

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

DISERTAČNÍ PRÁCE

Plzeň, 2012

Ing. Vlastimil ŠANTÍN

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta elektrotechnická

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor
v oboru

Elektroenergetika

Ing. Vlastimil Šantín

**Simulace jevů způsobených připojováním
a provozem větrných elektráren a farem**

Školitel: Doc. Ing. Pavla Hejtmánková Ph.D.

Datum státní doktorské zkoušky: 8. 6. 2010

Datum odevzdání práce: 31. 5. 2012

V Plzni, 2012

Abstrakt

Tato práce se zabývá poměrně rozsáhlou problematikou větrných elektráren a jejich připojováním a provozem v rámci distribučních a přenosových soustav. Jsou zde popsány základní principy související s přeměnou energie větru na elektřinu, požadavky na kvalitu elektrické energie, chování větrných elektráren z pohledu provozu elektrizační soustavy a nepříznivé vlivy těchto zdrojů v lokálním a globálním měřítku. Dále jsou zde představeny moderní přístupy v oblasti struktury a provozu elektroenergetických soustav a kromě toho rovněž technologie akumulace elektřiny.

Jedna z kapitol je následně věnována matematickému modelování systému větrné elektrárny, kdy jsou, na základě fyzikálních zákonitostí a poznatků, sestaveny matematické popisy jednotlivých částí tohoto zdroje elektrické energie a vytvořeny jejich počítačové modely v programu Simulink. Je zde představen i model celého systému větrné elektrárny s asynchronním generátorem, tedy systému s konstantními otáčkami, vytvořený složením modelů jeho jednotlivých částí v prostředí Simulinku.

Nejdůležitější část se následně zabývá simulacím různých způsobů připojení tohoto zařízení k elektrické síti, jako je připojení přímé, dále pak připojení využívající externího rezistoru nebo připojení přes soft-startér, a taktéž simulacím provozu tohoto zařízení při proměnlivé rychlosti větru. Následně jsou představeny i výsledky simulací připojování a provozu farmy větrných elektráren tohoto typu a na jejich základě je provedeno i stručné zhodnocení jednotlivých vlastností, kterými se uvedený zdroj, při jednotlivých způsobech připojení a při svém provozu, vyznačuje.

Klíčová slova

větrná elektrárna, větrná farma, vztlaková turbína, hnací ústrojí, aerodynamická regulace, asynchronní generátor, soft-startér, externí rezistor, elektrizační soustava, kvalita elektřiny, nepříznivé vlivy, stabilita a řízení, aktivní síť, akumulace elektřiny, matematický model, simulace, připojování a provoz, Simulink

Abstract

This thesis deals with the relatively broad issue of wind power plants and their connecting and operation within the scope of distribution and transmission systems. Basic principles associated with the conversion of wind energy to electricity, requirements for the quality of electrical energy, the behaviour of wind power plants in term of the power system operation and unfavourable influences of these sources in local and global scale are described here. Further, modern approaches in the sphere of the structure and the operation of power systems and, in addition to this, technologies of the electricity accumulation are presented in the text of this work.

One of chapters is also dedicated to the mathematical modelling of the wind power plant system, when mathematical descriptions of individual parts of this electrical energy source are built up, on the basis of physical laws, and their computer models in Simulink program are created. The model of the whole system of the wind power plant with the asynchronous generator, it means the system with constant speed, created by composition of individual parts models in Simulink environment, is also presented here.

The most important part deals then with simulations of different connecting ways of this system to the electrical grid, such as the direct connection, further the connection using the external resistor or the connection via the soft starter, and also with simulations of this system operation at variable wind speed. As the next, results of connection and operation simulations of the farm of this type wind powers plants are presented and, on their basis, the brief evaluation of individual features, by which the source is characterized, for individual connecting ways and during its operation, is done.

Keywords

wind power plant, wind farm, wind turbine, drive train, aerodynamic control, asynchronous generator, soft starter, external resistor, electricity quality, stability and regulation, power system, undesirable influences, active grids, electricity accumulation, mathematical model, simulation, connection and operation, Simulink

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně a s použitím legálního softwaru, literárních pramenů a odborných publikací uvedených v seznamu informačních zdrojů, který je součástí této práce.

V Plzni dne 31.5. 2012

Ing. Vlastimil Šantín

Poděkování

Tímto chci poděkovat paní Doc. Ing. Pavle Hejtmánkové Ph.D., svojí školitelce, a panu Doc. Ing. Emilovi Dvorskému CSc. za jejich odborné vedení, ochotu, vstřícnost a za poskytnutí cenných připomínek a rad týkajících se obsahu práce.

Obsah

| | |
|---|----|
| Obsah..... | 6 |
| Seznam použitých značek a zkratek..... | 9 |
| 1 Úvod..... | 14 |
| 1.1 Současný stav problematiky..... | 14 |
| 1.2 Stanovené cíle..... | 14 |
| 2 Všeobecně..... | 15 |
| 2.1 Vítr a jeho charakteristiky..... | 15 |
| 2.2 Způsoby využití větrné energie..... | 16 |
| 2.3 Historický vývoj využívání větru..... | 17 |
| 2.4 Význam a problematika větrných strojů..... | 18 |
| 2.5 Základy aerodynamiky větrného motoru..... | 19 |
| 3 Systémy větrných elektráren..... | 23 |
| 3.1 Typy větrných turbín..... | 23 |
| 3.1.1 Savoniusova turbína..... | 23 |
| 3.1.2 Darrieusova turbína..... | 24 |
| 3.1.3 Spirálovitá turbína..... | 24 |
| 3.1.4 Lopátkové kolo..... | 25 |
| 3.1.5 Vrtule..... | 25 |
| 3.2 Regulace větrných turbín..... | 26 |
| 3.2.1 Rotory s pevnými listy..... | 26 |
| 3.2.2 Rotory s natáčivými listy..... | 26 |
| 3.3 Generátory větrných elektráren..... | 28 |
| 3.3.1 Asynchronní s konstantními otáčkami..... | 28 |
| 3.3.2 Asynchronní s proměnnými otáčkami..... | 29 |
| 3.3.3 Synchronní s proměnnými otáčkami..... | 30 |
| 3.4 Způsoby připojení větrných elektráren..... | 30 |
| 3.4.1 Připojení přes soft-startér..... | 31 |
| 3.4.2 Připojení přes externí rezistor..... | 31 |
| 3.5 Přístrojové vybavení větrných elektráren..... | 32 |
| 3.5.1 Spínací zařízení..... | 32 |
| 3.5.2 Elektrické ochrany..... | 33 |
| 3.5.3 Kompenzace jalového výkonu..... | 34 |
| 3.6 Hnací ústrojí a převodovka..... | 35 |
| 4 Připojování větrných elektráren do ES..... | 36 |
| 4.1 Kvalita elektrické energie..... | 36 |
| 4.1.1 Kmitočet sítě..... | 36 |
| 4.1.2 Napájecí napětí..... | 36 |
| 4.1.3 Rychlé změny napětí..... | 37 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.1.4 | Krátkodobé poklesy napětí | 37 |
| 4.1.5 | Přerušeni napájecího napětí | 38 |
| 4.1.6 | Dočasná a přechodná přepětí | 38 |
| 4.1.7 | Nesymetrie napájecího napětí | 39 |
| 4.1.8 | Harmonická a mezi-harmonická napětí | 39 |
| 4.1.9 | Úrovně napětí signálů v napájecím napětí | 41 |
| 4.2 | Podmínky pro připojení | 41 |
| 4.2.1 | Požadavky na charakteristiky napětí a proudu | 42 |
| 4.2.2 | Požadavky na chování při poruchách v síti | 44 |
| 4.2.3 | Požadavky na chování při změnách frekvence | 45 |
| 4.2.4 | Požadavky na regulaci napětí a jalového výkonu | 46 |
| 5 | Působení větrných elektráren na ES | 47 |
| 5.1 | Lokální vlivy | 48 |
| 5.1.1 | Přetěžování sítí | 48 |
| 5.1.2 | Zkratové poměry | 48 |
| 5.1.3 | Změny napětí | 49 |
| 5.1.4 | Kolísání napětí | 51 |
| 5.1.5 | Harmonická a mezi-harmonická napětí | 53 |
| 5.1.6 | Harmonické proudy | 54 |
| 5.1.7 | Ovlivnění signálu HDO | 56 |
| 5.2 | Systémové vlivy | 56 |
| 5.2.1 | Spolehlivost dodávky elektřiny | 57 |
| 5.2.2 | Stabilita a řízení soustavy | 57 |
| 5.2.3 | Energetické toky v propojených ES | 58 |
| 5.2.4 | Velikost přenosových ztrát | 59 |
| 6 | Zajištění bezpečného provozu ES | 60 |
| 6.1 | Koncepce aktivních sítí | 60 |
| 6.1.1 | Mikrosítě | 60 |
| 6.1.2 | Virtuální elektrárny | 61 |
| 6.1.3 | Inteligentní sítě | 61 |
| 6.2 | Technologie akumulace elektřiny | 62 |
| 6.2.1 | Setrvačníky | 62 |
| 6.2.2 | Supravodivé cívky | 63 |
| 6.2.3 | Super-kondenzátory | 63 |
| 6.2.4 | Stlačený vzduch | 64 |
| 6.2.5 | Redoxní baterie | 64 |
| 6.2.6 | NAS baterie | 65 |
| 6.2.7 | Vodík | 65 |
| 7 | Modelování větrných elektráren | 67 |
| 7.1 | Matematické modelování | 67 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 7.2 | Model rychlosti větru | 68 |
| 7.3 | Model vztlakové turbíny..... | 72 |
| 7.4 | Model aerodynamické regulace..... | 75 |
| 7.5 | Model asynchronního generátoru | 76 |
| 7.6 | Model hnacího ústrojí a převodovky | 83 |
| 7.7 | Model soft-startéru | 85 |
| 7.8 | Model větrné elektrárny..... | 87 |
| 8 | Simulace připojení a provozu větrné elektrárny a farmy | 89 |
| 8.1 | Simulace připojení VTE přímo k síti..... | 89 |
| 8.2 | Simulace připojení VTE přes externí rezistor | 93 |
| 8.3 | Simulace připojení VTE pomocí soft-startéru..... | 96 |
| 8.4 | Simulace provozu VTE s konstantními otáčkami | 99 |
| 8.5 | Simulace připojení a provozu větrné farmy | 103 |
| 9 | Závěr..... | 107 |
| | Informační zdroje | 109 |
| | Literatura | 109 |
| | Normy a předpisy | 109 |
| | Internet..... | 110 |
| | Publikační činnost | 111 |

Seznam použitých značek a zkratek

| | | |
|----------------|----------------------------|--|
| DS | | distribuční soustava |
| ES | | elektrizační soustava |
| HDO | | hromadné dálkové ovládání |
| nn | | nízké napětí |
| OZ | | opětovné zapínání |
| OZE | | obnovitelné zdroje energie |
| PS | | přenosová soustava |
| vn | | vysoké napětí |
| VTE | | větrná elektrárna |
| vvn | | velmi vysoké napětí |
| a | [-] | počet listů rotoru |
| A | [m ²] | účinná plocha |
| A_r | [m/s] | amplituda rampové složky rychlosti větru |
| A_g | [m/s] | amplituda poryvové složky rychlosti větru |
| A_t | [m/s] | amplituda turbulentní složky rychlosti větru |
| b | [m] | délka tětiny aerodynamického prvku |
| b | [N·m·s·rad ⁻¹] | součinitel tlumení |
| c_F | [-] | součinitel axiální síly |
| c_M | [-] | součinitel momentu |
| c_P | [-] | součinitel využití výkonu |
| c_u | [-] | součinitel ekvivalentního napět'ového zdroje |
| c_x | [-] | součinitel odporu |
| c_y | [-] | součinitel vztlaku |
| d | [%] | fiktivní relativní změna napětí |
| d_c | [%] | relativní změna napětí |
| d_{kom} | [%] | relativní hloubka komutačního poklesu |
| d_{max} | [°] | maximální změna úhlu natočení |
| D | [m] | tloušťka věže |
| E | [J] | energie |
| f | [Hz] | kmitočet |
| $f_{\Delta u}$ | [Hz] | frekvence poklesů napětí |

| | | |
|-------------------------|--------------------------|--|
| F | [N] | síla |
| F_a | [N] | axiální síla |
| h | [-] | řád harmonické |
| h | [m] | výška nad zemským povrchem |
| i | [A] | elektrický proud |
| i_R | [A] | rotorový proud |
| i_S | [A] | statorový proud |
| $i_{v,\mu}$ | [A·VA ⁻¹] | vztažný proud harmonické |
| $i_{v,\mu \text{ př}}$ | [A·VA ⁻¹] | přípustný vztažný proud harmonické |
| $i_{v,\mu \text{ zul}}$ | [A·VA ⁻¹] | přípustný vztažný proud harmonické |
| I | [A] | elektrický proud |
| I_k | [A] | zkratový proud |
| $I_{v,\mu}$ | [A] | proud harmonické |
| $I_{v,\mu \text{ př}}$ | [A] | přípustný proud harmonické |
| $I_{v,\mu \text{ zul}}$ | [A] | přípustný proud harmonické |
| J | [kg·m ⁻²] | moment setrvačnosti |
| J_{gen} | [kg·m ⁻²] | moment setrvačnosti generátoru |
| J_{tur} | [kg·m ⁻²] | moment setrvačnosti turbíny |
| k | [N·m·rad ⁻¹] | tuhost hřídele |
| k_f | [-] | činitel flikru |
| $k_{i\psi}$ | [-] | činitel spínání závislý na síti |
| k_p | [-] | převod převodovky |
| l | [m] | charakteristická délka aerodynamického prvku |
| L | [H] | indukčnost |
| L_m | [H] | magnetizační indukčnost |
| L_R | [H] | indukčnost rotoru |
| L_{Rm} | [H] | vzájemná indukčnost dvou fází rotoru |
| L_{Rs} | [H] | vlastní indukčnost fáze rotoru |
| L_S | [H] | indukčnost statoru |
| L_{Sm} | [H] | vzájemná indukčnost dvou fází statoru |
| L_{Ss} | [H] | vlastní indukčnost fáze statoru |
| m | [-] | řád mezi-harmonické |
| m | [kg] | hmotnost |

| | | |
|--------------------|-------------------------|---|
| M | [N·m] | moment síly |
| M_{gen} | [N·m] | moment síly na straně generátoru |
| M_{tur} | [N·m] | moment síly na straně turbíny |
| M | [H] | vzájemná indukčnost |
| n | [ot·min ⁻¹] | otáčky |
| p | [kg·m·s ⁻¹] | hybnost |
| p_p | [-] | počet pólových dvojic stroje |
| P | [W] | činný výkon |
| P_{lt} | [-] | dlouhodobá míra vjemu flikru |
| P_{st} | [-] | krátkodobá míra vjemu flikru |
| Q | [VAr] | jalový výkon |
| r | [m] | poloměr rotace aerodynamického prvku |
| R | [m] | poloměr rotoru turbíny |
| R | [Ω] | rezistance |
| R_R | [Ω] | činný odpor vinutí rotoru |
| R_S | [Ω] | činný odpor vinutí statoru |
| Re | [-] | Reynoldsovo číslo |
| s | [m] | dráha |
| S | [VA] | zdánlivý výkon |
| S_0 | [VA] | referenční zdánlivý výkon |
| S_A | [VA] | napájecí výkon výrobního zařízení |
| S_{AV} | [VA] | celkový napájecí výkon připojených zařízení |
| S_k | [VA] | zkratový výkon |
| S_{rE} | [VA] | jmenovitý výkon výrobní jednotky |
| $S_{rE\text{max}}$ | [VA] | maximální dodávaný výkon |
| S_S | [VA] | celkový navržený napájecí výkon sítě |
| t | [s] | čas |
| T_{er} | [s] | koncový čas rampové složky rychlosti větru |
| T_{eg} | [s] | koncový čas poryvové složky rychlosti větru |
| T_{sr} | [s] | počáteční čas rampové složky rychlosti větru |
| T_{sg} | [s] | počáteční čas poryvové složky rychlosti větru |
| THD | [%] | celkové harmonické zkreslení |
| THF | [%] | celkový činitel harmonických |

| | | |
|-------------------------|--------------------------------|---|
| u | $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ | rychlost vzduchu za turbínou |
| u | [V] | elektrické napětí |
| u_R | [V] | rotorové napětí |
| u_S | [V] | statorové napětí |
| U | [V] | elektrické napětí |
| U_c | [V] | dohodnuté napájecí napětí |
| U_h | [%] | harmonické napětí |
| U_m | [%] | mezi-harmonické napětí |
| U_{\max} | [V] | maximální dovolené napětí |
| U_n | [V] | napájecí napětí |
| v | $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ | rychlost obtékání |
| v_m | [%] | vztažná hodnota mezi-harmonických |
| v_o | $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ | obvodová rychlost |
| v_v | $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ | výsledná rychlost proudu vzduchu |
| w | $[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$ | rychlost větru |
| X | $[\Omega]$ | reaktance |
| z_0 | [m] | drsnost povrchu |
| Z | $[\Omega]$ | komplexní impedance |
| Z_k | $[\Omega]$ | zkratová impedance |
| α | [rad] | spínací úhel |
| β | [rad] | úhel mezi směrem proudění a rovinou otáčení |
| β | [°] | úhel natočení listů turbíny |
| ΔP | [W] | změna činného výkonu |
| ΔQ | [VAr] | změna jalového výkonu |
| ΔS | [VA] | změna zdánlivého výkonu |
| ΔS_A | [VA] | změna zatížení |
| Δu | [%] | relativní změna napětí |
| Δu_{An} | [%] | relativní zvýšení napětí |
| ΔU | [V] | změna napětí |
| ΔU_{An} | [V] | ustálené zvýšení napětí |
| ΔU_{kom} | [V] | komutační pokles základní harmonické napětí |
| θ | [rad] | úhel mezi statorem a rotorem |
| θ_{gen} | [rad] | úhel polohy generátoru |

| | | |
|-----------------------|--|---|
| θ_{tur} | [rad] | úhel polohy turbíny |
| λ_0 | [-] | součinitel rychloběžnosti |
| μ | [kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹] | dynamická viskozita |
| μ | [-] | řád harmonické |
| ν | [m ² ·s ⁻¹] | kinematická viskozita |
| ν | [-] | řád harmonické |
| ζ | [rad] | odpojovací úhel |
| ρ | [kg·m ⁻³] | hustota |
| φ | [rad] | úhel natočení listů turbíny |
| φ | [rad] | fázový posuv |
| φ_E | [rad] | úhel mezi činným a zdánlivým výkonem zdroje |
| φ_f | [rad] | relativní úhel flikru |
| ψ | [rad] | úhel impedance sítě |
| Ψ | [Wb] | spřažený magnetický tok |
| ω | [rad·s ⁻¹] | úhlová rychlost |
| ω_{gen} | [rad·s ⁻¹] | úhlová rychlost generátoru |
| ω_n | [rad·s ⁻¹] | jmenovitá úhlová rychlost |
| ω_{tur} | [rad·s ⁻¹] | úhlová rychlost turbíny |

1 Úvod

S ohledem na neustále pokračující proces vyčerpávání tradičních neobnovitelných energetických zdrojů, který je ustavičně urychlován v důsledku rostoucích potřeb lidstva, a vzhledem ke zvětšujícímu se tlaku směrem k dosažení maximální míry využívání energie ze zdrojů alternativních dochází v posledních desetiletích k prudkému rozvoji v oblastech technologického vývoje a instalace všech zařízení, která tento potenciál využívají k výrobě elektřiny. Mezi tyto systémy patří také větrné elektrárny, které přispívají k významnému navýšení podílu obnovitelné energie na celkové spotřebě elektřiny i přesto, že existuje celá řada problémů týkajících se jejich výstavby, provozu a také všeobecného vnímání, kterými je třeba se v současné době zabývat.

1.1 Současný stav problematiky

Situace kolem připojování obnovitelných zdrojů energie do elektrizační soustavy je v současné době poměrně napjatá a dochází také ke zvyšování požadavků na tyto zdroje ze strany řízení distribučních i přenosových sítí. V případě větrných elektráren pak existuje celá řada systémů vyznačujících se určitými vlastnostmi, které se vzájemně odlišují a při jejich připojení do dané části soustavy tak mohou vznikat rozdílné situace. Proto je třeba provádět výpočty připojitelnosti těchto zdrojů, přičemž nejvýznamnějším nástroj tvoří pro tyto potřeby matematické modelování a počítačová simulace, které vycházejí z fyzikálních zákonů a umožňují zkoumání ustálených i přechodových stavů, včetně nejrůznějších druhů analyzování signálů elektrických veličin.

1.2 Stanovené cíle

Základním cílem této práce je poskytnout stručný přehled všech principů využívání energie větru a jednotlivých systémů větrných elektráren, popsat nepříznivé vlivy provozu těchto zařízení na provoz elektroenergetických soustav a zhodnotit možnosti řešení tohoto působení v oblasti kvality elektřiny a energetické bezpečnosti. Hlavní úkol pak spočívá ve vytvoření matematických popisů a počítačových modelů jednotlivých částí celého řetězce systému větrné elektrárny a v provedení simulace připojení a provozu jedné elektrárny a následně potom simulace připojení a provozu skupiny těchto zdrojů a ve zhodnocení jejich výsledků, se zaměřením na systém větrné elektrárny s asynchronním generátorem, tedy na systém s konstantními otáčkami a na jevy vznikající při různých způsobech jeho připojení k elektrické soustavě a během jeho provozu.

2 Všeobecně

2.1 Vítr a jeho charakteristiky

Jedním ze základních jevů, které lze v přírodě pozorovat a jejichž účinky fascinují lidstvo odnepaměti, je vítr. Tento pojem označuje převážně vodorovné proudění vzduchu vznikající částečně v důsledku tlakových rozdílů, jež se tvoří v atmosféře mezi vzdušnými masami ležícími nad různě zahřátými oblastmi zemského povrchu, a částečně v důsledku působení sil spojených s rotačním pohybem zeměkoule kolem své osy.

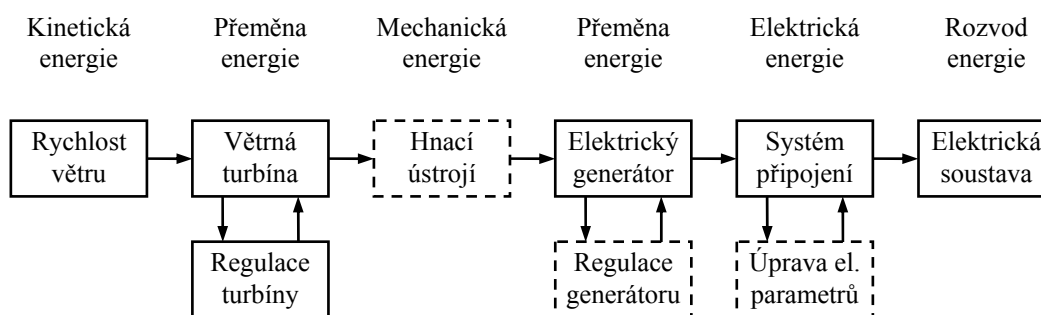
Podle zjednodušeného pohledu na globální proudění vzduchu existují na Zemi dvě pásma vysokého tlaku ležící mezi 30° a 40° severní a jižní šířky. Z nich proudí vzduch při zemském povrchu směrem k rovníku a k pólům, kde se naopak nacházejí pásma nízkého tlaku. Tato proudění jsou vlivem zemské rotace odchylována na západ, při přesunu do míst s vyšší obvodovou rychlostí, tedy směrem k rovníku, nebo na východ, při přesunu do míst s nižší obvodovou rychlostí, tedy směrem k pólům.

Tato základní proudění jsou dále ovlivňována místními tlakovými výšemi a nížemi s cyklónovým prouděním, jež vznikají vlivem nerovnoměrného ohřívání oceánů a pevnin, rozdílného ohřívání zemského povrchu během roku a také atmosférických poruch, které souvisejí s občasným pohybem vzduchu od pólu k rovníku. Smysl rotace vzduchu kolem tlakových výší je potom na severní polokouli po směru a na jižní polokouli proti směru hodinových ručiček. Rotace tlakových níží je opačná.

Nejdůležitější veličinou, která charakterizuje vítr je, kromě směru proudění, jeho rychlost, jež závisí zejména na momentálních přírodních podmínkách, a vyznačuje se proto velmi nestálým časovým průběhem. Rychlost proudění vzduchu se zvyšuje s nadmořskou výškou, přičemž její velikost je, v přízemních vrstvách atmosféry, dále ovlivněna tvarem a drsností zemského povrchu. Nejlepší větrné podmínky jsou tak buď v rovinných oblastech s hladkými vodními či písčnými plochami, v nichž proudění prakticky není zpomalováno třením, nebo v oblastech s nerovným terénem, kde je urychlováno na vrcholcích vyvýšenin a horských hřebenu. Naopak nejhorší situace je v oblastech husté městské zástavby, kde dochází k výraznému zpomalení větru následkem velké členitosti povrchu, a v oblastech údolí, v nichž obvykle vznikají inverze zabraňující proudění vzduchu nebo větry s velkým podílem turbulencí. Posledním faktorem ovlivňujícím rychlost a směr větru jsou překážky v podobě výškových budov a osamocených stromů, které způsobují vznik větrných vírů a ovlivňují tak charakter proudění vzduchu ve svém okolí.

2.2 Způsoby využití větrné energie

Energii větru je v zásadě možné využít dvěma způsoby, které se navzájem liší jen konečnou formou získané energie. První možností je způsob přímý, kdy je tato pohybová energie buď za pomoci plachty přímo využita pro pohyb nějakého objektu, nebo je pomocí větrného motoru přeměněna na energii mechanickou, která je následně využita pro přímý pohon mechanického zařízení, jako je mlýn, lis nebo čerpadlo. Druhou možností je potom způsob nepřímý, kdy je v turbíně získaná mechanická energie dále přeměněna za pomoci generátoru na energii elektrickou, která je následně přepravena do místa spotřeby, kde je využita pro pohon elektrického zařízení. Schématicky znázorňuje tuto přeměnu kinetické energie větru na elektrickou energii Obr. 2.1, na němž je názorně zobrazena dekompozice celého obecného systému větrné elektrárny pro potřeby jeho podrobné analýzy, přičemž části společné všem druhům těchto zařízení, jako je větrná turbína, její regulace, elektrický generátor či systém připojení, jsou vykresleny plnou čarou a části obsažené jen některými druhy těchto zdrojů, jako je převodovka, generátorová regulace nebo úprava elektrických parametrů, jsou označeny čarou přerušovanou. Jsou zde rovněž naznačeny jednotlivé druhy energie a jejich přeměny v jednotlivých částech řetězce.



Obr. 2.1: Transformace energie větru na energii elektrickou

Existuje celá řada druhů větrných elektráren, které se mohou vzájemně lišit svým provedením, principem nebo provozními vlastnostmi. Jedním ze základních parametrů pro dělení větrných elektráren je však také velikost jejich výkonu, která může u těchto zdrojů dosahovat hodnot od stovek wattů až do jednotek megawattů. Nejmenšími zařízeními jsou mikro-elektrárny se jmenovitým výkonem do 1 kW, jejichž výstupem je stejnosměrné napětí o velikosti 12 nebo 24 V a které se, v kombinaci s bateriemi, používají hlavně pro napájení malých zařízení, jako jsou reklamní panely, hodiny či měřicí zařízení. Po nich následují malé větrné elektrárny o jmenovitém výkonu do 60 kW, jejichž výstupem je již střídavé napětí velikosti 230, případně 400 V, a které slouží pro napájení velkých zařízení

typu vodního čerpadla a menších objektů typu rodinného domu nebo chaty. Další kategorií jsou střední elektrárny s výkonem do 700 kW, které obvykle dodávají energii do elektrické sítě na hladinách vysokého napětí. Z hlediska elektroenergetiky jsou nejvýznamnější velké elektrárny, jejichž výkon dosahuje hodnot několika MW, a jejich seskupení, neboli větrné farmy s výkonem desítek až stovek MW, které slouží výhradně k dodávkám elektrické energie do elektrizační soustavy na napěťových hladinách vysokého nebo velmi vysokého napětí a pomáhají pokrýt spotřebu celých obcí a měst.

2.3 Historický vývoj využívání větru

Větrná energie je pravděpodobně nejdéle využívanou přírodní silou, s jejíž pomocí lidé poháněli jednoduchá zařízení již v období starověku. První zmínky pocházejí z kreseb datovaných do doby kolem poloviny 4. tisíciletí před naším letopočtem, kdy naši předkové v Egyptě, a zřejmě také v jiných částech světa, zejména v zemích jihovýchodní Asie, začali postupně uvádět do pohybu první lodě poháněné plachtami, jejichž používání se do určité míry zachovalo dodnes, i když spíše pro sportovní účely.

K poněkud sofistikovanějšímu způsobu využití větrného potenciálu dospěli lidé asi o dva a půl tisíce let později, a to s pomocí větrného kola, které se stalo základem prvních větrných mlýnů stavěných ve starých civilizacích Persie a Číny, které sloužili zejména k zavlažování těchto zpravidla vyprahlých oblastí.

Větrné mlýny se, podobně jako například mlýny vodní, postupně rozšiřovaly i do dalších zemí, kde nacházely svoje uplatnění, hlavně při mletí obilí. Od počátku 12. století tak dochází k jejich velkému rozvoji v Evropě, kde byla postupně zdokonalena zavedením otočné střechy a křídel, a díky kolonizaci také v severní Americe, zejména v její západní části. Nejvíce se tato zařízení rozšířila v Holandsku, na jehož území se používala i k jiným účelům, například k vysoušení, výrobě oleje a papíru nebo pohonu pil, a kde pracovalo v polovině 19. století kolem 9 tisíc větrných mlýnů. Na území Spojených států amerických se rozšířily malé mnoha-lopatkové motory, určené zejména k čerpání vody, jejichž tehdejší počet je odhadován na více než 6 milionů.

Po tomto rozvoji však nastává úpadek těchto zařízení, který je způsoben rozšířením parního stroje, a s postupující elektrifikací a prodejem malých spalovacích motorů se pak prakticky ztrácí jejich význam. Jejich vývoj však pokračoval dále a během 20. století byly uváděny do provozu různé větrné motory, z nichž největším byl stroj Smith-Putnam, jehož výkon činil 1 250 kW a který byl provozován mezi lety 1945 a 1947 v americkém státě

Vermont. Nejvýznamnějším z nich byl potom jistě velmi dokonale propracovaný a vysoce spolehlivý stroj Hütter-Algaier s výkonem 100 kW, provozovaný v letech 1957 až 1968 v Dánsku, jehož listy byly vyrobeny ze skelného laminátu.

První prototyp větrného motoru sloužícího pro výrobu elektřiny byl postaven ještě na konci 19. století, kdy v krátkém časovém období byly, nezávisle na sobě, zkonstruovány větrné elektrárny na americkém a evropském kontinentu. Prvním vynálezcem je Američan Charles F. Brush, který na přelomu let 1887 a 1888 sestrojil v Clevelandu ve státě Ohio první automatickou větrnou turbínu napojenou na generátor elektrického proudu. Její rotor měl průměr 17 m a skládal se ze 144 paprskovitě uspořádaných lopatek z cedrového dřeva. Výkon generátoru při otáčkách 500 min^{-1} byl 12 kW. Evropské prvenství v konstrukci větrné elektrárny pak patří Poulu la Courovi, profesorovi lidové univerzity v dánské obci Askov, na jihu Jutského poloostrova, který v roce 1891 sestrojil první větrnou elektrárnu se čtyřmi až šesti „křídly“ tvořenými plachtami napnutými na rámové konstrukci, podobné klasickému evropskému větrnému mlýnu. Zde také vznikl první časopis o využívání větrné energie, když roku 1904 Poul la Cour vydal první číslo *Journal of Wind Electricity*.

Ani v oblasti výroby elektřiny však nemohly větrné stroje soupeřit se spalováním pevných a kapalných paliv, jejichž cena byla nízká a elektrická energie vyrobená větrnými elektrárnami tak byla mnohem dražší než ta z elektráren tepelných. Tato situace se zčásti změnila teprve v sedmdesátých letech 20. století, kdy v důsledku energetické krize došlo k výraznému nárůstu cen fosilních paliv díky uvědomění si omezenosti jejich zdrojů, a dále pak v důsledku zvýšení zájmů a péče o životní prostředí. To vyvolalo nastartování velkého rozvoje v oboru obnovitelných zdrojů obecně a větrné elektrárny se postupně staly velice významnou součástí světového energetického průmyslu.

2.4 Význam a problematika větrných strojů

Větrné elektrárny mají, stejně tak jako všechny zdroje obnovitelné energie, význam zejména v oblasti snižování míry závislosti elektroenergetiky na fosilních palivech a díky tomu také v oblasti omezování nepříznivých vlivů tohoto velmi významného sektoru na životní prostředí. Smysl jejich využití však musí být vždy podroben důkladnému rozboru vedoucímu ke zhodnocení všech důsledků jejich výstavby a provozu.

Nejdůležitější a zároveň nejproblematictější vlastností větrné elektrárny (VTE) je závislost jejích charakteristik na rychlosti větru, což je velmi proměnlivá veličina. S její velikostí se mění jak výkon, tak i účinnost. Pro hodnocení elektráren se dále využívá tzv.

roční míra využití instalovaného výkonu, což je počet hodin za rok, po které by musela elektrárna vyrábět na maximum, aby dodala stejné množství elektřiny jako za normálního provozu. Z hlediska elektroenergetiky je potom potřeba zhodnotit zejména ovlivnění dvou hlavních požadavků, které musí být v této oblasti splněny. Tím prvním je kvalita elektřiny, kterou představuje velikost napětí, sinusový průběh a frekvence. Druhým požadavkem je potom energetická bezpečnost, kdy se projevuje nespolehlivost dodávek elektřiny z těchto zdrojů v oblasti řízení soustavy a regulace energetických toků.

Druhým důležitým hlediskem, kterým je nutné se zabývat, jsou otázky související s pohledem ekologickým, které se týkají vlivů zařízení na životní prostředí. V tomto směru je nejdůležitější příslušnost VTE k obnovitelným zdrojům energie (OZE), které využívají čistě přírodní síly, jež jsou poměrně snadno dostupné a nevyčerpatelné. Při jejich provozu nevznikají žádné znečišťující látky ani odpady. Na druhou stranu je však třeba posoudit také velké množství materiálu a energie nutné pro jejich výstavbu. Rozpory panují také v názorech na vliv těchto zdrojů na krajinný ráz, což je většinou velice subjektivní a závisí to na konkrétním případě a srovnání s jinými stavbami a činnostmi. Důležitými aspekty jsou také různé vlivy na živou přírodu a zdraví, které jsou spojeny zejména se zvýšenou hlučností v blízkosti těchto zařízení, které ale u moderních strojů není tak významné, a to ani v oblastech neslyšitelných, infrazvuku a ultrazvuku, které mohou vyvolávat zdravotní problémy, ale jejichž emise se u těchto zařízení nepotvrdily. Zanedbatelný je rovněž vliv na ptactvo, výskyt problémů vyvolaných tzv. stroboskopickým jevem nebo tzv. blikavým jevem způsobovaným i jinými druhy elektrických zařízení.

Velký význam je dále spojen s pohledem ekonomickým, který pro účely hodnocení využívá veličiny jako měrná investice, tedy investice vztažená na jednotku instalovaného výkonu, jejíž velikost je v případě VTE srovnatelná s levnými klasickými energetickými zdroji, nebo doba životnosti, která je naopak srovnatelná s ostatními druhy OZE. Velkou roli hraje také cena vyrobené elektřiny, jež je pro všechny obnovitelné zdroje do značné míry regulována. Z těchto tří parametrů potom vychází nejdůležitější veličina, ekonomická návratnost, jejíž rozumně dlouhá doba je hlavním ukazatelem pro investory.

2.5 Základy aerodynamiky větrného motoru

Rotor větrné turbíny může pracovat na základě dvou různých aerodynamických principů. Prvním z nich je princip odporový, který využívá rozdílnosti ve velikosti odporu, který kladou lopatky vzdušnému proudu ve směru a proti směru otáčení. Vítr tedy působí

kolmo na plochu lopatek, které jsou tvořeny funkční plochou tak, aby kladly vzduchu větší odpor po směru otáčení než v protisměru, jsou v protisměru cloněné krycím štítem, nebo jsou samočinně natáčeny tak, aby se změnila velikost plochy rotoru. Druhý princip se pak nazývá vztlakový, protože využívá vztlakovou sílu, která vzniká při působení větru na natočené rovné listy, nebo na listy se speciálním aerodynamickým tvarem podobným tvaru letadlového křídla, což je mnohem účinnější.

Základním prvkem vztlakové turbíny je list nebo lopatka, které lze posuzovat jako rotující křídlo. Profil listu nebo lopatky musí být na rotoru umístěn tak, aby byl proti větru otočen svojí spodní stranou. Při správném nastavení je profil obtékán proudem vzduchu tak, že nad jeho vrchní stranou dochází ke zhušťování proudnic, tím narůstá rychlost proudění a podle Bernoulliho rovnice se snižuje statický tlak. Na spodní straně profilu rychlost proudění naopak klesá a statický tlak se zvyšuje.

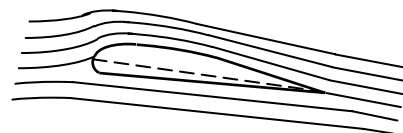
Síla vyvolaná podtlakem na vrchní straně profilu je obvykle dvojnásobná oproti síle vyvolané přetlakem na jeho spodní straně. Tím vzniká výsledná síla F , která se dělí na vztlakovou složku F_y , působící kolmo na směr ještě neovlivněného proudění, a na odporovou složku F_x , působící ve směru tohoto proudění.

Velikosti obou těchto složek je možné vyjádřit prostřednictvím aerodynamických součinitelů vztlaku c_y a odporu c_x , následujícími rovnicemi:

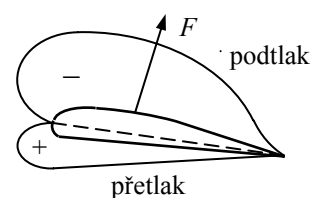
$$\begin{aligned} F_y &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_y \cdot A \cdot v^2 \\ F_x &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_x \cdot A \cdot v^2 \end{aligned} \quad (2.1)$$

kde ρ je hustota vzduchu, A je plocha křídla stanovená součinem jeho délky a délky tětiny profilu a v je rychlost nenarušeného proudu. Velikost výsledné síly působící na křídlo nebo list je potom dána jednoduchým vztahem:

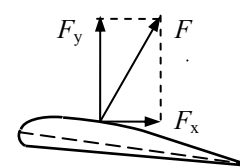
$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}, \quad (2.2)$$



Obr. 2.2: Proudění kolem listu



Obr. 2.3: Tlaky kolem profilu



Obr. 2.4: Síly na profil listu

Místo jejího působení může být v různé vzdálenosti od náběžné hrany profilu a jeho poloha se dá vyjádřit prostřednictvím momentu, který síla F vytváří vzhledem k náběžné hraně, jehož velikost lze stanovit ze vztahu:

$$M = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_M \cdot A \cdot b \cdot v^2, \quad (2.3)$$

kde c_M je momentový součinitel a b je délka tětiny profilu. Hodnoty všech uvedených součinitelů jsou závislé na geometrii profilu a jeho úhlu nastavení a jsou velmi důležitými charakteristikami jeho aerodynamických vlastností. Kromě optimálních hodnot součinitelů vztlaku a odporu má velký význam také velikost jejich vzájemného poměru c_y/c_x , který se nazývá jemnost profilu, zejména pak jeho maximální hodnota.

Další významnou veličinou, na které také závisí hodnoty uvedených součinitelů, je z hlediska aerodynamických podmínek Reynoldsovo číslo charakterizující poměr mezi setrvačnými a třecími silami, které je dáno vzorcem:

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} = v \cdot l \cdot \frac{\rho}{\mu}, \quad (2.4)$$

kde ν je rychlost obtékání profilu, l je charakteristická délka, obvykle délka tětiny, ν je kinematická viskozita proudící tekutiny a μ je dynamická viskozita.

Při otáčkách vrtule n se pak list pohybuje na poloměru r v rovině vrtule obvodovou rychlostí v_o , jíž k němu přitéká proud vzduchu vyvolaný otáčením rotoru. Druhou složkou rychlosti přitékajícího proudu je rychlost větru v protékajícího rotorem. Výsledná rychlost proudu vzduchu přitékajícího k prvku je potom:

$$v_v = \sqrt{v^2 + v_o^2} = \sqrt{v^2 + \left(\frac{\pi \cdot n}{30} \cdot r\right)^2} \quad (2.5)$$

Na list vrtule tak působí síla, která je, jak již bylo uvedeno, vektorovým součtem vztlakové a odporové složky pro daný úhel náběhu. Tuto sílu je však možné také rozložit do složky působící ve směru obvodové rychlosti a ve směru osy rotoru. Zatímco axiální složka dF_a je zachycována v uložení rotoru a přenáší se jako ohybová síla na stožár, tangenciální složka dF_t vyvolává na poloměru r elementární moment síly otáčející vrtulí.

Elementární síla působící v axiálním směru se pak vyjádří z rovnic (2.1), přičemž je potřeba využít vyjádření obvodové rychlosti rotoru prostřednictvím úhlu β relativního proudu vzduchu. Výsledný vztah pro tuto sílu má tvar:

$$dF = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot dA \cdot (1 + \cot^2 \beta) \cdot (c_y \sin \beta + c_x \cos \beta) \quad (2.6)$$

Podobně je možné vyjádřit rovněž moment vyvolaný touto vztlakovou silou na profilu prvku umístěného na poloměru r a také výkon podle vzorců:

$$dM = dF \cdot r = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot r \cdot dA \cdot (1 + \cot^2 \beta) \cdot (c_y \sin \beta + c_x \cos \beta) \quad (2.7)$$

$$dP = dM \cdot \omega = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot dA \cdot (1 + \cot^2 \beta) \cdot (c_y \sin \beta - c_x \cos \beta) \quad (2.8)$$

Takovéto vyjádření v podstatě platí pro nekonečně malé prvky, součásti profilu. V praxi se samozřejmě výpočet provádí pro list vrtule, který se rozdělí určitý počet prvků o určité tloušťce, kdy lze ještě zanedbávat změnu obvodové rychlosti podél poloměru a rozdíly v jejich geometrii. Výsledná axiální síla, moment síly a výkon celého rotoru se potom stanoví jako součet všech příslušných složek podél rotorového listu nebo lopatky a jejich vynásobením celkovým počtem listů nebo lopatek.

