

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Využití akumulčních prvků při provozu větrných  
elektráren**

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

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

Jméno a příjmení: **Bc. Martin MATOUŠEK**  
Osobní číslo: **E13N0059P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Technická ekologie**  
Název tématu: **Využití akumulčních prvků při provozu větrných elektráren**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Zhodnoťte systém větrných elektráren - výhody, nevýhody, možnosti použití.
2. Posuďte optimální spolupráci VE s elektrizační sítí - provozní charakteristiky, využití pro systémové služby, ostrovní provoz.
3. Navrhněte, optimální kombinaci VE s akumulčním prvkem.
4. Na modelu systému ověřte jeho provozní charakteristiky

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

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


Seznam odborné literatury:

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


Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Emil Dvorský, CSc.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

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

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**

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



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

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na větrné elektrárny, které při svém provozu využívají akumulaci elektrické energie. V první části diplomové práce jsou stručně popsány větrné elektrárny jako celek, dále druhy větrných motorů a konstrukce větrné elektrárny. Druhá část práce popisuje optimální spolupráci větrné elektrárny s elektrizační sítí, přičemž jsou zde rozebrány požadavky na připojení do elektrizační sítě. Třetí a čtvrtý bod práce se věnuje praktickému návrhu větrné elektrárny při různých provozních parametrech a z toho odvozených provozních charakteristik pomocí softwarového programu Matlab/Simulink.

## **Klíčová slova**

Větrný motor, elektrická energie, regulace, elektrizační síť

## **The use of storage elements in the wind turbines operation**

### **Abstract**

This study is focused on wind power when in use utilize electric energy accumulation. The first section briefly describes the wind turbine as a whole, as well as types of wind power and construction of wind farms. The second part describes the optimal cooperation with the wind power electricity networks, and are discussed requirements for connection to the electricity grid. The third and fourth point of the study is devoted to practical proposal for wind power at various operating parameters and the operating characteristics derived using the software Matlab / Simulink.

### **Keywords**

Wind motor, electric power, control, electricity network

## **Prohlášení**

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

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

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

V Plzni dne 29. 4. 2015

Bc. Martin Matoušek

.....

## **Poděkování**

Tímto bych velmi rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Emilu Dvorskému, CSc. za odborné vedení práce a cenné rady, které nepochybně vedly k dokončení této práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Lence Rakové, která svým jedinečným přístupem a ochotou přispěla ke zpracování práce.

Na závěr bych touto cestou rád poděkoval rodičům za neustálou podporu při studiu.

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>11</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>13</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>14</b>
<b>1 VĚTRNÉ ELEKTÁRNY.....</b>	<b>15</b>
1.1 TRANSFORMACE ENERGIE VĚTRU NA ENERGII ELEKTRICKOU.....	15
1.2 VYUŽITÍ ENERGIE VĚTRU.....	16
1.3 ZÁKLADY AERODYNAMIKY A TYPY VĚTRNÝCH MOTORŮ.....	16
1.3.1 Typy větrných motorů.....	17
1.3.1.1 Darrieusova turbína.....	17
1.3.1.2 Lopatkové kolo.....	18
1.3.1.3 Savoniuv rotor.....	19
1.3.1.4 Vrtule.....	19
1.4 ZÁKLADNÍ KONSTRUKČNÍ PRVKY VTE.....	20
1.5 REGULAČNÍ MOŽNOSTI VĚTRNÉ ELEKTÁRNY.....	21
1.5.1 Regulace „STALL“.....	22
1.5.2 Regulace „PITCH“.....	23
1.5.3 Regulace „ACTIVE STALL“.....	24
1.6 GENERÁTORY VĚTRNÝCH ELEKTÁREN.....	24
1.6.1 Stejnoseměrný generátor.....	24
1.6.2 Synchronní generátor s proměnnými otáčkami.....	25
1.6.2.1 Synchronní generátory připojené na síť.....	26
1.6.3 Asynchronní generátor s konstantními otáčkami.....	26
1.6.4 Asynchronní generátor s proměnnými otáčkami.....	27
1.6.4.1 Asynchronní generátory připojené na síť.....	28
<b>2 OPTIMÁLNÍ SPOLUPRÁCE VĚTRNÉ ELEKTÁRNY S ELEKTRIZAČNÍ SÍTÍ.....</b>	<b>30</b>
2.1 VLIV VĚTRNÝCH ELEKTÁREN NA ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVU.....	30
2.2 VTE A REGULACE ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY.....	31
2.2.1 Požadavky na chování VTE v elektrizační soustavě.....	32
2.2.1.1 Požadavky na chování větrných elektráren při zkratech a poruchách PS.....	32
2.2.1.2 Požadavky na chování větrných elektráren při změnách frekvence.....	33
2.3 PODMÍNKY PRO PŘIPOJENÍ VTE.....	33
2.3.1 Připojení VTE k síti.....	34
2.3.2 Ochrany.....	34
2.3.3 Řízení jalového výkonu.....	35
2.3.4 Zvýšení napětí.....	35
2.3.5 Změna napětí při spínání.....	36
2.3.6 Připojování synchronních a asynchronních generátorů.....	37
2.4 ZPĚTNÉ VLIVY NA NAPÁJECÍ SÍŤ - LOKÁLNÍ VLIVY.....	38
2.5 SYSTÉMOVÉ VLIVY.....	41
2.6 SYSTÉMOVÉ SLUŽBY.....	41
2.6.1 Regulace $U$ a $Q$ .....	42
2.6.2 Regulace $f$ a $P$ .....	42
2.6.3 Primární regulace (PRN).....	43
2.6.4 Sekundární regulace.....	44
2.6.5 Terciární regulace (TRN).....	44
2.7 ENERGETICKÉ TOKY V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ A PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKY.....	44
2.8 OSTROVNÍ PROVOZ – GRID-OFF SYSTÉM.....	46
<b>3 NÁVRH MODELU VĚTRNÉ ELEKTÁRNY.....</b>	<b>47</b>
3.1 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ.....	47



---

3.2	MODEL RYCHLOSTI VĚTRU .....	48
3.3	MODEL STATICKÉHO KOMPENZÁTORU .....	48
3.4	MODEL VZTLAKOVÉ TURBÍNY.....	50
3.5	MODEL AERODYNAMICKÉ REGULACE .....	53
3.6	MODEL BATERIE A STRÍDAČE.....	54
3.7	STATICÝ MODEL VĚTRNÉ TURBÍNY .....	56
3.8	DYNAMICKÝ MODEL VĚTRNÉ TURBÍNY .....	58
3.9	NAVRŽENÝ MODEL VĚTRNÉ TURBÍNY .....	59
<b>4</b>	<b>PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKY NAVRŽENÉHO MODELU.....</b>	<b>62</b>
4.1	PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKY MODELU BEZ MOŽNOSTI AKUMULACE.....	62
4.2	PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKY MODELU S MOŽNOSTÍ AKUMULACE.....	68
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>72</b>

## Seznam symbolů a zkratek

$VTE$ .....	Větrná elektrárna
$S_{kv}$ .....	Zkratový výkon v přípojném bodu [VA]
$\lambda$ .....	Účinitel
$f$ .....	Frekvence [Hz]
$U$ .....	Elektrické napětí [V]
$Q$ .....	Jalový výkon [VA $r$ ]
$P_v$ .....	Výkon vzdušného proudu [W]
$S_{ng}$ .....	Zdánlivý výkon zařízení [VA]
$m$ .....	hmota [kg]
$\rho$ .....	Hustota vzduchu [kg.m <sup>-3</sup> ]
$A$ .....	Plocha [m <sup>2</sup> ]
$C_p$ .....	Výkonový součinitel [-]
$P_j$ .....	Jmenovitý výkon [W]
$\lambda_0$ .....	Rychloběžnost [-]
$u_R$ .....	Obvodová rychlost [m.s <sup>-1</sup> ]
$w$ .....	Úhlová rychlost [rad.s <sup>-1</sup> ]
$\pi$ .....	Ludolfovo číslo 3,14 [-]
$R$ .....	Poloměr rotoru [m]
$DS$ .....	Distribuční síť

## Seznam obrázků

Obrázek 1.1	Blokové uspořádání VTE
Obrázek 1.2	Obtékání vzduchu kolem lopatek VTE [2]
Obrázek 1.3	Větrný motor typu Darrieus [3]
Obrázek 1.4	Americké kolo na čerpání vody [4]
Obrázek 1.5	Savoniuv rotor [1]
Obrázek 1.6	Uspořádání vrtulí větrných motorů, a) jednolistá, b) dvoulistá, c) třílistá [1]
Obrázek 1.7	Řez větrnou elektrárnou [2]
Obrázek 1.8	Regulace STALL [6]
Obrázek 1.9	Výkonová charakteristika regulace PITCH (a) a STALL (b) [7]
Obrázek 1.10	Synchronní generátor s proměnnými otáčkami [3]
Obrázek 1.11	Charakteristika pro různé rychlosti větru [1]
Obrázek 1.12	Asynchronní generátor s konstantními otáčkami [3]
Obrázek 1.13	Dvojitě napájený asynchronní generátor [3]
Obrázek 1.14	Jednopolové schéma silnoproudých obvodů VTE s asyn. generátorem [3]
Obrázek 1.15	Chování VTE při zkratech a poruchách PS [9]
Obrázek 1.16	Připojení a odpojení VTE při změnách frekvence [9]
Obrázek 1.17	Změna světelného toku způsobená dočasnou změnou napětí [10]
Obrázek 1.18	Hierarchický charakter regulace $f$ a $P$ [11]
Obrázek 1.19	Blokové schéma regulace ES ČR [12]
Obrázek 1.20	Přeshraniční toky ze dne 24. 2. 2015 [13]
Obrázek 1.21	Výroba elektrické energie z VTE v čase [13]
Obrázek 1.22	Blokové schéma grid-off systému bez akumulace
Obrázek 1.23	Blokové schéma grid-off systému s akumulací
Obrázek 1.24	Schéma modelu větrné elektrárny s asynchronním generátorem [14]
Obrázek 1.25	Schéma matematického modelování [3]
Obrázek 1.26	Schéma statického kompenzátoru
Obrázek 1.27	VA charakteristika kompenzátoru
Obrázek 1.28	Schématické znázornění proudu vzduchu protékajícího vrtulí
Obrázek 1.29	Součinitel účinnosti různých větrných kol jako funkce rychloběžnosti [15]

---

Obrázek 1.30	Schéma bloku regulace pitch
Obrázek 1.31	Průběhy mechanického výkonu turbíny a rychlosti turbíny v závislosti na rychlosti větru
Obrázek 1.32	Vybíjecí charakteristika baterie
Obrázek 1.33	Průběh nabíjení dvou různých baterií
Obrázek 1.34	Náhradní schéma střídače IGBT
Obrázek 1.35	Statický model větrné turbíny
Obrázek 1.36	Průběhy výkonového koeficientu v závislosti na natočení lopatek rotoru a na rychlostním koeficientu
Obrázek 1.37	Subsystem statického modelu větrné turbíny
Obrázek 1.38	Model větrné farmy
Obrázek 1.39	Schématické znázornění jednotlivých větrných elektráren
Obrázek 1.40	Navržený model větrné elektrárny
Obrázek 1.41	Subsystem navržené větrné turbíny s baterií
Obrázek 1.42	Parametry akumulčního prvku
Obrázek 1.43	Průběh činného výkonu v čase (varianta 1)
Obrázek 1.44	Průběh jalového výkonu v čase (varianta 1)
Obrázek 1.45	Průběh úhlu natočení listů (varianta 1)
Obrázek 1.46	Průběh rychlosti větru působícího na turbínu (varianta 1)
Obrázek 1.47	Úhlová rychlost asynchronního generátoru (varianta 1)
Obrázek 1.48	Průběh činného výkonu v čase (varianta 2)
Obrázek 1.49	Průběh jalového výkonu v čase (varianta 2)
Obrázek 1.50	Průběh úhlu natočení listů (varianta 2)
Obrázek 1.51	Průběh rychlosti větru působícího na turbínu (varianta 2)
Obrázek 1.52	Úhlová rychlost asynchronního generátoru (varianta 2)
Obrázek 1.53	Model doplněný o třífázový vypínač
Obrázek 1.54	Výsledná charakteristika vybíjení akumulátoru za čas
Obrázek 1.55	Výsledná charakteristika vybíjení akumulátoru v závislosti na kapacitě
Obrázek 1.56	Charakteristika ukazující průběh vybíjení baterie

## **Seznam tabulek**

Tabulka 1.1	Nastavení příslušných stupňů ochran [10]
Tabulka 1.2	Rychlé změny napětí v závislosti na četnosti výskytu [10]
Tabulka 1.3	Povolený obsah vyšších harmonických [10]
Tabulka 1.4	Parametry generátoru
Tabulka 1.5	Parametry turbíny
Tabulka 1.6	Parametry akumulátoru

## Úvod

Vzhledem k tomu, že jsou lidské potřeby stále více závislé na zdrojích elektrické energie, alternativní zdroje energie jsou jednou z možností, jak tyto potřeby uspokojovat a zajišťovat. V posledním desetiletí byl zaznamenán značný nárůst v oblasti technologického vývoje alternativních zdrojů a také snaha o dosažení zisku elektrické energie v maximální možné míře.

Důvod, proč upřednostňovat obnovitelné zdroje energie před klasickými elektrárnami tkví v tom, že obnovitelné zdroje jako je například využívání vody, slunce nebo větru při svém provozu, nezatěžují životní prostředí škodlivými emisemi. Dalším aspektem, proč využívat tyto zdroje je fakt, že na rozdíl od konvenčních výroben nejsou závislé na fosilních palivech. Naproti tomu, celosvětová spotřeba elektrické energie, je natolik značná, že její pokrytí pouze pomocí obnovitelných zdrojů elektrické energie je prozatím v současné době nemožné. Z tohoto důvodu, patří obnovitelné zdroje do skupiny doplňkových prostředků, které, dopomáhají uspokojit spotřebu energií na celém světě.

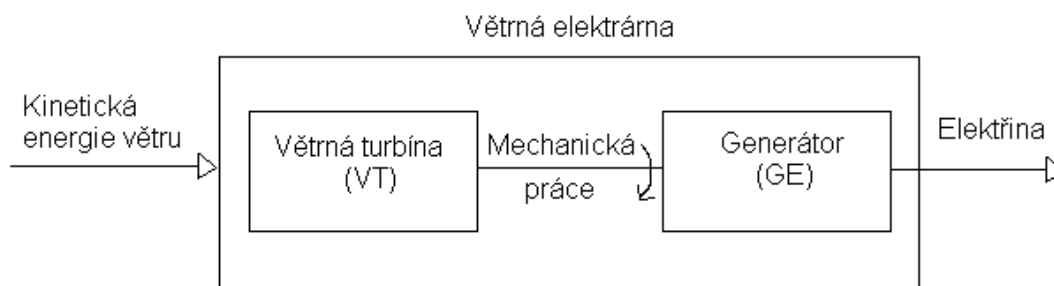
Ve své práci jsem se zaměřil na větrné elektrárny jako celek, věnoval jsem větrné energii od principu vzniku a přeměny kinetické energie větru na energii elektrickou až k popisu jednotlivých typů větrných elektráren. Dále jsem popisoval jednotlivé typy elektrických generátorů a jejich připojení k síti. Další část práce je věnována spolupráci elektrizační soustavy České republiky a větrných elektráren. Jsou zde popsány i možnosti regulace a požadavky na větrné elektrárny pro připojení do elektrizační soustavy. Cílem práce je vhodný návrh modelu větrné elektrárny v softwarovém programu Matlab/Simulink a modelování jeho provozních charakteristik v různých režimech zapojení. V poslední části práce jsou diskutovány jednotlivé provozní charakteristiky a je provedeno celkové shrnutí práce.

# 1 VĚTRNÉ ELEKTÁRNY

Základním ukazatelem a hlavním parametrem pro výrobu elektrické energie pomocí větrné elektrárny je větrný potenciál dané oblasti, kde je tento obnovitelný zdroj energie umístěn. Jinými slovy, větrná elektrárna je závislá na rychlosti větru. Obecně lze tvrdit, že většina větrných rotorů začíná vyrábět elektrickou energii, pokud je rychlost větru minimálně  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Z tohoto důvodu, se větrný rotor umísťuje nad okolní terén, aby případně stavby či nerovnosti krajiny nebránili v proudění větru. Avšak pokud je rychlost větru příliš velká, pro většinu elektráren se uvádí hodnota nad  $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , je nutné větrný rotor odstavit, aby nedošlo k poškození konstrukce turbíny z důvodu velkého mechanického namáhání.

## 1.1 Transformace energie větru na energii elektrickou

Větrnou elektrárnu tvoří několik dílčích částí, bez kterých by jako celek nemohla správně fungovat. První částí je větrná turbína, která je viditelně umístěna na stožáru a její funkce spočívá v tom, že mění kinetickou energii větru na rotační mechanickou energii a tím je uváděna do pohybu. Skládá se z rotorových listů, které mají specificky navržený tvar. Plocha rotorových listů je nastavena působení větru, kterému klade odpor a tím je uvedena do pohybu. Další částí větrné elektrárny je převodovka, která je pevně spojena s rotorem a také přes hřídel s generátorem elektrického proudu. Převodovka a elektrický generátor jsou umístěny uvnitř strojovny, kterému se říká gondola. Před samotnou distribucí do rozvodné sítě je elektrická energie transformována pomocí střídačů a usměrňovačů. Okamžitý výkon větrné elektrárny závisí zejména na rychlosti proudění větru a především na proměnlivosti proudění, které má vliv na množství vyráběné elektrické energie a tím i na provoz v elektrizační soustavě.



Obr.: 1.1 Blokové uspořádání VTE [8]

## 1.2 Využití energie větru

Historie využívání energie z větru je známá již řadu let. Větrná energie je pravděpodobně nejdéle využívanou přírodní silou s jejíž pomocí lidé poháněli jednoduchá zařízení. V podstatě existují dva typy jak využít energii z větru, které se od sebe liší jen konečnou formou získané energie. První možností využití energie z větru je způsob přímý, kdy je pohybová energii odebírána za pomoci plachty a energie je následně využita pro pohyb určitého objektu, nebo je pomocí větrného motoru přeměněna na energii mechanickou, která je následně využita pro pohon mechanického zařízení, například mlýn nebo čerpadlo. Tato metoda se uplatňovala hlavně v dřívějších dobách. Druhým typem využití větrné energie je způsob nepřímý, v turbíně je získána mechanická energie, která je pomocí generátoru přeměněna na energii elektrickou a tato energie je dále distribuována do místa spotřeby.

V dnešní moderní době je celá řada větrných elektráren, které mají různé provozní vlastnosti a dělí se podle několika vlastností. Jedním ze základních vlastností je velikost potažmo výkon větrné elektrárny, který dosahuje od několika desítek wattů až do jednotek megawattů. Ty nejmenší elektrárny lze nalézt na střeších rodinných domů, jejichž výkon dosahuje například 1 kW a výstupem je stejnosměrné napětí 12 či 24 V. Ovšem z hlediska energetiky jsou nejvýznamnější elektrárny, jejichž výkon dosahuje jednotek megawattů nebo v případě větrné farmy až několik desítek megawattů. Tyto elektrárny jsou postaveny za účelem dodávky elektrické energie do elektrizační sítě na hladinách vysokého či velmi vysokého napětí a podílejí se na pokrytí spotřeby obcí či měst. [1]

## 1.3 Základy aerodynamiky a typy větrných motorů

Rotor větrné elektrárny pracuje na základě dvou aerodynamických principů, odporovém a vztakovém, které se dle konstrukčního provedení mohou dále rozlišovat na motory se svislou či vodorovnou osou otáčení. Větrné motory, které pracují na odporovém principu, patří k historicky nejstarším a hlavním parametrem je zde odpor. Princip je velice jednoduchý, energie větru „naráží“ do nastavené plochy (listy rotoru) a to mu klade svou plochou aerodynamický odpor a tím vzniká síla, která roztáčí listy rotoru. Využití tohoto typu rotoru je obvykle k čerpání vody anebo k výrobě stejnosměrného proudu. Jako příklad, který využívá odporového principu Savoniuv rotor.

Druhou možností je využití vztakového principu, který má však specifické požadavky na lopatky rotoru a důraz je kladen především na provedení lopatek. Listy rotoru jsou



nastavovány větru svou spodní hranou, na kterou vítr naráží. Přes horní hranu rotorového listu prochází větší objem, jak je uvedeno (Obr. 1.2.). Tím dojde k urychlení větrného proudu na horní straně křídla a k podtlaku, jenž má za následek vyvolání vztlakové síly a křídlo je taženo dopředu vzniklým podtlakem. Vztlaková síla je přibližně dvakrát větší než odporová. Spolupůsobení těchto sil, které jsou na sebe navzájem kolmé, vzniká výsledná síla, která pohání listy vrtule. Větrné motory pracující na vztlakovém principu patří vrtule a větrná kola s vodorovnou osou otáčení, které jsou orientovány svoji rovinou otáčení kolmo ke směru větru. [1]



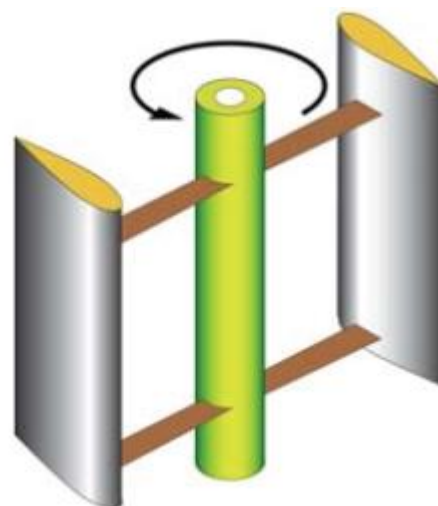
Obr. 1.2 Obtékání vzduchu kolem lopatek VTE [2]

### 1.3.1 Typy větrných motorů

Větrné motory se mohou dělit dle několika různých hledisek. Od již zmíněného dělení dle aerodynamického principu se dále mohou dělit podle osy otáčení na zařízení s vodorovnou nebo svislou osou otáčení. V této kapitole budou popsány základní a nejběžnější větrné turbíny, které jsou dnes nejvíce používané.

#### 1.3.1.1 Darrieusova turbína

Tento typ větrné turbíny se řadí mezi nejstarší, který využívá přeměny větrné energie na energii elektrickou pomocí vztlakového principu se svislou osou otáčení. Jsou zhotoveny v různých provedeních, jak je patrné z Obr. 1.3. Obvykle jsou opatřeny dvěma až čtyřmi listy, které mají vytvarovány lopatky tak, aby se dosáhlo co nejmenšího namáhání odstředivými silami.



