	0	-
11	VTE01	119,84	0	0	-	11,4	3,1	0,965ind
12	VTE01-1	119,84	1,5	0,5	0,95cap	0	0	-
13	VTE02	118,058	0	0	-	35,8	9,7	0,965ind
14	VT02-1	118,058	1,2	0,4	0,95cap	0	0	-
15	VTE03	118,202	50	17,8	0,94cap	46	12,5	0,965ind
16	VTE03-1	118,202	2	0,7	0,95cap	0	0	-
17	VPZAVOD	120,666	40	13,1	0,95cap	0	0	-
18	ZAVODNI	120,665	5,2	1,7	0,95cap	13,5	3,7	0,965ind
19	TEPLARNA	120,792	4,8	1,6	0,95cap	24,6	6,7	0,965ind
20	SIT400KV	400	45,5	-10,2	0,976ind	0	0	-

V tabulce 4-5 jsou shrnuty sledované změny. Světle zeleně zvýrazněné uzly představují nově připojené větrné elektrárny. Největší změny napětí nastaly v okolí VP s největším příspěvkem do sítě, tedy VP1 a VPZAVOD.

V případě VP1 narostla velikost napájecího napětí nad dovolenou mez (tab. 4-2), a to nejen v přípojných bodech, ale i v okolních uzlech (UZL5). Tento provozní stav není přípustný z hlediska kvality elektrické energie a vyžaduje regulační zásah v podobě snížení výkonů zdrojů, na které se nevztahuje zákon 180/2005sb o podpoře využívání obnovitelných zdrojů, tak aby napájecí napětí kleslo na povolenou úroveň podle PPDS.

V okolí druhého největšího VP (VPZAVOD) hladina napájecího napětí jen těsně zůstala v tolerovaných mezích. I tento stav ovšem vyžaduje regulaci pro zajištění stabilní dodávky elektrické energie.

Tab. 4-6 Zatížení vedení po připojení VTE a VP na instalovaný výkon

Název vedení	Začátek vedení			Konec vedení			I (A)	ΔP (MW)	Poměrné zatížení vedení (%)
	Uz	Pz	Qz	Uk	Pk	Qk			
	(kV)	(MW)	(MVA _r)	(kV)	(MW)	(MVA _r)			
A01	120,7	15,9	5,6	119,4	15,8	6,8	83	0,083	14,3
A02	120,7	15,9	5,6	119,4	15,8	6,8	83	0,083	14,3
A03	119,4	20,9	0,8	118,1	20,7	2,3	101	0,194	17,6
A04	119,4	20,9	0,8	118,1	20,7	2,3	101	0,194	17,6
A05	118,2	0,9	2,4	118,1	0,9	2,9	15	0,001	3,1
A06	118,2	0,1	2,3	118,1	0,1	2,8	13	0,001	2,8
A07	118,2	5,1	3,6	118,2	5,1	3,6	31	0,001	6,3
A08	118,1	3,9	0,5	118,0	3,9	1,0	19	0,002	4,1
A09	118,1	3,9	0,5	118,0	3,9	1,0	20	0,002	4,1
A10	119,8	19,6	2,6	119,4	19,5	1,9	95	0,098	19,6
A11	119,8	20,9	2,4	119,4	20,8	1,9	101	0,085	20,9
A12	120,8	28,3	1,0	119,8	28,1	0,4	135	0,253	27,9
A13	120,8	29,7	0,5	119,8	29,5	0	142	0,239	29,3
A14	121,7	28,6	0,2	120,8	28,4	0,7	136	0,195	28,0
A15	121,7	28,6	0,2	120,8	28,4	0,7	136	0,195	28,0
A16	121,5	21,1	1,7	120,8	21,0	2,3	101	0,096	20,8
A17	121,7	17,2	1,3	121,5	17,1	0,8	81	0,033	14,1
A18	123,4	29,3	11,3	121,7	29,1	11,7	147	0,238	30,6

Naproti zhoršeným napěťovým vlastnostem modelu po zapojení větrných elektráren, se výrazně odlehčila některá vedení. Poměrná zatížení vedení A12 až A15, která přesahovala v referenčním stavu 50 % a při výpadku mohla způsobit přetížení ostatních vedení, klesla díky většímu počtu zdrojů v napěťové hladině 110 kV asi o 46 % a ztráty na vedení v této oblasti klesly přibližně o 72 %. Naopak zatížení vedení A01 a A02 vzrostlo více než trojnásobně. Celkové ztráty na vedení činily 1,996 MW což odpovídá 62 % poklesu oproti referenčnímu stavu modelu. Na transformátoru T401 se otočil směr toku jalového výkonu a teče zpět do PS. Uzel SIT400KV se tedy chová jako podbuzený zdroj.

