

Analýza větrné elektrárny s vertikální osou otáčení

Analysis of wind turbine with vertical axis

Stanislav Mišák, Petr Kačor, Regina Holčáková, Lukáš Prokop
stanislav.misak@vsb.cz, petr.kacor@vsb.cz, regina.holcakova@vsb.cz, lukas.prokop@vsb.cz

Fakulta elektrotechniky a informatiky VŠB-TU Ostrava, Katedra elektroenergetiky

Abstrakt: Větrné elektrárny jsou považovány za obnovitelné zdroje s nestabilní dodávkou elektrické energie. Zvýšení účinnosti systémů větrných elektráren je možné dosáhnout pomocí optimalizace jednotlivých komponent systému. V tomto článku je řešena optimalizace speciálního typu větrného motoru. K optimalizaci a simulacím je v tomto případě využit matematický program ANSYS.

Abstract: Results from redesign of wind turbine are presented in this paper.

Analýza větrné elektrárny s vertikální osou otáčení

Stanislav Mišák¹, Petr Kačor¹, Regina Holčáková¹, Lukáš Prokop¹

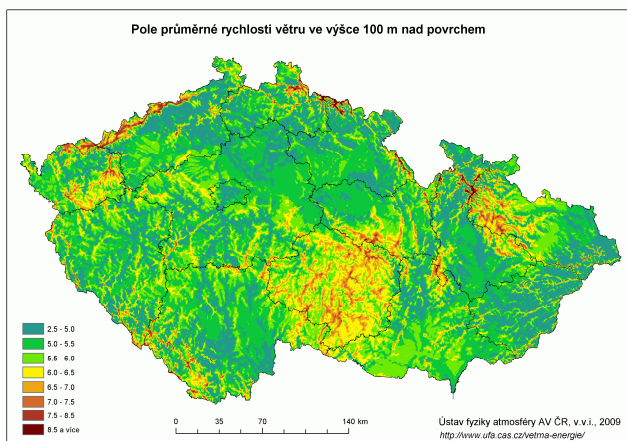
¹Fakulta elektrotechniky a informatiky VŠB-TU Ostrava, Katedra elektroenergetiky
Email: {stanislav.misak, petr.kacor, regina.holcakova, lukas.prokop}@vsb.cz

Abstrakt – Větrné elektrárny jsou považovány za obnovitelné zdroje s nestabilní dodávkou elektrické energie. Zvýšení účinnosti systémů větrných elektráren je možné dosáhnout pomocí optimalizace jednotlivých komponent systému. V tomto článku je řešena optimalizace speciálního typu větrného motoru. K optimalizaci a simulacím je v tomto případě využito matematický program ANSYS.

1 Úvod

Výše výkupních cen elektrické energie stanovená vyhláškou Energetického regulačního úřadu způsobila poměrně výrazný rozmach výstavby větrných elektráren na území České republiky v několika posledních letech. V důsledku toho se ve větší míře začínají projevovat negativní vlivy, které jsou spojeny s provozem těchto nestabilních obnovitelných zdrojů. Jedná se o přechodné děje a přepětí při spínacích operacích, negativní působení na kvalitu napětí a značná variabilita dodávaného výkonu.

Aby bylo možné elektrizační soustavu provozovat bezpečně, spolehlivě a hospodárně i nadále a to i v situaci, kdy bude instalován velký objem výkonu ve větrných elektrárnách, je nutné učinit veškerá možná legislativní a technická opatření k zajištění trvalého chodu elektrizační soustavy. Tohoto stavu je možné dosáhnout pouze kombinací několika možných metod a přístupů. Zcela zásadní je otázka predikce výroby elektrické energie, v důsledku které jsou plánovány velikosti rezerv pro pokrytí výpadků dodávky elektrické energie z nestabilních obnovitelných zdrojů.



Obrázek 1: Mapa rychlosti větrů na území České republiky

Další důležitým přístupem jsou legislativní úpravy a to zejména na úrovni kodexu přenosové soustavy a pravidel

provozování distribučních soustav, kde jsou přesně stanoveny technické podmínky pro připojení a paralelní provoz generátorů se sítí. Neméně důležitou součástí je potom vývoj nových moderních větrných elektráren, které jsou schopny v maximální možné míře využít větrný potenciál lokalit v ČR, kde mají být větrné elektrárny postaveny, viz Obrázek 1.