Výsledná axiální síla působící na rotor, výsledný moment síly rotoru a jeho výkon jsou důležité údaje o vlastnostech větrného motoru, které však platí jen pro určitou velikost a konkrétní provedení rotoru. Pro zobecnění těchto výpočtů se kvůli tomu zavádí několik součinitelů, které umožňují výpočty rotorů se stejným provedením a jinými rozměry. Jsou to součinitel axiální síly c_F , vyjadřující poměr vypočtené síly k síle vyvolané dynamickým tlakem proudu vzduchu na celou plochu rotoru, momentový součinitel c_M , který vyjadřuje poměr skutečného momentu síly k momentu způsobenému silou rovnou dynamickému tlaku na plochu rotoru působící na jeho vnějším poloměru, a výkonový součinitel c_P , který vyjadřuje poměr výkonu rotoru k výkonu větru protékajícímu celou jeho plochou. Jejich hodnoty jsou definovány následujícími vztahy:

$$c_F = \frac{2 \cdot F_a}{\rho \cdot A \cdot v^2}, \quad c_M = \frac{2 \cdot M}{\rho \cdot A \cdot v^2 \cdot R}, \quad c_P = \frac{2 \cdot P}{\rho \cdot A \cdot v^3} \quad (2.9)$$

Při tomto dodržení geometrické podobnosti rotoru jiné velikosti jsou tedy dodrženy i stejné aerodynamické vlastnosti profilu, avšak musí být zachován také poměr obvodové rychlosti rotoru v_0 k rychlosti větru w označovaný jako součinitel rychloběžnosti, jehož hodnota také slouží k rozdělení větrných rotorů na rychloběžné a pomaloběžné:

$$\lambda_0 = \frac{v_0}{w} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot n}{60 \cdot v} \quad (2.10)$$

Všechny tyto součinitele je možné používat též u jiných typů větrných motorů, založených nejen na vztlakovém, ale také na odporovém principu. Hodnoty koeficientů síly, momentu a využití výkonu se přitom budou vzájemně lišit v závislosti na rychloběžnosti.

3 Systémy větrných elektráren

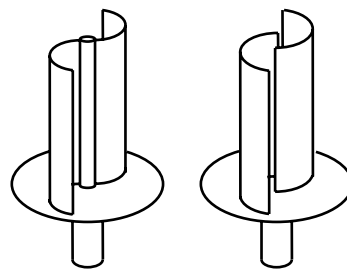
Existuje celá řada druhů větrných elektráren, které se mohou vzájemně lišit svým provedením, principem nebo provozními vlastnostmi. Nejdůležitější části větrné elektrárny jsou turbína a generátor, jejichž vzájemné spojení zajišťuje hnací ústrojí, jehož součástí může, ale nemusí, být převodovka. Dalšími součástmi elektrárny jsou potom věž, případně stožár elektrárny, na níž je umístěna celá strojovna, dále čidla sledující rychlost a většinou také směr větru, prvky regulace výkonu nebo napětí a samozřejmě i prvky připojení celého zařízení k elektrizační soustavě, včetně prvků výkonové elektroniky.

3.1 Typy větrných turbín

Větrné turbíny je možné rozdělit podle nejrůznějších kritérií. Kromě již zmíněného dělení podle aerodynamického principu na odporové a vztakové nebo rychlosti otáčení na rychloběžné a pomaloběžné, se větrné elektrárny ještě dělí podle osy otáčení na zařízení s vodorovnou nebo svislou osou. V praxi se potom uplatňuje několik typů rotorů jako jsou odporový Savoniusův rotor, vztakové rotory Darrieusova či spirálovitého typu se svislou osou a lopatkové kolo nebo vrtule s vodorovnou osou rotace.

3.1.1 Savoniusova turbína

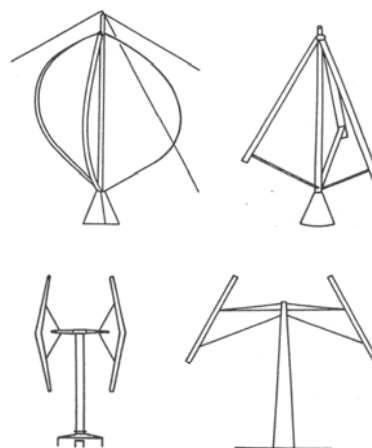
Prakticky nejdokonalejším rotorem pracujícím na odporovém principu, který je v současné době možné využít pro výrobu elektřiny, je rotor typu Savonius, jenž se skládá, jak je vidět z Obr. 3.1, ze dvou ploch ve tvaru půlválců na kruhové základně, které jsou uspořádány ve tvaru otevřeného písmene S, nebo mohou být vzájemně přesazeny. Patří mezi pomaloběžné rotory s velmi malou hodnotou rychloběžnosti, optimálně od 0,9 do 1, a jeho konstrukce, jejíž vodorovná varianta je známá z oblasti využití energie vody, se vyznačuje především svou jednoduchostí a spolehlivostí chodu, který je zajištěn již při malých rychlostech větru 2 až 3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Nevýhodami jsou pak hlavně nízká účinnost, jejíž nejvyšší udávaná hodnota je 23 %, a také dva mrtvé úhly pro vznik točivého momentu, což lze řešit spojením několika těchto rotorů s různě natočenými lopatkami, nebo rovněž jejich šroubovitým tvarem. Z těchto důvodů se tento stroj používá jen velmi málo a výhradně pro větrné elektrárny malých výkonů se stejnosměrným generátorem.



Obr. 3.1: Savoniusovy turbíny

3.1.2 Darrieusova turbína

Mezi nejdéle používané principy přeměny větrné energie na energii elektrickou patří vztlakové rotory typu Darrieus, které se vzájemně mohou poměrně značně lišit svým provedením, jichž je, viz Obr. 3.2, celá řada. Jsou opatřeny dvěma až čtyřmi listy aerodynamického profilu tvarovanými tak, aby namáhání odstředivými silami na ohyb bylo minimální. Jejich konstrukce má nejčastěji tvar řeckého písmene Φ , ale vyskytují se i provedení ve tvaru trojúhelníka nebo písmene H, které mohou mít též prizmatické listy umožňující regulovat výkon při vyšších rychlostech větru změnou sklonu listů.



Obr. 3.2: Darrieusovy turbíny

Největší výhodou větrných turbín tohoto typu je nezávislost jejich chodu na směru větru, jednoduchost jejich konstrukce a poměrně vysoká účinnost, která dosahuje hodnot až 38 %, při optimálních hodnotách rychloběžnosti 4 až 5. Velkou nevýhodou těchto strojů je však vysoká rychlost větru potřebná pro náběh, která činí 5 až 8 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a zpravidla také nutnost rozběhu pomocí cizího zdroje. Další nevýhodou je dále jejich malá výška, asi do 40 m, která nedovoluje využít příznivější podmínky výše nad zemským povrchem. V praxi je možné tato zařízení vidět jen zřídka na elektrárnách velkých výkonů.

3.1.3 Spirálovitá turbína

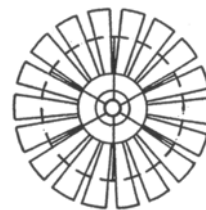
Zvláštním moderním typem vztlakové turbíny se svislou osou, jejíž konstrukce vychází z konstrukce turbíny Darrieusovy, je spirálovitá turbína, ukázaná v Obr. 3.3, jež je opatřena listy zkroucenými v úhlu 60 stupňů podobně jako vodní turbína Gorlovova. Tato koncepce, jejíž vývoj neustále probíhá, se vyznačuje hlavně malou hlučností a zanedbatelnou mírou vibrací, jež umožňují jejich instalaci v městské zástavbě a, díky lehké konstrukci z karbonového vlákna a epoxidové pryskyřice, dokonce také přímo na střeších budov. Jejich uplatnění je proto orientováno především na malé domácí zdroje energie malých výkonů pracujících při rychlostech větru od 4,5 do 16 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dobře se také vyrovnávají se značnou proměnlivostí směru a rychlosti vzdušného proudění, která je pro města typická.



Obr. 3.3: Spirálovitá turbína

3.1.4 Lopatkové kolo

Dlouhou historii používání mají také větrná kola opatřená obvykle plechovými lopatkami, jejichž počet se pohybuje od čtyř až do několika desítek, podle velikosti kola a požadované rychloběžnosti. Nejčastěji používaný typ této koncepce je potom tzv. americké kolo s větším počtem lopatek, viz Obr. 3.4, jehož největší předností je snadný rozběh a dobré využití malých rychlostí větru, do $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tento stroj patří mezi pomaloběžné a dosahuje velmi rozdílných hodnot účinnosti, která se udává od 20 do 43 %, při rychloběžnosti kolem jedné, a která rovněž závisí na použitém počtu lopatek. Největší nevýhodou je potom hmotnost rotoru, jehož základem je ocelový rám a nutnost natáčení do směru větru. Používají se hlavně k výrobě elektřiny pro vlastní spotřebu, dnes však již jen ojediněle.



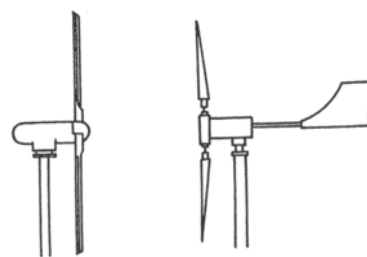
Obr. 3.4: Lopatkové kolo

3.1.5 Vrtule

Nejčastěji používaným typem rotoru ve větrných elektrárnách je vrtule, jejíž rovina otáčení je orientována, jako u větrného kola, kolmo ke směru větru. Obvykle je vrtule opatřena třemi listy, ale existují také dvoulisté a jednolisté vrtule, viz Obr. 3.5, s nimiž se lze ojediněle setkat. Vrtulové listy mají aerodynamický tvar podobný letadlovému křídlu a mohou být natáčivé kolem podélné osy, což umožňuje jejich snazší rozběh, lepší možnosti regulace, aerodynamické brzdění a snížení odporu vrtule při zastaveném rotoru. Existují dvě možnosti uspořádání rotoru, znázorněné na Obr. 3.6, a sice za gondolou, které umožňuje samovolné otáčení do směru větru, nebo před ní, kdy je tento pohyb zajištěn otočným systémem.



Obr. 3.5: Typy vrtule



Obr. 3.6: Uspořádání rotoru

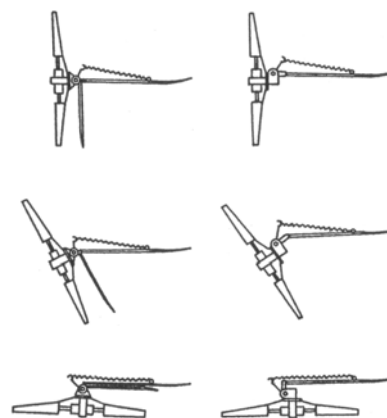
Vrtule je větrným strojem s největší účinností, do 45 %, jejíž maximální hodnota je dosahována při rychloběžnosti kolem 6. Rozběhová rychlost těchto turbín se pohybuje mezi 3 a $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a pracují až do rychlostí kolem $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Z důvodu malého počátečního točivého momentu jsou vybavovány elektrickým nuceným rozběhem, nebo dvoustupňovou regulací. Tento typ rotoru se uplatňuje u elektráren všech velikostí.

3.2 Regulace větrných turbín

Vzhledem k tomu, že rychlost větru je, jak již bylo naznačeno, velmi proměnlivá veličina a může v některých případech dosahovat velmi velkých hodnot, je zpravidla třeba větrné turbíny chránit před překročením maximálních bezpečných otáček. Dále je rovněž třeba provádět regulaci otáček za účelem přizpůsobení výkonu stroje jmenovitému výkonu generátoru. V závislosti na provedení rotoru se rozlišují dva základní regulační principy, a sice regulace typu stall, pro rotory s pevnými listy nebo lopatkami s automatickou regulací výkonu, a regulace pitch nebo active stall, pro rotory s natáčivými listy.

3.2.1 Rotory s pevnými listy

Regulace rotorů s pevnými listy spočívá vlastně v tom, že listy se pevně nastaví v rozmezí úhlu natočení φ od 0° do 4° a během provozu se jejich nastavení již dále nemění. Řízení výkonu a omezování maximálních otáček se běžně provádí tak, že rotor není spojen přímo s hřídelí, ale přes kloub, což umožňuje jeho naklápění. Při normálním provozu brání jeho natočení z optimální polohy pružina nebo závaží. Při velké rychlosti větru je však díky postranní desce nebo vyosení rotoru vzhledem k čepu, viz Obr. 3.7, vyvolána síla, která způsobí jeho vychýlení stranou, což může vést až k zastavení.



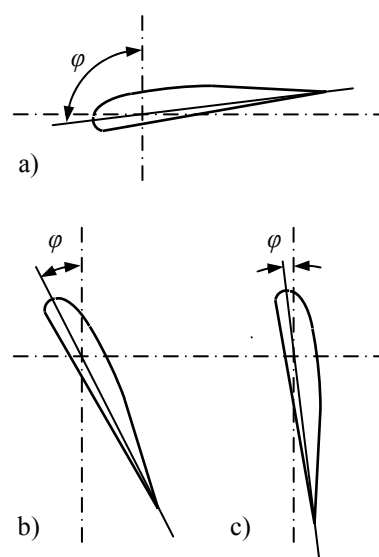
Obr. 3.7: Regulace stall

Regulace stall má však řadu nevýhod, mezi něž patří hlavně rychlé natáčení rotoru při poryvech větru a s tím spojený vznik velkých gyroskopických momentů. Další velkou nevýhodou je, že účinnost vrtule při vyšších rychlostech větru značně klesá a díky tomu klesá i výkon celé elektrárny. Vrtule s pevnými listy rovněž nejsou schopny samovolného startu, což se řeší elektrickým motorem. Výhodou je naopak jednoduchá konstrukce bez velkého počtu pohyblivých částí, která je spolehlivá a nevyžaduje náročnou údržbu.

3.2.2 Rotory s natáčivými listy

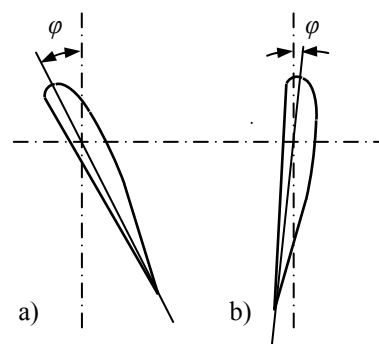
Velmi kvalitní regulace lze dosáhnout při použití rotoru s natáčivými vrtulovými listy, jimiž je možné zajistit provoz větrné turbíny při konstantních nebo málo proměnných otáčkách v poměrně velkém rozsahu velikostí rychlosti větru bez výrazných změn v jejich účinnosti. Pro rotory s natáčivými listy existují dva typy takovéto regulace.

První z nich je regulace pitch, která nastavuje listy při zastaveném rotoru náběžnou hranou proti směru větru tak, aby kladly co nejmenší odpor a nevznikala na nich síla roztáčející rotor. Jedná se o aktivní systém, jenž pracuje se vstupním signálem o výkonu generátoru a při provozu se tak, podle jeho velikosti, neustále mění úhel natočení listů φ v rozsahu 0° až 30° , čímž dochází ke změnám velikostí hnacích aerodynamických sil a tím též ke změnám využití výkonu turbínou. Jak je znázorněno na Obr. 3.8, list se musí z polohy a) při stojícím rotoru nejdřív natočit o několik desítek stupňů do polohy b) pro rozběh, z níž potom dalším otočením přejde do provozní polohy c) odpovídající jmenovitému výkonu.



Obr. 3.8: Regulace pitch

Podobně funguje také regulace active stall, která svým aerodynamickým principem v podstatě odpovídá regulaci používanou u rotorů s pevnými listy. Na rozdíl od regulace pitch pracuje tento způsob jen s malými změnami úhlu natočení, přičemž udržování konstantního výkonu není docilováno zvětšováním úhlu nastavení, ale naopak jeho zmenšováním, jak je vidět z Obr. 3.9, kde je znázorněna poloha a) pro rozběh, a poloha pro zastavení rotoru b), mezi nimiž regulace probíhá.



Obr. 3.9: Regulace active stall

Aktivní regulace natáčením listů turbíny má velké množství výhod, které umožňují její široké uplatnění. Jednou z nejvýznamnějších je schopnost aktivní kontroly výkonu v celém rozsahu rychlosti větru, která zajišťuje vyšší produkci elektřiny. Dalšími výhodami jsou snadný start rotoru bez nutnosti dalšího zařízení a snadné zastavení rotoru bez potřeby silných brzd. Tato koncepce také snižuje zatížení listů při vysokých rychlostech větru, a to hlavně při stojícím rotoru v extrémních podmínkách.

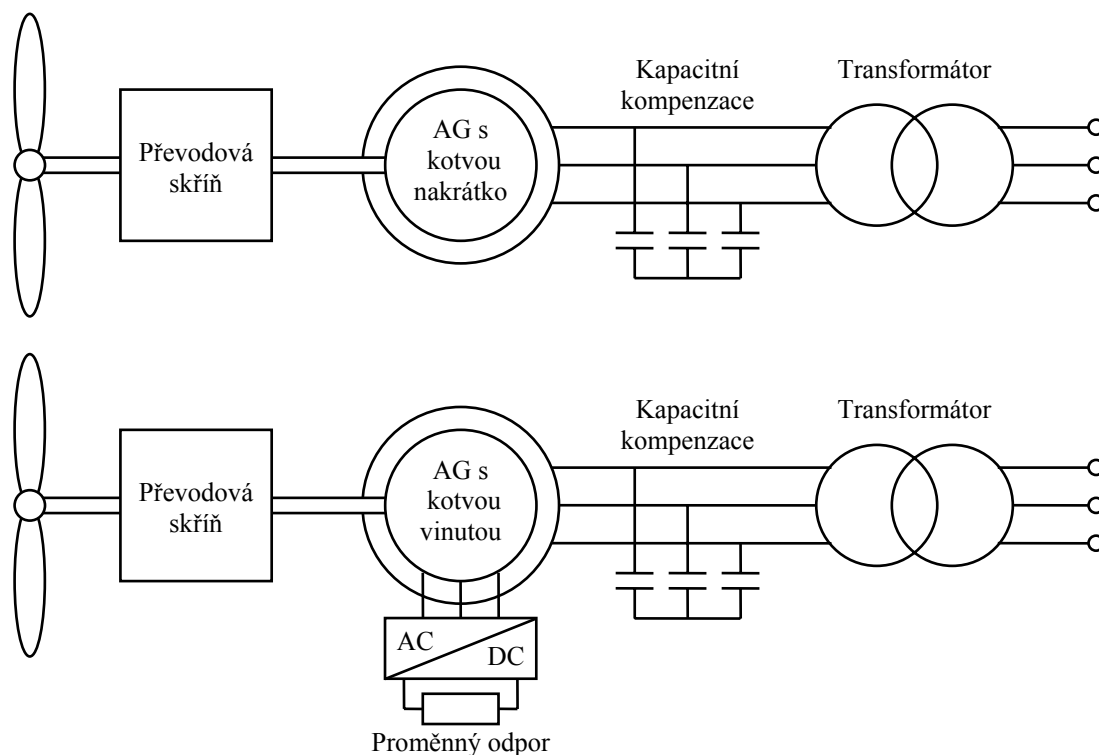
Hlavním rozdílem mezi oběma regulacemi využívajícími natáčení listů pak spočívá v nárocích na jejich konstrukční provedení. Při regulaci active stall totiž oproti regulaci pitch nedochází k přestavování vrtulového listu o velké úhly, až 120° mezi provozním a brzdícím režimem. Zatímco první typ využívá pro zastavení rotoru natočení listů náběžnou hranou proti větru, druhý k tomuto účelu využívá odtržení listu od proudnice.

3.3 Generátory větrných elektráren

V moderních větrných elektrárnách jsou většinou pro výrobu elektřiny používány asynchronní nebo synchronní generátory střídavého trojfázového proudu, přičemž oba tyto typy mají své výhody a nevýhody. Asynchronní generátory jsou charakteristické zejména jednoduchostí jejich výroby a provozu, ale také svou závislostí na elektrické síti, a proto nacházejí uplatnění spíše v oblasti menších výkonů. Jednotky vyšších výkonů jsou naproti tomu zpravidla vybaveny generátory synchronními, které se vyznačují svými regulačními schopnostmi umožňujícími řízení elektrických parametrů, jako jsou napětí, frekvence nebo činný a jalový výkon. V oblasti velmi malých výkonů je také možné se setkat s použitím generátorů stejnosměrného proudu.

3.3.1 Asynchronní s konstantními otáčkami

Většina donedávna instalovaných systémů VTE pracuje na principu asynchronního generátoru s konstantními otáčkami. Jedná se v podstatě o asynchronní generátor, který má obvykle dvě satorová vinutí a je přímo připojený k elektrické síti. V podstatě existují dva druhy asynchronních generátorů provozovaných s konstantními otáčkami, jejichž schémata zapojení jsou znázorněna na Obr. 3.10, z nichž první ukazuje použití generátoru s kotvou nakrátko a druhé naopak generátor s vinutým rotorem.

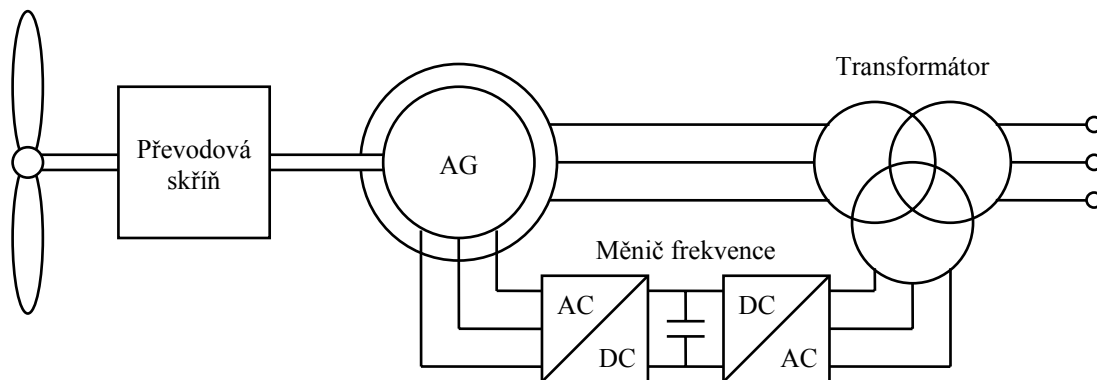


Obr. 3.10: Asynchronní generátory s konstantními otáčkami

Díky přepínání mezi dvěma statorovými vinutími je tento systém schopen pracovat jako dvou-výkonový, přičemž v režimu s větším počtem pólů využívá lépe nižší rychlosti větru a v režimu s menším počtem pólů pak vyšší rychlosti větru. Rychlost rotoru u těchto systémů je tedy určena kmitočtem sítě je závislá na počtu pólových dvojic generátoru, následkem čehož jsou otáčky téměř konstantní a pohybují se pouze v rozmezí 1 až 2 % od otáček synchronních. Generátor s vinutým rotorem umožňuje, díky zapojení proměnlivého odporu do rotorového obvodu, rozmezí otáček od 0 do 10 %. Hlavními nevýhodami této technologie jsou však nezbytnost použití kompenzace jalového výkonu, zpravidla kapacitní bankou, v důsledku odebrání jalového výkonu ze sítě, které je pro asynchronní generátory typické, a kolísání výkonu v závislosti na změnách mechanických momentů na listech turbíny, kde se používají všechny typy aerodynamické regulace.

3.3.2 Asynchronní s proměnnými otáčkami

Technologie asynchronního generátoru lze využít také pro systémy s proměnnými otáčkami, který je schopen udržovat prakticky konstantní mechanický moment právě díky možnosti změn otáček rotoru, jejichž velikost se pohybuje od -40 do +30 % synchronních otáček. Obecně jde o dvojitě napájený asynchronní generátor, jehož statorové vinutí je přímo připojeno k síti a jehož vinutý rotor je, jak ukazuje Obr. 3.11, napájen přes měnič kmitočtu. Takto může být do rotoru zaváděn proud o vhodné amplitudě, frekvenci, sledu fází a fázovém posunu vzhledem ke magnetickému toku statoru.



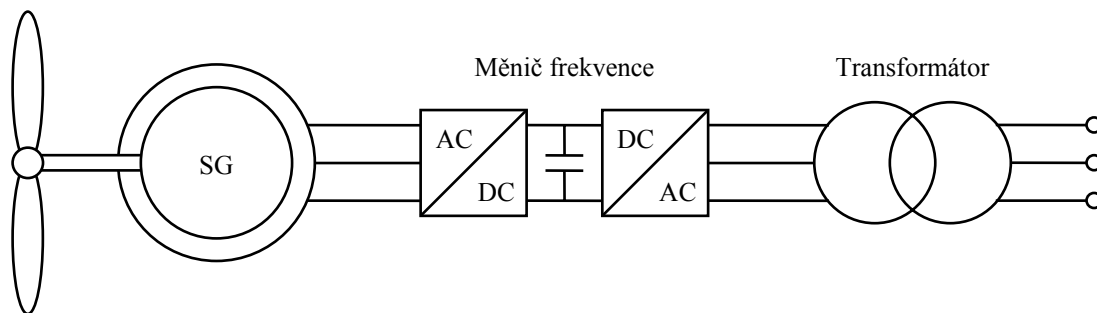
Obr. 3.11: Dvojitě napájený asynchronní generátor

Takovéto dvojitě napájení je výhodné zejména díky skutečnosti, že polovodičový měnič musí řídit pouze 20 až 30 % celkového výkonu stroje, což je příznivé pro velikost ztrát způsobených tímto prvkem. Menší velikost měniče kmitočtu pak zároveň dělá tento koncept atraktivní také z hlediska ekonomického. Jednou z velkých výhod tohoto systému je rovněž možnost regulace jalového výkonu zajišťovaná rotorovým proudem. Také proto

jsou dvojitě napájené asynchronní generátory v současné době jedním z nejpoužívanějších systémů. Největší nevýhodou, ve srovnání s jinými systémy s asynchronními generátory, je potom nutnost použití sběracích kroužků a polovodičového měniče. Pro aerodynamické řízení výkonu se používá výhradně regulace pitch.

3.3.3 Synchronní s proměnnými otáčkami

V současnosti nejvíce uplatňovanou technologií, zejména ve větrných elektrárnách velkých výkonů, je synchronní generátor s proměnnými otáčkami, který je často vybaven větším počtem pólových dvojic, a proto, na rozdíl od jiných systémů, může být s turbínou spojen přímo a nepotřebuje převodovku, která je jednou z nejsložitějších částí VTE. Tento typ generátoru, jehož schéma zapojení je vidět na Obr. 3.12, může mít buzení zajištěné pomocí elektromagnetu, nebo permanentním magnetu.



Obr. 3.12: Synchronní generátor s proměnnými otáčkami

Hlavní výhodou tohoto systému představuje, jak již bylo zmíněno dříve, schopnost regulace elektrických parametrů, včetně jalového výkonu, který lze, jak vyplývá z principu synchronního stroje, řídit pomocí budícího proudu. Měníč kmitočtu, který zároveň funguje jako zařízení pro hladší připojení k síti, ovládá v tomto případě celý výkon stroje, a také proto je tato koncepce poměrně drahá. Největší nevýhodou je však měničem způsobený výskyt vyšších harmonických, které je třeba odstranit použitím frekvenčních filtrů. Jako aerodynamická regulace se u těchto systémů využívá regulace pitch.

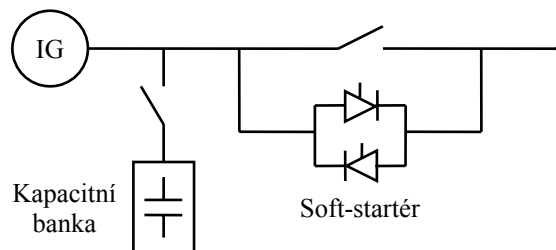
3.4 Způsoby připojení větrných elektráren

Během svého provozu odpovídá připojení větrných elektráren popisu v předchozí kapitole, což znamená, že za normálních podmínek jsou zařízení s asynchronním strojem připojena svým statorem přímo k elektrizační soustavě a pro napájení rotoru je využíván frekvenční měnič a zařízení se synchronním generátorem jsou plně připojena přes prvek výkonové elektroniky. Při startu větrné elektrárny, tedy pro účely jejího připojení k síti při

dosažení odpovídajících otáček, je však třeba zabránit některým jevům, jenž tento proces provázejí, zejména pak vzniku rázového proudu vlivem magnetizace stroje. S ohledem na to, že elektrárny se synchronním generátorem jsou vybaveny měničem na straně statoru, řešení této problematiky se jich netýká, protože vše je zajištěno pomocí tohoto měniče. Pro elektrárny s asynchronním generátorem jsou potom popsány v podstatě dva způsoby jejich připojování k síti využitelné při jejich rozběhu.

3.4.1 Připojení přes soft-startér

Nejpoužívanějším systémem je připojování generátoru přes tzv. soft-startér, který se skládá z dvou antiparalelně zapojených tyristorů v každé fázi, jak ukazuje Obr. 3.13, jež jsou elektronicky řízeny. Celý systém zahrnuje dále ještě hlavní vypínač, který zajišťuje překlenutí soft-startéru a také vypínač pro kompenzační kapacitní banku. Proces připojení větrné elektrárny, v tomto případě, může začínat při úhlové rychlosti generátoru v rozsahu mezi 5 a 30 procenty pod úrovní rychlosti synchronní. V tomto okamžiku začíná pracovat soft-startér, který spínáním jednotlivých tyristorů řídí velikost napájecího napětí a vytváří jeho plynulý nárůst až na jmenovitou hodnotu. Díky tomuto spínání je omezována rovněž velikost proudu tekoucího do generátoru a nedochází tak k překročení jmenovité hodnoty v řádu jejích násobků, jako v případě eventuálního přímého přifázování.



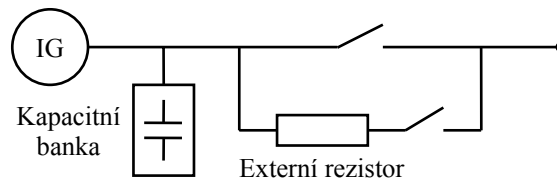
Obr. 3.13: Připojení přes soft-startér

Celý tento proces může trvat maximálně několik sekund a po dosažení jmenovité velikosti napětí dochází k sepnutí hlavního vypínače a k přemostění soft-startéru, který se nadále na provozu elektrárny nijak nepodílí. Nakonec je, buď v jednom, nebo v několika stupních připojena i kapacitní banka zajišťující kompenzaci jalového výkonu.

3.4.2 Připojení přes externí rezistor

Druhou možností, pro připojování větrných elektráren s asynchronními generátory, je využití externího rezistoru, které je znázorněno na Obr. 3.14, z něž je patrné, že v tomto obvodu je kapacitní kompenzace připojena ke generátoru trvale, jako v případě přímého

přifázování. Větrná elektrárna vybavená tímto prvkem se připojuje k soustavě při otáčkách mezi 75 a 100 procenty otáček synchronních, podobně jako u využití soft-startéru. V tomto okamžiku dochází k sepnutí vypínače rezistoru, připojení elektrárny přes tuto součástku a během maximálně několika sekund následně k magnetizaci stroje. Potřebný jalový proud pro magnetizaci je během celého startu dodáván kapacitní bankou.



Obr. 3.14: Připojení přes externí rezistor

Se zvyšováním napětí na kapacitním prvku se proud tekoucí externím rezistorem snižuje. V okamžiku dosažení velmi nízké velikosti je napětí na generátoru velmi blízko ke jmenovité hodnotě napětí v síti, dochází k sepnutí hlavního vypínače a zároveň k rozepnutí vypínače rezistoru, čímž se změní způsob připojení k síti na přímé. Vlivem omezení napětí externím rezistorem je při tom znovu, jako u soft-startéru, zabráněno vzniku proudového rázu. Na rozdíl od soft-startéru však připojení externího rezistoru nezpůsobuje ani vznik vyšších harmonických proudů a nepůsobí tak negativně na síť.

3.5 Přístrojové vybavení větrných elektráren

Pro připojení větrných elektráren a farem k soustavě existuje řada variant, které se mohou vzájemně lišit v závislosti na napěťové hladině přípojného místa nebo na způsobu provozu výroby. Součástí přístrojového vybavení jsou tedy, stejně jako v případě jiných elektroenergetických zdrojů, kromě elektroměrů či měřicích transformátorů, také spínací zařízení, různé druhy ochran a případně i zařízení pro kompenzaci jalového výkonu.

3.5.1 Spínací zařízení

Pro připojení větrné elektrárny do soustavy musí být vždy použito spínací zařízení se schopností vypínání zátěže, jako je vypínač, vypínač s pojistkami či úsekový odpínač, s předřazenou zkratovou ochranou. Jeho umístění může být jak na nízkonapěťové, tak i na vysokonapěťové straně blokového transformátoru a musí zajišťovat galvanické oddělení ve všech fázích. U výroben, jež nejsou schopny ostrovního provozu, může být funkce tohoto vazebního spínače nahrazena spínacím zařízením generátoru, které může sloužit nejen jako dělicí vypínač k síti, ale také pro spojování a synchronizaci. V případě výroben, které jsou

schopny ostrovního provozu, potom pro vypínání následkem činnosti ochran vyvolané jevy v síti slouží synchronizační vypínač umístěný mezi spínacím místem a výrobním zařízením elektrárny. Zapnutí spínacího prvku musí být také blokováno při ztrátě napětí v některé fázi a opětovné připojení elektrárny může být uskutečněno teprve ve chvíli, kdy je velikost napětí v mezích nastavení příslušných ochran.

3.5.2 Elektrické ochrany

Pro správné připojování a odpojování elektrárny spínacím zařízením jsou všechny zdroje vybaveny příslušnými ochranami, které zabraňují poškození zařízení elektrárny při poruchách, přetížení nebo jiných nepříznivých jevech v soustavě. Tyto ochrany v dělicím bodě potom nedovolují nežádoucí napájení příslušné části sítě s nepřijatelnými hodnotami napětí či frekvence ani napájení poruch v síti ze samotné výroby. Nastavení jednotlivých ochran proto musí splňovat požadavky ze strany provozu soustavy, viz Tab. 3.1, kde jsou uvedeny příslušné napěťové a frekvenční meze.

| Funkce ochrany | Rozsah nastavení |
|----------------|------------------|
| podpěťová | 0,7 až 1,0 U_n |
| přepěťová | 1,0 až 1,2 U_n |
| podfrekvenční | 48 až 50 Hz |
| nadfrekvenční | 50 až 52 Hz |

Tab. 3.1: Nastavení jednotlivých ochran

Pro účely minimalizace četnosti odpojování zdrojů se u podpěťových, přepěťových a podfrekvenčních ochran potom používají dva stupně, jeden s okamžitým působením při velkých odchylkách a druhý se zpožděným působením při malých odchylkách. Aby bylo možné s jistotou rozpoznat i jednopólové poklesy napětí, musí být dále ochrany vztahující se k jeho hodnotám trojfázové. Frekvenční ochrany mohou být jednofázové.

V soustavách vybavených systémem opětovného zapínání (OZ) je také třeba další ochrana zajišťující rychlé odpojení větrné elektrárny od soustavy. Tato zvláštní ochrana tak zabezpečuje odpojení výroby při výkonovém skoku nebo při překročení dovolené změny fázového úhlu a tím také ochranu generátoru proti zapnutí v proti-fázi při automatickém spuštění po bez-napěťové přestávce. Použitím této ochrany je také podmíněna samotná účinnost OZ, které může být zajištěno jen tehdy, pokud není síť při bez-napěťové pauze napájena. Jako ochrana pro nezpožděné vypnutí při OZ může být použita např. ochrana na skokovou změnu vektoru napětí, relé na výkonový skok, směrová nadproudová ochrana nebo také dvoustupňová napěťová a frekvenční ochrana.

3.5.3 Kompenzace jalového výkonu

Pro připojení asynchronního generátoru do soustavy je třeba, vzhledem k nutnosti jeho zásobování jalovou energií, použít také kompenzační zařízení, jež poskytují podporu pro udržování stability napětí v síti. Pro tento účel se dají využít například kondenzátorové baterie, statický proměnný kompenzátor, nebo statický synchronní kompenzátor. Prvním a nejjednodušším způsobem je připojení kondenzátorové baterie udržující správnou hladinu napětí pomocí připínání a odpínání kondenzátorů. Tento způsob je však zároveň nejméně účinný, protože je schopen provádět jen skokové změny v dodávce jalového výkonu a jeho reakce na náhlé změny napětí je poměrně pomalá.

Mnohem pokročilejší technologií je statický proměnný kompenzátor, jenž se skládá z kondenzátorů a reaktorů, které jsou spínány a ovládány pomocí tyristorů. Díky výkonové elektronice je tento systém schopen provádět plynulou regulaci a může tak reagovat rychle i na náhlé změny a nezpůsobovat přitom kolísání napětí. Velkou výhodou je potom jeho schopnost nejen dodávky jalové energie, ale rovněž její spotřeby, což významně rozšiřuje jeho působnost v oblasti regulace příslušné části sítě. Další výhody tohoto systému potom tvoří pozitivní působení na kvalitu elektrické energie.

Asi nejširší uplatnění má v současnosti statický synchronní kompenzátor, který řídí dodávku a spotřebu jalové energie pomocí regulace velikosti výstupního třífázového napětí ze střídavého napěťového generátoru. Při generování vyššího napětí než je napětí sítě dojde ke vzniku kapacitního proudu a tedy k dodávce jalového výkonu do sítě, čímž se napětí na přípojnicích zvýší na požadovanou hodnotu. Při generování napětí nižšího oproti napětí v síti potom naopak dojde ke vzniku induktivního proudu a kompenzátor odebere ze sítě jalovou energii, čímž se napětí na přípojnicích na požadovanou hodnotu sníží. Svým principem se tak tento systém v podstatě podobá regulaci jalového výkonu synchronního generátoru, kde se řízení změn velikosti a směru proudu v uzlu provádí změnou buzení. Stejně jako statický proměnný kompenzátor poskytuje i tento systém možnost rychlé a plynulé regulace jalové energie, avšak s poněkud rychlejšími reakčními časy. Statický synchronní kompenzátor může plnit rovněž funkci aktivního filtru a prostřednictvím měniče schopného generovat nesinusový průběh obsahující definované harmonické složky opačného směru oproti těmto složkám v síti tak odstranit jejich nežádoucí výskyt. Vzhledem k výhodám a možnostem rozšíření o doplňkové funkce je toto zařízení využíváno i pro připojování fotovoltaických elektráren, které dodávají elektřinu přes jednofázové měniče.

3.6 Hnací ústrojí a převodovka

Za jednu z nejproblematictějších částí celé větrné elektrárny je někdy označována převodovka, která se skládá z poměrně velkého množství pohyblivých součástí a může tak významně ovlivnit spolehlivost a také účinnost elektrárny. Obvykle se používá planetová převodovka, která může být jednostupňová, vícestupňová, nebo popřípadě být vybavena plynule proměnným převodovým poměrem a plnit tak i regulační funkci. S převodovkou pak samozřejmě souvisí větší hlučnost oproti bez-převodovému spojení, které se využívá pro VTE s mnoha-pólovými synchronními generátory.

4 Připojování větrných elektráren do ES

Nejdůležitějším úkolem při provozování elektrizační soustavy (ES) je bezpochyby zajištění jejího bezpečného a spolehlivého chodu jednotlivými provozovateli distribučních soustav (DS), kteří musí zároveň také zajistit dostatečnou kvalitu dodávané elektřiny, a provozovatelem přenosové soustavy (PS). Na území ČR se tato činnost řídí zejména zákonem č. 458/2000 Sb. ve znění pozdějších předpisů, na jehož základě jsou každoročně vydávána pravidla pro provozování distribučních soustav [20] a pravidla pro provozování přenosové soustavy [21], která stanovují technické, plánovací, provozní a informační požadavky pro připojení uživatelů k soustavě a pro její užívání.

4.1 Kvalita elektrické energie

Parametry dodávané elektřiny, které určují její kvalitu pro odběratele, jsou určeny charakteristikami v daném předávacím místě ES a jejich porovnáním s mezními velikostmi referenčních technických parametrů. Tyto charakteristiky napájecího napětí, které popisují kvalitu elektřiny dodávané z veřejných distribučních sítí a z přenosové sítě za normálních provozních podmínek, jsou stanoveny pravidly vycházejícími z norem, např. [10], a týkají se jeho kmitočtu, velikosti, tvaru vlny a symetrie třífázových napětí.