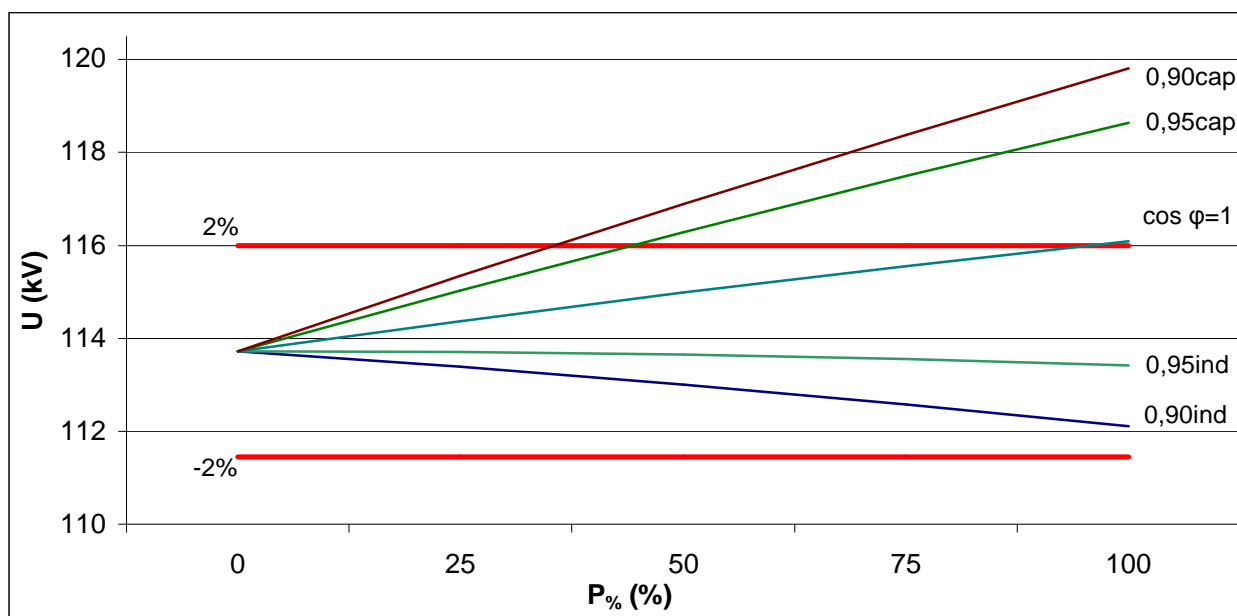
Charakteristickým rysem pro referenční stav byl značný odběr z PS a tedy i velké zatížení vedení přenášející tento výkon. Zapojením větrných parků se odběr výkonu z PS znatelně snížil a model se tedy jeví v tomto ohledu samostatnější. Zvětšením počtu elektrických zdrojů v síti mělo za následek decentralizaci výroby a rovnoměrnější rozložení výroben vzhledem k odběrům.

Tento stav ovšem vychází z předpokladu, že větrné elektrárny pracují na jmenovitý výkon. Na našem území lze s dosažením těchto hodnot počítat jen v určitých ročních obdobích a krátkých časových intervalech.

V případě, že by byla modelovaná síť zabezpečena více zdroji již v referenčním stavu a spotřeba nebyla kryta z velké části z jednoho uzlu (SIT400KV), připojení VTE a VP by vedlo k několikanásobnému zatížení vedení oproti běžnému chodu. Tuto skutečnost ukázalo právě zvýšení zatížení na vedeních A01, A02. Zároveň, by se po dobu plného výkonu větrných elektráren musela redukovat výroba ve stabilních konvenčních zdrojích. Všechny tyto aspekty násobené nestálým výkonem větru mohou při větším nasazení těchto zdrojů vést k destabilizaci soustavy.

4.3 Analýza provozních vlivů VTE

Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.1, každý zdroj, který je připojován do sítě ji v mnoha ohledech ovlivňuje. Tyto změny nesmí překročit dovolené meze, které jsou popsány v Příloze 4 PPDS. Z tohoto důvodu byla vytvořena pomocí programu GLF analýza lokálních vlivů VTE na okolní síť. K tomuto účelu byla použita část již namodelované sítě, která byla popsána v předchozích kapitolách. Protože nejpříznivější větrné podmínky pro stavbu VTE jsou v ČR v hornatých oblastech (Krušné hory, Jeseníky, apod.), bývají umístěny na konci dlouhého vedení jen s malými odběry. V případě připojení velkých VP je tedy lokální vliv značný. Schéma modelu použitého pro analýzu provozních vlivů je v **Příloze C**.



