

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

Diplomová práce

VYUŽITÍ AKUMULAČNÍCH PRVKŮ PŘI PROVOZU
VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

Bc. Jakub JUNGWIRTH

2019

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub JUNGWIRTH**
Osobní číslo: **E17N0078P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Využití akumulčních prvků při provozu větrných elektráren**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování

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 diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

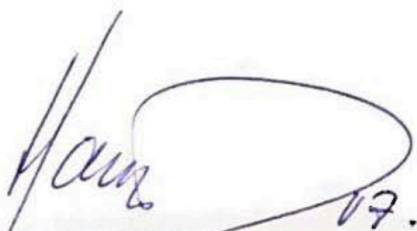
1. Malá větrná elektrárna - BEN

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

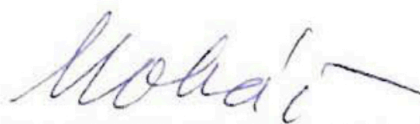
Oponent diplomové práce: **Doc. Ing. Pavla Hejtmánková, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. července 2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **21. srpna 2019**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



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

ANOTACE A KLÍČOVÁ SLOVA

Práce je zaměřena na větrné elektrárny. Týká se popisu funkce a provozu tohoto typu zdroje. Podmínky provozu. Možnosti akumulace elektrické energie. Bilance mezi výrobou a spotřebou. Simulace provozu větrné elektrárny a akumulčního prvku.

KLÍČOVÁ SLOVA

Větrná energie, elektrárna, akumulční prvek, baterie, provoz, pravidla provozu.

ANOTATION AND KEYWORDS

Master theses is focused on wind powerplants. Description of function this type of energy source. Working conditions. Possibilities of accumulation electric power. Balance between production and consumption. Simulation of wind power plant and battery system.

KEYWORDS

Wind energy, powerplant, accumulation element, battery, work, condition for work.

PROHLÁŠENÍ

Předkládám tímto k posouzení diplomovou práci, zpracovanou během mého studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, s použitím uvedené odborné literatury a pramenů a že veškerý software použitý při jejím řešení a zpracování, byl využit s respektováním všech jeho licenčních podmínek.

V Plzni, dne datum

Jméno Příjmení

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

E	Ws	energie
m	kg	hmotnost
v	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	rychlost
ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^3$	hustota
V	m^3	objem
P	W	výkon
t	s	čas
m	kg	hmotnost
ω	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	úhlová rychlost
R	m	vzdálenost/poloměr
S	VA	zdánlivý výkon
U	V	elektrické napětí
c	—	činitel flikru
A	m^2	plocha
η	%	účinnost
W	kWh	kapacita
Q	var	jalový výkon

OBSAH

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY	2
1.1 MOTIVACE PRÁCE	3
1.2 ROZDĚLENÍ PRÁCE	4
2 TEORETICKÝ POPIS	5
2.1 ENERGIE VĚTRU	6
2.2 VĚTRNÉ MOTORY	8
2.2.1 Odporový princip	8
2.2.2 Vztakový princip	8
2.2.3 Účinnost větrného motoru	9
2.2.4 Regulace větrného motoru	9
2.3 VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA	11
2.3.1 Synchronní stroj	11
2.3.2 Asynchronní stroj	12
2.3.3 Připojení	12
2.4 AKUMULACE ENERGIE	13
3 PROVOZ	14
3.1 PROVOZ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	15
3.2 DISTRIBUČNÍ SÍŤ	16
3.2.1 Podpora sítě	16
3.2.2 Přizpůsobení činného výkonu	17
3.2.3 Řízení jalového výkonu	18
3.2.4 Zpětné vlivy na síť	18
3.3 PŘENOSOVÁ SÍŤ	20
3.4 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY S ASYNCHRONNÍM GENERÁTOREM A MĚNIČEM KMITOČTU	22
3.5 PRAVIDLA PRO PROVOZ AKUMULAČNÍHO ZAŘÍZENÍ	23
3.6 SYSTÉMOVÉ SLUŽBY OBECNĚ	25
3.6.1 Primární regulace frekvence bloku	25
3.6.2 Sekundární regulace výkonu bloku	26
3.6.3 Snížení výkonu	26
3.6.4 Minutová záloha	26
3.6.5 Sekundární regulace napětí a jalového výkonu	26
3.6.6 Schopnost ostrovního provozu	26

Obsah

3.6.7	Schopnost startu ze tmy	27
3.7	VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY PRO SYSTÉMOVÉ SLUŽBY	28
3.7.1	Umělá setrvačnost	29
3.7.2	Služby výkonové rovnováhy	29
3.7.3	Akumulace	30
3.7.4	Ostatní podpůrné služby	30
4	NÁVRH VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY A SIMULACE PROVOZU	32
4.1	VÝPOČET VELIKOSTI LOPATKY	33
4.2	SIMULACE TEORIE	36
4.2.1	Model větrného motoru	37
4.2.2	Model střídače	38
4.2.3	Model větrné elektrárny	39
4.3	DYNAMICKÝ MODEL VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY SE ZÁTĚŽÍ	41
4.3.1	Zhodnocení výsledků	41
4.4	PŘECHOD DO OSTROVNÍHO REŽIMU	46
4.4.1	Zhodnocení výsledků	46
4.5	DYNAMICKÝ MODEL S BATERÍ	49
4.6	SIMULACE TOKU VÝKONU	51
4.6.1	Zhodnocení výsledků	53
5	ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR	58
5.1	SHRNUTÍ PRÁCE A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	59
5.1.1	Zhodnocení dosažených výsledků	59
A	PŘÍLOHA	61

Část 1

ÚVOD DO PROBLEMATIKY

1.1

MOTIVACE PRÁCE

ENERGETIKA využívající obnovitelné zdroje je v posledních letech na největším vzestupu. To se týká České republiky i zbytku světa. S výhledem do budoucnosti bude pravděpodobně tento rostoucí trend počtu obnovitelných zdrojů zachován. Jedním z těchto zdrojů elektrické energie jsou větrné elektrárny. Tento růst výkonu obsaženého v tomto zdroji je nejvýraznější v severovýchodních přímořských státech. Zde se tento zdroj těší oblibě díky možnosti výstavby v oblasti mimo pevninu kde je rychlost větru vysoká a navíc nevádí ve výhledu na krajinu. I v České republice se najdou oblasti využívající energii větru, i když jich není tolik a ani jedna z nich se nenachází v moři. Další oblastí, která prochází výrazným vývojem posledních let jsou akumulční články. Tento vývoj byl odstartován díky drobné elektronice a další velký pokrok přišel především díky vývoji automobilů využívající elektrický pohon (ať už hybridů či čistě elektromobilů). Díky tomu našly uplatnění tyto články i v elektroenergetice, kde dokáží dodat krátkodobě výkon využitelný při regulaci sítě. Tato práce je právě zaměřena na využití a provoz větrných elektráren, navíc doplněna o využití a provoz akumulčních článků a jejich vzájemnou spolupráci.

1.2

ROZDĚLENÍ PRÁCE

PRÁCE je rozdělena do tří částí. První část teoreticky popisuje jak lze efektivně využívat energii větru pro výrobu elektrické energie. To zahrnuje pochopení vzniku větru a popis prvků větrné elektrárny (spolupráce větrného motoru a elektrického alternátoru). Navíc teoretická část obsahuje popis možností jak akumulovat elektrickou energii.

Druhou část tvoří provoz větrné elektrárny. Zde jsou obsaženy podmínky pro připojení do sítě ať už distribuční nebo přenosové. Je zde popsána možnost řízení činného a jalového výkonu a možnosti provozu. Dále jsou zde popsány systémové služby a možnosti využití větrné elektrárny k těmto účelům.

Třetí část obsahuje návrh velikosti listu větrného motoru. Následuje několik modelů popisujících provoz elektrárny. Sledují se zde především toky výkonů, jalového a činného, přechod na ostrovní provoz a v poslední řadě využití baterie.

Část 2

TEORETICKÝ POPIS

2.1

ENERGIE VĚTRU

VĚTRNÉ proudy jsou jedny ze základních obnovitelných zdrojů energie na Zemi. Tyto proudy jsou způsobeny rozdíly tlaku vzduchu (atmosferického tlaku), které jsou důsledky rozdílu teploty. Dochází pak k proudění vzduchu z míst většího tlaku do míst s nižším tlakem. Výsledná rychlost větru úměrně závisí na velikosti rozdílu těchto tlaků. Z tohoto pohledu, by se měl vzduch nejvíce ohřívat na rovníku a stoupat vzhůru. Na jeho místo by měl proudit studený vzduch z pólů při zemi a na póly se vracet teplý vzduch, který bude klesat k zemi z horních vrstev. Dále je potřeba uvažovat, že Země rotuje kolem své osy, která je navíc nakloněna. Na směr větru pak působí odstředivé síly způsobené touto rychlostí. Dále je potřeba zmínit, že se Země pohybuje kolem Slunce, což způsobuje, že se teplota na Zemi mění i během roku a tím i proudění vzduchu. V průměru však lze přesto označit dvě pásma na Zemi s vyšším atmosferickým tlakem. Tato pásma se nachází mezi 30° - 40° jižní a severní šířky. Z těchto pásem proudí vzduch směrem k tropickému pásmu a následně k pásmu polárnímu. Tato představa je hodně zjednodušená. Směr větru deformuje mimo jiné také rozdíl ohřívání pevniny a oceánu. Dochází také k atmosferickým poruchám v důsledku občasného pohybu velkých hmot studeného vzduchu od pólu k rovníku. Rychlosti větru blízkosti povrchu ve výšce do 60m (které nás nejvíce zajímají z hlediska využití energie větru) jsou dále ovlivňovány topografií oblasti a kvalitou povrchu. To znamená že nad hladinou rybníka bude vyšší rychlost větru než nad zalesněnou krajinou, i když budou mít obě oblasti stejný tlakový rozdíl.

Jak lze vidět, proudění vzduchu na Zemi probíhá. A jelikož se jedná o pohybující se hmotu mají takové proudy určitou energii, kterou lze vyjádřit elementárním vztahem pro kinetickou energii. [1]

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Hmotnost můžeme vyjádřit pomocí hustoty vzduchu a jeho objemu.

$$m = \rho V = \rho As \quad (2)$$

Kde můžeme objem vyjádřit jako plochu protékanou vzduchem a dráhu, kterou vzduch urazí.

ENERGIE VĚTRU

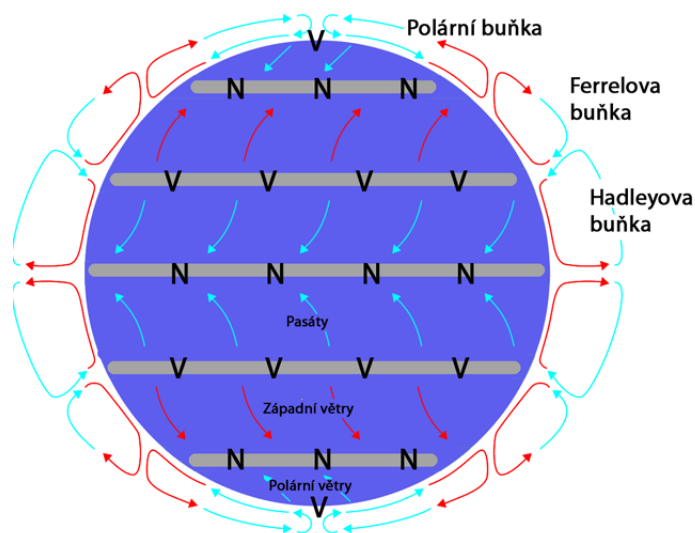
Když energii větru vydělíme časem působení, dostaneme výkon.

$$P = \frac{E}{t} = \frac{1}{2} \rho \frac{s}{t} A v^2 \quad (3)$$

Dosadíme-li rychlost větru za výraz s/t , dostaneme vzorec pro výkon větru který protéká plochou A .

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (4)$$

Lze vidět, že výkon větru je úměrný hustotě větru, ploše kterou protéká a třetí mocnině rychlosti větru. Z toho vyplývá, že při malých rychlostech větru bude výkon dodávaný větrem zanedbatelný, naopak při vysoké rychlosti větru bude výkon extrémně velký. [1]



Obr. 1: Zobrazení proudění větru na Zemi [2]

2.2

VĚTRNÉ MOTORY

ABYCHOM mohli transformovat energii větru na elektrickou energii, je potřeba nejdřív transformovat kinetickou energii vzduchu na mechanickou práci (kterou lze následně využít k pohonu generátoru). K tomu slouží tzv. větrné motory. Větrné motory lze dělit pomocí různých kritérií. Nejzákladnější a nejdůležitější dělení je dle aerodynamického principu. Dle něj dělíme větrné motory na odporovém principu a vztlakovém principu.

2.2.1 ODPOROVÝ PRINCIP

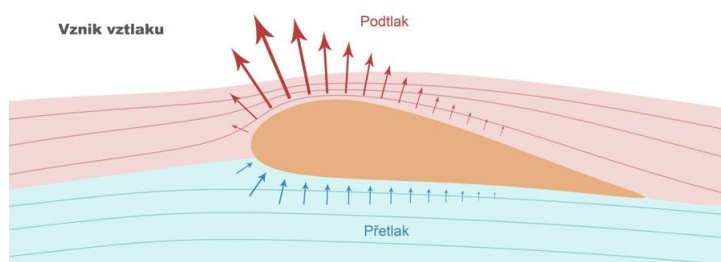
Větrné motory pracující na odporovém principu jsou nejstarší typy. Princip takového motoru je takový, že plochou (např. lopatky) nastavenou proti proudění větru mu klade aerodynamický odpor, proud vzduchu zpomaluje a tím vytváří na plochu sílu, která je mechanicky přeměněna na (nejčastěji rotační) pohyb. Na tomto principu vznikla spousta tvarů větrných kol, všechny však využívají stejný princip. Z důvodu malé účinnosti dnes nejsou pro výrobu elektrické energie prakticky vůbec využívány, proto se jimi práce více nezabývá. [1]

2.2.2 VZTLAKOVÝ PRINCIP

Druhými typy větrných motorů jsou motory pracující na vztlakovém principu. Z principu jsou takovéto větrné motory orientovány svojí rovinou otáčení kolmo ke směru větru. Motory pracující na tomto principu lze dále dělit na dvě základní skupiny a tou jsou větrná kola s vodorovnou osou a vrtule. Vrtulové motory bývají dvou nebo třívrtulové (mohou být i motory s jednou vrtulí a protizávažím), tento princip je nejvyužívanější co se týče výroby elektrické energie. Větrná kola mají jednoduché lopatky, jejichž počet se pohybuje od čtyř a více (může obsahovat i několik desítek lopatek), výhodou takového větrného motoru je, že se dokáže rozbíhat při nižších otáčkách s vyšším momentem. Naopak rotory s nižším počtem lopatek budou mít větší frekvenci otáčení než rotory s velkým počtem lopatek. [1]

Větrné motory pracující na vztlakovém principu se skládají z listů nebo lopatek na které lze pohlížet jako na rotující křídlo. Pro jejich navrhování je pak potřeba znát aero-

2.2.3 ÚČINNOST VĚTRNÉHO MOTORU



Obr. 2: Princip křídla [3]

dynamiku leteckých profilů. Zjednodušené vysvětlení je takové, že vzduch obtéká křídlo (lopatku) ve dvou rovinách. Tvar křídla je uzpůsoben tak, že jedna rovina vytvoří pro vzduch delší dráhu než druhá rovina, tento fakt způsobuje, že rychlost vzduchu je na delší dráze větší a tlak vzduchu klesá. Naopak je tomu na straně lopatky s kratší dráhou, rychlost vzduchu je menší a tlak vzduchu větší. Díky rozdílu tlaků nám vzniká působící síla na vrtuli. Natáčením vrtule pak lze regulovat sílu působící na vrtuli. [4]

2.2.3 ÚČINNOST VĚTRNÉHO MOTORU

Výkon větru byl odvozen v předchozí kapitole. Celý výkon větru však nelze využít. To je způsobeno tím, že využíváním energie větru prakticky vítr jako proudící hmotu zpomalujeme. Vítr však nelze zpomalit na nulovou hodnotu. Dle různých teoretických předpokladů byly určeny maximální účinnosti větrných motorů. Jedna z nich je tzv. Betzova ideální účinnost, která je přibližně 60% (v této úvaze je uvažován poměr rychlostí větru za motorem a před motorem $\frac{1}{3}$). Této účinnosti je však dosaženo za podmínek idealizovaného rotoru s nekonečným počtem nekonečně tenkých lopatek, na nichž by nevznikalo tření, nekonečně velkou obvodovou rychlost. Reálná účinnost je daleko pod touto ideální účinností. Je však dobré si uvědomit že i za těch podmínek které v reálu nemohou nikdy nastat, není účinnost větrného motoru větší než 60%. [4]

2.2.4 REGULACE VĚTRNÉHO MOTORU

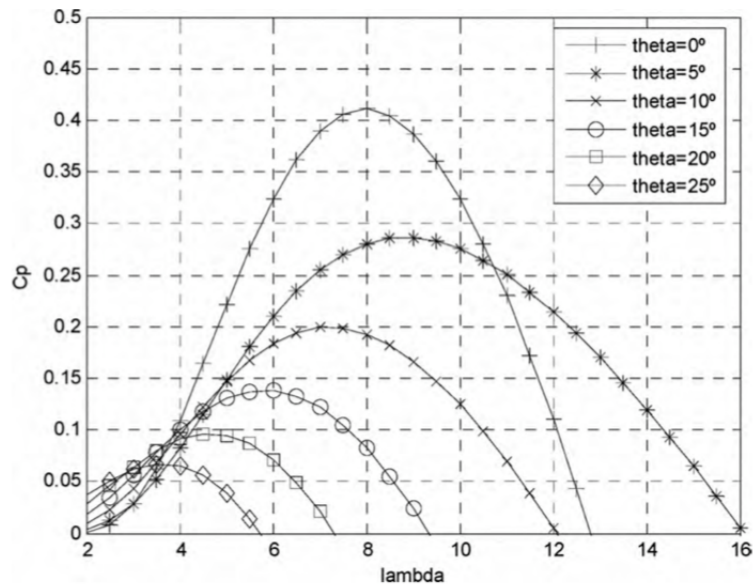
Větrný motor lze řídit pomocí natáčení lopatek. Díky tomu se mění velikost koeficientů vztlaku a odporu, na kterých je závislý výkon elektrárny. Tyto parametry jsou závislé na typu aerodynamického profilu vrtule. Pro příklad je zde vidět jak se mění C_p , což

2.2.4 REGULACE VĚTRNÉHO MOTORU

je účinnost větrného motoru na parametru lambda, který je definován níž. A na úhlu natočení lopatky, kterému se v odborné literatuře říká pitch angle. [1]

$$\lambda = \frac{\omega_w R}{v_w} \quad (5)$$

Kde ω_w je rychlost rotoru [rad/s], R je poloměr lopatky a v_w je rychlost větru. Theta v grafu značí náběžný úhel větru na lopatku.