4.1.1 Kmitočet sítě

Velikost jmenovité frekvence sítě je, na území ČR, stanovena na 50 Hz a střední hodnota kmitočtu základní harmonické, měřená v desetisekundových intervalech, musí za normálních provozních podmínek splňovat následující meze:

| meze pro distribuční soustavy nn a vn | | |
|--|---------------------------------------|----------------|
| se synchronním připojením k propojenému systému | 50 Hz \pm 1 % (49,5 Hz až 50,5 Hz) | za 99,5 % roku |
| | 50 Hz +4/-6 % (47 Hz až 52 Hz) | po 100 % času |
| bez synchronního připojení (ostrovní napájecí systémy) | 50 Hz \pm 2 % (49 Hz až 51 Hz) | za 95 % týdne |
| | 50 Hz \pm 15 % (42,5 Hz až 57,5 Hz) | po 100 % času |

Tab. 4.1: Meze střední hodnoty kmitočtu

4.1.2 Napájecí napětí

Normalizované jmenovité napětí U_n pro veřejnou síť nn je 230 V, a to jak mezi fázovým a středním vodičem pro čtyř-vodičové trojfázové soustavy, tak mezi jednotlivými fázovými vodiči pro tří-vodičové trojfázové soustavy. V soustavách vn a vvn je velikost

napájecího napětí určena velikostí dohodnutého napájecího napětí U_c . Průměrná efektivní hodnota napájecího napětí, měřená v desetiminutových intervalech, musí za normálních provozních podmínek, s vyloučením přerušeni napájení, splňovat meze v Tab. 4.2.

| | | |
|---|-----------------|----------------|
| meze pro distribuční soustavy nn | | |
| 99 % průměrných efektivních hodnot | $U_n \pm 10 \%$ | v každém týdnu |
| všechny průměrné efektivní hodnoty | $U_n \pm 15 \%$ | - |
| meze pro distribuční soustavy vn a 110 kV | | |
| 99 % průměrných efektivních hodnot | $U_c \pm 10 \%$ | v každém týdnu |
| meze pro přenosové soustavy 110 kV a 220 kV | | |
| 99 % průměrných efektivních hodnot | $U_c \pm 10 \%$ | v každém týdnu |
| meze pro přenosové soustavy 400 kV | | |
| 99 % průměrných efektivních hodnot | $U_c \pm 5 \%$ | v každém týdnu |

Tab. 4.2: Meze průměrné efektivní hodnoty napájecího napětí

V některých případech napájení ze soustavy nn může být ve vzdálených oblastech s dlouhými vedeními velikost napětí mimo rozsah $U_n +10/-15 \%$, přičemž všichni takto postižení odběratelé by měli být o této skutečnosti informováni.

4.1.3 Rychlé změny napětí

V soustavách nn a vn jsou rychlé změny napájecího napětí způsobeny zejména změnami zatížení u odběratelů či spínáním v síti. Za normálních provozních podmínek pak tyto změny nepřekračují hodnotu 5% U_n v sítích nn a 4% U_c v sítích vn. Za určitých podmínek se mohou několikrát denně vyskytnout rychlé změny napětí o velikosti až 10% U_n v sítích nn a 6% U_c v sítích vn. Pokud je změna napětí vyšší a způsobí snížení napětí pod 90% U_n , považuje se za pokles napětí. Změny napájecího napětí v PS potom nesmí překročit 3% U_c na úrovni vn a $2,5 \%$ U_c na úrovni vvn při četnosti 2 až 10 hod^{-1} , dále pak 4% U_c pro vn a 3% U_c pro vvn při četnosti nižší než 2 hod^{-1} a vyšší než 4 den^{-1} a nakonec také 5 až 6% U_c na vn a 3 až 5% U_c na vvn při četnosti nižší než 4 den^{-1} .

Dlouhodobá míra vjemu flikru, který je způsobován kolísáním napětí, musí v rámci DS i v rámci PS za normálních podmínek po 95 % času, v libovolném týdenním období, splňovat podmínku $P_{\text{fl}} \leq 1$. Reakce na tento jev je však velmi subjektivní a může se měnit v závislosti na příčině jeho vzniku a na délce doby, po kterou se vyskytuje.

4.1.4 Krátkodobé poklesy napětí

Vznik krátkodobých poklesů je obvykle spojen s poruchami, především se zkraty, v zařízeních odběratelů nebo ve veřejné distribuční síti. Četnost jejich ročního výskytu se

značně mění podle typu rozvodné sítě nebo místa sledování a jejich rozložení během roku může být velmi nepravidelné. Protože se jedná o převážně nepředvídatelné náhodné jevy, u nichž je prakticky nemožné stanovit k příslušné charakteristice určité hodnoty, musí být následující uvedené hodnoty interpretovány jako směrné hodnoty.

Za normálních provozních podmínek může být očekávaný počet krátkodobých poklesů napětí během roku od několika desítek až do jednoho tisíce. Většina z nich má dobu trvání kratší než 1 sekunda a hloubku poklesu menší než 60 %. Občas se však mohou vyskytnout krátkodobé poklesy napětí s větší hloubkou a delší dobou trvání. V některých oblastech se mohou velmi často vyskytovat krátkodobé poklesy s hloubkou 10 až 15 % jako následek spínání zatížení u odběratelů.

4.1.5 Přerušení napájecího napětí

Stav, při němž je napětí v předávacím místě menší než 1 % dohodnutého napětí U_c , se nazývá přerušení napájecího napětí. Tato přerušení mohou být buď předem dohodnutá, za účelem provádění plánovaných prací na DS, nebo poruchová, způsobená přechodnými nebo trvalými poruchami spojenými většinou s působením vnějších vlivů, poruchami na zařízeních a rušením. Přerušení napájecího napětí se dělí na krátkodobá, s dobou trvání do tří minut, a dlouhodobá, s dobou trvání delší než tři minuty.

Za normálních provozních podmínek je roční výskyt krátkodobých přerušení napájecího napětí v rozsahu od několika desítek do několika stovek. Přibližně 70 % těchto přerušení je kratší než 1 sekunda. Roční četnost výskytu dlouhodobých přerušení může být menší než 10, avšak v závislosti na uvažované oblasti, s ohledem na strukturu a uspořádání sítě, může dosahovat až hodnoty 50. Vzhledem k nepředvídatelnosti vlivů, které přerušení napětí způsobují, musí být tyto hodnoty opět interpretovány jako směrné.

4.1.6 Dočasná a přechodná přepětí

Přepětí mezi živými vodiči a zemí je stav, při němž dojde k překročení hodnoty jmenovitého, resp. dohodnutého napájecího napětí. Dočasné přepětí o síťovém kmitočtu je přepětí v daném místě, které má relativně dlouhou dobu trvání a jehož původ je obvykle ve spínacích operacích, jako jsou náhlé změny zatížení, nelinearitách či zkratech, zejména jednofázových. Přepětí přechodné je potom krátkodobé oscilační nebo neoscilační přepětí, které je obvykle silně tlumené s dobou trvání do několika milisekund a je zpravidla způsobeno bleskem, spínáním nebo působením pojistek.

Dočasná přepětí o síťovém kmitočtu se obecně objevují během poruch v distribuční síti nebo v instalacích odběratelů a zmizí s jejím odstraněním. V sítích nn mohou obvykle tato přepětí dosáhnout, v důsledku posunu uzlového bodu třífázové soustavy, hodnoty sdruženého napětí. Za určitých okolností může na straně nn vzniknout přepětí následkem zkratu na straně vn transformátoru. Doba trvání takového přepětí je shodná s dobou trvání zkratového proudu a nepřekračuje 1,5 kV. V soustavách vn jsou očekávané hodnoty těchto přepětí více závislé na způsobu uzemnění sítě. Všeobecně platí, že dočasné přepětí mezi živými vodiči a zemí nepřekročí v sítích s uzlem účinně uzemněným nebo uzemněným přes impedanci hodnotu 1,7 % dohodnutého napětí U_c a v soustavách izolovaných nebo rezonančně uzemněných hodnotu 2,0 % U_c .

Přechodná přepětí mohou být způsobena spínáním či bleskem, a to jak přímo, jen v soustavách vn, tak prostřednictvím elektromagnetické indukce. V sítích nn nepřekračují přechodná přepětí mezi živými vodiči a zemí obecně vrcholovou hodnotu 6 kV, náhodně se však vyskytují i hodnoty vyšší. Doby čela přepětí jsou velmi různé, od milisekund až po méně než mikrosekundu. Spínací přepětí má obvykle nižší vrcholovou hodnotu než přepětí způsobené bleskem, může však mít kratší dobu čela nebo delší dobu trvání.

4.1.7 Nesymetrie napájecího napětí

Stav trojfázové sítě způsobený převážně nesymetrií zatížení, při němž efektivní hodnoty fázových napětí nebo rozdíly fázových úhlů mezi po sobě jdoucími fázemi nejsou stejné, se označuje jako nesymetrie napětí. Při vzniku nesymetrie je, pro možné rušení zařízení připojených k síti, rozhodující zpětná složka. Za normálních provozních podmínek musí proto být v distribuční síti v libovolném týdenním období 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot zpětné složky napájecího napětí v rozsahu 0 až 2 % sousledné složky. V některých oblastech, v nichž jsou nějaké instalace odběratelů částečně připojeny jednofázově či dvoufázově, se mohou, v odběrných místech, vyskytovat nesymetrie až do velikosti 3 %. V rámci PS pak musí být během každého týdne 95 % středních efektivních hodnot zpětné složky napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut rovněž menší než 2 % sousledné složky. Tato hodnota přitom představuje určitou rezervu pro zvýšení zpětné složky směrem k jejímu zdroji.

4.1.8 Harmonická a mezi-harmonická napětí

Sinusový průběh napětí o síťovém kmitočtu je zkreslen výskytem napětí o vyšších frekvencích. Sinusové napětí s kmitočtem rovným celistvému násobku základní frekvence

napájecího napětí se nazývá harmonické a napětí, jehož kmitočet není celistvým násobkem základního kmitočtu síťového napětí, se nazývá mezi-harmonické.

Příčinou výskytu harmonických napájecího napětí jsou hlavně nelineární zatížení odběratelů připojených do všech úrovní soustavy. Harmonické proudy, tekoucí impedancí sítě, způsobují harmonická napětí, která se v odběrných místech mění s časem. Hladina mezi-harmonických je spojena zejména s používáním prvků výkonové elektroniky, jako jsou měniče kmitočtu. V mezi-harmonických napětích se mohou objevit i napětí s blízkými přílehlými kmitočty a vytvářet tak široké kmitočtové spektrum.

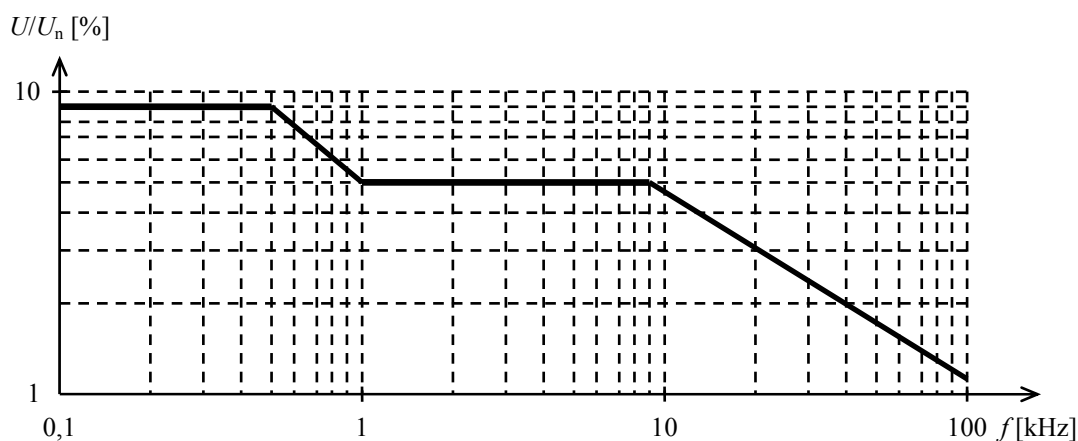
| liché harmonické | | | | sudé harmonické | |
|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| ne násobky 3 | | násobky 3 | | | |
| řád h [-] harmonické | harmonické napětí [%] | řád h [-] harmonické | harmonické napětí [%] | řád h [-] harmonické | harmonické napětí [%] |
| 5 | 5,0 | 3 | 3,0 | 2 | 1,9 |
| 7 | 4,0 | 9 | 1,3 | 4 | 1,0 |
| 11 | 3,0 | 15 | 0,5 | 6 | 0,5 |
| 13 | 2,5 | 21 | 0,5 | 8 | 0,5 |
| 17 | 2,0 | | | 10 | 0,5 |
| 19 | 1,5 | | | 12 | 0,5 |
| 23 | 1,5 | | | 14 | 0,5 |
| 25 | 1,5 | | | 16 | 0,5 |
| | | | | 18 | 0,5 |
| | | | | 20 | 0,5 |
| | | | | 22 | 0,5 |
| | | | | 24 | 0,5 |

Tab. 4.3: Úrovně harmonických napětí v předávacím místě v procentech U_n

Za normálních provozních podmínek musí v distribuční soustavě a hladině 110 kV být v libovolném týdenním období 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot napětí každé harmonické menší nebo rovno hodnotě z Tab. 4.3, přičemž u jednotlivých harmonických mohou rezonance vyvolat napětí vyšší. Vedle toho musí být celkový činitel zkreslení THD napájecího napětí, zahrnující všechny harmonické až do řádu 40, menší nebo roven 8 %. Vzhledem k tomu, že harmonické vyšších řádů než 25 jsou obvykle velmi malé, ale zároveň také obtížně předvídatelné, jejich úrovně se neuvádějí.

V rámci přenosové soustavy pak musí být během každého týdne 95 % průměrných efektivních hodnot harmonických napětí v desetiminutových měřicích intervalech $U_h \leq 1,5$ pro síť 220 kV a $U_h \leq 1$ pro síť 400 kV. Celkové harmonické zkreslení pak za stejných podmínek nesmí překročit hodnotu 2,0 pro 220 kV a 1,5 pro 400 kV.

Pro mezi-harmonická napětí U_m pak v přenosové soustavě platí, že 95 % jejich průměrných efektivních hodnot, získaných v desetiminutových měřicích intervalech, musí být během každého týdne menší než 0,2 % jmenovitého, resp. dohodnutého napětí. Pro hodnoty sub-harmonických a mezi-harmonických blízkých síťovému kmitočtu dále platí hodnoty dané podle Obr. 4.1, který je v logaritmickém měřítku.



Obr. 4.1: Úrovně mezi-harmonických napětí v procentech U_n

4.1.9 Úrovně napětí signálů v napájecím napětí

Za účelem přenosu signálů v soustavě a do objektů odběratele se používá signál superponovaný na napájecí napětí. Ve veřejné DS je možné rozlišovat tři typy signálů, a to signály hromadného dálkového ovládání, s rozsahem od 110 Hz do 3 kHz, nosné signály po vedeních, mezi 3 a 148,5 kHz, a signály síťových značek. V přenosových soustavách by úroveň poslechového signálu neměla překročit 0,3 % jmenovitého napětí.

4.2 Podmínky pro připojení

Místo připojení větrných elektráren, stejně jako jiných zdrojů elektrické energie, do elektrizační soustavy je v podstatě předurčeno jejich výkonem. Zatímco jednotlivé VTE a malé větrné farmy o výkonech v řádu jednotek až desítek MW se tak připojují do DS, na odpovídající napěťovou hladinu, velké větrné farmy o výkonech v řádu desítek až stovek MW jsou připojovány do PS. Při určování odpovídajícího způsobu a místa připojení je také třeba přihlídnout k daným síťovým poměrům a způsobu provozu zdroje. Podmínky pro připojení zdrojů jsou stanoveny v [20] a [21], které vycházejí s příslušných norem.

4.2.1 Požadavky na charakteristiky napětí a proudu

Aby byla dodržena potřebná kvalita elektřiny, musí VTE, stejně jako jiné zdroje připojené do soustavy, splňovat určité parametry. Podle [11] a [21] nesmí relativní zvýšení napětí vyvolaná všemi v síti provozovanými zdroji v nejnepříznivějším přípojném bodě překročit hodnotu 3 % v sítích nn, 2 % v sítích vn nebo 110 kV a hodnotu 1 % v přenosové soustavě. Ve zvláštních případech přitom může provozovatel sítě stanovit vyšší nebo nižší mezní hodnoty, s ohledem na druh a způsob provozu sítě, čímž je provozovateli umožněno řízení napětí při respektování možného součtu všech změn napětí ve výši 5 %.

Při připínání a odpínání výrobních zařízení k síti pak nesmí být v daném přípojném bodě překročena, pro četnost opakování menší než $1,5 \text{ min.}^{-1}$, přípustná hodnota relativní změny napětí ve výši 3 % v síti nn a 2 % v síti vn. Pro zřídka se opakující krátkodobou změnu napětí s četností menší než $0,01 \text{ min.}^{-1}$ je potom možné připustit vyšší hodnoty, pokud to dovolí poměry v síti. Pro výrobní v síti 110 kV nesmí podle [20] v normálním provozu překročit relativní změna napětí vyvolaná spínáním jednoho zařízení, např. větrné elektrárny, hodnotu 0,5 % a spínáním celé výrobní, např. větrné farmy, hodnotu 2 %. Při poruchovém provozu sítě potom nesmí být tato změna větší než 5 %. Pro VTE zapojené do PS jsou podle [21] tyto mezní hodnoty 0,5 % pro jednu elektrárnu a 1,5 % pro větrnou farmu při normálním provozu a 3 % při odpojení v důsledku poruchy.

Mezní hodnoty pro relativní hloubku komutačního poklesu způsobenou výrobním zařízením mají podle [11] velikost 0,05 pro síť nn a 0,025 pro síť vn. Přípustná hodnota dlouhodobé míry flikru způsobené provozem všech výrobních zařízení v nejnepříznivějším přípojném bodě v sítích nn a vn je 0,46. Ve společném napájecím bodě 110 kV má potom tato mezní hodnota velikost 0,37.

Pro harmonické proudy emitované zařízeními připojovanými v rámci distribučních soustav platí pro jednotlivé hladiny napětí a řády harmonických různé hodnoty vztažných proudů, které jsou využívány k následnému posouzení připojitelnosti k síti. Na hladinách nízkého napětí jsou tyto velikosti uvedeny v Tab. 4.4.

| řád v, μ [-] | $i_{v,\mu}$ [A/MVA] | řád v, μ [-] | $i_{v,\mu}$ [A/MVA] |
|------------------|---------------------|------------------|---------------------|
| 3 | 3,00 | 13 | 0,40 |
| 5 | 1,50 | 17 | 0,30 |
| 7 | 1,00 | 19 | 0,25 |
| 9 | 0,70 | 23 | 0,20 |
| 11 | 0,50 | 25 | 0,15 |

Tab. 4.4: Hodnoty vztažného proudu harmonických v síti nn

Pro harmonické proudy řádu v v rozmezí $25 < v < 40$ má pak vztažný proud velikost danou jako $0,15 \cdot 25/v$, pro harmonické proudy lichého řádu $\mu < 40$ platí následně hodnota $0,15 \cdot 25/\mu$, pro proudy sudých harmonických řádu $\mu < 40$ je velikost proudu $1,5/\mu$, pro řády harmonických $\mu > 42$ platí pro proud hodnota vztažného proudu daná jako $4,5/\mu$ a nakonec pro řády $v < 178$ je jeho velikost $4,5/v$. Vztažné hodnoty pro jediné předávací místo v síti vn potom ukazuje další tabulka Tab. 4.5, podle příslušných řádů a napětí.

| řád v, μ [-] harmonické | přípustný vztažný proud $i_{v,\mu}$ př [A/MVA] | | |
|--------------------------------|--|-----------|-----------|
| | síť 10 kV | síť 22 kV | síť 35 kV |
| 5 | 0,115 | 0,058 | 0,033 |
| 7 | 0,082 | 0,041 | 0,023 |
| 11 | 0,052 | 0,026 | 0,015 |
| 13 | 0,038 | 0,019 | 0,011 |
| 17 | 0,022 | 0,011 | 0,006 |
| 19 | 0,016 | 0,009 | 0,005 |
| 23 | 0,012 | 0,006 | 0,003 |
| 25 | 0,010 | 0,005 | 0,003 |

Tab. 4.5: Hodnoty vztažného proudu harmonických v síti vn

Pro liché harmonické vyššího řádu a pro sudé harmonické potom platí pro velikost přípustného vztažného proudu hodnoty $0,060/v$, $0,030/v$ a $0,017/v$. Pro řády $\mu < 40$ jsou dále velikosti proudů dány jako $0,060/\mu$, $0,030/\mu$ a $0,017/\mu$ a pro řády $\mu > 40$ jsou hodnoty proudů dány jako $0,160/\mu$, $0,090/\mu$ a $0,046/\mu$. Navíc je zapotřebí dodržet podmínku, že v rozsahu frekvencí 2 až 9 kHz nepřekročí ve společném napájecím bodě napětí 0,2 %. V síti napětí 110 kV musí přípustné vztažné proudy harmonických vyhovovat hodnotám, které jsou uvedeny v Tab. 4.6, opět v závislosti na řádu.

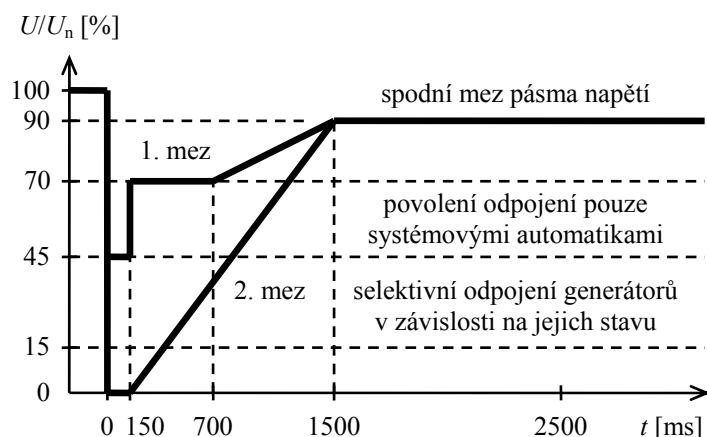
| řád v, μ [-] | $i_{v,\mu}$ zul [A/GVA] | řád v, μ [-] | $i_{v,\mu}$ zul [A/GVA] |
|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|
| 5 | 2,60 | 17 | 0,92 |
| 7 | 3,75 | 19 | 0,70 |
| 11 | 2,40 | 23 | 0,46 |
| 13 | 1,60 | 25 | 0,32 |

Tab. 4.6: Hodnoty vztažného proudu harmonických v síti 110 kV

Pro liché harmonické vyššího řádu než 25 a pro sudé harmonické pak platí velikosti přípustného vztažného proudu dané jako $5,25/v$, pro harmonické řádů $\mu < 40$ jsou potom jejich hodnoty $5,25/\mu$ a pro řády $\mu > 40$ platí pro přípustné vztažné proudy hodnota daná vztahem $16/\mu$. Proudů harmonických, přiváděné zkresleným napětím sítě do výrobního zařízení se výrobnímu zařízení nepřipočítávají.

4.2.2 Požadavky na chování při poruchách v síti

Velmi důležitou otázkou je i chování větrných elektráren při poruchách v soustavě, zejména při zkratech. Při připojování VTE do distribuční soustavy je zpravidla požadováno jejich rychlé odpojení od sítě, aby nedošlo k poškození zařízení v důsledku zkratových příspěvků od těchto zdrojů. Přesto je z hlediska provozu soustavy třeba, aby tyto zdroje splňovali určité požadavky, které jsou na ně kladeny. Jak uvádí [20], je při poklesu napětí v přípojném bodě pod hodnotu 85 % napětí vztažného, při současném odběru jalového výkonu, nutné odpojení výroby od sítě se zpožděním 0.5 s. Pokud dojde k poklesu napětí na nižší napěťové straně každého transformátoru zdroje na hodnotu 80 % vztažného napětí, musí být postupně po 1,5 až 2,4 s odstupy 0,3 s odpojena vždy čtvrtina výkonu zdroje. Při vzrůstu napětí na 120 % musí být zdroj odpojen do 100 milisekund. Další požadavky jsou potom stanoveny pomocí napěťových mezí podle Obr. 4.2, kterými se při poruchových stavech řídí odpojování zdrojů s asynchronními generátory.



Obr. 4.1: Meze průběhu napětí v přípojném bodě DS a PS

Obecně potom nesmí v oblasti nad první mezí dojít k nestabilitě či odpojení zdroje od sítě a v oblasti mezi mezemi musí výrobny, pokud je to možné, poruchu překonat bez odpojení. Pokud dojde k nestabilitě generátoru nebo náběhu ochrany, může být povoleno krátkodobé odpojení, přičemž resynchronizace musí následovat nejpozději do 2 sekund od jeho vzniku a rychlost růstu výkonu na původní hodnotu musí být aspoň 10 % jmenovitého výkonu generátoru za sekundu. V oblasti pod druhou mezí je vždy dovoleno krátkodobé odpojení, přičemž lze zvýšit resynchronizační čas a snížit rychlost růstu výkonu. Všechny jednotky, které se během poruchy neodpojí od sítě, musí po jejím odstranění zvýšit svůj výkon na původní hodnotu rychlostí minimálně 20 % jmenovitého výkonu za sekundu. Při poklesu napětí musí zdroje navíc podporovat napětí v síti přidáním jalového proudu a

tato regulace musí zajistit jalový proud na straně nižšího napětí transformátoru zdroje s příspěvkem minimálně 2 % jmenovitého proudu na procento poklesu napětí. Zařízení musí být schopné dodávat do sítě požadovaný jalový proud v průběhu 20 milisekund. V případě potřeby musí být možná dodávka jalového proudu ve výši minimálně 100 % jmenovitého proudu. Po návratu napětí do pásma necitlivosti musí regulace napětí zůstat zachována podle zadané charakteristiky po dalších 500 milisekund.

Trochu jiná situace je v přenosové soustavě, kde může plošné odpojování větrných farem následkem hlubokých poklesů napětí vyvolaných zkratem vyvolat vznik nedostatku výkonu v oblasti. Podle [21] je proto potřeba minimalizovat počet jednotek odpojených od soustavy v důsledku poruchy a po jejím odeznění zajistit rychlou obnovu dodávky z těchto zdrojů. Elektrárny připojené do přenosové sítě se při poruchách musí odpinat selektivně, s ohledem na velikosti a doby trvání poklesů napětí v předacím místě, a to podle požadavků, vztahujících se k mezím na Obr. 4.1. Výrobní připojené do PS nesmí být odpojeny, pokud je v průběhu poruchy napětí v předacím místě nad křivkou 2. meze. V odůvodněných případech a po dohodě s provozovatelem přenosové soustavy lze pro tyto účely uvažovat křivku 1. meze. Elektrárna musí být dále schopna činnosti i v případě dvou následných opětovných zapnutí (OZ). Je-li v průběhu poruchy napětí nad křivkou 2. meze, nesmí být elektrárna odpojována od sítě. V případě blízkých i vzdálených zkratů zdroje rovněž výrobní musí podporovat napětí přídatnou dodávkou jalového výkonu do sítě, která je k dispozici navíc vůči jalovému výkonu elektrárny před zkratem. Zvýšená dodávka jalového výkonu se uplatňuje při symetrických i nesymetrických poruchách, přičemž zvýšení dodávky musí následovat do 20 milisekund od výskytu zkratu, doba zvýšené dodávky je do 3 s po zkratu, pak následuje přechod na standardní režim, a požadované hodnoty vychází z požadavku na 2 % zvýšení proudu při 1 % poklesu napětí.

4.2.3 Požadavky na chování při změnách frekvence

Další nároky na provoz větrných elektráren se týkají oblasti stavu frekvence, jejíž velikost se může pohybovat v rozmezí 47,5 až 51,5 Hz. Pokud je kmitočet sítě v těchto dovolených mezích, musí VTE podle [21] zůstat připojena a pomáhat vyrovnávat bilanci výkonů. Změna aktuální výroby kvůli změně frekvence se nepředpokládá při frekvencích od 49,5 do 50,2 Hz v rámci PS a DS. Při vyšších frekvencích je nutné omezení výkonu o 40 % na každý 1 Hz, přičemž toto snižování může být prováděno v 10% krocích a žádaná rychlost tohoto omezování je 5 % za sekundu v PS. Při frekvencích nižších je v PS naopak

nutné zvýšit výkon VTE na maximum dostupného výkonu a zachovat připojení do sítě. Při frekvenci nad 50,5 Hz již pak není možné spouštění a připojování dalších VTE do soustavy a dojde-li k překročení daných mezních hodnot frekvence 47,5 a 51,5 Hz je požadováno jejich okamžité odpojení od sítě.

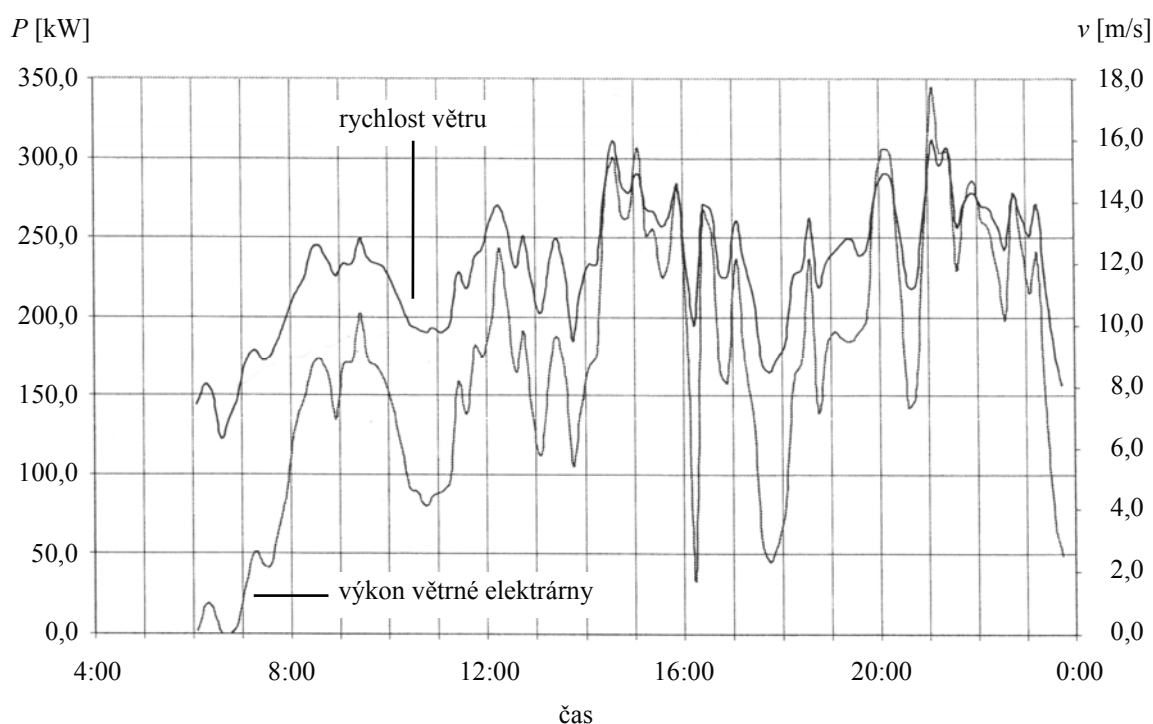
4.2.4 Požadavky na regulaci napětí a jalového výkonu

Jedním z požadavků na větrné elektrárny je také jejich podíl na regulaci jalového výkonu, což je možné díky regulaci účinníku. Jeho požadované rozsahy pro tyto zdroje jsou podle [20] rovny hodnotě 0,95 pro odběr a hodnotě 0,85 pro dodávku jalového výkonu do soustavy a podle [21] pro odběr i dodávku potom hodnotě 0,95, přičemž pro větrné farmy s výkonem větším než 100 MW je požadován i vyšší rozsah dodávky na úrovni účinníku o velikost 0,90. V případě potřeby musí být potom VTE schopna změnit velikost účinníku z jedné meze na druhou za 1 až 2 minuty.

Větrná elektrárny musí být dále schopna řídit v rámci svého regulačního rozsahu napěťové poměry v přípojném bodě, provádět na žádost provozovatele soustavy řízení na konstantní účinník, jalový výkon nebo napětí v místě připojení a také automaticky udržovat požadované hodnoty jednotlivých veličin v tomto místě.

5 Působení větrných elektráren na ES

Výroba elektřiny z větru je, z pohledu bezprostřední závislosti okamžitého výkonu na momentálních klimatických podmínkách, která je názorně ukázána na Obr. 5.1, a z ní plynoucí nemožnosti přizpůsobení dodávaného výkonu potřebám soustavy, tj. požadavkům odběratelů, všeobecně považována za nejproblematictější ze všech obnovitelných zdrojů energie (OZE). Tuto skutečnost potvrzuje také nízká hodnota doby využití instalovaného výkonu, která se u větrných elektráren, provozovaných ve vhodných lokalitách, obvykle pohybuje kolem 2000 hodin za rok, což je rovněž, společně s elektrárnami využívajícími sluneční záření, nejméně ze všech druhů OZE.



Obr. 5.1: Průběh výkonu větrné elektrárny a rychlosti větru

Pro analýzu působení VTE na provoz elektroenergetických soustav je možné tuto problematiku obecně rozdělit na dvě oblasti, a to na vlivy lokální a systémové. Jako lokální lze potom označit vlivy, které se negativně projevují v distribučních soustavách a které se týkají zejména připojovacích a provozních podmínek a zajištění nezbytné kvality dodávky elektřiny. Jako systémové je naopak možné označit vlivy, které se negativně projevují při provozu přenosových soustav a které zahrnují hlavně dopady na stabilitu, potažmo řízení, elektrizační soustavy a zajištění dostatečné spolehlivosti dodávky elektřiny.

5.1 Lokální vlivy

Mezi nežádoucí vlivy působící v rámci distribuční části elektrizační soustavy patří zejména kolísání napětí, které je ovlivněno kompenzací větrných elektráren, přetěžování sítí, které vzniká následkem kolísání výroby v těchto zdrojích, a také zvyšování zkratových poměrů v důsledku jejich připojování. Protože jsou však VTE opatřeny regulací založenou na výkonové elektronice, jsou také často zdrojem rušení v elektrické síti, které je spojeno se vznikem vyšších harmonických, vznikem blikavého jevu, tzv. flikru, nebo útlumem signálu hromadného dálkového ovládání (HDO). Postup při výpočetním hodnocení těchto, zpětných vlivů, udává podniková norma [11].

5.1.1 Přetěžování sítí

Základním předpokladem pro připojení jakéhokoliv zdroje elektřiny, tedy i větrné elektrárny, do soustavy je její dostatečné dimenzování, a to od místa připojení zdroje až po místo spotřeby, případně po místo transformace sloužící pro dálkový přenos. Proto, aby nedocházelo k přetěžování sítě zvýšenou dodávkou elektřiny za mimořádných větrných podmínek, musí být VTE připojena do správně zvoleného přípojného místa a její výkon vyveden do části sítě s odpovídající strukturou a uspořádáním. V případě připojení VTE do sítě, která je nedostatečně dimenzována, je nutné provést její posílení, aby nemohlo dojít k poškození jednotlivých provozních prostředků v důsledku nežádoucích vlivů, jako je vznik nadměrných oteplení nebo nedovolených změn napětí.

5.1.2 Zkratové poměry

Při připojování nových zdrojů do elektrizační soustavy je dále třeba brát v úvahu jejich příspěvky ke zkratovému proudu, které jsou příčinou nárůstu hodnoty zkratového výkonu v přípojném bodě, a také možnost změny směru výkonového toku v síti, protože zejména změna zkratových poměrů může mít za následek překročení hodnot zkratové odolnosti některých zařízení DS a může dojít k jejich poškození. Zároveň je nutné posoudit připojení také z hlediska zkratové odolnosti zařízení samotného zdroje, aby nedošlo k jeho poškození vlivem zkratového proudu sítě, k níž je připojeno.

Velikost třífázového zkratového výkonu, potažmo proudu, sítě je také naprosto zásadní pro posuzování zpětných vlivů zdrojů na soustavu a při jejím určování je nutné vycházet z takových normálních provozních podmínek, při nichž jsou hodnoty nejnižší. Při tom se neuvažují přechodné mimořádné konfigurace sítě podmíněné provozem. Impedance

sítě v přípojném bodě V je potom dána součtem impedance nadřazené sítě a impedancí transformátorů a vedení. Vliv k síti připojených přístrojů a zařízení, stejně jako svodových odporů a kapacit vedení, lze obvykle zanedbat.

Pro dimenzování zařízení na účinky zkratových proudů je nadřazená soustava obvykle charakterizována maximálním zkratovým proudem I_k'' nebo výkonem S_k'' . Vztah mezi těmito dvěma veličinami a impedancí soustavy Z_k'' v místě Q, pro výpočet elektricky vzdálených zkratů v distribučních soustavách podle normy [19] je:

$$Z_{kQ}'' = \frac{c_u \cdot U_n^2}{S_{kQ}''} = \frac{c_u \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{kQ}''}, \quad (5.1)$$

kde S_{kQ}'' je zdánlivý počáteční rázový souměrný zkratový výkon, c_u je napět'ový součinitel ekvivalentního napět'ového zdroje, U_n je efektivní hodnota jmenovitého sdruženého napětí soustavy, Z_{kQ}'' je ekvivalentní impedance soustavy v místě Q a I_{kQ}'' je počáteční rázový souměrný zkratový proud.

Pro tlumení zpětných vlivů na síť jsou však určující minimální hodnoty těchto proudů nebo výkonů a jim odpovídající maximální impedance sítě, a to za normálního provozního stavu soustavy při symetrických bez-odporových zkratech. Při posuzování zpětných vlivů je proto doporučeno, pro určování minimálních proudů, používat náhradní impedanci soustavy Z_{kQ} a vycházet z upravených hodnot S_{kQ} daných vztahem:

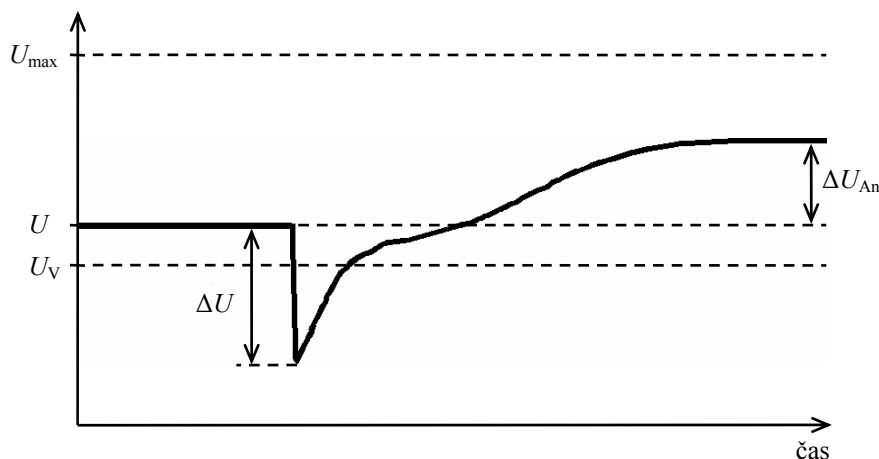
$$S_{kQ} = \frac{U_{nQ}^2}{Z_{kQ}} = \frac{U_{nQ}^2}{c \cdot Z_{kQ}''} \quad (5.2)$$

Pokud je bod sítě Q, se známými zkratovými parametry, zároveň společným napájecím bodem V, pak platí, že zkratový výkon S_{kV} roven zkratovému výkonu S_{kQ} . V ostatních případech se S_{kV} vypočte z činné složky R_{kV} a induktivní složky X_{kV} impedance sítě ve společném napájecím bodě. Tyto složky potom dostaneme součtem impedance v bodě Q a výsledné impedance transformátorů a vedení mezi body V a Q.

5.1.3 Změny napětí

Jedním z nejdůležitějších vlivů způsobovaných připojováním a provozem větrných elektráren jsou změny napětí. Kromě stálého zvýšení napětí, které je vyvoláno zvýšením dodávky elektřiny vlivem samotného připojení zdroje k síti, to mohou být také krátkodobé změny napětí vyvolané manipulacemi, které vznikají jako důsledek připínání a odpínání jednotlivých výrobních zařízení, v závislosti na druhu systému, nebo komutační poklesy, které mají svou příčinu ve struktuře a principu činnosti některých elektronických prvků pro

připojení k síti. Vzájemná souvislost mezi krátkodobou změnou a ustáleným zvýšením napětí ΔU_{An} je názorně vidět na Obr. 5.2, který ukazuje časový průběh změn velikosti napětí vzniklých připojením asynchronního generátoru.



Obr. 5.2: Krátkodobá změna a ustálené zvýšení napětí

Stálé zvýšení napětí je možné přesně vypočítat za použití počítačové analýzy toků zatížení, kde lze počítat s proměnlivou dodávkou jalového výkonu nebo sledovat úroveň napětí ve více uzlech, při současném respektování kompenzačních kondenzátorů. To se uplatňuje zejména při dodávce do více přípojných bodů a u složitých konfigurací sítě, jako jsou kruhové a zasmyčkované sítě. Ve velmi jednoduchých případech, jakým je dodávka do jednoho přípojného bodu, však může být proveden také manuální výpočet, který potom slouží alespoň jako hrubý odhad. Trvalé zvýšení napětí ΔU_{An} v libovolném bodě sítě je pak dáno jako rozdíl mezi napájecím napětím při napájení ze sítě a ze všech výroben v její příslušné části a napájecím napětím při odpojení těchto výroben. Velikost relativního zvýšení napětí Δu_{An} se potom určí z následujícího vztahu:

$$\Delta u_{An} = \frac{\Delta U_{An}}{U_V} = \frac{S_{rE \max}}{S_{kV}} \cdot \cos(\psi - \varphi_E), \quad (5.3)$$

kde U_V je napětí v přípojném bodě, $S_{rE \max}$ je maximální dodávaný výkon, S_{kV} je zkratový výkon v přípojném bodě, ψ je úhel impedance sítě a φ_E je úhel mezi činným a zdánlivým výkonem zdroje. Určení znamének odpovídá zdrojové orientaci.

Při posuzování změn napětí vyvolaných připojením a odpojením distribuovaného zdroje (DZ), je třeba respektovat druh generátoru a způsob jeho připojení k síti. Pokud je dodávka uskutečňována přes měnič nebo střídač, je změna zatížení stejná jako hodnota jmenovitého výkonu výrobní jednotky, přičemž horší situace je při odpojení, kdy zpravidla dochází ke skokovému výpadku dodávky, než při připojení, které je většinou provázeno

plynulým nárůstem v oblasti částečného výkonu. V případě asynchronních generátorů, jež se připínají s téměř synchronními otáčkami, v rozsahu 95 až 105 %, je změna zatížení, při zanedbání prvních dvou kmitů, většinou nižší než čtyřnásobek výkonu generátoru, přičemž v první půlplně mohou proudové špičky dosáhnout hodnoty až osminásobku jmenovitého proudu. Připojování synchronních generátorů, při dodržení obvyklých synchronizačních kritérií, žádnou významnou změnu zatížení nevyvolává. Velikost relativní změny napětí d_c vyvolané manipulacemi je možné vypočítat ze vzorce:

$$d_c = \frac{\Delta U}{U_V} = \frac{\Delta S_A}{S_{kV}} \cdot \cos(\psi - \varphi), \quad (5.4)$$

kde ΔU je změna napětí vyvolaná spínáním zdroje, ΔS_A je změna zatížení a φ je úhel této změny. Pro hodnocení spínání VTE lze také využít hodnotu činitele spínání závislého na síti $k_{i\psi}$, který respektuje velmi krátké přechodové jevy asynchronních strojů připojovaných s přibližně synchronními otáčkami. Tento koeficient zohledňuje velikost i časový průběh proudu během přechodového děje a je udáván jako funkce úhlu impedance sítě ψ pro každé zařízení. Z něj se dá určit fiktivní relativní změna napětí d podle vztahu:

$$d = k_{i\psi} \cdot \frac{S_{rE \max}}{S_{kV}} \quad (5.5)$$

Není-li známa hodnota úhlu φ , musí se buď určit na základě hodnot z praxe, nebo je třeba provést odhad pro nejhorší případ tak, že se za kosinový člen dosadí 1. Určení znamének odpovídá spotřebičové orientaci.

