

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**VLIV ROZPTÝLENÉ VÝROBY NA KVALITU
ELEKTRICKÉ ENERGIE**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

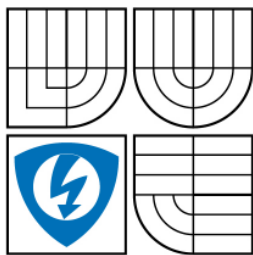
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MARTIN KRUŽÍK

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Martin Kružík

ID: 47053

Ročník: 2

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Vliv rozptýlené výroby na kvalitu elektrické energie

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Základní přehled vlivu rozptýlené výroby na kvalitu elektrické energie
2. Požadavky na připojení
3. Současná metodika hodnocení
4. Modely větrných elektráren
5. Dynamický model vybraného typu větrného motoru s generátorem
6. Parametrická simulace provozu v jednoduché síti
7. Porovnání výsledků simulace s výsledky současné metodiky

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 25.5.2009

Vedoucí práce: Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

>>Vložit licenční smlouvu<<

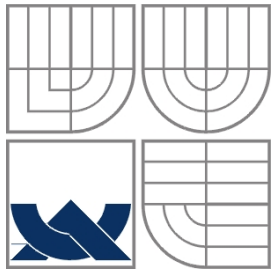
Bibliografická citace práce:

KRUŽÍK, M. Vliv rozptýlené výroby na kvalitu energie. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2009, stran 55.

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

Zároveň bych chtěl tímto poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Drápelovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky k mé práci a poskytnutou literaturu. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu během celé doby mého studia.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

Vliv rozptýlené výroby na kvalitu elektrické energie

Bc. Martin Kružík

vedoucí: Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2009

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

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

Master's Thesis

The effect of disperzed generation on power quality

by

Bc. Martin Kružík

**Supervisor: Ing. Jiří Drápela, Ph.D.
Brno University of Technology, 2009**

Brno

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá připojováním rozptýlených zdrojů do elektrické sítě a jejich vlivem na kvalitu elektrické energie. Cílem práce je sestavit jednoduchý dynamický model větrné elektrárny a model jednoduché sítě. Na tomto modelu simulovat vliv jejího provozu na charakteristiky napětí v místě připojení. Dále je třeba vypočítat charakteristiky napětí podle současných metod daných podnikovými normami energetiky (PNE). A tyto výsledky porovnat s výsledky simulací.

KLÍČOVÁ SLOVA: rozptýlené zdroje; elektrická síť; kvalita elektrické energie; větrná elektrárna; dynamický model

ABSTRACT

This MASTER`S THESIS engages in connecting with dispersed generation into electrical network and their influence on power quality. This thesis sets out to make up simple dynamic model of Wind power station and model of simple network. At this model I would like to simulate influence its working on voltage`s characteristics in addition place. Besides this is necessary calculate voltage`s characteristics according present methods – factory energy rules [PNE]. And these results compare with results of simulation.

KEY WORDS: disperzed generation; electrical network; power quality; wind power station; dynamic model

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	13
SEZNAM TABULEK	14
1 ÚVOD	17
2 ZDROJE ROZPTÝLENÉ VÝROBY	18
2.1 FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY	18
2.2 PALIVOVÝ ČLÁNEK	18
2.3 VODNÍ ELEKTRÁRNY	18
2.4 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	19
2.5 KOGENERAČNÍ JEDNOTKY	19
2.5.1 PLYNOVÉ TURBÍNY	20
2.5.2 SPALOVACÍ MOTORY	20
2.5.3 MIKROTURBÍNY	20
2.5.4 STIRLINGOVY MOTORY	20
3 ZÁKLADNÍ PŘEHLED VLIVU ROZPTÝLENÉ VÝROBY NA KVALITU ELEKTRICKÉ ENERGIE	21
3.1 VLIV RŮZNÝCH OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ NA DISTRIBUČNÍ SÍŤ	21
3.1.1 KAPACITNÍ FAKTOR	21
3.1.2 PROMĚNLIVOST VÝKONU V ČASE	21
3.1.3 DRUHY GENERÁTORŮ PRO RŮZNÉ ZDROJE	22
3.2 MOŽNOSTI AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE	22
3.3 VÝHODY A NEVÝHODY ROZPTÝLENÉ VÝROBY	23
4 POŽADAVKY NA PŘIPOJENÍ.....	25
4.1 PŘIHLAŠOVACÍ ŘÍZENÍ.....	25
4.2 STUDIE PŘIPOJITELNOSTI.....	26
4.3 PŘIPOJENÍ K SÍTI	26
4.4 PODMÍNKY PRO PŘIPOJENÍ.....	26
4.4.1 ZVÝŠENÍ NAPĚTÍ.....	26
4.4.2 ZMĚNY NAPĚTÍ PŘI SPÍNANÍ	27
4.4.3 PŘIPOJOVÁNÍ SYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ	28
4.4.4 PŘIPOJOVÁNÍ ASYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ	28
4.4.5 PŘIPOJOVÁNÍ VÝROBEN SE STRÍDAČI A MĚNIČI KMITOČTU	28
5 SOUČASNÁ METODIKA HODNOCENÍ	29
5.1 POSOUZENÍ Z HLEDISKA ZPĚTNÝCH VLIVŮ NA SÍŤ	29
5.1.1 ZVÝŠENÍ NAPĚTÍ	29
5.1.2 ZMĚNY NAPĚTÍ VYVOLANÉ MANIPULACEMI.....	30
5.1.3 FLIKR	31
5.1.4 HARMONICKÉ.....	32
5.1.5 KOMUTAČNÍ POKLESY	34
5.1.6 ZPĚTNÉ VLIVY NA ZAŘÍZENÍ HDO A RUŠENÍ SIGNÁLU HDO	35

6 DYNAMICKÝ MODEL VĚTRNÉHO MOTORU S GENERÁTOREM	36
6.1 DYNAMICKÉ VÝPOČTY.....	36
6.1.1 VÝPOČTY ELEKTROMAGNETICKÝCH JEVŮ	36
6.1.2 VÝPOČTY ELEKTROMECHANICKÝCH PŘECHODOVÝCH JEVŮ.....	36
6.1.3 VÝPOČTY STŘEDNĚDOBÉ DYNAMIKY	36
6.1.4 VÝPOČTY DLOUHODOBÉ DYNAMIKY	37
6.1.5 VÝPOČTY STATICKÉ STABILITY	37
6.2 MODEL VĚTRNÉ TURBÍNY	37
6.3 MODEL ASYNCHRONNÍHO GENERÁTORU	38
6.3.1 MODEL ASYNCHRONNÍHO GENERÁTORU S DVOJITÝM NAPÁJENÍM	39
6.4 MODEL SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU	40
7 DYNAMICKÝ MODEL KONKRÉTNÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	41
7.1 SOWTVARE PRO TVORBU MODELŮ	41
7.2 POPIS KONKRÉTNÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	41
7.3 MODEL VĚTRNÉ TURBÍNY.....	42
7.4 MODEL GENERÁTORU.....	43
8 PARAMETRICKÁ SIMULACE PROVOZU V JEDNODUCHÉ SÍTI	44
8.1 MODEL VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY.....	44
8.1.1 MODEL RYCHLOSTI VĚTRU	44
8.1.2 MODEL ELEKTRICKÉ SÍTĚ	45
8.1.3 MODEL MĚŘÍCÍCH OBVODŮ	46
8.2 PARAMETRICKÁ SIMULACE.....	47
9 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE S VÝSLEDKY SOUČASNÉ METODIKY	48
9.1 VÝPOČTY DLE SOUČASNÉ METODIKY	48
9.1.1 PŘÍKLADY VÝPOČTŮ DLE SOUČASNÉ METODIKY	48
9.2 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	49
9 ZÁVĚR.....	50
POUŽITÁ LITERATURA	51

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 6-1</i>	<i>Blokové schéma modelu větrné turbíny při konstantní rychlosti větru</i>	<i>7</i>
<i>Obr. 6-2</i>	<i>Blokové schéma modelu větrné turbíny při proměnné rychlosti větru</i>	<i>8</i>
<i>Obr. 6-3</i>	<i>Náhradní schéma asynchronního generátoru</i>	<i>8</i>
<i>Obr. 6-4</i>	<i>Schéma modelu dvojitě napojeného asynchronního generátoru.....</i>	<i>9</i>
<i>Obr.7-2</i>	<i>Schéma modelu větrné turbíny</i>	<i>42</i>
<i>Obr.8-1</i>	<i>Model větrné elektrárny připojené k síti 22kV</i>	<i>44</i>
<i>Obr.8-2</i>	<i>Průběh simulované rychlosti větru</i>	<i>45</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab.3-1 Rozdělení zdrojů podle kapacitního faktoru</i>	<i>21</i>
<i>Tab.3-2 Rozdělení vlivu zdrojů podle zkratových poměrů a vyšších harmonických</i>	<i>22</i>
<i>Tab.5-1 Vztažné proudy.....</i>	<i>33</i>
<i>Tab.8-1 Tabulka zpětných vlivů určených ze simulace určené pro jednotlivé zkratové výkony</i>	<i>47</i>
<i>Tab.9-1 Tabulka zpětných vlivů určených z výpočtů dle současné metodiky.....</i>	<i>48</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

nn-nízké napětí
 vn -vysoké napětí
 vvn-velmi vysoké napětí
 DS- distribuční síť
 HDO-hromadné dálkové ovládání
 PNE- podnikové normy energetiky

Značky:

k_{kl} -poměr zkratového výkonu
 ΔS_A - změna zatížení
 Δu_{An} – celková relativní změna napětí
 c - činitel flikru
 d_c - je relativní změna napětí
 d_{kom} - relativní hloubka komutačního poklesu
 I_v - přípustný harmonický proud
 i_v - vztažný proud
 φ_E - úhel dodávky
 k_{imax} -poměr největšího proudu v průběhu spínání
 k_{iy} - koeficient spínacího proudu závislý na úhlu impedance sítě
 p_{10min} -maximální střední výkon v intervalu 10 minut
 P_{1t} -hodnota flikru
 P_{1tjj} - hodnota flikru v přípojném bodě zařízení
 P_{1tjk} -příspěvek flikru v ostatních přípojných bodech
 P_{1tZU1} -nejvyšší přípouští hodnota dlouhodobého flikru
 S_0 -referenční výkon
 S_A -zdánlivý výkon zařízení
 S_{AV} -je celkový zdánlivý výkon v přípojném bodě
 $\sin\psi_{kV}$ - poměrem indukční reaktance a impedance
 S_{kVj} -zkratový výkon v přípojném bodě j
 S_{kVk} -zkratový výkon v bodě k
 S_{kV} - zkratový výkon v přípojném bodu
 S_{max} - maximálních zdánlivých výkon všech připojených/plánovaných výroben
 S_{nE} -zdánlivý jmenovitý výkon výroby
 S_{ng} -zdánlivý výkon generátorů
 $S_{rE_{max}}$ -maximální připojitelný výkon
 $S_{rE_{max}}$ - maximální výkon výrobní jednotky větrné elektrárny
 S_{rk} - výrobní výkon výroby
 X_k -reaktance

Z_k - impedace

Δf - rozdíl frekvence

ΔU - rozdíl napětí

Δu_{AV} - zvýšení napětí v přípojném bodě

Δu_{uers} - fiktivní náhradní změna napětí

ΔU_{Kom} - největší odchylka napětí sítě od okamžité hodnoty základní harmonické

Δu_{max} - změna napětí vyvolaná manipulacemi

$\Delta \varphi$ - rozdíl fáze

φ - fázový úhel mezi proudem a napětím výroby

ψ_{kV} - fázový úhel sítě

1 ÚVOD

V poslední době je kladen mnohem větší význam na výrobu elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Tato práce se zabývá vlivem těchto zdrojů na kvalitu elektrické energie. Jednotlivé obnovitelné zdroje ovlivňují různým způsobem elektrickou soustavu, k níž jsou připojeny. To je způsobeno použitím různých technologií přeměny obnovitelné energie na elektrickou a dostupností tohoto zdroje v daném čase. V první kapitole se tato práce zabývá vysvětlením technologií přeměny energie v jednotlivých obnovitelných zdrojích. Dále následuje základní přehled vlivu jednotlivých zdrojů rozptýlené výroby na kvalitu elektrické energie. V další části jsou vysvětleny požadavky, které jsou kladeny na jednotlivé obnovitelné zdroje, aby mohly být připojeny do distribuční sítě. A také se práce zabývá současnou metodikou hodnocení, která se používá při připojování jednotlivých zdrojů do sítě. V dalších částech se tato práce zabývá sestavením dynamického modelu větrné elektrárny a modelu jednoduché elektrické sítě pomocí programu Matlab Simulink. Pomocí těchto modelů jsem simuloval provoz větrné elektrárny a zjišťoval jsem vliv z hlediska zpětných vlivů na elektrickou síť. V závěru se tato práce zabývá porovnáním výsledků získaných simulací s výsledky určenými pomocí současné metodiky.

2 ZDROJE ROZPTÝLENÉ VÝROBY ELEKTRICKÉ ENERGIE

Jedním z problémů dnešní energetiky je výroba energie v rozptýlených zdrojích. Těmto zdrojům se taky někdy říká disperzní zdroje a zahrnují většinou obnovitelné zdroje energie, ačkoliv velké vodní elektrárny, pobřežní větrné parky a společné spalování biomasy v běžných elektrárnách (na fosilní paliva) mohou být výjimkami. Mezi obnovitelné zdroje energie patří: vodní elektrárny, větrné elektrárny, fotovoltaické elektrárny a také energie vznikající spalováním biomasy. Jsou to většinou zdroje malých výkonů rozmístěné po určitém prostoru, tedy nejsou centralizované. Tyto zdroje jsou menších výkonů, proto jsou připojovány k distribučním sítím vn a nn. Důvody proč se zvětšuje objem výroby v obnovitelných zdrojích, jsou jak ekologické tak ekonomické. Mezi ekologické patří závazek České republiky, že do roku 2010 navýší podíl elektrické energie z obnovitelných zdrojů na 8% [3].