Obr. 3: Závislost účinnosti na úhlu natočení lopatky [5]

2.3

VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA

POKUD pomocí větrného motoru získáme z kinetické energie větru mechanickou práci, lze ji přímo využít k pohonům. V dřívější době bylo této schopnosti využito pro mletí obilí, pohonu pil a jiných strojů v dílnách, později (občas i v dnešní době) bylo využito větrných motorů k čerpání vody ze studen, řek a vrtů pro zásobování vodou, zalévání či chlazení.

V dnešní době se nejvíce využívá větrných motorů pro pohon generátorů elektrické energie. Tato forma energie je nejvíce ušlechtilá. To znamená, že ji lze transformovat "jednoduše" na jiné druhy energie (např. tepelnou, nebo i zpět mechanickou).

Generátory elektrické energie se zde využívají buď synchronní, nebo asynchronní. Takovéto stroje připojené do elektrizační sítě s frekvencí 50 Hz mají synchronní otáčky od 1000 min^{-1} (pro šestipólový stroj) do 3000 min^{-1} (pro dvoupólový stroj). Z mechanických důvodů se větrné motory pro takhle vysoké otáčky nekonstruují. Aby bylo dosaženo spolupráce větrného motoru a elektrického generátoru je mezi ně vložena mechanická převodovka, díky ní se generátor roztočí na požadované otáčky.

2.3.1 SYNCHRONNÍ STROJ

Synchronní generátor je z principu složitější zařízení na konstrukci, jeho budící (většinou rotorové) vinutí je napájeno (buzeno) stejnosměrným proudem. To dává potřebu budícího obvodu, ať už kontaktní či bezkontaktní, v obou případech vzniká potřeba implementovat více zařízení (například pohyblivý kontakt pro kontaktní buzení, usměrňovač pro oba typy buzení). Pokud se jedná o bezkontaktní buzení je usměrňovač osazen na rotoru a v tomto případě vznikají větší nároky na tento usměrňovač, jelikož se pohybuje s rotorem a působí na něj odstředivé síly. Výhodou tohoto generátoru je, že díky buzení lze regulovat jalovou energii tohoto stroje, stroj tedy dokáže jalovou energii dodávat do obvodu, ale také odebírat pokud by bylo potřeba. Synchronní generátor se točí vždy synchronními otáčkami, velikost dodávaného činného výkonu pak závisí na zátěžném úhlu (úhel mezi magnetickým polem rotoru a magnetickým polem statoru). [1]

2.3.2 ASYNCHRONNÍ STROJ

2.3.2 ASYNCHRONNÍ STROJ

Asynchronní generátor má jednodušší konstrukci oproti synchronnímu, jeho rotorové vinutí tvoří pouze klec spojená nakrátko. Není zde potřeba budící obvod. Budící energie (jalová energie) je pak získávána pouze ze sítě a není schopna takovou energii dodávat. Takovýto generátor točí-li se synchronními otáčkami nedodává žádný činný výkon, ani žádný neodebírání. Aby takovýto generátor dodával činný výkon je potřeba, aby vítr roztočil rotor v nadsynchronních otáčkách. Při jmenovitém zatížení se otáčky zvýší cca o 1% až 2% synchronní rychlosti. [1]

2.3.3 PŘIPOJENÍ

Takovéto spojení větrného motoru, převodovky a generátoru lze připojit přes transformátor přímo do sítě. Takto synchronně pracující soustrojí dává výhodu pro stabilitu sítě. Chování frekvence v síti závisí na velikosti kinetické energie v soustavě. Všechny rotující stroje připojené do soustavy přímo přispívají k této kinetické energii. Setrvačnost energetické soustavy je definována jako schopnost bránit změně ve frekvenci díky odporu, který tvoří kinetická energie rotujících těles připojených do sítě.

Druhý způsob spojení větrné elektrárny se sítí je pomocí frekvenčního měniče. To dává výhodu k řízení generátoru a parametrů na výstupu. Takto připojený zdroj však ztrácí synchronní spojení se sítí a nepodílí se na stabilitě sítě. S nárůstem zdrojů takto připojených, ale také motorů připojených přes frekvenční měnič klesá stabilita. S tím přichází větší odchylky frekvence a ohrožení chodu soustavy. Jednou z možností jak tomu zamezit je vytvořit umělou stabilitu pomocí řízení měniče. Takto řízený měnič musí umět přizpůsobit zatížení generátoru, aby se choval tak jako přímo připojený k síti. [1]

2.4

AKUMULACE ENERGIE

PROBLÉMEM všech větrných elektráren (ale i jiných obnovitelných zdrojů např. fotovoltaických elektráren) je nestálá a neregulovatelná rychlost větru (popřípadě intenzita slunečního svitu) a s ní spojená výroba elektrické energie. Řešením tohoto problému může být akumulace energie. V tomto případě se nabízí přečerpávací vodní elektrárny, nebo ukládání energie v podobě tepla v tekuté soli či organickém oleji. Oba způsoby dokáží uložit velké množství energie, ovšem přeměna zpět na elektrickou energii trvá dlouho.

S vývojem akumulátorových baterií roste v posledních letech bateriové úložiště schopné pomoci regulaci sítě. Tyto baterie akumulují energii ve formě chemické energie. Nabíjení probíhá proudem, který mění reakční produkty opět na původní reaktanty. Elektrická energie se mění na chemickou. Záporná elektroda je katoda během vybíjení a anoda během nabíjení. Když dochází k vybíjení reaktant oxiduje a volné elektrony předává záporné elektrodě. V každém případě se vždy jedná o dvě elektrody v elektrolytu, který mění svůj charakter dle toho, zda je akumulátor vybitý či nabitý. Články mají napětí v hodnotách 1.1 V až 2 V. Pro vyšší hodnoty napětí je spojováno více článků v baterii. [6]

Používané nikel-kadmiové (NiCd) články jsou dnes z ekologických důvodů nahrazovány nikl-metalhydridovými (NiMH) a lithium-iontovými (Li-Ion), které mají navíc i vyšší hustotu energie. Li-On článku se vyrábí několik druhů, všechny jsou charakterizovány transportem lithiových iontů mezi elektrodami. Bateriové úložiště pomáhá regulaci sítě díky rychlé reakci. Ve světě jsou běžná úložiště o velikosti 10 MW a kapacitou 10MWh. Výjimkou je pak sestava Li-Ion baterií v Austrálii, která má výkon 100 MW a kapacitu 129 MW. V České republice se nachází bateriové úložiště o výkonu 1 MW - 1.6 MW s kapacitou 1.2 MWh - 1.75 MWh. [7]

Část 3

PROVOZ

3.1

PROVOZ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

VĚTRNÉ elektrárny jako zdroj elektrické energie nejsou z principu tak technologicky náročné jako jiné typy zdrojů a s tím souvisí jejich pořizovací a provozní cena (výjimkou mohou být fotovoltaické elektrárny, u kterých je pořizovací a provozní cena ještě nižší).

Z toho vyplývá, že je možno takovýto zdroj realizovat v nízkém výkonovém měřítku, svépomocí a bez nutnosti připojení na síť. Návrh větrného kola, elektrického generátoru, popřípadě akumulátoru a zátěže není tak složitý, stejně jako následná realizace. V České republice není mnoho míst k využití větrné energie. Krom větších zdrojů zásobujících energií energetickou soustavu lze využít tyto zdroje v oblastech, kde energetická soustava není. Stavba malých větrných elektráren je zajímavá v rozvojových oblastech. Pokud se postaví větrná elektrárna o výkonu třeba jen pár kW v místě bez připojení elektrické energie, změní se v daném místě životní úroveň. Pokud tvrdě pracující člověk udělá 80 W výkonu, potom 1 kW dá zhruba 12 tvrdě pracujících lidí. Ať už elektrárna stojí kdekoliv musí splňovat podmínky bezpečného provozu, mezi které patří především zabrzdění větrného kola při příliš vysokých rychlostech větru, pokud není odběr elektrické energie (chybí brzdny moment a elektrárna by se opět dostala do nepovolených rychlostí). Další důležitou podmínkou je, že elektrárna nesmí ovlivňovat elektrickou síť, což znamená, že musí být dostatečně galvanicky odpojena. Podmínek pro bezpečný provoz větrné elektrárny bez připojení do sítě bude víc, vzhledem k tomu, že takový provoz není příliš běžný, bude se práce dále zabývat podmínkami pro provoz větrné elektrárny, která bude pracovat s elektrickou sítí. [8]

Provoz větrné elektrárny připojené k elektrické síti musí splňovat podmínky bezpečného provozu jako by k síti připojená nebyla, avšak navíc vstupují podmínky navíc. Elektrárna v tomto případě nesmí příliš negativně ovlivňovat kvalitu energie v síti. Distribuční síť má na starost několik společností v České republice, všechny se však musí řídit pravidly pro provozování distribuční soustavy, které stanovuje Energetický regulační úřad (ERU). Přenosovou síť a regulaci kvality elektrické energie má na starost společnost ČEPS a.s., která stanovuje podmínky pro připojení zdrojů v Kodexu přenosové soustavy.

3.2

DISTRIBUČNÍ SÍŤ

Do distribuční soustavy je možno zapojit zdroje na napěťovou hladinu jak nn tak vn (popřípadě 110 kV). Minimální výkon, od kterého je potřeba připojit zdroj elektrické energie do sítě vn a maximální výkon, který je možný připojit do sítě nn závisí způsobu provozu zdroje a na síťových poměrech. Zdroje zapojené do sítě musí být navrženy tak, aby bylo vyloučeno rušivé zpětné působení na síť nebo na odběratele a jejich zařízení. Každý nový zdroj, který se připojí do distribuční sítě, musí být instalován s dálkovým ovládním (komunikační cesta mezi ovládacím obvodem a elektroměrovým rozvaděčem).

Zdroje musí být neomezeně připojeny v rozsahu frekvence 49 - 51 Hz. Větrné elektrárny s výkonem do 800 W musí být schopny trvalého provozu za podmínky, že je napětí v místě připojení v mezích $-15\% U_n$ až $+10\% U_n$. Pokud bude napětí nižší než U_n , dovoluje se snížený výstupního výkonu $P = \frac{U_n - U}{U_n} \cdot P_n$. U výroben připojených do sítě vn je požadavek pro připojení do sítě $90\% U_n$ - $118.8\% U_n$. [9]

3.2.1 PODPORA SÍŤE

Větrné elektrárny připojené do distribuční sítě musí být schopny se podílet na udržování napětí. Rozlišuje se zde mezi statickou a dynamickou podporou sítě.

Statickou podporou sítě se myslí udržování napětí ve stanovených mezích za normálního stavu, při pomalých změnách napětí. Výrobní jednotky, synchronně spojené se sítí, musí dodávat dostatečný jalový výkon, který kompenzuje jalový výkon vedení (kabelu).

Dynamická podpora sítě je udržení napětí při poklesech napětí v síti vvn zamezující nechtěnému odpojení zdrojů v síti nn (vn) a rozpadu sítě. Z toho vyplývá, že musí zdroje zůstat připojené při poruchách, během kterých dochází k poklesu napětí. V tomto případě se opět hodí kombinace větrné elektrárny a bateriového úložiště. Jelikož baterie s vhodným řízením dokáže rychle reagovat na změny v síti.

Schopnost startu ze tmy je jednou z dynamických podpor sítě. Ta se od větrných elektráren nepožaduje. Technicky schopná by toho teoreticky byla v případě, že by měla přiřazený akumulární prvek, který by byl schopný pohánět řízení dodat potřebný počáteční jalový výkon asynchronnímu generátoru. V tomto případě by muselo dojít k dodání do-

3.2.2 PŘIZPŮSOBENÍ ČINNÉHO VÝKONU

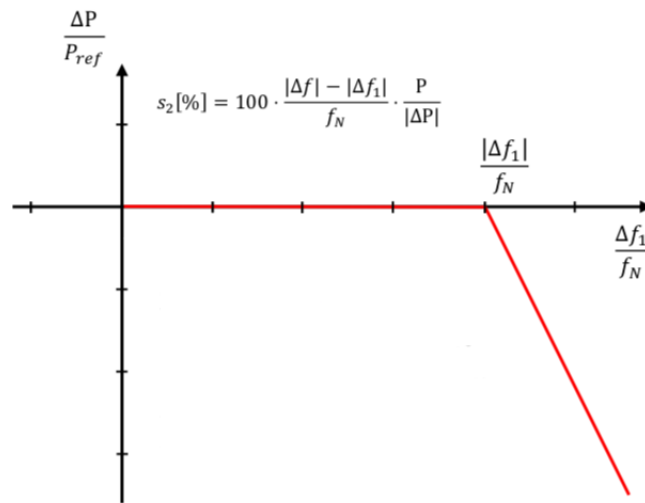
dávky do vybrané části distribuční soustavy do 30 minut od požadavku dispečinku (bez dodávky vnější elektrické energie).

Další dynamickou podporou sítě je ostrovní provoz. Jedná se o dodávku elektrické energie pouze do části elektrické soustavy. V tomto případě jsou kladeny velké požadavky na regulaci větrné elektrárny. Výrobní jednotka musí být schopna snížit svůj dodávaný výkon jak je to jen technicky možné, alespoň však o 55% své maximální kapacity. Napěťové a frekvenční podmínky zde platí stejné jak byly popsány pro běžný provoz. [9]

3.2.2 PŘIZPŮSOBENÍ ČINNÉHO VÝKONU

Všechny větrné elektrárny připojené do distribuční soustavy musí být schopny snižovat svůj činný výkon v závislosti na kmitočtu v síti, podle poměrů v síti a dle povelu dispečinku řídicího distribuční sítí. Pokud není výrobní schopna požadované regulace musí být schopna automaticky se odpojit od sítě.

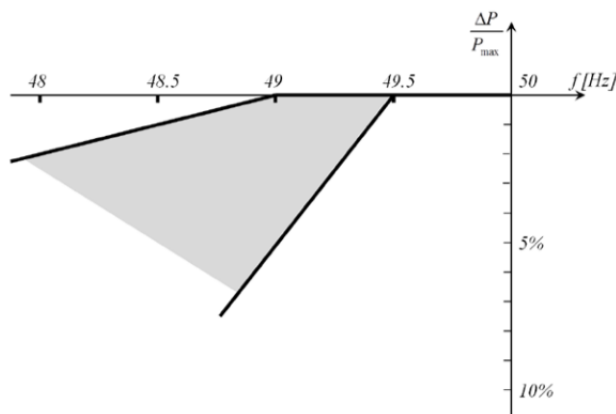
Dojde-li v síti k vzrůstu kmitočtu, musí být elektrárna schopna snížit výkon dle Obr.4. Nastavení statiky $s = 2\% - 12\%$. ΔP je změna činného výkonu na výstupu z výrobní jednotky, f_N je jmenovitá frekvence 50 Hz, Δf je odchylka od jmenovité frekvence. Dojde-li ke zvýšení frekvence kdy Δf je větší než Δf_1 , musí být výrobní schopna snížit činný výkon podle statiky s_2 . [9]



Obr. 4: Snížení činného výkonu při kmitočtu vyšším než jmenovitém [9]

Při poklesu frekvence v síti dovoluje provozovatel přenosové soustavy snížení činného výkonu dle Obr.5.

3.2.3 ŘÍZENÍ JALOVÉHO VÝKONU



Obr. 5: Dovolené snížení činného výkonu při poklesu frekvence [9]

Pro zabránění odpojení elektrárny napěťovými ochranami je dovolené snížení činného výkonu při vzrůstajícím napětí. Toto je povoleno u malých zdrojů připojených do sítě nízkého napětí.

Větrné elektrárny musí být schopny snížit svůj činný výkon na pokyn provozovatele distribuční sítě. Ten je oprávněn ke změnám v následujících případech. Bude-li ohrožení bezpečného provozu systému, mohlo by dojít k přetížení nebo nebezpečí vzniku ostrovního provozu, ohrožení stability statické i dynamické, vzrůst frekvence nebo bude-li docházet k údržbě distribuční sítě. [9]

3.2.3 ŘÍZENÍ JALOVÉHO VÝKONU

Každá elektrárna připojená do distribuční soustavy s výkonem nad 100 kVA musí mít říditelný jalový výkon. Řízení se provádí dle konkrétního místa a zdroje zapojení, nastavení jalového výkonu je buď dáno dohodnutou hodnotou, či harmonogramem, nebo se využívá on-line zadání (v tomto případě je potřeba změnu jalového výkonu provést do minuty od zadání). Pro větrné elektrárny je potřeba, aby byla regulace automatická a dostatečně rychlá z důvodu kolísajícího výkonu. Nesmí dojít k tomu, že se připojí kompenzační kondenzátory před generátorem. Při vypínání musí být opět vypnut generátor s kompenzačním zařízením současně. [9]

3.2.4 ZPĚTNÉ VLIVY NA SÍŤ

Jak již bylo zmíněno, je důležité aby větrná elektrárna negativně neovlivňovala distribuční síť.