Určování komutačních poklesů má smysl provádět jen u takových zařízení, u nichž se energie dodává přes střídače řízené sítí, protože jsou způsobeny mezi-fázovými zkraty na svorkách tyristorových měničů. Relativní hloubka komutačního poklesu d_{kom} , neboli periodický přechodný pokles napětí, se stanoví podle vzorce:

$$d_{kom} = \frac{\Delta U_{kom}}{U_1}, \quad (5.6)$$

kde ΔU_{kom} je velikost největší odchylky síťového napětí od okamžité hodnoty základní harmonické a U_1 je vrcholová hodnota základní harmonické.

5.1.4 Kolísání napětí

Vlivem nestálosti dodávky do soustavy způsobují větrné elektrárny sled rychlých změn napětí ve společném přípojném bodě. Takovéto kolísání napětí v síti může vyvolávat kolísání světelného toku u zdrojů světla, které se označuje jako blikavý jev, nebo častěji

jako flickr, jenž negativně působí na lidský zrak a může ovlivnit také psychickou pohodu člověka. Příčiny jeho vzniku mohou být v podstatě dvě, a sice vliv porывů větru, který je ale částečně eliminován setrvačností rotačních částí a výkonovým řízením turbíny, a vliv věže, který způsobuje periodický pokles výkonu při zákrytu listu turbíny s věží. Následkem takto vzniklých periodických poklesů činného a jalového výkonu vzniká na impedanci sítě napěťový úbytek ΔU o velikosti, která závisí především na počtu listů rotoru, v případě třílistých turbín se může jednat až o třetinu výkonu, vyjádřené vztahem:

$$\Delta U = \frac{\Delta P \cdot R + \Delta Q \cdot X}{\sqrt{3}U_n}, \quad (5.7)$$

kde ΔP a ΔQ značí změny činného a jalového výkonu elektrárny, R je rezistance a X je reaktance sítě. Z tohoto vztahu skutečnost, že v sítích s výrazně induktivním charakterem prakticky neexistuje změna napětí způsobující flickr, protože změny činného výkonu, které bývají výrazně vyšší než změny jalového výkonu, se na nízké rezistanci soustavy projeví jen zanedbatelně. Pro relativní úbytek napětí Δu potom platí:

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_n} = \frac{\Delta S}{S_{kV}} \cos(\psi + \varphi_f), \quad (5.8)$$

kde φ_f je relativní úhel flickru a ΔS je změna zdánlivého výkonu. Frekvence poklesů $f_{\Delta u}$ závisí na počtu listů a rotoru a velikostí otáček turbíny n a doba trvání poklesu je určena tloušťkou věže D a obvodovou rychlostí ω na konci listu turbíny s poloměrem R . Pro tyto parametry tedy platí následující vztahy:

$$f_{\Delta u} = a \cdot \frac{n}{60} \quad (5.9)$$

$$t = \frac{D}{\omega \cdot R} \quad (5.10)$$

Poměrnému úbytku napětí způsobenému flickrem je úměrná veličina, která se používá k jeho hodnocení a nazývá se emise flickru, nebo také míra vjemu flickru. V praxi se rozlišuje krátkodobá míra vjemu flickru P_{st} , která je měřena či počítána v časovém intervalu deseti minut, a dlouhodobou míru vjemu flickru P_{lt} , která je určována v intervalu dvou hodin. Velikost P_{lt} pro síť s jednou výrobnou je dána vzorcem:

$$P_{lt} = k_f \cdot \frac{S_{rE}}{S_{kV}} \left| \cos(\psi + \varphi_f) \right|, \quad (5.11)$$

kde k_f je činitel flickru daného zařízení a S_{rE} je jmenovitý výkon výrobní jednotky. Pro síť s více výrobními zařízeními nebo jednotkami o jmenovitých výkonech S_{rEi} připojenými do

společného bodu je třeba provést výpočet pro každou jednotku zvlášť. Výsledná hodnota pro výrobu s různými, nebo s n stejnými jednotkami, se určí takto:

$$P_{lt} = \sqrt{\sum_{i=1}^n P_{lti}^2}$$

$$P_{lt} = \sqrt{n} \cdot P_{lti}$$
(5.12)

Pokud je v síti více výrobních zařízení připojených do různých přípojných bodů, je výpočet poměrně složitý a výslednou hodnotu P_{lt} lze pro jednodušší konfigurace sítě, například pro jednostranně napájenou odbočku s n výrobními zařízeními, odhadnout. V tomto případě se pro každé výrobní zařízení j určí nejprve hodnota $P_{lt\,jj}$ v jeho přípojném bodě $k = j$ podle předchozích vztahů, potom se určí hodnoty jeho příspěvků $P_{lt\,jk}$ v ostatních přípojných bodech $k \neq j$ podle následujících dvou rovnic:

$$S_{kv\,j} < S_{kv\,k} \Rightarrow P_{lt\,jk} = P_{lt\,jj} \cdot \frac{S_{kv\,j}}{S_{kv\,k}},$$

$$S_{kv\,j} \geq S_{kv\,k} \Rightarrow P_{lt\,jk} = P_{lt\,jj}$$
(5.13)

kde $S_{kv\,j}$ a $S_{kv\,k}$ jsou zkratové výkony v přípojných bodech j a k . Z těchto jednotlivých hodnot je nakonec možné vypočítat výsledné hodnoty míry vjemu flikru $P_{lt\,k}$ pro všechny přípojných body podle vztahu:

$$P_{lt\,k} = \sqrt{\sum_{j,k=1}^n P_{lt\,jk}^2}$$
(5.14)

V případech komplikovaných konfigurací sítě, jakými jsou kruhové a zasmyčkované sítě, není možné provést takovýto výpočet a je nutné určit výsledné hodnoty míry vjemu flikru pomocí simulačního výpočtu.

5.1.5 Harmonická a mezi-harmonická napětí

Vznik sinusových průběhů o vyšších frekvencích je spojen zejména se zařízeními využívajícími polovodičové frekvenční měniče a střídače, kterými jsou větrné elektrárny vybaveny z důvodu produkce střídavého napětí o frekvenci různé od frekvence sítě. Napětí vytvářené těmito prvky totiž obsahuje, kromě první harmonické, určité množství vyšších harmonických, které sinusový průběh zkreslují. Skutečný průběh napětí ze střídače přitom také závisí na použitém způsobu jeho řízení.

Zkreslení průběhů křivky napětí ve společném napájecím bodě má za následek dodatečné namáhání zařízení ostatních uživatelů sítě a může docházet k poruchám jejich funkce nebo ke zkrácení jejich životnosti. S ohledem na tyto negativní vlivy je tedy nutné

stanovit, pro každou nově připojovanou VTE, podíl vyšších harmonických emitovaných do sítě. Při jeho posuzování se potom vychází z hodnot celkového činitele harmonických THF a celkového činitele harmonického zkreslení THD , určených takto:

$$THF_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U}, \quad (5.15)$$

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1}, \quad (5.16)$$

kde U_1 je efektivní hodnota základní harmonické, U_h je výsledné napětí harmonické h -tého řádu ve společném napájecím bodě a h je řád harmonické. Jako kritérium pro posuzování harmonických je stanoveno, že každý uživatel může do sítě dodávat výkon harmonických úměrný jeho smluvnímu výkonu.

Větrné elektrárny jsou většinou také zdrojem mezi-harmonických, které vznikají při provozu asynchronních strojů a následkem proměnlivosti výroby, způsobují zkreslení, neperiodické vůči kmitočtu sítě a přispívají tak ke vzniku flikru. Pro jejich hodnocení se používá vztažná hodnota mezi-harmonických v_m definovaná jako:

$$v_m = \frac{U_m}{U_n} \cdot 100, \quad (5.17)$$

kde U_m je výsledné napětí mezi-harmonických. Vzhledem k povaze původu těchto napětí nedochází zpravidla k aritmetickému sčítání jejich úrovní z různých zdrojů provozovaných v síti, přičemž výjimkou jsou situace, kdy se shoduje frekvence i fáze.

5.1.6 Harmonické proudy

Poněkud složitější situace je při posuzování harmonických proudů, jež mohou být emitovány zařízeními, zejména opětovně v případech použití střídačů a měničů frekvence a jejichž hodnoty musí udávat výrobce těchto zařízením například zprávou o typové zkoušce. U zdrojů připojených do sítě nn lze za předpokladu nemožnosti připojení více než dvou větších vlastních výroben s maximálním výkonem 10 % jmenovitého výkonu distribučního transformátoru použít kritérium:

$$I_{vnn} = i_v \cdot \frac{S_{kV}}{\sin \psi_{kV}}, \quad (5.18)$$

kde I_{vnn} je přípustný proud, i_v je vztažný proud, hodnota $\sin \psi_{kV} = X_k/Z_k$ je rovna 1 v případě předávacího místa blízko transformátoru vn/nn. Tento postup pak může být použit, pokud

je společný napájecí bod v síti vn, tedy pro připojení větrných elektráren. U výroben v síti vn je potom možné pro jediné předávací místo určit celkové přípustné harmonické proudy v tomto bodě následujícím způsobem:

$$I_{vpř} = i_{vpř} \cdot S_{kV}, \quad (5.19)$$

kde $I_{vpř}$ je přípustný proud a $i_{vpř}$ je přípustný vztažný proud. Je-li ve společném napájecím bodě připojeno několik zařízení, pak se určí harmonické proudy přípustné pro jednotlivá zařízení jako součin poměru zdánlivého výkonu zařízení a celkového připojitelného nebo plánovaného výkonu ve společném napájecím bodě:

$$I_{vpř} = I_{vpř} \cdot \frac{S_A}{S_{AV}} = i_{vpř} \cdot S_{kV} \cdot \frac{S_A}{S_{AV}} \quad (5.20)$$

U zařízení sestávajících z jednotek stejného typu je možné za S_A dosadit ΣS_{nE} , což platí též pro větrné elektrárny, u zařízení různých typů jde pak o odhad. Pro sčítání harmonických proudů, pocházejících od různých odběratelů a výroben potom platí, že pro usměrňovače řízené sítí, 6 či 12 pulzů, se harmonické pro ně typické, tedy řádu 5., 7., 11., atd., i pro ně netypické nízkých řádů, menších než 7, se jejich hodnoty aritmeticky sčítají. V případě netypických harmonických vyšších řádů, větších než 7, je následně celkový harmonický proud určitého řádu roven odmocnině ze součtu kvadrátů harmonických proudů tohoto řádu. Pro pulzně modulované střídače platí, že pro řád μ , který v zásadě není celočíselný, ale pro jeho hodnoty větší než 11 také obsahuje celočíselné hodnoty, je také celkový proud roven odmocnině ze součtu kvadrátů pro jednotlivá zařízení. Pokud se vyskytují u těchto střídačů netypické harmonické proudy řádů menších než 11, pak se velikosti těchto proudů sčítají opět aritmetickým způsobem.

Je-li v síti několik předávacích míst, musí být při posuzování poměrů v jednom předávacím místě uvažovány rovněž ostatní předávací místa a podle toho jsou poměry v síti vn přípustné, jestliže v každém společném napájecím bodě nepřekročí velikost proudů harmonických emitovaných do sítě hodnotu:

$$I_{vpř} = i_{vpř} \cdot S_{kV} \cdot \frac{S_{AV}}{S_S}, \quad (5.21)$$

kde S_{AV} je součet napájecích zdánlivých výkonů všech zařízení připojených do daného společného napájecího bodu a S_S je celkový výkon, pro který je síť navržena. Pokud podle tohoto výpočtu dojde k překročení přípustných velikostí harmonických proudů, potom v zásadě není připojení možné, pokud podrobnější výpočet neprokáže, že nejsou překročeny přípustné hladiny harmonických napětí v síti. Pro připojení v soustavách 110 kV je možné

určit přípustnou hodnotu harmonických proudů jednoho výrobního zařízení pro případ řádů harmonických nižších než 13 a pro řády harmonických vyšší než 13 a mezi-harmonické proudy pomocí následujících vztahů:

$$I_{vzul} = i_{v,\mu zul} \cdot S_{kV} \cdot \frac{S_A}{S_0} \quad (5.22)$$

$$I_{v,\mu zul} = i_{v,\mu zul} \cdot S_{kV} \cdot \sqrt{\frac{S_A}{S_0}}$$

kde $I_{v,\mu zul}$ je přípustný proud harmonické výrobního zařízení, $I_{v,\mu zul}$ je přípustný vztažený proud harmonické, S_A je přípojný výkon výrobního zařízení a S_0 je referenční výkon. Je-li výrobní zařízení připojeno k úseku vedení mezi dvěma transformovny, dosazuje se za referenční výkon hodnota tepelného mezního výkonu tohoto úseku vedení a při připojení výrobního zařízení k transformovně se za tento referenční výkon dosazuje maximálně k transformovně připojitelný vyráběný výkon. Proud harmonických, přiváděné zkresleným napětím sítě do výrobního zařízení, například do obvodů filtru, se tomuto příslušnému výrobnímu zařízení při posuzování nepřipočítávají.

5.1.7 Ovlivnění signálu HDO

Pod pojmem hromadné dálkové ovládání se rozumí soubor technických prostředků umožňujících vysílat povely nebo signály za účelem zapínání a vypínání spotřebičů nebo tarifů. Tento systém využívá pro přenos informace silová vedení energetické sítě a jeho správná funkce tak může být ovlivněna provozem jiných zařízení, hlavně zdroji rušivých harmonických a mezi-harmonických napětí v jím používaném frekvenčním pásmu. Větrné elektrárny také způsobují, stejně jako ostatní rozptýlená výrobní zařízení, přidavně zatížení přijímačů HDO. Úroveň signálu může být potom ovlivněna i kondenzátory usměrňovačů s kapacitní filtrací nebo kondenzátorovými bateriemi.

5.2 Systémové vlivy

Vlivy, které se negativně projevují v rámci přenosové soustavy, se týkají především elektrizačních soustav s velkým podílem větrných elektráren na celkové dodávce elektřiny, kde výkony velkých větrných farem prakticky postupně nahrazují podstatnou část výkonu dodávaného dříve stabilnějšími zdroji, zejména generátory tepelných elektráren, které také zajišťovali dostatečnou schopnost regulace. V takovýchto ES pak, následkem závislosti na aktuálních povětrnostních podmínkách, dochází ke vzniku rychlých změn energetických

toků s nepředvídatelnými směry a velikostmi. V soustavě se tak zvyšují nároky na zajištění její přenosové schopnosti a velikost regulačního výkonu.

5.2.1 Spolehlivost dodávky elektřiny

Připojování velkého počtu větrných elektráren a větrných farem působí, vzhledem k vysoké míře nestability jejich výkonu, nepříznivě na spolehlivost dodávky elektřiny, jež normálně závisí hlavně na maximální přenosové schopnosti elektrizační soustavy dané pro stav, kdy je v provozu všech N jejích prvků. Přenos maximálního výkonu musí být přitom zabezpečen i v případě výpadku některého z prvků soustavy a musí být tedy naplněno bezpečnostní kritérium $N-1$, kterým se řídí příprava ES. Největší nebezpečí překročení přenosové schopnosti ES náhlými nepředvídatelnými vysokými energetickými toky je potom právě za stavu, kdy je jeden prvek již odpojen.

Vzhledem k nespolehlivosti VTE jakožto zdrojů elektrické energie a nezbytnosti zálohování jejich výkonu jinými zdroji, schopnými reagovat na náhlé změny výroby, však významnou roli pro zajištění celkové spolehlivosti dodávky hraje také spolehlivost těchto elektráren. Při náhlém odpojení velkého počtu VTE, je třeba rychle nahradit jejich výkon, což výrazně zvyšuje riziko nepokrytí spotřeby, zejména pokud dojde k výpadku některého ze zdrojů určených k tomuto účelu.

5.2.2 Stabilita a řízení soustavy

Definici stability provozu soustavy poskytuje kodex přenosové soustavy [21] jako její schopnost udržet rovnovážný stav, a to jak za normálního chodu tak i po přechodových dějích způsobených vnějšími vlivy, dispečerským řízením a také poruchovými výpadky zařízení. To, mimo jiné, znamená, že pokud v soustavě dojde např. ke změně dodávaného výkonu, musí se vrátit do rovnovážného stavu s veličinami v dovolených mezích, přičemž soustava jako celek zůstane nedotčena.

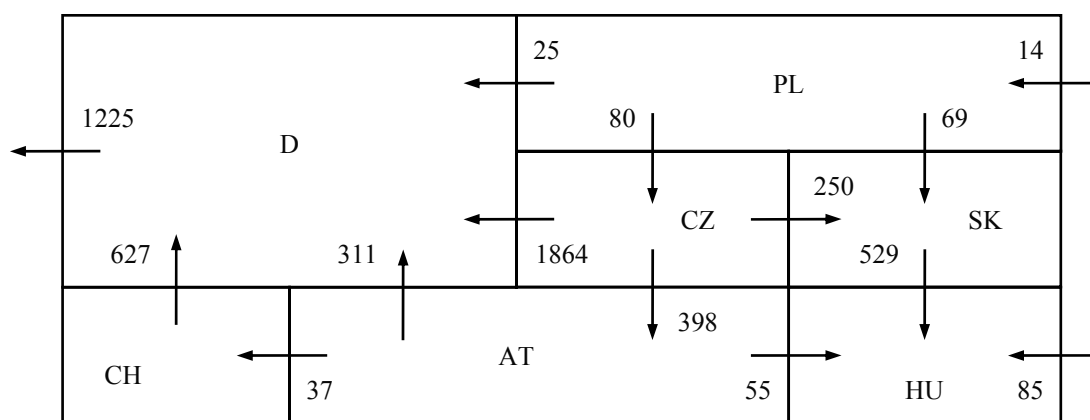
Tato schopnost závisí na zabezpečení dostatečného množství regulačního výkonu, což v soustavách s vysokým podílem VTE prakticky znamená nezbytnost zajištění většího rozsahu systémových služeb, resp. služeb podpůrných, které slouží k jejich realizaci. Ve srovnání klasickými, dobře regulovatelnými, zdroji se tak vlivem připojování VTE zvyšují nároky na velikost nutných rezerv výkonu pro primární regulaci, která v časech několika sekund působí autonomně na velké výrobní bloky a kompenzuje vlivy výpadků nebo náhlé změny výkonu zdrojů, dále na sekundární regulaci, která v časech do třiceti minut snižuje, pomocí centrálního regulátoru frekvence a předávaných výkonů za využití převážně točivé

rezervy, deficit výkonu v řízené oblasti, a konečně i objem dispečerských záloh, hlavně na rychle startující rezervy, například ve vodních elektrárnách.

Dispečerské řízení však musí, kromě nedostatku výkonu, řešit rovněž problém jeho přebytku nad velikostí zatížení, který je, do jisté míry, prohlubován zdroji zvyšujícími svůj výkon v době nízkého zatížení, mezi něž VTE také patří. To zvyšuje nároky na provoz klasických bloků z hlediska potřeby jejich častějšího odstavování, což způsobuje větší míru opotřebení a snížení životnosti těchto zařízení. Důležitá je proto i existence dostatečného počtu spolehlivých bloků schopných poskytovat takovéto služby.

5.2.3 Energetické toky v propojených ES

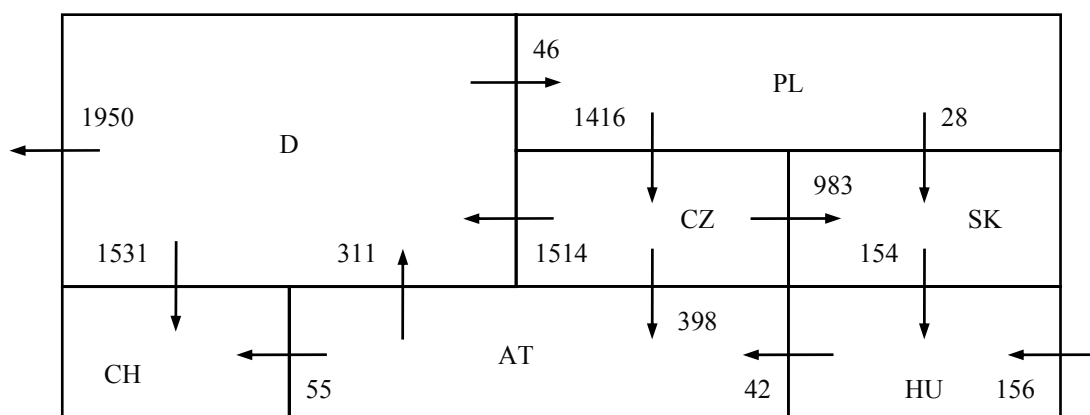
Celá problematika nepříznivých vlivů způsobených provozem větrných elektráren a farem velkých výkonů se stává ještě komplikovanější s ohledem na propojení soustav, kdy jsou, například v rámci UCTE, navzájem propojeny elektrizační soustavy sousedních států. Přes propojovací vedení tudíž může, jak je vidět na Obr. 5.3, který ukazuje výkonové přes-hraniční toky, probíhat dodávka elektřiny od zahraničních výrobců nebo její tranzit pro spotřebitele v jiných soustavách.



Obr. 5.3: Výkonové přes-hraniční toky v MW při slabé výrobě VTE

Velikost energetických toků, které přes PS protékají je dána souhrnem několika částí. První z nich je sjednaná výměna mezi soustavami, tj. obchod, kdy jsou přesně určeny velikost a čas dodávky ze zahraničních elektroenergetických zdrojů. Druhou tvoří kruhové toky, které vznikají vlivem primární regulace jednotlivých propojených soustav, kdy se energie přelévá v důsledku vyrovnávání bilance mezi výrobou a spotřebou v jedné z těchto soustav. Třetí částí jsou potom paralelní toky, k nimž dochází vlivem propojení a které přes danou soustavu probíhají následkem sjednaných výměn mezi jinými soustavami, protože

se rozlévají na všechny přes-hraniční profily, a to úměrně jejich elektrickým parametrům, a neodpovídají tak původně plánovanému směru ani velikosti obchodu.



Obr. 5.4: Výkonové přes-hraniční toky v MW při silné výrobě VTE

To znamená, že provozem VTE nejsou ovlivněny jen soustavy, do nichž jsou tyto zdroje připojeny, ale také soustavy okolní. Tuto situaci znázorňuje Obr. 5.4, v němž jsou, na rozdíl od předchozí kresby, uvedeny hodnoty a směry přes-hraničních toků v období se silnou výrobou VTE. Při porovnání obou obrázků je zřejmé, že tyto toky se mohou právě v závislosti na dodávce elektřiny z VTE velmi lišit a způsobovat tak okolním soustavám nemalé problémy, včetně jejich zatěžování tranzitními výkony.

5.2.4 Velikost přenosových ztrát

Díky nerovnoměrnosti umístění větrných elektráren, jejichž existence má smysl jen v oblastech s určitými přírodními podmínkami, a nedostatku zdrojů v jiných oblastech, kde je vysoká spotřeba elektřiny, vzniká nutnost přenosu velkého množství energie na velké vzdálenosti. Tato přeprava tedy zvyšuje zatížení přenosových cest mezi těmito oblastmi, což způsobuje, kromě zvýšení rizika možného přetížení, nárůst přenosových ztrát, jejichž hodnota závisí velikosti proudu protékajícího vedením, která se s rostoucím výkonem při stejné napěťové hladině zvyšuje.

6 Zajištění bezpečného provozu ES

Vzhledem k neustálému rychlému rozvoji v oblasti výstavby větrných elektráren dochází stále častěji k problémům v oblasti řízení a regulace sítí, do nichž jsou tyto zdroje připojeny. Pro zajištění bezpečného provozu elektrizačních soustav je tedy nutné přijmout určitá opatření, která jsou účinnými prostředky zejména při předcházení a řešení situací plynoucích z nestability a nepředvídatelnosti jejich výroby.

Mezi základní opatření náleží zejména automatická regulace VTE z hlediska napětí a jalového výkonu, která souvisí také s možností jejich případného pozdějšího zapojení do systému poskytování podpůrných služeb. Velmi důležitá je potom rovněž oblast posilování elektrizačních soustav, hlavně pak přenosových tras mezi místy výroby a spotřeby, která jsou v systému propojených evropských sítí velmi vzdálená, což mnohdy vede k nutnosti mezistátní spolupráce při koordinaci jejich výstavby. Jinou možností, jak zmírnit dopady nestálé dodávky elektřiny z VTE, je také instalace kompenzačních zařízení na rozvodnách, kam je vyveden výkon těchto zdrojů, zejména větších výkonů.

6.1 Koncepce aktivních sítí

Pro zajištění stability elektrizačních soustav lze dále využít koncepce a technologie aktivních sítí, které mají oproti tradičnímu pojetí současných sítí, převážně pasivních, řadu výhod. Mezi ně pak patří zejména možnost řízení velkého počtu menších zdrojů jako jeden celek nebo také větší možnosti zapojení OZE do otevřeného trhu s elektřinou. Z nich jsou významné hlavně mikrosítě, virtuální elektrárny a inteligentní síť.

6.1.1 Mikrosítě

První ze způsobů integrace distribuovaných zdrojů do distribučních sítí představuje pojetí, které se nazývá mikrosítě. Tento pojem v podstatě označuje spojení velmi malých zdrojů a spotřebičů, které pracují jako jednoduchý ucelený systém dodávající elektrickou a tepelnou energii. Jejich nejlogičtější začleněním jsou tak distribuční soustavy, zejména na úrovni nízkého napětí, které jsou nejbližší ke spotřebiteli a mohou tedy dobře působit na kvalitu elektřiny a spolehlivost její dodávky, s určitým stupněm nezávislosti na provozu nadřazených makrosítí. Největší nároky proto kladou v oblasti výkonové elektroniky, která slouží pro připojení a řízení jednotlivých prvků takovéto sítě.

Mikrosítě jsou tak vlastně systémy, do nichž jsou, společně s místní se spotřebou elektřiny, připojeny i lokální obnovitelné zdroje a které úmyslně vytváří ostrovy zajišťující

možnost svého odpojování a připojování v rámci distribuční sítě. Celá mikrosíť tedy musí být řízena jako jeden souhrnný systém schopný pružně reagovat na okamžité požadavky na straně spotřeby v závislosti na momentálních možnostech dodávky a případně také zaručit její pokrytí z místních zdrojů, například využitím akumulčních zařízení. Takové začlenění různých druhů a technologií OZE je proto rovněž jednou z cest vedoucích k efektivním systémům pro poskytování čisté, spolehlivé, bezpečné energie.

6.1.2 Virtuální elektrárny

Druhým konceptem, který umožňuje plnou integraci rozptýlené výroby do systému distribuce a do otevřeného trhu s elektřinou prostřednictvím koordinace zdrojů, je virtuální elektrárna. Jedná se v podstatě o sdružení malých zdrojů a říditelné zátěže, které tvoří jeden velký energetický celek, jenž je schopen jednak konkurovat klasickým elektrárnám na elektroenergetickém trhu a zároveň také poskytovat služby potřebné pro řízení soustavy, jako jsou rezerva činného výkonu pro řízení frekvence či rezerva jalové energie pro lokální regulaci napětí. Virtuální elektrárna je tedy reprezentací portfolia DZ zajišťující cenovou efektivitu, spolehlivost, flexibilitu a říditelnost svého výkonu.

Tato koncepce by přitom měla plnit dvě hlavní činnosti, které vymezují příslušné funkce a odpovědnosti. První z nich je komerční virtuální elektrárna, jejíž úlohou je hlavně ekonomická optimalizace portfolia pro otevřený trh s elektřinou. Druhá je pak technická virtuální elektrárna, která zajišťuje optimální a bezpečný provoz soustavy, přičemž jsou respektována technická omezení a potenciální služby. Podle kontraktů uzavřených na trhu je tak nejprve zabezpečeno efektivní ekonomické využití kapacity zdrojů, které mají navíc možnost volby své účasti na dané dodávce, a potom jsou optimalizovány výkonové toky v soustavě, a to za současného respektování pořadí tržní výhodnosti jednotek, plánovaných prací, možných výpadků, činných a jalových výkonů z dosažitelných zdrojů a předpovědi zátěže. Výsledkem je nakonec i přehled o všech dostupných parametrech významných pro dosahování rovnováhy soustavy a optimalizaci provozních nákladů.

6.1.3 Inteligentní síť

Značné úsilí se v současné době soustřeďuje na oblast výzkumu tak zvaných smart grids, neboli inteligentních sítí, jež se snaží řešit situaci elektroenergetických soustav jako celek. Jejich základ by měly tvořit moderní interaktivní komunikační systémy umožňující integraci rozptýlených zdrojů a řízení na straně výroby i spotřeby v reálném čase za účelem dosažení maximální účinnosti využití a kvality dostupné elektrické energie při současné

optimalizaci její ceny. Tato koncepce v sobě zahrnuje digitální měřicí a řídicí systémy a senzory, které by měly sledovat aktuální stav sítě, její zatížení a kvalitu dodávky. Veškeré jejich ovládání by se potom provádělo na telekomunikační úrovni a tyto inteligentní sítě by tak využívali technologie zejména z oblasti bezdrátového přenosu dat.

Velmi významnou funkcí těchto inteligentních sítí by měla být také plná integrace konečných zákazníků, jež by umožňovala každému sledovat a efektivně řídit svou spotřebu prostřednictvím vybavení inteligentními elektroměry. K tomu by měla přispět též struktura motivace těchto zákazníků k přesunu jejich spotřeby z doby, kdy je energie nedostatek, do doby, kdy se ES musí vyrovnat s jejím přebytkem. Nejdůležitější vlastností inteligentních sítí by potom bezesporu měla být předpokládaná vysoká odolnost proti přerušení dodávky v důsledku velkých poruch nebo útoků na jejich infrastrukturu a jejich samo-obnovovací schopnost, které by měly zabránit vzniku výpadků do tmy. Toho by se v případě nutnosti dosahovalo také zavedením systému krizového řízení, jenž by umožňovalo uvést v činnost regulační opatření pro snížení spotřeby elektřiny při jejím nedostatku a zajistit tím dodávku nutnou pro zabezpečení základních potřeb člověka. Další nutností je dále rozpad soustavy na krizové ostrovní systémy, které by významně snížily nebezpečí sociálně-ekonomického dopadu nedostatku energie na společnost. Z toho je vidět, že se v případě inteligentních sítí jedná o dosud nejpropracovanější pohled na situaci v elektroenergetice zahrnující všechny aspekty, jež by mohly mít nějaký vliv na energetickou bezpečnost.

6.2 Technologie akumulace elektřiny

Pro zlepšení provozu energetických systémů je dále možné uvažovat o akumulaci přebytečné energie, která je rovněž zpravidla součástí koncepcí aktivních sítí, přičemž lze využít různé technologie. Kromě přečerpávání vody a běžných baterií a kondenzátorů, jsou to obzvláště setrvačníky, supravodivé cívky, super-kondenzátory, stlačený vzduch, redoxní baterie, baterie na bázi tekutého kovu, nebo vodík.

6.2.1 Setrvačníky

Jedním z nejjednodušších způsobů skladování energie jsou setrvačníky, jež pracují na principu mechanické setrvačnosti rotujícího tělesa. Systém je v zásadě tvořen těžkým diskem a elektrickým strojem, který v motorickém režimu tento disk roztáčí a ukládá tedy spotřebovanou elektřinu ve formě jeho kinetické energie. V režimu generátoru potom tento disk zpomaluje a uloženou mechanickou energii opět mění na energii elektrickou.

Moderní setrvačnickové systémy akumulace energie jsou konstruovány s ohledem na minimalizaci ztrát vlivem tření a jsou proto opatřeny magnetickými ložisky a rotační část je umístěna ve vzduchoprázdňé komoře. Samotný setrvačnick je pak, hlavně z důvodu větší odolnosti proti poškození působením velkých odstředivých sil, vyroben z kompozitu na bázi uhlíkových vláken, charakteristických svou pevností.

Tato zařízení dosahují velkých hodnot doby životnosti, jež může být desítky tisíc cyklů, koncentrace energie, která se pohybuje kolem $130 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$ a účinnosti, jež dosahuje až 90 %. Zajímavým ukazatelem je také doba, za kterou setrvačnick samovolně zabrzdí bez připojení ke generátoru, jejíž velikost je uváděna v řádu let. Setrvačnick mohou poskytovat buď dlouhý vybíjecí čas, několik desítek minut, při dodávaném výkonu stovek kW, nebo relativně velký výkon, až do 10 MW, po kratší dobu desítek sekund. Mezi vlastnosti těchto systémů dále patří nezávislost na změnách teploty, šetrnost k životnímu prostředí a lehce měřitelná velikost aktuálního množství skladované energie.

6.2.2 Supravodivé cívky

Dalším principem skladování elektrické energie je využití magnetického pole, které vzniká v supravodivé cívce podchlazené pod svoji kritickou teplotu. Takovýto akumulační systém se zpravidla skládá ze supravodivé cívky, zařízení na úpravu energie, které slouží k usměrnění elektrického proudu při nabíjení a jeho rozstředění při vybíjení, a kryogenního chladiče udržujícího teplotu cívky pod hodnotou $269 \text{ }^\circ\text{C}$.

Po nabití cívky dochází jen k zanedbatelným poklesům protékajícího proudu, díky minimálnímu elektrickému odporu a magnetická energie tak může být skladována neurčitě dlouhou dobu. Ztráty energie v tomto systému jsou potom spojeny prakticky pouze s prvky výkonové elektroniky. Obousměrná účinnost, se započtením napájení kryogenní stanice, je vyšší než 95 % a doba životnosti několik set tisíc cyklů. Poměrně nízká je potom velikost koncentrace energie, která se pohybuje jen do $10 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$. Největší výhoda supravodivých spočívá ve schopnosti rychlého nabíjení a vybíjení, kdy během několika sekund může dojít ke spotřebě či k uvolnění výkonů o velikosti až stovek MW. Hlavní využití těchto systémů je tak v oblasti regulace soustavy nebo pulsních zdrojů.

6.2.3 Super-kondenzátory

Uchovávání energie v její elektrické podobě je možné pomocí elektrochemických kondenzátorů, z nichž nejvýznamnější jsou kondenzátory dvouvrstvé, jež dosahují lepších parametrů než klasické kondenzátory. Super-kondenzátory jsou totiž založeny na struktuře

obsahující dvě elektricky vodivé vrstvy z karbonových nanotrubiček vzájemně oddělené separátorem, které se vyznačují velkou plochou svého povrchu, přibližně 2 km^2 na jeden gram uhlíku. Proto také může být tato struktura, při vysoké kapacitě, velmi tenká.

Dvojitá karbonová vrstva je však schopna snést jen malé napětí, asi 2 V, a pro jeho zvýšení je nutné zapojit více těchto článků do série, přičemž kapacita jednoho článku může být až několik tisíc faradů. Koncentrace energie těchto baterií je mezi 10 a $30 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$, což je mnohem méně než u baterií běžných typů. Jejich výhodou je tedy spíše jejich rychlost, která určuje čas potřebný pro nabíjení na několik sekund. Pro vybíjení lze potom počítat s výkonem, od stovek kW do jednotek MW, který je dostupný po dobu od jednotek po dobu desítek sekund. Účinnost super-kondenzátorových baterií je pak někde kolem 98 % a jejich životnost může být až 100 tisíc cyklů. V současné době je tak těžištěm jejich využití hlavně rekuperace elektrické energie v dopravě.

6.2.4 Stlačený vzduch

Poměrně složitý je způsob skladování energie ve formě stlačeného vzduchu, který se svou podstatou podobá přečerpávacím vodním elektrárnám. Celý tento systém se skládá z elektrického kompresoru, který vytváří zásobu stlačeného vzduchu s tlakem o velikosti 20 MPa, tepelného výměníku, jenž slouží k rekuperaci tepla, a plynové turbíny využívající stlačený vzduch pro pohon elektrického generátoru.

Jako zásobárna stlačeného vzduchu mohou sloužit tlakové lahve, ale také podzemní dutiny, což ovlivňuje možnou koncentraci energie, jejíž velikost může dosahovat hodnot až kolem $100 \text{ Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$. Účinnost tohoto systému je potom odvozena od účinnosti jednotlivých zařízení a její hodnota je u systémů, které skladují a znovu využívají teplo odvedené při kompresi pro ohřev expandujícího vzduchu, kolem 70 %. Od vlastností všech zařízení se odvíjí dále životnost, která je kolem 10 tisíc cyklů. Největší výhodou ukládání energie do stlačeného vzduchu je potom schopnost akumulace velkého množství energie a schopnost dodávat v případě potřeby výkon o velikosti desítek až stovek MW po dobu až desítek hodin, což předurčuje tuto technologii pro využití v oblasti regulace soustavy.

6.2.5 Redoxní baterie

Jedním z chemických principů energetické akumulace je princip redoxní průtokové baterie, jejíž hlavní část tvoří redukčně-oxidační článek rozdělený na dvě části membránou propouštějící protony. Každá z těchto částí je spojena se zásobníkem elektrolytu, z nichž každý má jiné složení. Oba elektrolyty jsou na stejné bázi, zpravidla vanadu, ale obsahují

různé množství vanadových iontů s různým uspořádáním valenčních elektronů. V průběhu nabíjení tak dochází k redukci elektrolytu cirkulujícího zápornou částí a oxidaci elektrolytu protékajícího kladnou částí. Při vybíjení je tomu potom naopak.

Napětí na jednom takovém článku je kolem 1,5 V, jeho energetická účinnost může být až 85 % a životnost nižší než 5 tisíc cyklů. Velmi velký je u těchto systémů rozsah, při vybíjení dostupného výkonu, který se pohybuje mezi 10 kW a 10 MW, přičemž velikost vybíjecího času je v řádu desítek minut až jednotek hodin. Energetická hustota redoxních baterií dosahuje hodnot jen do 30 Wh·kg⁻¹ a je tedy v porovnání s ostatními chemickými články malá. Přesto se však, díky schopnosti akumulace a uvolňování velkého množství energie v dlouhých časových intervalech, dá předpokládat využitelnost těchto baterií pro spolupráci s obnovitelnými zdroji energie.

6.2.6 NAS baterie

Zajímavou technologii představuje, z hlediska akumulace elektřiny, baterie na bázi tekutého kovu. Tento článek se skládá z vnějšího ocelového obalu, chráněného proti korozi vrstvou chrómu nebo molybdenu, který slouží jako kladná elektroda, a pevné membrány propouštějící sodíkové kationy. Mezi vnější elektrodou a elektrolytem je potom tekutá síra, která je takto oddělena od tekutého sodíku sloužícího jako záporná elektroda. Při nabíjení tedy procházejí, díky přivedenému napětí, kationy sodíku přes membránu a vytvářejí sodné polysulfidy, jež se při vybíjení opět rozpadají a kationy tak přecházejí přes elektrolyt zpět za současného vzniku napětí na elektrodách.

Účinnost tohoto článku je velmi vysoká, asi 89 %, poskytované napětí má velikost 2 V a jeho životnost se pohybuje kolem 2,5 tisíce cyklů. Velká je také hodnota koncentrace energie, která přesahuje 100 Wh·kg⁻¹, z čehož také vyplývá schopnost akumulace poměrně velkého množství energie. Akumulační zařízení typu NAS baterie tak může při vybíjení dodávat výkon o velikosti jednotek až stovek MW po dobu i několika hodin a jejich využití je tedy možné v oblasti regulace soustavy a spolupráce s OZE.

6.2.7 Vodík

Podobně jako stlačený vzduch, může být jako médium pro ukládání energie využit také vodík, který v tomto případě není jejím zdrojem, ale přenašečem. Takový akumulační systém se skládá z elektrolyzátoru, kde se vodík díky účinku stejnosměrného proudu získává z vody, a palivového článku, kde se vodík zpětně získává stejnosměrným proudem. Jedná se tak zřejmě o technologicky nejnáročnější zařízení pro skladování energie.

Elektrolyzér obsahuje sérii článků, které jsou vždy vybaveny kladnou a zápornou elektrodou a ponořeny do vody, jejíž vodivost je zvýšena přidáním hydroxidů. Anoda je obvykle vyrobená z niklu a mědi pokrytá vrstvou oxidů, jako je mangan, wolfram, nebo ruthenium. Katoda je nejčastěji z niklu a je potažena tenkou vrstvou platiny působící jako katalyzátor. Současné elektrolyzéry mají účinnost mezi 65 a 80 %. Palivový článek pracuje v podstatě na obráceném principu než elektrolyzér, přičemž energetická účinnost přeměny chemické energie paliva na energii elektrickou dosahuje 35 až 50 %. Skladování vodíku může být uskutečněno v plynné formě při vysokých tlacích, jako kapalina v kryogenních zásobnících, případně jako plyn chemicky vázaný ve sloučeninách kovů. Největší výhodou vodíku je jeho energetická hustota, která je jednou z nejvyšších ze všech druhů paliv a jejíž velikost je více než $30 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$. Tímto způsobem se tak dá akumulovat velké množství energie, která je v případě potřeby rychle k dispozici, což ukazuje na možnosti jeho využití v oblasti vyrovnávání kolísání dodávky z obnovitelných zdrojů.