Obr. 1.3 Větrný motor typu Darrieus [3]

Mezi největší výhody těchto turbín se řadí jejich nezávislost na směru větru, jednoduchá konstrukce a v neposlední řadě celkem vysoká účinnost 38 %. Protikladem tohoto typu větrné turbíny je to, že v praxi se příliš neosvědčil pro velké mechanické namáhání. Jelikož se díky své konstrukci umísťuje v malé výšce nad zemí, pracuje tím pádem i s menší rychlostí větru. Velkou nevýhodou těchto strojů je, že se sami nerozsbíhají při nižších rychlostech větru, proto obvykle spolupracují s cizím zdrojem, který pomáhá zajišťovat rozběh. [3]

### 1.3.1.2 Lopatkové kolo

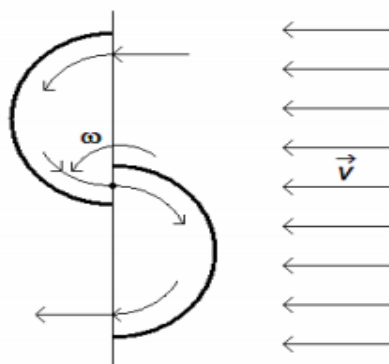
Pro lopatkové kolo často nazývané americké kolo jsou typické některé jeho parametry a to zejména velký počet lopatek a jejich velká plocha. Dosahuje jen nízkých otáček, avšak vyznačuje se velmi vysokým rozběhovým momentem. Tvar lopatek je velmi jednoduchý za použití ohnutých plechů. Relativně vysoké účinnosti dosahuje při příznivých podmínkách, kdy je lopatkové kolo schopno využít energii větru v rozmezí 20-40%. Pro výrobu elektrické energie se tento typ příliš nehodí, zejména proto, že elektrické generátory požadují pro optimální provoz otáčky od 800-3000 ot/min. Velký průměr rotoru a jeho vysoká hmotnost, která je daná velkým průměrem rotoru, způsobuje velké mechanické namáhání. [3]



Obr. 1.4 Americké kolo na čerpání vody [4]

### 1.3.1.3 Savoniuv rotor

Tento větrný rotor, pracující na odporovém principu, který je možné využít pro výrobu elektrické energie je nazýván Savoniuv rotor. Jak je možné vidět na Obr. 1. 5. je složen ze dvou ploch ve tvaru půlválců na kruhové základně, které jsou uspořádány ve tvaru písmene S. Tento druh větrného motoru patří mezi pomaloběžné rotory s malou hodnotou rychloběžnosti.



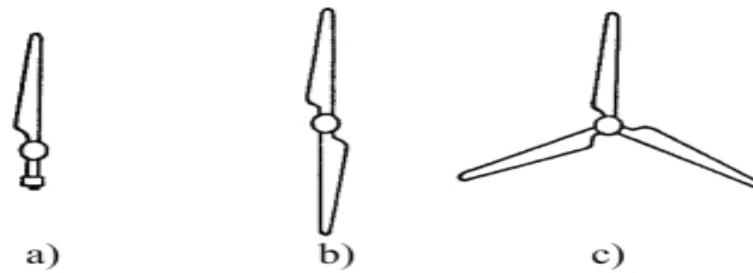
Obr. 1.5 Savoniuv rotor [1]

Výhodou tohoto rotoru je jeho jednoduchá konstrukce a vysokou spolehlivostí chodu, který je zajištěn již při malých rychlostech větru 2 až 3  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Rotor se vyznačuje velkým mechanickým namáháním, které snižuje životnost rotoru a relativně malou účinností přibližně 23% a proto se příliš nepoužívá. Tento typ rotoru se nejčastěji používá k čerpání vody nebo k výrobě stejnosměrného proudu.

### 1.3.1.4 Vrtule

Vrtule a větrná kola s vodorovnou osou otáčení pracující na vztlakovém principu, jsou orientovány svoji rovinou otáčení kolmo ke směru větru. Vrtule jsou obvykle v třílistém provedení, ale lze nalézt i vrtule jednolisté s protizávažím. (Obr. 1.6).

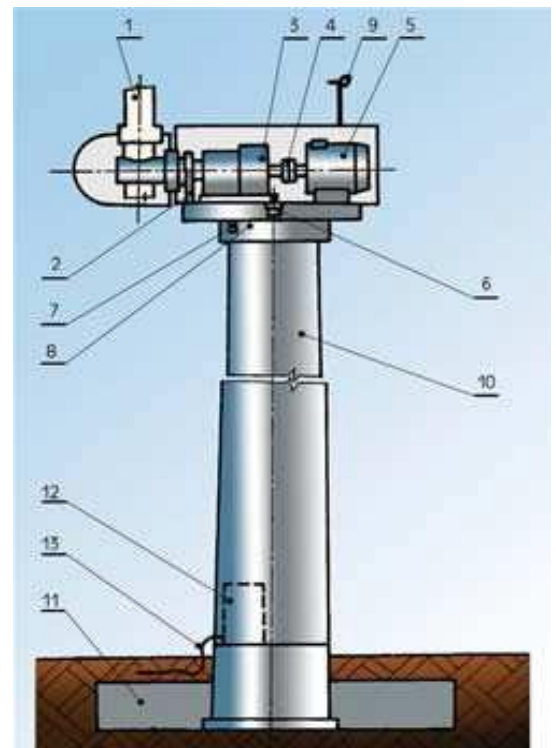
Vrtulové listy jsou kolem své podélné osy natáčivé, to platí u některých typů větrných motorů. Tento fakt má za následek lepší rozběh motoru, regulaci otáček i aerodynamické brzdění a případně i snížení odporu vrtule při zastaveném rotoru. Vrtule je větrným strojem s největší účinností do 45 %, jehož maximální hodnota je dosahována při rychloběžnosti kolem hodnoty 6. Rozběhová rychlost se pohybuje mezi 3 a 4  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  a pracují až do rychlosti 25  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tento typ rotoru se uplatňuje u elektráren všech velikostí.



Obr. 1.6. Uspořádání vrtulí větrných motorů, a) jednolistá, b) dvoulistá, c) třílistá [1]

## 1.4 Základní konstrukční prvky VTE

1. rotor s rotorovou hlavicí
2. brzda rotoru
3. planetová převodovka
4. spojka
5. generátor
6. servo - pohon natáčení strojovny
7. brzda točny strojovny
8. ložisko točny strojovny
9. čidla rychlosti a směru větru
10. několikadílná věž elektrárny
11. betonový armovaný základ elektrárny
12. elektrorozvaděče silnoproudého a řídicího obvodu
13. elektrická přípojka



Obr. 1.7. Řez větrnou elektrárnou [2]

- 1) **rotor s rotorovou hlavicí** – rotor je u elektráren velkých výkonů tvořen obvykle třemi lopatkami. Pokud je VTE použita jako doplňkový zdroj u rekreačních či rodinných domů, lze použít i například vrtuli jednolistou či dvoulistou. Důležitým parametrem je průměr rotoru, který může dosahovat i několik desítek metrů v závislosti na požadovaném výkonu.
- 2) **brzda rotoru** – Brzda rotoru slouží k zastavení otáčení rotoru při velkých rychlostech větru a je nezbytným doplňkem větrné elektrárny. Brzda má několikrát větší moment

síly než samotný rotor. Způsob jejího ovládní může být provedeno v několika variantách (mechanicky, elektricky, hydraulicky). Rozlišují se systémy s pevnou vrtulí a systémy s nastavitelnou vrtulí.

- 3) **převodovka** – bývá v různém velikostním provedení a záleží zejména na výkonu VTE. Jedná se o velmi namáhanou a důležitou součástku, protože se rotor netočí stálými otáčkami díky proměnlivé rychlosti procházejícího proudu vzduchu. Jsou navrhovány s vysokým koeficientem bezpečnosti a při navrhování převodového ústrojí je kladen důraz na co nejmenší hluk.
- 5) **generátor** - slouží k přeměně mechanické energie větru na elektrickou energii. Jako generátory lze použít asynchronní generátor, nebo synchronní generátor s budícím vinutím na rotoru. Tento typ generátoru se nahrazuje synchronním generátorem s permanentními magnety u rychloběžných alternátorů.
- 6) **stožár** – tvoří hlavní část nosného systému VTE. Používají se ocelové příhradové konstrukce, samostatný tubus velkého průměru, lze ho také vyrobit z betonu. Stožáry rozlišujeme podle toho, jakou mají vlastní frekvenci (tuhé, středně tuhé a měkké). Výška stožáru se pohybuje v rozmezí od 40 do 110m. [5]

## 1.5 Regulační možnosti větrné elektrárny

Bez možnosti regulace by nebylo možné provozovat elektrárnu v bezpečných mezích hodnot otáček. Regulace větrné elektrárny je velice důležitým aspektem z hlediska akumulace elektrické energie, kterou nelze dlouhodobě skladovat. U elektráren malých výkonů je tento problém vyřešen pomocí akumulátorových baterií, avšak u výroben velkých výkonů je tato možnost vyloučena s výjimkou přečerpávacích vodních elektráren. Současná elektrifikace a distribuční sítě jsou optimalizovány na stejnoměrnou a trvalou dodávku elektrické energie u uhelných či jaderných výroben. Tyto elektrárny jsou svoji typologií také tak nastaveny a proto jsou v diagramu zatížení umístěny v základním pásmu. V současné době probíhá regulace na území České republiky tak, že na každou hodinu je nasmlouvána přibližná spotřeba a produkce a podle toho se řídí funkce fosilních a atomových elektráren. U obnovitelných zdrojů obecně, je velice složité předem nasmlouvat výkony vzhledem k proměnlivosti zdrojů (slunce, vítr). Musí se tedy vždy nepřetržitě regulovat celá dodávka a nikoliv jen odchylka od definovaných hodnot. Tento fakt pak vede k nadměrnému přetěžování přenosových sítí, dochází ke snižování kvality sítě i neočekávaným výkyvům ceny elektřiny na trzích.

Vítr je nestálá veličina a v nárazových hodnotách může dosahovat velmi vysokých hodnot a tím být pro větrný motor nebezpečný. Regulovat otáčky je důležitým faktem i z

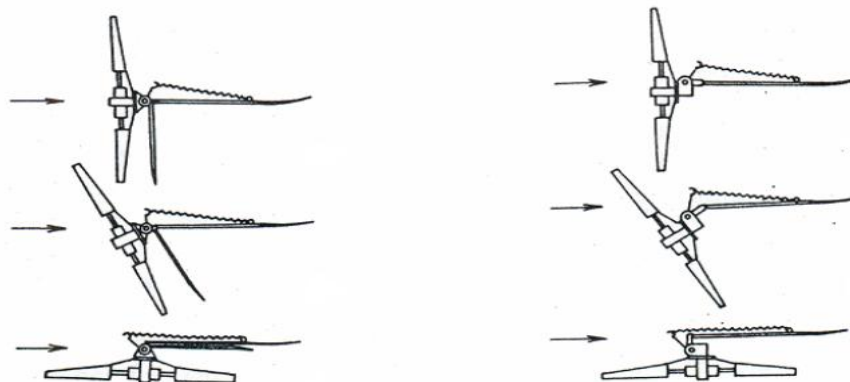
hlediska výkonu, aby se co nejvíce pohybovali na hranici nominálního výkonu. Rozlišují se dvě hlavní skupiny regulačních principů podle provedení rotorů. První skupinou jsou systémy, které mají pevné nenatáčivé lopatky, tento systém regulace se označuje „stall“. Do druhé skupiny regulačních principů spadají rotory, které pracují s natáčivými lopatkami a tento způsob regulace se označuje „pitch“. [6]

### 1.5.1 Regulace „STALL“

Tento druh regulace je uplatňován u rotorů s pevnými listy. Principem této regulace je to, že při normálním chodu brání vzájemnému natočení rotoru z optimální polohy pružina nebo jiný mechanismus. Pokud je rychlost větru příliš vysoká, musí být vyvolaná značná síla, která překoná sílu pružiny nebo jiného mechanismu, například na principu závaží a způsobí vychýlení rotoru z roviny kolmé na směr větru. Regulační sílu je možné vyvolat pomocí postranní desky, která je umístěna vedle rotoru svoji plochou proti větru. Tento způsob regulace má několik nevýhod, zejména účinnost vrtule při velkých rychlostech větru značně klesá a tím klesá i výkon celé elektrárny dále pak neschopnost samovolného startu. [6]

#### Výhody regulace „STALL“

- Jednoduchý princip konstrukce
- Menší počet pohyblivých částí
- Nenáročná údržba



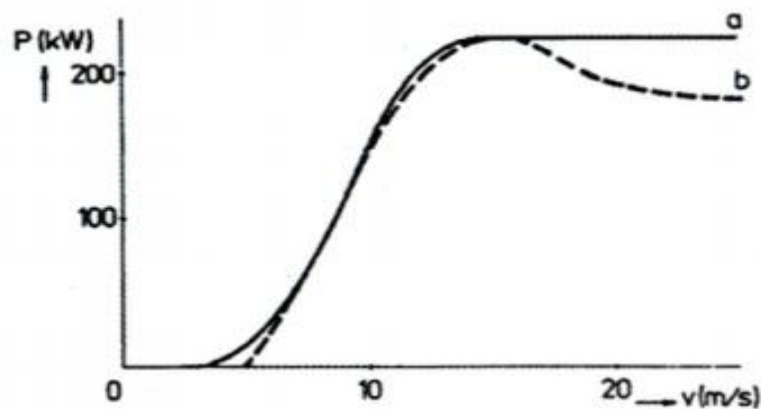
Obr. 1.8. Regulace STALL [6]

### 1.5.2 Regulace „PITCH“

Zajistit chod větrné elektrárny při neměnných či málo proměnných otáčkách v relativně širokém rozsahu rychlosti větru má za úkol regulace „pitch“ aniž by se výrazně měnila účinnost. Účel této regulace spočívá v tom, že při zastaveném rotoru tzv. „do praporu“ zajistí nastavování vrtulových listů náběžnou hranou proti směru větru tak, aby proudícímu větru kladly lopatky rotoru minimální odpor a nemohla tak vznikat síla, které by působila na rotor. Tento aktivní systém spolupracuje se vstupním signálem o výkonu generátoru a při provozu se tak mění úhel natočení listů. Oproti regulaci stall má tento systém více výhod, například to, že pro okamžité zastavení rotoru nepotřebuje silné brzdy, rotorové listy mají nižší hmotnost a hlavní výhodou této regulace je, že start turbíny je prováděn změnou nastavení úhlu náběhu. [7]

#### Výhody regulace „PITCH“

- jednoduchý start elektrárny změnou nastavení úhlu náběhu
- nižší hmotnost rotorových listů
- snižuje zatížení listů rotoru
- produkce energie je větší než u regulace „STALL“



Obr. 1.9. Výkonová charakteristika regulace PITCH (a) a STALL (b) [7]

### 1.5.3 Regulace „ACTIVE STALL“

Podobně jako u regulace „pitch“ je také u této regulace využito toho, že jsou listy rotoru přestavitelné. Ovšem na rozdíl od regulace „pitch“ dochází u této regulace k otočení listů do protilehlého směru při dosažení jmenovitého výkonu, přitom se úhel nastavení zvýší a zesílí se odtržení proudu a přebytečná energie větru je eliminována. Hlavní výhodou regulace „active stall“ spočívá v tom, že regulace výkonu probíhá lépe než u pasivní regulace stall. Z tohoto důvodu, nedochází k přetěžování generátoru při poryvech větru. Celou elektrárnu lze provozovat při vysokých rychlostech větru a to lze považovat za další výhodu oproti pasivní regulaci stall, jelikož tam vyšší odtržení proudu způsobí větší pokles výkonu. Tento druh regulace se používá u větrných elektráren velkých výkonů ( 1MW a více). [7]

## 1.6 Generátory větrných elektráren

V dnešních moderních větrných elektrárnách středních a velkých výkonů se obvykle pro výrobu elektrické energie využívá synchronních či asynchronních generátorů střídavého trojfázového proudu. Jejich základní vlastnosti se mění podle toho, zda elektrárna pracuje samostatně a dodává elektrickou energii spotřebičům v samostatných sítích nebo je připojena na rozvodnou elektrickou síť. Asynchronní motory s kotvou nakrátko nacházejí uplatnění zejména v elektrárnách středních výkonů, kde pracují v generátorickém režimu. Jejich výhodou je vysoká provozní spolehlivost, malé pořizovací náklady a také nenáročná údržba. Naproti tomu větrné elektrárny velkých výkonů jsou zpravidla osazovány generátory synchronními. Tyto generátory mají své přednosti v regulační schopnosti elektrických parametrů, jakými jsou napětí, činný a jalový výkon a frekvence.

### 1.6.1 Stejnosměrný generátor

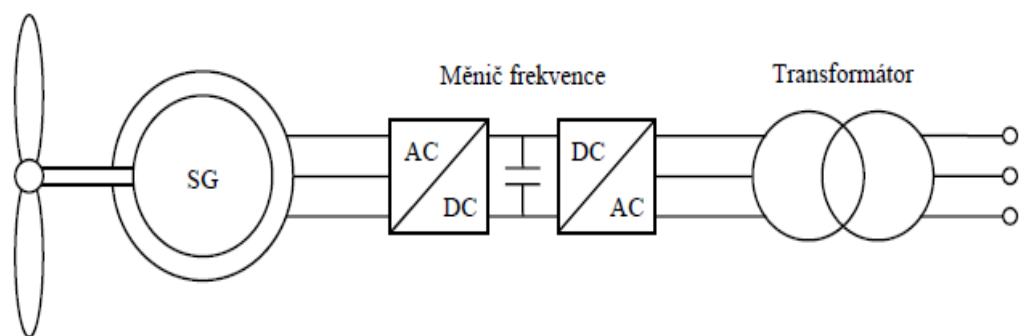
Používají se u malých větrných elektráren. Stejnosměrný generátor (dynamo) je elektrický točivý stroj, jehož funkcí je převádět energii mechanickou na energii elektrickou. Funkcí dynama je na svých výstupních svorkách udržovat stejnosměrné elektrické napětí. Indukované napětí na vodičích zajišťuje komutátor. Komutátor si lze představit jako soustavu dvou měděných lamel, které jsou od sebe navzájem izolovány. K těmto lamelám jsou připojeny vodiče. Po lamelách kloužou uhlíkové kartáče a z těchto kartáčů je sbíráno indukované napětí a je přiváděno na výstupní svorky. Konstrukce stejnosměrných generátorů je tvořena rotorem (pohyblivou částí) a statorem (pevnou částí), přičemž na pólech statoru je uloženo budící vinutí. Rotor obsahuje drážky, v nichž je uloženo vinutí kotvy. Vinutí si lze



představit jako soustavu jednotlivých závitů indukujících na svých vodičích indukované napětí. Při vhodném spojení všech vinutí lze dosáhnout toho, aby se jednotlivá napětí na jednotlivých závitech sčítala. Tyto generátory se vyrábějí jako dvoupólové, tudíž hodnota jejich otáček je 3000 ot/min. Výstupní napětí je 12 nebo 24 V. Stejnosemnné generátory dodávají stejnosměrný proud a tudíž mohou být spojeny s bateriemi. Vzhledem ke svému provedení se nehodí na nepřetržitý celoroční provoz z důvodu opotřebování uhlíkových kartáčů. Výhodou těchto generátorů je snadná dostupnost v různých velikostech, mezi nevýhody patří obrušování kartáčů. [5]

### 1.6.2 Synchronní generátor s proměnnými otáčkami

Jak již bylo zmíněno, tento generátor se používá nejvíce u elektráren velkých výkonů. Synchronní generátor (alternátor) se vyrábí v provedení jednofázovém či trojfázovém. Tento generátor s proměnnými otáčkami bývá často vybaven větším počtem pólových dvojic, a proto může být s větrnou turbínou spojen přímo a nepotřebuje převodovku. Absence převodovky má tu výhodu, že nedochází v elektrárně k vysokým otáčkám a náklady na údržbu jsou samozřejmě menší, než když je soustava převodovkou opatřena. V porovnání s asynchronními generátory jsou pořizovací náklady větší. Největší výhodou tohoto systému je regulace elektrických parametrů, tudíž i jalového výkonu a tento výkon lze řídit pomocí buďícího proudu. Další velkou výhodou tohoto typu je relativně velká účinnost a schopnost pracovat s velkým rozsahem větru. Tento typ generátoru může mít buzení pomocí permanentního magnetu nebo rotoru napájeným stejnosměrným proudem. U těchto systémů se nejčastěji využívá regulace „pitch“. Proměnné otáčky zajišťuje výkonový měnič, který upraví výstupní signál na požadované parametry. Největším nedostatkem daného systému je vysoká pořizovací cena a nutnost vysoce výkonového měniče. [3]

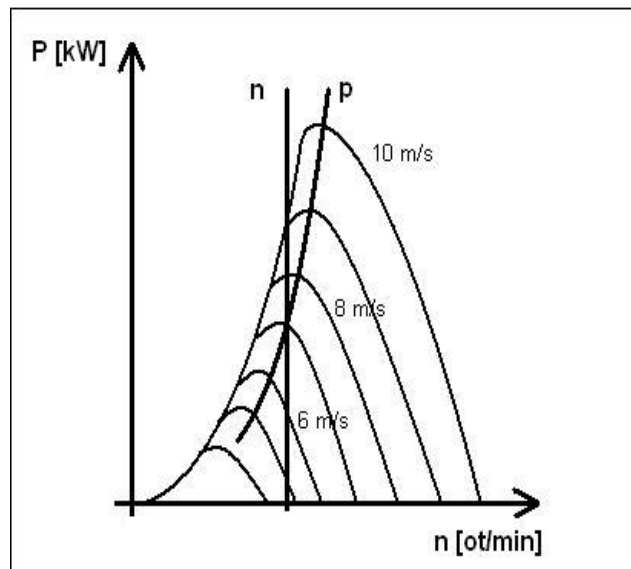


Obr.: 1.10. Synchronní generátor s proměnnými otáčkami [3]

### 1.6.2.1 Synchronní generátory připojené na síť

Synchronní generátor přímo připojený na elektrickou rozvodnou síť má rychlost otáčení konstantní, danou kmitočtem sítě a počtem pólu. Při kmitočtu 50 Hz jsou otáčky dvoupólového stroje 3000 ot/min, u čtyřpólového stroje 1500 ot/min a šestipólového 1000 ot/min. V dnešní podobě tyto generátory pracují tak, že pracují společně paralelně spojené do elektrické sítě. Pokud je jeden generátor připojen na elektrickou síť, předpokládá se, že výkon ostatních generátorů připojených na elektrickou síť je mnohem větší a pro náš generátor nemůže ovlivnit napětí a kmitočet sítě, jedná se o tzv. tvrdou síť.