Obr. 4-1 Vliv VTE na velikost napětí v přípojném bodě

V modelu je na konci vedení připojen VP o instalovaném výkonu 42 MW. Podstatou prováděné analýzy bylo sledování změny velikosti napájecího napětí v blízkém uzlu UZL1 v závislosti na provozním stavu parku. Tato změna podle PPDS nesmí překročit 2%.

Napájecí napětí v UZL1 bez ovlivnění VP bylo přibližně 113,72 kV. Při najíždění VP do provozu se s narůstajícím výkonem začal projevovat jeho vliv na okolí. Ten byl značně odlišný pro různé hodnoty účinnosti. V grafu na obr. 4-1 jsou znázorněny velikosti napětí v UZL1 v závislosti na výkonu VP při konstantním účinnosti výroby. Z obrázku je patrné překročení dovolené odchylky. Při účinnosti výroby VP 0,90 kapacitní, kdy generátory pracují v podbuzeném stavu a dodávají do sítě jalový výkon, překročila hodnota napětí v UZL1 stanovenou mez již při asi 37 % výkonu parku. Po dosažení instalovaného výkonu za stejného účinnosti vzrostlo napětí přímo na VP přes 10%. Dalšího překročení mezní hodnoty v průběhu najíždění na instalovaný výkon bylo dosaženo v rozmezí účinností 0,90 kapacitní až 1. Ovlivnění okolní sítě i při výrobě pouze činného výkonu ($\cos \varphi=1$) bylo způsobeno dodávkou z uzlu SIT400KV, který reprezentuje příspěvek z PS. Tento uzel byl nastaven jako bilanční a choval se tedy jako ideálně tvrdý zdroj.

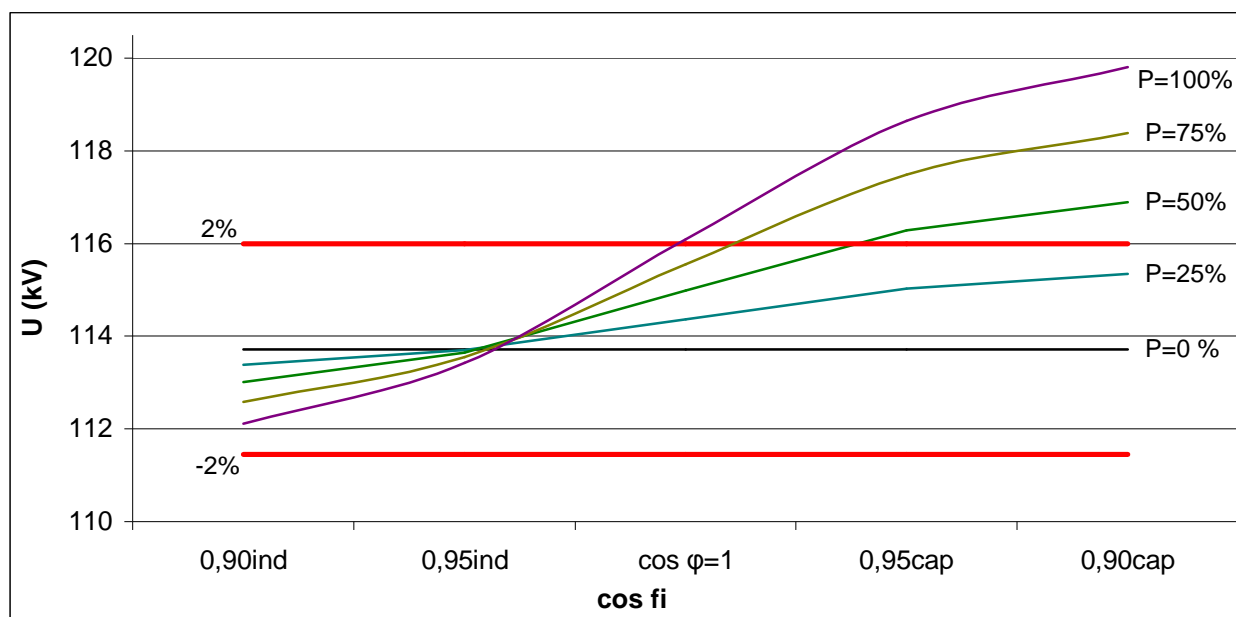
Naopak v dovolených mezích pracoval VP při provozu s účinností induktivní (přebuzený generátor). Pokud by ovšem síť nebyla takto „tvrdá“, VP by při výrobě čistě činného výkonu