3.2.4 ZPĚTNÉ VLIVY NA SÍŤ

V přípojném místě nesmí docházet ke změně napětí ($\Delta U \leq 3\%$ pro napájecí bod v nn, $\Delta U \leq 2\%$ v síti vn a 110k V). Je třeba dát pozor na kolísání napětí vyvolávající flikr. Dlouhodobá míra flikru značená jako P_{lt} musí být udržována v mezích $P_{lt} \leq 0.46$ pro napájecí bod nn a vn a $P_{lt} \leq 0.37$ pro napěťovou hladinu 110 kV. [9]

$$P_{lt} = c \cdot \frac{S_{ng}}{S_{kV}} \quad (6)$$

Kde P_{lt} je dlouhodobá míra flikru, c je činitel flikru (bezrozměrná veličina specifická pro dané zařízení, norma pak rozlišuje činitel flikru pro ustálený provoz a činitel flikru pro spínání a odpojování), S_{ng} je výkon větrné elektrárny a S_{kV} je zkratový výkon ve společném napájecím bodu. Jedná-li se o park, kde se nachází více větrných elektráren, je zapotřebí vypočítat dlouhodobou míru flikru P_{lt} pro jednotlivé zdroje a z toho vypočítat výslednou hodnotu flikru $P_{lt\Sigma} = \sqrt{\sum_i P_{lti}^2}$. [9]

Další nepříznivý vliv, který může nastat připojením větrné elektrárny k síti jsou proudy vyšších harmonických. To nastává u větrných elektráren připojených ke zdroji přes měnič frekvence. Elektrárny musí splňovat požadavky na velikost emise proudů jednotlivých harmonických dané normou ČSN EN 61000-3-2. Pro více zdrojů se postupuje stejně jako při výpočtu flikru, určí se přípustný proud pro jeden zdroj a následně se provede odmocnina ze součtu kvadrátů proudů stejné frekvence.

Vlastním zatížením větrné elektrárny, popřípadě zvýšeným zatížením části sítě, do které zdroj pracuje je ovlivňován signál HDO (hromadné dálkové ovládání). Výrobní smějí způsobit úroveň signálu HDO maximálně o 5% za předpokladu, že bude následně dodržena minimální přípustná úroveň, pro nn 150% U_r , vn 190% U_r , pro 110kV 200% U_r . U_r je náběhové napětí přijímače (U_r je v rozmezí 0.8 - 0.9% U_n). [9]

3.3

PŘENOSOVÁ SÍŤ

JELIKOŽ se do přenosové sítě připojují elektrárenské bloky vyšších výkonů, bude se jednat pravděpodobně u větrných elektráren o park s více zdroji. V tomto případě se bere jmenovitý výkon elektrárny jako součet všech jmenovitých výkonů větrných elektráren.

Při provozu musí být větrná elektrárna schopna dodávat trvalý výkon v rozsahu napětí přenosové sítě ($\pm 5\%$ pro 400 kV a $\pm 10\%$ pro 220 kV). Co se frekvence týče, musí být zdroj schopen dodávky výkonu bez omezení v rozsahu 49.5 Hz - 50.5 Hz.

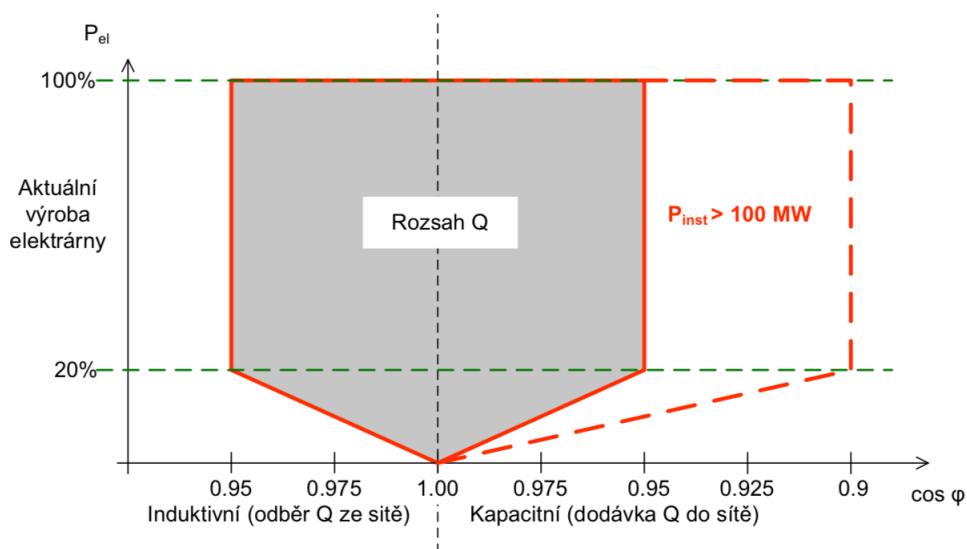
Na větrné elektrárny není kladen požadavek na primární, sekundární ani terciální regulaci. Za účelem řízení elektrizační soustavy musí být schopna snížení dodávaného výkonu minimálně o 10% z dosažitelného výkonu za minutu. Toto omezení se využívá především v případě poruch, výpadků sítě, omezení regulovatelnosti soustavy, ve chvílích, kdy by provoz větrné elektrárny zvyšoval možnost dalších výpadků či ohrožoval spolehlivý provoz. V případech, kdy dojde v síti ke zkratům ať už blízkým nebo vzdáleným, musí zdroj podporovat napětím přídatnou dodávkou jalového výkonu, pokud je tento jalový výkon k dispozici. Tato zvýšená dodávka se uplatní jak při symetrických, tak i nesymetrických zkratech. Zvýšení dodávky jalového výkonu musí následovat do 20 ms od výskytu zkratu. Doba této zvýšené dodávky je požadována do 3s po zmizení zkratu, následuje standardní režim. Toto vychází z požadavku 2% zvýšení proudu při 1% poklesu napětí.

Na frekvenci jsou také kladeny požadavky. Větrná elektrárna (větrný park) musí zůstat připojený do soustavy a pomáhat vyrovnávat bilanci výkonů ve frekvenčním pásmu 47.5 Hz - 51.5 Hz. Nesmí dojít k odpojení od sítě z důvodu odchylky frekvence. Při frekvenci nad 50.2 Hz je nutné omezit výrobu. Omezení 40% z výchozí hodnoty výkonu na 1Hz. Snižování se provádí v krocích, je požadováno omezení výkonu 5% za sekundu při nadfrekvenci. Při frekvenci 51.5 Hz je požadováno okamžité odpojení větrné elektrárny od sítě. Pokud naopak dojde k poklesu frekvence pod hodnotu 49.5 Hz, je potřeba zvýšit výrobu na maximum a zachovat připojení. Pokud však dojde k poklesu až pod 47.5 Hz musí dojít k okamžitému odpojení elektrárny od sítě. Pro rozsah 49.5 Hz - 50.2 Hz se nepředpokládá změna výroby elektrárny.

Jedná-li se o větrný park, při připojení celé skupiny nesmí dojít ke změně napětí větší než 1.5% Un. Připojení jedné z jednotek nesmí vyvolat změnu napětí větší než 0.5% Un.

Pokud dojde k odpojení celého parku vlivem poruchy, nesmí to ovlivnit napětí o více než 3% U_n .

Pro větrné elektrárny je požadován rozsah účinníku od 0.95 kapacitního do 0.95 indukčního charakteru viz Obr.6 (pokud by se jednalo o park o výkonu větším než 100 MW podmínka na rozsah je 0.90). [10]



Obr. 6: Požadavky na dodávku jalového výkonu [10]

V rámci svého regulačního rozsahu účinníku musí být větrná elektrárna schopna řídit napěťové poměry na předacím místě dle požadavku provozovatele přenosové soustavy. Musí tak být schopna i řídit konstantní účinník a napětí. Musí udržovat tyto hodnoty na požadované hodnotě a být připojena do systému ASRU (automatický sekundární regulátor napětí).

Stejně jako u distribuční sítě i zde se sleduje kvalita vyrobené energie. Flicker se bude počítat stejným způsobem $P_{Itcelk} = \sqrt{\sum_i P_{It}^2}$, kde $P_{It} = c \cdot \frac{S_S}{S_k}$ (c je koeficient flickru, který je charakteristický pro danou větrnou elektrárnu, P_{It} je výkon jednoho zdroje, S_S je zdánlivý výkon elektrárny, S_k zkratový výkon v místě připojení, P_{Itcelk} výsledný příspěvek větrné elektrárny skládající se z více jednotek. [10]

3.4

VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY S ASYNCHRONNÍM GENERÁTOREM A MĚNIČEM KMITOČTU

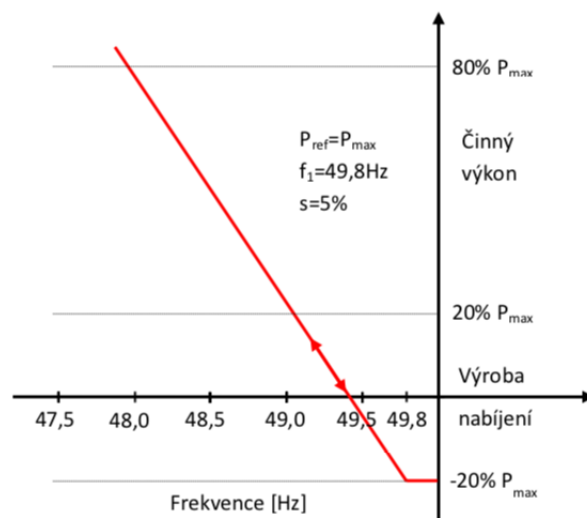
Z důvodu spolehlivé spolupráce větrné elektrárny se sítí využívá se k připojení měniče frekvence. Lze využít jednoduchého tyristorového spouštěče připojeného k asynchronnímu motoru s kotvou nakrátko nebo k přepínači počtu pólů. Jednoduchá konstrukce a malá náročnost na údržbu je výhodou. Nevýhodou je malá účinnost systému při nízkých rychlostech větru (výkon dodávaný asynchronním generátorem je závislý na nadsynchronních otáčkami). Další nevýhodou je nedostatečná kompenzace jalového výkonu, ta je pak řešena stupňovitou kompenzací připojeného kompenzačního zařízení (to přináší nežádoucí spínací vlivy). Dojde-li během připojení elektrárny k síti k prudké změně momentu na hřídeli větrného motoru (vlivem turbulence větrného proudění), takovýto řídicí systém není schopný na toto reagovat, to se projeví deformací proudu stroje a deformací napětí v místě připojení větrné elektrárny. Řešení s tyristorovým měničem využívají především větrné elektrárny s výkonem do 300 kW.

Pro větrné elektrárny velkých výkonů do 2 MW jsou využívány asynchronní generátory s vinutým rotorem spojené s měničem frekvence s rekuperační jednotkou. Stator generátoru je přímo (přes transformátor nn/vn) spojen s elektrizační sítí a vinutý rotor je napájen z frekvenčního měniče. Systém řízení měniče vyhodnocuje rychlosti větru, otáčky rotoru a přizpůsobuje momentovou charakteristiku stroje. Průběh napětí a proudu je řízen na rotoru. Řídicí systém zajistí bezpečné připojení na síť s minimálním proudovým rázem. Velké proudové rázy způsobují poklesy napětí, které nesmí být větší než je tolerance provozovatele distribuční soustavy (přenosové). Na základě daných síťových poměrů stanovuje způsob připojení k distribuční soustavě provozovatel distribuční soustavy. Z důvodu řízení jalového výkonu zdroje je třeba připojení kompenzačního zařízení. Přepínání stupňů kompenzačního zařízení musí být automatické a dostatečně rychlé. Dochází však k nežádoucím vlivům jako při kompenzaci asynchronních motorů s kotvou nakrátko. Tyto vlivy jsou však řešeny pomocí měniče frekvence. Se strojem napájeným přes měnič frekvence s vektorovým řízením je možno dosáhnout řízení magnetického toku a snížení potřebné jalové energie (řízení účinníku od 0.96 do -0.98). [11]

3.5

PRAVIDLA PRO PROVOZ AKUMULAČNÍHO ZAŘÍZENÍ

A KUMULAČNÍ zařízení, které se nachází ve výrobě, musí být schopné odezvy činného výkonu na podfrekvenci. Tato frekvenční odezva musí být poskytnuta při nabíjení i v režimu dodávky. Odezva činného výkonu na podfrekvenci je poskytována na programovatelné mezi frekvence. Minimálně mezi 49.8 Hz - 49.5 Hz. Baterie musí být schopna dodat svůj výkon, jak je to technicky možné se zpožděním maximálně do 2 s a odezvou maximálně do 30 s. [9]



Obr. 7: Frekvenční odezva činného výkonu na podfrekvenci u akumulčního zařízení [9]

Stejně jako u větrných elektráren i zde má provozovatel distribuční sítě oprávnění k pokynu snížení výkonu akumulčního zařízení (v tomto případě v obou stavech, nabíjení i vybíjení). A to ve stejných případech jako ohrožení bezpečnosti, nebezpečí přetížení, vznik ostrovního provozu a další jako v kapitole Distribuční síť přizpůsobení činného výkonu. Snížení výkonu musí být neprodlené, maximálně v průběhu jedné minuty. Sní-

PRAVIDLA PRO PROVOZ AKUMULAČNÍHO ZAŘÍZENÍ

žení musí začít do 5 sekund po obdržení pokynu na vstupním rozhraní akumulčního zařízení a sítě. [9]

3.6

SYSTÉMOVÉ SLUŽBY OBECNĚ

KE správné funkci elektrizační sítě je třeba tuto síť náležitě řídit. Jak již bylo zmíněno výše, v České republice má řízení sítě na starost společnost ČEPS a.s. Ta zajišťuje, aby byla elektrická energie dodávána v určité kvalitě (udržování frekvence a napětí) a nepřetržitě v odběrných místech soustavy. Tyto činnosti se dějí jak za běžného stavu, tak za poruchového stavu. V poruchových stavech dále řeší obnovu jmenovitého provozu, řízení ostrovních provozů, popřípadě start ze tmy. Všechny tyto činnosti se nazývají systémové služby. Dále sem patří ještě mezinárodní obchod s energií.

Prostředky k zajištění systémových služeb se nazývají podpůrné služby. Ty jsou definovány jako činnosti fyzických nebo právnických osob pro zajištění provozu elektrizační soustavy, její stability a spolehlivosti dodávky elektrické energie. Podpůrné služby se rozdělují do dvou kategorií. První jsou služby výkonové rovnováhy (zde se vyrovnává rovnováha mezi výrobou a spotřebou, tedy udržování frekvence v povolených mezích), druhou skupinou jsou ostatní podpůrné služby, které zajišťují kvalitu napětí a provoz přenosové soustavy.

Jednou z podpůrných služeb je také služba nazývaná EregZ. Tímto pojmem je označována přeshraniční dodávka elektrické energie. Ta není uskutečněna automaticky, ale na pokyn dispečera přenosové soustavy. Ten rozhoduje o využití této služby na základě aktuální situace v elektrizační soustavě. [10]

3.6.1 PRIMÁRNÍ REGULACE FREKVENCE BLOKU

Jde o službu zajišťující výkonovou rovnováhu v síti. Jedná se o automatickou funkci zajišťovanou logickými obvody primární regulace. Je to přesně definovaná změna výkonu elektrárenského bloku v závislosti na odchylce frekvence, ať už kladná či záporná. Velikost odchylky závisí na možnostech bloku a na smlouvě uzavřené mezi poskytovatelem této podpůrné služby a společností ČEPS a.s. Tato podpůrná služba probíhá do 30 s od okamžiku vzniku odchylky. Velikost regulačního výkonu je od 3 MW do 10 MW. [10]

3.6.2 SEKUNDÁRNÍ REGULACE VÝKONU BLOKU

3.6.2 SEKUNDÁRNÍ REGULACE VÝKONU BLOKU

Opět se jedná o službu výkonové rovnováhy. Využití této zálohy je dáno algoritmem sekundárního regulátoru na dispečinku ČEPS a.s. Jedná se o regulační výkon kladný či záporný, probíhající tentokrát do 10 minut od požadavku dispečinku. Velikost zálohy pak je 10 MW až 70 MW. Minimální rychlosti změny výkonu musí být 2 MW/min. [10]

3.6.3 SNÍŽENÍ VÝKONU

Je to podpůrná služba, která poskytuje snížení výkonu bloku (či úplné jeho odstavení) do 30 min. Zde se jedná pouze o zápornou regulační energii, jejíž minimální velikost musí být 30 MW. Služba se využívá pro snížení dodávky el. energie do sítě a odregulování výkonové nerovnováhy při značné záporné odchylce. V situacích, kdy tato odchylka vzniká nedodržením sjednaných diagramů, v rozsahu přesahující možnost odregulování pomocí sekundární regulace nebo minutové zálohy. [10]

3.6.4 MINUTOVÁ ZÁLOHA

Poslední službou zajišťující výkonovou rovnováhu, jsou minutové zálohy. Jedná se buď o 5 min. nebo 15 min. V obou případech jde o kladný i záporný regulační výkon. V případě 5 minutové zálohy se jedná o minimální velikost regulačního výkonu 30 MW, který musí být garantován alespoň po 4 hodiny. Pro 15 min. zálohu se jedná o velikost výkonu minimálně 70 MW, a blok musí být schopen dodávat tento výkon po neomezenou dobu. [10]

3.6.5 SEKUNDÁRNÍ REGULACE NAPĚTÍ A JALOVÉHO VÝKONU

V tomto případě se již nejedná o službu výkonové rovnováhy. Tato služba zajišťuje kvalitu elektrické energie z hlediska hladiny napětí. Jedná se o automatické udržování hodnoty napětí v pilotních uzlech. Tento systém musí být schopen spolupracovat s prostředky teriální regulace napětí a jalových výkonů (to znamená na úrovni celé propojené regulované soustavy). [10]

3.6.6 SCHOPNOST OSTROVNÍHO PROVOZU

Další podpůrnou službou je schopnost ostrovního provozu. V tomto případě elektrárenský blok nepracuje do celé propojené soustavy, ale pouze do určité oddělené části tzv. ostrova. Na blok zajišťující tuto podpůrnou službu jsou kladeny vysoké regulační nároky. Jelikož takovýto ostrov nepředstavuje tak vysoce tvrdou síť jakou je celá energetická soustava dochází zde k častějším a také vyšším odchylkám frekvence a napětí, na

3.6.7 SCHOPNOST STARTU ZE TMY

kteře musí být blok schopn reagovat. Ostrovní provoz je nezbytný pro předcházení nouzových stavů (např. rozpad sítě). Regulační režim ostrovního provozu je spuštěn automaticky při poklesu frekvence pod 49.8 Hz a při zvýšení frekvence nad 50.2 Hz. Při ostrovním provozu je třeba zajistit stabilní spolupráci s ostatními bloky zapojenými do ostrovu. [10]

3.6.7 SCHOPNOST STARTU ZE TMY

Jedná se o spuštění bloku bez pomoci vnějšího zdroje napětí. Za této podmínky musí blok dosáhnout jmenovitých otáček, jmenovité hodnoty napětí. Musí být schopn připojení k síti a jejího napájení v ostrovním provozu. Schopnost startu ze tmy je nezbytná pro obnovení dodávky po úplném nebo částečném rozpadu sítě. [10]

3.7

VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY PRO SYSTÉMOVÉ SLUŽBY

JAK bylo řečeno v předchozí kapitole, systémové služby zajišťují stabilitu sítě (udržení frekvence v dovolených mezích díky vyrovnání výroby a spotřeby). Každý točivý stroj, který je synchronně připojený k síti, napomáhá svojí setrvačností udržovat soustavu stabilní během odchylek výroby a spotřeby. Pokud dojde ke změně výroby nebo spotřeby, setrvačnost těchto strojů zamezuje pokles či růst frekvence nad nekontrolovatelnou hodnotu, a to ještě před reakcí regulátorů primární regulace bloků.