Na Obr. 1. 11. je znázorněn průběh výkonu větrného motoru v určitém rozmezí otáček pro různé rychlosti větru. Na základě konstantního kmitočtu sítě je zřejmé, že i otáčky generátoru budou neměnné a provoz generátoru bude zajišťován v bodech, které leží na přímce „n“. Nastane-li situace, že se mění rychlost větru, mění se tím i výkon a hnací moment na hřídeli generátoru a tím i příkon  $P_p$ . Podle zákona o zachování energie se při zanedbání ztrát musí příkon  $P_p$  přeměnit na výstupní elektrický výkon  $P$ . [1]

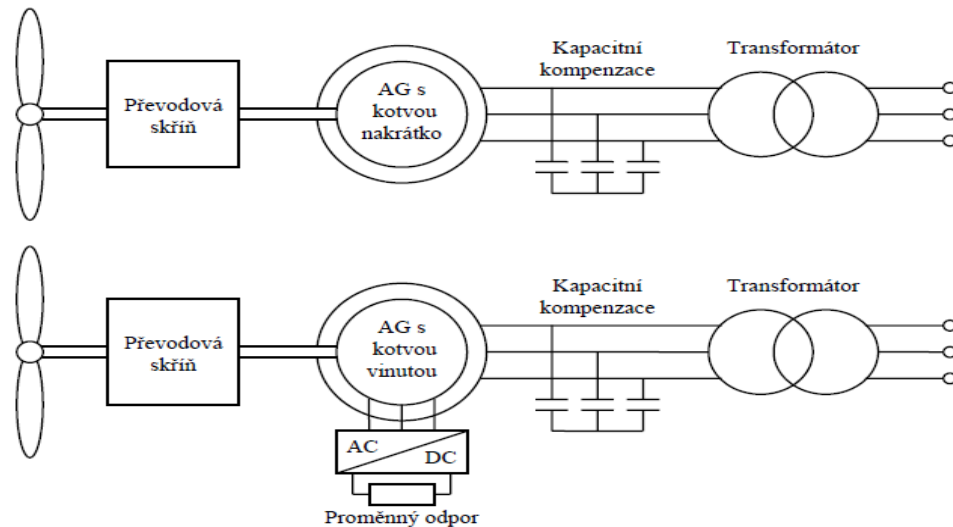


Obr. 1.11. Charakteristika pro různé rychlosti větru [1]

### 1.6.3 Asynchronní generátor s konstantními otáčkami

Všeobecné použití asynchronních strojů se uplatňuje v poháněcích motorech, avšak mohou pracovat jako generátory elektrické energie. Tyto stroje jsou velmi oblíbené pro svou jednoduchost, nízkou cenu a snadné připojení k elektrické rozvodné síti a s výhodou se využívají jako generátory větrných elektráren. Co se týče konstrukčního provedení těchto strojů, lze najít obdobu se synchronním strojem. Rotor asynchronního stroje, stejně jako

stator, je tvořen z magnetických vodivých plechů. Plechy rotoru jsou staženy do paketu a usazeny na hřídeli. V drážkách plechů je uloženo vinutí rotoru. V dříve postavených větrných elektrárnách lze nalézt asynchronní generátor s konstantními otáčkami.



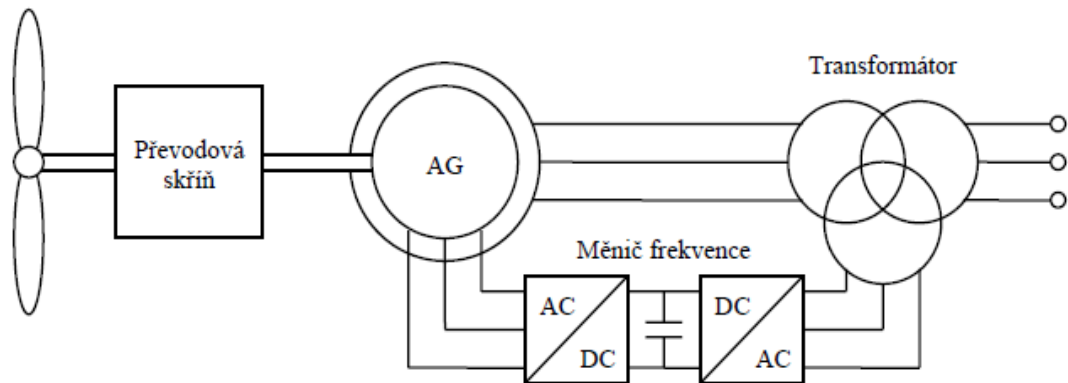
Obr. 1.12. Asynchronní generátor s konstantními otáčkami [3]

Tento generátor má obvykle dvě statorová vinutí a je přímo připojen k elektrické síti. Jak je patrné z Obr. 1.12 existují dva typy generátoru s konstantními otáčkami. Na prvním obrázku lze vidět zapojení s kotvou nakrátko a na druhé generátor s vinutým rotorem. Předností těchto generátorů je schopnost přepínat mezi dvěma statorovými vinutími a tím tak zefektivnit provoz větrné elektrárny. V režimu s menším počtem pólů využívá lépe vyšší rychlosti větru a v režimu s větším počtem pólů menší rychlosti větru. Nedostatkem tohoto systému je nutnost kompenzace jalového výkonu, který je pro asynchronní generátory typické. [3]

#### 1.6.4 Asynchronní generátor s proměnnými otáčkami

Asynchronního generátoru lze také využít pro systémy s proměnnými otáčkami, který je schopen udržovat konstantní mechanický moment právě díky možnosti změn otáček rotoru, jejichž velikost se pohybuje od -40 do + 30 % synchronního otáček. Jde o dvojité napájený asynchronní generátor, který má statorové vinutí spojené přímo k síti a jehož rotor je napájen přes měnič kmitočtu, tudíž do rotoru může zaváděn proud o správné frekvenci, amplitudě, sledu fází a fázovém posunu vzhledem k magnetickému toku statoru. Toto dvojité napájení je velmi výhodné, protože polovodičový měnič musí řídit pouze 20 až 30 % celkového výkonu stroje. Velkou výhodou tohoto systému je možnost regulace jalového výkonu zajišťovaná

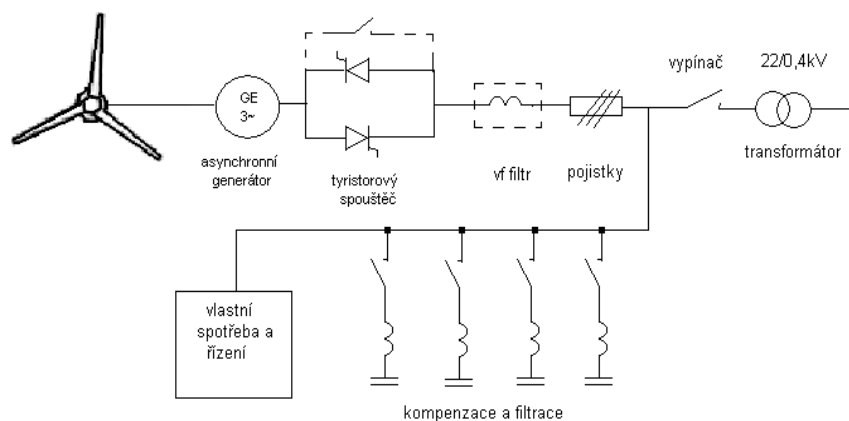
rotorovým proudem, a proto také jsou dvojité napájené asynchronní generátory dnes velmi používané. Nevýhodou je oproti jiným systémům použití sběracích kroužků a polovodičového měniče. [3]



Obr. 1.13. Dvojité napájený asynchronní generátor [3]

#### 1.6.4.1 Asynchronní generátory připojené na síť

Asynchronní generátory s kotvou nakrátko jsou nejčastěji používaným typem elektrického generátoru větrných elektráren připojených na rozvodnou síť. Napětí i kmitočet asynchronního generátoru jsou dány sítí, na kterou je připojen. Z ní také odebírá magnetizační proud a jemu odpovídající jalový výkon, čímž zhoršuje účinnost sítě. Je nutné kompenzovat účinnost pomocí paralelně připojených kondenzátorů (viz Obr. 1.14) rozdělené do několika stupňů. Jednotlivé stupně se spínají automaticky, aby účinnost sítě při změně zatížení neklesl pod 0,95.



Obr. 1.14. Jednopolové schéma silnoproudých obvodů VTE s asynchronním generátorem [3]

Jelikož po připnutí asynchronního generátoru k síti nastává elektromechanický přechodný děj, který je doprovázen nárůstem proudu a momentu, bývají tyto generátory vybaveny tyristorovým spouštěčem, který omezuje proudový náraz na hodnotu nižší než dvojnásobek jmenovitého proudu. Tento tyristorový spouštěč se také používá k omezení proudu při motorickém rozběhu při malé rychlosti větru. Po ukončení rozběhu se spouštěč přemostí kontaktním spínačem.

## 2 Optimální spolupráce větrné elektrárny s elektrizační sítí

Větrné elektrárny jsou charakterizovány jako obnovitelné zdroje s nestabilní dodávkou elektrické energie, což negativně působí na provoz elektrizační soustavy, proto je potřeba sledovat a vyhodnocovat toky výkonů z těchto obnovitelných zdrojů. Během dne se může několikrát změnit tok výkonu na vedení a tyto změny pak mají citelný vliv na systém chránění vedení. Z tohoto důvodu je nezbytné znát toky výkonů z jednotlivých větrných elektráren, ale i z celých větrných farem.

### 2.1 Vliv větrných elektráren na elektrizační soustavu

Přenos a distribuce elektrické energie jsou výjimečné tím, že je v celé síti nutné zachovávat neustálou rovnováhu mezi okamžitou výrobou a spotřebou. Důvod je zcela zřejmý, elektrickou energii nelze či velmi obtížně dlouhodobě skladovat. Jednou z možností skladování je převod na jinou formu energie, např. potencionální (přečerpávací vodní elektrárny), mechanickou (setrvačníky) nebo chemickou (palivové články). Ve srovnání s jinými dosud využívanými obnovitelnými zdroji pro výrobu elektrické energie, patří větrné elektrárny díky své proměnlivosti výroby k nejproblematictější. Důvodem je mnohdy rychle se měnící rychlost větru a proto není možné zajistit konstantní dodávku elektrické energie do místa vyvedení, tj. k odběratelům a větrné elektrárny mohou mít v případě chybné regulace výkonu, nepříznivý vliv na elektrizační soustavu. Nepravidelnost, nahodilost a špatná predikovatelnost síly a směru větru způsobují, že zařízení určená k využívání jeho energie jsou schopna pracovat pouze část roku (v našich podmínkách cca 10-20%). Nedokonalé využívání instalovaného výkonu vede k ekonomickým ztrátám v samotné výrobě, a jednak k problémům s regulací v elektrizační soustavě.

Negativní vlivy VTE na provoz soustavy jsou zcela neoddiskutovatelné a lze si tyto vlivy rozdělit na vlivy lokální (ovlivňují distribuční síť) a systémové (ovlivňují celou přenosovou soustavu).

## 2.2 VTE a regulace elektrizační soustavy

V České republice počet instalovaných větrných elektráren zatím nedosahuje takového počtu, aby výkyvy ve výrobě mohly vážnějším způsobem ovlivnit Českou přenosovou a distribuční soustavu. V současné době je výkon větrných elektráren využíván pouze k pokrytí ztrát provozu ES. Naproti tomu evropské státy např. Německo, Dánsko, Španělsko, kde mají větrné elektrárny na vnitrostátní výrobě elektrické energie velký podíl, může nastat situace, kdy případný výpadek či naopak přebytek většího výkonu elektrické energie z VTE vede k problémům s udržením spolehlivosti a kvality dodávky elektrické energie.

V rámci ENTSO-E (unie pro koordinace přenosu elektřiny), ve které jsou vnitrostátní sítě jednotlivých států navzájem provázané by mohla nastat situace, při které výkyvy v síti jedné země ovlivní síť sousedních států (tzv. přeshraniční toky). S nárůstem vyššího počtu instalovaných větrných elektráren v Evropě dochází k problémům v oblasti frekvenčně - výkonové regulaci. Tento fakt je v dnešní době velmi diskutován a hledají se možnosti zahrnutí VTE do regulačních procesů elektrizační soustavy.

Při krátkodobých výpadech v síti VVN a VN může nastat současné odpojení mnoha VTE najednou. Nejproblematictější je např. náhlé odpojení a připojení velké větrné farmy o výkonu několik desítek MW. V zájmu kvality dodávky elektrické energie musí elektrizační soustava počítat s případným výpadkem celého komplexu a je nutné zajistit, dostatečné množství regulačního a záložního výkonu. V rámci ENTSO-E musí členové udržovat výkonovou rezervu, která by pokryla výpadek největšího bloku výrobního státu. Například v České republice je největším samostatným blokem 1000MW blok v jaderné elektrárně Temelín a v současné době je v České republice výkon z VTE přibližně 280 MW, výpadek tohoto výkonu, tedy nemůže ovlivnit stabilitu sítě ČR ani okolních států.

V Německu se po odpojení jaderných elektráren zvýšil počet instalovaných větrných elektráren, u kterých výkon již dosahuje hodnot primární výkonové rezervy. Ze současného stavu věci VTE jednoznačně navyšují požadavky na výkonové zálohy, což má ekonomický dopad na samotnou výrobu a přenos elektřiny.

## 2.2.1 Požadavky na chování VTE v elektrizační soustavě

Provoz elektrických sítí podléhá jistým pravidlům, která jsou dána tzv. kodexem sítí. Tyto kodexy jsou stále více rozšiřovány a to zejména kvůli požadavkům na provoz větrných elektráren v elektrizační soustavě.

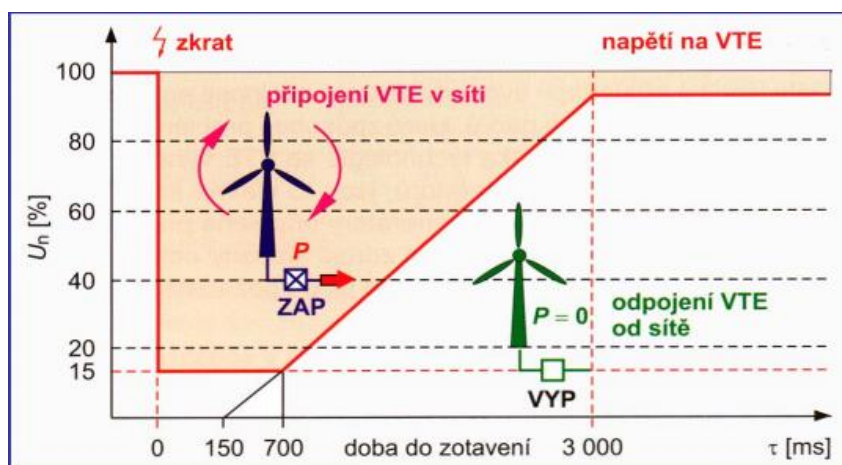
Základní požadavky jsou:

- Chování větrných elektráren při zkratech
- Chování větrných elektráren při změnách frekvence
- Chování větrných elektráren při změně účinníku

### 2.2.1.1 Požadavky na chování větrných elektráren při zkratech a poruchách PS

Požadavky na chování VTE při zkratech jsou následující:

- co nejrychlejší odpojení v případě zkratu, při připojování VTE do sítí VN (cílem je omezit zkratové poměry a tím zabránit poškození zařízení)
- okamžité odpojování - není vhodné v případech většího počtu VTE v sítí 110 kV a v přenosové síti z důvodu velkého odpadlého výkonu
- VTE, které jsou připojované do přenosové sítě - kladen požadavek proti odpojení při vzdálených zkratech
- při poklesu napětí v místě VTE po zkratu poklesne do 15%  $U_n$  a po cca 0,7s se začne zotavovat, nesmí být další VTE odpojeny, viz Obr. 1.15. [9]

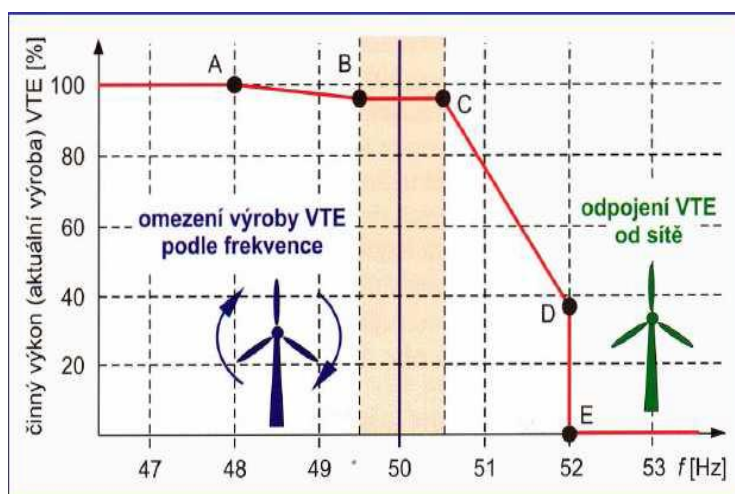


Obr. 1.15. Chování VTE při zkratech a poruchách PS [9]



### 2.2.1.2 Požadavky na chování větrných elektráren při změnách frekvence

Při kolísající frekvenci je velmi důležité, aby větrné elektrárny zůstaly při změně frekvence v síti připojeny do soustavy a pomáhali udržovat bilanci výkonů. U frekvence nižší než 49,5 Hz je požadavek na zachování zapojení větrných elektráren do sítě při maximální okamžité výrobě. U frekvencí v rozsahu 49,5 – 50,5 Hz se změna výroby nepředpokládá. Jak je patrné z Obr. 1.16. při frekvenci převyšující 52 Hz se požaduje okamžité odpojení VTE od sítě. [9]



Obr. 1.16. Připojení a odpojení VTE při změnách frekvence [9]

### 2.3 Podmínky pro připojení VTE

Podmínky připojení VTE uvedené v této kapitole vychází z dokumentu Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy. Připojení větrných elektráren jako zdroje elektrické energie do elektrizační soustavy má své podmínky a požadavky. Tyto podmínky jsou uvedeny v tzv. kodexu PS (přenosové soustavy), což je soubor norem a technických opatření a za jeho platnost a aktuálnost zodpovídá ČEPS a.s. Do přenosové soustavy na odpovídající napěťovou hladinu se připojují velké větrné farmy, které svým výkonem dosahují desítek až stovek MW. Menší zdroje elektrické energie, například jednotlivé větrné elektrárny o výkonu jednotek až desítek MW se připojují do DS (distribuční soustavy).

### 2.3.1 Připojení VTE k síti

Větrné elektrárny se začleňují mezi výrobní elektrické energie, u kterých se musí při připojování do distribuční sítě dbát zvýšené pozornosti z důvodů zpětných vlivů na síť. Výrobní, které mají být provozovány paralelně se sítí, je zapotřebí připojit k síti ve vhodném předávacím místě. Aby bylo zaručeno, že výrobní bude provozována bez rušivých účinků a neohrozí napájení dalších odběratelů, zvolí provozovatel distribuční soustavy s přihlédnutím k daným síťovým poměrům, výkonu a způsobu provozu vlastní výrobní způsob a místo připojení na síť.

Do sítě VN se převážně připojují zdroje jednotlivé, naopak do sítě 110kV se připojují větrné farmy, jejichž výkon se pohybuje řádově kolem desítek MW. Do přenosové sítě se připojují větrné farmy, které mají výkon řádově stovky MW. [10]

### 2.3.2 Ochrany

Jako ochrana vlastního zařízení a zařízení odběratelů je zapotřebí využívat ochrany s určitým nastavením, které při definovaných odchylkách napětí a frekvence vybaví spínací zařízení, aby nedošlo k poškození vlastního zařízení či zařízení odběratelů. Pro ochranu vlastní výrobní se vztahuje ochrana zkratová, ochrana proti přetížení a další ochrany např. podpět'ová, přepět'ová, podfrekvenční a nadfrekvenční. Ochrana podpět'ová a napět'ová musí být trojfázová na rozdíl od podfrekvenční a nadfrekvenční, která může být provedena jako jednofázová.

Funkce	Rozsah nastavení	Příklad nastavení	
		rozsah	zpoždění
Podpětí 1.stupeň $U <$	$0.70 U_n$ až $1.0 U_n$	$90 \% U_n$	0,5 s
Přepětí 1.stupeň $U >$	$1.0 U_n$ až $1.2 U_n$	$110 \% U_n$	0,5 s
Podfrekvence 1.stupeň $f <$	48 Hz až 50 Hz	49,8 Hz	0,5 s
Nadfrekvence $f >$	50 Hz až 52 Hz	50,2 Hz	0,5 s

Tab. 1.1. Nastavení příslušných stupňů ochran [10]

### 2.3.3 Řízení jalového výkonu

Větrné elektrárny ve většině případů využívají asynchronní stroje, které pro svou činnost vyžadují jalový výkon, který v síti komplikuje přenos a výrobu a proto se provádí kompenzace účinníku za pomoci zdroje jaloviny přímo u výroby. Řízení jalového výkonu je určeno PDS (provozovateli lokálních distribučních sítí), přičemž zdroje připojované do sítě nn musí držet tolerance jmenovitého napětí a požadavek na účinník zdroje, který musí být mezi 0,95 kapacitní a 0,95 induktivní a činná složka výkonu je nad 3% jmenovitého proudu předávacího místa. Zdroje připojované do sítě vn, které dodávají do sítě činný výkon P v předávacím místě, musí být opatřeny režimem řízení jalového výkonu:

- udržování zadaného účinníku  $\cos\varphi$
- udržování hodnoty účinníku  $\cos\varphi = f(P)$
- udržování zadané hodnoty jalového výkonu (odběr/dodávka) v rámci provozního diagramu stroje
- udržování napětí v předávacím místě (na výstupu generátoru, za blokovým transformátorem nebo pilotním uzlu DS) [8]

### 2.3.4 Zvýšení napětí

Připojené výroby zapříčiňují svým provozem zvýšení napětí, které nesmí v nejnepříznivějším případě (přípojném bodu) ve srovnání s napětím bez jejich připojení přesáhnout následující hodnoty:

- 2% pro výroby s přípojným místem v síti vn a 110kV
- 3% pro výroby s přípojným místem v síti nn

Pokud je v síti nn a nebo vn pouze jedno přípojně místo, lze tuto podmínku vyjádřit pomocí zkratového poměru výkonů

$$k_{k1} = \frac{S_{kv}}{\sum S_{amax}} \quad (1.1)$$

kde  $S_{kv}$  je zkratový výkon v přípojném bodu a  $\sum S_{amax}$  je součet maximálních zdánlivých výkonů všech připojených / plánovaných výroben.