2.1. Fotovoltaické elektrárny

Elektrickou energii lze získat ze sluneční energie různými způsoby, přímo i nepřímo. Prvním způsobem je použití fotovoltaického článku. Tyto články produkují stejnosměrný signál, který musíme převádět na střídavý signál. Abychom mohli připojit elektrárnu na síť, použijeme elektronické střídače. Obdobně je tomu i u nepřímé přeměny. Ta je založena na získání tepla pomocí slunečních sběračů. V ohnisku sběračů umístíme termočlánky, které mění teplo na elektřinu. Další skupinou jsou sluneční tepelné elektrárny. V principu jde o tepelnou elektrárnu, která potřebné teplo získává přímo ze slunečního záření. Systém využívá soustředění sluneční energie pomocí čočky nebo zrcadla do jednoho místa. Koncentrované sluneční záření je pak užito jako zdroj tepla pro konvenční elektrárnu. Pro výrobu elektrické energie se potom používá synchronní generátor. [7]

2.2 Palivový článek

V něm využíváme slunečního záření prostřednictvím chemické energie tak, že pomocí slunečního záření rozložíme vodu na vodík a kyslík. Tím se energie ukládá do jednotlivých plynů. Při opětovném slučování těchto plynů (okysličování vodíku) vzniká opět voda a uvolňuje se nahromaděná energie. V palivovém článku se tato tepelná energie mění na elektrickou energii. V budoucnosti budou pravděpodobně palivové články důležitým zdrojem energie. Jejich předností je především vysoká účinnost až 90 %. Pomocí palivových článků lze získávat elektřinu s výkonem 12 kW. Vyrábějí se však už baterie mnoha palivových článků s výkonem až 13 000 kW, které se používají zejména v astronautice [7].

2.3 Vodní elektrárny

Protékající voda roztáčí turbínu, která je připojena na společné hřídeli s elektrickým generátorem. Generátor dohromady s turbínou tvoří turbogenerátor. Potenciální energie vody se tak mění na energii elektrickou. Výběr turbíny závisí na účelu a podmínkách celého vodního díla. Nejčastěji jsou používány Francisova nebo Kaplanova turbína v různých modifikacích. V malých vodních elektrárnách jsou to pak Bánkiho a jednoduchá Francisova turbína. Pro výrobu energie se potom používají různé druhy generátorů. Velké vodní elektrárny pracují se synchronními generátory a malé vodní elektrárny používají asynchronní generátory. [7]

2.4 Větrné elektrárny

Aerodynamické síly působí na listy rotoru, které převádějí větrnou energii na mechanickou energii. Mechanická energie je pomocí generátoru převáděna na energii elektrickou. Pro výrobu elektrické energie se používají různá zapojení s různými generátory. Podél rotorových listů vznikají aerodynamické síly. Z toho důvodu musí mít listy speciálně tvarovaný profil, velmi podobný profilu křídla letadla. Se vzrůstající rychlostí větru rostou vztahové síly s druhou mocninou a energie vyprodukovaná generátorem s třetí mocninou. Je proto třeba zajistit efektivní a rychle pracující regulaci výkonu rotoru tak, aby se zabránilo mechanickému a elektrickému přetížení větrné elektrárny[7].

1) Větrné elektrárny s asynchronními generátory

Jednou možností je použití asynchronního generátoru s kotvou na krátko, poháněného přes převodovku. Jalový výkon je v tomto případě vyráběn kondenzátorovými bateriemi. Otáčky se regulují 1 až 2%. Další možností je použití asynchronního generátoru s vinutou kotvou. V tomto zapojení můžeme plynule měnit odpor připojený do obvodu kotvy. Pro výrobu jalového výkonu je třeba použít opět kondenzátorové baterie. Otáčky se mohou měnit o 10%. Poslední zapojení je tzv. dvojitě napájený asynchronní generátor. Užívá asynchronního generátoru s vinutou kotvou. Rotorové vinutí je napájeno přes frekvenční měnič. Díky tomuto měniči nejsou potřebné kondenzátorové baterie, protože je schopen dodávat jalový výkon jak pro potřebu generátoru, tak pro potřeby sítě. Otáčky se mohou měnit až o 30% [9].

2) Větrné elektrárny se synchronními generátory

Podobně jako asynchronní generátory mohou být synchronní generátory poháněny přímo, nebo přes převodovku. Jestliže použijeme převodovku, můžeme synchronní generátor připojit k síti. Bezpřevodkově uspořádání používá nízkotáčkové generátory, které mají poměrně velké rozměry a k síti jsou připojené přes měniče kmitočtu[9].

2.5 Kogenerační jednotky

Tyto jednotky využívají současné výroby elektrické energie a tepla z jednoho primárního zdroje. Vyrobené teplo může být použito pro vytápění prostoru, nebo při vyšších teplotách jako technologické teplo, obvykle ve formě páry. Kogenerační zdroje se často rozdělují na malé a velké. Malé zdroje používají spalovací motory jako pohonnou jednotku. Někdy tyto zdroje označujeme jako malokogenerační. Na rozdíl od nich velkokogenerační využívá jako pohonu plynových turbín. Dělení na „velké“ a „malé“ jednotky je běžné, ale jedná se o subjektivní definici. V kontextu průmyslové plynové kogenerační turbíny jednotka s výkonem 5 MW je malá. Pokud se jedná o spalovací motory, tak jednotka 5 MW je velká. Tyto zdroje je mnohem užitečnější dělit podle technologie, eventuálně podle užití tepla. Spalovací motory jsou používány tam, kde je teplo používáno pro vytápění prostoru. Jestliže potřebujeme vysokopotenciální teplo, je vhodnější použít plynové turbíny. Pro výrobu elektrické energie se používají synchronní nebo asynchronní generátory. Synchronní může na rozdíl od asynchronních pracovat nezávisle na síti, může být tedy použit jako záložní zdroj.

U generátoru s výkonem do 200 kW je cenově výhodnější použití asynchronního generátoru, není třeba další vybavení pro řízení, startování a paralelní provoz se sítí. Při výkonech nad 200

kW cenový rozdíl mizí. Je tendence používat synchronní generátory i pro kogenerační jednotky s nižšími výkony [5].

2.1.1 Plynové turbíny

Ve velkém měřítku se staly nejrozšířenějšími pohony kogenerace, typický instalovaný výkon se pohybuje mezi 1 až 100MW. Pracuje na principu hoření paliva ve spalovací komoře za přítomnosti vzduchu dodávaného kompresorem. Žhavé stlačené plyny o teplotě kolem 1200 °C otáčejí řadou lopatek turbíny, které jsou připevněny na hřídeli. Tím vzniká mechanická energie, která je použita k výrobě elektřiny generátorem. Spaliny z parní turbíny jsou použity buď přímo, nebo přes parogenerátor pro místní spotřebu tepla. Další možností je použití spalin k výrobě tepla v kotli na odpadní teplo. Toto teplo je využíváno pro průmyslové procesy, nebo k výrobě elektrické energie expanzí v parní turbíně [5].

2.1.2 Spalovací motory

Pracují na stejném principu jako automobilové spalovací motory. Oproti plynovým turbínám mají větší elektrickou účinnost. Naopak větší problém je s využitím vyrobeného tepla, které je téměř rovnoměrně rozděleno mezi spaliny a chladivo motoru. V mnoha aplikacích je teplo získané z chladících okruhů a spalin kaskádně uspořádáno k výrobě jednoho výstupu tepla. Nejčastěji je vyráběna horká voda o teplotě kolem 100 °C. S rozvojem využití obnovitelných zdrojů jsou tyto motory používány pro spalování bioplynu [5].

2.1.3 Mikroturbíny

V posledních letech byly vyvinuty turbíny mnohem menších výkonů. Instalovaný výkon se snížil až na 30 kW. Oproti spalovacím motorům mají nižší emise NO_x, nejsou náročné na údržbu a vyrábějí vysokopotenciální teplo. Ovšem nelze srovnávat mikroturbíny se spalovacími motory na základě elektrické účinnosti [5].

2.1.4 Stirlingovy motory

Stirlingův motor je „novou“ technologií v různých projektech mikro-kombinované výroby. Byl vyvinut již v roce 1816. Nicméně vyžaduje materiály vysoké kvality, proto se v minulosti výrazně nerozšířil. Pracuje na principu změny teplotního rozdílu po celém stroji. Tato změna je převáděna na mechanickou energii. Teplotní změny se dosahuje pohybem plynu mezi teplými a studenými tepelnými výměníky. Jako pracovní plyn se používá vzduch, vodík nebo helia. Elektrická účinnost Stirlingova motoru je něco přes 10 % [5].

3 ZÁKLADNÍ PŘEHLED VLIVU ROZPTÝLENÉ VÝROBY NA KVALITU ELEKTRICKÉ ENERGIE

3.1 Vliv různých obnovitelných zdrojů na distribuční síť

Jak velký vliv mají jednotlivé obnovitelné zdroje na kvalitu lze rozlišovat podle následujících kritérií:

- podle využití výkonu – kapacitní faktor
- podle charakteru výkonu proměnného v čase
- podle druhu generátoru připojeného k síti

3.1.1 Kapacitní faktor

Je to nástroj používaný pro porovnávání jednotlivých zdrojů energie. Vyjadřuje ekvivalentní dobu, kterou daný zdroj pracuje s instalovaným výkonem za rok. Tímto způsobem se přepočítá celková doba provozu daného zařízení s proměnným výkonem pohybujícím se od (0-100%), na dobu ekvivalentní, po kterou by pracoval se 100 % zatížením. Tato ekvivalentní doba vyjádřená v hodinách za rok a podělená celkovou dobou roku vyjadřuje kapacitní faktor.

Druh obnovitelného zdroje	Kapacitní faktor	Ekvivalent doby provozu s plným výkonem
Spalování biomasy	85%	~ 7 500 hod/rok
Bioplynové stanice	90%	~ 8 000 hod/rok
Malé vodní elektrárny	45 až 50%	~ 4000 až 4 380 hod/rok
Větrné elektrárny	17 až 30%	~ 1500 až 2600 hod/rok
Fotovoltaické elektrárny	9,7 až 11%	~ 850 až 1000 hod/rok

Tab. 3-1 Rozdělení zdrojů podle kapacitního faktoru

U vodních, větrných a fotovoltaických elektráren záleží na parametrech lokality a klimatických podmínkách konkrétního roku. Těmito parametry rozumíme vodní srážky, povětrnostní podmínky, počet slunečných dní.

3.1.2 Proměnlivost výkonu v čase

Uvádí, jakou rychlostí se mění výkon v době jedné hodiny jednotlivých obnovitelných zdrojů. Nejlépe jsou na tom zdroje pracující na principu zpracování biomasy a malé vodní elektrárny. Jejich výkon se během hodiny mění v rozmezí 70-100% a během jedné minuty o jednotky procent. Výstupní výkon fotovoltaické a větrné elektrárny se mění během hodiny v rozmezí 0-100% a během minuty o desítky %.

3.1.3 Druhy generátorů pro různé zdroje

Jednotlivé disperzní zdroje jsou připojeny do elektroenergetického systému pomocí distribuční sítě. Napěťová hladina se volí podle výkonu zdroje. K přeměně jednotlivých energií na elektrickou se používá tří základních technologií. Používají se synchronní a asynchronní generátory a výkonové měniče kmitočtu. Tyto zdroje mají různý vliv na velikost zkratových poměrů a úroveň vyšších harmonických, podle tabulky 3-2.

Druh zdroje	Synchronní generátory	Asynchronní generátory	DC zdroje se střídači
Vliv na zkratové poměry	velký	malý	velmi malý
Úroveň harmonických	velmi malá	velmi malá	značná

Tab. 3-2 Rozdělení vlivu zdrojů podle zkratových poměrů a vyšších harmonických

Synchronní generátory

Tyto generátory se používají při výrobě elektrické energie pomocí parních a plynových turbín, dieselových motorů a vodních turbín.

Asynchronní generátory

Používají se při výrobě ve větrných elektrárnách a v malých vodních elektrárnách.

Stejnoseměrné zdroje se střídači

Používají se při výrobě pomocí palivových článků, fotovoltaických článků a u některých větrných elektráren s usměrňovači a střídači.

Z předchozího rozdělení je patrné, že největší problémy při připojování obnovitelných zdrojů, jsou s větrnými elektrárnami. A to z důvodu nestálosti jejich výstupního výkonu, nutnosti udržování rezervního výkonu a složitou předvídatelností jejich produkce [1,9].

3.2 Možnosti akumulace elektrické energie

Jak už bylo řečeno v minulé kapitole, elektrická energie dodávaná z obnovitelných zdrojů do sítě, a to zejména z větrných elektráren, má v čase velmi proměnlivou hodnotu. Tato změna je úměrná třetí mocnině rychlosti větru. Abychom zmenšili tyto změny energie, používáme systémy akumulace elektrické energie. Tento akumulací systém musí mít dostatečný výkon v řádu desítek procent instalovaného výkonu větrné energie. V současnosti se používá pět základních způsobů akumulace.