Nárůst počtu větrných elektráren v síti přináší problém se snižující se stabilitou elektrizační soustavy a její setrvačností. Důvodem je, že větrné elektrárny nemají synchronní rychlost dle sítě, a také to, že moderní elektrárny jsou připojeny přes frekvenční měnič, čímž odpadá synchronní propojení se sítí.

Při snížené setrvačnosti jsou odchylky frekvence vyšší a rychlejší. V síti, kde by se nacházelo příliš zdrojů, které svým provozem nepřispívají k setrvačnosti soustavy, by mohlo dojít k situaci, že by primární regulace nedokázala dostatečně rychle vyrovnat odchylky mezi výrobou a spotřebou. V nejhorším případě by mohlo dojít k úplnému rozpadu sítě a black outu.

Tradiční provoz větrných elektráren je takový, že výkon dodávaný do sítě je maximalizován dle možnosti elektrárny. Tedy tak, aby byla energie větru co nejvíce využívána. V tomto případě není možnost, aby byly takoveto zdroje energie využívány pro regulaci frekvence, jelikož při vysoké rychlosti větru dodávají více výkonu do sítě a při nízké rychlosti větru méně. To způsobuje výkyvy frekvence v síti, které je pak zapotřebí regulovat pomocí klasických elektráren (využívající tepelné oběhy). Tyto klasické elektrárny musí držet výkonovou zálohu, v situacích, kdy dochází k odchylce frekvence, která je způsobená změnou rychlosti větru.

Trend moderní doby je takový, že je vyvíjen tlak na budování více obnovitelných zdrojů, jako jsou fotovoltaické elektrárny a právě i větrné elektrárny. To znamená, počet těchto zdrojů (nepřispívajících přirozeně ke stabilitě sítě) je rostoucí a pravděpodobně bude nadále růst i v blízké budoucnosti. Klasický provoz větrných elektráren tedy není možný provozovat stále, jelikož při vysokém počtu by se síť stala neregulovatelnou.

Aby bylo možné zvyšovat počet těchto zdrojů v síti, je třeba přistoupit k řízení větrných elektráren odlišným způsobem. V České republice, kde nemá větrná energetika až tak vysoké zastoupení, není toto téma tak aktuální jako v zahraničních státech, kde

3.7.1 UMĚLÁ SETRVAČNOST

větrné elektrárny přispívají svojí výrobou podstatně větší částí. Každý z těchto států řeší tuto problematiku vlastním způsobem, princip se však dost podobá. [12]

3.7.1 UMĚLÁ SETRVAČNOST

V prvé řadě je potřeba, aby i větrné elektrárny přispívaly setrvačností k stabilitě sítě. Jelikož tato vlastnost není pro tyto zdroje přirozená, je třeba ji vytvořit uměle. To je možné udělat pomocí řízení větrné elektrárny. Je zapotřebí, aby byla sledována frekvence v síti, a podle toho přizpůsoben dodávaný výkon elektrárny. Při nízké rychlosti větru je toho možno dosáhnout pomocí kinetické energie uložené v rotujícím rotoru s turbínou. Tato energie je opětovně dodána zpět ze sítě, aby se elektrárna vrátila do svého jmenovitého stavu. Pokud je rychlost větru vyšší, je možné pomocí řízení (natáčení lopatek) dodat výkon do sítě pomocí krátkodobého přetížení elektrárny. Obě varianty potřebují ke své funkci přesné měření aktuálního stavu sítě i vlastní elektrárny. [13]

3.7.2 SLUŽBY VÝKONOVÉ ROVNOVÁHY

Dále by bylo dobré, aby se větrné elektrárny podílely na primární a sekundární regulaci výkonu sítě. To však nebude možné s tradičním způsobem provozu. Především pak, bude-li potřeba kladného regulačního výkonu. Elektrárna, která pracuje na svůj maximální výkon, není schopna dlouhodobě dodávat regulační výkon navíc. Docházelo by k dlouhodobému přetížení, což není dobré pro zařízení jako takové. Větrná elektrárna nabízí dobrou možnost záporného regulačního výkonu díky relativně snadné regulaci pomocí natočení lopatek. Navíc není problém elektrárnu zastavit úplně a popřípadě znovu najet. Tady je značná výhoda oproti klasickým elektrárnám, které při odpojení od sítě musí zůstat alespoň ve svém vlastním ostrovním provozu. Jedná-li se o větrný park, je možnost postupného odpojení jednotlivých větrných elektráren (je třeba brát ohled na zpětné vlivy na síť, není dobré rázem odpojit velký výkon). Tyto zdroje je však možné provozovat i pro regulační zálohu kladnou. V tomto případě je potřeba, aby elektrárna měla určitou výkonovou rezervu. V praxi to znamená, že elektrárna nebude vyrábět maximální výkon, kterého je schopna. Bude docházet k tomu, že energie větru nebude plně využita. Pro primární regulaci výkonu je zapotřebí vlastního automatického regulátoru na turbíně, který bude dávat povel na natáčení lopatek dle odchylky frekvence v síti. Při sekundární regulaci bude docházet k regulaci výkonu až na povel dispečera provozovatele přenosové soustavy. [13]

Přestože nejsou podpůrné služby po větrných elektrárnách požadovány, služba snížení výkonu (do 30 min.) nedělá tomuto zdroji problém. Stejně tak jeho odstavení.

Pro minutové zálohy samotná elektrárna není vhodná. Jedná se zde o výkonovou rezervu, která musí být garantována po dobu 4 hodin v případě 5minutové zálohy a po neomezenou dobu v případě 15minutové zálohy. Pro zápornou výkonovou zálohu zde

3.7.3 AKUMULACE

není problém, ten však nastane pro kladný rezervovaný výkon. Zde není možnost garantovat potřebnou sílu větru po neomezenou dobu.

3.7.3 AKUMULACE

V případech, kdy není dostatečná rychlost větru a elektrárna je odstavena, vzniká problém s možností nejen minutových záloh, ale také primární a sekundární regulace, prakticky není možné zajistit ani snížení výkonu, jelikož žádný výkon není dodáván. Pokud k tomu dojde, musí výkonovou rovnováhu zajistit jeden z klasických zdrojů elektrické energie. Jsou-li však tyto zdroje nahrazovány, je třeba hledat jiné řešení. To se nabízí v akumulaci elektrické energie. Možností akumulace je několik, jak již bylo zmíněno v teoretickém úvodu. Například přečerpávací vodní elektrárny jsou zdrojem velkého regulačního výkonu, který je k dispozici během pár minut. Je-li však potřeba vysoce rychlá frekvenční záloha, je možnost využít bateriových stanice. Využití tohoto systému prochází velkým růstem, stejně jako obnovitelné zdroje, to z důvodu možnosti vzájemné spolupráce. Bateriové systémy mohou dodat požadovaný regulační výkon, ať už kladný či záporný (v závislosti na nabití baterie) s dostatečnou rychlostí v případech, kdy toho nejsou větrné elektrárny schopny. Pokud bude větrná elektrárna provozována se sníženým výkonem, je možnost baterii opět dobít pomocí rezervovaného kladného regulačního výkonu, který není zrovna využíván. Nebo je možnost baterii dobíjet pomocí výkonu ze sítě ve chvíli, kdy je v síti nerovnováha v podobě přebytku výroby jiných zdrojů. Nevýhodou pak je omezení v kapacitě a výkonu baterie. Pro dodání vysokého výkonu po dobu několika hodin, je potřeba stavět velké bateriové stanice, jejichž investiční náklady jsou vysoké. Následně je důležité klást velký důraz na správné řízení baterie, jelikož takovýto systém je připojen k síti pomocí frekvenčních měničů. Zde vznikají problémy s vyššími harmonickými, které je potřeba důkladně filtrovat.

3.7.4 OSTATNÍ PODPŮRNÉ SLUŽBY

Regulace napětí v síti je spojena s produkcí či spotřebou jalové energie. Ve většině případů větrných elektráren se jedná o asynchronní motory, které jsou spotřebiteli jalového výkonu (mají induktivní charakter). Z tohoto důvodu je nutné je správně kompenzovat. Tím docílíme, aby elektrárny neměly negativní vliv na napětí v síti. V tomto případě však není možnost dodávat regulační jalový výkon, jelikož kompenzační zařízení jsou ve většině případů pouze k vykompenzování daného stroje. Pro dodání jalové regulační zálohy je však možnost využít asynchronní motor s řízením na rotoru. Zde se jedná o vinutý rotor napájený přes rekuperační měnič frekvence. [11]

Pro ostrovní provoz lze využít větrné elektrárny pouze s kombinací klasického zdroje nebo s kombinací dobře dimenzovaného akumulačního prvku, jakým mohou být bateriové stanice. Větrné elektrárny jsou dobře regulovatelné, především ty, které jsou pro-

3.7.4 OSTATNÍ PODPŮRNÉ SLUŽBY

vozovány s řízením na rotoru. Chceme-li však zajistit nepřerušenu dodávku elektrické energie, je zapotřebí mít určitou zálohu pro chvíle bezvětří.

V případě schopnosti startu ze tmy zde mohou být využity větrné elektrárny s permanentními magnety, které nepotřebují externí buzení. Stále je zde však nezaručená potřebná rychlost větru. Větrné elektrárny využívající asynchronní stroj nejsou schopny dodat elektrický výkon bez pomoci cizího zdroje. Řešením je pak opět akumulární zařízení, jakým může být bateriové úložiště připojené k větrné elektrárně. Takováto baterie může dodat potřebný počáteční výkon pro start a vybuzení elektrárny, která je sama schopna fungovat a popřípadě napájet další zdroj, popřípadě část sítě (ostrov). A tímto způsobem znovu obnovit dodávku v síti.

Část 4

NÁVRH VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY A SIMULACE PROVOZU

4.1

VÝPOČET VELIKOSTI LOPATKY

VĚTRNÁ elektrárna bude relativně malého výkonu 10 kW. Tento výkon bude požadován při rychlosti větru 12 m/s. Elektrárna bude připojena ke spolupráci s rodinným domem a baterií která bude fungovat jako záloha pro případ bezvětří. V každém případě bude systém připojen k síti nízkého napětí a přebytek vyrobené energie bude odeslán do sítě.

V prvé řadě je potřeba zjistit, jak velkou plochu potřebujeme pokrýt lopatkami, aby na výstupu větrného motoru byl potřebný výkon. Jestli je očekáván výkon 10 kW na výstupu z generátoru, je třeba započítat jeho účinnost a také účinnost větrného kola. V některých případech je třeba ještě započítat účinnost převodovky. V tomto návrhu je uvažován systém bez převodovky, místo toho se zde nachází frekvenční měnič. Ztráty na měniči jsou zanedbatelné oproti předchozím dvou, tedy budou v návrhu zanedbány.

Výpočet potřebného celkového výkonu.

$$P_c = \frac{P_e}{\eta_g \eta_{vm}} = \frac{10 \text{ kW}}{0,8 \cdot 0,4} = 31,25 \text{ kW} \quad (7)$$

Kde P_e je požadovaný elektrický výkon 10 kW, η_g je účinnost generátoru 80%, η_{vm} účinnost větrného motoru 40%.

Teď je třeba zjistit plochu potřebnou k dosažení takového výkonu. K tomu lze využít vztah z teoretického úvodu.

$$P_c = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (8)$$

Kde ρ je hustota vzduchu, v tomto případě je počítáno s hodnotou 1,2 kg/m³ což odpovídá 21°C. A je potřebná plocha, je to hodnota, kterou je potřeba vyjádřit a zjistit. Poslední člen je jmenovitá rychlost v vzduchu třetí kvadrát. Pro tento výpočet je zde hodnota 12 m/s.

$$A = \frac{2P_c}{\rho v^3} = \frac{2 \cdot 31,5 \cdot 10^3}{1,2 \cdot 12^3} = 30,38 \text{ m}^2 \quad (9)$$

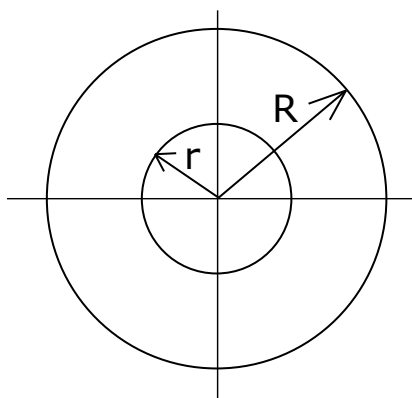
VÝPOČET VELIKOSTI LOPATKY

Následně je potřeba určit velikost lopatky. Je třeba uvažovat určitý průměr rotoru a taky fakt že v oblasti rotoru se nevytváří moc efektivní síly. Vnější a vnitřní průměr je navrhnout, že lopatka začíná až v 1/3 vzdálenosti od středu viz Obr.8.

$$R = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{30,38}{\pi}} = 3,6m \quad (10)$$

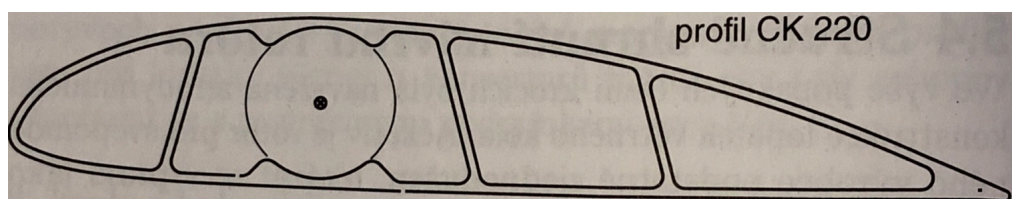
$$r = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \frac{30,38}{\pi}} = 1,8m \quad (11)$$

Vnější poloměr lopatky R vyšel $3,6 m$. Vnitřní poloměr lopatky $1,8 m$. Průměr větrného motoru je $7,2 m$. To už je velký průměr, to je způsobeno tím, že elektrárna pracuje při relativně nízké rychlosti větru. Při rostoucí rychlosti větru se znatelně snižuje potřebný průměr rotoru.



Obr. 8: Zobrazení vnějšího a vnitřního poloměru lopatky

Profil lopatky musí mít aerodynamické parametry přijatelné pro tyto účely. Pro příklad je uveden profil CK220. Jeho výhodou je jednoduché provedení.



Obr. 9: Aerodynamický profil CK220 [8]

V rozsahu $500 W$ až $5 kW$ je doporučen počet lopatek $3 - 12$. Zde volíme variantu tři lopatek, což je nejtradičtější provedení.

VÝPOČET VELIKOSTI LOPATKY

Pro tento počet lopatek odpovídá ideální koeficient rychloběžnosti 3,5 – 6. Ten určuje kolikrát se otáčí rotor rychleji než je rychlost větru. Zde bude uvažována hodnota 4. Čím menší bude koeficient rychloběžnosti, tím snazší je rozběh rotoru.

Pro konkrétní výpočet je ještě nutno určit hloubku lopatek. Ta se mění v závislosti na vzdálenosti od středu rotoru. Pro tento výpočet tuto hodnotu nebudeme uvažovat. Navíc je třeba znát přesné parametry profilu (koeficienty vztlaku a odporu).

Parametry větrné elektrárny	
Vnější průměr R [m]	3,6
Vnitřní průměr r[m]	1,8
Výkon generátoru P [kW]	10
Účinnost generátoru η	80 %
Účinnost větrného motoru η	40 %
Koeficient rychloběžnosti k_e	4
Počet lopatek n	3
Profil	CK220

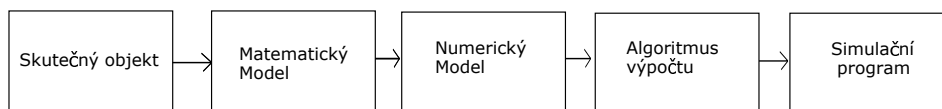
Obr. 10: Parametry větrné elektrárny

4.2

SIMULACE TEORIE

PRO ověření funkčnosti větrné elektrárny se využívají matematické modely. Z teoretických předpokladů lze pak na modelu simulovat provoz elektrárny. To se využívá ještě před samotnou výstavbou díla. Díky tomu je možné pozorovat provozní charakteristiky elektrárny spolu s negativními vlivy jaké může mít na síť. Z těchto znalostí se pak dá posoudit, zda je možné elektrárnu v daném místě stavět s ohledem na síť a ekonomické zhodnocení projektu.

Vztahy mezi jednotlivými veličinami se popisují pomocí lineárních, nelineárních, diferenciálních rovnic a jejich soustav. Pomocí vhodně zvolené metody pro výpočet těchto soustav lze získat potřebný výsledek popisující provoz elektrárny. Jelikož pro popis složitých systémů jakým elektrárny jsou, vznikají soustavy obsahující velký počet složitých rovnic. K jejich řešení využívá numerických metod, které jsou řešeny s pomocí výpočetní techniky. Proces matematického modelování je zobrazen na Obr.11.