Ke zjištění  $S_{amax}$  je potřeba vycházet z maximálních zdánlivých výkonů jednotlivého zařízení  $S_{E_{max}}$

$$S_{e\max} = S_{e\max10\min} = S_{ng} \cdot P_{1\min} = \frac{P_{ng}}{\lambda} \cdot P_{10\min} \quad (1.2)$$

kde:

$S_{ng}$  – jmenovitý zdánlivý výkon jednoho zařízení

$P_{ng}$  – jmenovitý činný výkon jednoho zařízení

$\lambda$  – celkový účinník daného zařízení

$P_{10\min}$  – maximální střední výkon v intervalu 10 min.

Podmínka pro zvýšení napětí v jediném předávacím místě bude dodržena pokaždé, když zkratový poměr výkonů  $kk_1$  bude:

1) Pro výroby s předávacím místem v síti vn

- větší, nebo rovno 50ti násobku součtu maximálních zdánlivých výkonů připojených zdrojů

2) Pro výroby s předávacím místem v síti nn

- větší, nebo rovno 33 násobku součtu maximálních zdánlivých výkonů připojených zdrojů

### 2.3.5 Změna napětí při spínání

Připojování a odpojování jednotlivých generátorů nebo zařízení, způsobuje změny napětí v přípojném bodu. Tyto změny nevyvolávají zpětné vlivy v případě, že největší změna napětí nepřesáhne tyto meze:

- pro výroby s předávacím místem v síti nn 3%
- pro výroby s předávacím místem v síti vn 2%

Tyto hodnoty jsou platné pouze tehdy, je-li splněna podmínka, že spínání není častější než jednou za 1,5 minuty.

Při četnosti spínání, například jednou denně, může provozovatel distribuční soustavy (PDS) připustit větší změny napětí, pokud to dovolí poměry v síti.

Pro výroby v síti 110kV platí omezené změny napětí vyvolané spínáním:

a) Normální provoz

- Spínání jednoho generátoru větrné turbíny:  $\Delta u_{\max} \leq 0,5\%$
- Spínání celého zařízení (např. větrného parku):  $\Delta u_{\max} \leq 0,2\%$

## b) Poruchový provoz

- Pro změnu napětí při spínání celého zařízení platí:  $\Delta u_{\max} \leq 0,5\%$

V síti PDS lze na základě zkratového výkonu a jmenovitého zdánlivého výkonu  $S_{nE}$  odhadnout změnu napětí

$$\Delta u_{\max} = k_{i\max} \cdot \frac{S_{ne}}{S_{kv}} \quad (1.3)$$

kde:

$S_{kv}$  – jmenovitý zkratový výkon v síti PDS

$K_{i\max}$  – činitel, označován jako „největší spínací ráz“

$S_{nE}$  – jmenovitý zdánlivý výkon

Činitel  $K_{i\max}$  udává poměr největšího proudu, který se vyskytuje v průběhu spínacího pochodu (např. zapínací ráz  $I_a$ ) ke jmenovitému proudu generátoru nebo zařízení.

$$k_{i\max} = \frac{I_a}{I_{ng}} \quad (1.4)$$

### 2.3.6 Připojování synchronních a asynchronních generátorů

Podmínky pro synchronizaci **synchronních generátorů**:

- rozdíl frekvence  $\Delta f < \pm 0,5\text{Hz}$
- rozdíl napětí  $\Delta U < \pm 10\% U_n$
- rozdíl fáze  $< \pm 10^\circ$

K dodržení těchto stanovených podmínek je nutné synchronizační zařízení.

**Asynchronní generátory** rozbíhané pohonem musí být připojeny bez napětí při otáčkách v mezích 95% až 105% synchronních otáček. Asynchronní generátory, které jsou schopny ostrovního provozu, kde jsou spínány pod napětím, je nezbytné dodržet podmínky spínání jako u synchronních generátorů. [10]

## 2.4 Zpětné vlivy na napájecí síť - lokální vlivy

Distribuční část elektrizační soustavy je zatížena negativními vlivy, mezi které patří zejména tyto:

- Přetěžování sítě
- Kolísání napětí
- Zvýšení zkratových poměrů
- Kvalita dodávky

Další častý zdroj rušení v elektrické síti je spojen se vznikem flikru, vyšších harmonických nebo útlumem signálu HDO (hromadné dálkové ovládání) z důvodu toho, že VTE jsou opatřeny regulací založenou na výkonové elektronice. Lokální vlivy lze omezit na přijatelnou hodnotu vhodným způsobem připojení či technologií, ale nelze jim zcela zabránit.

### Přetěžování sítě

Může nastat v situaci, kdy je zvýšená dodávka elektrické energie za mimořádných větrných podmínek. Aby nedocházelo k této skutečnosti, musí být VTE připojena do vhodně zvoleného přípojného místa. Pokud síť nebude dostatečně dimenzována, může dojít k poškození jednotlivých provozních prostředků v důsledku např. vznik nadměrného oteplení atd.

### Kolísání napětí

Flikrem rozumíme rychlé změny světelného toku, na které je lidské oko velmi citlivé a musí se tedy udržovat ve velmi úzkých mezích. Jedním ze zdrojů, které způsobují kolísání napětí (flikr) jsou větrné elektrárny. Na základě dvou hlavních příčin může dojít ke vzniku flikru.

- Vliv poryvů větru
- Vliv tubusu VTE

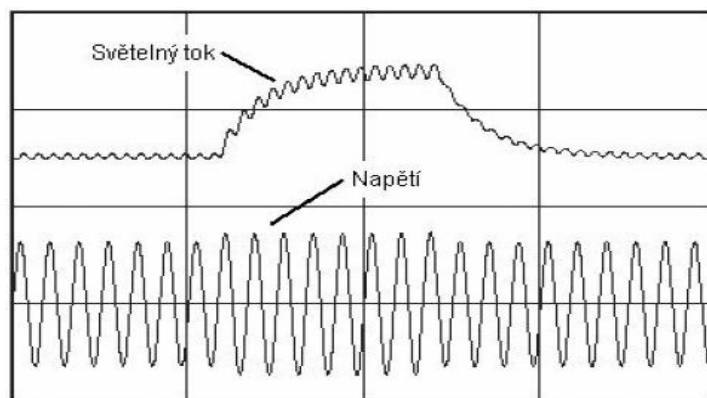
Četnost n	$\Delta U/U_N$ [%]
$n \leq 4$ za den	3
$n \leq 2$ za hodinu a $> 4$ za den	3
$2 < n \leq 10$ za hodinu	2.5

Tab. 1.2. Rychlé změny napětí v závislosti na četnosti výskytu [10]

Slabší poryvy větru jsou potlačovány setrvačností rotačních částí. U silnějších poryvů je kolísání napětí potlačováno výkonovým řízením turbíny. Ve chvíli vzájemného překrývání věže VTE s listem rotoru, dochází k tomu, že VTE přichází o část výkonu. V tento okamžik nastane periodicky se opakující kolísání síťového napětí tzv. flikru. U světelných zdrojů způsobuje změnu světelného toku – blikání. Používaným parametrem pro určování flikru je veličina nazývaná míra vjemu flikru, nebo také nazývaná jako emise flikru. Na velikost míry vjemu flikru mají vliv následující parametry: velikost, frekvence a délka poklesů.

Pro posouzení jedné větrné elektrárny či větrné farmy v jednom předávacím místě je zapotřebí se zřetelem na kolísání napětí vyvolávajících flikr dodržet ve společném napájecím bodě tyto mezní hodnoty:

- $P_h \leq 0,46$  u výroben připojených do sítě NN
- $P_h \leq 0,37$  u výroben připojených do sítě VN



Obr. 1.17. Změna světelného toku způsobená dočasnou změnou napětí [10]

Z Obr. 1.17 je patrné, že i malá změna napětí vyvolá zřetelný vliv na světelný tok.

### Zvyšování zkratových poměrů

Se změnou zkratových poměrů je nutné počítat při připojení VTE do sítě, protože VTE se chová jako kterákoliv jiná elektrárna, která je vyvedená do jednoho bodu sítě. Vzhledem k tomuto důvodu je nutné přezkontrolovat dimenzování prvků sítě s ohledem na velikost zkratového výkonu.

### Vyšší harmonické

Zdroji vyšších harmonických jsou tzv. nelineární spotřebiče. To jsou spotřebiče, které odebírají při sinusovém napájecím napětí nesinusový proud. Harmonické vznikají především u zařízení se střídači nebo měniči frekvence. Jak již bylo uvedeno, VTE jsou opatřeny regulací založenou na výkonové elektronice, tudíž vyšší harmonické v elektrizační síti vznikají díky frekvenčním měničům, které dodávají od generátoru proud do obvodu. Za normálních provozních podmínek musí být během libovolného týdenního období 95% středních efektivních hodnot každého harmonického napětí  $u_h$  a celkového harmonického zkreslení THD (Total Harmonic Distortions) v měřicích intervalech 10 minut menší nebo rovny podle Tab. 1.3.

Sít'	Max. amplituda harmonické $u_h$ [% $U_n$ ]	Max. THD
110 kV	2,0	$\leq 2,5$
220 kV	1,5	$\leq 2,0$
400 kV	1,0	$\leq 1,5$

Tab. 1.3. Povolený obsah vyšších harmonických [10]

### Ovlivnění zařízení HDO

K provozování signálu hromadného dálkového ovládání (dále jen HDO) se používají frekvence v intervalu mezi 183,3 až 283,3 Hz. Hromadné dálkové ovládání (HDO) je systém umožňující vysílat signály za účelem zapínání nebo vypínání spotřebičů či tarifů. Zařízení HDO mohou negativně ovlivňovat především výrobní a zařízení s kompenzací účinníku. V těchto případech je posuzován vliv výrobní na vysílače HDO a PDS poskytne informaci o jeho zatížení. Při hodnotách blízkých maximálnímu zatížení je nutné provést opatření.

Pro frekvence 183,3 – 283,3 Hz platí následující minimální úrovně HDO:

- $u_n$  150%  $U_f$
- $v_n$  190%  $U_f$
- 110 kV 200%  $U_f$

kde  $U_f$  je náběhové napětí (v rozmezí 0,8 – 0,9 %  $U_n$ )



## 2.5 Systémové vlivy

Systémové vlivy větrných elektráren se v elektrizační soustavě projevují při větším výskytu větrných elektráren v síti a zahrnují především dopad na stabilitu elektrizační soustavy, ohrožení spolehlivosti dodávky elektrické energie, začlenění VTE do pokrývání diagramu zatížení a chování VTE při blízkých zkratech a poruchách přenosové soustavy. Za systémové vlivy lze označit takové vlivy, které se projevují negativními vlivy na provoz přenosových soustav. Může docházet ke snížení přenosové schopnosti vedení na mezinárodních profilech. V tomto ohledu se v elektrizační soustavě České republiky v současné době projevuje především vliv větrných elektráren instalovaných v severní oblasti Německé republiky. Jak již bylo zmíněno, predikování výroby elektrické energie z větrných elektráren je velice složité vlivem proměnlivosti rychlosti a směru větru, to má za následek rychlé změny energetických toků. Proto zvyšování výkonu VTE vyžaduje zvyšování regulačního výkonu celé soustavy.

## 2.6 Systémové služby

Systémové služby jsou nutné pro bezpečný provoz elektrizační soustavy a kvalitní a spolehlivou dodávku elektrické energie. Slouží pro udržování systémových standardů a jsou důležité i na úrovni mezinárodních závazků a podmínek propojení elektrizační soustavy České republiky. Poplatky za systémové služby jsou hrazeny jako součást ceny za elektřinu všemi spotřebiteli těchto služeb. Výši poplatků každý rok stanovuje Energetický regulační úřad (ERÚ). Systémové služby jsou realizovány provozovatelem přenosové sítě v ČR - Česká přenosová soustava (ČEPS a.s.).

Na úrovni přenosové soustavy (PS) jsou v Kodexu PS definovány následující základní systémové služby:

- **Udržování výkonové rovnováhy v reálném čase** (terciární regulace výkonu atd.)
- **Udržování kvality elektřiny** (sekundární regulace f a P, sekundární regulace napětí atd.)
- **Obnovení provozu** (využívá se startu ze tmy)
- **Dispečerské řízení** (řízení propustnosti sítě – toků činných výkonů)

### 2.6.1 Regulace U a Q

Napětí a jalový výkon jsou společně z hlediska provozu elektrizační soustavy silně spřaženy. Změnou dodávky jalového výkonu do uzlu soustavy se dosáhne změny napětí v tomto uzlu a uzlech elektricky blízkých. Tato změna napětí závisí nejen na velikosti změny dodávky jalového výkonu, ale také na aktuálním zapojení daného uzlu. Regulace těchto veličin spadá do poskytovaných služeb podpory a systému a její kvalita je průběžně sledována a vyhodnocována. Napětí a jalový výkon patří mezi lokálně regulovatelné veličiny na rozdíl od frekvence.

Strategie pilotních uzlů je nedílnou součástí přenosové soustavy České republiky. Jako akční prvky pro regulaci zde slouží injekce jalových výkonů do uzlů se správným citlivostním poměrem ve vztahu k pilotnímu uzlu. Zdroj jalových výkonů poskytují synchronní generátory, regulační transformátory a kompenzační zařízení.

Regulace U a Q se dělí na primární (v rámci jednoho bloku výroby, např. teplárny, elektrárny, atd.), sekundární (v rámci jednoho uzlu soustavy) a terciární (v rámci celé regulované soustavy).

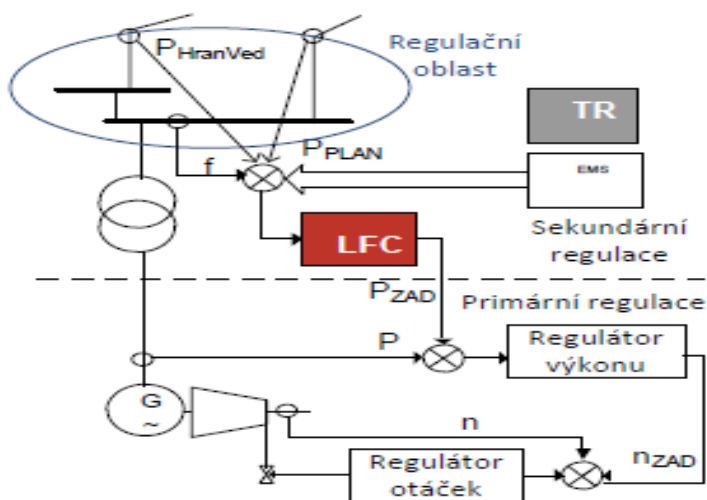
Mezi hlavní přínosy regulace U a Q patří:

- zvýšení bezpečnosti a hospodárnosti provozu
- zvýšení kvality dodávky elektřiny konečnému odběrateli
- snížení počtu regulačních odboček na transformátorech
- eliminace negativního zpětného působení OZE na regulovanou soustavu [11]

### 2.6.2 Regulace f a P

Jak je patrné z Obr. 1.18, regulace frekvence a činného výkonu má hierarchický charakter. Na úrovni elektrárenského bloku je realizována primární regulace a na ní navazuje sekundární regulace frekvence a činného výkonu. Na principu solidarity funguje primární regulace frekvence, tzn., že v prvních okamžicích se na pokrývání výkonové rovnováhy podílejí všechny zdroje zapojené do elektrizační soustavy pracující v režimu primární regulace.

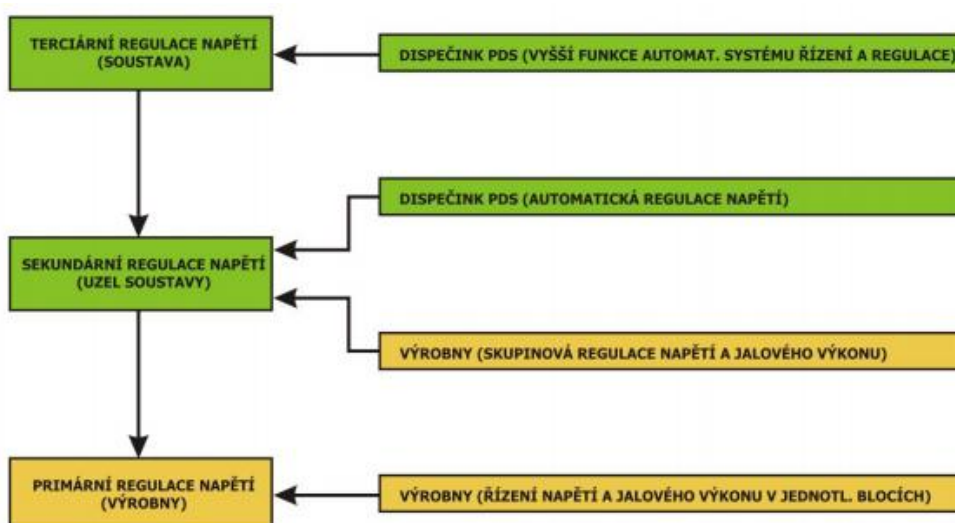
Sekundární regulace frekvence a činného výkonu je realizována automaticky sekundárním regulátorem frekvence a předávaných výkonů. [11]



Obr. 1.18. Hierarchický charakter regulace  $f$  a  $P$  [11]

### 2.6.3 Primární regulace (PRN)

Tato regulace je základní regulační úlohou, jejímž úkolem je udržovat zadané svorkové napětí generátoru pomocí změny buzení stroje. Na rychlé změny zátěže reaguje v časovém intervalu 1 až 2 sekund. Díky jejímu lokálnímu působení má vliv na stabilitu celého systému prostřednictvím nastavených mezí daných maximálním proudem statoru, rotoru nebo mezí podbuzení. Tyto limitní hodnoty jsou omezení vyplývající z provozního diagramu generátoru, u něhož v přebuzeném stavu fungují jako hranice, za kterou již není možno poměr vyráběného jalového a činného výkonu dále posunout. [11]



Obr. 1.19. Blokové schéma regulace ES ČR [12]

## 2.6.4 Sekundární regulace

Principem této regulace je koordinace prvků regulace v daném místě na základě požadavků kladených terciární regulací, jejíž je podmnožinou. V určitých uzlech ES udržuje předepsanou hodnotu napětí a přiřazuje produkovaný jalový výkon jednotlivým strojům. Doba sekundární regulace je udržována pod hodnotou 120 sekund. Tato regulace je základní regulační úlohou, jejímž úkolem je udržovat zadané svorkové napětí generátoru pomocí změny buzení stroje. Na rychlé změny zátěže reaguje v časovém intervalu [11]

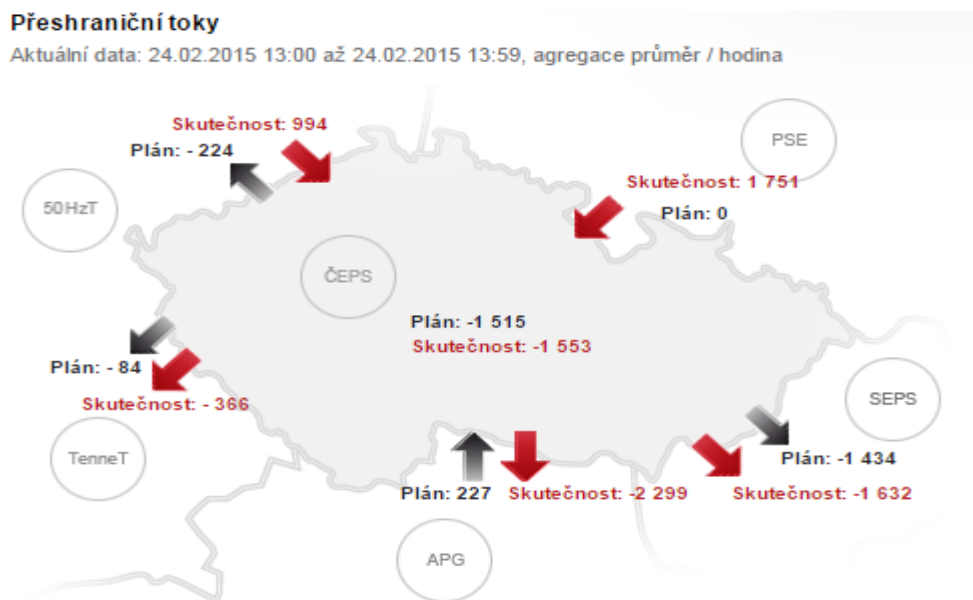
## 2.6.5 Terciární regulace (TRN)

Ve své podstatě se jedná o centralizovanou službu, která má za cíl koordinovat toky jalových výkonů a velikost napětí pro ekonomický a bezpečný provoz elektrizační soustavy. Aby tento požadavek mohl být splněn, je zapotřebí zachování točivé rezervy jalového výkonu, který postačí pro aktuální provozní stav, ale i pro zachování stability systému v případě neočekávaných změn. Pod touto změnou si lze představit např. výpadek velkého elektrárenského bloku či prudký nárůst zatížení. Terciární regulace zajišťuje udržení optimálního provozu za pomoci určení daných hodnot napětí pro ARN (automatické regulátory napětí) v místech pilotních uzlů. [11]

## 2.7 Energetické toky v elektrizační soustavě a provozní charakteristiky

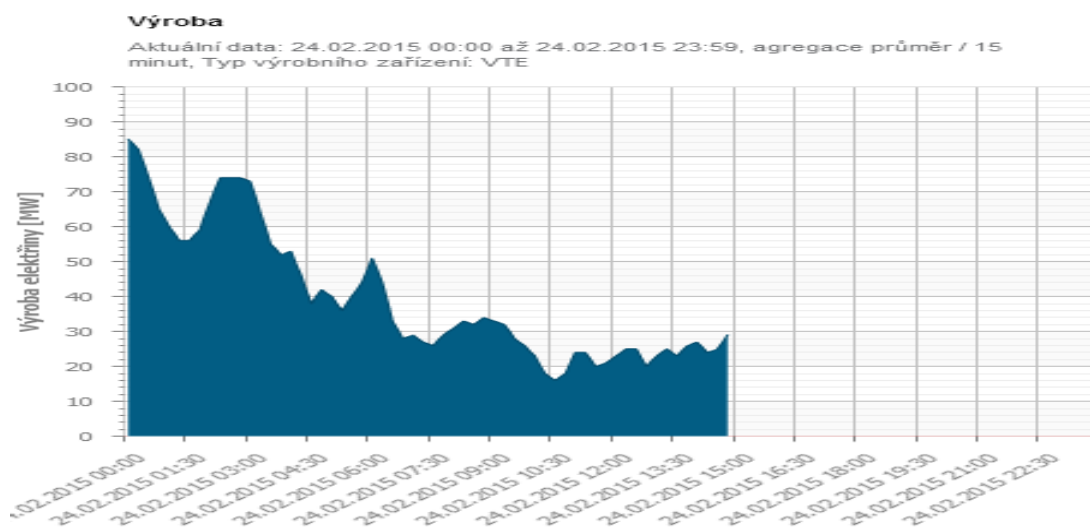
Energetické toky v elektrizační soustavě jsou nedílnou součástí dnešní moderní energetiky. Propojení elektrických soustav v rámci ENTSO-E má své nesmírné výhody. Mezi některé výhody lze zařadit např. poskytování vzájemné pomoci v případě nouze, napěťovou stabilitu, zvýšení spolehlivosti apod. Mezi jednotlivými elektrizačními soustavami dochází k výměně elektrické energie. Soustavy mohou spolupracovat s přímým propojením, nebo jsou řídicí systémy odděleny a dochází jen ke sjednané výměně na požadované výkonové hladině bez vzájemné koordinace. Toto je jedna z částí, které má vliv na velikost energetických toků. Další z nich tvoří kruhové toky, které vznikají vlivem primární regulace jednotlivých propojených soustav. Paralelní toky, ke kterým dochází vlivem propojení, a které přes danou soustavu probíhají následkem sjednaných výměn mezi jinými soustavami.