- 1) Kvantitativní akumulace** – tvoří ji převážně zásoba pevných, kapalných a plyných paliv na zemském povrchu i zemské kůře. Nejedná se o klasickou akumulaci, ale jde převážně o spalování, kde se spalováním anorganických látek uvolňuje energie.
- 2) Tepelná akumulace** – této akumulace využívají tepelné akumulátory, které představují buď speciální zařízení, nebo běžné součásti technologických celků, například dlouhé teplovody, které umožňují využít akumulované tepelné energie pro přeměnu na jiný druh energie, obvykle elektrické.
- 3) Chemická nebo elektrochemická akumulace** – označuje akumulaci elektrické energie ve formě chemické energie. Toto se provádí pomocí baterií nebo akumulátorů.

Akumulátory využívají přeměnu elektrické energie na energii chemickou, kterou je možno v případě potřeby transformovat zpět na elektrickou energii. V dnešní době existuje velké množství typů akumulátorů, vhodných pro realizaci těchto systémů. U drobných akumulačních systémů se používají průmyslově vyráběné akumulátory NiCd, Li-ion a Li-pol. Ve výkonově akumulačních systémech se používají akumulátory NaS a akumulátory s průtočným elektrolytem.

- 4) **Mechanická akumulace** – využívá přeměny potenciální a kinetické energie v zařízeních umožňujících přeměnu této energie na jinou formu vhodnější pro praktické využití. Nejčastějším případem je použití přečerpávacích vodních elektráren. Další možností je použití zásobníků stlačeného vzduchu nebo plynu. Dále pak se pro akumulaci ve formě kinetické energie využívá setrvačníků. V praxi se tyto způsoby však moc nepoužívají, ale možnosti použití se zkoumají.
- 5) **Elektromagnetická akumulace** – pracuje na principu elektromagnetické akumulace založené na akumulování energie ve formě elektromagnetického pole kolem supravodivých vodičů. Jedná se o poměrně nový způsob akumulace a je podroben dalšímu výzkumu.

Podle umístění těchto akumulačních zařízení rozlišujeme decentralizované a centralizované systémy akumulace. Decentralizované akumulační systémy jsou přidruženy k jednotlivým větrným elektrárnám nebo celým větrným farmám. V praxi bylo uskutečněno mnoho experimentů pro vybrání vhodného akumulačního systému. Z ekonomických a někdy i z ekologických příčin je použití některých akumulačních systémů nemožné. Nejčastější je použití elektrochemické akumulace za použití vhodných ochranných a řídicích elektronik. Dále se používá superkapacitorů, které jsou schopny přímo uložit elektrický náboj. Dalším už poněkud méně používaným akumulačním systémem zejména v Evropě je použití hmotného mechanického setrvačnicku na vysokých otáčkách. Centralizované akumulační systémy jsou stále součástí elektrizační soustavy, jsou to totiž systémy pro řešení nerovnováhy sítě. Realizace těchto systémů se provádí pouze dvěma způsoby. Prvním způsobem je čerpání vody a druhým způsobem je použití stlačeného vzduchu [4].

3.3 Výhody a nevýhody rozptýlené výroby

Hlavní nevýhodou rozptýlené výroby je nižší hospodárnost, účinnost, zásoby paliva a životnost. Čím větší má výrobní jednotka výkon, tím větší má účinnost a menší náklady na MW. Dokonce i při spojení několika menších jednotek stejné velikosti do jednoho výrobního celku jsou náklady na MW nižší. Výhoda hospodárnosti není tak podstatná, protože malé jednotky jsou výhodnější z hlediska neustálého technologického vývoje. Zatím co velké jednotky jsou již plně vyvinuty. Mezi nevýhody patří také požadavky na umístění a nepředvídatelnosti výroby energie. S nepředvídatelností také souvisí náklady na zálohování výkonu elektrické sítě a udržování rezervního výkonu pro případ, když vítr zeslabí nebo zesílí mimo pracovní oblast větrné turbíny. Další nevýhodou rozptýlené výroby jsou náklady na připojení. Patří sem také vysoké náklady na postavení obnovitelného zdroje.

Jednou výhodou je využití tepla, které je vždy spojené s výrobou elektrické energie. Na tomto principu pracují kogenerační jednotky, které se snaží využít energii efektivněji. Jestliže je třeba teplo využívat lokálně, jedná se vždy o rozptýlenou výrobu. Další výhodou je fakt, že se jedná o ekologické zdroje energie, které netvoří skleníkové plyny, to neplatí pro fosilní

paliva. S tím je spojena i další výhoda, že u těchto zdrojů odpadají investice na palivo. To snižuje náklady na provoz a snižuje provozní rizika.

Další výhody a nevýhody spojené s energetickou, sítí a životním prostředím je třeba posuzovat jednotlivě případ od případu[7].

4 POŽADAVKY NA PŘIPOJENÍ

Požadavky pro připojení jsou dány podnikovými normami energetiky a to konkrétně PNE 33 3430: Parametry kvality elektrické energie. A dále také pravidly provozování distribučních soustav přílohou 4: Pravidla pro paralelní provoz zdrojů ze sítě provozovatele distribučních soustav.

Při připojování výroben, potažmo odběrů s vlastními výrobny, které mají být paralelně připojeny k distribuční síti, vzniká celá řada technických problémů.

- 1) Změny rozdělení toku výkonů - Připojením disperzního zdroje k distribuční síti může dojít k přetížení části sítě, změně toku výkonů, změně ztrát v síti, což může vést k výměně zařízení nebo ke stavbě nových sítí.
- 2) Změny velikosti napětí - Jestliže k síti připojíme nový zdroj, tak napětí podél vedení vzroste podle velikosti činného výkonu, což způsobí změny i v jiných místech sítě jak vn tak nn. Je tedy třeba regulovat napětí sítě.
- 3) Vzrůst zkratových proudů - Připojením nového zdroje do sítě se zvyšují hodnoty zkratových proudů, což může vést k překročení dovolených zkratových parametrů energetických zařízení.
- 4) Ohrožení stability a bezpečnosti generátoru - Může k tomu dojít při vzniku zkratu v síti nebo při vzniku ostrovního provozu.
- 5) Změny podmínek pro činnost elektrických ochranných v sítích vn - Podle místa vzniku zkratu z jedné strany se projeví „podpora“ zdrojů, na druhé straně změna toku proudu, což vyžaduje změnu nastavení nebo výměnu elektrických ochranných.
- 6) Vliv na kvalitu energie - Podle principu výroby elektrické energie se mohou objevit různé problémy s kvalitou energie. Jako je například flickr nebo vliv harmonických [12].

4.1 Přihlašovací řízení

Při přihlašování je třeba dodat podklady provozovateli distribuční soustavy. Přihlašovací řízení musí obsahovat situační plány pozemku, přehledové schéma výroby, údaje o předávací stanici, technická data napájecího transformátoru, popis ochranných, příspěvek zkratových proudů, popis výrobních zdrojů včetně technických protokolů, osvědčení a zkušební protokol očekávaných zpětných vlivech. Na tomto základě poskytne distributor žadateli informace o možnostech připojení výroby k distribuční síti. Dále je třeba podat distribuční společnosti žádost o připojení. Na základě této žádosti, rozhodne distributor energie, zda je nutné, aby žadatel nechal možnost připojení výroby k distribuční síti ověřit studií připojitelnosti [13].

4.2 Studie připojitelnosti

Studie připojitelnosti výroby musí obsahovat technické posouzení s ohledem na dodržení parametrů zpětných vlivů na distribuční soustavu. Jedná se zejména o změny napětí vyvolané trvalým provozem výroby, změny napětí při spínání, útlumu signálu HDO, flikru, harmonických a dalších kritérií daných charakterem výroby [13].

Podklady pro studie připojitelnosti by měly zpravidla obsahovat:

- a) zkratový výkon v_{vn} nebo v_n v napájecí rozvodně nebo místě od kterého bude vliv počítán
- b) stávající a výhledové hodnoty zatížení v soustavě
- c) související zdroje připojené k DS v předmětné části DS
- d) platné požadavky na připojení zdrojů k DS v předmětné části DS
- e) parametry transformátoru v_{vn}/v_n
- f) stávající a výhledový stav HDO
- g) parametry vedení k místu připojení – délka, typ, průřez
- h) možné provozní stavy (základní zapojení + zapojení při náhradních dodávkách)
- i) zjednodušený mapový podklad [13]

4.3 Připojení k síti

Pro připojení k síti je třeba najít vhodné předávací místo, které musí být přístupné personálu distribuční soustavy. Tohle místo a způsob připojení na síť určí provozovatel distribuční soustavy. S přihlédnutím k daným síťovým poměrům, výkonu a způsobu provozu vlastní výroby, stejně jako k oprávněným zájmům výrobce. Z hlediska zpětných vlivů na síť vychází posudek z impedance sítě v napájecím bodě. Stejně jako při posuzování provozu vlastní výroby [12].

4.4 Podmínky pro připojení

Při připojování výroby do distribuční sítě je třeba splnit podmínku, že všechny fáze sítě jsou pod napětím. K připojení se používá spínač, který musí být blokován, dokud není na každé fázi napětí minimálně nad rozběhovou hodnotou podpěťové ochrany.

4.4.1 Zvýšení napětí

Napětí se v případě připojení do přípojného bodu nesmí v nejhorším případě zvýšit o 2% v sítích v_n a 110kV a o 3% v síti nn. Pokud se v síti nachází jedno přípojné místo, posuzuje se tato podmínka podle vzorce 4.1. Tento poměr musí být větší než 50 pro síť v_n a větší jak 33 pro síť nn.

$$k_{k1} = \frac{S_{kV}}{\sum S_{Amax}} \quad (4.1)$$

S_{kV} - je zkratový výkon v přípojném bodu

$\sum S_{Amax}$ - součet maximálních zdánlivých výkonů všech připojených/plánovaných výroben.

Při zjišťování maximálních zdánlivých výkonů jednotlivých zařízení větrných elektráren je třeba vycházet z výkonů zařízení $S_{E_{max}}$, který se určí podle vzorce 4.2.

$$S_{E_{max}} = p_{10min} S_{ng} \quad (4.2)$$

p_{10min} - je maximální střední výkon v intervalu 10 minut

S_{ng} - je zdánlivý výkon generátoru

Maximální střední výkon v intervalu 10 minut je udáván ve zkušebním protokolu větrné elektrárny.

Pokud je síť převážně induktivní, pak je posouzení podle vzorce 4.2 příliš konzervativní, to znamená, že dodávaný výkon bude silněji omezen, než je zapotřebí k dodržení zvýšení napětí. Potom je třeba výkon $S_{A_{max}}$ vypočítat podle vzorce 4.3 pro síť vn, a podle vzorce 4.4 pro síť nn.

$$S_{A_{max\,vn}} = \frac{2\% S_{kV}}{k_{k1vn} (\cos(\psi_{kV} - \varphi))} \quad (4.3)$$

$$S_{A_{max\,nn}} = \frac{3\% S_{kV}}{k_{k1nn} (\cos(\psi_{kV} - \varphi))} \quad (4.4)$$

ψ_{kV} - fázový úhel sítě

φ - fázový úhel mezi proudem a napětím výroby

Jestliže potřebujeme určit zvýšení napětí v přípojném bodě Δu_{AV} , použijeme vzorce 4.5 [13].

$$\Delta u_{AV} = \frac{S_{A_{max}} \cdot \cos(\psi_{kV} - \varphi)}{S_{kV}} \quad (4.5)$$

4.4.2 Změny napětí při spínání

Změny napětí ve společném napájecím bodě, vyvolané manipulacemi z jednotlivých generátorů, nevyvolávají zpětné vlivy, pokud největší změna napětí v předávacím místě sítě nn nepřesáhne 3% a změna napětí v předávacím místě sítě vn 2%. To platí, pokud spínání není častější jak jednou za 1,5h. V sítích 110kV platí pro omezení změny napětí vyvolané spínáním.

a) Normální provoz: Jestliže spínáme jednu výrobní jednotku, což může být například jeden generátor větrné turbíny, může být změna napětí maximálně 0,5%. Při spínání celého zařízení, může být změna napětí maximálně 2%.

b) Poruchový provoz: Při spínání celého zařízení může být maximální změna napětí 5%.

Změnu napětí lze odhadnout na základě vzorce 4.6.

$$\Delta u_{\max} = k_{i\max} \frac{S_{nE}}{S_{kV}} \quad (4.6)$$

S_{kV} - zkratový výkon v přípojném bodu sítě

S_{nE} - zdánlivý jmenovitý výkon výroby

$k_{i\max}$ - největší spínací ráz

Největší spínací ráz udává poměr největšího proudu, který se vyskytuje v průběhu spínacího pochodu ke jmenovitému proudu generátoru. Tento poměr se pohybuje v rozmezí 1-8 podle druhu výrobního zařízení. Pro větrné elektrárny platí speciální "činitel spínání závislý na síti", tento činitel musí respektovat nejen výši ale i časový průběh proudu při spínání a udává se jako funkce úhlu impedance sítě pro každé zařízení ve zkušebním protokolu. Pomocí něj lze vypočítat fiktivní "náhradní změnu napětí", podle vzorce 4.7. Výsledek nesmí přesáhnout hodnotu

$$\Delta u_{ers} = k_{i\psi} \frac{S_{nE}}{S_{kV}} \quad (4.7)$$

maximální změny napětí pro jednotlivé stavy. Pro zmenšení zpětných vlivů na síť je třeba zamezit současnému spínání více generátorů v jednom přípojném bodě. Technické řešení je časové odstupňování jednotlivých spínání, které je závislé na vyvolaných změnách napětí [13].