hladinu napětí okolí téměř neovlivňoval, a charakteristiky kapacitních a induktivních účinníků by byly symetrické podle $\cos \varphi=1$ na vodorovné ose grafu. Tím by se i průběhy účinníků induktivní povahy dostaly za hranici 2% ještě před dosažením plného výkonu VP. Tabulka 4-7 dokumentuje změny napětí v uzlu UZL1 při najíždění blízkého VP včetně procentuálního vyjádření odchylky od stavu bez jeho příspěvku. Pracovní oblast VP, která splňuje podmínky pro připojení do DS je vyznačena zelenou barvou, naopak oblast která kritéria nesplňuje je vyznačena červeně.

Tab. 4-7 Změny velikosti napětí v přípojném bodě po připojení VTE

	P=0%	P=25%	P=50%	P=75%	P=100%	$\Delta U_{25\%}$ (%)	$\Delta U_{50\%}$ (%)	$\Delta U_{75\%}$ (%)	$\Delta U_{100\%}$ (%)
	U	U	U	U	U				
	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)				
0,90ind	113,718	113,385	113,006	112,582	112,11	0,29%	0,63%	1%	1,41%
0,95ind	113,718	113,704	113,65	113,557	113,424	0,01%	0,06%	0,14%	0,26%
cos $\varphi=1$	113,718	114,372	114,985	115,559	116,096	0,57%	1,10%	1,59%	2,05%
0,95cap	113,718	115,033	116,289	117,492	118,645	1,14%	2,21%	3,21%	4,15%
0,90cap	113,718	115,343	116,895	118,384	119,813	1,41%	2,72%	3,94%	5,09%

Dalším sledovaným dějem byla míra vlivu VP na velikost napětí ve společném přípojném bodě při konstantním výkonu a různém charakteru účinníku. V celém sledovaném rozsahu účinníků může VP pracovat asi do 37 % výkonu. S narůstajícím výkonem se spektrum možného použití účinníků postupně zužuje. Všechny průběhy výkonů se sbíhají v hodnotě účinníku asi 0,96 induktivní při zanedbatelném nárůstu napětí.



Obr. 4-2 Závislost velikosti napětí v PCC na účinníku při různých provozních stavech VTE

5 ZHODNOCENÍ VLIVU INTEGRACE NA CENU ELEKTRICKÉ ENERGIE

S rostoucím instalovaným výkonem VTE v ČR roste i vliv těchto zdrojů na konečnou cenu elektrické energie. V současnosti pokrývají větrné elektrárny zhruba 0,1 % roční spotřeby. V roce 2010 to ale mají být už skoro 2 %, tedy 1100 GWh ročně.

Specifikem připojení větrných zdrojů do sítě souvisí s nutností posouvat výstavbu větrných elektráren do stále více odlehlých lokalit. Jak napovídá větrná mapa ČR (obr. 1-2), oblasti s relativně příznivými větrnými podmínkami na našem území jsou spíše v pohraničí, s vysokou nadmořskou výškou a těžko dostupným terénem. Tato skutečnost zvyšuje nejen náklady na stavbu VTE, které hradí výrobce, ale také na připojení do sítě. Ty jsou již hrazeny provozovatelem PS nebo DS. Další investiční náklady provozovatelů sítí způsobené rozvojem větrných elektráren spočívají v posílení PS a DS a nákup vyšších výkonových záloh (regulační výkon, dispečerka záloha).

Tab. 5-1 Výkupní ceny a zelené bonusy pro větrné elektrárny [13]

Datum uvedení do provozu	Výkupní ceny elektřiny dodané do sítě v Kč/MWh	Zelené bonusy v Kč/MWh
Větrná elektrárna uvedená do provozu po 1. lednu 2008 včetně	2460	1870
Větrná elektrárna uvedená do provozu od 1. ledna 2007 do 31. prosince 2007	2520	1930
Větrná elektrárna uvedená do provozu od 1. ledna 2006 do 31. prosince 2006	2570	1980
Větrná elektrárna uvedená do provozu od 1. ledna 2005 do 31. prosince 2005	2820	2230
Větrná elektrárna uvedená do provozu od 1. ledna 2004 do 31. prosince 2004	2960	2370
Větrná elektrárna uvedená do provozu před 1. lednem 2004	3280	2690