Větrné elektrárny svým provozem ovlivňují jak danou soustavu, do nichž jsou připojeny, ale také soustavy sousední. Pokud nastane situace, že větrné elektrárny vyrábějí značné množství elektrické energie, a pro elektřinu není dobyt, pak energetické toky mohou okolním soustavám způsobovat velké problémy, z důvodu zatěžováním tranzitními výkony.



Obr. 1.20. Přeshraniční toky ze dne 24. 2. 2015 [13]

Co se týče samotné výroby elektrické energie z větrných elektráren, lze si hodnotu vyráběné elektrické energie ukázat na Obr. 1.21.

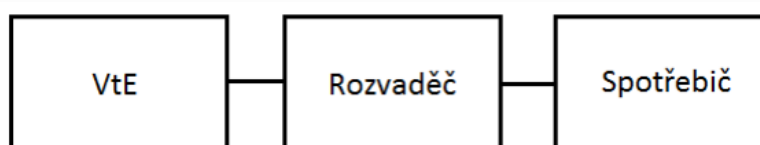


Obr. 1.21. Výroba elektrické energie z VTE v čase [13]

## 2.8 Ostrovní provoz – grid-off systém

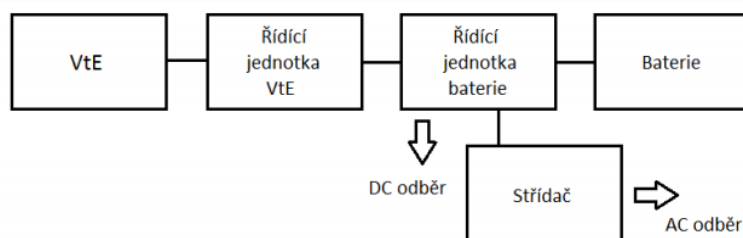
Ostrovní systémy, které nejsou propojeny s distribuční elektrickou sítí, jsou označovány jako systémy grid-off. Svoje uplatnění nalézají své uplatnění především tam, kde není možnost připojení k elektrické síti (chaty, chalupy, atd.).

**Systém bez možnosti akumulace** se nachází všude tam, kde není omezení množstvím vyrobené energie. Vyrobená energie je hned účelně spotřebována a přeměňována na jinou formu energie. Pokud je větrná elektrárna mírně předimenzována, dá se očekávat spolehlivý provoz celého systému. Mezi výhody tohoto systému je menší pořizovací cena a vysoká spolehlivost a jednoduchost. Hlavní nevýhodou je nefunkčnost systému při bezvětří, ale u tohoto typu systému je to logické.



Obr. 1.22. Blokové schéma grid-off systému bez akumulace

**Systém s možností akumulace** se vyznačuje tím, že ve svém obvodu již má zařazeny baterie na akumulaci elektrické energie. Tento systém se s úspěchem používá tam, kde nevádí případný výpadek elektrické energie. Výhodou tohoto systému je to, že je systém imunní vůči krátkodobým stavům bezvětří, ovšem je třeba počítat s tím, že kapacita baterií je omezena, a při delším výpadku může dojít ke stavu, kdy např. chata či chalupa bude bez elektrické energie. Proto je velice důležité dbát na správné nadimenzování větrné elektrárny a baterií, vzhledem k odběru. To spočívá i v precizní přípravě při plánování výstavby, kde je žádoucí znát průměrné rychlosti a četnosti větru v dané lokalitě a v neposlední řadě znát velikost o připojené zátěži. V praxi se této koncepci využívá především pro malé výkony, desítky až stovky wattů (např. meteorologické stanice na vrcholcích hor apod.). Tento systém je možné vidět nejčastěji v chatových oblastech, či v rodinných domech, kde systém plní účel pro pokrytí spotřeby elektrické energie na svícení nebo napájení drobných spotřebičů.

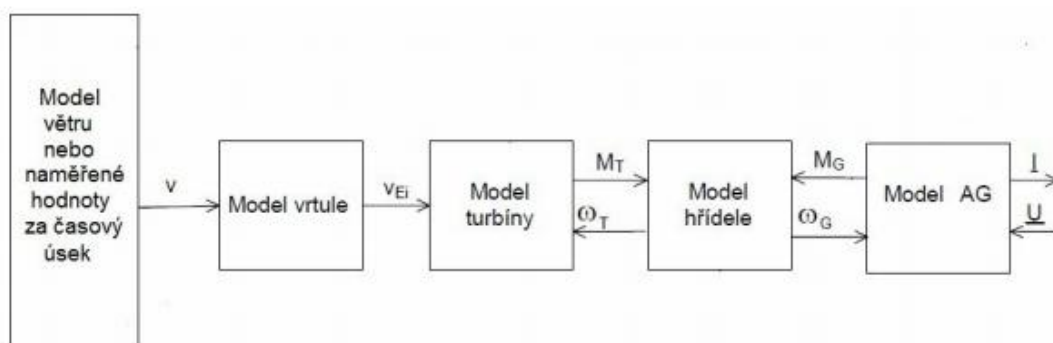


Obr. 1.23. Blokové schéma grid-off systému s akumulací

### 3 Návrh modelu větrné elektrárny

V poslední době se stále zvyšuje potřeba matematického modelování a simulace větrných elektráren včetně vlivu, které tyto zdroje mají na elektrizační soustavu. Modely a následně jejich simulace jsou využívány k analýze připojitelnosti a říditelnosti větrných elektráren. Na základě získaných výsledků jsou následně vybrány nejlepší možné varianty.

V této kapitole bude navržen model větrné elektrárny, který bude vycházet z knihovny softwarového programu Simulink a model bude upraven na parametry České přenosové soustavy. Na upraveném modelu budou následně simulovány dva stavy zapojení, jednou ze simulací je stav bez akumulčního prvku a druhý simulovaný stav je model s akumulčním prvkem. Na Obr. 1.24. je znázorněno schéma modelu větrné elektrárny s asynchronním generátorem a jednotlivé bloky modelu jsou detailně rozebrány v následujících kapitolách.



Obr. 1.24. Schéma modelu větrné elektrárny s asynchronním generátorem [14]

#### 3.1 Matematické modelování

Matematický model systému představuje vztahy mezi veličinami, které daný systém popisují, nejčastěji užitím diferenciálních rovnic, nelineárních rovnic a lineárních rovnic a jejich soustav. Ve své podstatě se jedná o univerzální nástroj pro analýzu systémů, čehož se ve velké míře využívá v technických oblastech včetně větrných elektráren. Pomocí modelu lze provést simulaci uvažovaného systému, protože každý model je abstrakcí své reálné předlohy, přičemž dochází k zanedbání některých fyzikálních jevů.

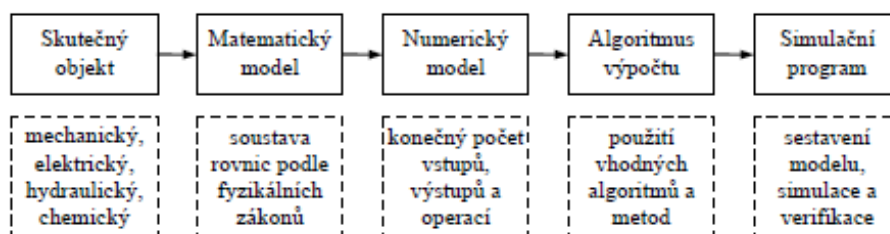
Matematické modely lze rozdělit do dvou skupin:

1. modely získané fyzikální analýzou systému (tzv. deduktivní)
2. modely získané zpracováním experimentů (tzv. induktivní)

U induktivních modelů se předpokládá, že vlastnosti modelovaného systému jsou popsány předem určenými matematickými vztahy, které obsahují parametry, jejichž hodnoty jsou

neznámé. Výhodou této metody je její snadná aplikace spočívající v tom, že se používá již vyhotovených modelů.

Deduktivní modely jsou odvozeny analýzou skutečné fyzikální podstaty děje a z ní vycházejícího matematického popisu. Vytvoření těchto modelů je obtížnější, což je způsobeno podmínkou pochopení systému. Detailní pochopení systému naopak poskytuje lepší podmínky pro jeho ovládání.



Obr. 1.25. Schéma matematického modelování [3]

### 3.2 Model rychlosti větru

Za vznikem větru stojí Slunce, které nerovnoměrně zahřívá zemský povrch. Vítr vzniká jako proudění vzduchu, který se snaží vyrovnávat tlakové rozdíly mezi oblastmi tlakových níží a výší v atmosféře. Následkem nerovnoměrného zahřívání zemského povrchu ohřátý vzduch stoupá vzhůru a na jeho místo se tlačí vzduch studený.

Energie větru je definována jako kinetická energie hmoty vzduchu pohybující se určitou rychlostí a lze ji vyjádřit vztahem:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot v^2 [J] \quad (1.5)$$

Pro model rychlosti větru bude použit blok z knihovny softwarového programu Simulink. Rychlost větru je počítána jako průměrná hodnota z celé plochy rotoru, přičemž její základ požadovaná rychlost větru, kterou lze měnit dle požadavků.

### 3.3 Model statického kompenzátoru

Tento druh modelu je používán v napájecích sítích k rychlé regulaci jalového výkonu, k filtraci harmonických složek napětí a také k eliminaci flikru. Je složen z prvků výkonové elektroniky a spadá do skupiny zařízení označovaných FACT (Flexible Alternating current Transmission System), takto označovaná skupina má za úkol vylepšovat kvalitu napětí v distribučních sítích.

Kompenzátor je zdroj proudu, který jalový výkon dodává, nebo naopak absorbuje za



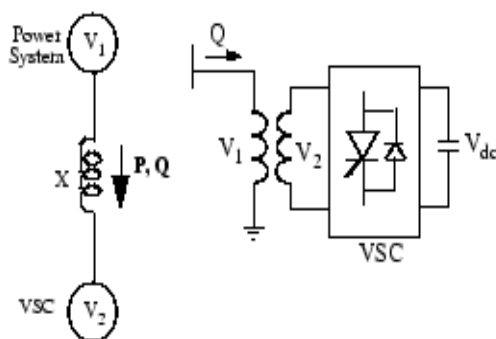
účelem zlepšení účinníku. Na Obr. 1.26. je znázorněno náhradní schéma statického kompenzátoru, ze kterého je patrné, že základem kompenzátoru je tvořen vysokokapacitním kondenzátorem, na němž je udržováno konstantní napětí. Dalším prvkem ve schématu je třífázový napěťový střídač, který je realizován tranzistory IGBT. Spojení se sítí zajišťuje transformátor.

Náhradní schéma lze popsat následujícími rovnicemi:

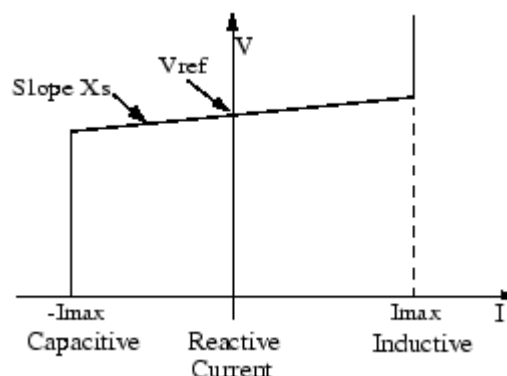
$$P = \frac{V_1 \cdot V_2 \cdot \sin \sigma}{X} [\text{VA}] \quad (1.6)$$

$$Q = \frac{V_1(V_1 - V_2 \cos \sigma)}{X} [\text{VAr}] \quad (1.7)$$

kde  $V_1$  je napětí sítě, výstupní napětí kompenzátoru se označuje  $V_2$ ,  $X$  je reaktance transformátoru a filtru a veličina  $\delta$  značí fázový posun  $V_1$  k  $V_2$



Obr. 1.26. Schéma statického kompenzátoru



Obr. 1.27. VA charakteristika kompenzátoru

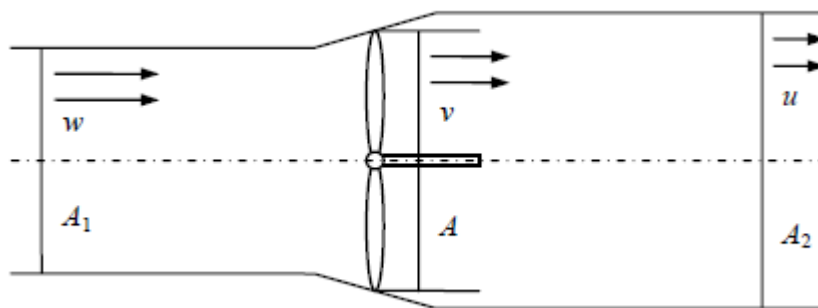
Principem kompenzátoru je udržování konstantního napětí na vysokokapacitním kondenzátoru. V ustáleném stavu se napětí  $V_2$  mírně fázově zpožďuje za síťovým napětím  $V_1$ , aby došlo ke kompenzaci ztrát transformátoru a střídače a také bylo zajištěno stále nabití kondenzátoru. V případě, že hodnota napětí  $V_2$  je menší než hodnota napětí  $V_1$ , kompenzátor se chová jako indukčnost a absorbuje jalový výkon. V opačném případě, tedy že hodnota napětí  $V_2$  vzroste, kompenzátor se chová jako kondenzátor a generuje jalový výkon. Na Obr. 1.27. je znázorněna VA charakteristika kompenzátoru, která tyto vzájemně vztahy částečně popisuje a zároveň ukazuje rozsah proudů, které je kompenzátor schopen dodat nebo absorbovat. Velikost jalového výkonu (proudu) lze popsat vztahem:

$$Q = \frac{V_1(V_1 - V_2)}{X} [\text{VAr}] \quad (1.8)$$

### 3.4 Model vztlakové turbíny

Celkový model větrné elektrárny se skládá z modelů jednotlivých komponent elektrárny a modelů vnějších vlivů, které chod elektrárny ovlivňují. Větrná turbína se skládá z rotoru, který je umístěn na gondole a obvykle je opatřen dvěma nebo více listy a přes převodovku je mechanicky připojen k elektrickému generátoru. Výstupní výkon nebo točivý moment z větrné turbíny závisí na několika faktorech. Mezi tyto faktory patří např. úhel natočení lopatek rotoru, velikost a tvar rotoru atd.

Větrné motory se používají k přeměně kinetické energie větru na mechanickou práci. Princip větrného motoru spočívá v tom, že zpomalují proud vzduchu, který protéká pracovní plochou motoru jak je patrné z Obr. 1. 28., a tím odebírají část jeho energie. Tato energie je využívána pro vznik mechanického momentu na hřídeli.



Obr. 1.28. Schématické znázornění proudění vzduchu protékajícího vrtulí [3]

V prostoru omezeném proudovými plochami se nepřenáší hmota ani energie a platí rovnice kontinuity  $w_1 A_1 = v A = u A_2$  a také zákon zachování hybnosti.

Vzorec pro výpočet energie a hybnosti mají tvar:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (1.9)$$

$$p_v = m \cdot v = \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (1.10)$$

kde:

$v$  – rychlost proudění vzduchu

$\rho$  – hustota vzduchu

$A$  – plocha, přes kterou protéká vzduch

$s$  – dráha vzduchu, kterou urazí

Při znalosti těchto vztahů lze vyjádřit velikost axiálního výkonu působícího na rotor:

$$P_v = \frac{E_v}{t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot (w^2 - u^2) [W] \quad (1.11)$$

$$P_v = \frac{P_v}{t} \cdot v = \rho \cdot A \cdot v^2 (w - u) [W] \quad (1.12)$$

Při porovnání těchto dvou vztahů plyne, že velikost rychlosti proudu, který turbína využije lze spočítat jako  $v = \frac{w+u}{2}$ , a výsledný vztah vyjadřující velikost mechanického výkonu větrného rotoru je možné zapsat ve tvaru:

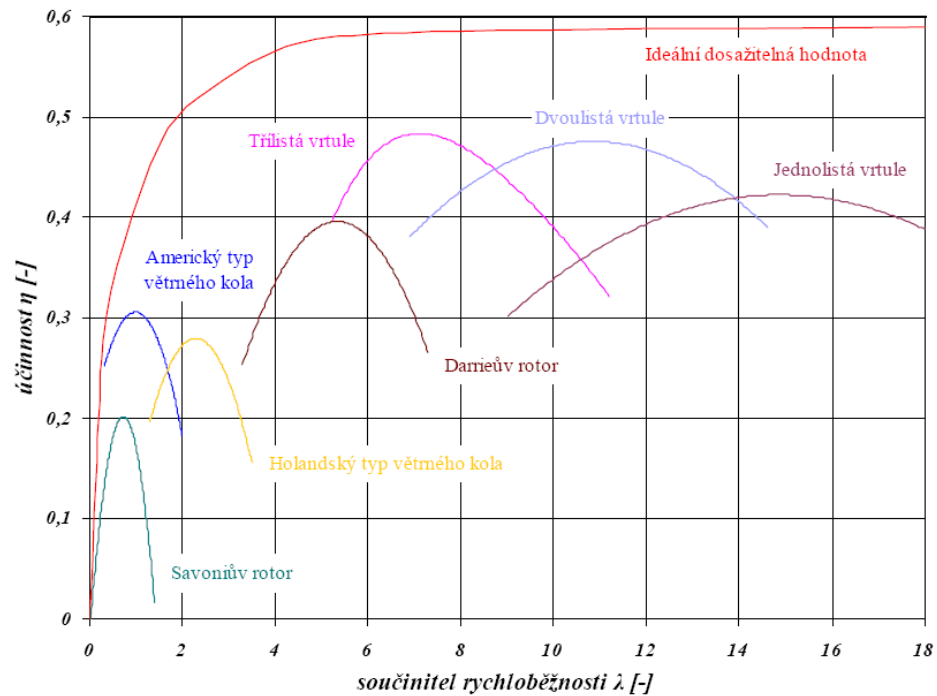
$$P_{tur} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (w^2 - u^2) \cdot (w + u) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot w^3 \cdot c_p [W] \quad (1.13)$$

kde  $R$  je poloměr turbíny a veličina  $c_p$  představuje výkonový součinitel.

Výkonový koeficient je potom definován jako poměr mechanického výkonu turbíny ku výkonu volného proudu větru

$$C_p = \frac{P_m}{P} = \frac{P_m}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3} [-] \quad (1.14)$$

Maximální hodnota výkonového koeficientu u turbín pracujících na vztakovém principu je  $c_p = 0.5926 [-]$ . Tato hodnota vyplývá z Betzovy teorie a vyjadřuje tzv. ideální účinnost větrného stroje. Obvykle hodnota výkonového koeficientu dosahuje maximálně hodnoty 0.45 [-], to je způsobeno ztrátami, které jsou připisovány konfiguraci a návrhu jednotlivých turbín. Průběh výkonového koeficientu  $c_p$  v závislosti na rychlostním koeficientu (rychl oběžnosti)  $\lambda$  jednotlivých turbín je znázorněn na Obr. 1.29.



Obr. 1.29. Součinitel účinnosti různých větrných kol jako funkce rychloběžnosti [15]

Z velikosti výkonu vykonaného rotačním pohybem lze stanovit velikost krouticího momentu dle vztahu:

$$M_{tur} = \frac{P_{tur}}{\omega_{tur}} = \frac{1}{4f_{tur}} \cdot \rho \cdot R^2 \cdot w^3 \cdot c_p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot w^2 \cdot c_m \quad (1.15)$$

kde  $c_M$  je součinitel krouticího momentu, frekvenci otáčivého pohybu turbíny představuje  $f_{tur}$  a  $w_{tur}$  je úhlová rychlost. Okamžité hodnoty výkonu a momentu jsou závislé na rychlosti větru a jejich průběhy pro různé úhly natočení listů rotoru lze vyjádřit pomocí rychloběžnosti. Tato veličina udává poměr mezi obvodovou rychlostí turbíny a rychlostí větru.

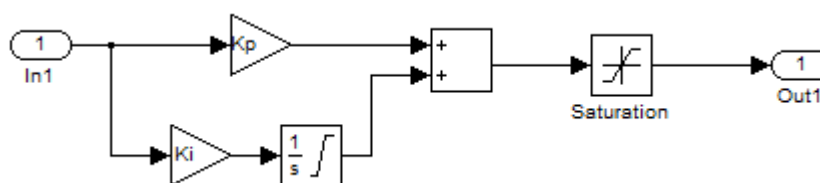
$$\lambda = \frac{v_{obv}}{v_v} = \frac{w_r \cdot R}{v_v} \quad (1.16)$$

kde  $v_{obv}$  je obvodová rychlost rotoru ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $v_v$  je rychlost větru ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $w_r$  je úhlová rychlost rotoru ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ) a  $R$  je poloměr rotoru ( $\text{m}$ ).