4.4.3 Připojování synchronních generátorů

Vhodným zařízením je třeba zajistit dodržení těchto synchronizačních podmínek

- rozdíl napětí $\Delta U < \pm 10 \% U_n$
- rozdíl frekvence $\Delta f < \pm 0.5 \text{ Hz}$
- rozdíl fáze $\Delta \varphi < \pm 10^\circ$

4.4.4 Připojování asynchronních generátorů

Asynchronní generátory rozbíhané pohonem musí být připojeny bez napětí při otáčkách v mezích 95 % až 105 % synchronních otáček. U těchto generátorů je změna zatížení většinou menší než 4-násobek výkonu generátorů. To platí při zanedbání prvních dvou celých kmitů (rush-efekt). V první půlvině lze čekat proudové špičky 8 násobku jmenovitého proudu. U asynchronních generátorů schopných ostrovního provozu, které nejsou připojovány bez napětí, je zapotřebí dodržet podmínky spínání jako pro synchronní generátory.

4.4.5 Připojování výroben se střídači a měniči kmitočtu

Střídače smějí být spínány pouze tehdy, když je jejich střídavá strana bez napětí. U vlastních výroben se střídači, schopných ostrovního provozu, které nejsou spínány bez napětí, je zapotřebí dodržet podmínky zapnutí platné pro synchronní generátory [13].

5 SOUČASNÁ METODIKA HODNOCENÍ

Tato kapitola se zabývá posouzením připojení zdrojů s přípojovacím bodem v sítích nn, vn a 110kV. Přitom se vychází z předpokladu, že se elektrická energie vyrábí pokud možno bez rušivých vlivů a že se souhrn přípustných zpětných vlivů na síť rozdělí na všechna připojená zařízení. Aby nedocházelo k negativnímu ovlivňování kvality napětí, musí být dodržena podmínka, že zpětné vlivy na síť působící od zdrojů musí být menší než zpětné vlivy na síť působící od spotřebičů. S výjimkou těch nejmenších zdrojů.

5.1 Posouzení z hlediska zpětných vlivů na síť

Z hlediska zpětných vlivů na síť mají při paralelním provozu výroben význam tyto body:

- zvýšení napětí
- změny napětí vyvolané manipulacemi
- flikr
- harmonické
- komutační poklesy
- nesymetrie
- kompensace jalového výkonu
- zpětné vlivy na zařízení pro přenos signálů po distribuční síti (např. HDO).

Provoz výrobního zařízení je z hlediska zpětných vlivů na síť přípustný za dodržení určitých podmínek. Vede-li posouzení k nepříznivému výsledku, je třeba navrhnout určitá opatření už ve fázi plánování [11].

5.1.1 Zvýšení napětí

Celková relativní změna napětí Δu_{An} v přípojném bodě nesmí překročit přípustné hodnoty a to 3% pro síť nn a 2% pro síť vn. Ve zvláštních případech může provozovatel sítě zadat i jiné hodnoty.

Pravidla pro výpočet:

Síťové transformátory vn/nn se připočítávají k hodnotám nn.

Ve velmi jednoduchých případech lze v sítích nn použít manuální výpočet pro hrubý odhad. Ovšem při proměnlivé dodávce jalového výkonu, nebo při sledování úrovně napětí ve více uzlech se doporučuje použití počítačové analýzy toku výkonů. Pro správné výsledky je třeba použít zatížení naměřená v síti současně. Při nedostatku přesných údajů je možné použití následujících odhadů jako nejhorší případ. Síť nn je bez zatížení s plnou dodávkou. Síť vn přenáší cca 25% jmenovitého zatížení. Relativní zvýšení napětí Δu_{An} lze vypočítat podle vzorce 5.1.

$$\Delta u_{An} = \frac{S_{rE\max}}{S_{kV}} \cos(\psi - \varphi_E) \quad (5.1)$$

$S_{rE\max}$ - maximální připojitelný výkon

S_{kV} - zkratový výkon v přípojném bodě

ψ - úhel impedance sítě

φ_E úhel dodávky (úhel mezi činným a zdánlivým výkonem zdroje)

Při dodávce z více výrobních zařízení ve více přípojných bodech a v komplikovaných konfiguracích sítě, je třeba relativní zvýšení napětí určit výpočtem toku zatížení.

Opatření pro snížení relativní změny napětí:

Jednou možností je zvýšení zkratového výkonu sítě, a to buďto technickými opatřeními, nebo změnou přípojného bodu s větším zkratovým výkonem. Další možností je řízení jalového výkonu nebo omezení maximálního možného dodávaného výkonu [11].

5.1.2 Změny napětí vyvolané manipulacemi

Při spínání a odpínání výrobních zařízení k síti (např. připojení generátorů, přepínání počtu pólů asynchronních generátorů) nesmí v přípojném bodě sledované výroby velikost relativní změny napětí d_c překročit přípustnou hodnotu. Pro změny napětí s četností opakování jedna změna za deset minut platí, že relativní změna napětí nesmí překročit hodnotu 3% pro síť nn a 2% pro síť vn. Pro zřídka vyskytující se změny napětí s četností menší než je jedna změna za den lze připustit vyšší hodnotu relativní změny napětí a to 6 % pro síť nn a 3% pro síť vn. Relativní změna napětí se potom vypočítá podle vzorce 5.2, kde d_c je relativní změna napětí.

$$d_c = \frac{\Delta S_A}{S_{kV}} \cos(\psi - \varphi) \quad (5.2)$$

ΔS_A - změna zatížení

S_{kV} - zkratový výkon sítě v přípojném bodě

ψ - úhel impedance sítě

φ - úhel změny zatížení.

Pro různé typy zdrojů se za změnu zatížení ΔS_A dosazují různé hodnoty, je třeba vzít do úvahy druh generátoru.

a) Při dodávce přes měnič nebo střídač je změna zatížení rovna jmenovitému výkonu. Kritické je odpojení, protože začátek dodávky (při připojení) většinou začíná s plynulým nárůstem v oblasti částečného výkonu. Za ΔS_A se dosazuje cca jmenovitá hodnota výkonu výroby.

b) Při dodávce přes synchronní generátor, při dodržení synchronizačních kritérií žádná významná změna zatížení nenastává. Za ΔS_A se dosazuje cca jmenovitá hodnota výkonu výroby.

c) Při dodávce přes asynchronní generátory, které se připínají se synchronními otáčkami, neuvažujeme-li první dva kmity, je změna zatížení nižší než čtyřnásobek výkonu generátoru. Není-li známa přesná hodnota, počítá se obvykle s 8-násobkem jmenovitého výkonu výroby, pro asynchronní generátor s motorickým rozběhem. A 4-násobkem jmenovitého výkonu výroby,

při přibližně synchronních otáčkách generátoru. Při přepínání pólů asynchronních generátorů se vyskytuje obdobně vysoká změna zatížení ΔS_A jako při motorickém rozběhu.

Pro určení fiktivní relativní změny napětí d u větrných elektráren použijeme vzorec 5.3.

$$d = \frac{k_{i\psi} \cdot S_{rE \max}}{S_{kV}} \quad (5.3)$$

$k_{i\psi}$ - koeficient spínacího proudu závislý na úhlu impedance sítě

$S_{rE \max}$ - výkon výrobní jednotky

S_{kV} - zkratový výkon v přípojném bodě

Koeficient spínacího proudu bývá uváděn v protokolu o zkouškách větrných elektráren.

Opatření pro zmírnění změny napětí vyvolané manipulací:

Z předchozího textu je patrné, že toto opatření je potřebné při připojování asynchronních generátorů. Jednou z možností je omezení spínacího proudu. To se provádí tlumivkami, odpory, rozběhovým transformátorem, nebo zařízením pro omezení třífázového proudu, které se po rozběhu přemostí. Další možností omezení spínacího proudu je připojení v přípojném bodě s vyšším zkratovým výkonem, zvýšením zkratového výkonu v daném přípojném bodě nebo zvláštním provedením asynchronního generátoru [11].

5.1.3 Flicker

Flicker je subjektivní vjem nestálého zrakového vnímání vyvolaný světelným podnětem, jehož jas nebo spektrální rozložení kolísá v čase. Posouzení flickru je normálně potřebné jen u větrných elektráren, protože hodnota flickru zařízení především u větrných elektráren s asynchronními generátory může být až 50. Nejvyšší přípustná hodnota dlouhodobého flickru v přípojném bodě sítě, který mohou produkovat všechna výrobní zařízení, nesmí překročit hodnotu 0,46. Známe-li činitel flickru c a fázový úhel flickru φ_f , například ze zkušebního protokolu větrné elektrárny, můžeme pomocí vzorce 5.4 určit dlouhodobý flicker.

$$P_{1t} = c \frac{S_{rE}}{S_{kV}} \cos(\psi - \varphi_f) \quad (5.4)$$

S_{rE} - výrobní výkon výrobní

S_{kV} - zkratový výkon v přípojném místě

ψ - úhel impedance sítě

Pro jednoduchý odhad můžeme za kosinus úhlu dosadit jedničku. Při použití více výrobních jednotek v jednom přípojném bodě je třeba pro každé výrobní zařízení počítat flicker zvlášť. Celkový flicker se potom vypočítá podle vzorce 5.5. Jsou-li výrobní jednotky stejné, platí vzorec 5.6.

$$P_{lt} = \sqrt{\sum_{i=1}^n P_{1ti}^2} \quad (4.5)$$

$$P_{lt} = \sqrt{n} P_{1ti} = \sqrt{n} \cdot c \frac{S_{rEi}}{S_{kV}} \quad (4.6)$$

n - počet připojených jednotek

Při připojení více výrobních zařízení v různých přípojných bodech je třeba pro každé zařízení vypočítat flickr P_{1ij} zařízení j v jeho přípojném bodě $k=j$ podle rovnic 5.4 a 5.5. A dále taky pro každé zařízení j vypočítat příspěvek flickru P_{1jk} v ostatních bodech $j \neq k$. Jestliže platí podmínka $S_{kVj} < S_{kVk}$ vypočítá se příspěvek flickru podle vzorce 4.7.

$$P_{1jk} = P_{1ij} \cdot \frac{S_{kVj}}{S_{kVk}} \quad (5.7)$$

S_{kVj} - zkratový výkon v přípojném bodě j

S_{kVk} - zkratový výkon v bodě k

Je-li $S_{kVj} \geq S_{kVk}$ potom platí vzorec 4.8.

$$P_{1jk} = P_{1ij} \quad (5.8)$$

Výsledný flickr v přípojném bodě k se spočítá obdobně podle vzorce 5.5. Výsledný flickr ve všech přípojných bodech musí být menší než $P_{ltZU1}=0,46$. U komplikovaných konfigurací sítě se výsledný flickr určí simulačním výpočtem.

Opatření pro snížení flickru:

Jednou z možností je volba zařízení s nižší hodnotou flickru nebo instalace dynamického kompenzačního zařízení. Dále je možné flickr snížit zvýšením zkratových výkonů sítě nebo připojením v místě s vyšším zkratovým výkonem [11].

5.1.4 Harmonické

Posouzení z hlediska harmonických je potřebné jen tehdy, dodávají-li zdroje energii do sítě přes měniče nebo střídače. Velikost harmonických proudů zařízení musí udávat výrobce ve zprávě o typové zkoušce.

5.1.4.1 Posuzování harmonických pro sítě nn

Do sítě nemohou být připojeny víc než dvě výrobní s maximálním výkonem 10% výkonu distribučního transformátoru. Přípustný proud I_{vnn} se spočítá podle vzorce 5.9.

$$I_{vnn} = i_v \cdot \frac{S_{kV}}{\sin \psi_{kV}} \quad (5.9)$$

i_v - je vztažný proud daný tabulkou 5-1

$\sin \psi_{kV} = X_k / Z_k$ - poměrem reaktance a impedance

5.1.4.2 Posuzování harmonických pro sítě vn

Pro pouze jediné předávací místo lze určit harmonické proudy $I_{vpř}$ podle vzorce 5.10.

$$I_{vpř} = i_{vpř} \cdot \frac{S_{kV}}{\sin \psi_{kV}} \quad (5.10)$$

$i_{vpř}$ - vztažný proud daný tabulkou 5-1

S_{kV} - zkratový výkon předávacího místa

Pokud je ve společném napájecím bodu připojeno několik zařízení, platí pro výpočet harmonického proudu vzorec 5.11.

$$I_{vpř} = i_{vpř} \cdot S_{kV} \frac{S_A}{S_{AV}} \quad (5.11)$$

S_A - zdánlivý výkon zařízení

S_{AV} - celkový zdánlivý výkon v přípojném bodě.

Řád harmonické μ	vztažný proud (A/MVA)				
	nn	10kV	25kV	35kV	110kV
5	3	0,15	0,058	0,033	2,6
7	2,5	0,082	0,041	0,023	3,75
11	1,5	0,052	0,026	0,015	2,4
13	1	0,038	0,019	0,011	1,6
17	-	0,022	0,011	0,006	0,92
19	-	0,016	0,009	0,005	0,7
23	-	0,012	0,006	0,003	0,46
25	-	0,01	0,005	0,003	0,32
>25 nebo liché	-	0,06 μ	0,03/ μ	0,017/ μ	5,25/ μ
$\mu < 40$	-	0,06 μ	0,03/ μ	0,017/ μ	5,25/ μ
$\mu > 40$	-	0,16 μ	0,09/ μ	0,046/ μ	16/ μ

Tab. 5-1 Vztažné proudy

5.1.4.3 Posuzování harmonických pro sítě 110kV

Pro tyto sítě udává tabulka 5-1 dovolené harmonické proudy vztažené ke zkratovému výkonu pro zařízení připojená do jedné transformovny nebo do jednoho vedení. Pro harmonické proudy do 13 řádu platí vzorec 5.12.

$$I_{vzul} = i_{vzul} \cdot S_{kV} \frac{S_A}{S_0} \quad (5.12)$$

i_{vzul} - přípustný vztažný proud daný tabulkou 4-1

S_{kV} - zkratový výkon v přípojném bodě

S_A - přípojný výkon výrobního zařízení

S_0 - referenční výkon.