Jak již bylo uvedeno, podle zákona 180/2005sb o podpoře využívání obnovitelných zdrojů jsou provozovatelé regionálních DS a provozovatel PS povinni vykupovat veškerou vyrobenou elektřinu z větrných elektráren pokud výrobce splňuje podmínky připojení a dopravy elektřiny, a to za cenu určenou platným cenovým rozhodnutím Energetického regulačního úřadu, kterým se stanovuje podpora pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů. Z minimálních výkupních cen elektřiny uvedených v tabulce 5-1 vyplývá, že provozovatelé vykupující tuto elektřinu zaplatí za dodanou MWh asi dvojnásobek tržní hodnoty elektřiny, což způsobuje další finanční zátěž. Cena silové elektřiny na trhu se v závislosti na období a poptávce rychle mění. Z dlouhodobého

hlediska má však rostoucí tendenci. Výrobce elektřiny z VTE také díky přirozené povaze proudění větru nemusí dodržovat plánovaný denní diagram dodávek. Rozdíl mezi předpokládanou a skutečnou dodávkou elektřiny pokrývá provozovatel soustavy. [9]

Všechny tyto faktory v nemalé míře ovlivňují náklady na výstavbu a provoz větrných elektráren a způsobují zvýšení výrobní ceny elektřiny v závislosti na rostoucím celkovém instalovaném výkonu VTE v síti. Tento nárůst má samozřejmě vliv i na konečnou cenu elektřiny pro odběratele. Lze předpokládat, že pokud by se vyplnily prognózy o nárůstu výroby elektřiny z VTE, zvýší se cena za dopravu elektřiny pro konečného zákazníka do roku 2010 o 14 % oproti cenám platným pro rok 2005. V případě odběrových sazeb z vyšších napěťových hladin, například u cen elektřiny pro velkoodběratele, tak bude váha cenového dopadu relativně vyšší.

6 ZÁVĚR

Podíl větrných elektráren na hrubé spotřebě elektřiny v České republice by se měl do roku 2010 zvýšit z nynější 0,1 % na až 2 %. Z tohoto důvodu je důležité sledovat a vyhodnotit vlivy těchto zdrojů na kvalitu a cenu elektrické energie a posoudit zatížení soustav, do kterých větrné elektrárny dodávají elektřinu. Tato práce se zabývá právě těmito aspekty.

V první části práce byly popsány nejčastěji používané technologie a způsoby přeměny kinetické energie větru na energii elektrickou. Okrajově byly zmíněny možnosti regulace výkonu větrné turbíny a popsáno strojové a elektrické příslušenství elektrárny. Dále se práce zabývá přehledem největších výrobců větrných elektráren a jejich zastoupením na celosvětovém a německém trhu. Německo je na poli instalovaného výkonu větrných elektráren jasným lídrem v Evropě a masivní nasazení VTE v jeho energetickém mixu má vliv i na přeshraniční toky. Podle studie Bundesverband Windenergie z roku 2006 dominují na největším evropském trhu dva výrobci větrných elektráren – dánská firma Vestas a německý Enercon. Z nabídky jejich výrobků byly podrobněji popsány elektrárny o jmenovitých výkonech 2 MW, používající nejmodernější materiály a technologie provozu. Z katalogu firmy Vestas byla vybrána V90-2 MW, Enercon zastupovala větrná elektrárna E82. Obě popisované VTE se od sebe značně liší od tvaru listů rotoru přes osazení gondoly, použití převodovky a zvoleného generátoru, až po technologii regulace výkonu.

Ve druhé části se již práce zabývá hlavním tématem, tedy kvalitou elektrické energie. V jejím teoretickém úvodu jsou uvedeny sledované hodnoty elektrické energie, které jsou zásadní pro určení její jakosti. Zvýšená pozornost byla věnována produkci flickrů z větrných turbín. Díky regulaci otáček turbíny a bohatému elektronickému příslušenství se podařilo značnou část této negativní vlastnosti VTE potlačit. Avšak flickr vznikající za souvislého běhu se z důvodu přirozené povahy větru (nestabilní hustota větru) nebo omezení větrných turbín s vodorovnou osou (efekt stožárového stínu) eliminovat dosud nedaří.