Při vývoji nebo modernizaci větrných elektráren se předpokládají inovace a optimalizace zejména v oblasti větrných motorů, generátorů a systému řízení. Právě na prezentaci výsledků získaných při optimalizaci větrných motorů pomocí počítačových simulací v matematickém simulačním programu ANSYS jsou zaměřeny následující kapitoly tohoto článku.

2 Větrné motory

Do současné doby bylo vyvinuto a provozováno velké množství větrných motorů, pokud bychom je chtěli seřadit podle kritérií, hlavním kritériem by pravděpodobně bylo rozdělení podle osy otáčení a to následovně viz Obrázek 2:

- VTE s horizontální osou otáčení (HAWT)
- VTE s vertikální osou otáčení (VAWT)



Obrázek 2: Ukázky horizontálního a vertikálního větrného motoru

Nejrozšířenější jsou v současné době větrné elektrárny s horizontální osou otáčení se třemi listy a jmenovitým výkonem okolo 2 až 3 MW pro instalace na pevnině.

Větrné elektrárny s vertikální osou otáčení nejsou vyráběny o takovém jmenovitém výkonu jako větrné elektrárny s horizontální osou otáčení. Důvodem jsou značné prostorové nároky na větrný motor a obrovské nároky na mechanickou pevnost stožárů. Jejich velkou výhodou je však nižší rychlost otáčení, nižší hluk, vyšší účinnost a nezáleží u nich na směru větru. Z těchto důvodů jsou proto využívány větrné elektrárny s vertikální osou otáčení pro menší aplikace, kde již není nut-

ný větrný motor o velkém průměru. Jedním z možných využití větrných elektráren s vertikální osou otáčení jsou ostrovní systémy pro napájení elektrických spotřebičů malých výkonů.

V areálu VŠB – TU Ostrava byl vybudován hybridní ostrovní systém, jehož jedním zdrojem je právě větrná elektrárna s vertikální osou otáčení a druhým zdrojem pak solární panel. Výkon tohoto hybridního systému slouží k nabíjení baterií, které pak zajišťují napájení svítidla veřejného osvětlení. Jmenovitý výkon svítidla tvořeného technologií vysoce svítivých LED diod má 40 W.

Parametry větrné elektrárny s vertikální osou otáčení jsou uvedeny v Tabulce 1. Jedná se o parametry udávané výrobcem větrného motoru.

Tabulka 1: Základní parametry větrného motoru

Větrný motor P-200	
Jmenovitý výkon	200 W
Průměr rotoru	0,8 m
Pracovní oblast rychlostí větru	4-25 m/s
Maximální rychlost větru	40 m/s
Jmenovité napětí	DC 12V
Brzdění	Auto
Hmotnost motoru	48 kg (bez sloupu)
Délka lopatek	1,5 m
Jmenovitá rychlost větru	10 m/s

V našem příspěvku se budeme zabývat možností optimalizace větrného motoru ve spojení s generátorem s permanentními magnety. Tento systém by měl pro účely zdejší lokality vykazovat pokud možno maximální hodnoty účinnosti v širokém spektru rychlostí větru.