Harmonické vyšších řádů než 13 a pro meziharmonické platí vzorec 5.13.

$$I_{vzul} = i_{vzul} \cdot S_{kV} \sqrt{\frac{S_A}{S_0}} \quad (5.13)$$

Připojíme-li výrobní zařízení na vedení mezi dva transformátory, dosazuje se za referenční výkon tepelný mezní výkon tohoto vedení. Při připojení výrobního zařízení vlastním vedením k transformovně, se za referenční výkon dosazuje maximální k transformovně připojitelný výkon [11,13].

5.1.5 Komutační poklesy

Tento zpětný vliv má význam pouze u takových zařízení, kde je energie dodávána do sítě přes střídač řízený sítí. Komutační pokles je dán periodickými krátkodobými poklesy napětí sítě. Důvodem je zkrat mezi dvěma fázovými vodiči, který vzniká při každé komutaci a trvá až do úplného převzetí proudu další diodou.

Relativní hloubka komutačního poklesu je dána vzorcem 5.14.

$$d_{kom} = \frac{\Delta U_{kom}}{\bar{U}_1} \quad (5.14)$$

ΔU_{kom} - je největší odchylka napětí sítě od okamžité hodnoty základní harmonické

\bar{U}_1 - vrcholová hodnota základní harmonické.

Relativní hloubka komutačních poklesů nesmí překročit hodnotu 0,05 pro sítě nn a 0,025 pro sítě vn. K významnému zmenšení doby trvání a hloubky komutačních poklesů se používá síťové tlumivky zapojené společně s usměrňovačem. Další možností je zvýšení zkratového výkonu sítě ve společném napájecím bodu nebo volba usměrňovače s nezávisle řízeným usměrňovačem [7].

5.1.6 Zpětné vlivy na zařízení HDO a rušení signálu HDO

Aby byla zaručena spolehlivá funkce systému HDO, musí být zajištěna taková napěťová úroveň signálů tónové frekvence, která s dostatečnou rezervou převyšuje náběhové napětí přijímačů. Zařízení pro výrobu elektrické energie mimo střídačů nepůsobí rušivě na signál HDO. Na signál HDO působí tedy jenom zdroje se střídači a to jen ty zdroje, které obsahují filtry. Potom příslušné proudy tečou přes přípojný bod do distribuční sítě a mohou způsobit chybnou funkci přijímačů HDO. Rušivé napětí na kmitočtu HDO nebo ležící v těsné blízkosti kmitočtu tohoto signálu, nesmí překročit hodnotu 0,1% jmenovité hodnoty napětí. A pro rušivé signály ± 100 Hz nebo ležící v těsné blízkosti kmitočtu tohoto signálu, nesmí překročit hodnotu 0,3% jmenovité hodnoty napětí [11].

6 DYNAMICKÝ MODEL VĚTRNÉHO MOTORU S GENERÁTOREM

6.1 Dynamické výpočty

Prováděné výpočty v energetice můžeme rozdělit na výpočty dynamického a statického charakteru. Výpočty statického charakteru jsou výpočty chodu sítě a výpočty počátečních rázových hodnot zkratových proudů. Mezi statické výpočty patří zjišťování časových průběhů přechodových jevů. Mezi tyto výpočty s přechodným charakterem patří:

- Výpočty elektromagnetických jevů
- Výpočty elektromechanických přechodných jevů
- Výpočty střednědobé dynamiky
- Výpočty dlouhodobé dynamiky
- Výpočty statické stability

Hlavním důvodem provádění dynamických výpočtů je zajištění bezpečného provozu elektrické soustavy. Pro provádění těchto výpočtů jsou nutná technická data o síti (vedení, transformátorech, kompenzačních zařízeních). A dále také údaje o zdrojích, které dynamiku soustavy ovlivňují především [8].

6.1.1 Výpočty elektromagnetických jevů

Výpočty elektromagnetických přechodných jevů zahrnují celé spektrum analýz. Jako příklad lze uvést výpočty přepětí při spínání vedení naprázdno, při vypínání transformátorů a tlumivek, rezonanční přepětí atd. Elektromagnetické jevy představují speciální děje, které mají většinou lokální charakter [8].

6.1.2 Výpočty elektromechanických přechodných jevů

Výsledkem výpočtů elektromechanických přechodných jevů je stanovení mezí dynamické stability při přechodu z jednoho ustáleného stavu do druhého. Přechodný jev je vyvolán iniciační poruchou, nejčastěji různými druhy zkratů mezi fázovými vodiči a zemí. Vstupní podmínky výpočtu určuje ustálený stav soustavy před poruchou. Průběh poruch je dán činností ochrany a automatik a zejména nastavením jejich časového působení [8].

6.1.3 Výpočty střednědobé dynamiky

Tyto výpočty slouží pro analýzu soustavy při a po činnosti primární regulace frekvence a regulace otáček. Výpočty jsou nezbytné i pro kontrolu ostrovních režimů, vznikajících v důsledku poruch nebo v průběhu obnovy soustavy po jejím rozpadu. Cílem výpočtů je stanovení objemů frekvenčního odlehčování, kontrola zálohy a parametrů primární regulace, kontrola chování různých typů regulace bloku a jejího nastavení apod. Při výpočtu se kontroluje, jestli odchylky frekvence od jmenovité hodnoty nepřesáhnou dovolené meze, při kterých dochází k vypínání generátorů [8].

6.1.4 Výpočty dlouhodobé dynamiky

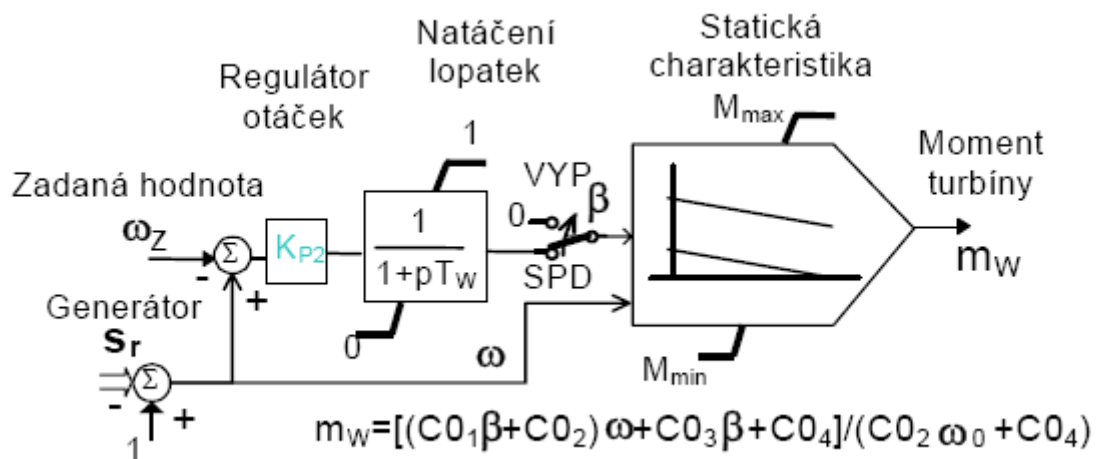
Tyto výpočty slouží pro kontrolu soustavy při a po činnosti sekundární regulace výkonu a frekvence. Jedná se o optimalizaci skladby regulačních bloků a nastavení parametrů sekundární regulace (výkonového čísla, parametrů sekundárních regulátorů apod.). Cílem výpočtů je kontrola velikosti a dynamiky sekundární zálohy výkonu za podmínky vyregulování výpadků výkonů v ES podle principu neintervence. Výpočet může brát v úvahu i změny zatížení a aktivaci terciální regulace a kontrolovat pokrývání denního diagramu zatížení. Dále je kontrolována součinnost sekundární regulace U/Q spolu s bloky a dalšími prostředky do nich zapojenými, tedy odolnost soustavy proti napěťovému kolapsu [8].

6.1.5 Výpočty statické stability

Cílem provádění těchto výpočtů je stanovení mezních hodnot veličin z hlediska fyzikální existence, či přípustnosti provozního stavu. Jako příklad lze uvést modální analýzu soustavy, tj. analýzu šíření kmitů v ES a jejich tlumení. Výsledkem modální analýzy je určení schopnosti soustavy a jejich jednotlivých prvků tlumit vnucené kmity. Dalším použitím je zjištění limitních tranzitů činného výkonu přes přenosové profily, určení mezí podbuzení generátorů a hlídačů mezí podbuzení a návrh nastavení hlídačů meze podbuzení na generátorech atd [8].

6.2 Model větrné turbíny

Při simulaci krátkodobé dynamiky, kdy je rychlost větru konstantní, lze použít statický model s natočením lopatek turbíny, jehož blokové schéma ukazuje obrázek 6-1.

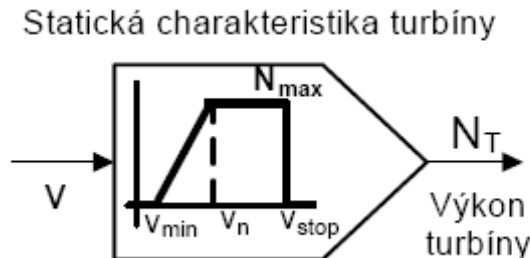


Obr. 6-1 Blokové schéma modelu větrné turbíny při konstantní rychlosti větru [8]

Vlastní turbína je modelována statickou charakteristikou v závislosti na rychlosti rotoru ω a natočení lopatek β . Tato závislost je definována čtveřicí parametrů C_{01} - C_{04} určí se aproximací z charakteristik turbíny. Úhel β se mění v rozmezí od 0 do 1. Při hodnotě 0 dosahuje moment turbíny největší hodnoty. Při inicializaci modelu (ve výchozím stavu) předpokládá $\beta=0$.

Úhel natočení β je ovládán jednoduchým proporcionálním regulátorem otáček Setrvačnost mechanismu natáčení lopatek je modelována časovou konstantou T_w .

Pro simulaci dlouhodobé dynamiky, kdy se rychlost větru mění, lze použít statický model v závislosti na rychlosti větru v , jehož blokové schéma ukazuje obrázek 6-2.

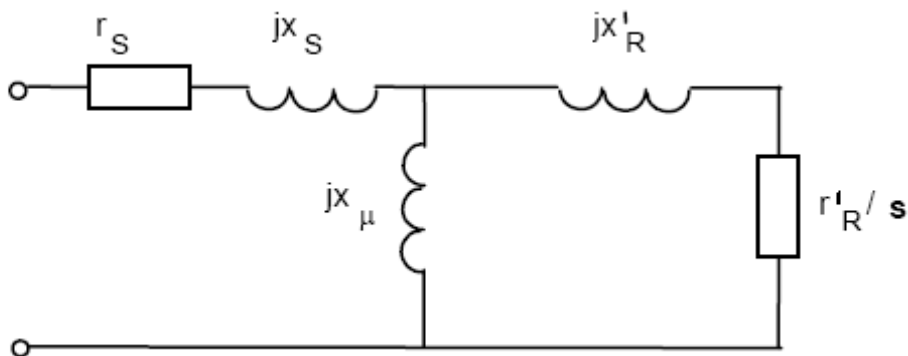


Obr. 6-2 Blokové schéma modelu větrné turbíny při proměnné rychlosti větru [8]

Statický model aproximuje závislost výkonu turbíny na rychlosti větru lineárně od minimální rychlosti v_{\min} do rychlosti v_{\max} , kdy turbína dává maximální výkon N_{\max} . Při rychlosti v_{stop} se turbína odstavuje z bezpečnostních důvodů. Veškeré regulace větrné turbíny jsou v modelu implicitně zahrnuty, takže model se hodí pro stacionární výpočty s pomalými změnami rychlosti větru [8].

6.3 Model asynchronního generátoru

Pro výpočty elektromechanických přechodných dějů se asynchronní stroje, většinou u generátorů větrných elektráren, nahrazují parametry ekvivalentního obvodu. Ty se dají použít i pro dynamický model. Na rozdíl od synchronního generátoru je nutno u strojů s převodovkou uvažovat s pružností hřídelí a proto se zadávají mechanické parametry generátoru a turbíny zvlášť [8].



Obr. 6-3 Náhradní schéma asynchronního stroje [8]

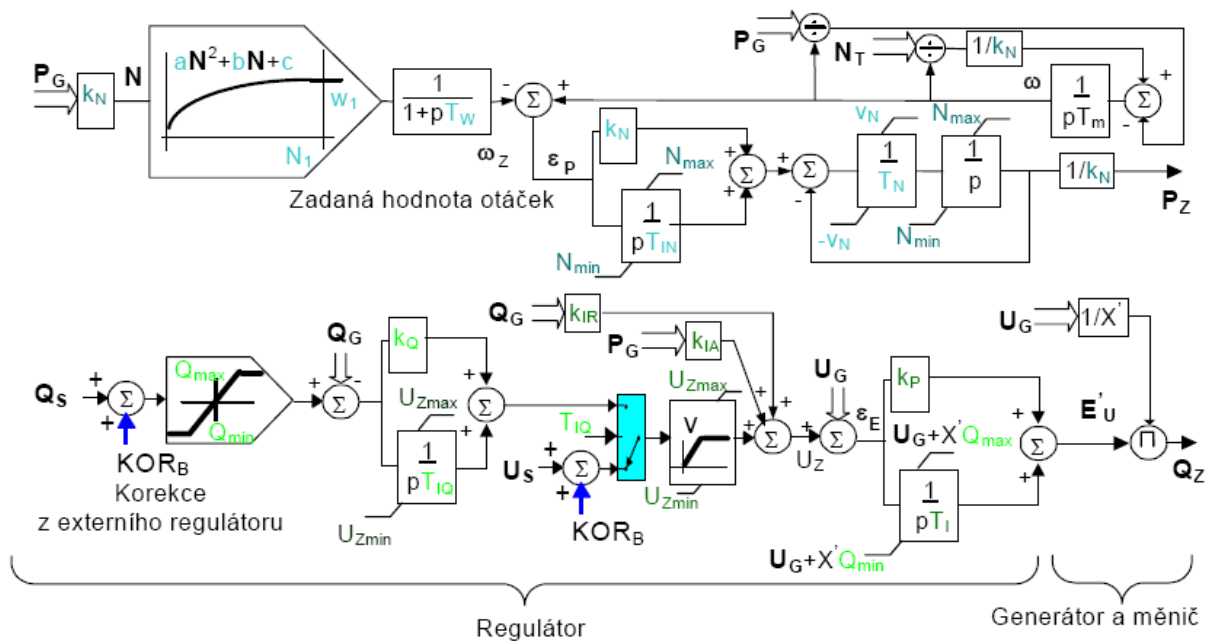
- r_s – odpor fáze statoru při provozní teplotě
- x_s – rozptylová reaktance fáze statoru
- x'_R – rozptylová reaktance fáze rotoru přepočítaná na stator
- x_μ – příčná (magnetizační) nasycená reaktance

r_R' – odpor fáze rotoru při provozní teplotě přepočítaný na stator

Všechny předešlé veličiny jsou uváděny v poměrných jednotkách.