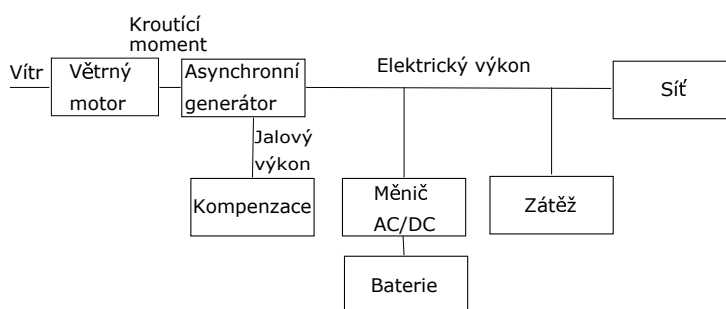


Obr. 11: Simulační proces [14]

Model větrné elektrárny s akumulacním prvkem lze rozdělit do více jednodušších bloků. V první řadě je to elektrárna, která se skládá z větrného motoru, alternátoru a řízení. Popřípadě zde najdeme kompenzaci, jedná-li se o asynchronní alternátor. Dále je to blok s baterií, který potřebuje měnič frekvence. Ten musí být schopen jednak usměrňovat v případě nabíjení a střídat elektrický proud, v případě vybíjení baterie. Následuje blok spotřeby a sítě. Síť se pak dá ještě rozdělit na zdroj, transformátory a vedení. Zjednodušené schéma je na Obr.12.

Pro tyto výpočty lze využít různých simulačních programů. V této práci je využit program Matlab a jeho simulační prostředí Simulink. Výhoda tohoto prostředí je taková, že již obsahuje předem vytvořené bloky, které při správném nastavení a propojení dokáží vytvořit požadované průběhy.

4.2.1 MODEL VĚTRNÉHO MOTORU



Obr. 12: Zjednodušené blokové schéma větrné elektrárny s akumulací

4.2.1 MODEL VĚTRNÉHO MOTORU

Zde se jedná o větrný motor pracující na vztlakovém principu. To z důvodu, že je to momentálně nejefektivnější způsob využití energie větru. Proto je to nejvyužívanější princip pro větrné elektrárny. Energie získaná z větrného motoru vychází z energie větru, která je popsána v teoretickém úvodu. Tato energie je pak vynásobena účinností větrného motoru C_p . Účinnost C_p je závislá na koeficientu rychloběžnosti λ a na úhlu natočení lopatek β

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\beta, \lambda) \quad (12)$$

A zde značí využitelnou plochu lopatek, ρ značí hustotu vzduchu a v rychlost větru.

Účinnost turbíny je dána profilem lopatky. Ten se může měnit se vzdáleností od středu. Vzniká pak složitý vztah obsahující koeficienty charakterizující profil lopatky.

Účinnost turbíny C_p lze také vypočítat jako poměr výkonu mechanického turbíny P_t a výkonu rychlosti větru P .

$$C_p(\beta, \lambda) = \frac{P_t}{P} \quad (13)$$

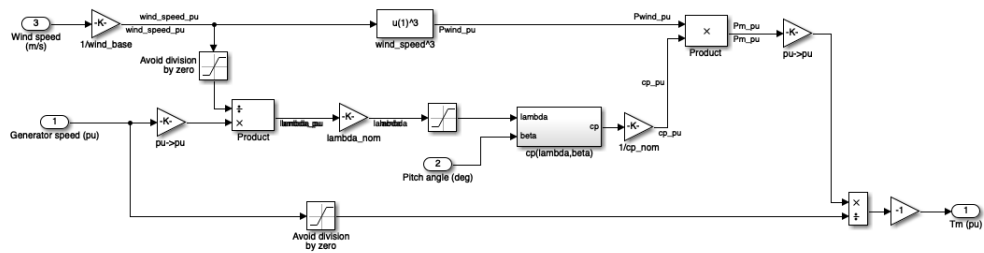
Koeficient rychloběžnosti λ byl také odvozen v teoretickém úvodu jako poměr rychlosti turbíny ku rychlosti větru.

Model takového větrného motoru je obsažen v knihovně Simulink. Zobrazení tohoto modelu je na Obr.13.

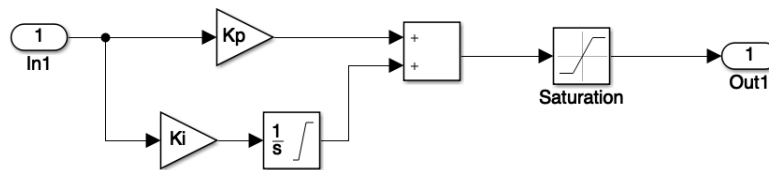
Tento připravený model pracuje s poměrnými veličinami, je důležité tedy zadat výkon turbíny, dále omezující velikost úhlu natočení lopatek a nominální rychlost větru. Vstupem do modelu jsou pak rychlost větru, rychlost turbíny a natočení lopatek.

Ke správné regulaci elektrárny je třeba zajistit regulaci natočení lopatek. K tomu je možné využít PI regulátor. Pomocí tohoto regulátoru lze simulovat stavy elektrárny například při vyšších rychlostech větru než je jmenovitá. Regulátor je zobrazen na Obr.14.

4.2.2 MODEL STŘÍDAČE



Obr. 13: Model větrné turbíny



Obr. 14: Model regulace natočení lopatek

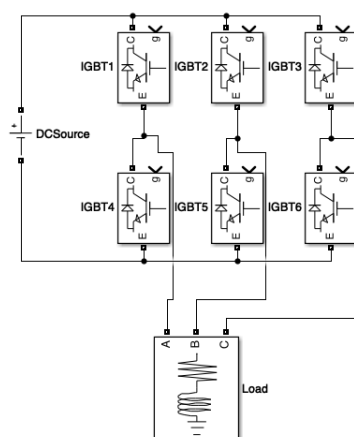
4.2.2 MODEL STŘÍDAČE

Pro modelování elektrárny s možností akumulací do baterie je možno využít připraveného bloku pro baterii. Ten nabízí možnost výběru ze čtyř druhů baterií. Pro tento model byla vybrána Lithium-ionová baterie. Důvodem je její vysoká kapacita a proudové zatížení. Z těchto důvodů se také stále zvyšuje její použití v dnešní době.

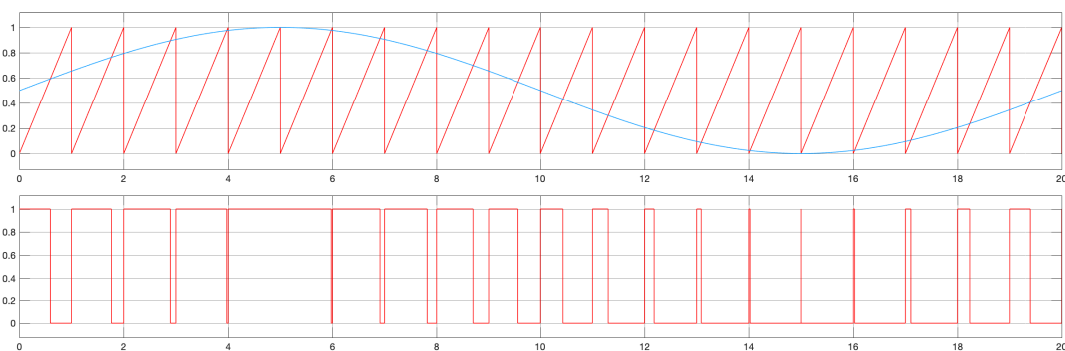
Aby baterie správně fungovala v propojení se střídavou sítí, je zapotřebí frekvenční měnič. Pro nabíjení baterie by stačil obyčejný diodový můstek. Zde je ovšem potřeba, aby baterie dodávala energii zpátky do sítě dle potřeby zátěže. Pro tyto účely je zapotřebí využít spínací elektroniku. Konkrétně jsou zde využity spínací prvky IGBT tranzistory se zpětnými diodami. Schéma zapojení je vidět na Obr.15.

Tento střídač lze využít i jako usměrňovač při správním řízení spínání. Řízení se provádí pomocí pulzně šířkové modulace (PWM - pulse width modulation). PWM signál vznikne pomocí pilového vysokofrekvenčního signálu a sinusového signálu, jehož frekvence odpovídá frekvenci, která je potřeba na výstupu ze střídače. Zobrazení PWM modulace je vidět na Obr.16. Pro spolupráci se sítí je zapotřebí sledovat základní harmonickou síť 50 Hz a tou modulovat řídicí signál pro střídač. Díky tomu lze dosáhnout synchronní spolupráce se sítí.

4.2.3 MODEL VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY



Obr. 15: Model střídače



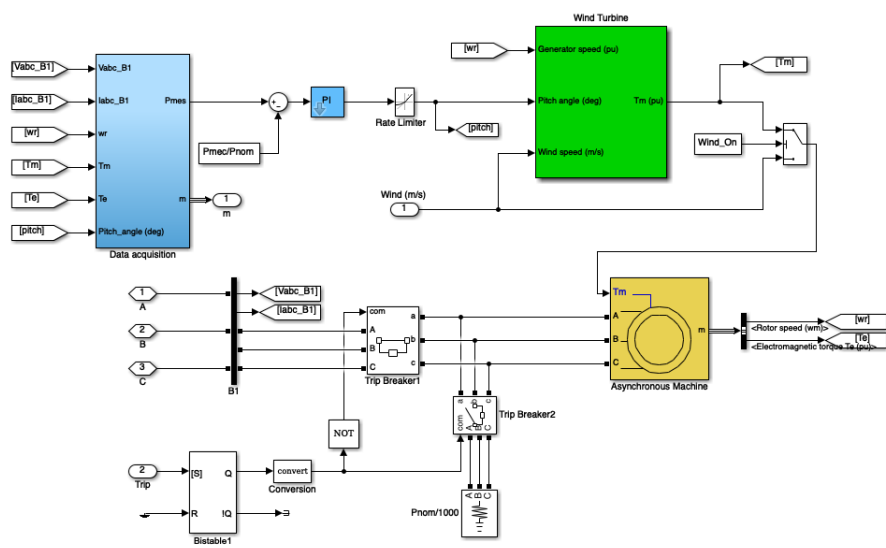
Obr. 16: Pulzně šířková modulace

4.2.3 MODEL VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

Dynamický model lze využít ke sledování dějů trvajících krátký časový interval řádově sekundy a méně. Například pokud je třeba sledovat přechodné děje vznikající během připojení nebo odpojení elektrárny. Lze také sledovat činné a jalové výkony během rozběhu elektrárny nebo regulaci způsobenou měnící se rychlostí větru.

Pro tyto účely je zde využit připravený blok z knihovny Simulink, který obsahuje jednotlivé bloky popsané dříve v práci. Jedná se o blok větrné turbíny a její regulaci natočení lopatek. K tomu je připojen asynchronní motor využívaný v režimu generátoru. Režimu generátoru se dosáhne řízením vstupního momentu asynchronního motoru. Ten je dodáván pomocí větrné turbíny (pro režim generátoru musí být poměrná hodnota momentu turbíny záporná). Blokové schéma bloku větrné elektrárny je zobrazeno na Obr.17.

4.2.3 MODEL VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY



Obr. 17: Vnitřní model větrné elektrárny

4.3

DYNAMICKÝ MODEL VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY SE ZÁTĚŽÍ

NÁSLEDNĚ byl celý blok větrné elektrárny propojen se zátěží a se zdrojem střídavého napětí představující síť. Propojení mezi zátěží a sítí je tvořeno vedením, které je znázorněno pomocí π článků. Vedení od větrné elektrárny k zátěži je dlouhé 200 m. Zdroj střídavého napětí je pak připojen pomocí třífázového transformátoru 22/0.4 kV o výkonu 8 MW. Vedení směřující od transformátoru k zátěži je dlouhé 5 km. K elektrárně je dále připojena kompenzace, aby nebyl přenášen zbytečně velký jalový výkon ze sítě. Ta je řešena dvěma stupni. Větrná elektrárna je nastavena na výkon 10 kW stejně jako zátěž. Celé blokové schéma je zobrazeno na Obr.18. Momentálně se jedná o variantu bez připojené akumulace.

Zbylé parametry větrné elektrárny jsou vypsány v tabulce na Obr.19. Některé z veličin jsou v poměrných jednotkách. Tyto hodnoty jsou vztaženy k jmenovitému výkonu elektrárny.

Simulace bude probíhat od rychlosti větru 9 m/s a bude se během 5 s zvyšovat až do rychlosti větru 14 m/s. Celková doba simulace je 10 s. Je zde sledován jak činný výkon, tak i jalový výkon elektrárny. Dále jsou sledovány výkony sítě, opět se jedná o činné i jalové. Aby docházelo k co nejmenšímu přenosu jalového výkonu ze sítě, je zde vytvořena dvoustupňová kompenzace. Ta v čase 4 s zvýší svůj kompenzační výkon z 1500 var na 4500 var. V poslední řadě je zde sledován úhel natočení listu vrtule.

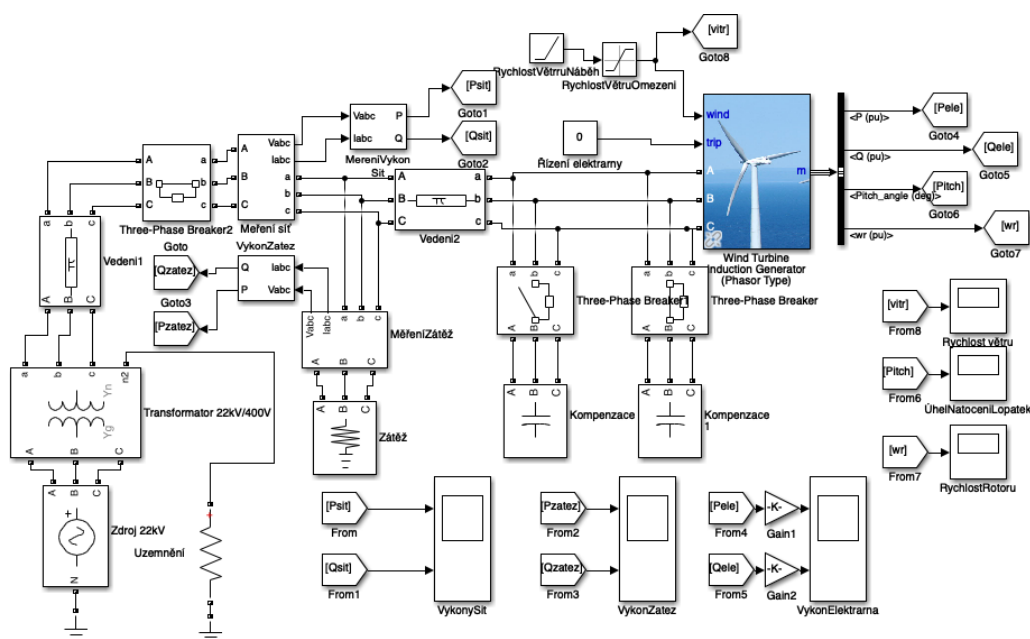
4.3.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Jak bylo řečeno, průběh rychlosti větru je stoupající. Stoupá od 9 m/s do 14 m/s a to po dobu 5 s. Následně se rychlost větru ustálí na 14 m/s a celá simulace pokračuje do 10 s.

Výkon elektrárny je z počátku kmitavý, ať se jedná o činný či jalový výkon. To se projevuje i na výkonu dodávaného sítí. Tento jev je způsoben rozjezdem asynchronního motoru. Během první půl sekundy dochází velkému odběru jalového a dokonce i činného výkonu. Kmitání však ustane do první sekundy simulace.

Následně lze pozorovat jak elektrárna dodává snížený činný výkon, to z důvodu nízké rychlosti větru. Do chvíle než se dostane vítr na svou jmenovitou hodnotu, musí odběr zátěže pokrývat síť. Jmenovité hodnoty větru se dosáhne v čase 3 s elektrárna dodává jmenovitý výkon, který pokrývá zátěž a není nutno dodávat činný výkon ze sítě.

4.3.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ



Obr. 18: Model elektrárny bez akumulace se zátěží

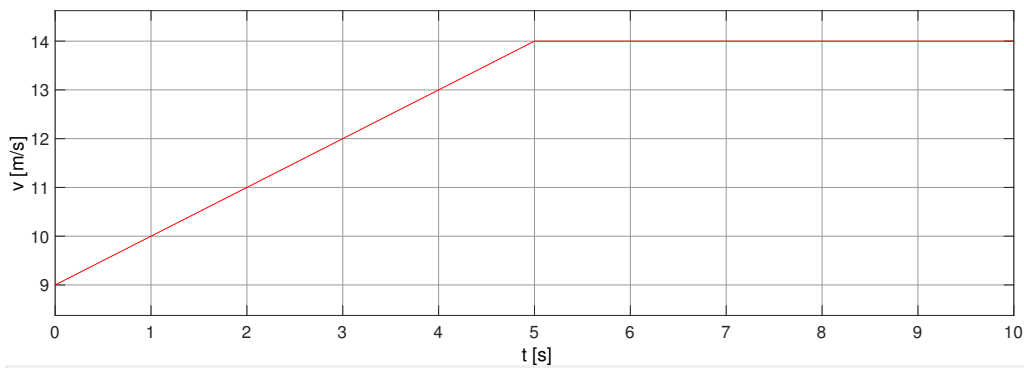
Jmenovitý výkon [kW]	10
Napětí [V]	400
frekvence [Hz]	50
Odpor stator [pu]	0,004843
Indukčnost statoru [pu]	0,1248
Odpor rotor [pu]	0,004377
Indukčnost rotoru [pu]	0,1791
Mech. výkon [kW]	10
Jm. Rychlost větru [m/s]	12

Obr. 19: Parametry generátoru

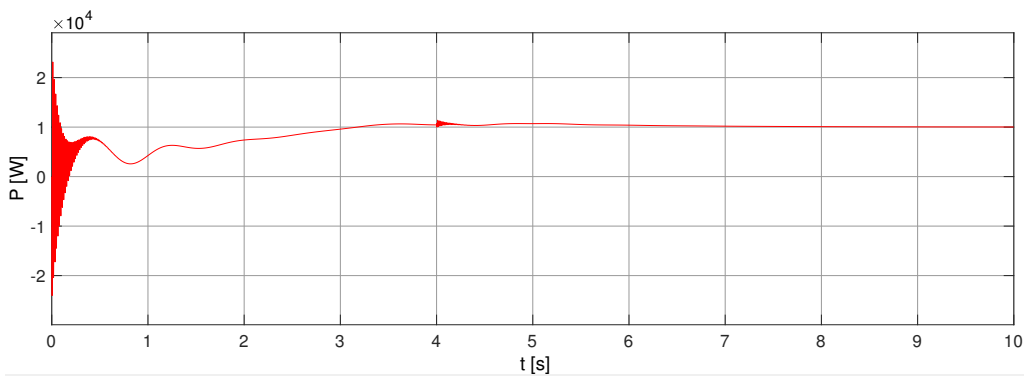
Po čase 3 s však dochází k dalšímu nárůstu rychlosti větru. Než dojde k reakci regulátoru natočení lopatek dochází ke stavu kdy elektrárna dodává vyšší výkon než je jmenovitý. Jelikož zátěž je konstantní 10 kW přebytečný výkon se vrací do sítě.