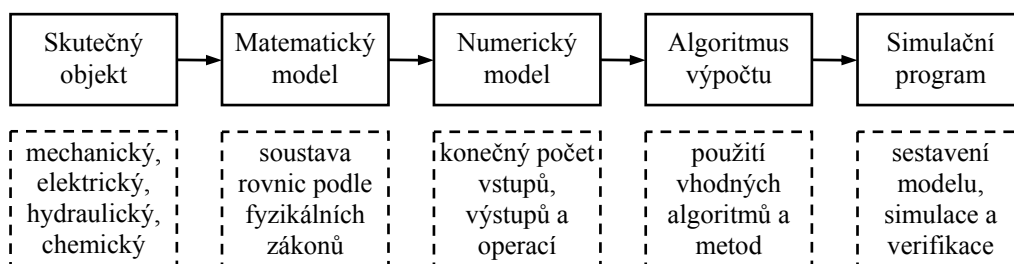
7 Modelování větrných elektráren

Aby bylo možné studovat jevy, které souvisejí s větrnými elektrárnami a dopadem jejich provozu na provoz distribučních a přenosových soustav, je nutné provádět, podobně jako v jiných oborech, nejrůznější počítačové simulace. K tomu je nejprve třeba vytvořit modely všech jednotlivých částí simulovaného systému, který se v případě zkoumání vlivů větrných elektráren na elektrizační soustavu skládá z větru, větrné turbíny, aerodynamické regulace, hnacího ústrojí, generátoru, prvků výkonové elektroniky, transformátoru, části elektrické sítě s přípojným bodem a měřicích členů.

7.1 Matematické modelování

Matematické modelování obecně představuje univerzální nástroj pro analýzu nebo syntézu systémů, čehož se prakticky využívá ve všech oblastech zkoumání. V technických oborech, respektive přímo v elektroenergetice, potom může sloužit například k nahrazení destruktivních zkoušek, vysvětlení experimentálně zjištěných jevů, dále k výpočtu, návrhu a optimalizaci nějakého zařízení, rovněž k simulaci řízení a regulace nejrůznějších systémů nebo ke zjišťování a objasnění příčin poruch.

Základem každé simulace je pak dobrá znalost uvažovaného systému, protože každý model vzniká abstrakcí své reálné předlohy, přičemž nutně dochází k jejímu zjednodušení a některých zanedbání fyzikálních jevů, které ve skutečnosti neovlivňují její vlastnosti ani chování. Skutečný systém je tak nahrazen matematickým popisem jevů a jejich interakcí na základě známých fyzikálních zákonů. Tato interpretace potom umožňuje řešení dvěma způsoby, a sice analyticky nebo s pomocí numerických metod.



Obr. 7.1: Obecný postup při matematickém modelování

Využití analytického řešení vyžaduje větší rozsah zjednodušení rovnic popisujících systém a v určitých případech, jako jsou například některé nelineární rovnice, není vůbec možné. Naproti tomu však tento způsob umožňuje zobecněnou interpretaci výsledků, které mohou sloužit k ověření správnosti numerického řešení, které naopak umožňuje mnohem

méně zjednodušeného matematického modelu. Výsledky numerického způsobu řešení jsou totiž vždy pouze konkrétním řešením pro určité hodnoty parametrů, počátečních podmínek a vstupních veličin a jejich přesnost je tedy, do značné míry, závislá též na přesnosti těchto hodnot. Zobecněná interpretace těchto výsledků může být proto nespolehlivá.

K provedení příslušných výpočtů je potom třeba zvolit vhodné algoritmy a metody aproximace nebo integrace, které jsou následně využity simulačním programem, vhodným s ohledem na požadavky dané úlohy. Jedním z nástrojů, které jsou úspěšně využívány pro tvorbu modelů nejrůznějších systémů ve všech oborech, je program Simulink, jenž tvoří nedílnou součást matematického programu Matlab a jenž umožňuje užití bloků základních k vytváření složitějších systémů.

7.2 Model rychlosti větru

Jednou ze základních částí modelů všech systémů větrných elektráren, v případě nedostupnosti naměřeného průběhu rychlosti větru, je model tohoto vzdušného proudění, které se vyznačuje stochastickým charakterem a které je možné napodobit součtem čtyř komponent, jimiž jsou počáteční průměrná hodnota rychlosti větru w_s , dále potom rampová složka $w_r(t)$ představující její rovnoměrný nárůst nebo pokles v závislosti na čase, nárazová komponenta $w_g(t)$ charakterizující výskyt většího výkyvu její hodnoty, čímž respektuje výskyt náhlého poryvu, a turbulentní složka $w_i(t)$ zastupující víření vzduchu a propůjčující celému popisovanému průběhu proměnlivý charakter, což je pro účely celého modelu zcela zásadní. Průběh této veličiny tak lze popsat následující rovnicí:

$$w(t) = w_s + w_r(t) + w_g(t) + w_i(t) \quad (7.1)$$

Rampová složka, která určuje rovnoměrný nárůst nebo pokles průměrné rychlosti větru je následně definována třemi parametry, a sice svou amplitudou A_r určující velikost změny a svým počátečním časem T_{sr} a konečným časem T_{er} udávajícími rychlost této změny. Její časová závislost se dá matematicky popsat takto:

$$\begin{aligned} t < T_{sr} &\Rightarrow w_r(t) = 0 \\ T_{sr} \leq t \leq T_{er} &\Rightarrow w_r(t) = A_r \cdot \frac{t - T_{sr}}{T_{er} - T_{sr}} \\ t > T_{er} &\Rightarrow w_r(t) = A_r \end{aligned} \quad (7.2)$$

Podobným způsobem lze samozřejmě vyjádřit i časovou závislost nárazové složky poryvu, která je také určena třemi veličinami, a sice svou amplitudou A_g , jež stanovuje velikost výkyvu průměrné hodnoty, a počátečním časem T_{sg} a konečným časem T_{eg} , které udávají

celkovou dobu jeho trvání. Průběh této komponenty je potom určen s využitím průběhu trigonometrické funkce kosinus, respektive jejího odečtu od hodnoty jedna, a je možné jej tedy popsat následujícím způsobem:

$$\begin{aligned}
 t < T_{sg} &\Rightarrow w_g(t) = 0 \\
 T_{sg} \leq t \leq T_{eg} &\Rightarrow w_g(t) = A_g \cdot \left[1 - \cos\left(2\pi \cdot \frac{t - T_{sg}}{T_{eg} - T_{sg}}\right) \right] \\
 t > T_{eg} &\Rightarrow w_g(t) = 0
 \end{aligned}
 \tag{7.3}$$

Nejsložitější součástí časové závislosti rychlosti větru je turbulentní komponenta, která se vyznačuje zejména hodnotami výkonové spektrální hustoty P_{SD} , jejíž velikost je závislá na průměrné hodnotě rychlosti větru w_a , výšce nad zemským povrchem h , na drsnosti povrchu z_0 zohledňující vliv terénu, na frekvenci f , integrační délce turbulence l , jejíž hodnota má velikost $20h$ při výšce menší než 30 m nad zemí a je rovna 600 m při výšce větší. Vztah pro určení výkonové spektrální hustoty, viz [02], má tvar:

$$P_{SD}(f) = l \cdot \left[\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)^2 \right]^{-1} \cdot \left[1 + 1,5 \cdot \frac{f \cdot l}{w_a} \right]^{-\frac{5}{3}}
 \tag{7.4}$$

Kromě jiných veličin je tedy její velikost závislá také na drsnosti zemského povrchu, který zahrnuje do výpočtu vliv dané lokality. Pro názornou představu jsou v Tab. 7.1 uvedeny jeho typické hodnoty pro různé druhy krajiny.

| druh krajiny | rozsah z_0 [m] |
|------------------------------------|------------------|
| otevřené moře nebo písek | 0,0001 - 0,001 |
| zasněžený povrch | 0,001 - 0,005 |
| krátká tráva nebo step | 0,001 - 0,01 |
| dlouhá tráva nebo skalnatý povrch | 0,04 - 0,1 |
| lesy, města nebo kopcovité oblasti | 1 - 5 |

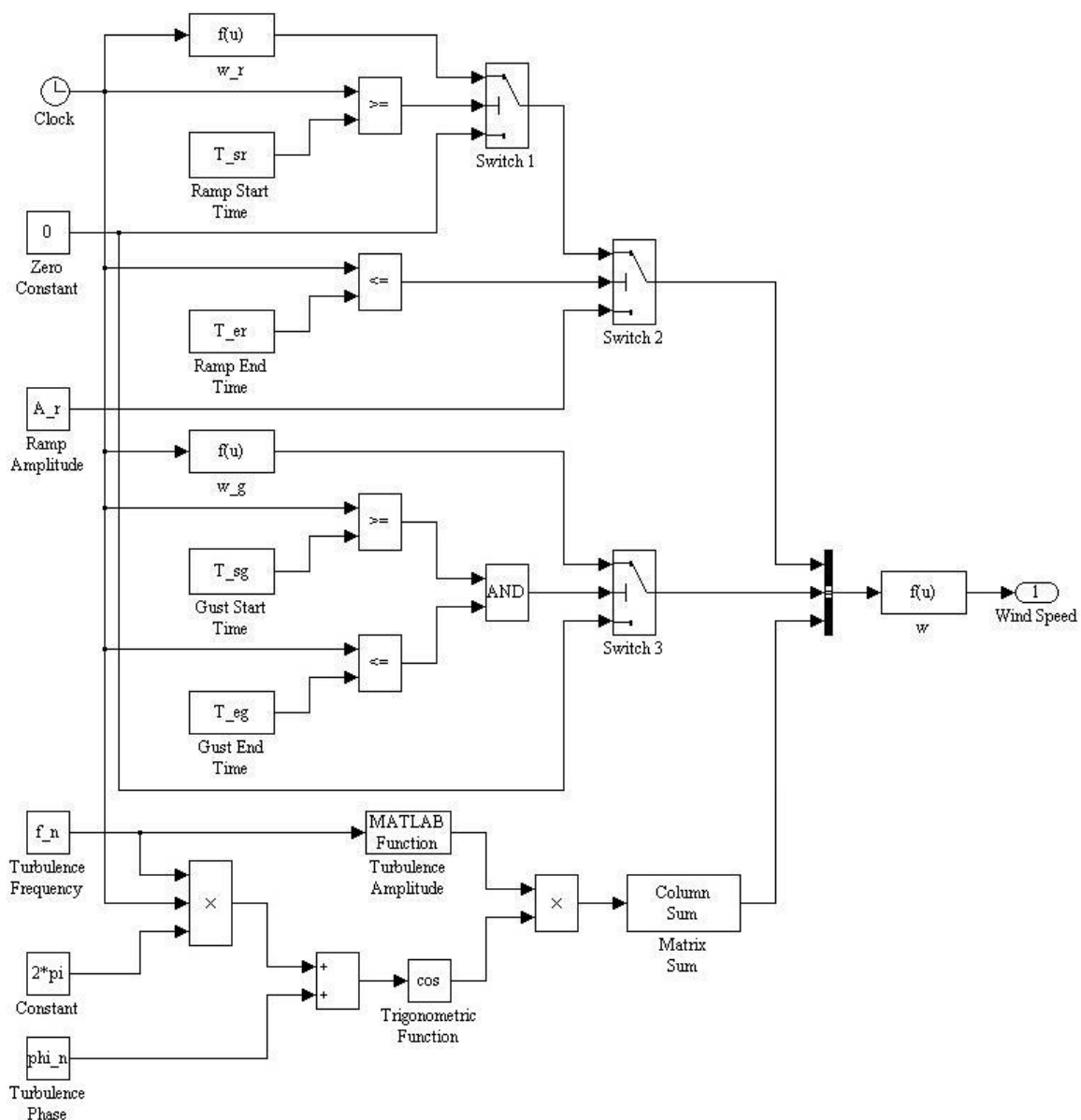
Tab. 7.1: Hodnoty drsnosti zemského povrchu v závislosti na druhu krajiny

K získání časové posloupnosti hodnot ze známých velikostí výkonové spektrální hustoty pro různé hodnoty frekvence lze potom využít inverzní diskrétní Fourierovu transformaci a získaný vzorec pro stanovení průběhu turbulentní složky lze tedy zapsat jako:

$$w_t = \sqrt{2} \cdot \sum_{n=1}^N [A_t \cdot \cos(2\pi \cdot f_n + \varphi_n)]
 \tag{7.5}$$

Jedná se prakticky o součet velkého počtu harmonických průběhů s amplitudou, která je pro jednotlivé hodnoty frekvence f_n dána velikostí výkonové spektrální hustoty, a s úhlem natočení φ_n , který má náhodnou hodnotu, viz [07].

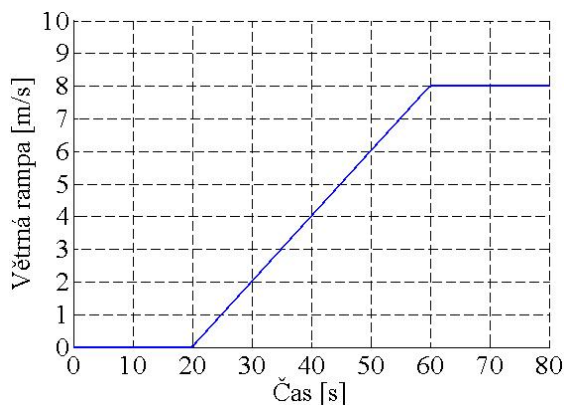
Podle výše uvedených vzorců lze potom sestavit model rychlosti větru v programu Simulink, jehož vnitřní struktura je představena na Obr. 7.2 a který umožňuje velice věrně napodobit skutečný průběh rychlosti větru včetně jejího velmi proměnlivého charakteru v závislosti na odpovídajících parametrech.



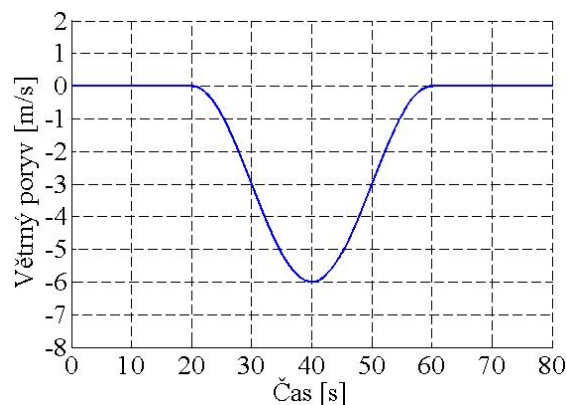
Obr. 7.2: Model rychlosti větru

Základními parametry tohoto modelu, které lze měnit přímo v masce bloku jsou pak v podstatě všechny hodnoty používané pro výpočet, tedy průměrná počáteční rychlost větru, amplitudy rampové a nárazové složky, jejich počáteční a koncové časy, výška nad zemským povrchem, velikost jeho drsnosti a délka turbulence. Uvnitř bloku jsou načítány dále hodnoty frekvence a náhodné fáze pro určení příslušných hodnot výkonové spektrální

hustoty. Jedinou nezadávanou veličinou je tak čas potřebný k aktuálnímu výpočtu velikostí jednotlivých složek a jedinou výstupní veličinou tvoří požadovaná rychlost větru. Příklad průběhu jednotlivých komponent v závislosti na čase ukazují Obr. 7.3, kde je znázorněna rampová složka, Obr. 7.4, na němž je vidět nárazová složka a nakonec také Obr. 7.5, který ukazuje komponentu turbulentní. Příklad výsledného průběhu rychlosti větru je pak vidět na Obr. 7.6, pro definované parametry uvedené níže.

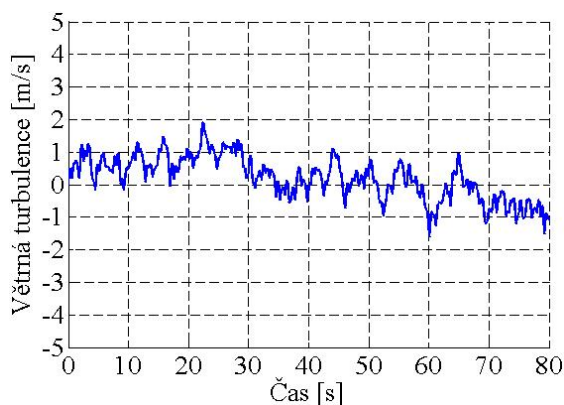


Obr. 7.3: Průběh rampové složky

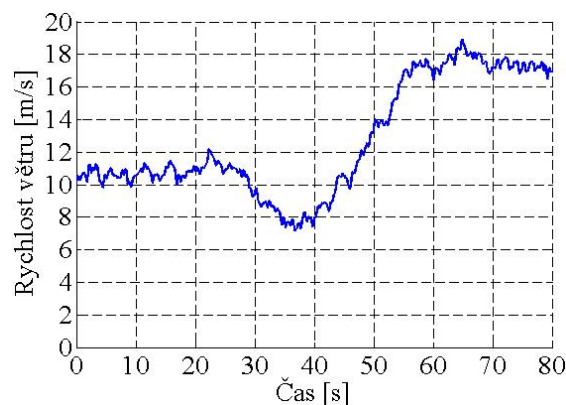


Obr. 7.4: Průběh nárazové složky

Na těchto obrázcích je vidět jak vznikne celkový průběh rychlosti větru v závislosti na čase. Prvních dvacet sekund je rychlost konstantní a odpovídá hodnotě zadané počáteční průměrné rychlosti, která je v tomto případě 10 m/s. Potom dochází, během následujících čtyřiceti sekund, zároveň k postupnému nárůstu této hodnoty s amplitudou 8 m/s a k jejímu výkyvu s amplitudou -3 m/s, odpovídající ve skutečnosti dvojnásobku.



Obr. 7.5: Průběh turbulentní složky



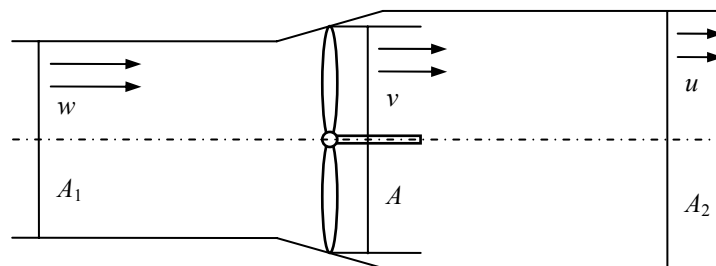
Obr. 7.6: Průběh rychlosti větru

Takto je vytvořen průběh průměrné hodnoty rychlosti větru, k němuž se nakonec přičte ještě průběh změn způsobených turbulence, v tomto případě pro výšku 90 m nad zemským povrchem o drsnosti 0,01 m a pro rozmezí frekvence 0.005 - 2 Hz, takže nejnižší frekvence tedy odpovídá řádově délce sledovaného období a nejvyšší pak minimální délce

kroku. Například, pro časové období pohybující se v jiných řádech, jako jsou jednotky až desítky hodin se výpočet provede s hodnotami frekvence odpovídající periodám od hodin až dnů do jednotek až desítek minut.

7.3 Model vztlakové turbíny

Větrná turbína v podstatě slouží k přeměně kinetické energie větru na mechanickou práci. Základní princip potom spočívá v tom, že turbína zpomaluje proud vzduchu, který protéká její pracovní plochou, jak je vidět na Obr. 7.7, a odebírá tak část jeho energie, jíž využívá pro vznik mechanického momentu působícího na hřídel.



Obr. 7.7: Proud vzduchu protékající větrnou turbínou

V prostoru, který je omezen proudovými plochami, nedochází k přenosu hmoty ani energie a platí tedy jednak rovnice kontinuity $w \cdot A_1 = v \cdot A = u \cdot A_2$ a jednak zákon zachování hybnosti. Vzorce pro výpočet energie a hybnosti mají následující tvar:

$$E_v = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot s \cdot v^2 \quad \text{a} \quad p_v = m \cdot v = \rho \cdot A \cdot s \cdot v, \quad (7.6)$$

kde v je rychlost proudění vzduchu, ρ je hustota vzduchu, A je plocha, kterou protéká a s je dráha, kterou urazí. Na základě vztahů pro energii a hybnost vzduchového toku před a za turbínou, je dále možné vyjádřit velikost axiálního výkonu působícího na rotor:

$$P_v = \frac{E_v}{t} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot (w^2 - u^2) \quad \text{a} \quad P_v = \frac{p_v}{t} \cdot v = \rho \cdot A \cdot v^2 (w - u) \quad (7.7)$$

Z porovnání těchto vztahů potom plyne, že velikost rychlosti vzduchu využitě turbínou lze spočítat jako $v = (w + u)/2$ a že výsledný vzorec vyjadřující velikost mechanického výkonu větrného rotoru je možné napsat v následujícím tvaru:

$$P_{tur} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (w^2 - u^2) \cdot (w + u) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot w^3 \cdot c_p, \quad (7.8)$$

kde R je poloměr rotoru, neboli délka listu turbíny, a c_p je součinitel využití výkonu, který vyjadřuje vzájemnou vazbu mezi výkonem proudu vzduchu a výkonem turbíny, tj. vlastně účinnost větrné turbíny, v závislosti na rychlosti větru. Pro turbíny pracující na vztlakovém

principu je maximální velikost tohoto součinitele, respektive ideální účinnost větrného stroje, rovna přibližně hodnotě 0,593. Z velikosti výkonu vykonaného rotačním pohybem lze nakonec stanovit velikost kroutícího momentu podle vztahu:

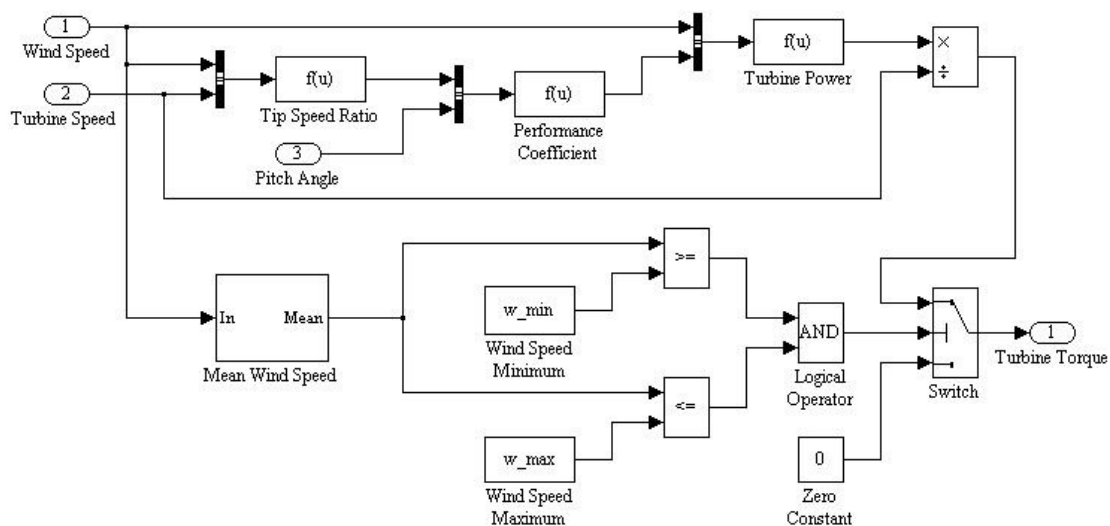
$$M_{tur} = \frac{P_{tur}}{\omega_{tur}} = \frac{1}{4f_{tur}} \cdot \rho \cdot R^2 \cdot w^3 \cdot c_p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot w^2 \cdot c_M, \quad (7.9)$$

kde ω_{tur} je úhlová rychlost a f_{tur} je frekvence otáčivého pohybu turbíny a c_M je součinitel kroutícího momentu. Z uvedených rovnic je vidět, že okamžité hodnoty výkonu, potažmo momentu, jsou velmi závislé na rychlosti větru. Jejich průběhy pro různé úhly natočení listů pak mohou být také vyjádřeny pomocí rychloběžnosti [03], jež udává poměr mezi obvodovou rychlostí turbíny a rychlostí větru, rovnicemi:

$$c_p = 0,5176 \cdot \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4 \cdot \beta - 5 \right)^{\frac{21}{\lambda_i}} + 0,0068 \cdot \lambda \quad (7.10)$$

$$\lambda_i = \left(\frac{1}{\lambda + 0,08 \cdot \beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \right)^{-1}$$

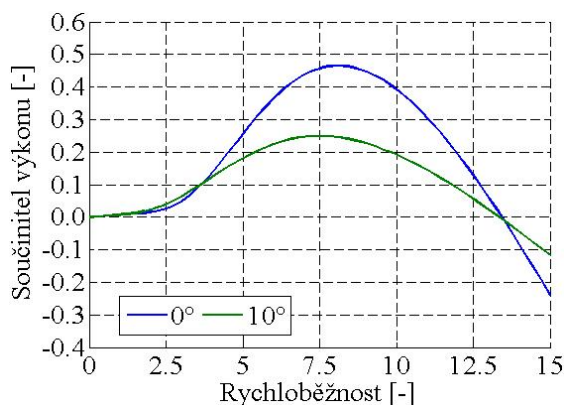
Na základě těchto rovnic se dá potom sestavit model vztlakové větrné turbíny v programu Simulink, který je znázorněn na Obr. 7.8 a který umožňuje sledovat změny ve velikosti kroutícího momentu v závislosti na rychlosti větru, úhlové rychlosti rotoru a na hodnotě úhlu natočení listů turbíny aerodynamickou regulací.



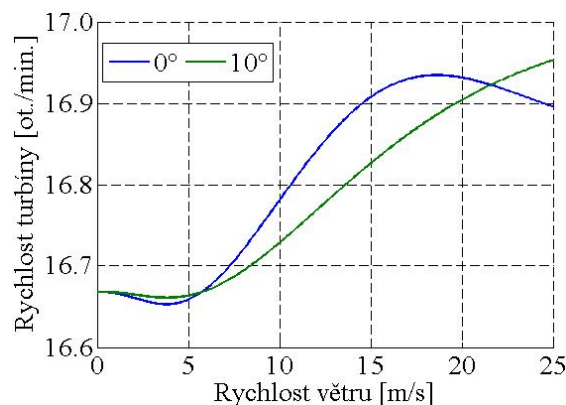
Obr. 7.8: Model větrné turbíny

Základními parametry tohoto modelu, jejichž hodnoty lze libovolně měnit v masce vytvořeného bloku, jsou poloměr rotoru vrtule, hustota vzduchu a provozní meze rychlosti větru. Uvnitř tohoto bloku jsou vypočítávány průběhy součinitele využití výkonu, jejichž

příklad ukazuje Obr. 7.9, pro dva různé úhly natočení listů. Před samotným výpočtem pak dochází nejprve také k porovnání průměrné hodnoty rychlosti větru s provozními mezemi, jejichž překročení vede k simulovanému odstavení zařízení. Vstupními veličinami modelu jsou rychlost větru, úhel natočení listů a úhlová rychlost turbíny, příklad jejíhož průběhu je vidět na Obr. 7.10, při použití čtyřpólového asynchronního stroje.

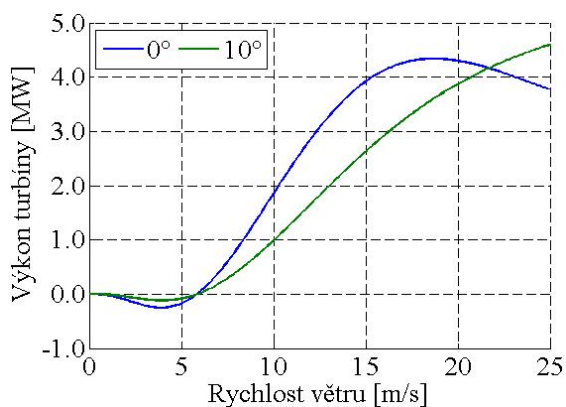


Obr. 7.9: Průběhy součinitele výkonu

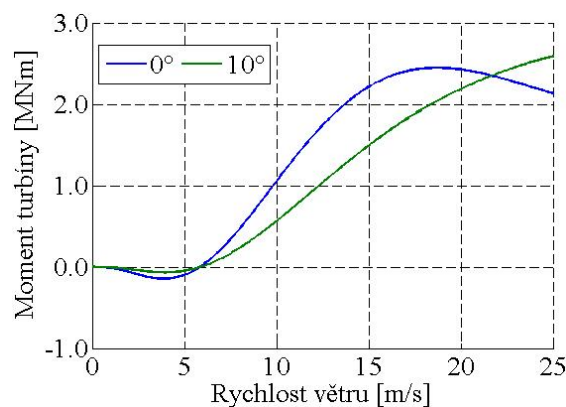


Obr. 7.10: Průběhy otáček turbíny

Výstupní veličinou je potom kroutící moment na hřídeli, který je dále zpracováván a přenášen hnacím ústrojím na rotor generátoru. Průběhy výkonu turbíny a mechanického momentu pro dva různé úhly natočení listů a pro úhlovou rychlost odpovídající uvedenému grafu jsou znázorněny na Obr. 7.11 a na Obr. 7.12, z nichž je zřejmé, že lze jejich velikosti natáčením listů regulovat a udržovat tak výkon generátoru na stálé hodnotě.



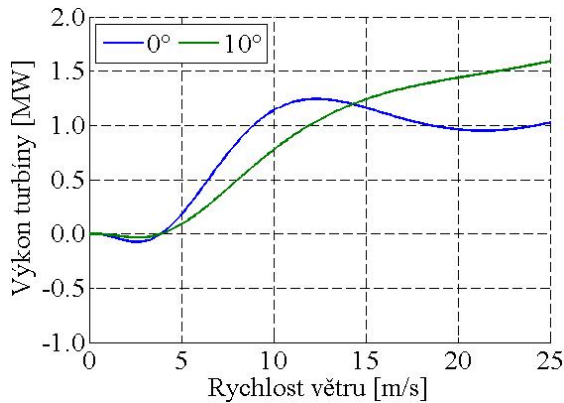
Obr. 7.11: Průběhy výkonu turbíny



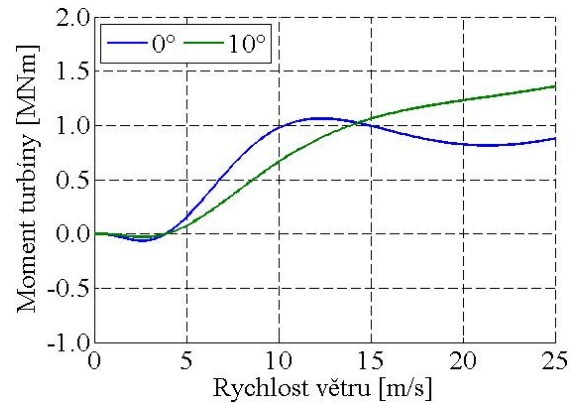
Obr. 7.12: Průběhy momentu na hřídeli

Z uvedených grafů je dále patrné, že hodnota součinitele využití výkonu klesá při vysoké hodnotě rychloběžnosti do záporných hodnot, což je příčinou vzniku záporného výkonu turbíny a momentu na hřídeli. K tomu dochází při nízkých rychlostech větru, které nejsou dostatečné pro rozběh větrné elektrárny a je to ovlivněno také potřebnou rychlostí otáčení turbíny, respektive velikostí otáček generátoru. Při vyšších požadovaných otáčkách

se tak spodní mez rychlosti větru posouvá až na hodnotu 6 m/s oproti nižším otáčkám, kdy tato hodnota činí pouze standardní 4 m/s, jak je vidět z Obr. 7.13 a z Obr. 7.14, na nichž jsou znázorněny průběhy výkonu a momentu pro průběhy úhlové rychlosti odpovídající použití šestipólového asynchronního stroje.



Obr. 7.13: Průběhy výkonu turbíny



Obr. 7.14: Průběhy momentu na hřídeli

Kvůli tomu se také v systémech větrných elektráren s konstantními otáčkami často využívá dvojího vinutí na statoru, s vyšším počtem pólů pro rozběh a provoz při slabém proudění a s nižším počtem pólů pro provoz při silném proudění. V případě elektráren s proměnnými otáčkami je pak tento problém řešen změnou otáček elektronickou regulací výkonového měniče pro napájení statoru, případně rotoru.

7.4 Model aerodynamické regulace

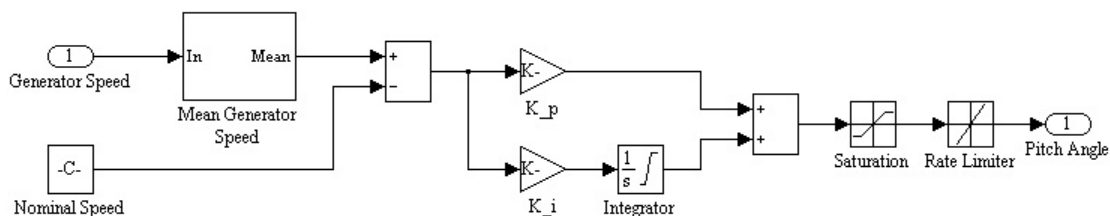
Součástí moderní větrné elektrárny je rovněž systém aerodynamické regulace, která zajišťuje natáčení listů β vztlakové turbíny, což umožňuje, jak již bylo zmíněno, regulaci jejího mechanického výkonu v závislosti na současné rychlosti větru. Tato řídicí jednotka pracuje na principu porovnávání aktuální průměrné a jmenovité hodnoty úhlové rychlosti generátoru nebo aktuálního průměrného výkonu a jmenovitého výkonu generátoru a jejich rozdíl, respektive změna aktuální průměrné hodnoty, je následně použita pro určení změny úhlu natočení listů, což lze matematicky zapsat jako:

$$\beta(t) = K_p (\omega_{gen} - \omega_n) + K_i \int (\omega_{gen} - \omega_n) dt$$

$$\frac{d\beta}{dt} \in \langle -d_{max}; d_{max} \rangle \quad \wedge \quad \beta(t) \in \langle \beta_{min}; \beta_{max} \rangle, \quad (7.11)$$

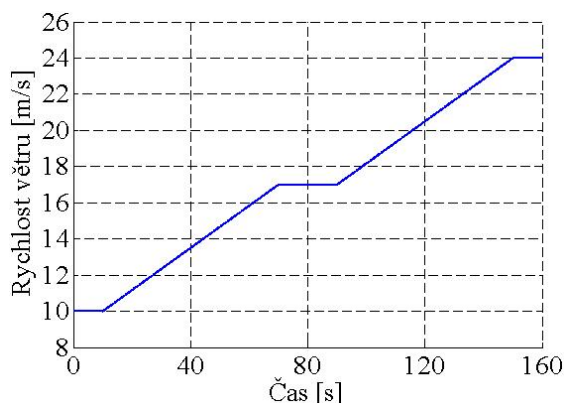
kde d_{max} je maximální hodnota rychlosti změny úhlu natočení listů, β_{min} a β_{max} vyjadřují meze pro natáčení listů, K_p je konstanta proporcionální složky a K_i je konstanta integrační složky PI regulátoru, jehož struktura je vidět na Obr. 7.15 a jenž umožňuje sledovat změny

úhlu natočení listů v závislosti na změnách otáček, resp. výkonu, generátoru a simulovat tak funkci systému regulace mechanického výkonu při vysokých rychlostech větru, která nedovoluje překročení jmenovitých hodnot, čímž umožňuje provoz větrné elektrárny při vyšších rychlostech větru a zároveň zabraňuje poškození zařízení.

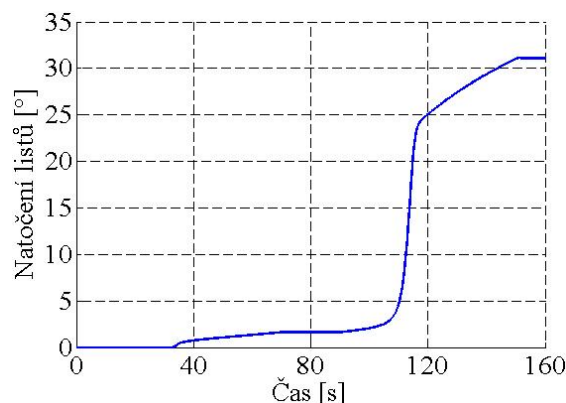


Obr. 7.15: Model aerodynamické regulace

Soubor parametrů tohoto modelu potom tvoří velikosti jednotlivých provozních mezí a konstant regulátoru. Vstupní veličinou je, v případě znázorněného modelu okamžitá úhlová rychlost generátoru a výstupní veličinou pak úhel natočení listů, jehož průběh je znázorněn na Obr. 7.17, pro uvedenou časovou závislost průměrné rychlosti větru.



Obr. 7.16: Průběh průměrné rychlosti větru



Obr. 7.17: Průběh úhlu natočení listů

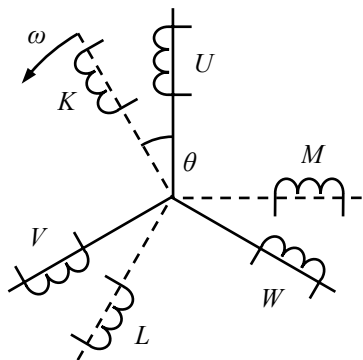
Z tohoto grafu je zřejmé, že úhel natočení se začíná měnit při jmenovité hodnotě rychlosti větru, v tomto případě asi 12,7 m/s, a při jejím nárůstu dochází ke zvyšování úhlu natočení. Při druhém nárůstu je dále vidět průběh reakce systému.

7.5 Model asynchronního generátoru

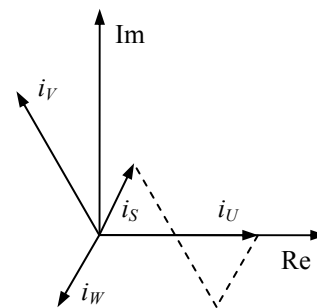
Nejpoužívanějším prostředkem v oboru modelování střídavých elektrických strojů je metoda prostorových fázorů, a to zejména díky značnému zjednodušení diferenciálních rovnic stroje, která spočívá obzvláště v transformaci proměnných parametrů na parametry stálé. Tato možnost přechodu na řešení diferenciálních rovnic s konstantními koeficienty může být přitom uskutečněna několika způsoby, jako jsou Dq0 transformace nebo Parkova

transformace, které jsou založeny na nahrazení trojfázového statorového souřadnicového systému systémem dvoufázovým a polohou svázaným například s rotorem.

Při modelování se dá vyjít z Obr. 7.18 ukazujícího schéma uspořádání statorových a rotorových vinutí. Pro základní model lze předpokládat určitá zjednodušení stroje, jako je symetrické trojfázové vinutí statoru a rotoru, konstantní vzduchová mezera, harmonické rozložení magnetického napětí a indukce ve vzduchové mezeře, zanedbání skin-efektu ve statorových a rotorových vodičích nebo zanedbání ztrát v magnetickém obvodu. Za těchto podmínek je asynchronní stroj popsán nelineární soustavou diferenciálních rovnic, jež pro konstantní úhlovou rychlost rotoru přechází v soustavu lineární.



Obr. 7.18: Uspořádání vinutí generátoru



Obr. 7.19: Proudů v komplexní rovině

Metoda prostorových fázorů vychází z podobnosti mezi časovými a prostorovými vektory. Okamžitá velikost výsledné prostorové proudové vlny v určitém místě na obvodu stroje může být proto popsána jako průmět prostorového fázoru této vlny do osy, jež tímto místem prochází. Je to stejné jako vyjádření okamžité velikosti proudu v určitém místě za pomoci průmětu tohoto časového vektoru do reálné osy nebo imaginární osy. Při použití prostorových fázorů je, stejně jako u časových vektorů, využívána symbolicko-komplexní metoda a jednotlivé fázory jsou zobrazeny v komplexní rovině, jež je kolmá k ose otáčení rotoru. Za předpokladu harmonického průběhu výsledné proudové vlny je prostorový fázor této vlny určen geometrickým součtem prostorových fázorů proudů jednotlivých fází, jak ukazuje Obr. 7.19, kde je znázorněna situace statoru.