6.3.1 Model asynchronního generátoru s dvojitým napájením

Asynchronní stroj s vinutou kotvou napájenou z frekvenčního měniče lze pro výpočet elektromechanických přechodných dějů modelovat staticky pomocí Nortonova vstřiku paralelně s náhradní reaktancí motoru. Přechodné děje v obou vinutích jsou zanedbány, protože jsou dostatečně rychlé v porovnání s vyšetřovanými elektromechanickými ději. Dominantní roli přebírá frekvenční měnič, který v součinnosti s regulačními obvody je schopen přizpůsobovat činný i jalový výkon požadavkům na efektivní využití rychlosti větru a na neovlivňování sítě.



Obr. 6-4 Schéma modelu dvojitě napojeného asynchronního generátoru[8]

Regulace spočívá ve dvou oddělených a nezávislých částech pro činný a jalový požadovaný výkon P_Z a Q_Z . Cílem regulace P_Z je přizpůsobovat činný výkon dodávaný do sítě, aby odpovídal výkonové rovnováze soustrojí, tedy především výkonu vyráběnému větrnou turbínou v závislosti na rychlosti větru. V modelu se předpokládá spolupráce s větrnou turbínou s proměnnými otáčkami, takže zadaná hodnota otáček se určuje v závislosti na skutečné dodávce výkonu do sítě P_G . V případě výkonové nerovnováhy (rozdílu mezi výkonem turbíny N_T a výkonem generátoru P_G) a vzniku regulační odchylky ϵ_p je požadovaný výkon P_P měněn trendem v_N , aby se dostal do souladu s výkonem turbíny. Naopak při poklesu dodávky do sítě P_G (např. vlivem zkratu) se zmenšují zadané otáčky ω_z (vstupující i do modelu turbíny), čímž se zmenšuje akcelerace soustrojí.

Regulace Q_Z může obdobně jako u synchronního generátoru pracovat v primární nebo sekundární regulaci v závislosti na hodnotě parametru T_{IQ} . Pro volbu $T_{IQ}=0$ regulátor reguluje svorkové napětí (jedná se tedy o režim primární regulace), případně modifikované statikami jalovým nebo činný výkonem (volbou parametrů k_{IR} a k_{IA}). Pro $T_{IQ}>0$ reguluje regulátor jalový výkon generátoru (jedná se tedy o režim sekundární regulace). V obou případech lze

k zadané hodnotě přičítat korekční signál z externího regulátoru a simulovat tak např. regulaci napětí sítě (v definovaném místě) [8].

6.4 Model synchronního generátoru

Pro výpočty elektromechanických přechodných dějů se synchronní stroj generátor většinou modeluje pomocí Parkových rovnic. Základní štítkové hodnoty i parametry dynamického modelu jsou v tabulce v příloze A. V některých velmi speciálních případech je nutné provádět kontrolu vzniku subsynchronních oscilací a rezonancí v přenosové síti. Veličiny nutné pro tyto účely (modelování rotujících částí hřídele) uvádí závěrečná část tabulky[8].

7 DYNAMICKÝ MODEL KONKRÉTNÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

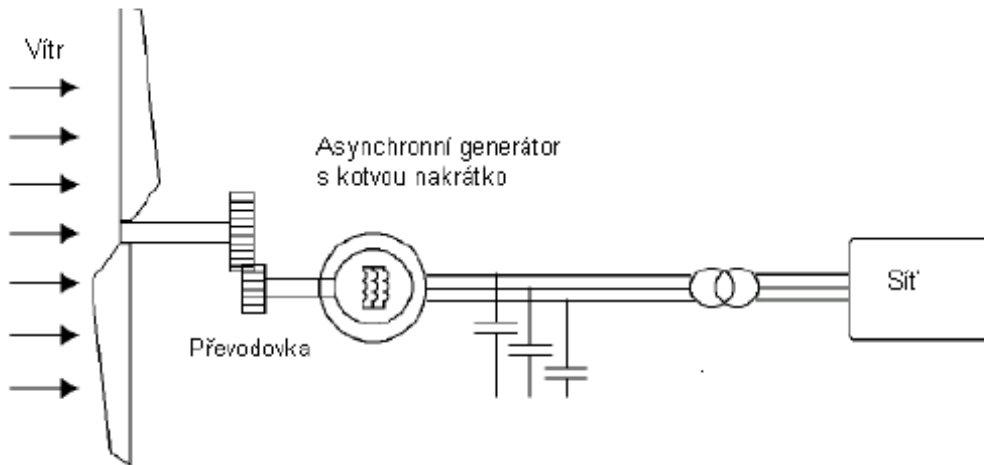
7.1 Sotvare pro tvorbu modelů

Pro tvorbu dynamického modelu větrného motoru s generátorem a parametrického modelu sítě byl použit program MATLAB s jeho nadstavbou Simulink. To je nástroj pro modelování rozličných procesů. Pomocí grafického rozhraní lze snadno vytvářet modely dynamických soustav založené na popisu diferenciálními rovnicemi. Jsou zde také prvky, pro vstupy a výstupy dat, s mnoha možnostmi jejich grafického zobrazení. Při modelování prvků a soustav reálného světa je potřeba zvládnout proceduru matematicko-fyzikální analýzy pro převod chování dynamiky systémů do jazyka diferenciálních rovnic. Tvorba tohoto modelu je velmi náročná z důvodů převodu dynamiky systému na diferenciální rovnice. Proto byl firmou The MathWorks, Inc. vyvinut nástroj pro modelování reálných systémů Simscape, který je nástavbou MATLAB/Simulink. Simscape je tvořen knihovnami základních prvků reálného světa z oblasti mechaniky, hydrauliky a elektrotechniky, doplněné o knihovnu termomechanických jevů a fyzikálních signálů.

Dalším nástrojem pro modelování energetických prvků a soustav je nástavba SimPowerSystems. Tato nástavba umožňuje modelovat výrobu, přenos, distribuci, spotřebu elektrické energie a také její konverzi do energie mechanické. Knihovny SimPowerSystems obsahují více jak 150 bloků. Jsou to např. zdroje, prvky elektrických obvodů a základní součástky jako je rezistor, kondenzátor a cívka, dále modely motorů, výkonová elektronika s diodami, tyristory, nebo prvky pro měření elektrických veličin. Aplikační knihovna obsahuje tři podskupiny. První podskupinou jsou Distribuované zdroje v, níž jsou fázorové modely větrných turbín. Druhou podskupinou jsou Elektrické pohony, které zahrnují detailní popis motoru, konvertorů a regulátorů pro každý motor. Poslední podskupina obsahuje modely stejnosměrných přenosových systémů. Prvky z knihoven Simscape a SimPowerSystems je možné propojovat s prvky se Simulinku, takže lze snadno vytvářet hybridní schémata pro simulaci energetických zařízení. [6].

7.2 Popis konkrétní větrné elektrárny

V současné době je většina větrných elektráren v České republice vybavena asynchronními generátory. Asynchronní stroje mohou mít rotor s vinutím klecovým nebo kroužkovým. Dále se používají generátory s přepínáním počtu pólů. Generátory s kotvou na krátko jsou používány do výkonu 300kW. V současné době jsou asynchronním generátory s kotvou na krátko nahrazovány systémy, které využívají spolupráce frekvenčního měniče s rekuperační jednotkou a asynchronním generátorem s kroužkovou kotvou. Pro model byla vybrána větrná elektrárna Vestas V27 o výkonu 225kW. Pro výrobu elektrické energie používá asynchronního generátoru s přepínáním počtu pólů. Řízení je dále prováděno pomocí natočení lopatek větrné turbíny. Další technické informace jsou uvedeny v příloze B. Na obrázku 7-1 je uvedeno principiální schéma větrné turbíny s asynchronním generátorem s kotvou na krátko [1,14].

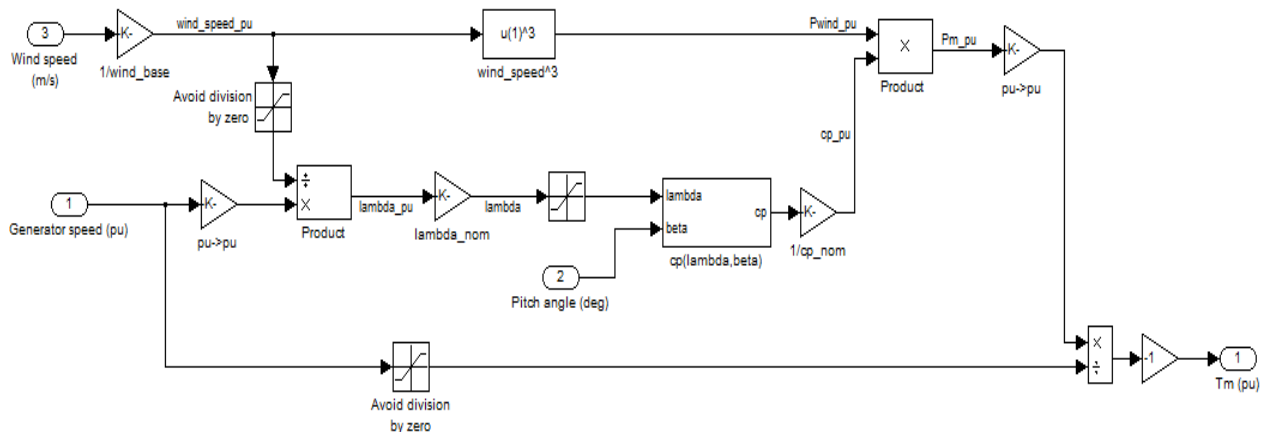


Obr. 7-1 Blokové schéma větrné turbíny s asynchronním generátorem s kotvou na krátko [9]

V současné době jsou v naší republice používány dvě větrné elektrárny tohoto typu. První je na hostýnském vrchu v okrese Kroměříž a další u obce Velká Kraš u Vidnavy, okres Jeseník.

7.3 Model větrné turbíny

Model větrné turbíny byl vybrán z knihovny SimPowerSystems. V tomto modelu je zadáván výkon jmenovitou hodnotou výstupního výkonu turbíny, jmenovitým výkonem asynchronního generátoru, rychlostí větru, při které turbína dosahuje maximálního výkonu. Schéma tohoto modelu je uvedeno v obrázku 7-2.



Obr. 7-2 Schéma modelu větrné turbíny

Jak je patrné ze schématu, tento model má tři vstupy. Do prvního vstupu se zadává rychlost větru v m/s, na další je přiváděna rychlost generátorů v poměrných jednotkách, poslední je určen pro úhel natočení lopatek větrné turbíny ve stupních. Výstupem je moment větrné turbíny v poměrných jednotkách.

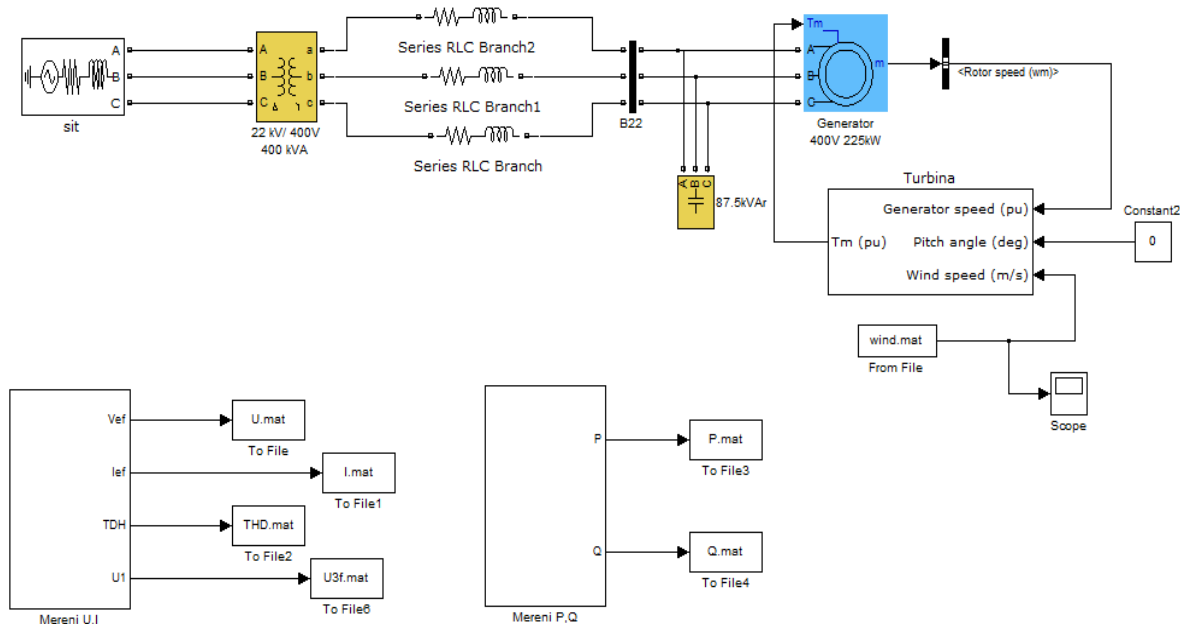
7.4 Model generátoru

Model asynchronního generátoru s kotvou na krátko je vybrán z knihoven SimPowerSystems. Tento model je zadán jmenovitým výkonem, sdruženým napětím a jmenovitou frekvencí. Ostatní parametry jako je odpor a indukčnost statoru a rotoru, jsou použity hodnoty generátoru převzaté z generátoru 160kW, který je součástí knihoven Simulinku. Reálná větrná elektrárna používá generátor s přepínáním počtu pólů. V tomto modelu se uvažuje pouze šestipólový generátor se jmenovitým výkonem 225kW, který pracuje při rychlosti větru vyšší jak 6 m/s. Asynchronní generátor musí navíc pracovat s kompenzací jalového výkonu pomocí kondenzátorové baterie. Do modelu je tedy přidána kompenzační baterie s výkonem 87,5kVAr. Jmenovitý výkon této kompenzační baterie je dán technickou dokumentací větrné elektrárny.