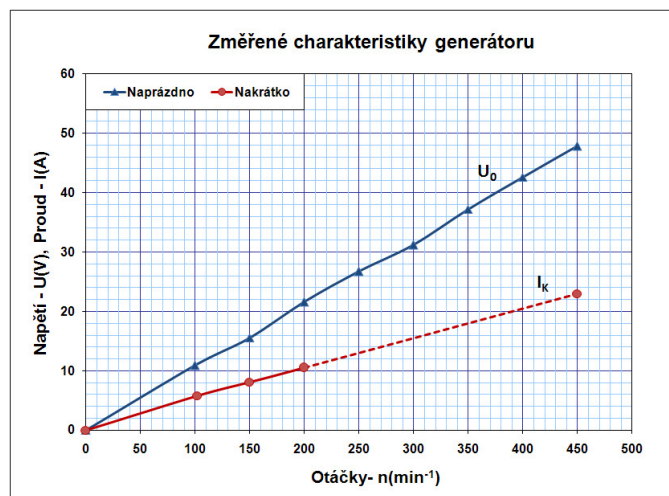
3 Základní vlastnosti generátoru

Podívejme se nyní blíže na vlastní generátor s permanentními magnety. Jmenovitý štítkový výkon generátoru je $P_N=200\text{W}$ při jmenovitém napětí $U_N=31\text{V}$ a otáčkách $n_N=350\text{min}^{-1}$, které odpovídají jmenovité frekvenci $f_N=58,33\text{Hz}$. Ve spojení s větrným motorem by měl generátor pracovat od rychlosti větru $v_{w1}=4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a dle výkonové křivky $P=f(v_w)$ dodávané výrobcem, by měl svého jmenovitého výkonu dosáhnout při rychlosti větru $v_{wN}=10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

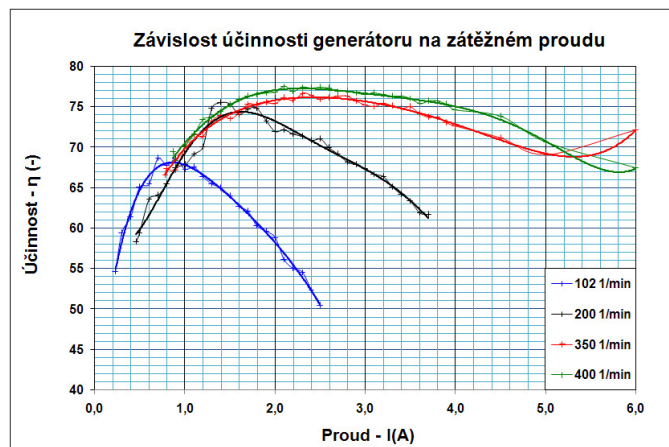
Před montáží na sloup veřejného osvětlení byl samotný generátor testován v laboratoři, kde byly změřeny jeho základní charakteristiky naprázdno, nakrátko a také charakteristiky při zvolené zátěži. Generátor s permanentními magnety nelze regulovat jinak, než změnou otáček. Charakteristika „naprázdno“ a „nakrátko“ na Obrázku 3 je tedy vynesena v závislosti na otáčkách a nikoli na budícím napětí U_b (F_b), jak je obvyklé u klasických typů generátorů s regulací buzení.

U průběhů účinnosti, viz Obrázek 4, jsou základním parametrem konstantní otáčky, výstupní proud je v obvodu generátoru regulován změnou odporové zátěže a výstupní napětí odpovídá této nastavené zátěži. Jak je vidět z charakteristiky, pro $n_N=350\text{min}^{-1}$, dosahuje generátor ve jmenovitém stavu

účinnosti cca $\eta=(73\div 74)\%$. Jak dále vyplývá z pracovních podmínek generátoru, bude jeho výkon dodávaný do obvodu závislý na aktuální rychlosti větru, resp. otáčkách větrného motoru.



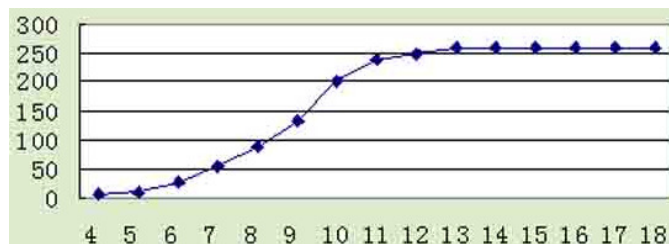
Obrázek 3: Měření „naprázdno“ a „nakrátko“ na generátoru