Model sítě navržený a vypočítaný pomocí analytického programu GLF je podrobně rozveden ve 4. kapitole. Samotný výpočet probíhal ve třech fázích. V první fázi byl sestaven model s pouze konvenčními zdroji elektrické energie (teplárny, plynové elektrárny apod.). Tento model sloužil jako jakýsi etalon, tedy referenční stav, ze kterého bylo vycházeno. Fáze druhá spočívala v připojení několika větrných elektráren a parků do této sítě a následné vyhodnocení změn oproti referenčnímu stavu. Ty se negativně projeví zvýšením napájecího napětí v síti nad dovolenou mez hned v několika uzlech modelu. To by ve skutečné soustavě mělo za následek nucené odstavení stabilních zdrojů. Třetí fáze naznačila lokální vliv větrné elektrárny na její okolí. Z výsledků a dosažených grafů plyne, že VTE v závislosti na výkonu a účinníku značně ovlivňuje napájecí napětí ve společném přípojním bodě. Tento fakt omezuje použitelné provozní stavy elektrárny, shrnuté v tabulce 4-7.

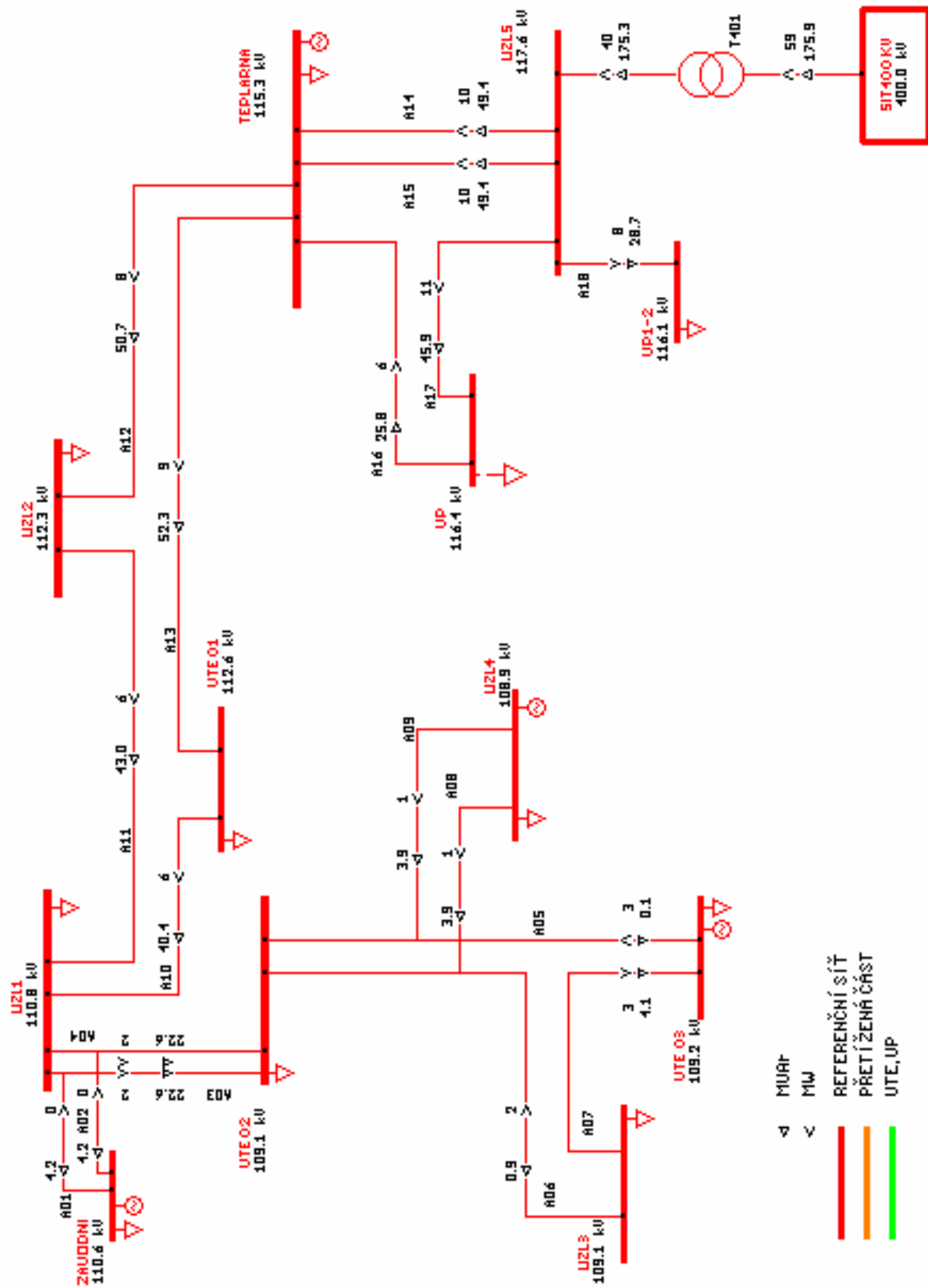
Konečně v poslední části práce poukazuje na ekonomická hlediska výstavby a provozu větrných elektráren a vlivu na konečnou cenu elektrické energie. Díky silné legislativní podpoře se provozování VTE může zdát jako vhodný podnikatelský záměr se státní garancí návratnosti investice do 15 let. Zvyšování podílu na hrubé spotřebě elektřiny v ČR sebou ovšem přináší řadu technických komplikací jako budování nebo posilování vedení v odlehlých horských lokalitách, nutnost výstavby záložních zdrojů pro krytí ztrát způsobených nedodržáním plánované dodávky elektřiny, atd. Náklady s tímto spojené se samozřejmě odrazí i na ceně elektrické energie pro