8 PARAMETRICKÁ SIMULACE PROVOZU V JEDNODUCHÉ SÍTI

8.1 Model větrné elektrárny frekvenci.

Model větrné elektrárny je uveden na obrázku 8-1. Tento model pracuje s diskretním signálem s periodou $50\mu\text{s}$, což je 400 vzorků na jednu periodu elektrického signálu při sítové frekvenci.

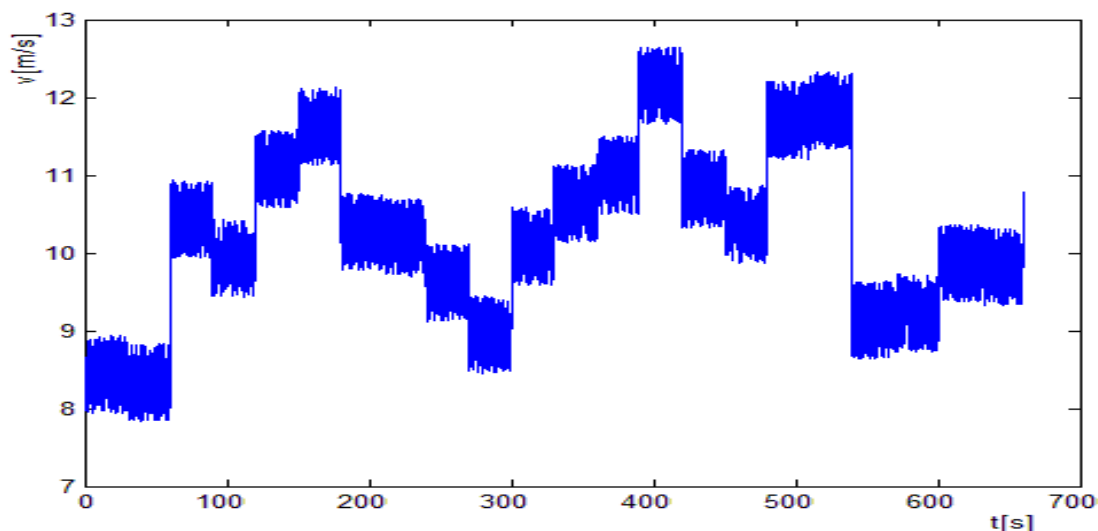


Obr. 8-1 Model větrné elektrárny připojené k síti 22kV

Tento model obsahuje větrnou elektrárnu, kabelové vedení se sdruženým napětím 400V, kterým je elektrárna připojena přes transformátor 400kVA k distribuční síti 22kV. Dále tento model obsahuje obvody pro měření. Asynchronní generátor a větrná turbína byla popsána v předchozí kapitole. Úhel řízení natáčení lopatek je do jmenovité rychlosti 13,5 m/s nulový. Tento model je tedy sestaven pro rychlosti větru meze 6-13,5 m/s. Proto je úhel nastavený konstantou na nulu.

8.1.1 Model rychlosti větru

Pro model rychlosti větru byly použity generátory náhodných čísel s různou změnou velikosti signálu v různém čase. První generátor pracuje v rozmezí rychlosti od 8 do 12 m/s s četností jednou za minutu. Další se změnou rychlosti větru ± 1 m/s s četností 30s, poslední provádí změnu ± 0.5 m/s s četností desetkrát za vteřinu, čímž jsou simulovány rychlé změny rychlosti větru. Výsledný signál obr. 8-2 je dán součtem těchto náhodných signálů.



Obr. 8-2 Průběh simulované rychlosti větru

8.1.2 Model elektrické sítě

Elektrické vedení nn je v tomto modelu nahrazeno sériovým obvodem RL. Odpor a indukčnost vedení jsou z katalogu firmy nkt cables pro měděný kabel o průřezu 240mm^2 . Uvažuje se o kabelu v délce 1km. Dále je zde zařazen distribuční transformátor o jmenovitém výkonu 400kVA. Tento transformátor od firmy BEZ má následující parametry:

Typ TOHn 358/22

Jmenovitý výkon 400kVA

Ztráty naprázdno 650W

Ztráty nakrátko 4600W

Napětí nakrátko 6%

V modelu je třeba zadat tento transformátor pomocí jmenovitého výkonu, jmenovitých napětí primárního a sekundárního vinutí transformátoru. Dále se zadává pomocí rezistence vinutí obou vinutí, rezistence reprezentující ztráty naprázdno a indukčnosti primárního a sekundárního vinutí. Odpor primárního vinutí se spočítá pomocí vzorce 8.1.

$$R_1 = \frac{1}{2} \cdot \Delta P_k \left(\frac{U_n}{S_n} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot 650 \cdot \left(\frac{22 \cdot 10^3}{400 \cdot 10^3} \right)^2 = 0,983 \Omega \quad (8.1)$$

Obdobně se spočítá odpor sekundárního vinutí podle vzorce 8.2.

$$R_2 = \frac{1}{2} \cdot \Delta P_k \left(\frac{U_n}{S_n} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot 650 \cdot \left(\frac{400}{400 \cdot 10^3} \right)^2 = 3,25 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (8.2)$$

Abychom mohli určit indukčnost vinutí, musíme pomocí vzorce 8.3 spočítat impedanci primárního vinutí.

$$Z_1 = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{6}{100} \cdot \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{400 \cdot 10^3} = 72,6 \Omega \quad (8.3)$$

Obdobně pak podle vzorce 8.4 spočítáme impedanci sekundárního vinutí.

$$Z_2 = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{6}{100} \cdot \frac{400^2}{400 \cdot 10^3} = 0,024 \Omega \quad (8.4)$$

Potom pro reaktanci primárního a sekundárního vinutí platí vzorec 8.5 a 8.6.

$$X_1 = \frac{1}{2} \sqrt{Z_1^2 - (2R_1)^2} = \frac{1}{2} \sqrt{72,6^2 - 1,966^2} = 36,287 \Omega \quad (8.5)$$

$$X_2 = \frac{1}{2} \sqrt{Z_2^2 - (2R_2)^2} = \frac{1}{2} \sqrt{0,024^2 - (6,5 \cdot 10^{-4})^2} = 0,012 \Omega \quad (8.6)$$

Z těchto reaktancí můžeme podle vzorce 8.7 a 8.8 určit indukčnost primárního a sekundárního vinutí.

$$L_1 = \frac{X_1}{\omega} = \frac{36,287}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,1155 H \quad (8.7)$$

$$L_2 = \frac{X_2}{\omega} = \frac{0,012}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 3,8 \cdot 10^{-5} H \quad (8.8)$$

Příčná rezistence se určí ze stavu naprázdno pomocí vzorce 8.9.

$$R_{FE} = \frac{U_n^2}{\Delta P_0} = \frac{(22 \cdot 10^3)^2}{650} = 7,446 \cdot 10^5 \Omega \quad (8.9)$$

Další částí je blok pro simulaci elektrické sítě. Na tomto místě je použit blok třífázového zdroje. Tento zdroj se zadává pomocí jmenovitého napětí, frekvence, zkratového výkonu a v neposlední řadě podle poměru reaktance a rezistence X/R.

8.1.3 Model měřících obvodů

Aby bylo možné v závěru porovnat výsledky simulace s výsledky vypočítané dle současné metodiky, je třeba určit parametry na nn straně transformátoru. Měření tedy bude probíhat v místě mezi transformátorem a vedením nízkého napětí. V matlabu byl sestaven blok, který měří průběh okamžitého třífázového napětí a proudu. Tento model z těchto průběhů dále počítá efektivní sruženou hodnotu napětí a efektivní hodnotu proudu. Pomocí dalšího bloku je možné měření činného a jalového výkonu. Dále je zde zařazen blok pro výpočet celkového harmonického zkreslení. Výsledky těchto měření jsou ukládány do matic. Z těch můžeme velmi jednoduše zjistit maximální a minimální hodnoty hledaných veličin, nebo je zobrazit do vhodného grafu.

8.2 Parametrická simulace

Tato simulace by měla být prováděná pro připojení větrné elektrárny různého výkonu, abychom nemuseli sestavovat více modelů pro jednotlivé výkony větrné elektrárny. Měnily by se tím nejen parametry větrné elektrárny, ale také parametry vedení a transformátoru, pomocí kterého je větrná elektrárna připojena k síti. Použijeme-li simulaci, kde budeme měnit poměr výkonu elektrárny a zkratového výkonu sítě. Jestliže budeme měnit velikost zkratového výkonu, mění se i tento poměr a můžeme používat stejný model větrné elektrárny a sítě. Tento poměr budeme nastavovat od velikosti, kdy je zkratový výkon sítě desetnásobkem až do tisícinásobku výkonu elektrárny. Tato simulace bude probíhat pro jednotlivé zkratové výkony uvedené v tabulce 8-1. po dobu 11 minut. Je potřeba doba delší než deset minut, aby bylo možné určit míru vjemu flikru. Rychlost větru v tomto modelu je uvažována mezi rychlostmi 6-13,5 m/s. Úhel natočení lopatek větrné elektrárny je pro tyto rychlosti větru nulový. Výsledky této simulace jsou uvedeny v tabulce 8.1.

S_{kv}/S_{VE} []	S_{VE} [kVA]	S_{kv} MVA	u_{An} [%]	d_c [%]	THD _{max} [%]	P_{ST} []
1000	277,78	277,78	1,94	1,31	0,75	0,424
800	277,78	222,22	1,95	1,32	0,76	0,424
500	277,78	138,89	1,98	1,34	0,77	0,424
300	277,78	83,33	2,03	1,38	0,8	0,424
200	277,78	55,56	2,1	1,43	0,84	0,424
100	277,78	27,78	2,3	1,58	0,95	0,424
80	277,78	22,22	2,4	1,63	1,02	0,424
50	277,78	13,89	2,69	1,83	1,42	0,424
30	277,78	8,33	3,2	2,14	1,9	0,423
20	277,78	5,56	3,78	2,49	3,09	0,423
10	277,78	2,78	133,33	125,8	1,47E+07	5,181

Tab. 8-1. Tabulka zpětných vlivů určených ze simulace pro jednotlivé zkratové výkony

Relativní změnu napětí je možné určit z rozdílu mezi maximem a minimem naměřených hodnot napětí. Musíme uvažovat jen tu část průběhu napětí, kdy neprobíhá přechodový jev, který vzniká při připojení modelu větrné elektrárny k síti. Proto je pro výpočet relativní změny brán signál od doby 10-660s. Pro určení relativní změny napětí způsobené připojením zátěže je vyšetřováno z průběhu simulace v době od 0-10s.

Dalším krokem je určení celkového harmonického zkreslení, tato hodnota nesmí přesáhnout 10%. Jestliže celkové harmonické zkreslení nepřesáhne tuto hranici, není nutné zkoumat vliv jednotlivých harmonických.

Aby mohla být zjištěna míra vjemu flikru je třeba použít program Power Quality Analysis Tools, který byl vytvořen na základě matlabu na univerzitě A&M Texasu. Tento blok spolupracuje přímo s Matlabem. V tomto programu je vytvořen přímo blok pro výpočet míry vjemu flikru. Jako vstupní signál se používá průběh napětí o určitém množství vzorků. Tyto vzorky si program načítá přímo s matice výsledků, zadává se pouze vzorkovací frekvence a název matice mat, ve které je uložen průběh vyšetřované veličiny. Pro výpočet míry vjemu flikru bylo použito průběhu třífázového napětí. V této simulaci byl použit vzorkovací kmitočet 6400Hz.

9 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE S VÝSLEDKY SOUČASNÉ METODIKY

9.1 Výpočty dle současné metodiky

Výpočty dle současné metodiky byly prováděny se stejnými hodnotami zkratového výkonu sítě jako parametrická simulace. Tyto výpočty byly prováděny pomocí tabulky sestavené v programu Microsoft Excel tab. 9-1. Pro tyto výpočty bylo třeba zjistit určité konstanty potřebné pro výpočet dle současné metodiky. Činitel flikru $c=30$, a koeficient proudu $k=4$.