Regulátor úhlu lopatek začne reagovat v čase mezi 3 s a 4 s. V této chvíli se zmenšuje dodávaný výkon elektrárnou na svou jmenovitou hodnotu. Elektrárna následně dodává činný výkon do zátěže a síť není zatěžována činným výkonem.

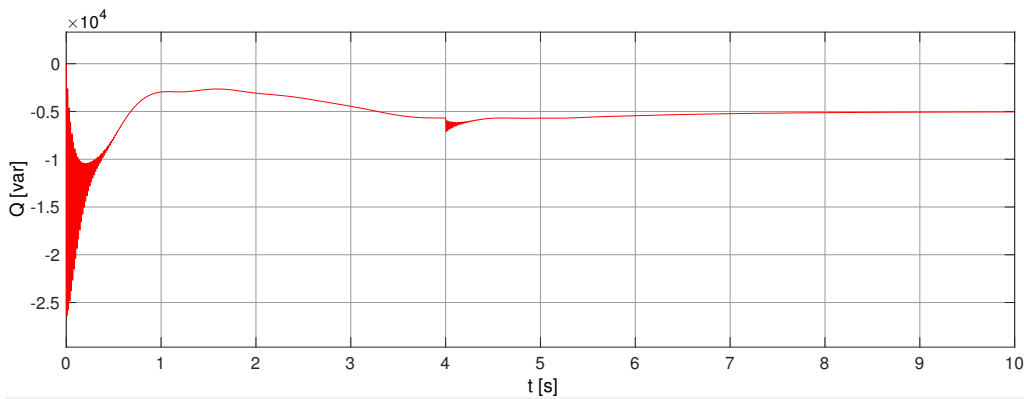
4.3.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ



Obr. 20: Průběh rychlosti větru $v(t)$ [m/s]



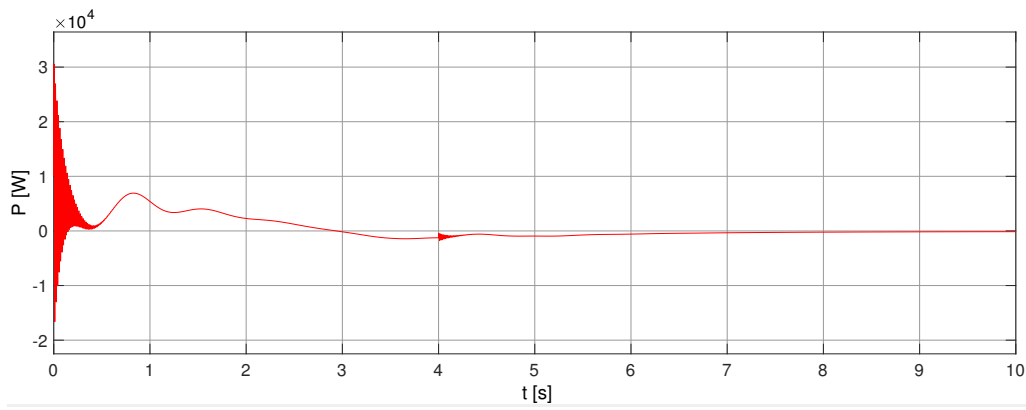
Obr. 21: Činný výkon elektrárny $P(t)$ [W]



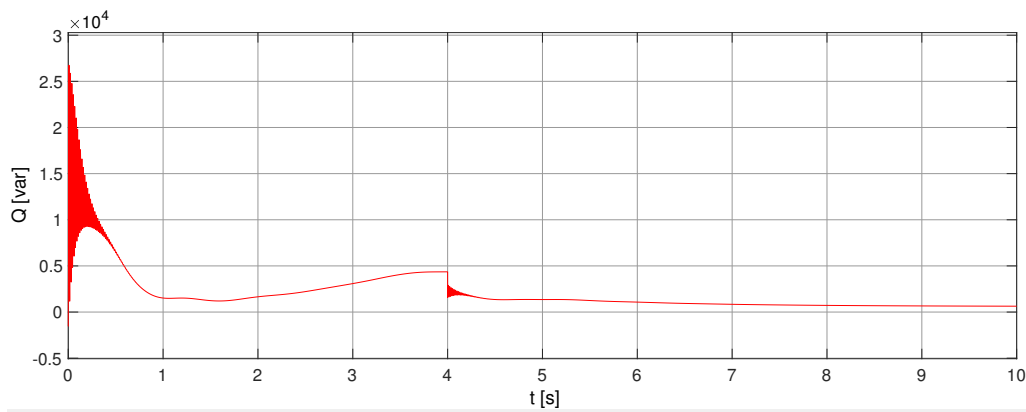
Obr. 22: Jalový výkon elektrárny $Q(t)$ [var]

Poslední jev, který lze pozorovat na této simulaci je přepnutí kompenzačního stupně. Pro stav kdy elektrárna pracuje ve svém jmenovitém výkonu je zvolena kondenzátorová

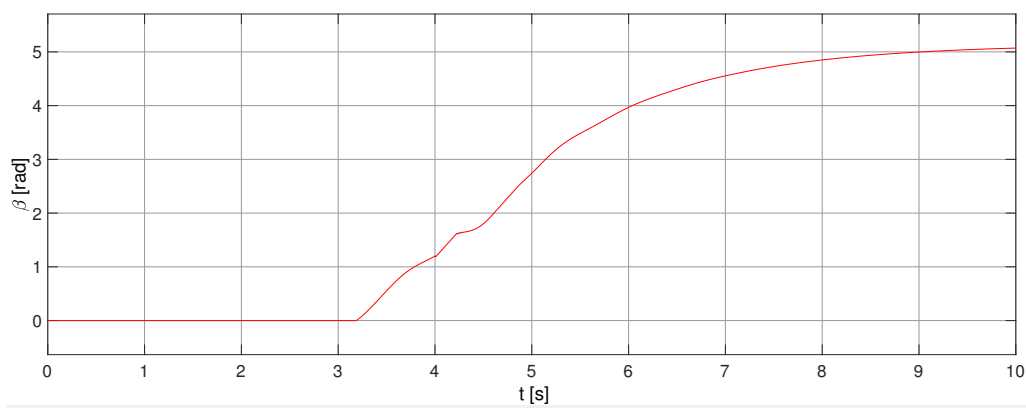
4.3.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ



Obr. 23: Činný výkon sítě $P(t)$ [W]



Obr. 24: Jalový výkon sítě $Q(t)$ [var]



Obr. 25: Úhel natočení lopatek $\beta(t)$ [rad]

4.3.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

baterie o velikosti 4500 *var*. S touto velikostí by však při nízkých rychlostech větru (nižší výkon elektrárny) docházelo k překompenzování. Je zde proto vložen druhý stupeň 1500 *var*. Nízký stupeň kompenzace je připojen z počátku simulace až do času 4 s. V tuto chvíli lze pozorovat zákmit výkonů především jalových (částečně i činného). Lze pozorovat že od času 1 s až po čas 4 s jalový výkon odebíraný elektrárnou značně roste. Je zde proto přepnut vyšší kompenzační stupeň. Celý děj je nejlépe pozorovatelný na grafu jalového výkonu sítě. Zde je vidět snížení dodávaného jalového výkonu v čase 4 s. Dodávaný jalový výkon po čase 4 s je malý, důležité je, že není kapacitního charakteru (nedochází k překompenzování).

4.4

PŘECHOD DO OSTROVNÍHO REŽIMU

OSTROVNÍ režim je takový, že elektrárna pracuje sama (nebo společně s jinými zdroji) do určité části sítě. Jelikož se jedná o zdroj s asynchronním strojem, je potřeba, aby elektrárna byla před přechodem do ostrovního provozu připojena k síti. Elektrizací sítě tím dodá potřebný budící jalový výkon k rozběhu elektrárny. Není zde možný start ze tmy. V této simulaci dojde k odpojení zdroje střídavého napětí, spolu s transformátorem a vedením. Pro tyto účely je zde nastaven třífázový spínač na vypnutí.

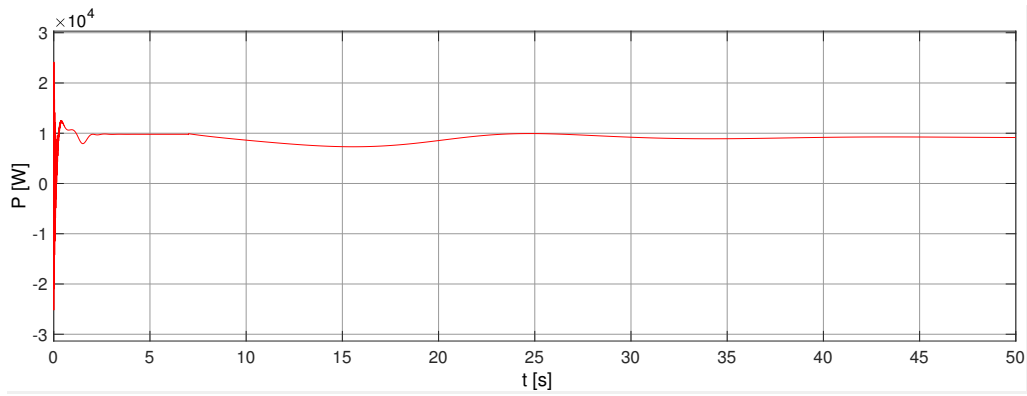
Simulace bude nyní sledována po dobu 50 s. V téhle situaci není sledován stav elektrárny během měnící se rychlosti větru, pouze stav elektrárny během přechodu na ostrovní provoz. Proto je zde rychlost větru konstantní a to 12 m/s. Jedná se o jmenovitou rychlost větru. Je důležité mít správně nastavenou kompenzaci. To z důvodu, že kondenzátorová baterie připojená k elektrárně bude zdrojem jalového výkonu pro elektrárnu. Pokud bude příliš malá dojde k samovolnému zastavení turbíny, pokud příliš velká, dojde k velkému kmitání výkonu a dojde k neřiditelnosti elektrárny. Je zde proto nastavena velikost kompenzačního výkonu 4800 var. Tato hodnota se nebude během simulace měnit jako v předchozím případě, to opět z důvodu konstantní rychlosti větru a tedy konstantního výkonu.

Počáteční stav je takový, že je elektrárna připojena k síti. V této chvíli dojde k rozběhu elektrárny a ustálení na jmenovité hodnotě. Po 7 s dojde pomocí spínače k přechodu do ostrovního režimu.

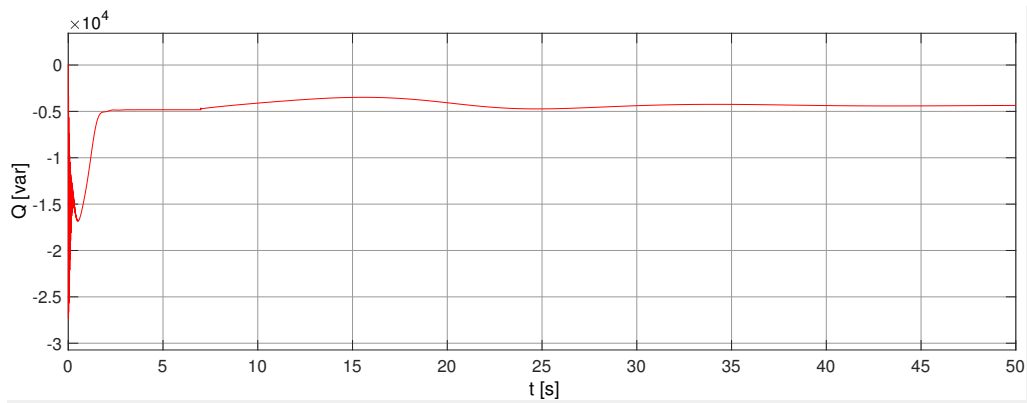
4.4.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

V této simulaci sledujeme jiné prvky než v té předešlé. Především není zapotřebí sledovat výkon tekoucí sítí, jelikož důležitá část simulace je odpojena od sítě. Proto tímto blokem neprotéká činný ani jalový výkon. Výkon se zde objevuje pouze z počátku při rozběhu elektrárny, v tomto případě je průběh dost podobný průběhu předešlé simulace. Co se zde vyplatí sledovat je opět samotný výkon elektrárny a tentokrát i výkon zátěže. Ve chvíli odpojení od sítě 7 s dojde k velkému poklesu činného výkonu ve výrobě. Jelikož je to momentálně jediný zdroj činného výkonu, projeví se tento pokles i na zátěži. Dojde zde k pozvolnému vlnění výkonu (činného i jalového). Toto kmitání má však tlumený charakter. Kmitání výkonu se ustálí na hodnotě přibližně 9 kW. Což sice není požado-

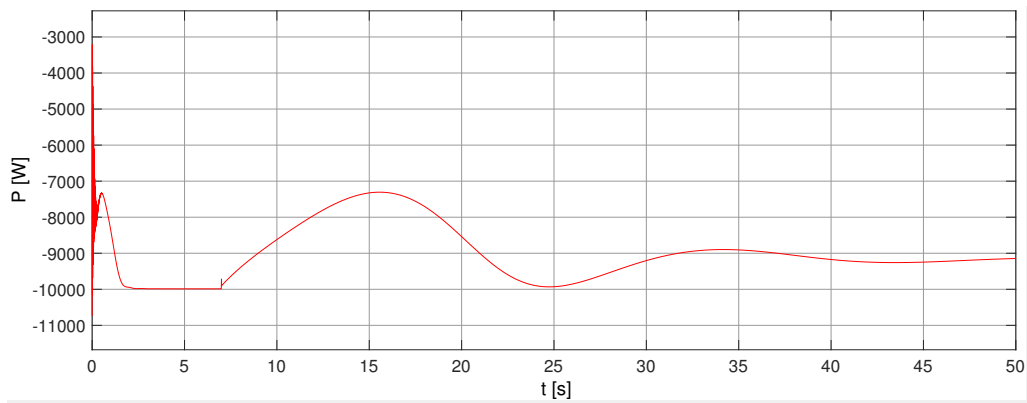
4.4.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ



Obr. 26: Činný výkon elektrárny $P(t)[W]$

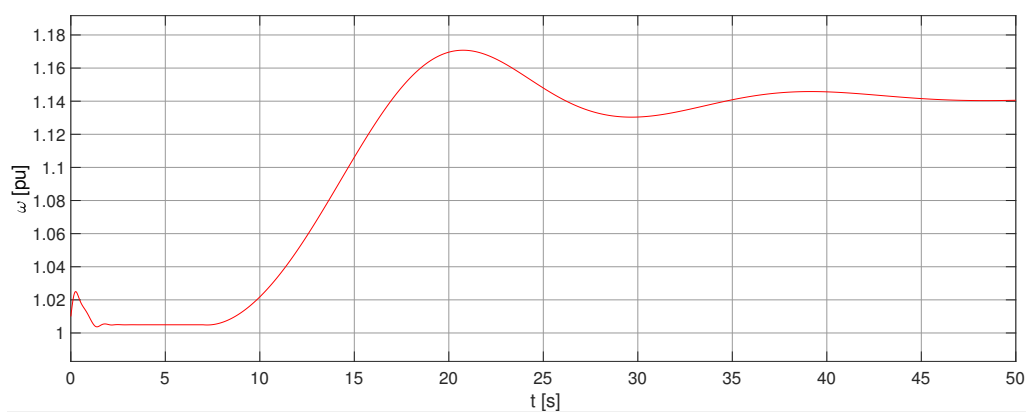


Obr. 27: Jalový výkon elektrárny $Q(t)[var]$



Obr. 28: Činný výkon zátěže $P(t)[W]$

4.4.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ



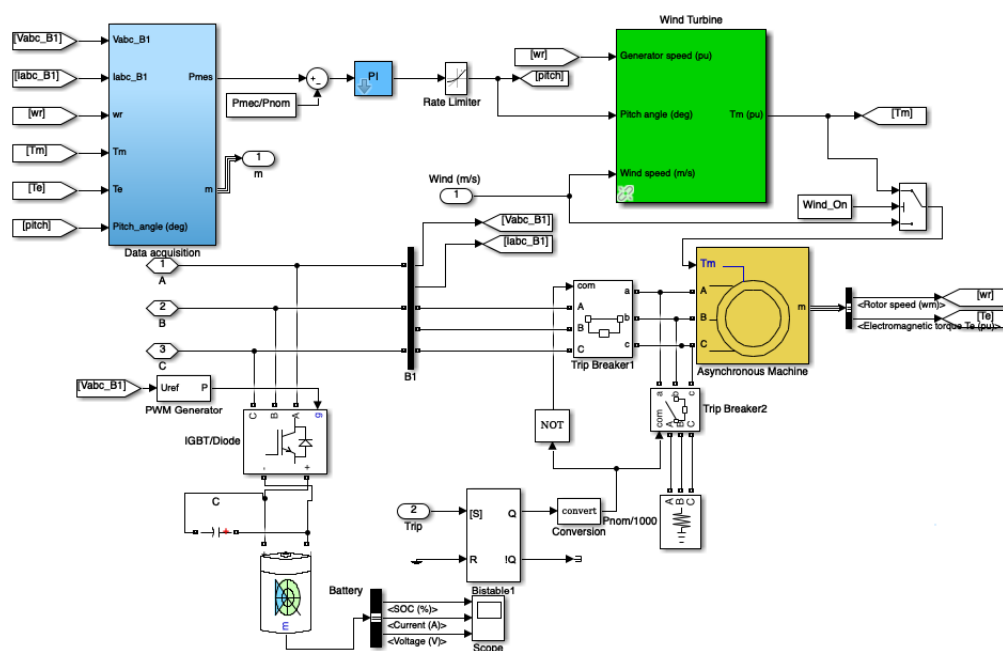
Obr. 29: Rychlost rotoru $\omega(t)$ [pu]

vaný výkon 10 kW, každopádně se jedná o ustálený stav. Dále v této simulaci sledujeme průběh rychlosti rotoru. Ta se se prudce zvedne ve chvíli přechodu do ostrovního provozu. Průběh rychlosti má také kmitavý charakter. Stejně jako u výkonu, je tento průběh tlumený a po čase se ustálí na stabilní hodnotě.