konečného zákazníka v podobě nárůstu příspěvku na podporu výkupu elektřiny z obnovitelných zdrojů a kombinované výroby elektřiny a tepla, poplatku za systémové služby nebo zvýšením ceny za distribuci v rozmezí 5 až 14 % podle nárůstu podílu elektřiny z větrných elektráren na hrubé spotřebě.

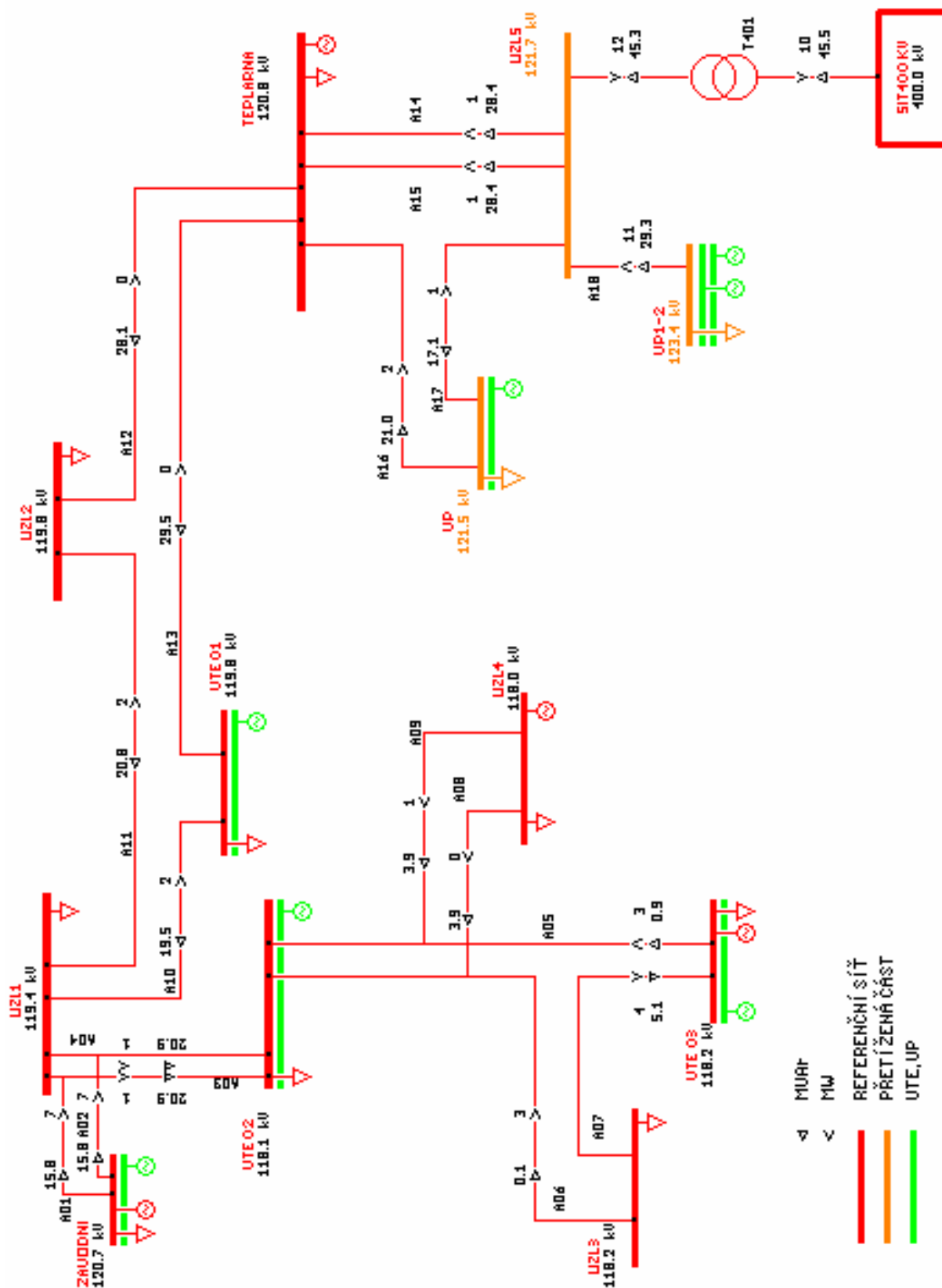
POUŽITÁ LITERATURA

- [1] RYCHETNÍK, V., PAVELKA, J., JANOUŠEK, J. *Větrné motory a elektrárny*. ČVUT v Praze, Praha 1997, 199 stran
- [2] KOLEKTIV AUTORŮ *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v ČR*. ČEZ, a. s. Praha 2007
- [3] ERÚ. *Roční zpráva o provozu ES ČR 2006* [on-line]. c2007, [cit. 27.3.2008]. Dostupné z: <http://www.eru.cz/rz_06/rz/index.htm>
- [4] ČEZ, a. s., *Divize výroba. Roční zpráva 2006 : Jaderné elektrárny společnosti ČEZ, a. s.* Redaktor Zbyněk Grunda. 2006. vyd. [s.l.] : [s.n.], 2006. 32 s. Dostupný z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/energie_a_zivotni_prostredi/CEZ-Rocni-zprava-provozu-JE-06.pdf>.
- [5] KV VENTI, a. s. *Nejvýkonnější větrné elektrárny v Evropě* [on-line]. c2007, poslední revize 25.1 2007 [cit. 17. 11. 2007]. Dostupné z: <<http://www.vetrnaelektrarna.otestuj.cz/Nejvykonnejsi-VE-v-Evrope.html>>
- [6] VESTAS. *V90-1,8 MW a 2,0 MW Stavíme na zkušenostech* [on-line]. c2007, [cit. 17. 11. 2007]. Dostupné z: <<http://www.niko-brno.cz/index.php?page=vyrobní-rada>>
- [7] ÚFA. *Výzkum vhodnosti lokalit v ČR z hlediska zásob větrné energie a zpracování metodiky pro posuzovací a schvalovací řízení při zavádění větrných elektráren* [on-line]. c2007 [cit. 26. 10. 2007.] Dostupné z: <<http://www.ufa.cas.cz/html/dllouka/info/vav/priloha02.jpg>>