Pro dvoupólový stroj s dvojitým napájením, tedy stroj se šesti vinutími, třemi na statoru a třemi na rotoru, je možné, pro základní harmonickou, napsat následující napěťové rovnice jednotlivých statorových a rotorových fází:

$$\overline{u}_k = R_k \overline{i}_k + \frac{d\overline{\Psi}_k}{dt}, \quad (7.12)$$

kde k je označení fáze, R je činný odpor vinutí a Ψ je spřažený magnetický tok. Z důvodu předpokladu souměrnosti statorového a rotorového vinutí lze napsat:

$$\begin{aligned} R_U &= R_V = R_W = R_S \\ R_K &= R_L = R_M = R_R \end{aligned} \quad (7.13)$$

kde R_S je odpor vinutí statoru a R_R je odpor vinutí rotoru. Vzhledem k tomu, že vzduchová mezera asynchronního stroje je konstantní, je možné psát:

$$\begin{aligned} L_{UU} &= L_{VV} = L_{WW} = L_{Ss} \\ L_{KK} &= L_{LL} = L_{MM} = L_{Rr} \end{aligned} \quad (7.14)$$

kde L_{Ss} a L_{Rr} značí vlastní indukčnosti statoru a rotoru. Pro vzájemné indukčnosti vinutí statoru a rotoru, které také nejsou závislé na poloze, dále platí:

$$\begin{aligned} L_{UV} &= L_{UW} = L_{VW} = M_S = L_{Sm} \cdot \cos 120^\circ = L_{Sm} \cdot \cos 240^\circ = -0,5L_{Sm} \\ L_{KL} &= L_{KM} = L_{LM} = M_R = L_{Rm} \cdot \cos 120^\circ = L_{Rm} \cdot \cos 240^\circ = -0,5L_{Rm} \end{aligned} \quad (7.15)$$

kde L_{Sm} , nebo L_{Rm} , je vzájemná indukčnost mezi dvěma fázemi statoru, nebo rotoru, ve stejné ose. Vzájemné indukčnosti mezi státorem a rotorem závisí na poloze takto:

$$\begin{aligned} L_{UK} &= L_{KU} = L_{VL} = L_{LV} = L_{WM} = L_{MW} = M_1 = L_h \cdot \cos \vartheta \\ L_{UL} &= L_{LU} = L_{VM} = L_{MV} = L_{WK} = L_{KW} = M_2 = L_h \cdot \cos \left(\vartheta + \frac{2}{3} \pi \right), \\ L_{KV} &= L_{VK} = L_{LW} = L_{WL} = L_{MU} = L_{UM} = M_3 = L_h \cdot \cos \left(\vartheta - \frac{2}{3} \pi \right) \end{aligned} \quad (7.16)$$

kde L_h je maximální hodnota vzájemné indukčnosti mezi vinutími na statoru a rotoru. Pro hodnoty spřažených magnetických toků může být pomocí indukčností napsáno:

$$\begin{bmatrix} \Psi_U \\ \Psi_V \\ \Psi_W \\ \Psi_K \\ \Psi_L \\ \Psi_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{Ss} & M_S & M_S & M_1 & M_2 & M_3 \\ M_S & L_{Ss} & M_S & M_3 & M_1 & M_2 \\ M_S & M_S & L_{Ss} & M_2 & M_3 & M_1 \\ M_1 & M_3 & M_2 & L_{Rr} & M_R & M_R \\ M_2 & M_1 & M_3 & M_R & L_{Rr} & M_R \\ M_3 & M_2 & M_1 & M_R & M_R & L_{Rr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_U \\ i_V \\ i_W \\ i_K \\ i_L \\ i_M \end{bmatrix}, \quad (7.17)$$

Pro znázornění prostorových fázorů v komplexní rovině je vhodné dále použít jednotkové vektory, tedy vektory s jednotkovou délkou a fázovým posunem 0 , $2\pi/3$ a $4\pi/3$:

$$\bar{1} = e^{j0} = 1, \quad \bar{a} = e^{j\frac{2}{3}\pi} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad \text{a} \quad \bar{a}^{-2} = e^{j\frac{4}{3}\pi} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad (7.18)$$

První vektor je roven jedné a tím je osa první fáze totožná s osou reálnou, tak jako je tomu na Obr. 7.19. Je to stejné jako s interpretací časových fázorů v komplexní rovině. Výsledný prostorový fázor je potom určen jako součet jednotlivých prostorových fázorů, které náleží

k jednotlivým fázím. Obecně je možné pro prostorové fázory proudu, napětí, magnetického toku nebo jiné libovolné trojfázové veličiny f napsat následující rovnici:

$$\bar{f} = \frac{2}{3} (f_A \cdot \bar{1} + f_B \cdot \bar{a} + f_C \cdot \bar{a}^2) \quad (7.19)$$

V důsledku magnetické vazby, která je mezi statorovými a rotorovými vinutími, a změn závislých na vzájemné poloze statoru a rotoru je obvykle výhodné vyjádřit všechny rovnice ve stejných, statorových nebo rotorových souřadnicích. Koeficienty v řešených rovnicích jsou potom konstantní a rovnice pro napětí ve statorovém a rotorovém obvodu mají, ve statorových souřadnicích, následující tvar:

$$\begin{aligned} \bar{u}_S^S &= R_S \bar{i}_S^S + \frac{d\bar{\Psi}_S^S}{dt} \\ \bar{u}_R^S &= R_R \bar{i}_R^S + \frac{d\bar{\Psi}_R^S}{dt} - j p_p \omega_{gen} \bar{\Psi}_R^S \end{aligned} \quad (7.20)$$

kde p_p počet pólových dvojic a ω_{gen} je mechanická úhlová rychlost generátoru. Aby bylo možné řešit uvedené rovnice v oboru reálných čísel, musí být ještě provedeno rozložení prostorových fázorů na složky. K jejich zobrazení do reálné a imaginární osy vybraného systému souřadnic potom slouží transformace:

$$\begin{aligned} u_\alpha &= \frac{2}{3} \left[\bar{u}_A \cos \vartheta + \bar{u}_B \cos \left(\vartheta + \frac{2}{3} \pi \right) + \bar{u}_C \cos \left(\vartheta - \frac{2}{3} \pi \right) \right] \\ u_\beta &= \frac{2}{3} \left[\bar{u}_A \sin \vartheta + \bar{u}_B \sin \left(\vartheta + \frac{2}{3} \pi \right) + \bar{u}_C \sin \left(\vartheta - \frac{2}{3} \pi \right) \right] \end{aligned} \quad (7.21)$$

Díky tomu přechází řešení napěťových rovnic od trojfázového na dvoufázové, přičemž jednotlivé složky tvoří symetrické dvoufázové vinutí, které vyvolává stejnou pracovní vlnu jako vinutí původní. Pro opačnou transformaci výsledných proudů pak platí:

$$\begin{aligned} \bar{i}_A &= i_\alpha \cos \vartheta + i_\beta \sin \vartheta \\ \bar{i}_B &= i_\alpha \sin \left(\vartheta + \frac{2}{3} \pi \right) + i_\beta \sin \left(\vartheta + \frac{2}{3} \pi \right) \\ \bar{i}_C &= i_\alpha \sin \left(\vartheta - \frac{2}{3} \pi \right) + i_\beta \sin \left(\vartheta - \frac{2}{3} \pi \right) \end{aligned} \quad (7.22)$$

Další veličinou, která je důležitá pro model, je vnitřní elektromagnetický moment, jehož velikost může být určena z rovnice pro rotorový obvod v souřadnicích statoru. Pro vnitřní výkonovou bilanci rotoru stroje je tedy možné napsat:

$$\bar{u}_R^S \cdot \bar{i}_R^{S*} = R_R \bar{i}_R^S \cdot \bar{i}_R^{S*} + \frac{d\bar{\Psi}_R^S}{dt} \cdot \bar{i}_R^{S*} - j p_p \omega_{gen} \bar{\Psi}_R^S \cdot \bar{i}_R^{S*} \quad (7.23)$$

Reálná část tohoto výrazu pak představuje velikost činného výkonu protékajícího rotorem stroje, kde na pravé straně je součet Jouleových ztrát, výkonu dodávaného prostřednictvím indukovaného napětí a vnitřního mechanického výkonu stroje, z něž je možné po vydělení úhlovou rychlostí získat vztah pro vnitřní elektromagnetický moment:

$$M_{gen} = -\frac{3}{2} p_p \operatorname{Re} \left\{ j \cdot \overline{\Psi_R^S} \cdot \overline{i_R^{S*}} \right\} \quad (7.24)$$

Hodnoty spřažených magnetických toků mohou být vyjádřeny prostřednictvím vlastních a vzájemných indukčností a proudů. Za předpokladu, že součet statorových proudů, nebo rotorových proudů, je roven nule, lze pro základní polohu rotoru napsat:

$$\begin{aligned} \overline{\Psi_S} &= \left(L_{Ss} + \frac{1}{2} L_{Sm} \right) \cdot \overline{i_S} + \frac{3}{2} L_h \overline{i_R} = L_S \overline{i_S} + L_m \overline{i_R} \\ \overline{\Psi_R} &= \left(L_{Rs} + \frac{1}{2} L_{Rm} \right) \cdot \overline{i_R} + \frac{3}{2} L_h \overline{i_S} = L_R \overline{i_R} + L_m \overline{i_S} \end{aligned} \quad (7.25)$$

kde L_S a L_R jsou indukčnosti statoru a rotoru, které zahrnují vlastní indukčnost příslušné fáze a vzájemné indukčnosti dalších fází a L_m je magnetizační indukčnost, jež představuje maximální magnetickou vazbu mezi fází statoru a fází rotoru. Dosazením těchto vzorců do napěťových rovnic lze potom pro transformovaný systém dostat:

$$\begin{aligned} u_{S\alpha} &= R_S i_{S\alpha} + L_S \frac{di_{S\alpha}}{dt} + L_m \frac{di_{R\alpha}}{dt} \\ u_{S\beta} &= R_S i_{S\beta} + L_S \frac{di_{S\beta}}{dt} + L_m \frac{di_{R\beta}}{dt} \\ u_{R\alpha} &= R_R i_{R\alpha} + L_R \frac{di_{R\alpha}}{dt} + L_m \frac{di_{S\alpha}}{dt} + p_p \omega_{gen} (L_R i_{R\beta} + L_m i_{S\beta}) \\ u_{R\beta} &= R_R i_{R\beta} + L_R \frac{di_{R\beta}}{dt} + L_m \frac{di_{S\beta}}{dt} - p_p \omega_{gen} (L_R i_{R\alpha} + L_m i_{S\alpha}) \end{aligned} \quad (7.26)$$

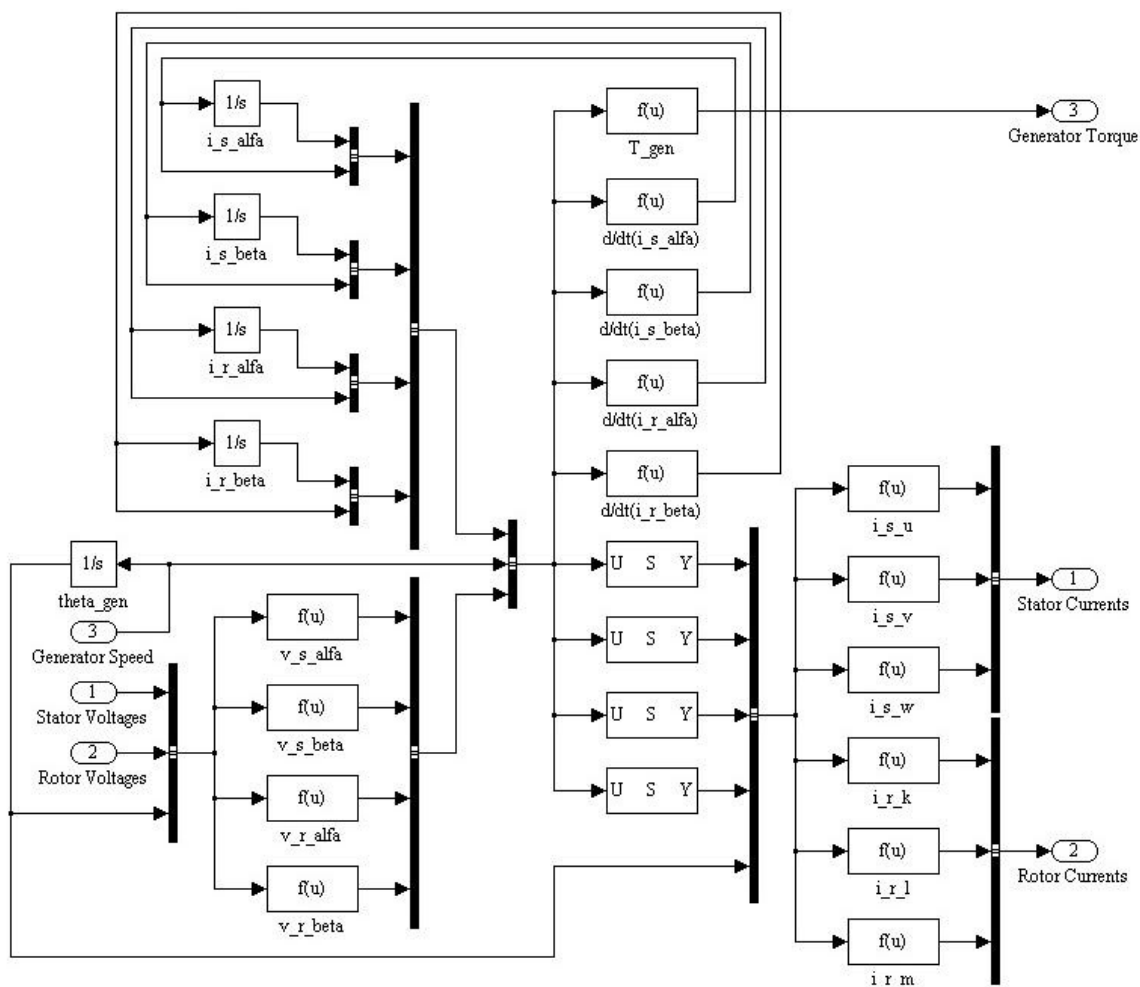
Z těchto rovnic je možné následně vyjádřit jednotlivé proudy zavedeného dvoufázového systému. Podobným způsobem se dá vyjádřit také hodnota vnitřního elektromagnetického momentu stroje, pro který po dosazení za magnetický tok platí vztah:

$$M_{gen} = -\frac{3}{2} p_p L_m \operatorname{Re} \left\{ j \cdot \overline{i_R^S} \cdot \overline{i_R^{S*}} \right\} = \frac{3}{2} p_p L_m \operatorname{Re} \left\{ j \cdot \overline{i_R^S} \cdot \overline{i_S^{S*}} \right\} \quad (7.27)$$

Pro transformovaný systém lze pak dosazením komplexních tvarů rotorového a komplexně sdruženého statorového proudu dostat vzorec pro hodnotu vnitřního elektromagnetického moment vyvolaného otáčením stroje ve tvaru:

$$M_{gen} = \frac{3}{2} p_p L_m (i_{S\beta} \cdot i_{R\alpha} - i_{S\alpha} \cdot i_{R\beta}) \quad (7.28)$$

Podle uvedených rovnic je možné sestavit zjednodušený model dvojité napájeného asynchronního generátoru v programu Simulink, který je vidět na Obr. 7.20. Tento model umožňuje sledovat průběhy a fázových proudů a vnitřního elektromagnetického momentu, v závislosti na napájecích napětích a úhlové rychlosti generátoru.

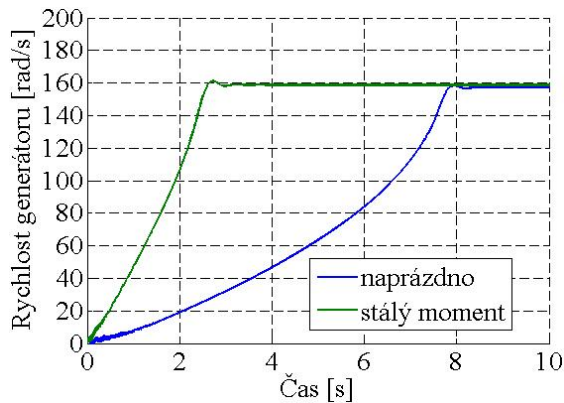


Obr. 7.20: Model dvojité napájeného asynchronního generátoru

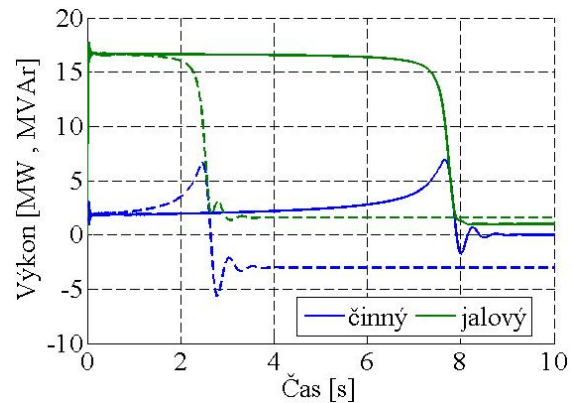
Základními parametry tohoto modelu, jejichž hodnoty lze snadno měnit v masce bloku, jsou odpory a indukčnosti statoru a rotoru, dále pak magnetizační indukčnost mezi statorovým a rotorovým vinutím a také počet pólových dvojic stroje. V bloku je nejprve provedena transformace napájecích napětí z trojfázového na dvoufázový systém, následně jsou vypočteny proudy, za pomoci uvedených matematických rovnic a integračních bloků a nakonec jsou výsledné proudy převedeny zpět na původní trojfázový systém.

Vstupními veličinami modelu jsou pak, již dříve zmíněné, průběhy fázových napětí statoru, fázových napětí rotoru a mechanická úhlová rychlost rotoru. Výstupy jsou tvořeny jednotlivými průběhy statorových a rotorových fázových proudů a elektromagnetického

momentu působícího na rotor. Příklady časových průběhů úhlových rychlostí při rozběhu stroje naprázdno a při rozběhu s konstantním momentem jsou znázorněny na Obr. 7.21, pro harmonické napájení statoru a bez napájení rotoru. Průběhy činného a jalového výkonu pro oba případy jsou potom vidět na Obr. 7.22, plnou čarou výkony při rozběhu naprázdno a čárkovanou pak výkony při rozběhu s konstantním momentem.

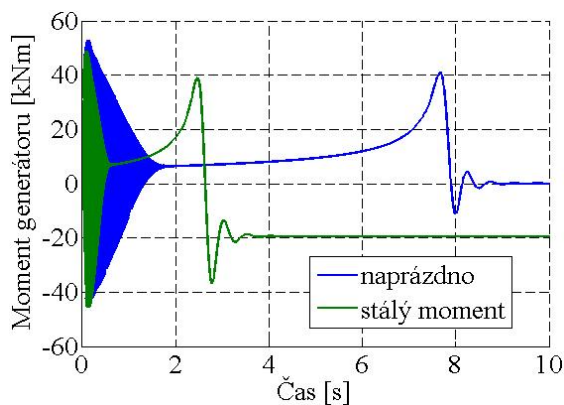


Obr. 7.21: Průběhy úhlové rychlosti stroje

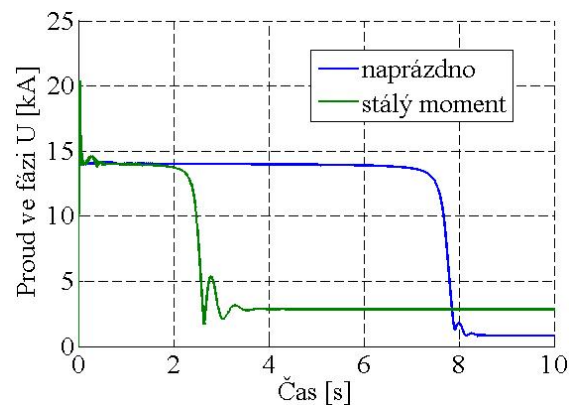


Obr. 7.22: Průběhy výkonu stroje

Z těchto časových závislostí je potom vidět, jak velikost mechanického momentu působícího ze strany pohonu ovlivňuje rychlost rozběhu generátoru a jak se mění velikosti výkonů a jejich vzájemný poměr v oblasti rychlostí blízkých jmenovité hodnotě. Další dva grafy, na Obr. 7.23 a na Obr. 7.24, potom ukazují průběhy vnitřního elektromagnetického momentu stroje a průběhy efektivní hodnoty jednoho ze statorových proudů.



Obr. 7.23: Průběhy momentu stroje

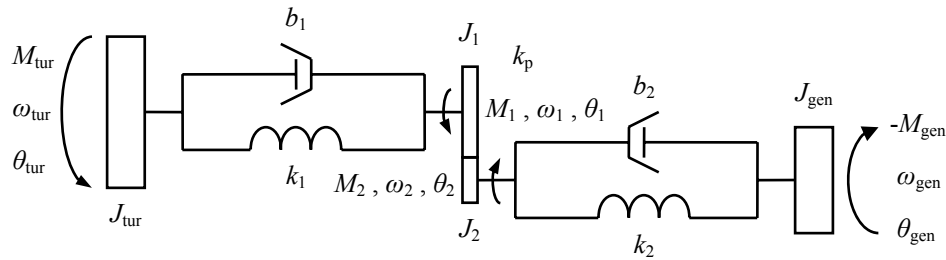


Obr. 7.24: Průběhy statorového proudu

Z nich je patrné jednak vysoká míra kolísání mechanického působení generátoru na hřídel během počáteční fáze jeho rozběhu, způsobená značným rozdílem mezi momentální úhlovou rychlostí a rychlostí synchronní, a dále také vysoká hodnota fázového statorového proudu, která může dosáhnout až sedminásobku jeho jmenovité velikosti.

7.6 Model hnacího ústrojí a převodovky

Při popisu hnacího ústrojí, zajišťujícího přenos mechanického momentu z turbíny na generátor je možné vycházet ze schématu, které je vidět na Obr. 7.25 a které znázorňuje pružné spojení dvou kotoučů, charakterizovaných momenty setrvačnosti, s převodovkou za pomoci pružných hřídelí s určitými hodnotami tuhosti a součinitele tlumení.

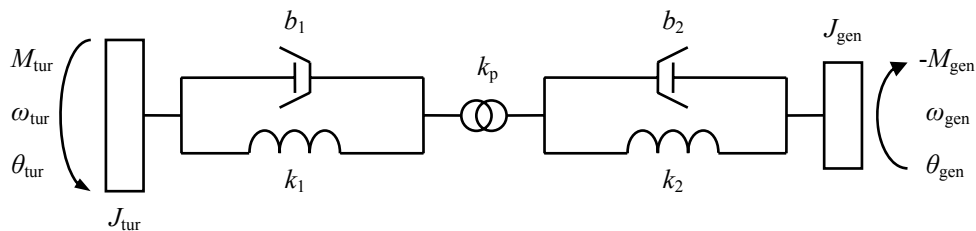


Obr. 7.25: Schéma hnacího ústrojí s převodovkou

Pro takovýto systém je potom možné, po uvolnění všech těles, napsat soustavu čtyř diferenciálních rovnic, které vyjadřují vztahy mezi jednotlivými momenty setrvačnosti J a mechanickými momenty M působícími na hřídelích:

$$\begin{aligned}
 M_{tur} &= J_{tur} \cdot \frac{d\omega_{tur}}{dt} + b_1 \cdot (\omega_{tur} - \omega_1) + k_1 \cdot (\theta_{tur} - \theta_1) \\
 M_1 &= J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt} - b_1 \cdot (\omega_{tur} - \omega_1) - k_1 \cdot (\theta_{tur} - \theta_1) \\
 M_2 &= J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt} + b_2 \cdot (\omega_2 - \omega_{gen}) + k_2 \cdot (\theta_2 - \theta_{gen}) \\
 -M_{gen} &= J_{gen} \cdot \frac{d\omega_{gen}}{dt} - b_2 \cdot (\omega_2 - \omega_{gen}) - k_2 \cdot (\theta_2 - \theta_{gen})
 \end{aligned} \tag{7.29}$$

kde b_1 a b_2 jsou součinitelé tlumení, k_1 a k_2 jsou tuhosti, ω značí úhlové rychlosti a θ značí úhly natočení. Tuto interpretaci je však možné dále zjednodušit, protože velikosti momentů setrvačnosti převodových kol jsou vzhledem k jejich rozměrům oproti velikostem rotorů turbíny a generátoru velmi malé a lze je tedy zanedbat. Podle Obr. 7.26 je vidět, že je dále nutné převést všechny parametry buď na stranu turbíny, nebo generátoru.



Obr. 7.26: Schéma hnacího ústrojí s převodem

Nejprve je třeba přepočítat součinitelů tlumení a tuhostí hřídele. K tomuto účelu se zavádí jejich ekvivalentní hodnoty, které se, pro převedení rovnic na stranu turbíny, nebo generátoru, určí z jejich původních hodnot následujícím způsobem:

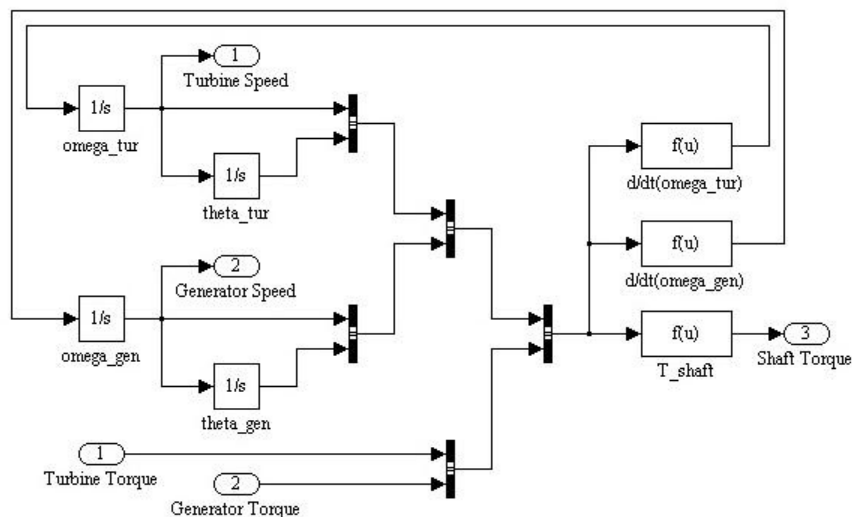
$$k_e^{tur} = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot k_p^2}{k_1 + k_2 \cdot k_p^2} \quad \text{nebo} \quad k_e^{gen} = \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2 \cdot k_p^2}, \quad (7.30)$$

kde k_p je hodnota převodu. Velikost mechanického momentu a momentu setrvačnosti je třeba převést vynásobením nebo vydělením hodnotou k_p^2 a velikosti úhlu natočení a úhlové rychlosti potom vydělením či vynásobením hodnotou převodu. Výsledné pohybové rovnice přepočtené na stranu turbíny mají potom tvar:

$$M_{tur} = J_{tur} \cdot \frac{d\omega_{tur}}{dt} + b_e \cdot \left(\omega_{tur} - \frac{\omega_{gen}}{k_p} \right) + k_e \cdot \left(\theta_{tur} - \frac{\theta_{gen}}{k_p} \right) \quad (7.31)$$

$$- M_{gen} k_p^2 = J_{gen} k_p^2 \cdot \frac{d\omega_{gen}}{dt} - b_e \cdot (\omega_{tur} k_p - \omega_{gen}) - k_e \cdot (\theta_{tur} k_p - \theta_{gen})$$

Z těchto rovnic lze následně vyjádřit derivace úhlových rychlostí v závislosti na hodnotách působících krouticích momentů, jimiž na hnací ústrojí působí turbína a generátor. Ty jsou základem pro počítačový model zobrazený na Obr. 7.27, jenž umožňuje sledování změn úhlových rychlostí vyvolané změnami krouticích momentů.



Obr. 7.27: Model hnacího ústrojí s převodovkou

Základními parametry tohoto modelu, jejichž hodnoty lze libovolně měnit v masce vytvořeného bloku, jsou hodnota tuhosti hřídele, součinitel tlumení, momenty setrvačnosti rotoru turbíny a generátoru a samozřejmě také nutné počáteční podmínky. Vstupní veličiny jsou tvořeny mechanickými momenty a výstupními veličinami jsou úhlové rychlosti.

7.7 Model soft-startéru

Pro připojení větrné elektrárny s asynchronním generátorem může být během jejího rozběhu využit soft-startér, který se skládá ze dvou antiparalelně zapojených tyristorů v každé fázi, jejichž spínáním je možné vytvořit plynulý náběh napětí z nulové hodnoty na hodnotu jmenovitou. Proto je třeba vytvořit model tohoto spínání, které se provádí změnou velikosti spínacího fázového úhlu, na jejímž základě se určí spínací pulsy pro jednotlivé tyristory. Pro připojení čistě činné zátěže se prakticky dají rozlišit tři režimy, v nichž může soft-startér pracovat. První režim nastává při spínacím úhlu v rozmezí $0^\circ \leq \alpha < 60^\circ$ a jsou při něm napájeny dva nebo tři polovodičové spínače. Pro větší velikost spínacího úhlu pak rozlišujeme druhý režim, $60^\circ \leq \alpha < 90^\circ$, při němž jsou napájeny právě dva spínače. A třetí režim nastává při spínacích úhlech v rozsahu $90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$, kdy není napájen ani jeden spínač, nebo jsou napájen dva polovodičové spínače.

Poněkud složitější je situace v případě připojování činně induktivní zátěže, protože určení provozního režimu závisí na odpojovacím úhlu ζ a na mezním úhlu α_{lim} , které závisí na velikosti účinníku, tedy fázového posuvu φ , přičemž druhý mód, vyznačující se rychlými změnami výstupního proudu, není možný kvůli induktivnímu charakteru zátěže. Proto jsou v tomto případě uvažovány pouze dva režimy, první v rozsahu spínacího úhlu $\varphi \leq \alpha < \alpha_{\text{lim}}$ a třetí v rozmezí $\alpha_{\text{lim}} \leq \alpha < 150^\circ$. Limitní úhel lze určit podle vztahu:

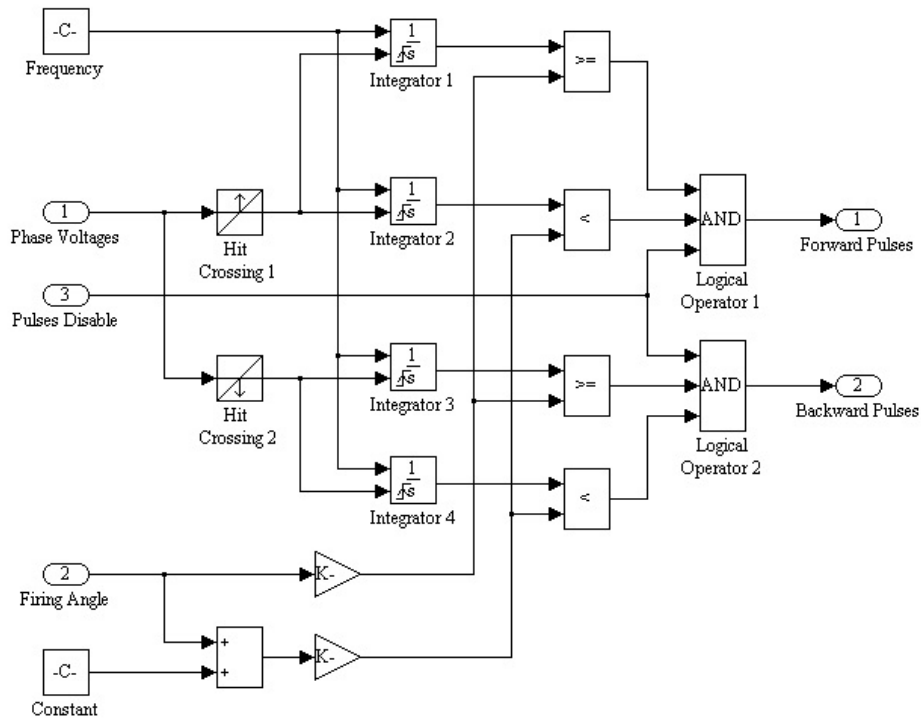
$$\frac{\sin\left(\alpha_{\text{lim}} - \varphi - \frac{4}{3}\pi\right)}{\sin(\alpha_{\text{lim}} - \varphi)} = \frac{2 \cdot e^{-\frac{\pi}{3 \cdot \tan \varphi}} - 1}{2 - e^{-\frac{\pi}{3 \cdot \tan \varphi}}} \quad (7.32)$$

Vzhledem k tomu, že tyristorový spínač nedovoluje průchod zpětného proudu, bude jeho napájení ukončeno v okamžiku, kdy spínací úhel dosáhne velikosti odpojovacího úhlu, jehož hodnota se dá určit za pomoci následující rovnice:

$$\sin(\xi - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-\cot[\varphi \cdot (\xi - \alpha)]} = 0 \quad (7.33)$$

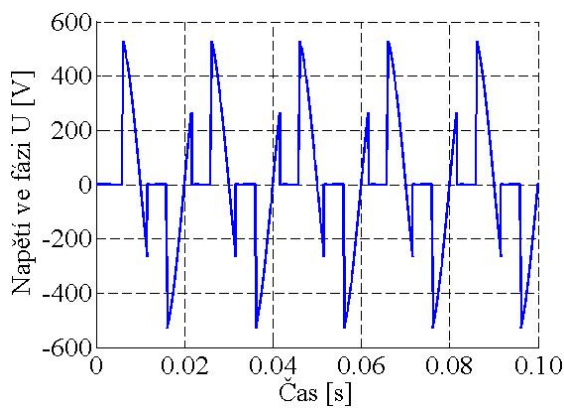
Podle uvedených vztahů lze například stanovit, že pro připojování čistě induktivní zátěže bude velikost limitního spínacího úhlu, oddělujícího oba možné provozní režimy spínačů, mít hodnotu 120° a závislost odpojovacího úhlu na úhlu spínacím bude pro tento typ zátěže mít lineární charakter [08]. Schéma modelu generátoru pulsů pro spínání jednotlivých tyristorových spínačů, vytvořeného v prostředí nástroje Simulink, je potom názorně vidět na Obr. 7.28, jenž dává možnost sledovat změny spínání jednotlivých tyristorů v závislosti na změnách spínacího úhlu. Prakticky tento blok funguje tak, že sleduje průběhy fázových

napětí a při průchodu nulou v kladném směru porovnává velikost fáze s aktuální hodnotou spínacího úhlu a s hodnotou o třetinu periody vyšší a, pokud je jeho velikost mezi nimi, vyšle impuls k sepnutí tyristoru umístěném v dané fázi v kladném směru. Podobně je tomu i při průchodu napětí nulou v záporném směru, kdy řídicí blok vysílá, při velikostech fáze v uvedeném rozmezí, impulsy pro tyristory umístěné v opačném směru každé fáze.

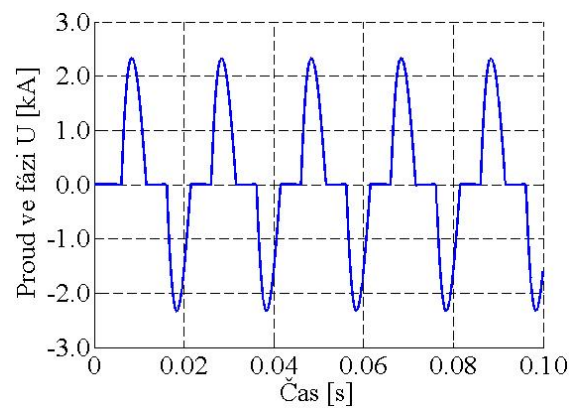


Obr. 7.28: Model generátoru pulsů pro soft-startér

Jediným parametrem modelu s uvedenou strukturou je frekvence sítě, jeho vstupy tvoří průběhy fázových napětí a průběh spínacího úhlu, který může být realizován jako postupný pokles z maximální hodnoty na hodnotu minimální, nebo může být regulován s ohledem na omezování hodnoty proudu ve fázích.



Obr. 7.29: Průběh napětí ve fázi

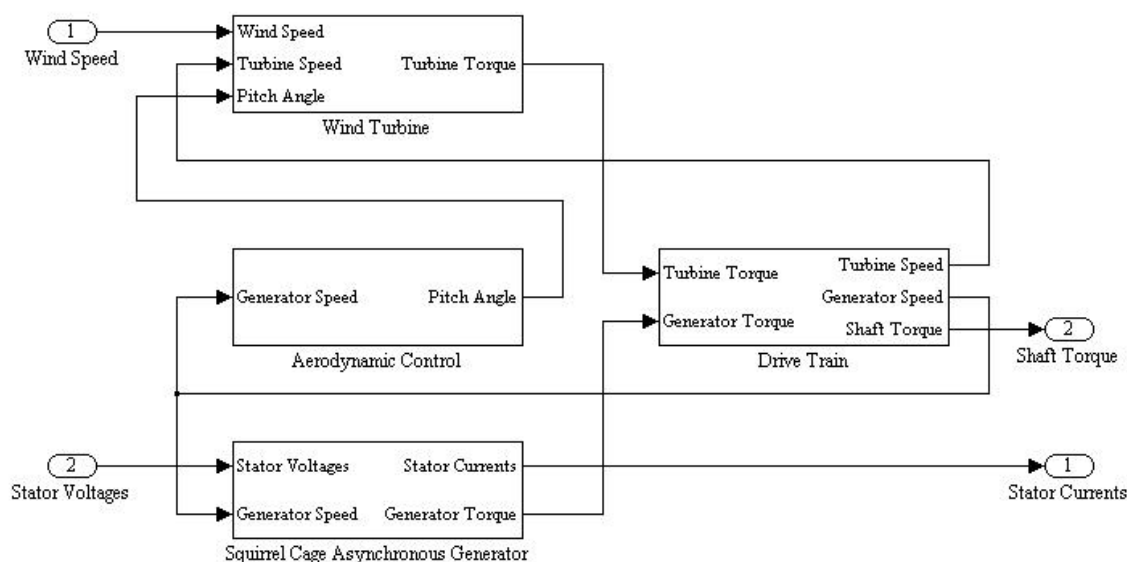


Obr. 7.30: Průběh proudu ve fázi

Z uvedených grafů na Obr. 7.29 a na Obr. 7.30, jež ukazují časové průběhy napětí a proudu v jedné z fází pro připojení zátěže s účínkem o velikosti 0.85 a se spínacím úhlem nastaveným na hodnotu 70° . Při spínacích úhlech větších než je mezní hodnota pro danou zátěž se fázové proudy obsahují nesinusové složky a nespojitost, a proto tyto jednotlivé proudy obsahují ve výsledku velký podíl harmonických.

7.8 Model větrné elektrárny

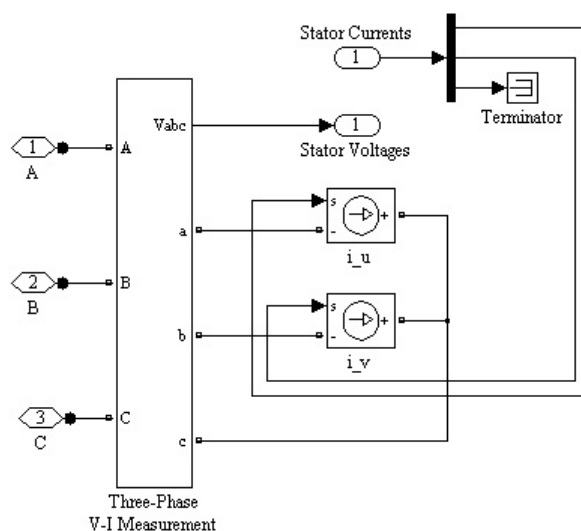
Model celého systému větrné elektrárny vznikne nakonec sestavením modelů jeho jednotlivých částí a jejich vzájemným propojením, jak ukazuje Obr. 7.31, na němž je vidět struktura modelu větrné elektrárny s konstantními otáčkami, která využívá asynchronní generátor s kotvou nakrátko, obsahuje převodovku a je vybavena aerodynamickou regulací listů turbíny. Jak je vidět z obrázku, prvním článkem v řetězci je větrná turbína, jež převádí energii větru na mechanický moment, který je přiváděn na jednu stranu převodovky. V této části se mechanická energie převádí na otáčivý pohyb a jsou určovány úhlové rychlosti obou konců, přičemž rychlost turbíny je přiváděna zpět do turbíny kvůli výpočtu aktuální hodnoty výkonového součinitele a rychlost generátoru potom do bloku generátoru kvůli určování momentální hodnoty vnitřního elektromagnetického momentu stroje.



Obr. 7.31: Model větrné elektrárny s konstantními otáčkami

Ten je zase přiváděn do bloku převodovky. Úhlová rychlost generátoru je pak také přiváděna na vstup bloku aerodynamické regulace, kde jsou její změny využity k určování změn úhlu natočení listů, jehož hodnoty jsou opětovně přiváděny do turbíny pro potřeby výpočtu výkonového součinitele. Parametry celého modelu tvoří soubor všech parametrů

jednotlivých bloků tak, jak byly již popsány v jednotlivých částech. Vstupními veličinami jsou pak rychlost větru představovaná naměřeným, nebo simulovaným průběhem, a fázová napětí na statoru, v případě použití stroje s vinutým rotorem také napětí na rotoru. Výstupy jsou zejména průběhy statorových, případně i rotorových, proudů, s jejichž pomocí se dají následně určit průběhy výkon asynchronního stroje. Lze však samozřejmě, s pomocí bloků ukládajících jednotlivé veličiny během simulace, též získat průběhy všech veličin, s nimiž uvedený model pracuje. Pomocí měřicího členu z knihovny SimPowerSystems, jehož užití ukazuje Obr. 7.32 je dále možné s tímto modelem pracovat přímo v rámci této knihovny, která obsahuje fyzikální modely základních elektrotechnických součástek a nejrůznějších zařízení a je určena k provádění simulací v elektrotechnické oblasti.



Obr. 7.32: Model propojení s fyzikálními modely

Tento blok má na vstupu velikosti proudů, jež odebírá z modelu větrné elektrárny a které jsou pomocí proudových zdrojů převáděny na fyzikální signály. Na výstupu jsou pak velikosti fázových napětí, jež jsou získávána měřicím členem a převáděna na matematický signál, který je následně přiváděn na vstup modelu větrné elektrárny. Fyzikální porty potom slouží k přímému propojení na modely z knihovny SimPowerSystems a přenášejí fyzikální signály napětí a proudů mezi modelem větrné elektrárny a těmito prvky. V případě modelu větrné elektrárny s asynchronním generátorem s kotvou nakrátko je využit jeden takovýto blok a pro model větrné elektrárny s vinutým rotorem jsou potom pochopitelně použity dva takovéto stejné bloky, jeden pro stator a druhý pro rotor.

8 Simulace připojení a provozu větrné elektrárny a farmy

Pro simulování připojení a provozu větrné elektrárny a větrné farmy do elektrizační soustavy byl zvolen systém s konstantními otáčkami, tzn. větrná elektrárna s asynchronním generátorem vybavená s aerodynamickou regulací listů turbíny, jejíž jednotlivé parametry jsou uvedeny v Tab. 8.1, pro turbínu, regulaci, převodovku a generátor.

| název veličiny | velikost |
|--------------------------------|--|
| poloměr rotoru turbíny | 45 m |
| hustota vzduchu | $1.25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ |
| rozsah úhlu natočení listů | $0^\circ - 45^\circ$ |
| maximální změna úhlu natočení | $10^\circ/\text{s}$ |
| moment setrvačnosti turbíny | $32\cdot 10^5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ |
| moment setrvačnosti generátoru | $120 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ |
| součinitel tuhosti hřídele | $90\cdot 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ |
| součinitel tlumení hřídele | $35\cdot 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1}$ |
| velikost převodu | 90 |
| činný odpor vinutí statoru | 1,587 m Ω |
| indukčnost vinutí statoru | 1,566 mH |
| činný odpor vinutí rotoru | 1,587 m Ω |
| indukčnost vinutí rotoru | 1,556 mH |
| magnetizační indukčnost | 1,516 mH |
| počet pólových dvojic | 2 |

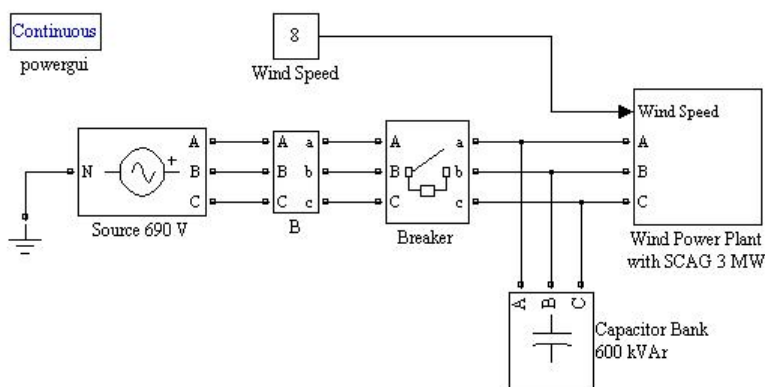
Tab. 8.1: Simulační parametry větrné elektrárny

Jedná se o větrnou elektrárnu s výkonem 3 MW, která je připojována na napětí o jmenovité hodnotě 690 V, jejíž parametry byly určeny převážně podle [02], kde jsou dány například typické hodnoty pro generátory v poměrných jednotkách. Pro takovéto zařízení potom byly provedeny níže popsané simulace pro různé způsoby jeho připojení a pro jeho provoz a následně také simulace připojení a provozu farmy těchto elektráren.