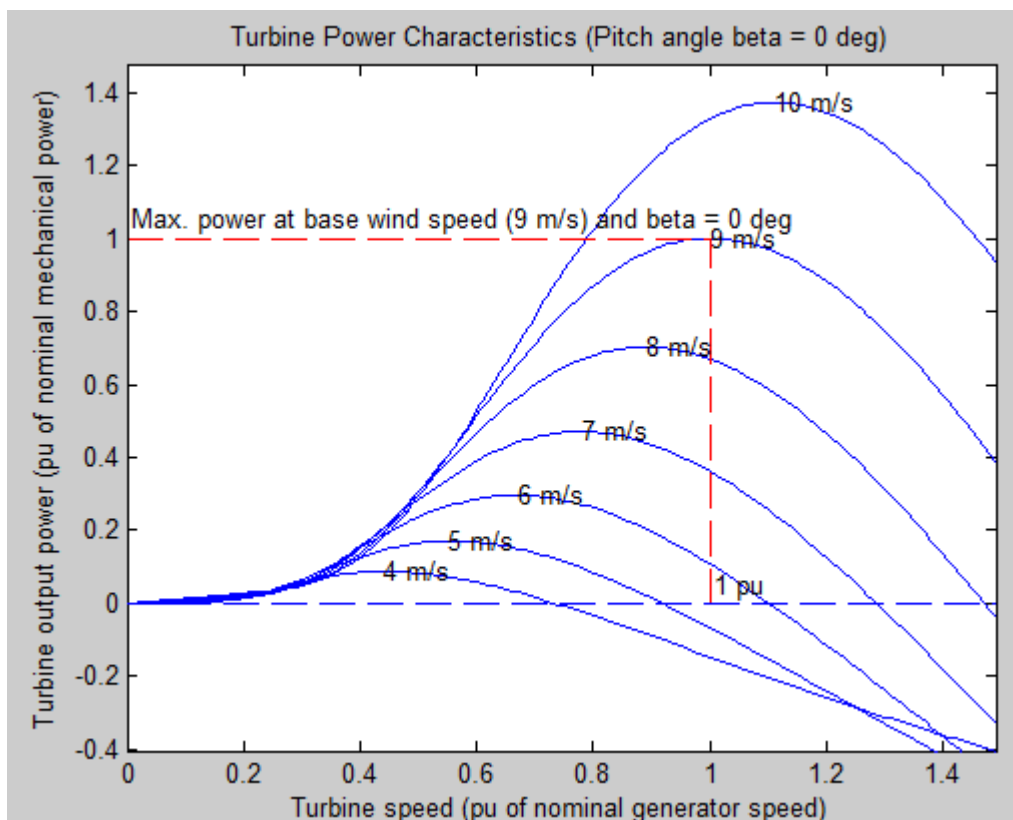
kde veličina  $P_m$  udává mechanický výstupní výkon turbíny,  $c_p$  je výkonový součinitel,  $\rho$  je hustota vzduchu, plocha rotoru je označena  $A$  a rychlost větru je značena  $v$ .

### 3.5 Model aerodynamické regulace

Aerodynamická regulace je nedílnou součástí dnešních moderních větrných elektráren. Tato regulace zajišťuje natáčení listů  $\beta$  vztakové turbíny a tím je dosaženo vhodné regulace mechanického výkonu v závislosti na aktuální rychlosti větru. Na Obr. 1.30. je znázorněna vnitřní struktura PI regulátoru, pomocí něhož lze sledovat změny úhlu natočení listů v závislosti na změnách otáček či výkonu generátoru. Na základě tohoto faktu lze simulovat různé stavy, například schopnost regulace mechanického výkonu při vysokých rychlostech větru za předpokladu, že systém nedovoluje překročit jmenovité hodnoty a tím je umožněn provoz při vyšších rychlostech větru a zároveň je zabráněno poškození zařízení.



Obr. 1.30. Schéma bloku regulace pitch



Obr. 1.31. Průběhy mechanického výkonu turbíny a rychlosti turbíny v závislosti na rychlosti větru

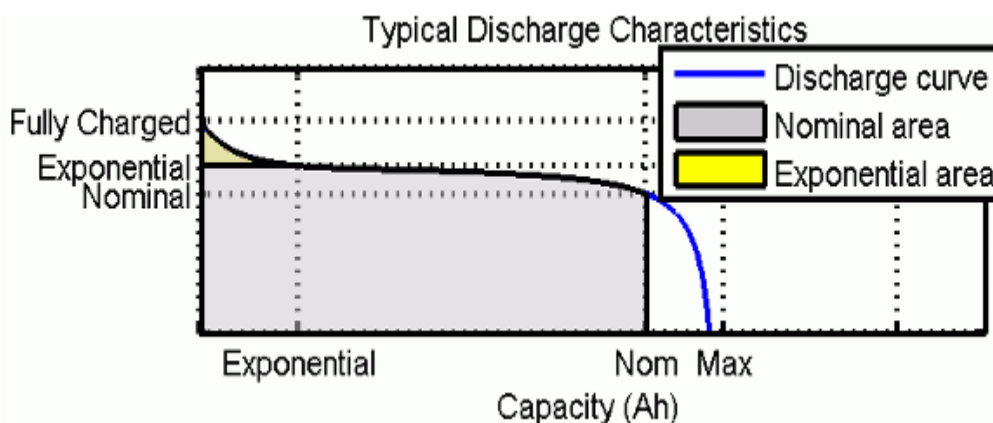
### 3.6 Model baterie a střídače

V této kapitole bude popsán model baterie a střídače, které jsou použity v modelu, který simuluje stav, kdy je větrná turbína opatřena akumulčním prvkem.

Jako akumulční prvek, bude použita lithium iontová baterie. Tento typ akumulčního prvku byl zvolen pro své výhodné vlastnosti, mezi něž patří například relativně vysoká kapacita, malý objem a hmotnost. Softwarový program simulink nabízí několik již připravených modelů baterií, ze kterých si dle potřeby vybrat nejvhodnější variantu. Charakteristika ukazující průběh vybíjení baterie je znázorněna na Obr. 1.32.

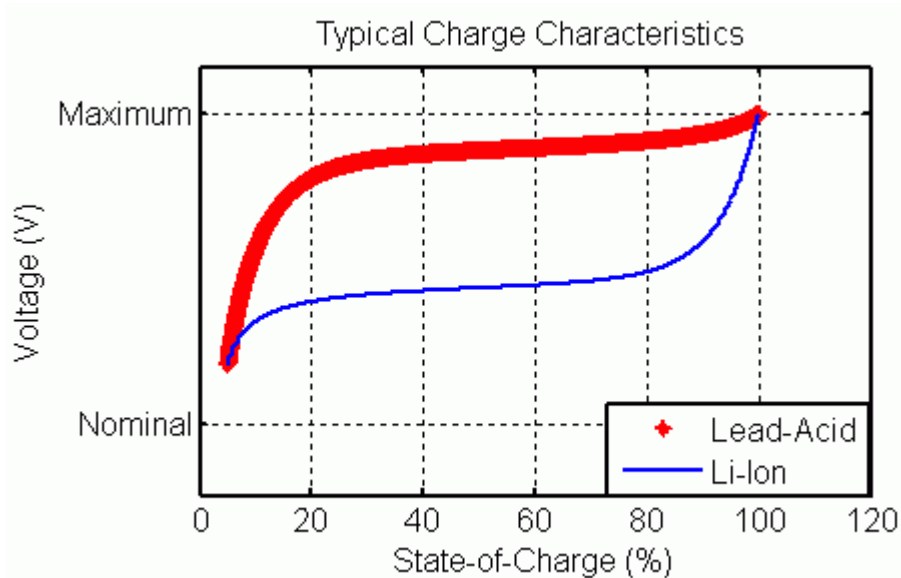
Výběr vlastností, které jsou kladeny na systémy akumulace elektrické energie:

- počet cyklů
- bezpečnost provozu (vliv na životní prostředí)
- účinnost
- maximální výkon jaký může poskytnout – jak rychle dokáže uvolnit energii
- cena



Obr. 1.32. Vybíjecí charakteristika baterie

První část charakteristiky zobrazené na Obr. 1.32. udává exponenciální pokles napětí, když je baterie nabitá. V závislosti na typu zvolené baterie má tato oblast větší plochu či menší. Druhá část popisuje využití elektrického náboje, dokud neklesne jmenovité napětí baterie a třetí část charakteristiky zobrazuje vybíjecí křivku baterie při rychlém poklesu napětí.

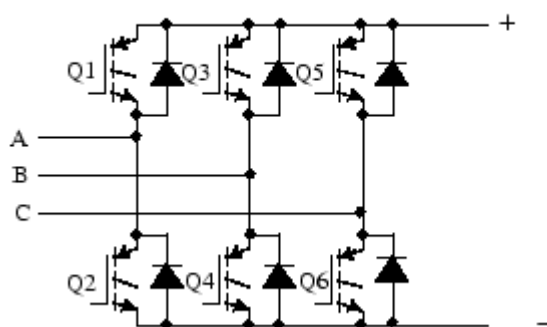


Obr. 1.33. Průběh nabíjení dvou různých baterií

Na Obr. 1.33. je znázorněn průběh nabíjecích charakteristik dvou různých baterií. Jedna z baterií je lithium – iontová (v Obr. 1.33. označena modře) a druhým typem je baterie olověná (v Obr. 1.33. označena červeně).

Napětový střídač je polovodičový měnič, který mění stejnosměrné napětí na střídavé. Základem každého střídače jsou řízené polovodičové spínače, může to být buď tranzistor – pro výkony do řádu stovek kW, nebo tyristor pro větší výkony. Model střídače je opět součástí knihovny softwarového programu Simulink. Skládá se ze šesti prvků IGBT a k nim paralelně připojených nulových diod. Střídač je řízen PI regulátorem s pulzně – šířkovou modulací (PWM). Regulaci zajišťuje PI regulátor, jehož zásah ovlivňuje tvar PWM signálu pro spínání polovodičových prvků.

#### IGBT-Diode bridge:



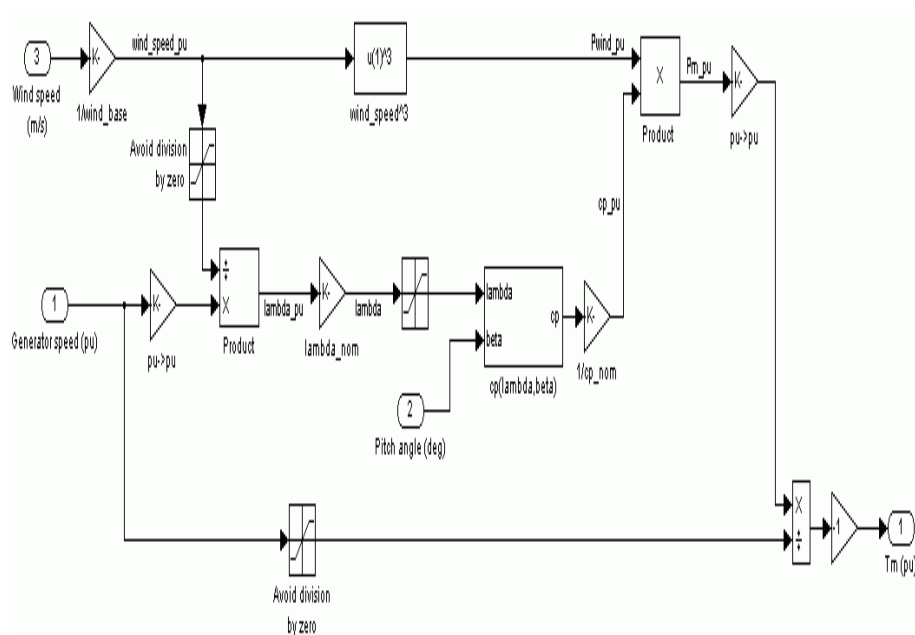
Obr. 1.34. Náhradní schéma střídače IGBT

### 3.7 Statický model větrné turbíny

Model větrné turbíny byl vybrán z knihovny SimPowerSystems a je schématicky znázorněn na Obr. 1.35. Výstupní výkon turbíny je popsán vztahem:

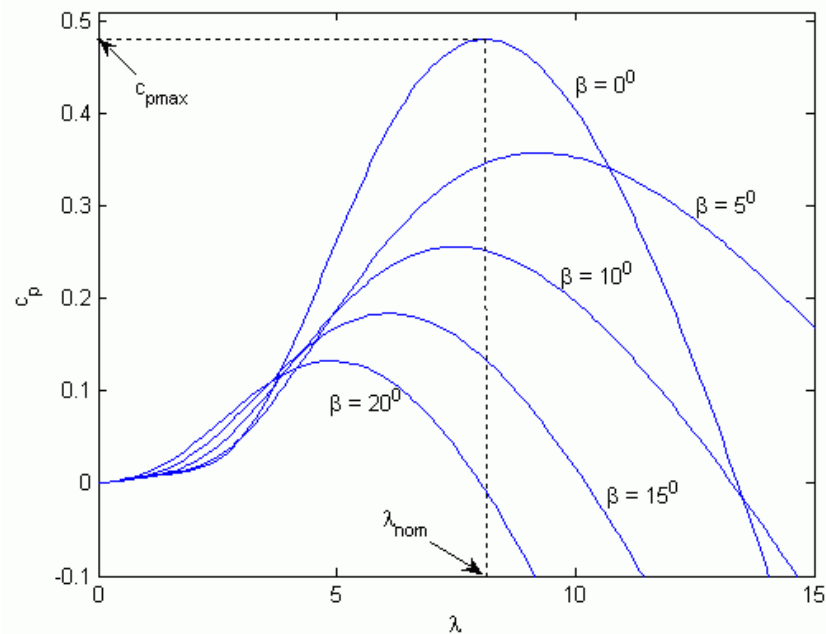
$$P_m = \frac{1}{2} \cdot c_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 [W] \quad (1.17)$$

kde veličina  $P_m$  udává mechanický výstupní výkon turbíny,  $c_p$  je výkonový součinitel,  $\rho$  je hustota vzduchu, plocha rotoru je označena  $A$  a rychlost větru je značena  $v$ .



Obr. 1.35. Statický model větrné turbíny

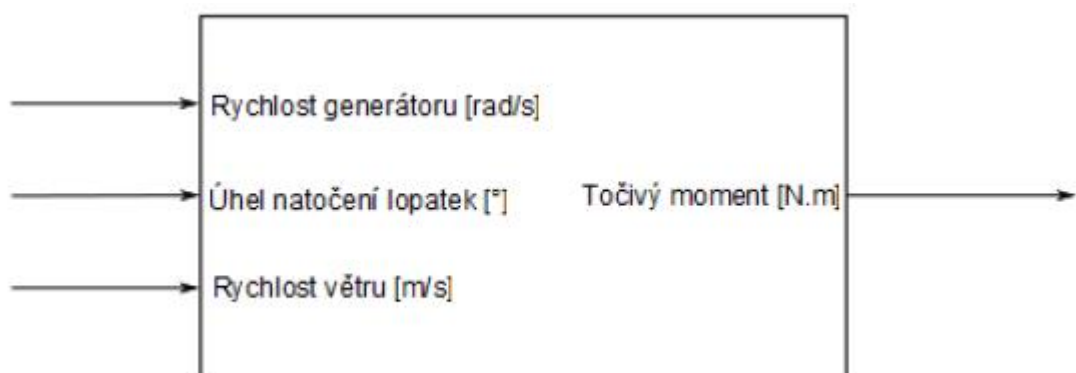




Obr. 1.36. Průběhy výkonového koeficientu v závislosti na natočení lopatek rotoru a na rychlostním koeficientu

Na Obr. 1.36. jsou znázorněny průběhy výkonového koeficientu  $c_p$  v závislosti na rychlostním koeficientu  $\lambda$  a pro různé natočení listů rotoru  $\beta$ . U větrných elektráren, které jsou vybaveny systémem natočení úhlu listů, lze regulovat rychlost otáčení a udržovat tak optimální rychlost otáčení větrné turbíny vzhledem k rychlosti větru.

Pro snazší manipulaci a využití tohoto statického modelu v dalších modelech bylo celé schéma převedeno na subsystém, který je znázorněn na Obr. 1.37.

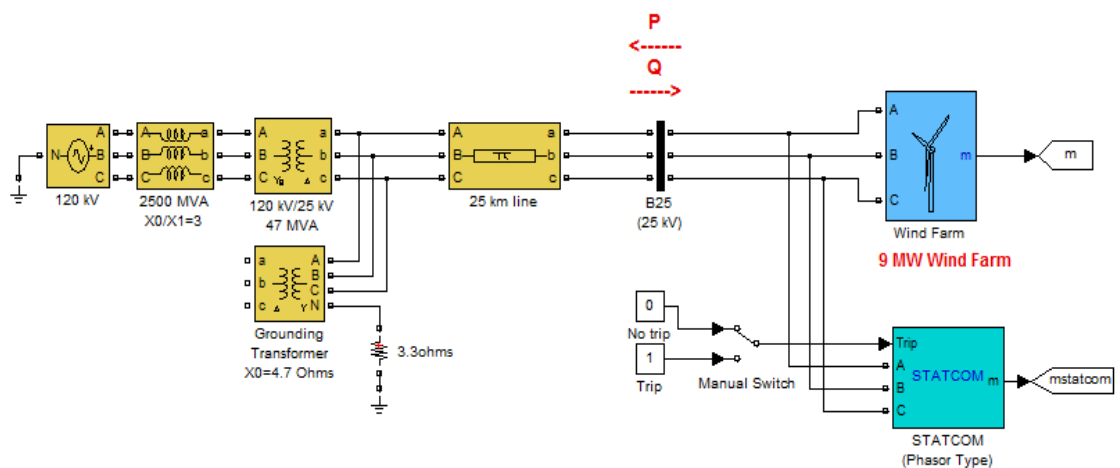


Obr. 1.37. Subsystém statického modelu větrné turbíny

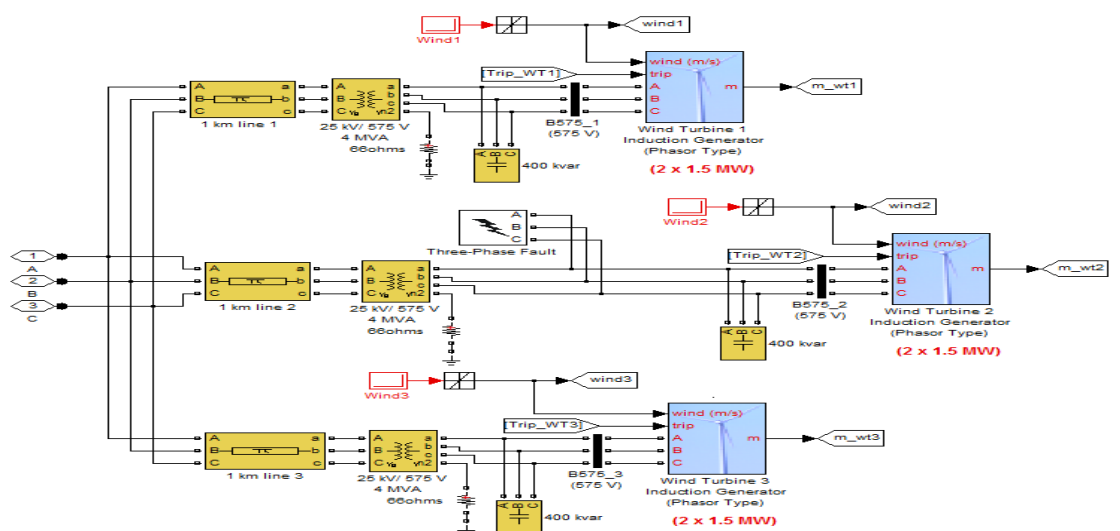
### 3.8 Dynamický model větrné turbíny

Jak již bylo zmíněno, tato kapitola je zaměřena na simulování větrné elektrárny ve dvou režimech zapojení. Prvním z nich je model, který je opatřen akumulčním prvkem, který je realizován vhodným blokem, který byl vybrán z knihovny softwarového programu Simulink. Druhým režimem zapojení je model větrné elektrárny bez akumulčního prvku a následně budou porovnány oba dva režimy zapojení z hlediska výstupních charakteristik větrné elektrárny.

Knihovna softwarového programu Simulink nabízí již hotový model větrné farmy, která se skládá z tří větrných generátorů, z nichž každý má jmenovitý mechanický výkon 3MW a celý systém je připojen k distribuční soustavě 25 kV. Dále je elektrická energie transportována přes 25 km dlouhé vedení na linku 120 kV. Na Obr. 1.38. je schématicky znázorněna zmiňovaná větrná farma ve spolupráci s elektrizační sítí.