- [8] PTÁČEK, J. *Graphic load flow* [počítačový program]. Ver. 8/97. [Česká republika], 1997 [citováno 2008-05-13]. Vyžaduje MS-DOS
- [9] MUSILVÁ, A. *Větrná energie se značně prodrazí* [on-line]. c2008, poslední revize 8. 11. 2007 [cit. 1.6.2008] Dostupné z: <<http://www.ct24.cz/ekonomika/4875-vetrna-energie-se-znacne-prodrazi/>>
- [10] Zákon č. 180/2005 Sb. *o podpoře využívání obnovitelných zdrojů*. In *Práva a povinnosti subjektů na trhu s elektřinou z obnovitelných zdrojů*. Praha, 2005. ISSN 1211-1244
- [11] *Pravidla provozování distribučních soustav – Příloha 4, Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy*. Dostupné z: <<http://www.eon.cz/cs/distribution/regulations.shtml>>
- [12] *Pravidla provozování distribučních soustav – Příloha 3, Kvalita elektřiny v distribuční soustavě, způsoby jejího zjišťování a hodnocení*. Dostupné z: <<http://www.eon.cz/cs/distribution/regulations.shtml>>
- [13] ERÚ. *Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 7/2007, ze dne 20. listopadu 2007*. Jihlava
- [14] LARSSON, A. *Flicker Emission of Wind Turbines Caused by Switching Operations*, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2002.
- [15] LARSSON, A. *Flicker Emission of Wind Turbines During Continuous Operations*, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2002

Příloha A Model sítě vvn v referenčním stavu



Příloha B Model sítě vvn po připojení VTE a VP na instalovaný výkon



Příloha C Model sítě vvn pro analýzu provozních vlivů VP