8.1 Simulace připojení VTE přímo k síti

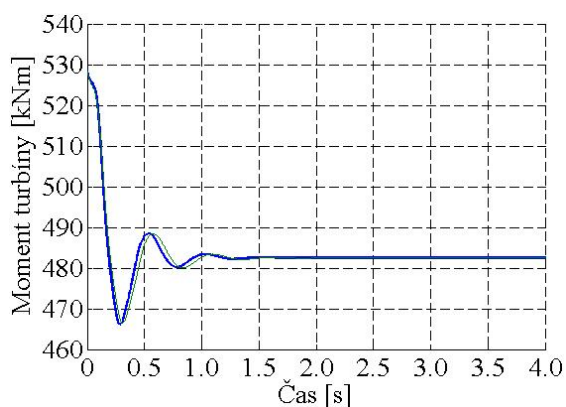
Nejjednodušším způsobem připojení větrné elektrárny s asynchronním generátorem k síti je jeho přímé připnutí v okamžiku, kdy jeho otáčky dosáhnou určité hodnoty blížící se k velikosti otáček synchronních. Tento způsob připojení tedy nevyžaduje žádné další zařízení, kromě vypínače a kapacitní banky, a na procesu rozběhu větrné elektrárny se nepodílí zejména žádné další prvky, zejména pak z oblasti výkonové elektroniky. To sebou samozřejmě nese určité výhody a zároveň také určité nepříznivé jevy, které vyplývají přímo z vlastností daného typu zařízení. Simulační schéma tohoto způsobu připojení pak

ukazuje Obr. 8.1, na němž je vidět jednoduché připojení větrné elektrárny daného výkonu přímo ke zdroji napětí o uvedené velikosti. Kromě této simulace připojení k tvrdému zdroji napětí byla provedena také simulace připojení ke zdroji napětí s vnitřní impedancí, který představuje elektrickou síť s určitým zkratovým výkonem. Jako kapacitní kompenzace byla použita zátěž s uvedenou hodnotou.

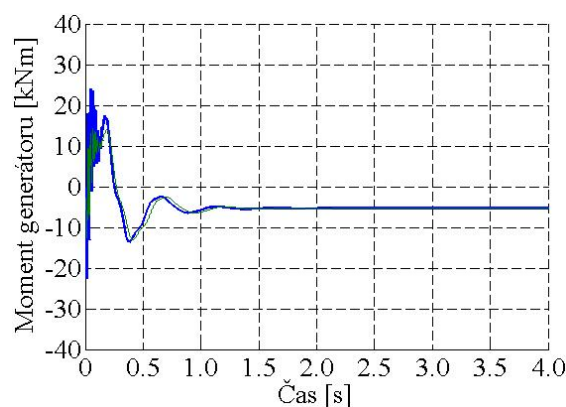


Obr. 8.1: Simulace připojení VTE přímo k síti

Bylo tedy simulováno připojení větrné elektrárny po rozběhu při dosažení velikosti otáček generátoru 1450 ot./min., což je více než 95 % z hodnoty otáček synchronních pro čtyřpólový stroj, přičemž bylo sledováno chování větrné elektrárny v krátkém časovém úseku po připnutí zařízení ke zdroji napětí, nejprve tvrdému a následně ke zdroji s vnitřním zkratovým výkonem o velikosti 50 MVA. Průběhy jednotlivých sledovaných veličin jsou potom znázorněny v několika následujících grafech, vždy pro připojení k tvrdému zdroji silnou čarou a pro připojení k měkkému zdroji čarou tenkou.



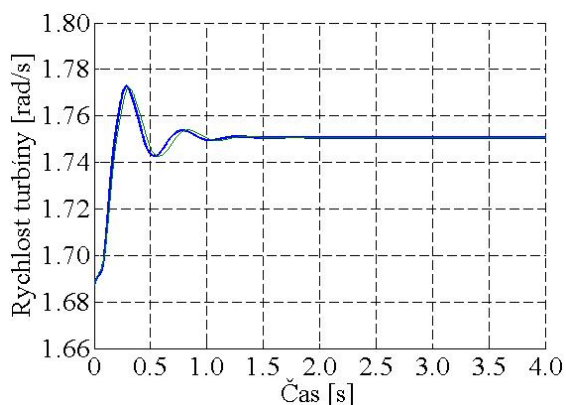
Obr. 8.2: Průběhy momentu turbíny



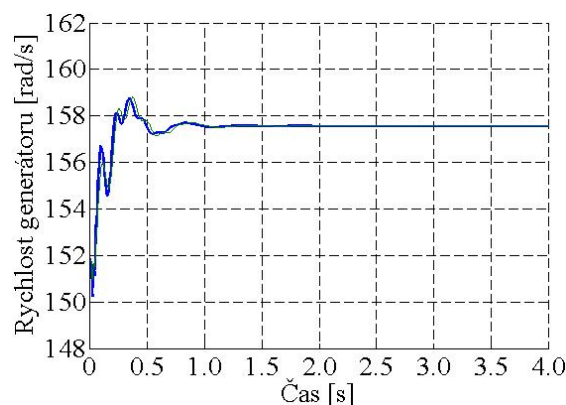
Obr. 8.3: Průběhy momentu generátoru

Na prvních dvou obrázcích jsou tedy vidět časové závislosti krouticích momentů působících na převodovku ze strany turbíny a generátoru, přičemž je patrné, že zatímco průběh momentu turbíny není příliš ovlivňován velikostí zkratového výkonu v síti, protože

jeho hodnota závisí hlavně na rychlosti větru a otáčkách turbíny, moment generátoru jistou závislost na tvrdosti sítě vykazuje, protože jeho velikost se odvíjí od hodnoty napájecího napětí, jež v případě měkkého zdroje v okamžiku připojení zařízení poklesne. Přechodový děj potom trvá, jak je vidět, asi 1,5 sekundy.

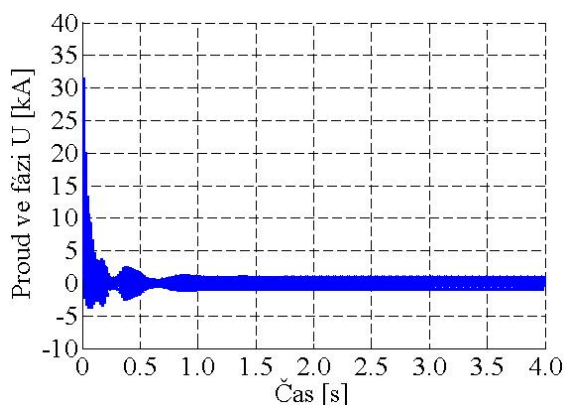


Obr. 8.4: Průběhy rychlosti turbíny

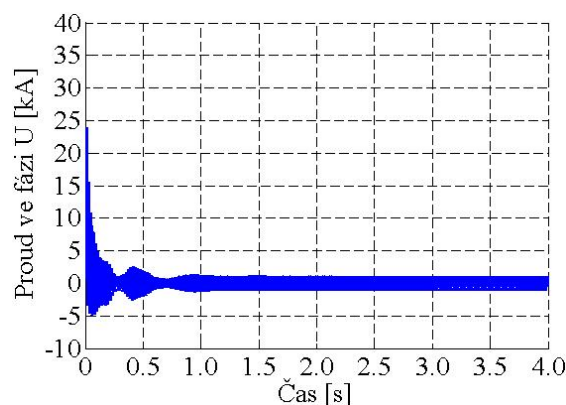


Obr. 8.5: Průběhy rychlosti generátoru

Z dalších dvou obrázků je dále vidět, že velikost zkratového výkonu zdroje nemá prakticky vliv na úhlové rychlosti, v případě generátoru dochází pouze k menšímu výkyvu těsně po připojení následkem nižších hodnot působícího vnitřního elektromagnetického momentu stroje během nastalého rychlého přechodového jevu. Následující grafy potom ukazují průběh jednoho z fázových proudů, viz. Obr. 8.6 a Obr. 8.7, pro připojení nejprve k tvrdému a dále k měkkému zdroji, během tohoto času.



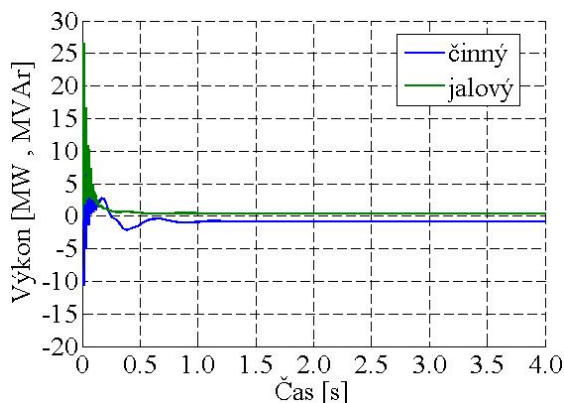
Obr. 8.6: Průběh proudu ve fázi



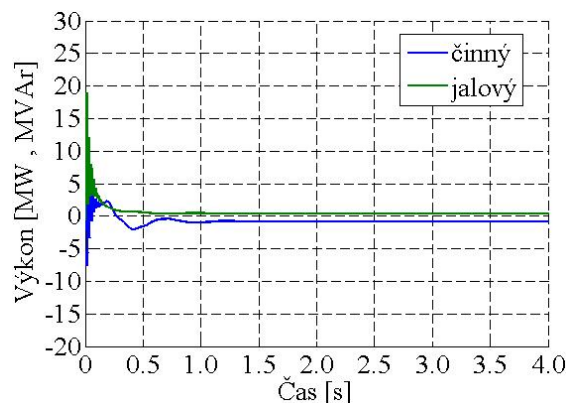
Obr. 8.7: Průběh proudu ve fázi

Na těchto grafech je vidět zejména jedna z nejdůležitějších vlastností uvažovaného způsobu připojení, kdy při přímém připnutí asynchronního generátoru k síti vzniká v tomto okamžiku rázový proud velkých hodnot. Zároveň je taktéž vidět, jak se při změně velikosti zkratového výkonu zdroje změnil průběh proudu těsně po připojení zařízení, kdy vlivem poklesu napětí, k němuž ve druhém případě dochází, je velikost tohoto rázového proudu

nižší, zatímco u připojení k tvrdému zdroji dosahují jeho hodnoty až 7mi násobku hodnoty jmenovité, u připojení k měkké síti je to již jen kolem 5ti násobku. Dále simulace ukázaly, že velikost rázového proudu není závislá na velikosti rychlosti větru v okamžiku připojení k síti. Zajímavá je také analýza proudů z hlediska výskytu harmonických, viz příklad pro jednu z fází pro připojení k tvrdému zdroji v Obr. 8.10, kdy u první varianty vyšly hodnoty celkového zkreslení během první sekundy po startu pro jednotlivé fáze od 1,06 do 2,44 % a u druhé varianty od 0,75 do 2,02 %, což je způsobeno hlavně nižší hodnotou stejnosměrné složky. Od proudů se dále odvíjí rovněž velikosti a průběhy činného a jalového výkonu, sníženého díky použití kapacitní banky o výkonu 600 kVAr, jež jsou znázorněny na Obr. 8.8 a na Obr. 8.9, opět pro obě uvažované varianty zdroje napětí.

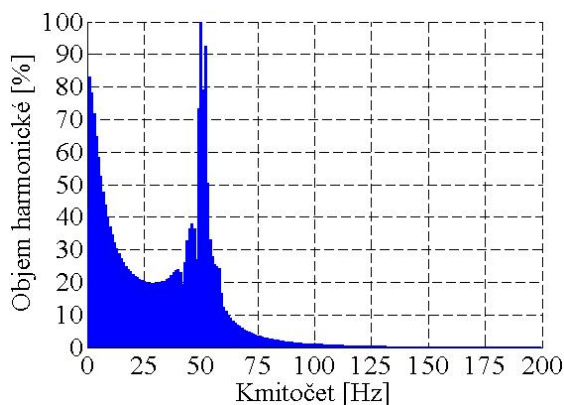


Obr. 8.8: Průběhy trojfázových výkonů

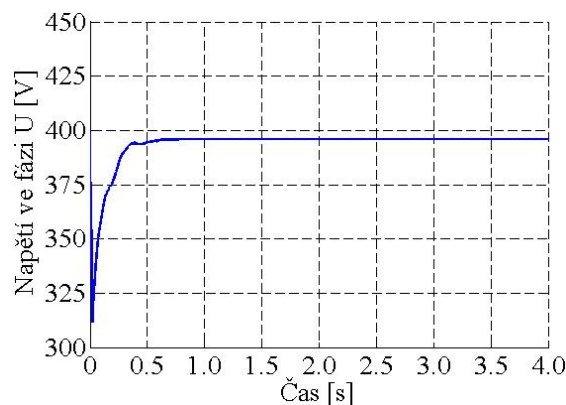


Obr. 8.9: Průběhy trojfázových výkonů

Z nich je znovu zřejmé, že při poklesu napětí v síti při připojení asynchronního generátoru nedochází ke vzniku tak velkého výkonového rázu, a to jak u činné dodávky tak u jalové spotřeby. Přesto však jsou hodnoty výkonových toků mezi větrnou elektrárnou a sítí při přímém připojení velmi velké, zejména kvůli magnetizaci stroje během několika prvních okamžiků po připnutí zařízení na napětí.



Obr. 8.10: Harmonické proudy

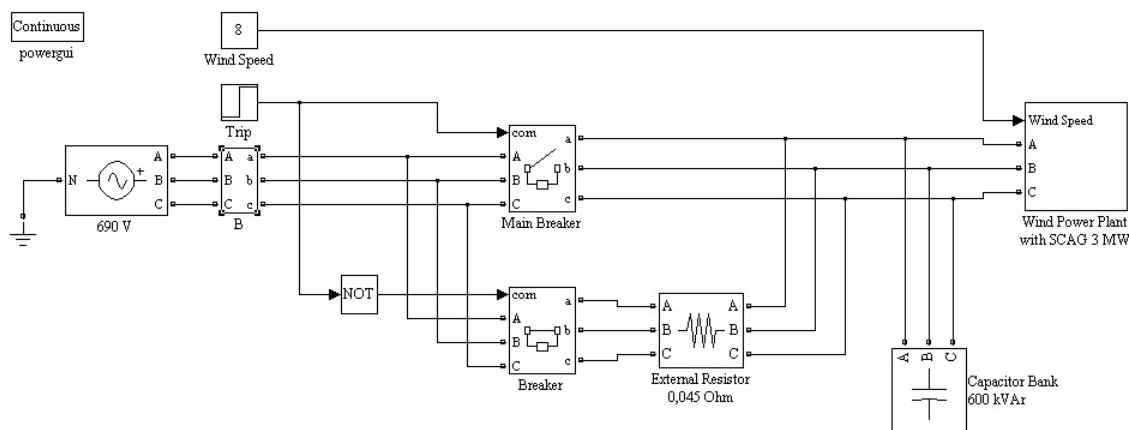


Obr. 8.11: Průběh fázového napětí

Poslední graf potom ukazuje pokles efektivní hodnoty napájecího napětí v jedné z fází vlivem přímého připojení větrné elektrárny ke zdroji s daným zkratovým výkonem, přičemž je jasné, že při vyšších zkratových výkonech, tedy pro připnutí ke tvrdšímu zdroji, bude tento pokles nižší a při připojení k měkčímu zdroji naopak tento pokles vzroste. Dále je z Obr. 8.11 vidět, že vlivem připojení větrné elektrárny s konstantními otáčkami dochází rovněž k trvalému poklesu napětí, hlavně následkem odběru jalového výkonu, typického pro provoz asynchronního generátoru.

8.2 Simulace připojení VTE přes externí rezistor

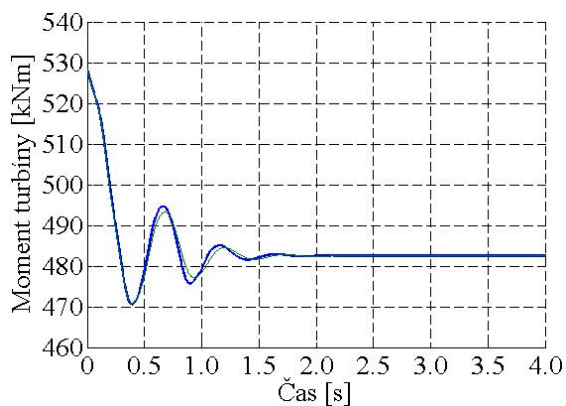
Další možností využitelnou pro připojování větrných elektráren s asynchronními generátory je, již zmiňované, připojení přes externí rezistor, kdy se zařízení po rozběhu na určitou velikost otáček generátoru připojí k síti nejprve přes externí prvek s daným činným odporem a dochází tak k omezení velikosti napětí, při němž se stroj magnetizuje. Jakmile však velikost protékajícího proudu klesne na velmi nízkou hodnotu, je externí rezistor odpojen vypínačem a elektrárna je přepojena do stavu přímého připojení k síti. Simulační schéma tohoto způsobu připojení ke zdroji napětí o uvedené velikosti v Simulinku je vidět na Obr. 8.12, přičemž kromě této varianty bylo opět simulováno také připojení ke zdroji s určitým zkratovým výkonem, reprezentující síť.



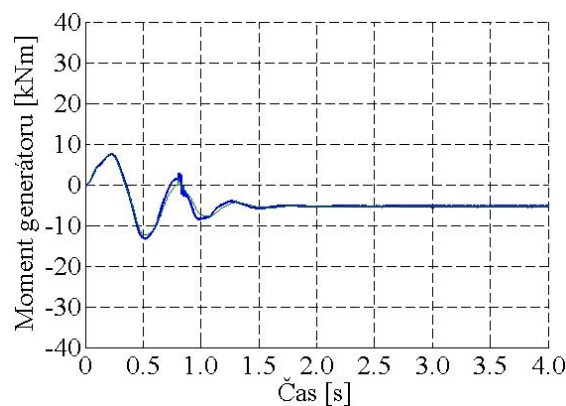
Obr. 8.12: Simulace připojení VTE přes externí rezistor

Pro tuto variantu bylo tedy simulováno připojení větrné elektrárny po rozběhu při dosažení velikosti otáček generátoru 1450 ot./min., stejně jako v předchozím případě, což odpovídá více než 95ti procentům hodnoty synchronních otáček, přičemž bylo sledováno chování větrné elektrárny v krátkém časovém úseku po připnutí zařízení ke zdroji napětí, nejprve tvrdému a následně opět ke zdroji s vnitřním zkratovým výkonem 50 MVA. Pro

připojení byl použit externí rezistor o velikosti $45 \text{ m}\Omega$, což je asi 40ti násobek hodnoty činného odporu vinutí statoru. Průběhy jednotlivých sledovaných veličin jsou pak znovu znázorněny v několika následujících grafech.

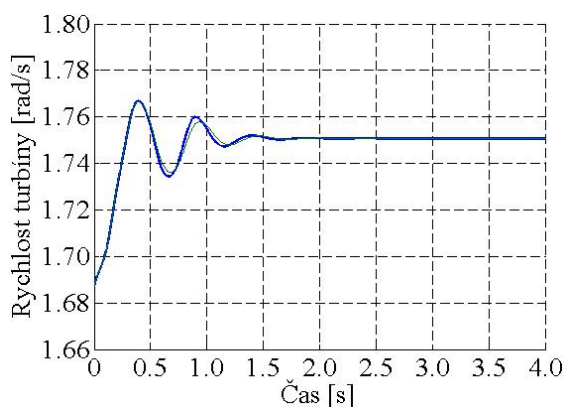


Obr. 8.13: Průběhy momentu turbíny

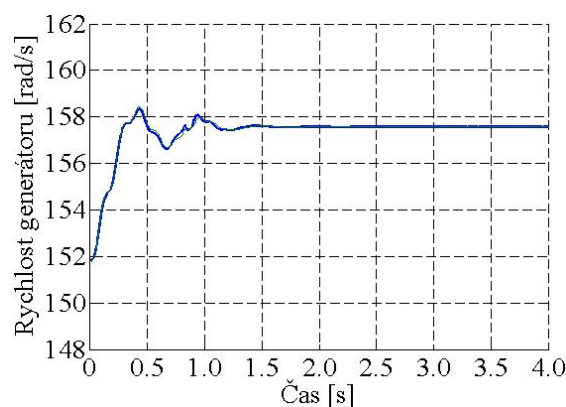


Obr. 8.14: Průběhy momentu generátoru

Na prvních dvou obrázcích jsou znovu vidět časové závislosti krouticích momentů působících na převodovku ze strany turbíny a generátoru, přičemž je patrné, na rozdíl od přímého připojení, že ani jeden z těchto průběhů nezávisí příliš na velikosti zkratového výkonu sítě, protože zde nedochází k takovému poklesu napájecího napětí v okamžiku připnutí zařízení, vzhledem k omezení protékajícího proudu vlivem externího rezistoru, a že taktéž nedochází k rychlému kolísání vnitřního elektromagnetického momentu stroje do vysokých hodnot těsně po připnutí, jako u přímého připojení. Ve srovnání s touto variantou je zřejmé, že přechodový děj je zde delší a trvá asi 2 sekundy.



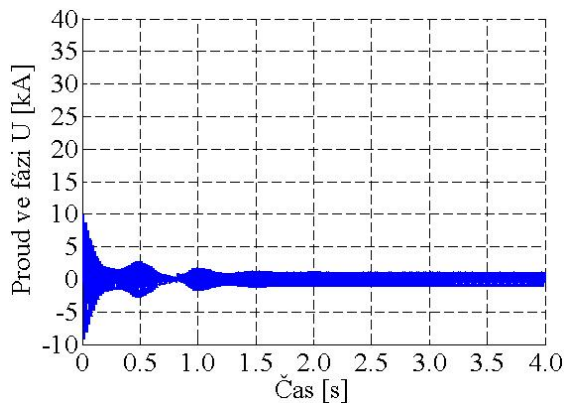
Obr. 8.15: Průběhy rychlosti turbíny



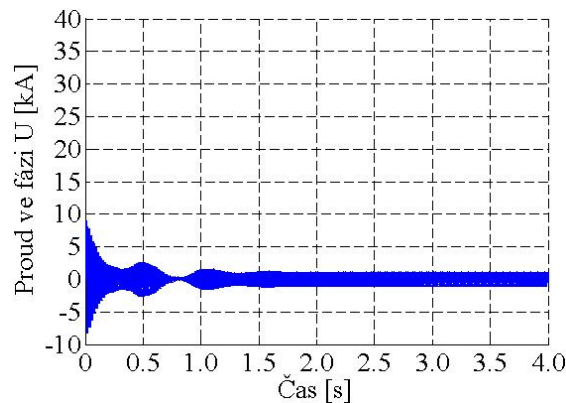
Obr. 8.16: Průběhy rychlosti generátoru

Z dalších dvou obrázků je znovu vidět, že velikost zkratového výkonu zdroje nemá prakticky vliv na průběhy úhlových rychlostí, což vyplývá z poměrně jemného startu bez rychlých výkyvů momentu generátoru. V porovnání s předchozím případem tak nedochází ani k tak výraznému kolísání otáček a ustálení po připnutí k síti je dosaženo mírně později,

jak již bylo zmíněno. To je vidět i z následujících grafů, které představují průběh jednoho z fázových proudů, viz. Obr. 8.17 a Obr. 8.18, pro připojení nejprve k tvrdému zdroji a následně ke zdroji s vnitřní impedancí, během tohoto času.

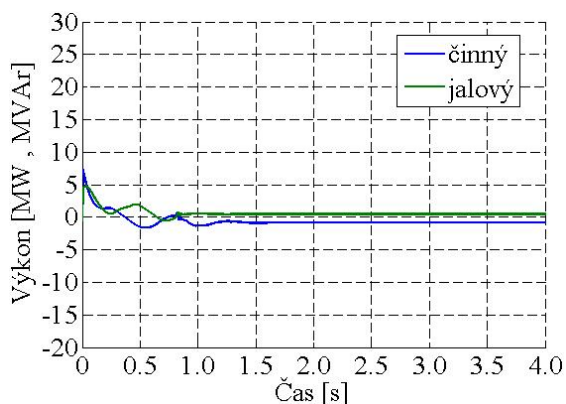


Obr. 8.17: Průběh proudu ve fázi

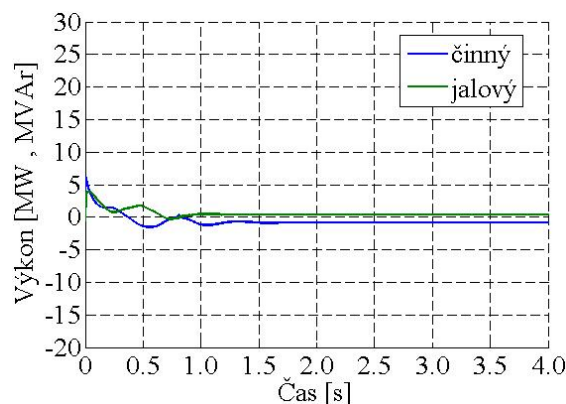


Obr. 8.18: Průběh proudu ve fázi

Na těchto grafech je vidět také okamžik, kdy velikost procházejícího proudu klesne na velmi malou hodnotu, v obou případech v čase 0,8 s, a kdy je externí rezistor odpojen při současném sepnutí hlavního vypínače. Oproti variantám přímého připojení je zjevné, že velikost proudu při připojení nedosahuje tak vysokých hodnot a pro danou velikost odporu prakticky nepřesáhne 2,5 násobek jmenovité hodnoty. Jedna z nejdůležitějších vlastností uvažovaného způsobu připojení tak je, že v okamžiku připnutí k síti nevzniká rázový proud o velkých hodnotách, čímž je působení zařízení na soustavu při startu mnohem menší. Při tom z analýzy harmonických proudů vyplývá, že celková hodnota zkreslení je vzhledem k předchozí variantě téměř shodná, spektrum pro jednu fázi pak ilustruje Obr. 8.21, přičemž u připojení k tvrdému zdroji vyšly jeho velikosti od 1,11 do 2,61 % a u připojení k měkké síti potom od 1,00 do 2,40 %, obě tedy mírně vyšší.

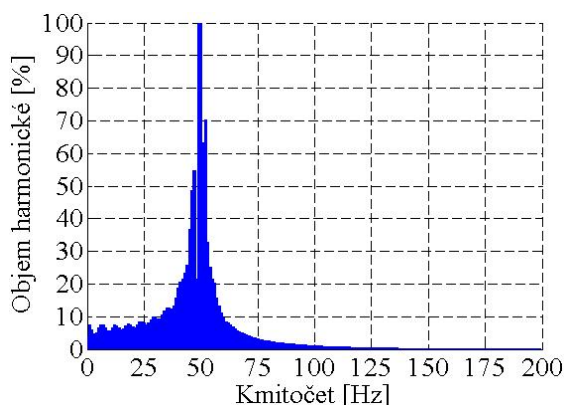


Obr. 8.19: Průběhy trojfázových výkonů

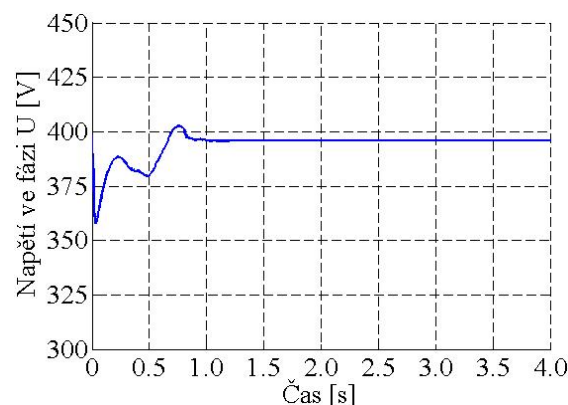


Obr. 8.20: Průběhy trojfázových výkonů

Zajímavé jsou také průběhy dodávaného činného a odebíraného jalového výkonu, znovu sníženého díky použití kapacitní banky o výkonu 600 kVAr, které jsou znázorněny na Obr. 8.19 a na Obr. 8.20, opět pro obě uvažované varianty zdroje napětí. Z nich je patrné, že výkonové toky nejsou již tak velké, ani při počáteční magnetizaci stroje, a proto je tento způsob připojení relativně jemný. V okamžiku přepojení jsou výkony minimální, a přechodový jev způsobený tímto zásahem je tak velmi malý a krátký.



Obr. 8.21: Harmonické proudy



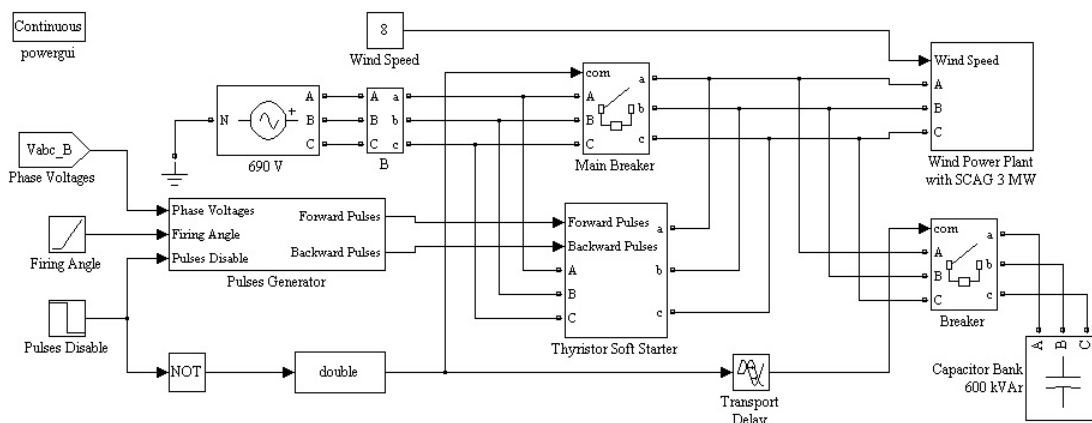
Obr. 8.22: Průběh fázového napětí

Poslední graf znovu ukazuje pokles efektivní hodnoty napájecího napětí v jedné z fází vlivem připojení větrné elektrárny ke zdroji s daným zkratovým výkonem, tentokrát přes externí rezistor, přičemž opět platí, že při vyšších hodnotách zkratového výkonu, tedy pro připnutí ke tvrdšímu zdroji, bude tento pokles nižší a při připojení k měkčímu zdroji naopak tento pokles vzroste. Dále je z Obr. 8.22 vidět, že oproti předchozímu případu je tento pokles mnohem nižší, následkem omezení procházejícího proudu a vlivem delší doby rozběhu trvá jeho opětovné zvýšení směrem k napětí trvale sníženému v důsledku připojení asynchronního generátoru poněkud déle. Kolem okamžik odpojení externího rezistoru jeho velikost dokonce na zlomek sekundy vzroste nad svou původní hodnotu, což je způsobeno chvilkovou dodávkou jalové energie.

8.3 Simulace připojení VTE pomocí soft-startéru

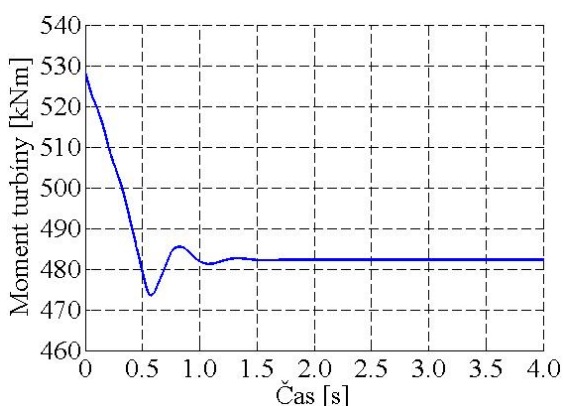
Nejpoužívanějším způsobem, který je využíván pro připojování větrných elektráren s asynchronním generátorem je připojení přes tyristorový soft-startér, kdy se zařízení po rozběhu na určitou velikost otáček generátoru připojí přes tento polovodičový prvek, který zajišťuje postupný nárůst napětí z nulové hodnoty, spínáním dvou antiparalelně zapojených tyristorů v každé fázi na základě velikosti spínacího úhlu. Ten může být řízen s ohledem na velikost protékajícího proudu, či nastavován postupným snižováním jeho velikosti z jedné

hodnoty na druhou. V okamžiku, kdy soft-startér přestává omezovat napětí, dochází k jeho překlenutí hlavním vypínačem a toto zařízení se na dalším provozu větrné elektrárny již nepodílí. Potom je teprve připojena kapacitní kompenzace. Simulační schéma uvedeného způsobu připojení ke zdroji napětí o dané velikosti v programu Simulink je znázorněno na Obr. 8.23, přičemž velikost spínacího úhlu je nastavována postupným poklesem ze své maximální hodnoty 90° na hodnotu 35° pro plné připojení.

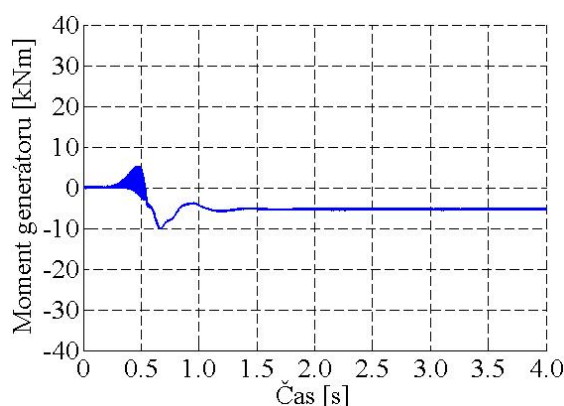


Obr. 8.23: Simulace připojení VTE přes soft-startér

Pro tuto variantu bylo tedy simulováno připojení větrné elektrárny po rozběhu při dosažení velikosti otáček generátoru 1450 ot./min., stejně jako v předchozím případě, což odpovídá více než 95ti procentům hodnoty synchronních otáček, přičemž bylo sledováno chování větrné elektrárny v krátkém časovém úseku po připnutí zařízení k tvrdému zdroji napětí. Průběhy sledovaných veličin jsou opět vidět v následujících grafech.



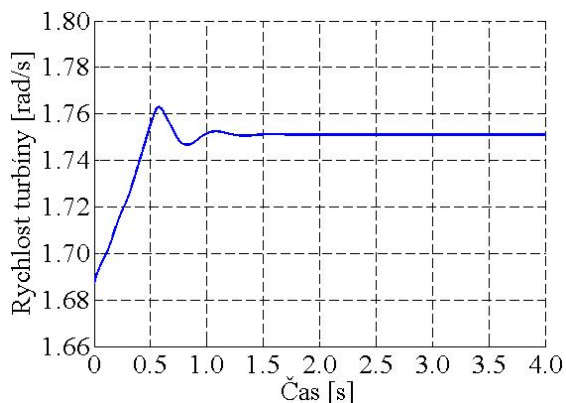
Obr. 8.24: Průběh momentu turbíny



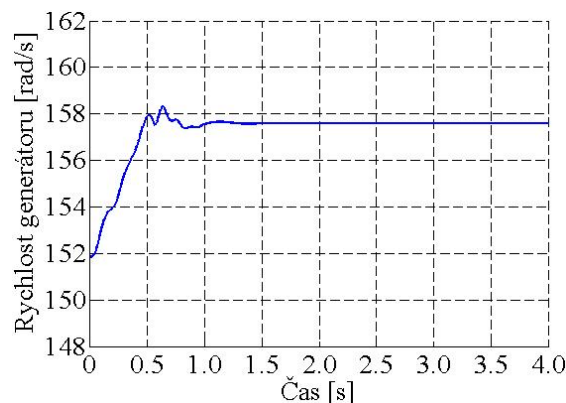
Obr. 8.25: Průběh momentu generátoru

Na prvních dvou obrázcích jsou znovu vidět časové závislosti krouticích momentů působících na převodovku ze strany turbíny a generátoru, přičemž je vidět, že mechanický moment turbíny má podobný průběh jako u předchozích variant, zatímco průběh momentu

generátoru se liší zejména svým velmi rychlým kolísáním v krátkém časovém úseku, které je způsobeno tyristorovým spínáním. Oba průběhy také ukazují, že hodnoty momentů se drží v užších mezích než u předchozích variant. Celý přechodový děj potom trvá přibližně 1,5 sekundy, tedy jako u přímého připojení k síti.

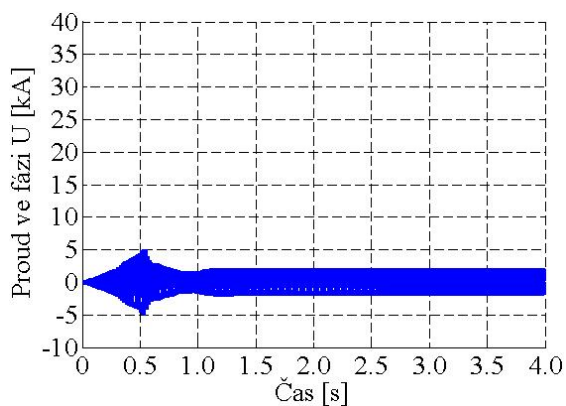


Obr. 8.26: Průběh rychlosti turbíny

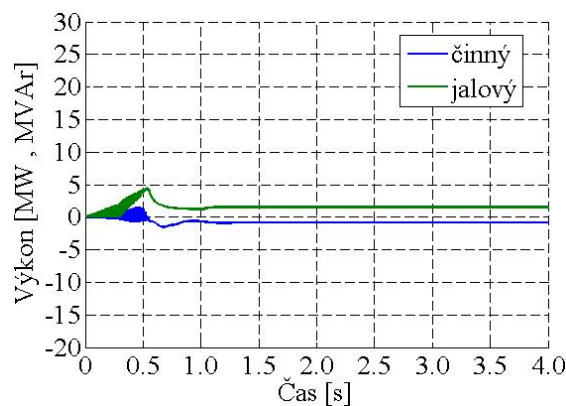


Obr. 8.27: Průběh rychlosti generátoru

Z dalších dvou obrázků je rovněž vidět, že start při použití tohoto systému je také relativně měkký, podobně jako při využití externího rezistoru, kdy nedochází k přílišným výkyvům v úhlových rychlostech. To je patrné i z průběhů fázového proudu a trojfázových výkonů, které jsou s velikostí otáček úzce spjaty a jejichž závislosti jsou ukázány v grafech na Obr. 8.28 a na Obr. 8.29, pro připojení k tvrdému zdroji.



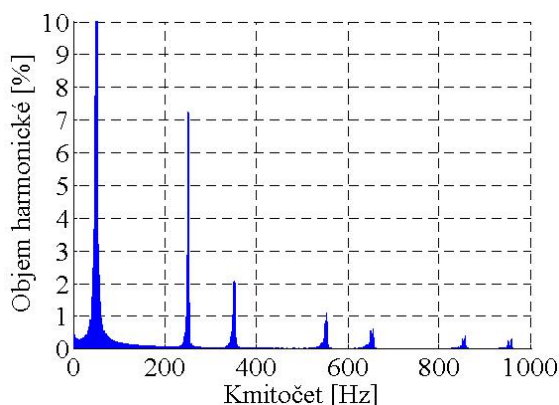
Obr. 8.28: Průběh proudu ve fázi



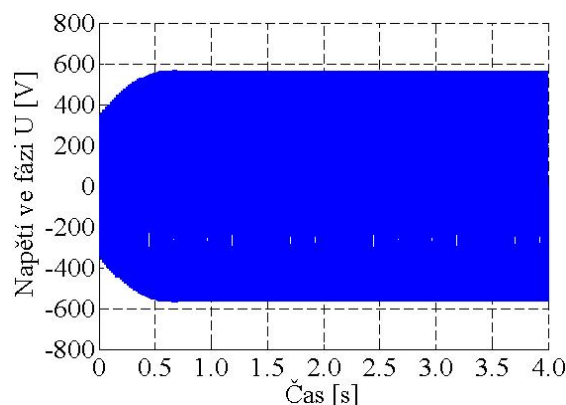
Obr. 8.29: Průběhy trojfázových výkonů

Na prvním z nich je pak vidět, že během řízeného připojení dochází k postupnému nárůstu proudů v jednotlivých fázích a jejich hodnoty, i bez využití další regulace jejich hodnot, prakticky je mírně překročí jmenovitou velikost. Díky tomu rovněž nedochází ke vzniku velkých výkonových toků mezi elektrárnou a sítí. Na druhou stranu se ale tento způsob připojení vyznačuje vysokou mírou výskytu harmonických proudů, právě kvůli velmi rychlému spínání během startu, a celková hodnoty zkreslení vyšly v tomto případě

mezi 7,32 a 7,37 %, což je oproti předchozím variantám mnohonásobně více, zejména v oblasti vyšších frekvencí, viz. Obr. 8.30 níže. Z grafu výkonů je pak vidět hlavně vysoká míra jejich kolísání během startu, kdy vlivem tyristorového spínání dochází k okamžitým změnám napětí a proudů v jednotlivých fázích. Hodnota jalového výkonu není v tomto případě snížena kapacitní kompenzací, která se připojuje až po ukončení rozběhu a na jeho průběhu se tudíž nijak nepodílí.