4.5

DYNAMICKÝ MODEL S BATERIÍ

V této kapitole bude obohacen předchozí dynamický model o bateriové úložiště. Jako baterie je zde využit předem definovaný blok v knihovně Simulink pro baterii. Jak bylo řečeno v předchozích kapitolách, k propojení baterie se střídavou, třífázovou sítí je potřeba frekvenčního měniče. Jeho vnitřní struktura je zobrazena v teoretickém popisu simulace. Pro lepší přehled je připojen připravený blok třífázového můstku složeného z IGBT tranzistorů se zpětnými diodami. Toto propojení je provedeno ve vnitřním schématu elektrárny z důvodu přehlednosti. Zobrazení připojení baterie je na Obr.30.

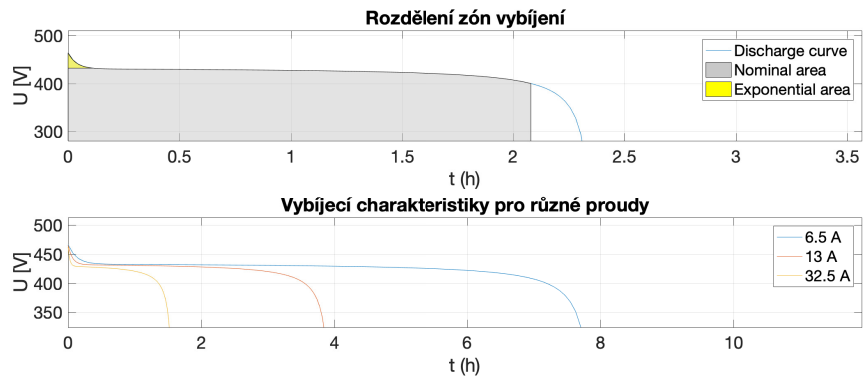


Obr. 30: Elektrárna s připojenou baterií

Jmenovitý výkon baterie je 400 V, kapacita 50 Ah. Technologie baterie je lithium-ionová. Vybíjecí parametry byly automaticky popsány pomocí připraveného bloku na základě nominálních hodnot. Baterie má počáteční stav nabito na 100%.

DYNAMICKÝ MODEL S BATERÍ

Charakteristiky popisující vybíjení baterie pro různé vybíjecí proudy jsou zobrazeny na Obr.31.

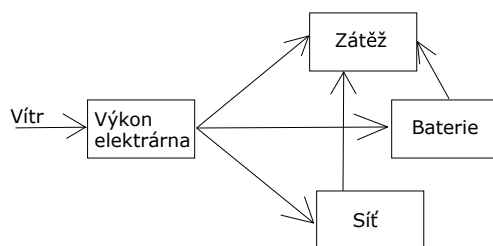


Obr. 31: Průběh vybíjení baterie

4.6

SIMULACE TOKU VÝKONU

TATO kapitola je zaměřena na toky energií mezi větrnou elektrárnou, sítí, spotřebou a baterií. Je zde vytvořen jednoduchý model, který ze základních parametrů zobrazuje využití připojené baterie. Principiální blokové schéma je zobrazeno na Obr.32. Samotný model ovšem není vytvořen pomocí softwaru Simulink. Je tvořen několika výpočetními funkcemi v prostředí Matlab. Tyto funkce lze nalézt v přílohách této práce.



Obr. 32: Základní blokové schéma modelu

Předchozí dynamické modely simulovaly provoz větrné elektrárny v časových úsecích řádově desítky sekund. Pokud by bylo potřeba řešit problematiku v řádech hodin a dnů, simulace by v takovémto modelu trvala příliš dlouho nebo by bylo zapotřebí velkého výpočetního výkonu.

Následující model je podstatně jednodušší než předchozí dynamické modely. Tím ztrácí možnost sledování přechodných dějů během připojení či odpojení elektrárny. Dále nelze sledovat negativní vlivy, kterými elektrárna působí na síť. Díky jednoduchosti zde však vzniká výhoda řešení dějů dlouhých řádově dny a déle. Především je zde možnost sledovat využití připojené baterie.

Model vznikl s myšlenou pomoci člověku, který uvažuje o investici do větrné elektrárny v kombinaci s akumulačním prvkem, kterým je baterie. To vše pro vlastní domácí zatížení. Pomoci především tím, že názorně uvidí, zda bude velikost uvažované baterie dostatečně využita, nebo zda nebude příliš malá.

Vstupními parametry pro simulaci jsou především parametry elektrárny: jmenovitý výkon, účinnost (větrného motoru a generátoru), minimální, maximální a jmenovitá rychlost větru. Dále to jsou parametry baterie: kapacita, nabíjecí, vybíjecí proud, minimální možné vybití. Dále se vloží charakteristika denní spotřeby a charakteristika rychlosti větru za den. Možno vložit měření v delší časovém intervalu (i kratším), důležité je, aby obě charakteristiky (zátěže a rychlosti větru) byly ve stejném časovém úseku.

Princip simulace je takový, že je vypočten výkon dle aktuální rychlosti větru. Ten je zmenšen účinností větrného motoru a účinností generátoru. Pokud je rychlost menší než minimální, nebo větší než maximální, elektrárna je odstavena a nevyrábí. Pokud je rychlost větru v rozmezí jmenovité rychlosti větru a maximální rychlosti, je vyráběn maximální (jmenovitý) výkon elektrárny. V rozmezí mezi minimální a jmenovitou rychlostí větru se výkon elektrárny mění se třetí mocninou rychlosti větru.

Následně je vyrobený výkon rozdělen mezi zátěž, baterii a síť. Dle aktuálního stavu zátěže a nabití baterie. V první řadě má vždy přednost pokrytí výkonem zátěž, v druhé řadě je baterie. V situaci vysokého výkonu, který přesahuje výkon zátěže a maximální nabíjecí výkon baterie (nebo v případě že je baterie nabita na 100%), dojde k toku energie směrem do sítě. Pokud by došlo k situaci, že větrná elektrárna nedodává výkon, ať už v důsledku příliš nízké rychlosti větru, nebo příliš vysoké rychlosti větru bude výkon do zátěže dodáván z baterie. To však za předpokladu, že je baterie nabita na více než minimální kapacitu a za předpokladu, že zátěž není příliš velká a baterie je schopna pokrýt požadovaný odběr. V situaci odstavené elektrárny a vybití baterie (nebo pokud vybíjecí výkon je menší než výkon zátěže) dojde k dodávce energie směrem ze sítě.

Energie dodávána či odebírána z baterie nebo sítě je vypočtena integrací výkonu podle času.

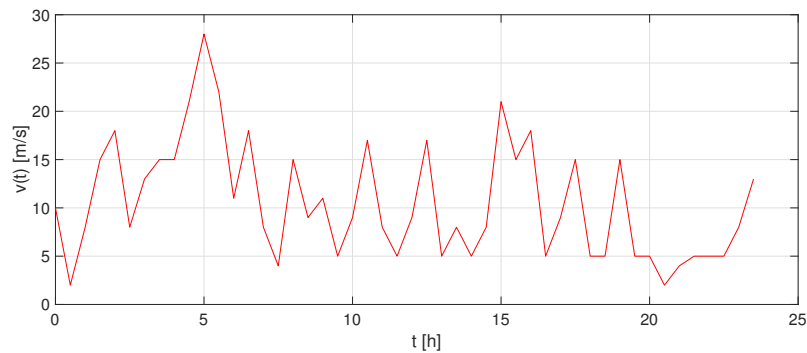
$$dW = P dt \quad (14)$$

Parametry pro tuto simulaci jsou následovné. Jmenovitý výkon elektrárny je jako v předchozím případě 10 kW, účinnost generátoru je 80%, účinnost větrné turbíny 40%. Jmenovitá rychlost je 12 m/s, minimální 8 m/s a maximální 15 m/s. Baterie má maximální kapacitu 20 kWh, minimální 5 kWh. Pokud bude doba nabíjení 2.5 h, nabíjecí výkon bude 6 kW dle následujícího vzorce.

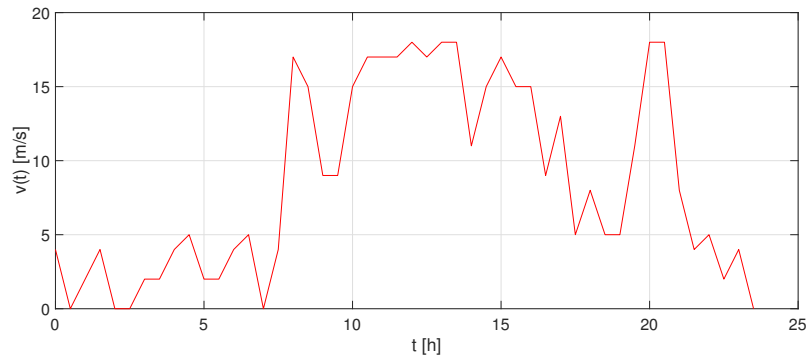
$$P_{nab} = \frac{W_{max} - W_{min}}{t_{nab}} = \frac{20 - 5}{2.5} = 6kW \quad (15)$$

Pro zobrazení funkčnosti modelu je zde použita konstantní zátěž 1 kW po dobu dvou dnů. Pro každý den je zvolena jedna charakteristika měření rychlosti větru v půlhodinových intervalech. Charakteristiky o rychlosti větru jsou získané z webu in-pocasi.cz. Je zde použito měření o rychlostech větru ze stanice Hrozetín, jehož provozovatelem je meteohrozetin.cz. Aby byl průběh použitelný pro navrženou větrnou elektrárnu, byly změněny jednotky z km/h na m/s. Na Obr.33 je vidět průběh prvního dne a na Obr.34 je vidět průběh rychlosti větru druhého dne.

4.6.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ



Obr. 33: Měření rychlosti větru první den



Obr. 34: Měření rychlosti větru druhý den

4.6.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

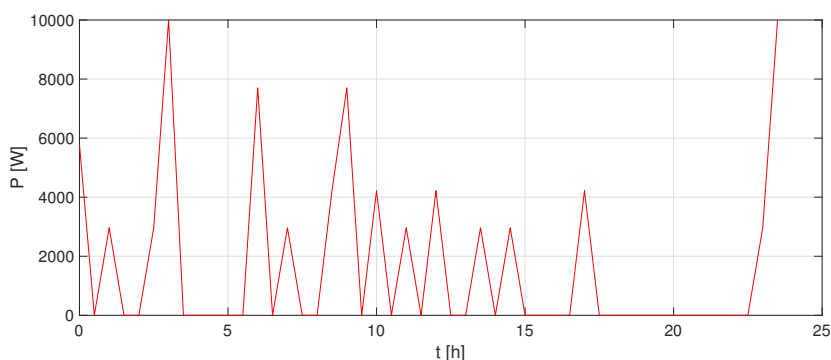
Z výsledků prvního dne je vidět, že elektrárna střídavě vyráběla či nevyráběla v závislosti na rychlosti větru. Baterie zde začíná na své minimální hodnotě nabití. Ve chvílích kdy dochází k přebytku energie, dochází k nabíjení baterie. Ta se přes den nabilá až na kapacitu přes 90%. Díky bateriové záloze nedocházelo za celý den čerpání výkonu ze sítě. Ve chvílích maximálního výkonu elektrárny dochází k situaci vysokého přebytku výkonu. Vzniká přebytek energie, kterou baterie není schopna přijmout (z důvodu omezení nabíjecím výkonem), proto je tato energie dodávána do sítě.

Druhý den začíná baterie nabitá na kapacitu se kterou předchozí den skončila. To odpovídá hodnotě zhruba 84%. Druhý den dochází k nižším rychlostem větru. Elektrárna se zřídka dostane na svou jmenovitou hodnotu výkonu. Baterie však dokáže díky své akumulované energii dodat potřebný výkon zátěži. Přestože je druhý den elektrárna převážně odstavena, nedochází k čerpání elektrické energie ze sítě. Kapacita baterie klesne

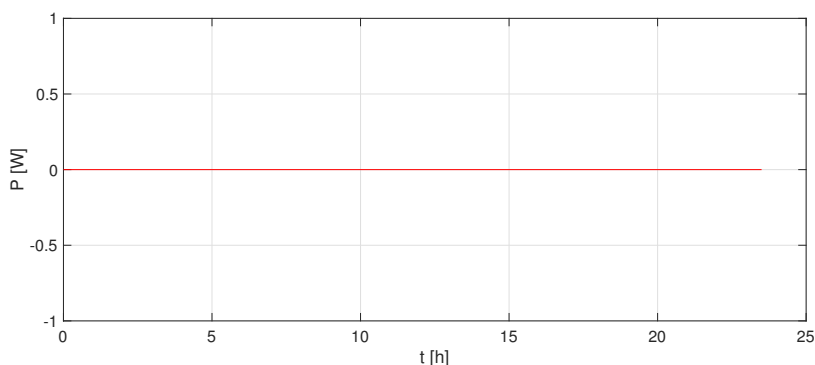
4.6.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

během první poloviny dne, kdy je rychlost větru nízká, pod hranici 40%. Následně se rychlost větru zvedne a baterie se znovu začne nabíjet. Stejně jako v předchozím případě, ve chvílích kdy dosahuje elektrárna jmenovité hodnoty výkonu, není možno takový výkon spotřebovat ani akumulovat, vzniká přebytek energie, která je odesílána do sítě.

Je zapotřebí zmínit, že v reálném případě není zátěž takto konstantní a také není tak nízká po celý den. Zátěž je zvolena s ohledem na vysvětlení a pochopení principu modelu. A také dokázání jeho funkčnosti. Výhoda modelovaného případu je taková, že není čerpána žádná energie ze sítě. Pokud by byla elektrárna nastavena na maximální dodávaný výkon 7 kW a nastavena tak, že v případě plného nabití baterie dojde k jejímu odstavení, docházelo by k situaci kdy je 6 kW použito pro nabíjení baterie a 1 kW pro zátěž. Nedochovalo by k přebytkům, které je zapotřebí odesílat směrem do sítě a elektrárna by byla schopna ostrovního provozu.

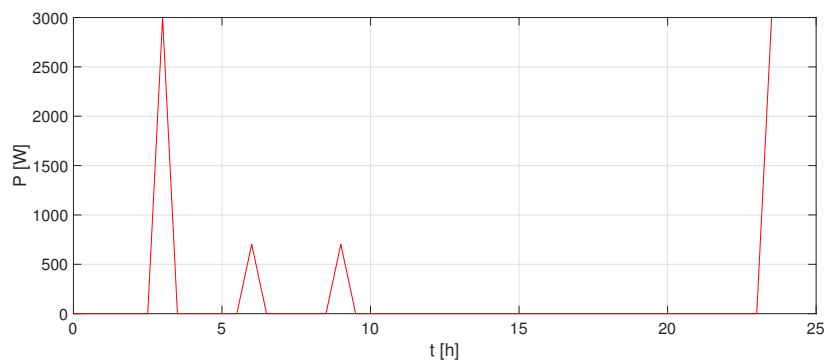


Obr. 35: Výkon elektrárny 1.den

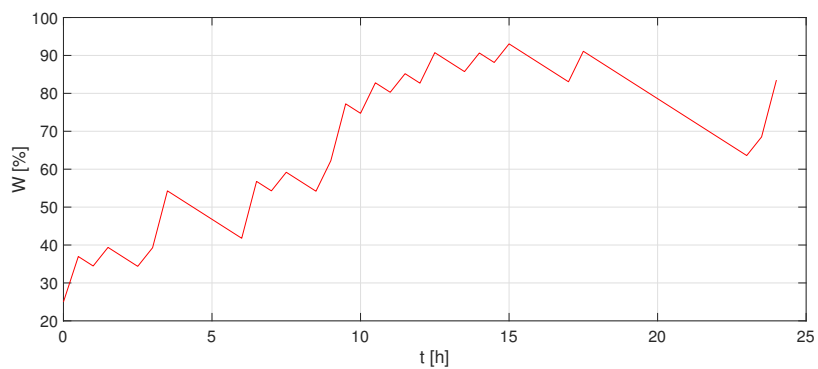


Obr. 36: Výkon dodaný ze sítě 1.den

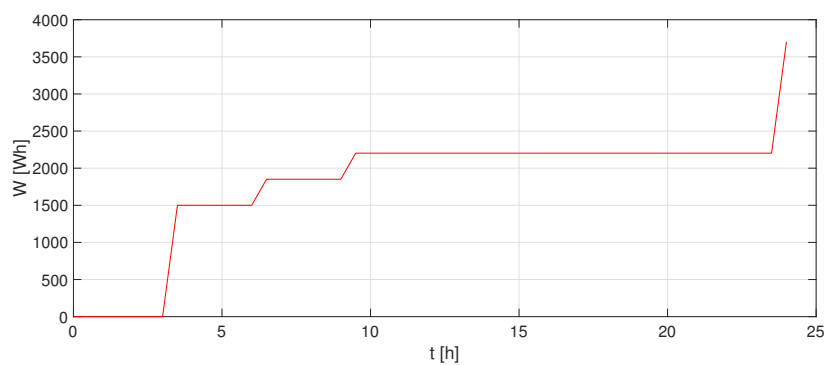
4.6.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ



Obr. 37: Výkon dodaný do sítě 1.den

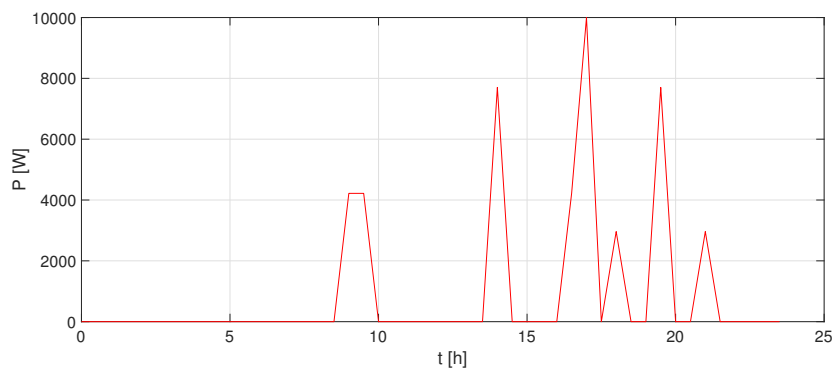


Obr. 38: Nabití baterie 1.den

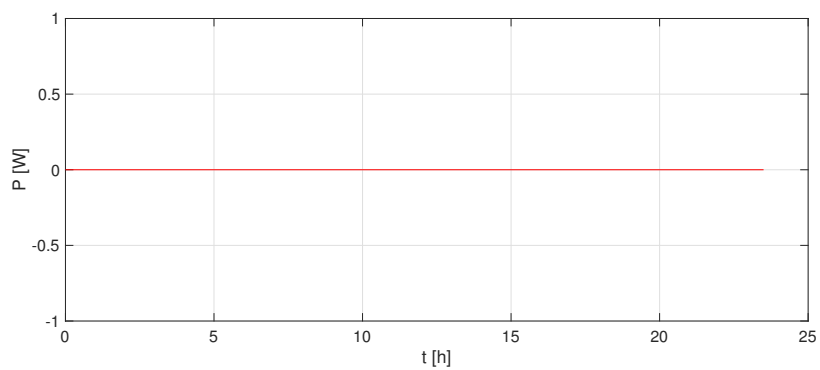


Obr. 39: Energie dodaná do sítě 1.den

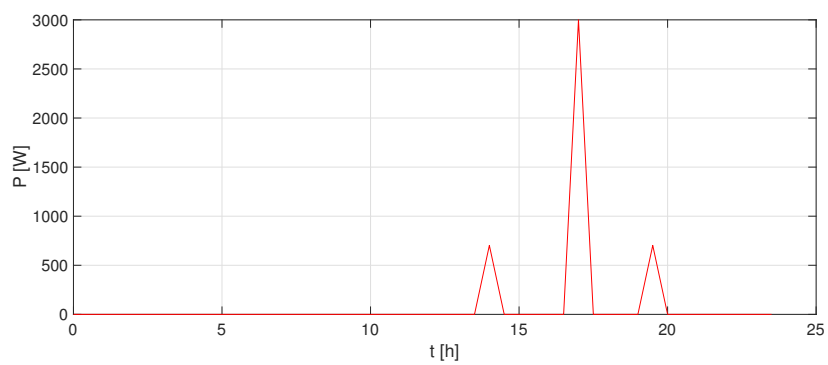
4.6.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ



Obr. 40: Výkon elektrárny 2.den

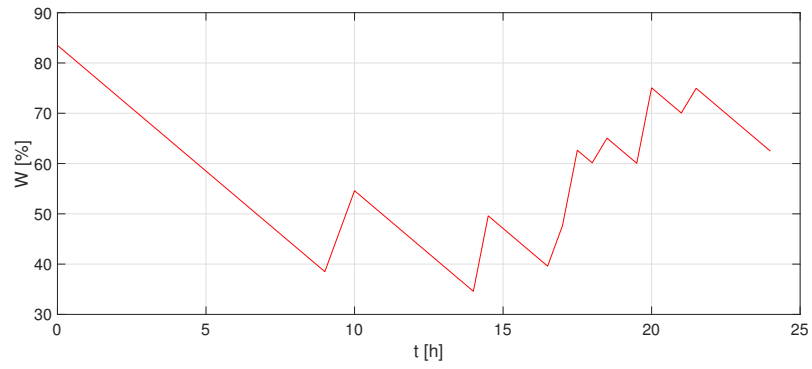


Obr. 41: Výkon dodaný ze sítě 2.den

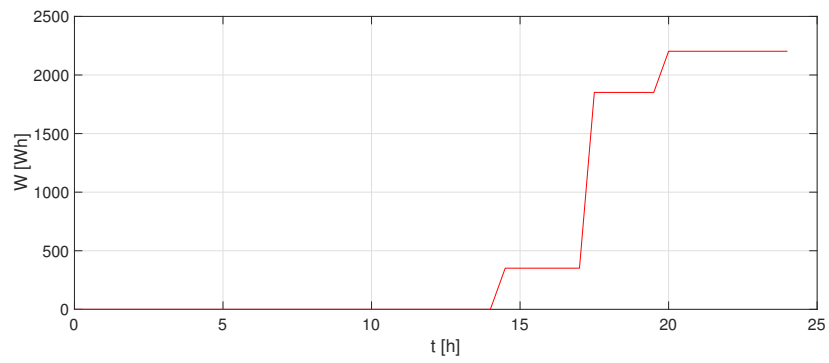


Obr. 42: Výkon dodaný do sítě 2.den

4.6.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ



Obr. 43: Nabití baterie 2.den



Obr. 44: Energie dodaná do sítě 2.den

Část 5

ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR

5.1

SHRnutí PRÁCE A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

DIPLOMOVÁ práce byla zaměřena na provozování větrných elektráren. První část práce byla věnována teoretickému popisu a pochopení jak funguje větrná elektrárna a její prvky. Následovala kapitola zabývající se provozními podmínkami, které jsou dané Kodexem přenosové soustavy a nařízením Energetického regulačního úřadu České republiky. V této části jsou také popsány podpůrné služby, které využívá provozovatel přenosové soustavy pro zajištění systémových služeb, včetně využití větrných elektráren pro tyto účely. V poslední části je stručný velikosti listu větrného motoru. Provoz větrné elektrárny je simulován na několika matematických modelech. Jednak se jedná o funkce vytvořené v prostředí Matlab. A dále se jedná o simulace vytvořené v nadstavbě softwaru Matlab jménem Simulink.

5.1.1 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Větrné elektrárny představují část energetiky v oblasti obnovitelných zdrojů energie. Výhodou je především neomezený zdroj energie. Tím je myšleno, že není možno větrnou energii vytěžit tak, aby už nebyla k dispozici (jako je tomu u fosilních paliv). Nevýhodou je pak nestálost a nízká předvídatelnost této energie.

Tradiční způsob provozu větrných elektráren přináší další nevýhodu. Tou je nemožnost využití tohoto zdroje pro systémové služby. To však neznamená, že toho tento zdroj není schopný. Je ovšem zapotřebí přistoupit k regulaci těchto elektráren odlišným způsobem než je běžné. S nárůstem počtu obnovitelných zdrojů bude zapotřebí aby se tyto zdroje podílely na stabilitě sítě. Kromě speciálního řízení větrných elektráren pomůže ke stabilizaci sítě také akumulace energie. Bateriové systémy lze v dnešní době budovat o relativně vysokých výkonech. Přestože nevydrží dodávat výkon dlouhodobě, dokáží překlenout dobu nečinnosti větrných elektráren způsobenou bezvětřím.

V práci je vytvořeno několik simulačních modelů reprezentujících provoz větrné elektrárny. První z nich je vytvořen k pozorování negativních vlivů na síť způsobených připojením větrné elektrárny s asynchronním generátorem. Dále se zde pozoruje změna jalového výkonu s nárůstem energie větru. V poslední řadě je zde zobrazena regulace pomocí natočení lopatek větrného motoru.

5.1.1 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Druhý model reprezentuje přechod do ostrovního provozu. V tomto případě dochází k výkyvům výkonů, jalového i činného a především pak ke změně rychlosti rotoru. Zde je zapotřebí mít elektrárnu správně vykompenzovanou. Při špatné kompenzaci dochází k samovolnému zastavení elektrárny či rozkmitu výkonu nad neregulovatelnou úroveň.

Na třetím modelu lze vidět možnost připojení akumulčního prvku k předešlému modelu. Akumulční prvek je tvořen lithium-ionovou baterií. Charakteristika zobrazuje průběh vybíjení akumulátoru při různém proudovém zatížení.

V poslední části je vytvořen jednoduchý model větrné elektrárny, který obsahuje akumulční prvek opět tvořený baterií. Vytvoření modelu vzniklo za účelem pozorování využití baterie během dlouhého časového období. Na charakteristikách je pak možné pozorovat tok energie mezi elektrárnou, baterií, zátěží a sítí, z čehož lze vyzorovat zda je baterie dostatečně využívána, popřípadě zda je možné využívat elektrárnu v provozu bez připojení na síť.



PŘÍLOHA

1. Příloha - Vstupní hodnoty + vyvolání funkcí
2. Příloha - Funkce vyjadřující nabíjení baterie
3. Příloha - Funkce vyjadřující výkon větrné elektrárny

PŘÍLOHA

```
function [Wb, Wds, Wzs , Ps , Pd, time ] =
Balance_VTE_a_Baterie_radek(Pz , t , Wmin, Wmax, Pn, Pel, Pch )

% W ... Kapacita baterie [kWh]
% Ps ... Výkon dodaný ze sít# [kW]
% Pd .... Výkon dodaný do sít# [kW]

step = t(:,2); %velikost kroku
Wb = [ Wmin]; %po#áte#ní nabití baterie
l = size(t);
loops = l(:,2); %po#et cykl#
time = [0]; %po#átek #asu
%Pd = [0];
Wds = [0]; %energie dodaná do sít#
Wzs = [0]; %energie získaná ze sít#

for i = 1 : loops

    time(:,i+1) = time(:,i) + step;

    if Pz(:,i) < Pel(:,i) %pokud odebíraný výkon je menší než
        vyráb#ný výkon

        if Wb(:,i) < 0.8* Wmax % pokud je kapacita baterie menší
            než maximální kapacita baterie

                Proz = Pel(:,i) - Pz(:,i); % rozdíl výkon# vyrobeného a
                spot#ebovaného

                if Proz > Pch % pokud výkon vyrobený navíc je v#tší
                    než maxiální dobíjecí výkon

                        Wb(:,i+1) = Wb (:,i) + Pch * step; % maximální
                        nabíjecí výkon jde do baterie a ta se nabíjí
                        Pd(:,i) = Proz - Pch; % dodaný výkon do
                        sít#
                        Ps(:,i) = 0; % výkon odebíraný ze
                        sít#

                        Wds(:,i+1) = Wds(:,i) + Pd(:,i) *step;
                        Wzs(:,i+1) = Wzs(:,i);

                    else

                        Wb(:,i+1) = Wb(:,i) + Proz * step; % vyrobený výkon
                        navíc nabíjí baterii
                        Pd(:,i) = 0; % dodaný výkon do
                        sít#
                        Ps(:,i) = 0; % výkon odebíraný
                        ze sít#
```

1

Obr. 46: Příloha 2. - Funkce vyjadřující nabíjení baterie

PŘÍLOHA

```
function [R , Pel , Pv] = vykon_VTE( v, t, Pn, vn, vmax,vmin, ny,ro )

%R polomer turbiny
% Pel vykon elektrarny
% Pv vykon vetru
% v rychlost vetru
% t cas
% Pn jmenoviny vykon elektrarny
% vn jmenovitá rychlo vetru
% vmax maximalni rychlost vetru
% ny ucinost soustroji (turbina, p#evodovka, generator)
% ro hustota vzduchu

%ro= 1.2;
R = sqrt((2*Pn)/(ro*ny*pi*vn^3));
S = size(t);

for i = 1: S(1,2)

    if v(:,i) < vmin
        Pel(:,i) = 0;

    elseif v(:,i) < vn

        Pel(:,i) = 1/2 * ro *ny * pi * R^2 * v(:,i)^3;

    elseif v(:,i) < vmax

        Pel(:,i) = 1/2 * ro *ny * pi * R^2 * vn^3;

    else
        Pel(:,i) = 0;

    end

    Pv(:,i) = 1/2 * ro * pi * R^2 * v(:,i)^3;
end

end

Not enough input arguments.

Error in vykon_VTE (line 15)
    R = sqrt((2*Pn)/(ro*ny*pi*vn^3));

Published with MATLAB® R2017a
```

1

Obr. 47: Příloha 3. - Funkce vyjadřující výkon větrné elektrárny

LITERATURA

- [1] Vaclav Rychetnik, Josef Janoušek, and Jiří Pavelka. *Větrné motory*. Vydavatelství ČVUT, 1997.
- [2] Obrazek proudění vetru. <https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/obrazky/proudy10.11.2013.png>.
- [3] Obrazek principu kridla. https://elspeedo.cz/wp-content/uploads/2016/12/vyuka_2014_168.jpg.
- [4] Václav Rychetník. *Větrné motory*. VŠB -Technická univerzita Ostrava, 1999.
- [5] Alejandro Rolan, Alvaro Luna, Gerardo Vazquez, and Daniel Aguilar. Modeling of a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator. *Technical University of Catalonia*, 2009.
- [6] Princip akumulátoru. <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/akumulace-elektricke-energie--9696>.
- [7] Akumulátory. <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/>.
- [8] Horst Crome. *Technika využití energie větru, Svěpomocná stavba větrných zařízení*. Genesis grafické studio Brno, 2002.
- [9] Energetický regulační úřad. Pravidla pro paralelní provoz vyroben a akumulacních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy. 2018.
- [10] ČEPS a.s. Kodex přenosové soustavy část i - iv. 2015-2019.
- [11] Stanislav Mišák, Lukáš Prokop, Petr Krejčí, and Tadeusz Sikora. Provoz větrných elektráren s měniči frekvence. *VŠB TU Ostrava*, 2008.
- [12] Mikko Kuivaniemi, Minna Laasonen, and spol. *Future system inertia*. Entso-e Belgium.
- [13] Nicholas Miller, Clark Karra, and Miaolei Shao. *Impact of Frequency Responsive Wind Plant Controls on Grid Performance*. Entso-e Belgium, 2010.
- [14] Vlastimil Šautník. *MODEL OF WIND POWER PLANT WITH ASYNCHRONOUS GENERATOR IN SIMULINK PLATFORM*. University of west Bohemia, 2011.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Zobrazení proudění větru na Zemi [2]	7
Obrázek 2	Princip křídla [3]	9
Obrázek 3	Závislost účinnosti na úhlu natočení lopatky [5]	10
Obrázek 4	Snížení činného výkonu při kmitočtu vyšším než jmenovitém [9]	17
Obrázek 5	Dovolené snížení činného výkonu při poklesu frekvence [9]	18
Obrázek 6	Požadavky na dodávku jalového výkonu [10]	21
Obrázek 7	Frekvenční odezva činného výkonu na podfrekvenci u akumul- lačního zařízení [9]	23
Obrázek 8	Zobrazení vnějšího a vnitřního poloměru lopatky	34
Obrázek 9	Aerodynamický profil CK220 [8]	34
Obrázek 10	Parametry větrné elektrárny	35
Obrázek 11	Simulační proces [14]	36
Obrázek 12	Zjednodušené blokové schéma větrné elektrárny s akumulací	37
Obrázek 13	Model větrné turbíny	38
Obrázek 14	Model regulace natočení lopatek	38
Obrázek 15	Model střídače	39
Obrázek 16	Pulzně šířková modulace	39
Obrázek 17	Vnitřní model větrné elektrárny	40
Obrázek 18	Model elektrárny bez akumulace se zátěží	42
Obrázek 19	Parametry generátoru	42
Obrázek 20	Průběh rychlosti větru $v(t)$ [m/s]	43
Obrázek 21	Činný výkon elektrárny $P(t)$ [W]	43
Obrázek 22	Jalový výkon elektrárny $Q(t)$ [var]	43
Obrázek 23	Činný výkon sítě $P(t)$ [W]	44
Obrázek 24	Jalový výkon sítě $Q(t)$ [var]	44
Obrázek 25	Úhel natočení lopatek $\beta(t)$ [rad]	44
Obrázek 26	Činný výkon elektrárny $P(t)$ [W]	47
Obrázek 27	Jalový výkon elektrárny $Q(t)$ [var]	47
Obrázek 28	Činný výkon zátěže $P(t)$ [W]	47
Obrázek 29	Rychlost rotoru $\omega(t)$ [pu]	48
Obrázek 30	Elektrárna s připojenou baterií	49
Obrázek 31	Průběh vybíjení baterie	50
Obrázek 32	Základní blokové schéma modelu	51
Obrázek 33	Měření rychlosti větru první den	53
Obrázek 34	Měření rychlosti větru druhý den	53
Obrázek 35	Výkon elektrárny 1.den	54

Seznam obrázků

Obrázek 36	Výkon dodaný ze sítě 1.den	54
Obrázek 37	Výkon dodaný do sítě 1.den	55
Obrázek 38	Nabití baterie 1.den	55
Obrázek 39	Energie dodaná do sítě 1.den	55
Obrázek 40	Výkon elektrárny 2.den	56
Obrázek 41	Výkon dodaný ze sítě 2.den	56
Obrázek 42	Výkon dodaný do sítě 2.den	56
Obrázek 43	Nabití baterie 2.den	57
Obrázek 44	Energie dodaná do sítě 2.den	57
Obrázek 45	Příloha 1. - Vstupní hodnoty + vyvolání funkcí	62
Obrázek 46	Příloha 2. - Funkce vyjadřující nabíjení baterie	63
Obrázek 47	Příloha 3. - Funkce vyjadřující výkon větrné elektrárny	64