S_{kV}/S_{rE} []	S_{rE} [kVA]	S_{kV} MVA	u_{An} [%]	d [%]	P_{1T} []
1000	277,78	277,78	0,069518	0,40	0,03
800	277,78	222,22	0,086897	0,50	0,0375
500	277,78	138,89	0,139035	0,80	0,06
300	277,78	83,33	0,231726	1,33	0,166667
200	277,78	55,56	0,347589	2,00	0,15
100	277,78	27,78	0,695177	4,00	0,5
80	277,78	22,22	0,868972	5,00	0,375
50	277,78	13,89	1,390355	8,00	0,6
30	277,78	8,33	2,317258	13,33	1
20	277,78	5,56	3,475887	20,00	1,5
10	277,78	2,78	6,951774	40,00	3

Tab. 9-1. Tabulka zpětných vlivů určených z výpočtů dle současné metodiky

9.1.1 Příklady výpočtů dle současné metodiky

Zde jsou uvedeny příklady výpočtů pro první řádek tabulky. Výpočet relativní změny napětí se počítá podle vzorce 4.1, kde úhel sítě je dán poměrem reaktance a rezistence sítě a úhel dodávky je dán účínkem větrné elektrárny po dosazení získáme vzorec 9.1.

$$\Delta u_{An} = \frac{S_{rE}}{S_{kV}} \cos(\psi - \varphi_E) = \frac{277,78 \cdot 10^3}{277,78 \cdot 10^6} \cos(81,7 - 35,91) = 0,0006951 \quad (9.1)$$

Relativní pokles způsobený připojením zátěže se počítá podle vzorce 4.3 po dosazení, získáme vzorec 9.2.

$$d = \frac{k \cdot S_{rE \max}}{S_{kV}} = \frac{4 \cdot 277,78 \cdot 10^3}{277,78 \cdot 10^6} = 0,004 \quad (9.2)$$

Obdobně podle vzorce 4.4 určíme dlouhodobou míru flikru po dosazení dostaneme vzorec 9.3. Za kosinus rozdílu uhlů se může při určitém zjednodušení určit jednička.

$$P_{1t} = c \frac{S_{rE}}{S_{kV}} \cos(\psi - \varphi_f) = \frac{30 \cdot 277,78 \cdot 10^3}{277,78 \cdot 10^6} = 0,03 \quad (9.3)$$

9.2 Porovnání výsledků

Výsledky parametrické simulace jsou uvedeny v tabulce 8-1 a výsledky určené výpočty dle současné metodiky v tabulce 9-1. Relativní změna napětí určené ze simulace dosahuje hodnoty vyšší jak změny určené dle současné metodiky. To je způsobeno změnou výkonu změnou rychlostí větru, se kterou současná metodika nepočítá. Největší přípustná hodnota je 2% pro síť vn. Další hodnocenou změnou je relativní změna napětí, způsobená změnou zatížení. Tato změna je způsobena připojováním asynchronního generátoru. Tato změna je větší v případě určeném dle současné metodiky vyšší než v případě parametrické simulace. Největší přípustná hodnota je opět 2% pro síť vn. V tabulce 8-1 jsou určené hodnoty celkového harmonického zkreslení. Současná metodika řeší harmonické jen v případě, kdy je použita výrobná, která používá pro výrobu elektrické energie měniče a střídače kmitočtu. Harmonické je třeba řešit, jen pokud celkové harmonické zkreslení přesahuje úroveň 10%. Poslední hodnocenou změnou je míra vjemu flikru. Současná metodika počítá s dlouhodobou mírou vjemu flikru, která se počítá z intervalu dvou hodiny. Zatím co model sestavený v matlabu simulinku určuje pouze krátkodobou míru flikru určené z intervalu deset minut. Krátkodobá míra vjemu flikru určená simulací je ve všech případech zkratového výkonu stejná, výrazná změna nastane až v okamžik kdy je poměr výkonů 10. Aby mohl být zdroj zapojen do sítě, nesmí dlouhodobá míra flikru překročit hodnotu 0,46. Dle současné metodiky je možno elektrárnu připojit do sítě, jestliže zkratový výkon bude 500 krát větší jak výkon větrné elektrárny. Dle parametrické simulace je možno připojit modelovanou elektrárnu do sítě, jestliže zkratový výkon bude 200 krát větší jak výkon větrné elektrárny.

10 ZÁVĚR

Úkolem této práce bylo zjistit, jak dané výrobní zařízení působí na elektrickou síť z hlediska zpětných vlivů. Pro model byla vybrána větrná elektrárna Vestas V27. Tato větrná elektrárna používá k výrobě elektrické energie asynchronního generátoru. Jedním z úkolů bylo posoudit provoz větrné elektrárny dle současné metodiky, to znamená podle podmínek pro připojení daných podnikovými normami (PNE). Při výpočtech dle současné metody je zapotřebí znát údaje ze zkušebního protokolu větrné elektrárny. Tento protokol se bohužel nepodařilo získat, tak byl činitel flikru odhadnut na $c=30$ a koeficient spínacího proudu byl dosazován $k=4$. Dalším úkolem bylo simulovat provoz větrné elektrárny pomocí modelu v programu Matlab a simulink. Model sestavený v tomto programu pracoval s rychlostmi větru kolem 10m/s. Pro tento úkol probíhala parametrická simulace, což umožnilo simulovat změnu výkonu větrné elektrárny pomocí změny zkratového výkonu v přípojném bodě. Toto zjednodušení umožnilo používat pouze jeden model větrné elektrárny, přívodního kabelu a transformátoru, pomocí kterého je elektrárna připojena k síti. Výsledky jednotlivých zpětných vlivů jsou uvedeny v příslušných tabulkách.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ACSA - A27/225 kW WINDTURBINE
<http://www.acsaeolica.com/en/pdf/aerogeneradores.pdf>
- [2] ČESNEK, V. Porovnání jednotlivých obnovitelných zdrojů energie ve vztahu k elektrické síti, *Konference ČK CIRED 2007*, Tábor 6. - 7.11.2007
- [3] DOLEŽAL, J., KYNCL, J., SÝKORA, T., ŠPETLÍK, J., TLUSTÝ, J. Technické aspekty zdrojů rozptýlené výroby v síti vn, *Konference ČK CIRED 2004*, Tábor 9. - 10.11.2004
- [4] EON.CZ. Akumulace energie, ElektriKa.cz spol. s r.o.,
<http://elektriKa.cz/terminolog/eterminologitem.2005-05-26.0638199009/view>
- [5] Gerwen, R. Distributed Generation and Renewables,
www.medportal.cz/files/file/lpq_cz/8_1.pdf
- [6] HUMUSOFT, s.r.o. JIRKOVSKÝ J., HOUŠKA J. Nástroje pro modelování fyzikálních soustav v prostředí matlab a simulink
<http://www.humusoft.cz/old/pub/matlab/2007/egu07.pdf>
- [7] KOLEKTIV AUTORŮ, ACTUM S.R.O.: Alternativní zdroje energie,
<http://www.alternativni-zdroje.cz>
- [8] MÁŠLO, K. Modelování větrných elektráren pro výpočty dynamické stability, *sborník 7. semináře E2004*, Praha září 2004
www.ceps.cz/doc/kodex/Vstupni%20Data/VstupniDataVypocty_Rev01-2005.pdf
- [9] MÁŠLO, K. Vliv větrných elektráren na provoz ES, *Konference ČK CIRED 2004*, Tábor 9. - 10.11.2004
- [10] MISAK S., PROKOP L., KREJEJČÍ P., SIKORA T. Větrné elektrárny a asynchronní generátory v sítích VN *Časopis Elektrověda* 11.12.2008
- [11] PNE 33 3430-0 Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů distribučních soustav
- [12] POSPÍŠIL, J., POUCHÝ, L., TUREČEK, P. Vybrané poznatky z připojování disperzních zdrojů do sítí vn a vvn. *Konference ČK CIRED 2007*, Tábor 6. - 7.11.2007
- [13] PŘÍLOHA 4 PPDS: Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy 2007
- [14] VESTAS V27 225-50 <http://www.eko-energia.com/uploaded/pdf/V27.pdf>

Příloha A Parametry dynamického modelu synchronního generátoru

Veličina	Jednotka	Název
typ generátoru		Provedení generátoru -turbo/hydro
S_n	MVA	Zdánlivý jmenovitý výkon
P_n	MW	Činný jmenovitý výkon
U_n	kV	Sdružené napětí statoru
spojení vinutí	Y/ Δ	Spojení vinutí statoru
P-Q diagram	MW-MVAr	PQ diagram stroje při stanovených (uvedených) podmínkách
n	1/min	Otáčky
R_s	p.j.	Odpor fáze statoru při provozní teplotě
η	%	Účinnost při stanovených podmínkách
X_{dn}	p.j.	Podélná synchronní nesycená reaktance
X_{qn}	p.j.	Příčná synchronní nesycená reaktance
X_{ds}	p.j.	Podélná synchronní sycená reaktance
X_{qs}	p.j.	Příčná synchronní sycená reaktance
X'_{dn}	p.j.	Prvá přechodná nesycená podélná reaktance
X'_{qn}	p.j.	Prvá přechodná nesycená příčná reaktance
X'_{ds}	p.j.	Prvá přechodná sycená podélná reaktance
X'_{qs}	p.j.	Prvá přechodná sycená příčná reaktance
X''_{dn}	p.j.	Druhá přechodná (rázová) nesycená podélná reaktance
X''_{qn}	p.j.	Druhá přechodná (rázová) nesycená příčná reaktance
X''_{ds}	p.j.	Druhá přechodná (rázová) sycená podélná reaktance
X''_{qs}	p.j.	Druhá přechodná (rázová) sycená příčná reaktance
$X_{1\sigma}$	p.j.	Rozptylová reaktance statoru
X_0	p.j.	Netočivá reaktance
X_{2n}	p.j.	Zpětná nesycená reaktance
X_{2s}	p.j.	Zpětná sycená reaktance
T_{d0}'	s	Podélná přechodná časová konstanta na prázdno
T_{d}'	s	Podélná přechodná časová konstanta nakrátko
T_{d0}''	s	Podélná rázová časová konstanta na prázdno
T_{d}''	s	Podélná rázová časová konstanta nakrátko
T_{q0}'	s	Příčná přechodná časová konstanta na prázdno
T_{q}'	s	Příčná přechodná časová konstanta nakrátko
T_{q0}''	s	Příčná rázová časová konstanta na prázdno
T_{q}''	s	Příčná rázová časová konstanta nakrátko
T_a	s	Stejnoseměrná časová konstanta statoru
R_f	p.j.	Odpor budícího vinutí
T_{Agt}	s	Akcelerační konstanta generátoru a turbíny
Mag. charakt. stroje	V-A	Magnetizační charakteristika stroje naprázdno
U_{bmax}	V	Maximální (stropní) budící napětí stroje
I_{bmax}	A	Maximální (stropní) budící proud stroje
U_{bn}	V	Jmenovité budící napětí stroje
I_{bn}	A	Jmenovitý budící proud stroje
U_{b0}	V	Jmenovité budící napětí naprázdno stroje

Ib0	A	Jmenovitý budící proud naprázdno stroje
Rz	p.j.	Odpor uzemnění
Xz	p.j.	Reaktance uzemnění
C	F	Kapacita generátoru k zemi
Speciální parametry		
Hi	kg m ² Nm/mech.	Setrvačný moment i-té části hřídele generátoru
Kij	rad	Koeficient tuhosti spojení i-té a j-té rotující části
Di	Nm/(rad/s)	Koeficient tlumení i-té rotující části hřídele
P.j.		Podíl části výkonu vyráběné v i-té rotující část

Příloha B Technické parametry větrné elektrárny Vestas V-27**Rotor:**

Průměr	27 m
Plocha	573 m ²
Hlavní generátor	43ot/min
Vedlejší generátor	32 ot/min
Řízení výkonu	Pitch
Lopatky počet /délka	3 / 13 m
Materiál lopatek	(GFRP)
Profil lopatek	NACA 63-200
Výška náboje	31,5 m

Provozní údaje:

Spouštěcí rychlost	3,5 m/s
Vypínací rychlost	25,0 m/s
Rychlost při nominálním výkonu	13,5 m/s

Generátor: 6 polů 8 polů

Typ	Dvojitý asynchroní
Výkon	225/50 kW
Proud	400/100 A
Napětí	400/400 V
Frekvence	50 Hz/50 Hz
Cos φ	0,81/0,72
Zapojení	Trojúhelník/ Trojúhelník
Otáčky	1008 ot/min/760
Výrobce	SIEMENS, ASEA, ABB

Kompenzace jalového výkonu

Jalový výkon	87,5/25 kVAr
Výsledný cos φ	0,94/0,91
Výsledný proud	45 A/80 A

Převodovka:

Typ	2 rychlosti
Převodový poměr	1 : 23
Nominální výkon	433 kW
Objem oleje	70 l
Výrobce	HANSEN, FLENDER

Řídicí systém:

Typ	aktivní řízení
Rychlost	0,6 degr/sec

Řízení motoru:

Typ	Asynchronní
Rychlost	950 ot/min

Řízení převodovky:

Typ šnekový převod/planetová převodovka
Nominální moment 2 x 5500 Nm
Výrobce BONFIGLIOLI,

Řízení natočení:

Typ Optoelectrický
Výrobce VESTAS

Hydraulický systém:

Typ zubové čerpadlo
Výtlač. 4,2 l/min a 100 bar
Max tlak 100 bar
Objem oleje 30 l
Výrobce..... VICKERS SYSTEMS

Řídicí jednotka:**Řídicí jednotka:**

Typ Multi Processors (VMP)
Výrobce VESTAS

Hmotnost:

Věž 12.000 kg
Gondola 7.900 kg
Turbina 2.900 kg