Obr. 8.30: Harmonické proudy



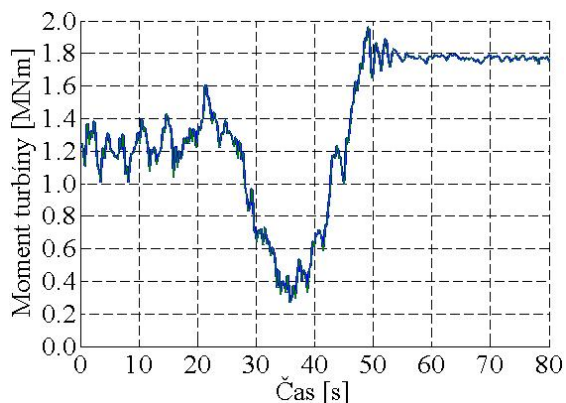
Obr. 8.31: Průběh statorového napětí

Poslední graf pak ukazuje postupný nárůst napětí ve fází přiváděného v průběhu startu na stator, viz. Obr. 8.31. Ačkoli nebyla provedena simulace připojení k měkké síti, je z předchozích průběhů patrné, že v případě použití soft-startéru, oproti přímému připojení nebo využití externího rezistoru, zjevně nedochází ke vzniku velkých proudů a výkonů v okamžiku připnutí asynchronního generátoru, které by způsobovaly výrazný přechodný pokles napětí. Trvalý pokles napětí přitom je v tomto případě, po připojení kompenzace jalového výkonu, zákonitě stejný jako u předchozích variant.

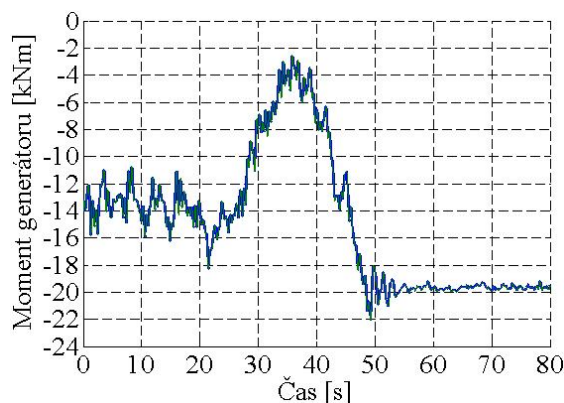
8.4 Simulace provozu VTE s konstantními otáčkami

Samotný provoz větrné elektrárny s asynchronním generátorem byl simulován pro průběh rychlosti větru odpovídající Obr. 7.6, tedy s výchozí průměrnou rychlostí $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, postupným nárůstem její hodnoty o $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a současným výkyvem o velikosti $-3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ mezi 20 a 60 sekundou, pro výšku 90 m nad zemským povrchem o drsnosti 0,01. Simulační schéma vypadá v tomto případě stejně, jako u simulace přímého připojení. Provoz větrné elektrárny byl znovu simulován pro její připojení na tvrdý zdroj napětí a posléze na zdroj se zkratovým výkonem o velikosti 50 MVA, představující měkkou síť. Výsledné průběhy jednotlivých veličin jsou znázorněny v následujících několika grafech, přičemž z důvodu porovnání obou simulovaných variant, jsou opět průběhy odpovídající připojení k tvrdému

zdroji silnou čarou a průběhy pro připojení k měkké síti čarou tenkou. Jak je z těchto obrázků vidět, nejsou tyto závislosti téměř ovlivněny velikostí zkratového výkonu soustavy a výrazně ovlivněnými veličinami jsou v tomto směru jen pokles napětí a rázový proud. Na prvních grafech jsou vidět momenty ze strany turbíny a generátoru.

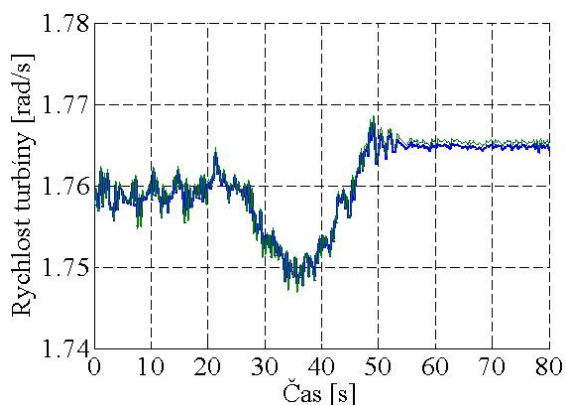


Obr. 8.32: Průběhy momentu turbíny

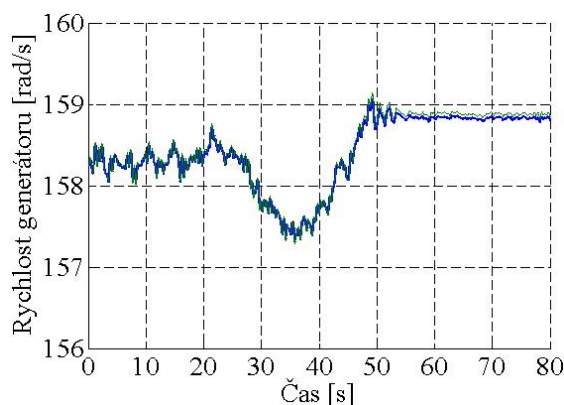


Obr. 8.33: Průběhy momentu generátoru

Oba tyto obrázky pak ukazují, že velikosti momentů jsou velmi závislé na rychlosti větru působící na turbínu a v podstatě kopírují její velice proměnlivý charakter. Dále je zde patrné, že oba tyto průběhy při použití aerodynamické regulace založené na řízení velikosti výkonu, logicky nezávisí na velikosti zkratového výkonu sítě, protože nedochází k regulaci velikosti otáček, ale k omezování mechanického momentu ve všech případech na stejnou velikost, při níž je dodáván jmenovitý výkon.



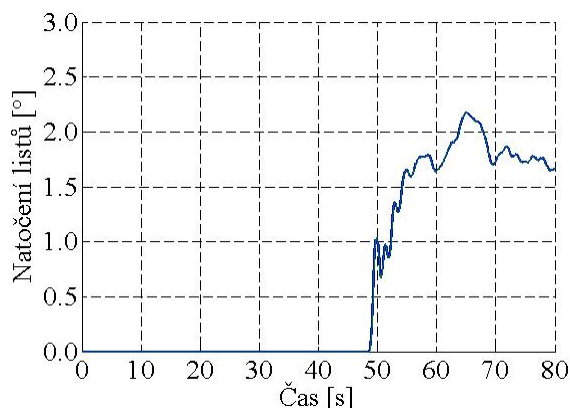
Obr. 8.34: Průběhy rychlosti turbíny



Obr. 8.35: Průběhy rychlosti generátoru

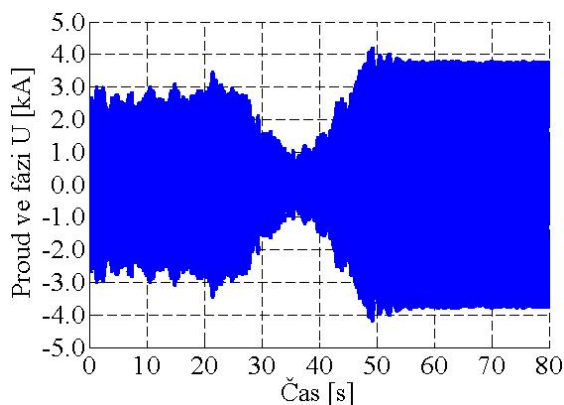
Znárodné závislosti úhlových rychlostí potom ukazují, že během provozu při rychlosti větru odpovídající jmenovitému výkonu, se varianty téměř překrývají, zatímco po překročení této velikosti dochází k jeho omezování, přičemž z důvodu poklesu napětí platí pro druhou variantu poněkud jiná hodnota jmenovité rychlosti, vyšší než pro první variantu při jmenovitém napětí sítě. V případě použití řízení úhlu natočení listů v závislosti na

hodnotách otáček by byla situace opačná, v obou případech by docházelo k omezování jejich velikosti na společnou jmenovitou hodnotu a díky tomu by byl vnitřní moment stroje do měkké sítě nižší než do tvrdé, z již zmíněného důvodu poklesu napětí. Reakci regulace turbíny je vidět na Obr. 8.36, ukazujícího změny ve velikosti úhlu natočení, rovněž pro obě varianty shodné, při regulaci na základě porovnávání výkonu.

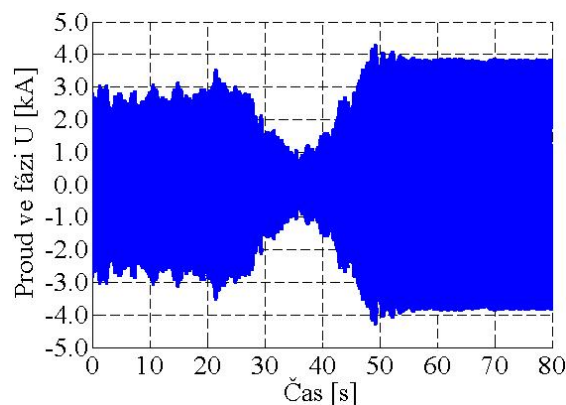


Obr. 8.36: Průběhy úhlu natočení listů

Další obrázky potom ukazují průběhy jednoho ze satorových proudů, pro připojení k tvrdému zdroji Obr. 8.37 a k měkké síti Obr. 8.38, které znovu potvrzují, že zkratový výkon sítě neovlivňuje v tomto případě jejich velikost a že jejich průběhy jsou odrazem průběhu rychlosti větru a dochází tak k jejich neustálému kolísání.



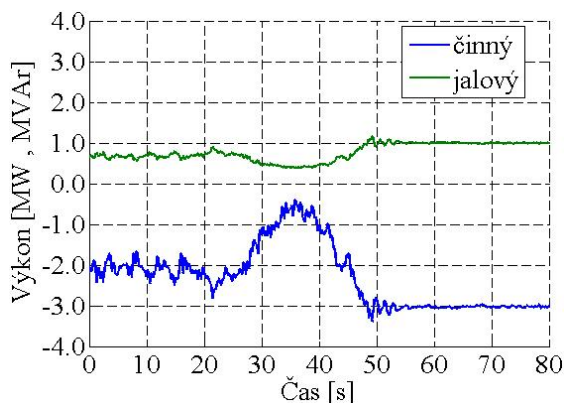
Obr. 8.37: Průběh proudu ve fázi



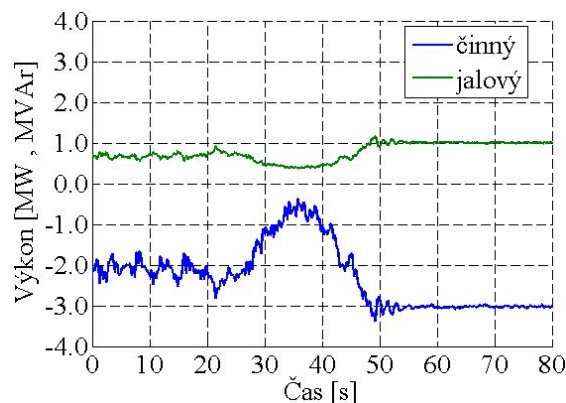
Obr. 8.38: Průběh proudu ve fázi

Z analýzy harmonických proudů následně vyplývá, že celková hodnota zkreslení je při samotném provozu větrné elektrárny s konstantními otáčkami prakticky nulová, a sice pro obě zkoušené varianty, protože na jejím chodu se nepodílí žádné další zařízení, hlavně pak žádný prvek výkonové elektroniky. Kolísání velikostí proudů je přitom vyšší při chodu pod jmenovitou hodnotou výkonu, protože aerodynamická regulace svým působením proti změně momentu částečně stabilizuje průběhy jednotlivých veličin, tedy i proudů a výkonů,

jejichž závislosti jsou vidět na Obr. 8.39 a na Obr. 8.40, z nichž je dále vidět, že závislost činného výkonu na rychlosti větru je mnohem silnější než závislost výkonu jalového, jehož velikost je tak mnohem stabilnější. Grafy pro obě uvažované varianty jsou znovu prakticky shodné, z již několikrát zmíněných důvodů.

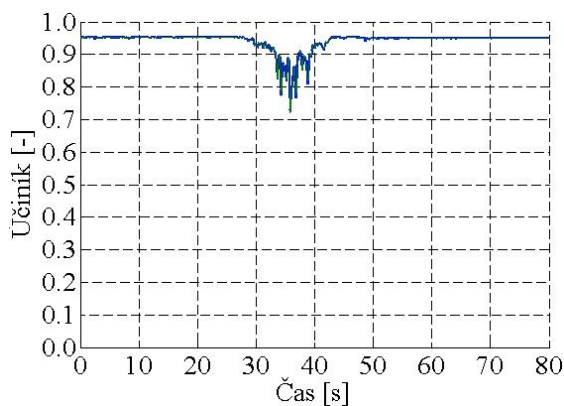


Obr. 8.39: Průběhy trojfázových výkonů

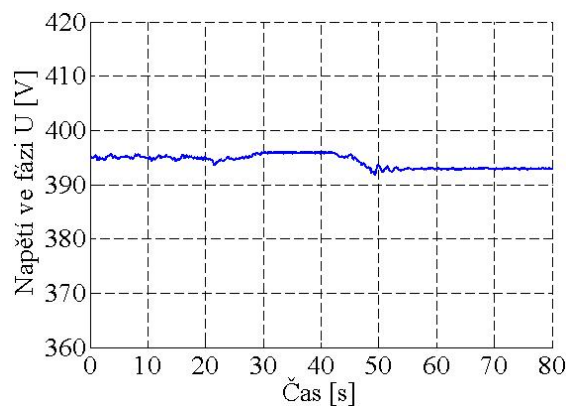


Obr. 8.40: Průběhy trojfázových výkonů

Od těchto dvou veličin se také odvíjí časová závislost účinníku, která je znázorněna na Obr. 8.41, ze kterého je zjevné, že při nižších rychlostech působícího větru dochází, v souladu s předchozími grafy, k výraznému poklesu jeho hodnoty a pro jeho udržení je tedy potřeba, kromě kapacitní banky, jiná proměnná kompenzace jalového výkonu, která by změny regulovala a udržovala účinník na přijatelné hodnotě.



Obr. 8.41: Průběh účinníku

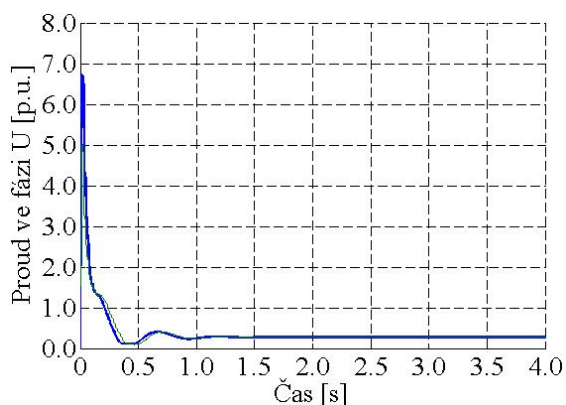


Obr. 8.42: Průběh fázového napětí

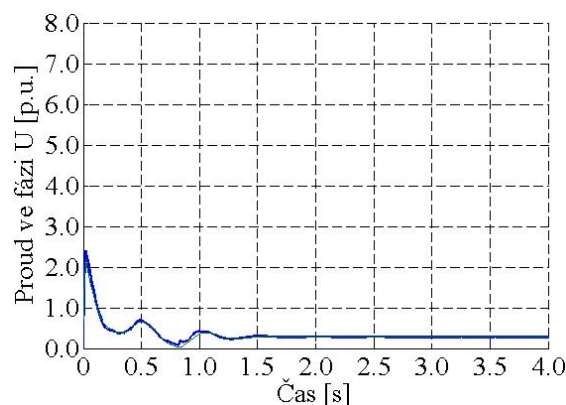
Poslední graf potom ukazuje změny efektivní hodnoty napětí ve fázi během chodu větrné elektrárny připojené ke zdroji se zkratovým výkonem 50 MVA, z něhož je patrný poměrně výrazný trvalý pokles napětí, který se snižuje s nárůstem zkratového výkonu a s poklesem rychlosti větru. Je zde vidět také kolísání hodnoty napětí způsobené vlivem kolísání činných a jalových výkonových toků.

8.5 Simulace připojení a provozu větrné farmy

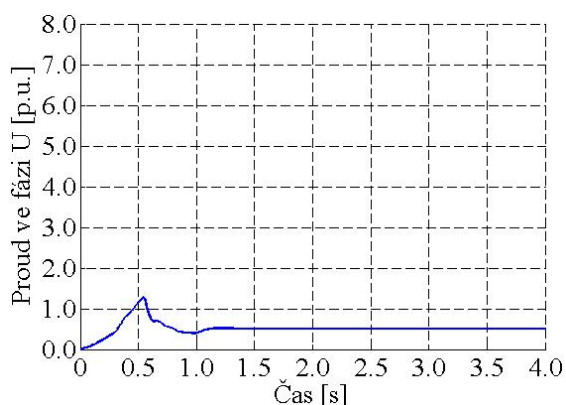
Pro analýzu působení větrné farmy na elektrizační soustavu byla zvolena větrná elektrárna se stejnými parametry jako v předchozích případech, přičemž byly provedeny simulace připojení a provozu skupiny 10ti zařízení o celkovém výkonu 30 MW nejprve k tvrdému zdroji a následně ke zdroji s vnitřní impedancí se zkratovým výkonem 500 MVA představujícímu měkkou síť. Byly tedy simulovány podobné situace jako u jednotlivého zařízení pro připojení všech strojů, celé farmy, v jednom okamžiku, což odpovídá nejhorší možné situaci a provoz při proměnlivé rychlosti větru. Výsledky jsou vidět v následujících grafech, pro připojení k tvrdému zdroji silně a k měkké síti tence. Jejich první skupina, viz. Obr. 8.43 až Obr. 8.46, ukazuje efektivní hodnoty proudů jedné z fází v poměrných jednotkách, při jednotlivých způsobech připnutí a během provozu.



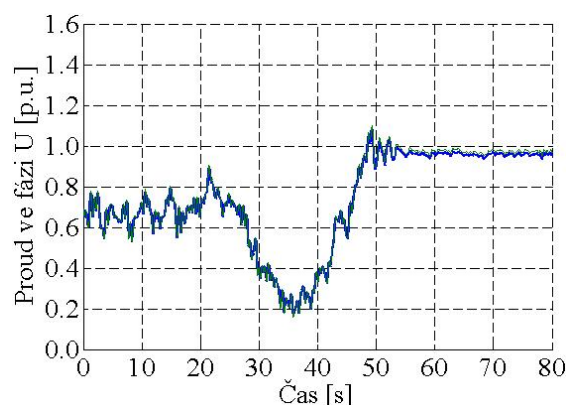
Obr. 8.43: Přímé připojení



Obr. 8.44: Připojení přes externí rezistor



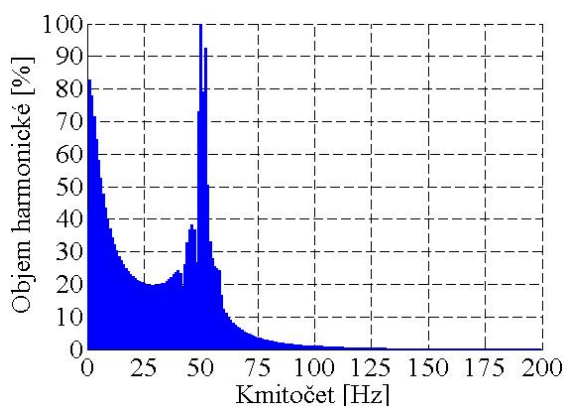
Obr. 8.45: Připojení přes soft-startér



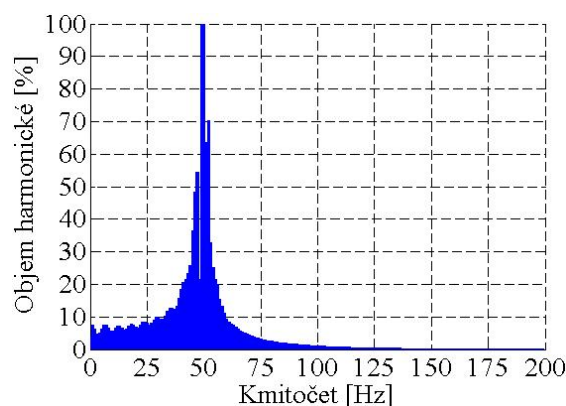
Obr. 8.46: Provoz větrné farmy

Z těchto průběhů je vidět, že podobně, jako u připojení jednotlivé větrné elektrárny s asynchronním generátorem, dochází při přímém připnutí všech strojů najednou ke vzniku rázového proudu, jehož hodnota může být v závislosti na tvrdosti sítě až 7mi násobně vyšší

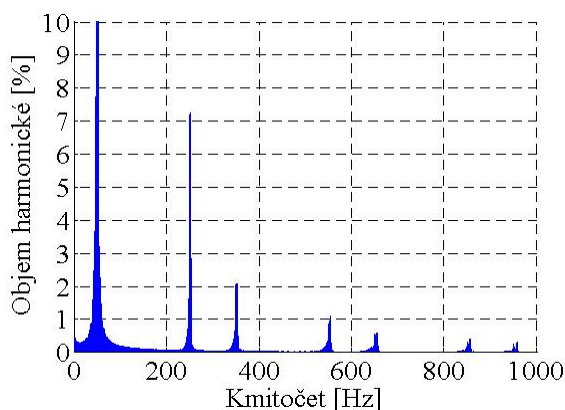
než velikost součtu jmenovitých proudů celé farmy. Pro připojení přes externí rezistor opět platí, že rázový proud prakticky nepřekročí 2,5 násobek této hodnoty a tento způsob, díky čemuž je tento způsob připojení mnohem šetrnější. Pro připojení přes soft-startér na tvrdou síť je pak znovu vidět, že dochází pouze k postupnému nárůstu proudu během startu a není překročen ani 1,5 násobek jmenovité hodnoty. U samotného provozu je nakonec zřejmé, že velikost proudu závisí velmi na rychlosti větru a při připojení k měkké síti dosahuje jeho hodnota pro jmenovitý výkon větší velikosti než pro provoz na tvrdém zdroji, vzhledem k poklesu napětí. Všechny tyto hodnoty, kromě případu připojení přes soft-startér, jsou sníženy kapacitní kompenzací o souhrnné velikosti 6 MVAR pro celou farmu, a proto není při provozu dosažena skutečná jmenovitá hodnota.



Obr. 8.47: Přímé připojení



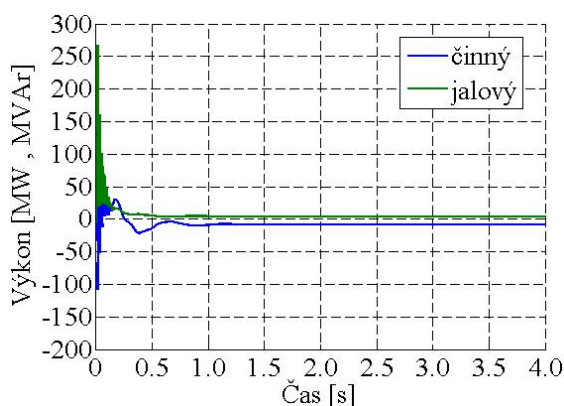
Obr. 8.48: Připojení přes externí rezistor



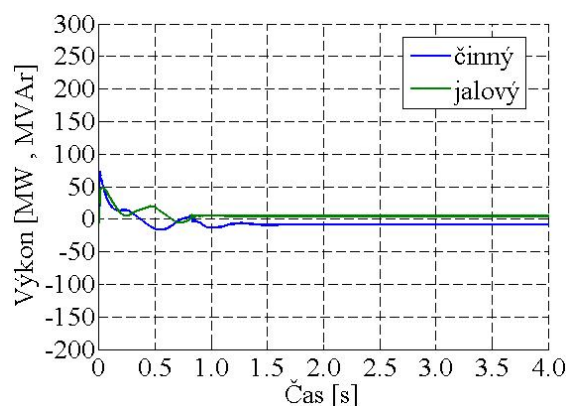
Obr. 8.49: Připojení přes soft-startér

Z analýzy harmonických, jejíž příklady pro připojení a provoz na tvrdém zdroji jsou znázorněny na Obr. 8.47 až Obr. 8.49, následně vyplývá, podobně jako u připojení a provozu jednotlivé elektrárny, že u přímého připojení je zkrácení proudů harmonickými během první sekundy velmi nízké, pro jednotlivé fáze od 1,06 do 2,44 %, respektive od 0,75 do 2,08 %, podobně jako je tomu u použití externího rezistoru, kde jsou tyto hodnoty

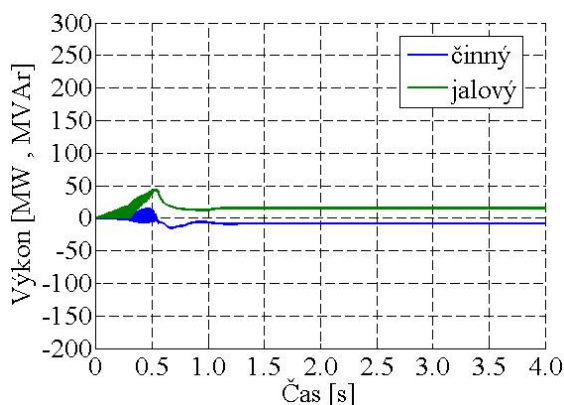
pro připojení k tvrdému zdroji od 1,11 do 2,61 %, případně pro připojení k měkké síti od 0,85 do 2,14 %. Pro využití soft-startéru naopak vyšly hodnoty celkového zkreslení proudů pro připojení k tvrdému zdroji kolem 7,35 %, což je největší nevýhodou tohoto způsobu připojení. Analýza dále potvrdila, že při provozu farmy větrných elektráren s konstantními otáčkami se v podstatě žádné zkreslení harmonickými proudy neobjevuje, protože se na tomto chodu nepodílí žádné vnější prvky, které by mohly být jejich zdrojem. Analogických výsledků, jak při simulacích jednotlivé větrné elektrárny, bylo dosaženo rovněž v oblasti výkonových toků mezi elektrárnou a zdrojem napětí, tedy odebíraného jalového výkonu, sníženého ve všech případech kromě použití soft-startéru o kompenzační výkon kapacitní banky, a generátorem dodávaného činného výkonu.



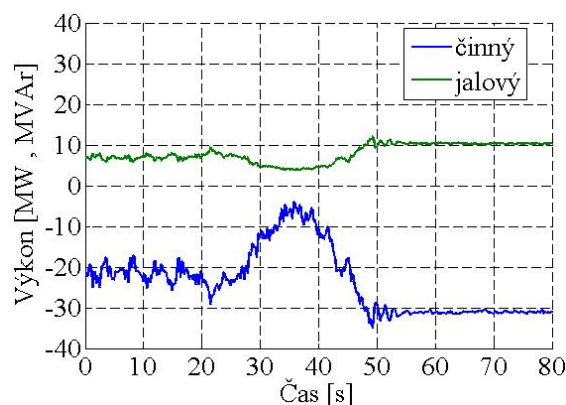
Obr. 8.50: Přímé připojení



Obr. 8.51: Připojení přes externí rezistor



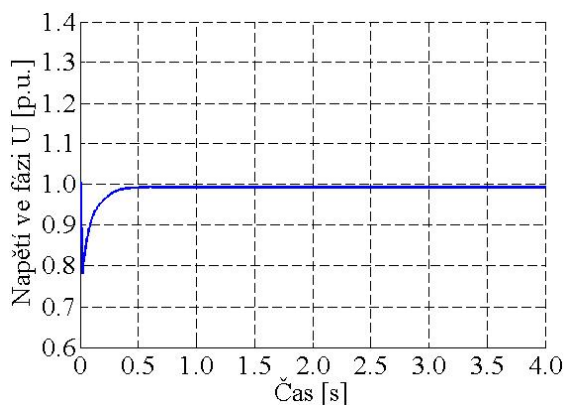
Obr. 8.52: Připojení přes soft-startér



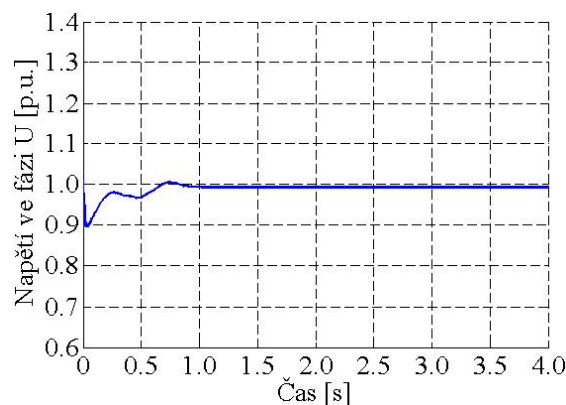
Obr. 8.53: Provoz větrné farmy

Jejich průběhy jsou znázorněny na Obr. 8.50 až Obr. 8.53, pro připojení k tvrdé síti a znovu ukazují, že u připojení přes externí rezistor či soft-startér nedochází ke vzniku vysokých toků v okamžiku startu, díky čemuž jsou tyto dva způsoby mnohem šetrnější a jejich vliv na síť je mnohem menší než v případě přímého připojení, kdy ke vzniku těchto velkých výkonů dochází. Z průběhu výkonů při provozu farmy je opět viditelná relativně

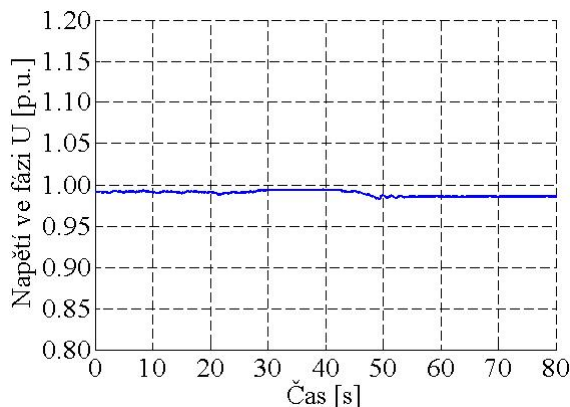
silná závislost zejména činného výkonu na rychlosti větru, jež je při dosažení jmenovitých hodnot zmírněna činností aerodynamické regulace. Závislost jalového výkonu potom není tak výrazná, což má za následek velké kolísání hodnoty účinníku při nižších rychlostech větru. Poslední skupinu grafů nakonec tvoří průběhy efektivních hodnot fázových napětí v poměrných jednotkách při připojení a provozu na měkké síti, viz. Obr. 8.54 až Obr. 8.56, z nichž vyplývá, podobně jako u simulací jedné větrné elektrárny, že při připojení dochází v důsledku velikosti zkratového výkonu sítě k poklesu napětí v okamžiku připojení o různé velikosti pro různé způsoby připnutí v důsledku výkonových toků.



Obr. 8.54: Přímé připojení



Obr. 8.55: Připojení přes externí rezistor



Obr. 8.56: Provoz větrné farmy

V samotném provozu se následně projevuje trvalý pokles napětí kvůli připojení zdroje, jehož velikost je, do jisté míry, také závislá na rychlosti větru a je tak třeba celou farmu ještě kompenzovat pomocí některého zařízení schopného reagovat na tyto změny a takto regulovat velikost napětí a rovněž hodnotu účinníku. Pro případ připojování farmy postupně, tedy připínání jednotlivých elektráren s určitým časovým zpožděním, by potom situace prakticky odpovídala simulacím jednotlivého zařízení a start farmy by tak byl, díky nižším proudům, výkonům a poklesům napětí v okamžiku připojení, šetrnější.

9 Závěr

Problematika využívání větrných elektráren je, stejně jako je tomu v případě jiných druhů zdrojů obnovitelné energie, poměrně rozsáhlá a obsahuje řadu různých řešení, která využívají rozdílné principy. Nejzávažnější oblastí v rámci uplatnění těchto zdrojů v sektoru elektroenergetiky je potom jejich připojování do elektrizačních soustav a s tím spojený vliv jejich provozu na chod těchto elektroenergetických systémů.

V této práci se mi podařilo vytvořit stručný a ucelený přehled dané problematiky zahrnující jednotlivé technologie využití energie větru pro výrobu elektřiny, požadavky na vlastnosti těchto zdrojů s pohledu kvality elektřiny a regulace distribučních či přenosových soustav, popis nepříznivých vlivů způsobovaných v těchto sítích jejich připojováním nebo provozem a rovněž souhrn moderních přístupů ke struktuře a provozu elektroenergetických soustav doplněný o přehled současných technologií v oblasti akumulace elektřiny, které by měly být komplexním řešením situace v tomto sektoru.

Velmi podstatnou část práce pak tvoří matematický popis jednotlivých částí větrné elektrárny s asynchronním generátorem s konstantními otáčkami a jejich počítačový model v Simulinku, jednom z nástrojů matematického programu Matlab. Jedná se tedy o modely větru, větrné turbíny, aerodynamické regulace, asynchronního generátoru a hnacího ústrojí s převodovkou, jež dohromady tvoří model celé větrné elektrárny, a model soft-startéru, který je často využíván při připojování těchto zdrojů, při jejichž tvorbě jsem vycházel jak z obecných znalostí fyzikálních principů jednotlivých prvků, tak i z nejnovějších poznatků jejich zkoumání a z jejich specifických vlastností.

Nejdůležitějším přínosem práce je dále kapitola věnující se simulacím připojení a provozu větrné elektrárny a farmy do elektrické sítě představované jednak tvrdým zdrojem napětí a jednak také měkkým zdrojem s vnitřní impedancí a určitou velikostí zkratového výkonu. Z jejich výsledků potom vyplývá zejména to, že z hlediska způsobů připojení se jako nejšetrnější jeví využití externího rezistoru, při němž nedochází ke vzniku rázového proudu o značných velikostech, respektive k velkým výkonovým tokům, jako u připojení přímého, ani ke vzniku poměrně velkého množství harmonických proudů, jako v případě použití soft-startéru, díky čemuž nedochází v okamžiku připojení k výraznému působení zařízení na soustavu, zejména z hlediska krátkodobého poklesu napětí. Nejvyšší rázové proudy se tedy objevují při připojení přímém, kdy je asynchronní generátor připnut přímo k soustavě, což způsobuje, vlivem jeho magnetizace, vznik velkých výkonů a na měkké síti

potom velmi výrazný dočasný pokles napětí, a proto není tento způsob pro připojování větších zařízení příliš vhodný. Nejnižší pokles pak způsobuje připojení přes tyristorový soft-startér, kdy dochází k postupnému připojení a pozvolnému nárůstu proudu během startu, přičemž však vzniká také velké množství harmonických, jež mají negativní vliv, a proto je třeba tento systém doplnit o filtr snižující celkové zkreslení proudu. Při samotném provozu bylo prokázáno velmi výrazná závislost všech sledovaných veličin na častých změnách rychlosti větru. Větrná elektrárna s konstantními otáčkami se proto vyznačuje proměnlivým charakterem dodávky elektrické energie a rovněž velikosti účinníku, který je kompenzován pouze kapacitní bankou. V tomto směru je určitě řešením využití některého ze způsobů proměnlivé kompenzace jalového výkonu. Z hlediska harmonických proudů se provoz větrné elektrárny s konstantními otáčkami vyznačuje jejich prakticky nulovým výskytem, hlavně díky přímému připojení k elektrické síti bez využití dalších, zejména výkonových, prvků. Z pohledu větrné farmy, jakožto skupiny větrných elektráren je pak situace analogická a v případě současného připojení celé farmy najednou tedy platí stejné závěry jako pro jednotlivá zařízení. Velikost větrné farmy, kterou lze připojit pak závisí na velikosti zkratového výkonu sítě, jemuž následně také odpovídá pokles napětí způsobený připojením zdroje. Při postupném připojování jednotlivých elektráren v rámci farmy je ale možné připojovat farmu do relativně měkčí sítě, protože v okamžiku připojení jednoho zařízení se vždy projeví rázové proudy, výkony a harmonické vznikající pouze následkem jeho připnutí a vedené výsledky jsou přitom částečně platné i pro připojování elektráren s proměnnými otáčkami využívajícími dvojité napájený asynchronní generátor, protože při samotném připnutí elektrárny k soustavě a následném krátkém přechodovém jevu se její regulace rotorovým proudem v podstatě nemá příležitost uplatnit.

Na tyto modely a simulace je následně možné navázat zejména vytvořením modelu řízení napájení do rotoru asynchronního generátoru a dotvořením modelu větrné elektrárny s proměnnými otáčkami, která díky využití dvojité napájeného stroje umožňuje regulaci výkonů a účinníku, dále vytvořením modelu větrné elektrárny se synchronním generátorem a simulacemi připojování a provozu obou těchto zařízení.

Informační zdroje

Literatura

- [01] Rychetník, V. - Pavelka, J. - Janoušek, J.: Větrné motory a elektrárny, ČVUT, Praha 1997, ISBN 80-01-01563-7
- [02] Ackermann T.: Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons Inc., USA 2005, ISBN 0-470-85508-8
- [03] Heier, S.: Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, John Wiley & Sons Inc., USA 1998, ISBN 0-471-97143-X
- [04] Noskievič P.: Modelování a identifikace systémů, MONTANEX a.s., Ostrava 1999, ISBN 80-7225-030-2
- [05] Štěpina J.: Prostorové fázory jako základ teorie elektrických strojů, ZČU, Plzeň 1993, ISBN 80-7082-089-6
- [06] Škorpil, J. - Mertlová, J. - Willmann, B.: Obnovitelné zdroje a jejich začleňování do energetických systémů, publikace ke grantovému projektu GAČR 102/06/0132, ZČU, Plzeň 2008, ISBN 978-80-7043-733-9
- [07] Shinozuka, M. - Jan, C. M.: Digital Simulation of Random Processes and its Applications, In: Journal of Sound and Vibration, 1972, r. 25, č. 1, s. 111-128, ISSN 0022-460X
- [08] Ghamidi, M. - Ramezani, A. - Mohammadimehro, M.: Soft Starter Modeling for an Induction Drive Starting Study in an Industrial Plant, In: 2011 UKSim 5th European Symposium on Computer Modeling and Simulation, Madrid 2011, s. 245-250, ISBN 978-1-4673-0060-5
- [09] Thiringer, T.: Grid-Friendly Connecting of Constant-Speed Wind Turbines Using External Resistors, In: IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, r. 17, č. 4, s. 537-542, ISSN 0885-8969

Normy a předpisy

- [10] ČSN EN 50160: Charakteristiky napětí el. energie dodávané z veřejné distribuční sítě
- [11] PNE 33 3430-0: Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů DS
- [12] PNE 33 3430-1: Parametry kvality el. energie: Harmonické a mezi-harmonické
- [13] PNE 33 3430-2: Parametry kvality el. energie: Kolísání napětí
- [14] PNE 33 3430-3: Parametry kvality el. energie: Nesymetrie napětí

- [15] PNE 33 3430-4: Parametry kvality el. energie: Poklesy a krátká přerušení napětí
- [16] PNE 33 3430-5: Parametry kvality el. energie: Přejížděná přepětí - impulsní rušení
- [17] PNE 33 3430-6: Parametry kvality el. energie: Omezení zpětných vlivů na HDO
- [18] PNE 33 3430-7: Charakteristiky napětí el. energie dodávané z veřejné distribuční sítě
- [19] ČSN IEC 909-2: Data pro výpočty zkratových proudů v souladu s IEC 909
- [20] Pravidla pro provozování distribučních soustav, 2011
- [21] Kodex přenosové soustavy, 2011

Internet

- [22] Vestas: <http://www.vestas.com> [cit. 2010-03-31]
- [23] Enercon GmbH: <http://www.enercon.de> [cit. 2010-03-31]
- [24] Quietrevolution Ltd.: <http://www.quietrevolution.co.uk> [cit. 2010-03-31]
- [25] Electricity Storage Association: <http://www.electricitystorage.org> [cit. 2010-03-31]
- [26] ETP SmartGrids: <http://www.smartgrids.eu> [cit. 2010-03-31]
- [27] The Mathworks Inc.: <http://www.mathworks.com> [cit. 2010-03-31]

Publikační činnost

- (01) Šantín V.: Využití a návrh tepelného čerpadla, In: Elektrotechnika a informatika 2007: část třetí - Elektroenergetika, sborník z 8. konference doktorských prací, ZČU, Plzeň 2007, s. 95-98, ISBN 978-80-7043-573-1
- (02) Šantín V.: Vlivy větrných elektráren na elektrizační soustavu, In: Elektrotechnika a informatika 2008: část třetí - Elektroenergetika, sborník z 9. konference doktorských prací, ZČU, Plzeň 2008, s. 75-78, ISBN 978-80-7043-703-2
- (03) Šantín V.: Model větrné turbíny v programu Simulink, In: sborník Elektrotechnika a informatika 2009: část třetí - Elektroenergetika, sborník z 10. konference doktorských prací, ZČU, Plzeň 2009, s. 71-74, ISBN 978-80-7043-811-4
- (04) Šantín V.: Influences of Wind Power Plants on Power System, In: Proceedings of Intensive Programme - Renewable Energy Sources 2010, Plzeň 2010, s. 64-71, ISBN: 978-80-7043-893-0
- (05) Šantín V.: Mathematical Modelling of Doubly-Fed Asynchronous Generator, In: Proceedings of Intensive Programme - Renewable Energy Sources 2010, Plzeň 2010, s. 134-139, ISBN: 978-80-7043-893-0
- (06) Šantín V.: Simulace napěťového kolapsu v programu Simulink, In: Elektrotechnika a informatika 2010: část třetí - Elektroenergetika, sborník z 11. konference doktorských prací, ZČU, Plzeň 2010, s. 73-76, ISBN 978-80-7043-915-9
- (07) Šantín V. - Majer, V. - Hejtmánková P.: Simulation of Voltage Collapse in Matlab Program with Use of Simulink Tool and SimPowerSystems Library, In: Proceedings of the 12th International Scientific Conference - Electric Power Engineering 2011, VŠB TU, Ostrava 2011, s. 327-330, ISBN: 978-80-248-2393-5
- (08) Šantín V.: Model of Wind Power Plant with Asynchronous Generator in Simulink Platform, In: Proceedings of Intensive Programme - Renewable Energy Sources 2011, Plzeň 2011, s. 60-65, ISBN: 978-80-261-0010-2
- (09) Šantín V.: Model větrné elektrárny s asynchronním generátorem, In: Elektrotechnika a informatika 2011: část třetí - Elektroenergetika, sborník z 12. konference doktorských prací, ZČU, Plzeň 2011, s. 65-68, ISBN 978-80-261-0017-1
- (10) Šantín, V. - Hejtmánková, P.: Simulation of Wind Power Plant with Constant Speed, In: Proceedings of the 13th International Scientific Conference - Electric Power Engineering 2012, VUT, Brno 2012, s. 603-608, ISBN: 978-80-214-4514-7