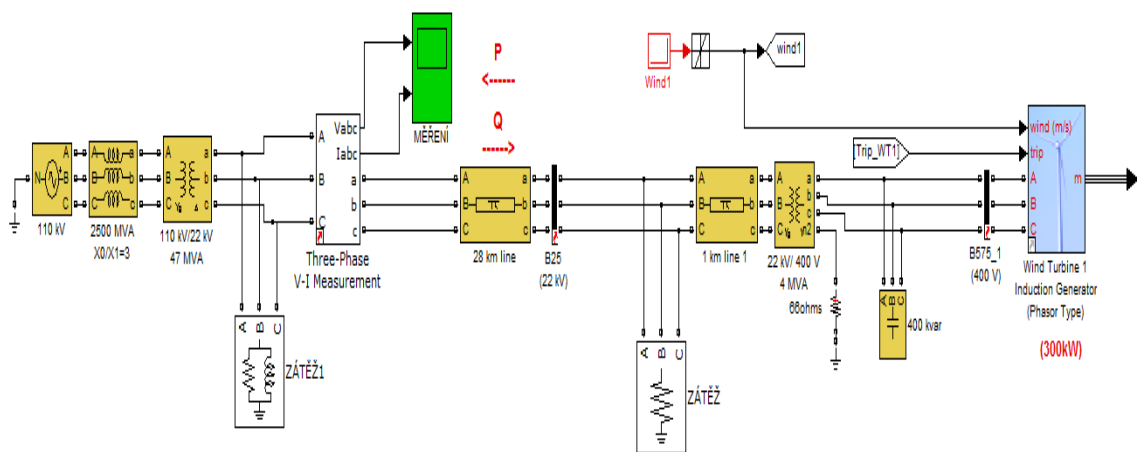
Obr. 1.38. Model větrné farmy



Obr. 1.39. Schématické znázornění jednotlivých větrných elektráren

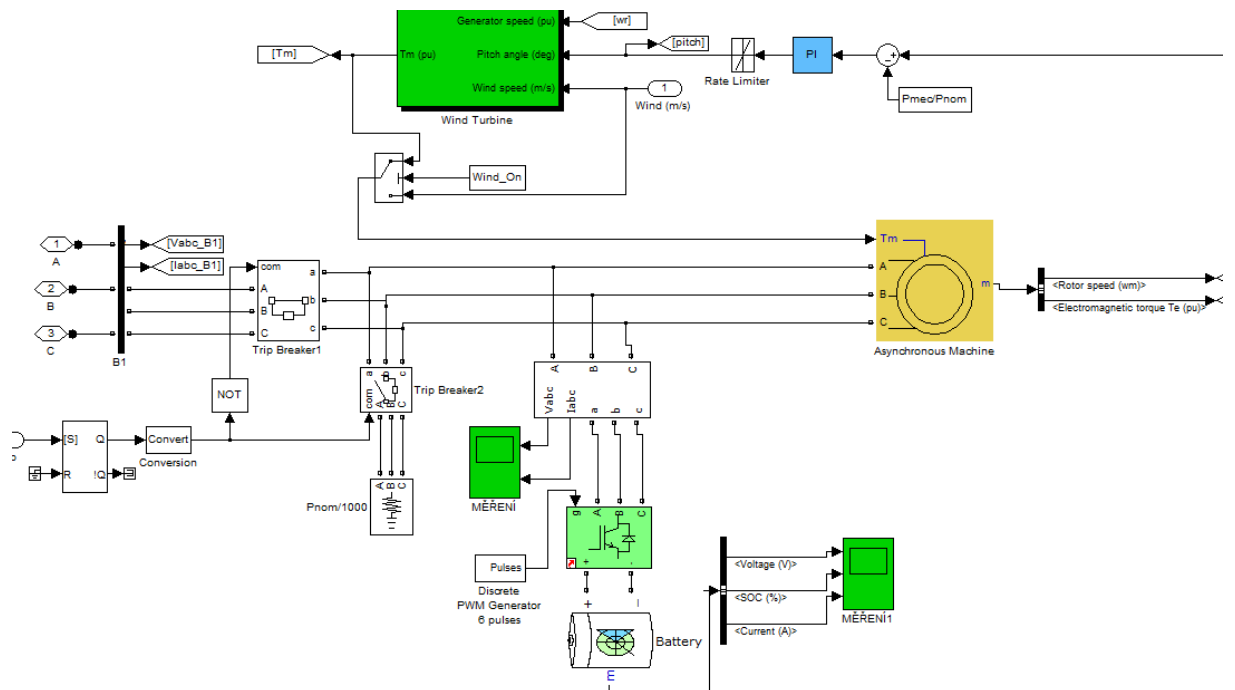
### 3.9 Navržený model větrné turbíny

Na základě modelu z předchozí kapitoly bude vycházet i model, který poslouží k vybraným simulacím. Model se již nebude skládat ze tří větrných elektráren, ale byl upraven pouze na jednu větrnou elektrárnu o jmenovitém výkonu 100 kW. Model se skládá z vrtule pohánějící indukční generátor s kotvou nakrátko, přičemž satorové vinutí generátoru je přímo napojeno na elektrickou síť. Model byl následně upraven na parametry elektrizační soustavy, které jsou používány v České republice. Tyto změny se týkají především frekvence, která byla upravena na 50 Hz oproti původní hodnotě 60 Hz, kterou byl opatřen původní model. V případě, že rychlost větru překročí nominální hodnotu  $9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  je nutné omezit výstupní výkon generátoru na hodnotu 100 kW. Z tohoto důvodu model obsahuje řízení natáčení listů vrtule. Na Obr. 1.40. je znázorněn upravený model.



Obr. 1.40. Navržený model větrné elektrárny

Další změnou, kterou lze z Obr. 1.40. vidět, je přidání dvou zátěží (v Obr. 1.40. označené jako „Zátěž“ a „Zátěž 1“), přičemž tyto zátěže charakterizují odběr činného výkonu a velikost jednotlivých zátěží činí 100 kW pro „zátěž“ a 10 kW pro „zátěž“1. Změna byla provedena i u délky vedení, které bylo v původním modelu 25 km a po úpravě je nová hodnota 28 km. Pro znázornění výsledků jednotlivých simulací byl model opatřen blokem pro třífázové měření a osciloskopem pro zobrazení výsledných charakteristik. Jalový výkon absorbovaný asynchronním generátorem je kompenzován připojeným kondenzátorem o jmenovité hodnotě 400 kVAr.



Obr. 1.41. Subsystem navržené větrné turbíny s baterií

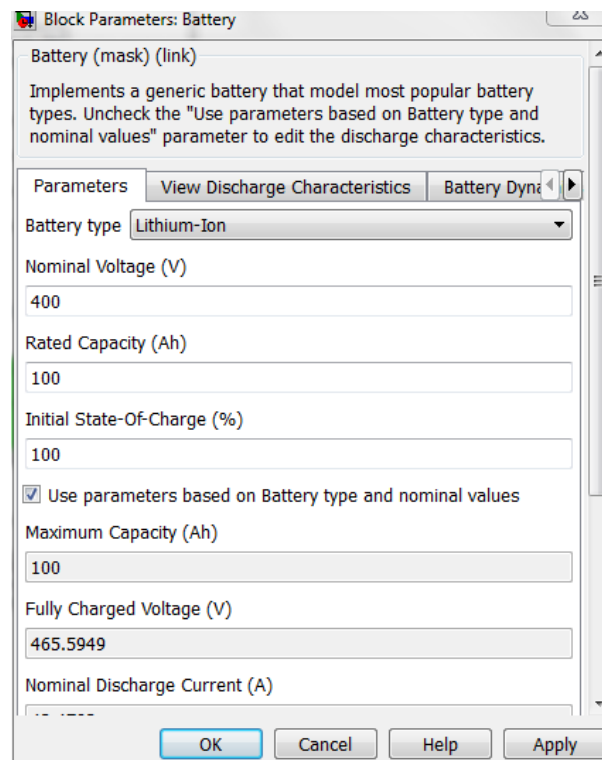
Na Obr. 1.41. je znázornění subsystem navržené větrné elektrárny, který v podstatě ukazuje vnitřní strukturu větrné elektrárny. Subsystem obsahuje statický model větrné elektrárny, který byl stručně popsán v předchozích kapitolách, na který navazuje blok s aerodynamickou regulací, která je realizována pomocí PI regulátoru.

V případě, že bude simulován stav, při kterém bude zapojen akumulční prvek, bude baterie zapojená do obvodu a z toho důvodu bylo nezbytné zapojit opět blok s třífázovým měřením a osciloskopem pro interpretaci výsledků. Pomocí tohoto zapojení lze sledovat průběh napětí a proudu na akumulčním prvku.

Jak již bylo několikrát zmíněno, jedním ze simulovaných stavů je kombinace větrné elektrárny s akumulčním prvkem. Jako akumulční prvek byla vybrána lithium-iontová baterie, která je zapojená společně se střídačem, který byl podobně jako baterie vybrán z knihovny programu Simulink a pro zobrazení jednotlivých průběhů je připojen i osciloskop. Parametry navržené baterie jsou zobrazeny na Obr. 1.42.

PARAMETRY AKUMULÁTORU	
Nominální napětí	400 V
Jmenovitá kapacita	100 Ah
Maximální kapacita	100%
Napětí plně nabitého akumulátoru	465,6 V
Nominální vybíjecí proud	43,47 A
Vnitřní odpor	0,04 $\Omega$
Exponenciální napětí	432,15 V
Exponenciální kapacita	4,19 Ah

Tab. 1.6. Parametry akumulátoru



Obr. 1.42. Parametry akumulčního prvku

Na Obr. 1.42. jsou shrnuty parametry prvku, realizující akumulaci. Tento blok umožňuje nastavení hodnot v libovolném rozsahu a je ho možné použít pro několik variant zapojení, například je možné, zvolit z několika typů akumulátorových jsou nulové. Baterie je připojená na nominální napětí 400 V a hodnota kapacity baterie je nastavena na 100 Ah.

## 4 Provozní charakteristiky navrženého modelu

Tato kapitola bude zaměřena na ověření provozních charakteristik modelu, který byl navržen v předchozí kapitole. Provozní charakteristiky budou ověřeny při dvou režimech zapojení, přičemž první variantou je model bez možnosti využití akumulčního prvku a druhou možností je varianta s využitím akumulčního prvku. Jednotlivé provozní stavy budou simulovány pro dvě různé rychlosti větru. V závěru této kapitoly budou vybrané charakteristiky vzájemně porovnány.

### 4.1 Provozní charakteristiky modelu bez možnosti akumulace

Prvním simulovaným stavem je model větrné turbíny, který není opatřen akumulčním prvkem a schéma zapojení vychází z Obr. 1.41. který je uveden v kapitole 3.8.

Aby simulace mohla proběhnout dle zvolených požadavků, je nezbytné zvolit parametry asynchronního generátoru a větrné turbíny, které jsou uvedeny v přehledných tabulkách (viz. Tab. 1.4 a Tab. 1.5.). Některé hodnoty v uvedených tabulkách mají rozměr poměrné veličiny (označeno „pu“), která představuje poměr mezi aktuální hodnotou a nominální hodnotou daná veličiny. Důležitým parametrem, který je rozhodující zejména pro možnou regulaci lopatek je jmenovitá rychlost větru, na kterou je turbína konstruována a jejíž hodnota je  $9 \text{ m.s}^{-1}$ .

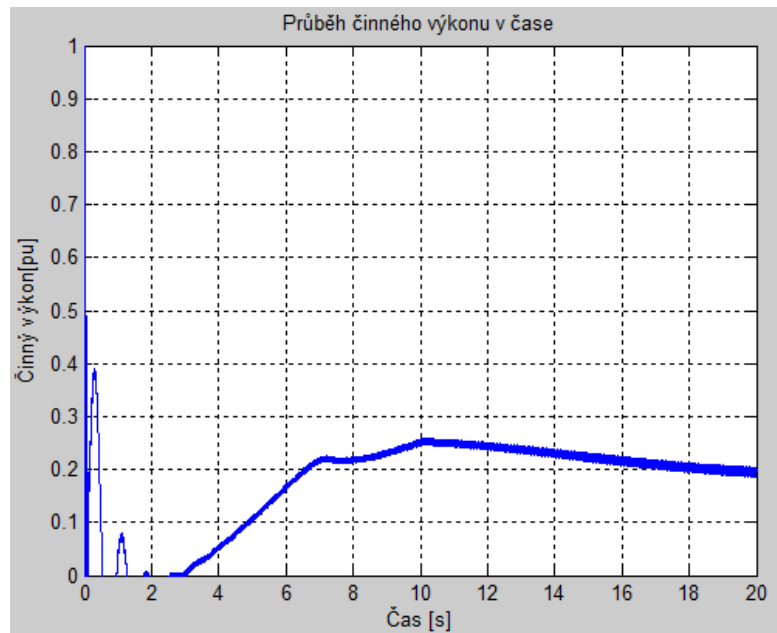
<b>Parametry generátoru</b>	
frekvence [Hz]	50
nominální výkon [kW]	100
odpor statoru $R_s$ [pu]	0,004843
odpor rotoru $R_r$ [pu]	0,004377
magnetizační indukčnost $L_m$ [pu]	6,77

Tab. 1.4. Parametry generátoru

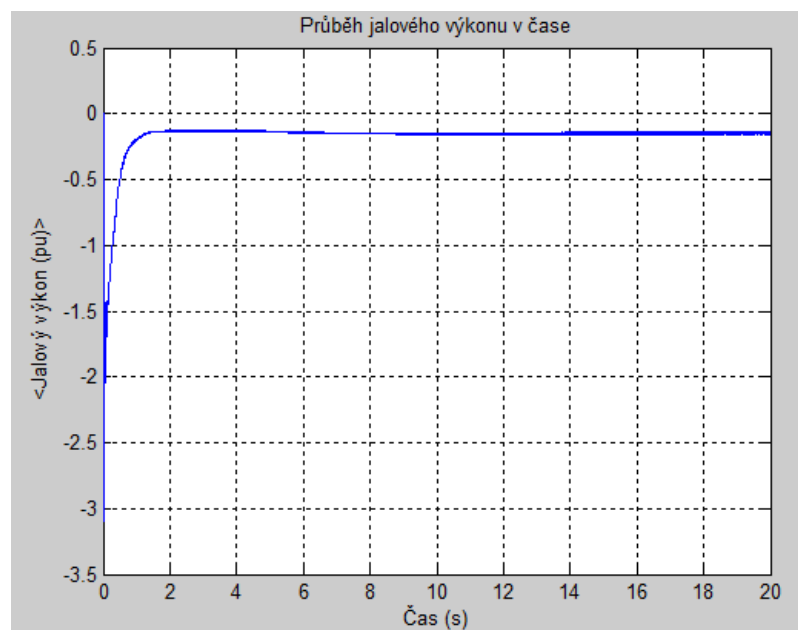
<b>Parametry turbíny</b>	
jmenovitý mechanický výkon [kW]	100
jmenovitá rychlost větru [ $\text{m.s}^{-1}$ ]	9
maximální úhel natočení lopatek [deg]	45

Tab. 1.5. Parametry turbíny

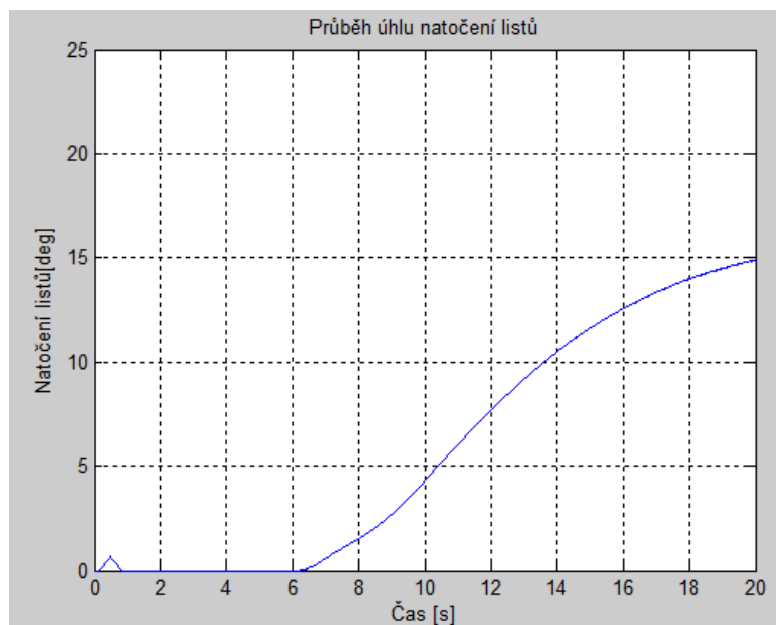
Dalším klíčovým parametrem, který je třeba nastavit před spuštěním simulace je rychlost větru a jeho změna v požadovaném čase. Rychlost větru, který působí na turbínu je na počátku  $5 \text{ m.s}^{-1}$  a v čase 2 sekund je pro větrnou turbínu rychlost větru postupně zvyšována na hodnotu  $13 \text{ m.s}^{-1}$ . Koncová rychlost větru je vyšší než nominální, proto jsou otáčky turbíny regulovány pomocí natáčení lopatek tak, aby se výstupní výkon ustálil na jmenovité hodnotě 100 kW. V této zvolené variantě bude simulován časový úsek v rozsahu 20 sekund.



Obr. 1.43. Průběh činného výkonu v čase (varianta 1)

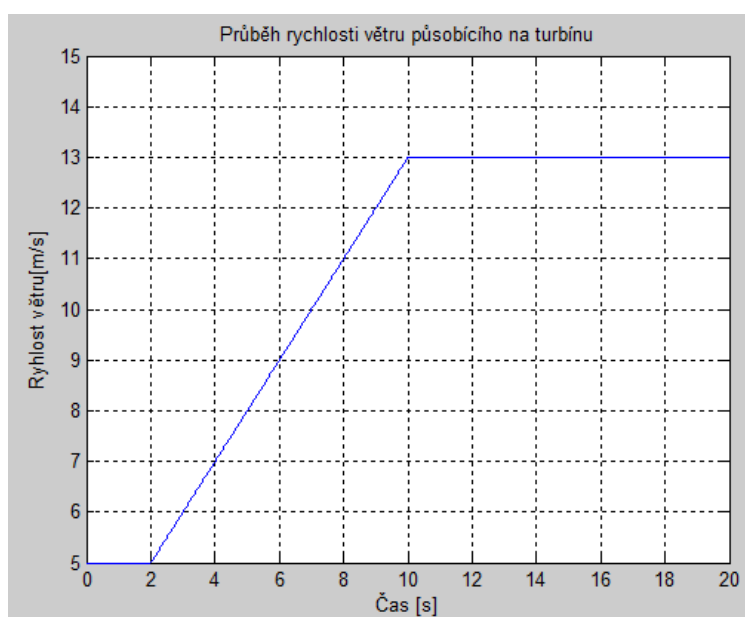


Obr. 1.44. Průběh jalové výkonu v čase (varianta 1)



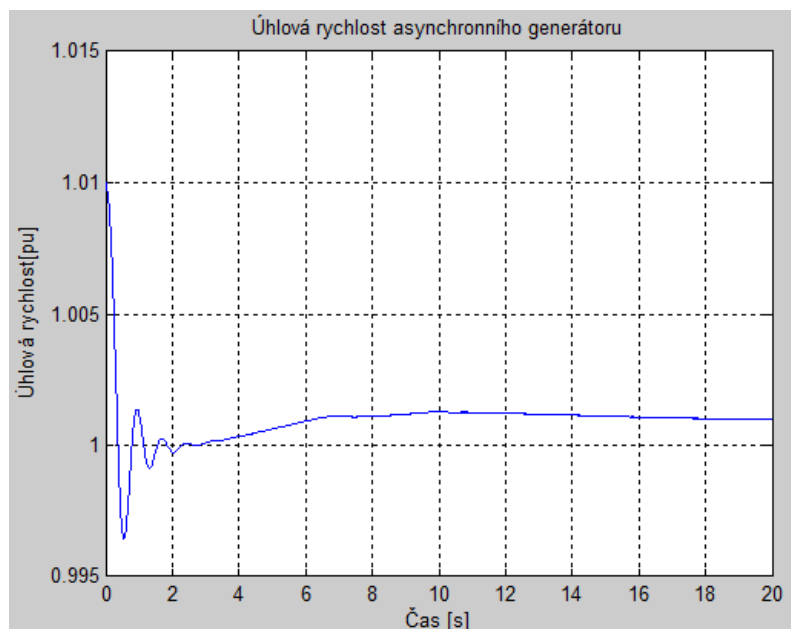
Obr. 1.45. Průběh úhlu natočení listů (varianta 1)

Na základě této simulace bylo předmětem zkoumání měření průběhu činného a jalového výkonu, dále pak průběhy úhlové rychlosti asynchronního generátoru a natočení listů rotoru, zajišťující regulaci. Rychlost generátoru je při výrobě elektrické energie lehce nadsynchronní a pohybuje se v rozmezí 1 pu při nulovém zatížení a 1,005 pu při plném zatížení, jak je patrné z Obr. 1.47. Průběh jalového výkonu (Obr. 1.44), který je absorbován asynchronním generátorem vyrovnává připojený kondenzátor s výkonem 400 kVAr. Na jednotlivé charakteristiky má velký vliv i připojená činná zátěž. Z Obr. 1.46. lze vidět, průběh rychlosti větru, který působí na turbínu při počátečních podmínkách, která jsou definovány výše.



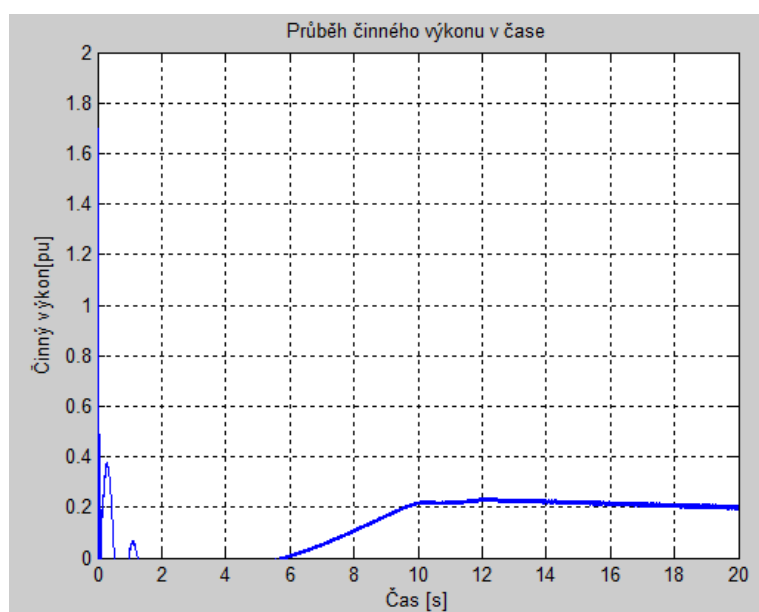
Obr. 1.46. Průběh rychlosti větru působícího na turbínu (varianta 1)



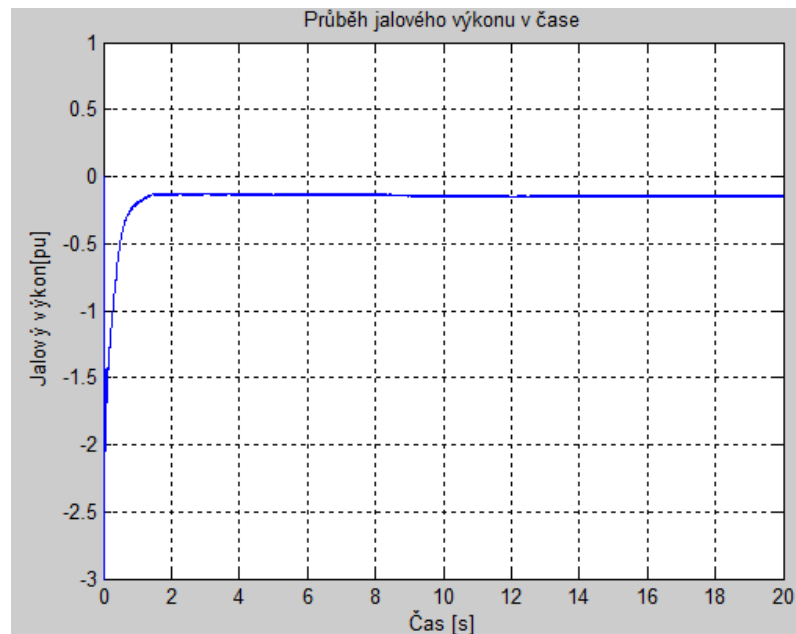


Obr. 1.47. Úhlová rychlost asynchronního generátoru (varianta 1)

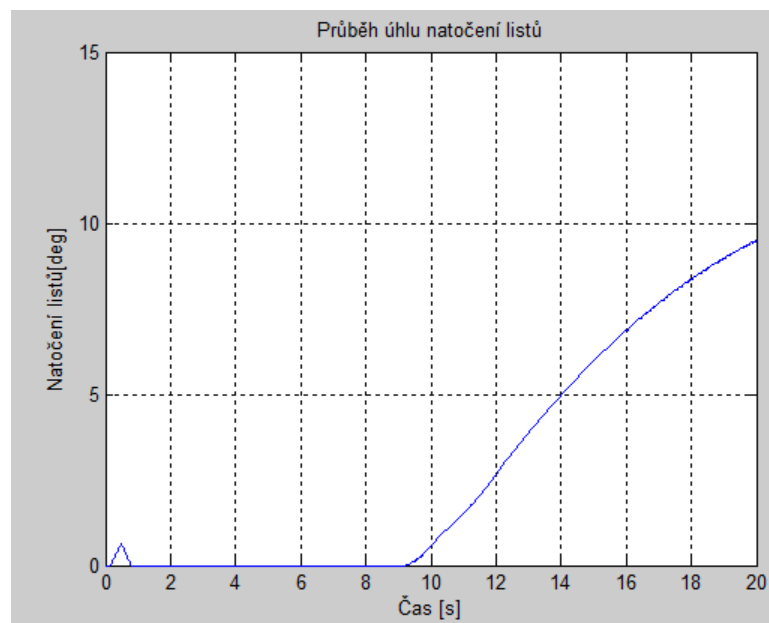
Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, provozní charakteristiky modelu větrné turbíny budou porovnány pro různé rychlosti větru. Následující charakteristiky vycházejí z působení větru, který má v počátku rychlost  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a po 3 sekundách se tato rychlost zvýší na hodnotu  $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Jako v předešlém případě i při těchto parametrech bude doba simulace 20 sekund. Všechny ostatní parametry zůstaly stejné, včetně jmenovité rychlosti větru, na kterou je turbína konstruována, tedy  $9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .



Obr. 1.48. Průběh činného výkonu v čase (varianta 2)

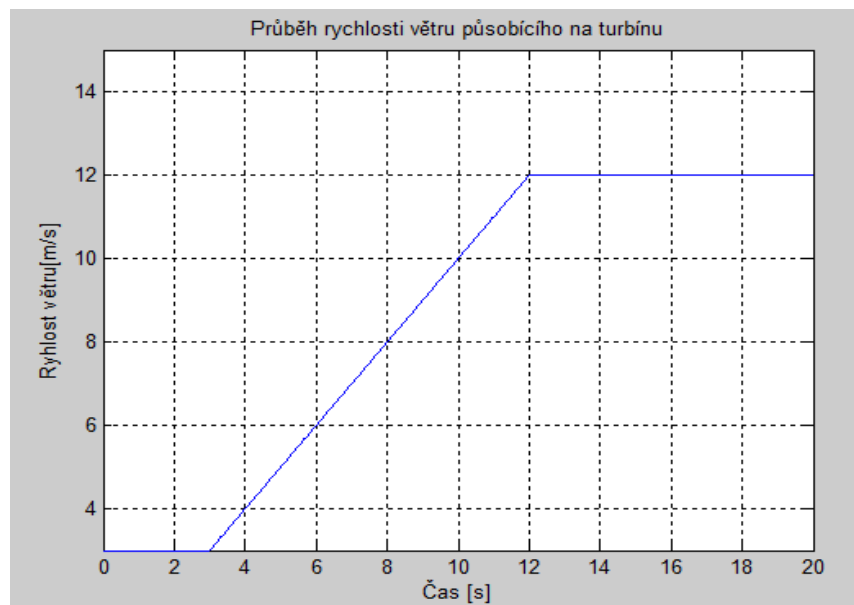


Obr. 1.49. Průběh jalového výkonu v čase (varianta 2)

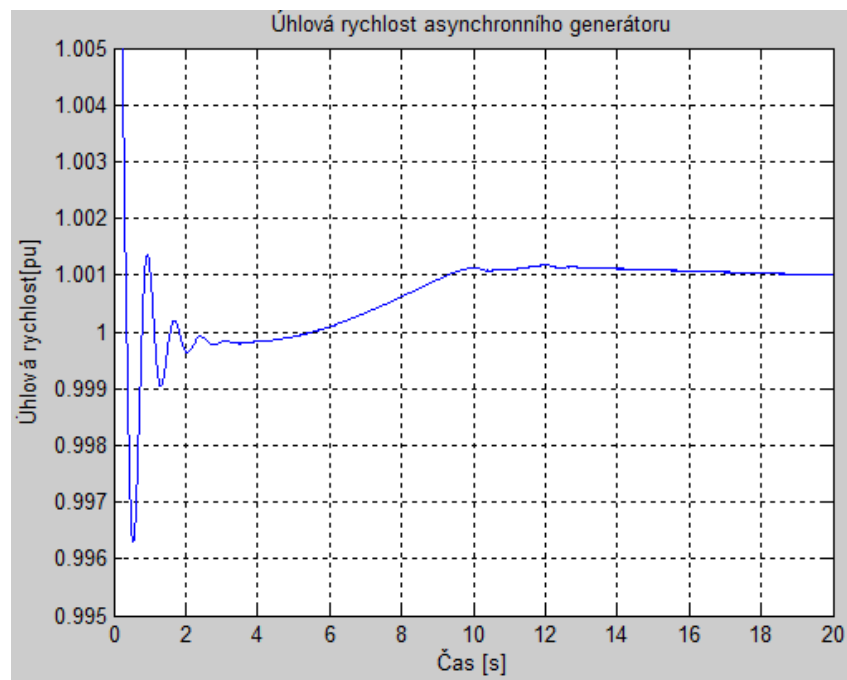


Obr. 1.50. Průběh úhlu natočení listů (varianta 2)

Z přiložených průběhů provozních charakteristik modelu je patrné, že zvolená rychlost větru s určitým časovým zpožděním se oproti původnímu návrhu příliš neliší. Největší změnu lze pozorovat mezi Obr. 1.45. a Obr. 1.50., které ukazují řízenou regulaci natáčením listů rotoru, přičemž zásadní rozdíl je v čase působení této regulace a také v amplitudě. Srovnání úhlové rychlosti asynchronního generátoru je téměř shodné, jelikož se hodnota po ustálení jako v předchozím případě ustálí na hodnotě 1,005 pu.



Obr. 1.51. Průběh rychlosti větru působícího na turbínu (varianta 2)



Obr. 1.52. Úhlová rychlost asynchronního generátoru (varianta 2)

## 4.2 Provozní charakteristiky modelu s možností akumulace

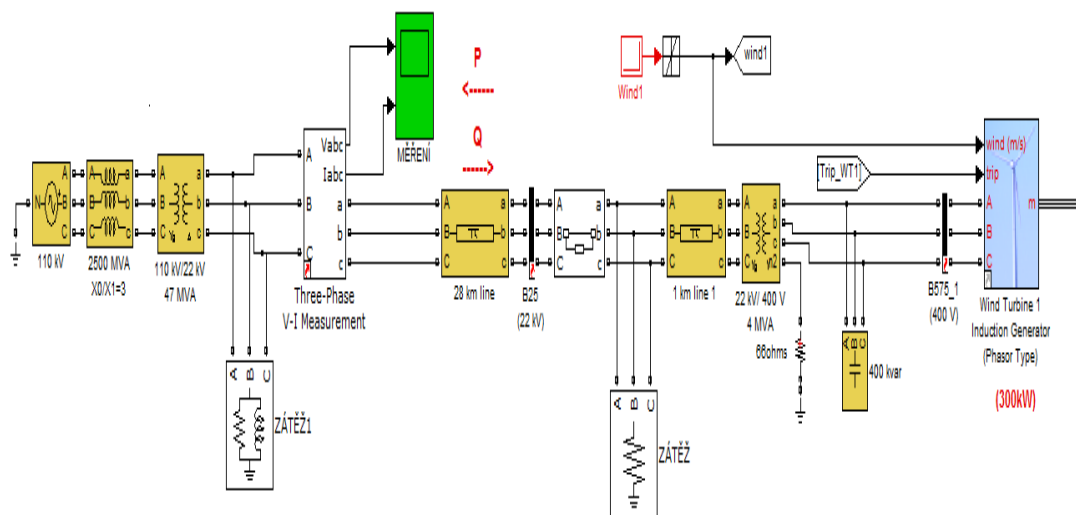
Zkoumáním provozních charakteristik navrženého modelu, který je opatřen akumulčním prvkem se bude zabývat tato kapitola. V předchozí kapitole byl simulován stav, při kterém byly do obvodu připojeny pouze dvě zátěže, a akumulční prvek nebyl připojen.

Schéma zapojení tentokrát vychází z Obr. 1.41, který je uveden v kapitole 3.8. Podobně jako v předchozím případě budou provozní charakteristiky modelu ověřovány pro dvě různé rychlosti větru. Veškeré parametry zůstaly stejné, tzn. parametry asynchronního generátoru a parametry turbíny vychází z předchozí kapitoly, kde jsou uvedeny v přehledných tabulkách (Tab. 1.4 a Tab. 1.5).

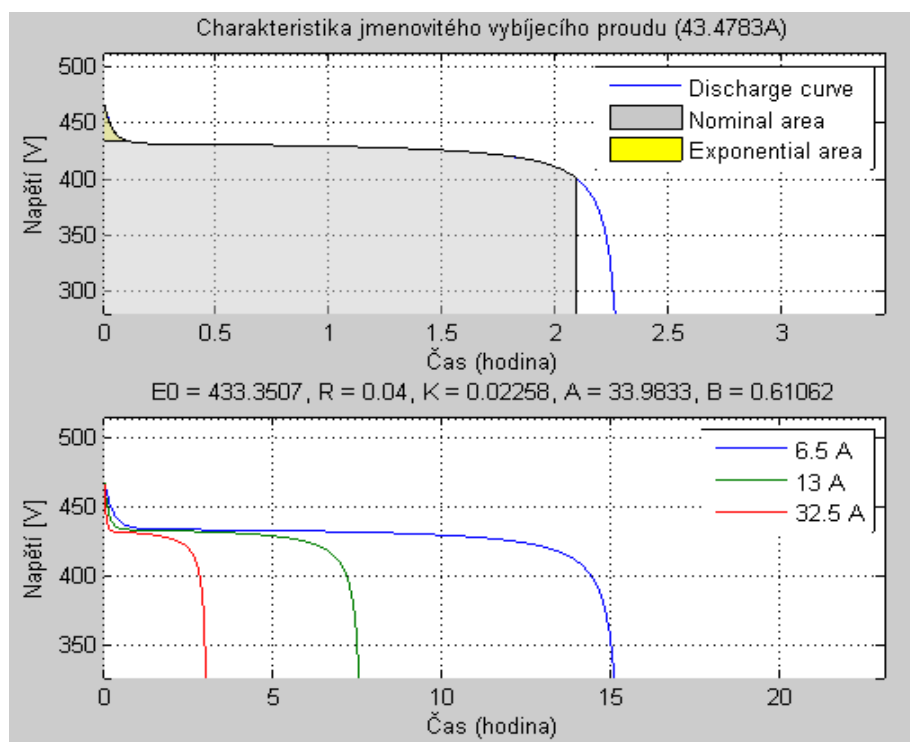
Přidáním akumulčního prvku do obvodu lze očekávat odlišné charakteristiky než u modelu bez možnosti akumulace, zejména bude sledován stav nabíjení a vybíjení akumulátoru. Pro tento druh simulace je důležité zvolit vhodné parametry prvku, který realizuje akumulaci. Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.8 konkrétně z Obr. 1.42, je patrné, že vhodně vybraným blokem z knihovny softwarového programu Simulink lze realizovat akumulaci v libovolných hodnotách.

Počáteční rychlost větru byla opět nastavena na hodnotu  $5 \text{ m.s}^{-1}$  v počátku a v čase 2 sekund je rychlost větru postupně zvyšována na hodnotu  $13 \text{ m.s}^{-1}$ . Časový úsek, po který bude probíhat simulace je 30 sekund.

Jelikož bude akumulční prvek realizovat ostrovní systém, je zapotřebí navržený model větrné elektrárny doplnit o třífázový vypínač, který realizuje odpojení větrné elektrárny od elektrizační sítě v daný čas, který lze libovolně měnit.

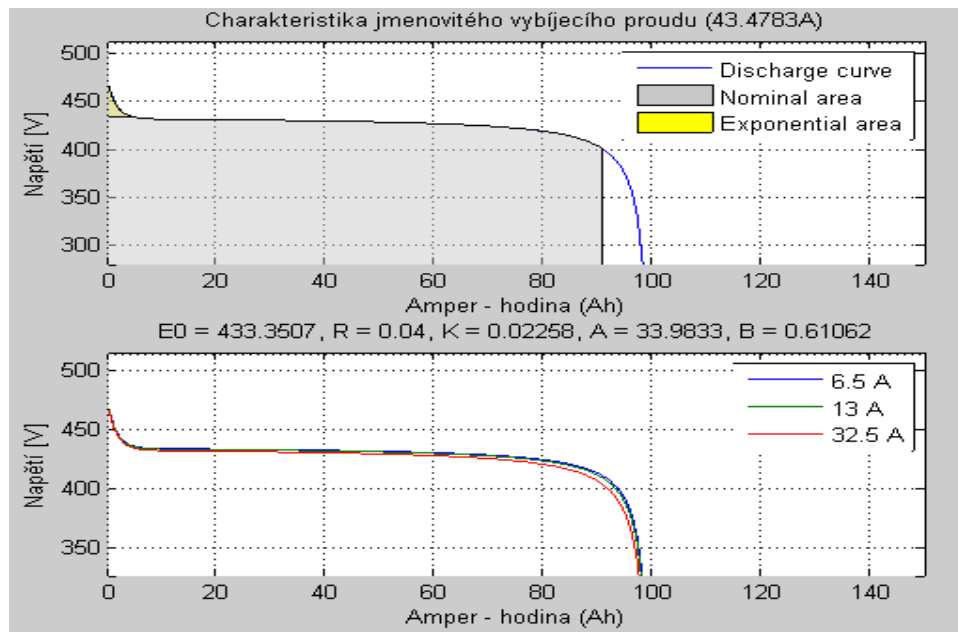


Obr. 1.53. Navržený model doplněný o třífázový vypínač



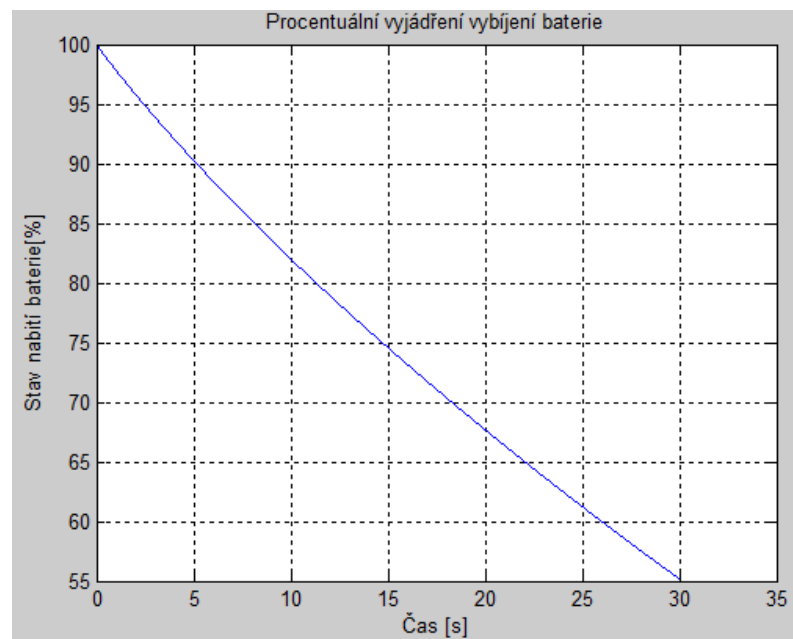
Obr. 1.54. Charakteristika vybíjení akumulátoru za čas

Celá simulace probíhala za předem stanovených podmínek, které byly popsány výše. Důležitým kritériem pro samotnou simulaci bylo využití a nastavení třífázového vypínače, který v čase 5 sekund odpojil větrnou elektrárnu od elektrizační sítě, a na základě tohoto faktu byla elektrárna schopna pracovat v ostrovním režimu. Opětovné připojení větrné elektrárny do elektrizační sítě proběhlo v čase 15 sekund. Výsledky nabíjení a vybíjení akumulátoru z hlediska připojené zátěže jsou zobrazeny na Obr. 1.54. a Obr. 1.55. Na Obr. 1.54. je znázorněn průběh nominální vybíjecí křivky (nominální vybíjecí proud), přičemž se tyto křivky porovnávaly s časem. Dále jsou zde znázorněny vybíjecí křivky akumulátoru na základě zvolených vybíjecích proudů. Na Obr. 1.55 jsou vykresleny totožné charakteristiky, avšak vybíjecí křivky jsou porovnávány z hlediska kapacity akumulátoru. Hodnota nominálního vybíjecího proudu činí 43,48 A.



Obr. 1.55. Charakteristika vybíjení akumulátoru v závislosti na kapacitě

Na Obr. 1.56. je zobrazen průběh vybíjení baterie, která byla zpočátku nabitá na 100 % své kapacity a s rostoucím časem dochází k jejímu vybíjení. Parametr počátečního stavu nabití baterie lze nastavit v bloku realizující akumulátor a používá se jako počáteční parametr pro simulaci a nemá vliv na vybíjecí křivku. Jak již bylo zmíněno, simulace probíhala po dobu 30 sekund a na konci tohoto času byl stav baterie na 55 % své kapacity.



Obr. 1.56. Charakteristika ukazující průběh vybíjení baterie

## Závěr

V této diplomové práci jsem se zabýval problematikou větrných elektráren, které se charakterem výroby elektrické energie zařazují mezi obnovitelné zdroje energie, jejichž nezávislost na stále ubývajících fosilních palivech patří mezi jejich největší výhody.

Úvodní část práce jsem věnoval teoretickému rozboru, ve kterém jsou detailně popsány možnosti využití energie větru na energii elektrickou, dále jsem provedl rozdělení větrných elektráren z hlediska principu, na němž pracují, a také jsem popsal jednotlivé druhy generátoru, které se nejčastěji používají při výrobě elektrické energie u větrných elektráren.

V další části práce jsem se zaměřil na problematiku spolupráce a regulace větrných elektráren s elektrizační sítí, uvedl jsem zde, za jakých podmínek je možné připojit tyto energetické zdroje do přenosové soustavy s ohledem na kvalitu dodávané elektřiny, a také jsem v této části práce věnoval pozornost regulaci přenosové soustavy.

Velmi podstatnou část diplomové práce tvoří matematický popis jednotlivých částí větrné elektrárny, které mi posloužili k sestavení funkčního modelu v softwarovém programu Simulink. Jedná se tedy o modely větru, statického kompenzátoru, větrné turbíny či aerodynamické regulace.

Největším přínosem této práce je poslední kapitola, ve které jsem na vytvořeném modelu ověřoval jeho provozní charakteristiky při různých rychlostech větru. Model byl opatřen činnou zátěží a akumulčním prvkem, která představovala lithium – intová baterie. Jsou zde porovnány dva různé režimy zapojení, přičemž jedno z nich tvoří model bez akumulčního prvku a druhým stavem je model, který je akumulčním prvkem opatřen. Tyto dva stavy jsou v samotném závěru práce srovnávány.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] RYCHETNÍK, V., JANOUŠEK, J., PAVELKA, J. *Větrné motory a elektrárny*. 1. vyd., Vydavatelství ČVUT, Praha 1997, 199 stran, ISBN 80-01-01563-7
- [2] EkoWATT: Větrná energie. [online]. [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: <http://www.ekowatt.cz/uspory/vetrna-energie.shtml>
- [3] ŠANTÍN, Vlastimil. *Simulace jevů způsobených připojováním a provozem větrných elektráren a farem*. Plzeň, 2012. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavla Hejtmánková Ph.D.
- [4] HALLENGA, Uwe. *Malá větrná elektrárna: návod ke stavbě s konstrukčními výkresy*. 2. přepr. a rozš. vyd. Ostrava, : HEL, 2006, 95 s. ISBN 80-861-6727-5.
- [5] MATOUŠEK, Martin. *Návrh větrné elektrárny*. Plzeň, 2013. Bakalářská. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Lenka Raková.
- [6] Větrná energie: Systémy regulace. [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: [http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie\\_9/systemy-regulace\\_27](http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie_9/systemy-regulace_27)
- [7] MASTNÝ, Ing. Petr. *Větrná energetika 2* [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: [http://www.ueen.feec.vutbr.cz/~mastny/vyuka/mmze/prednasky/05\\_pr.pdf](http://www.ueen.feec.vutbr.cz/~mastny/vyuka/mmze/prednasky/05_pr.pdf)
- [8] LEHEČKA, Martin. *Vliv větrných elektráren na provoz elektrizační soustavy*. Plzeň, 2009. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Vlastimil Šantín.
- [9] TLUSTÝ, Josef, Jan KYNCL, Ladislav MUSIL, Jan ŠPETLÍK, Jan ŠVEC, Petr HAMOUZ, Zdeněk MÜLLER a Miroslav MÜLLER. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*. Vyd. 1. Praha, 2011, 255 s. ISBN 978-80-01-04940-2.
- [10] Pravidla provozování distribučních soustav: *Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy* [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: [http://www.czrea.org/files/pdf/pravidla\\_ds.pdf](http://www.czrea.org/files/pdf/pravidla_ds.pdf)
- [11] MÁSLA, Karel. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013, 272 s. ISBN 978-80-260-4461-1.
- [12] PROKOP, Ondřej. *Role elektrárny Dukovany v elektrizační soustavě České republiky*. Brno, 2014. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=86023](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86023). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Karel Katovský Ph.D.



- [13] ČEPS a.s. [online]. [cit. 2015-04-11]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Data/Vsechna-data/Stranky/Vyroba.aspx>
- [14] ACKERMANN, Thomas. *Wind Power Systems*. Dostupné z: [http://ie.fing.edu.uy/simsee/curso2010/wind\\_power\\_in\\_power\\_systems.pdf](http://ie.fing.edu.uy/simsee/curso2010/wind_power_in_power_systems.pdf)
- [15] FOLTÝN, Petr. *Návrh malé větrné elektrárny se Savoniovým rotorem: Design of small Wind Turbine System With Savonius Rotor*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD]