Obrázek 4: Průběh účinnosti generátoru v závislosti na proudu

4 Sestavení modelu větrného motoru

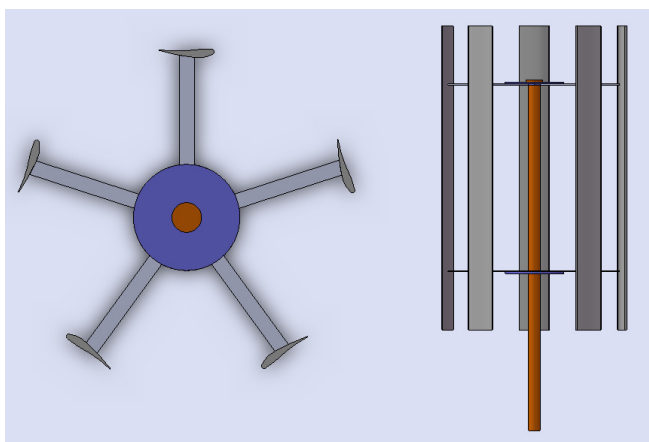
V dalším kroku se blíže zaměříme na vlastní větrný motor. Jak již bylo uvedeno, jedná se o vertikální větrný motor, který pracuje na vztakovém principu (Darieus). Výrobce k tomuto systému dodává výkonovou křivku, která má následující podobu, viz Obrázek 5.



Obrázek 5: Výkonová charakteristika větrného motoru

Protože počáteční laboratorní měření ukázala, že větrná elektrárna nedosahuje potřebných parametrů, rozhodli jsme se provést konstrukční úpravu a optimalizaci, resp. redesign větrného motoru. Tato úprava by měla vést k lepšímu využití větrných podmínek, které jsou v lokalitě VŠB-TU Ostrava charakteristické větší četností větrů s nižší rychlostí.

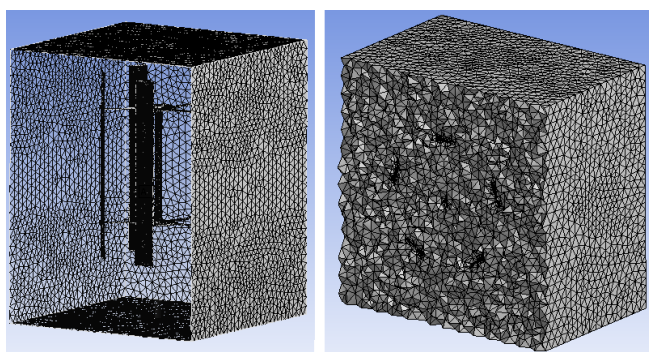
Abychom mohli navrhnout lepší řešení větrné elektrárny, provedeme nejprve analýzu numerického modelu původní konstrukce větrného motoru. Výpočtem numerického modelu získáme jeho výkonovou charakteristiku.



Obrázek 6: Sestavení modelu větrného motoru

Na Obrázku 6 je vidět základní geometrické uspořádání řešeného systému. Model větrného motoru je pak převeden do simulačního software, kde se vytvoří jeho celková výpočetní síť. Pro numerickou analýzu modelu motoru je využit CFD software, který umožňuje řešit základní tlakové a rychlostní poměry v proudícím médiu kolem lopatek stroje.

Větrný motor je uzavřen do prostoru ve tvaru kvádrů tak, aby byl s dostatečnou přesností simulován otevřený prostor. Bližší pohled na povrchové a prostorové elementy modelu větrného motoru ukazuje Obrázek 7.

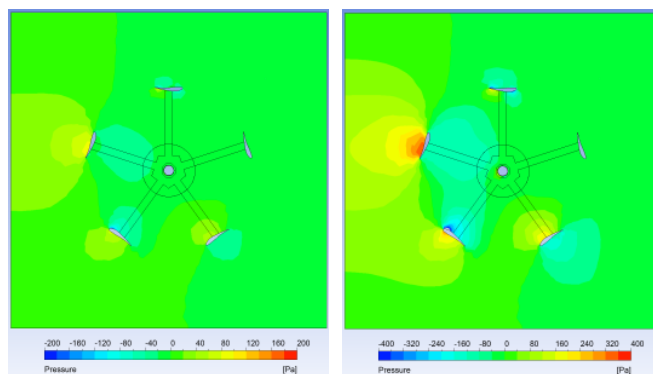


Obrázek 7: Ukázka výpočetní sítě modelu větrného motoru

Při vytváření modelu je kladen hlavní důraz na precizní výpočetní síť (mesh) na povrchu lopatek a také v jejich bezprostředním okolí. V místech, kde dochází k velkému gradientu rychlosti má výpočetní síť (mesh) vyšší hustotu dělení. Celkově model motoru obsahuje cca 500tis elementů a cca 200tis uzlů.

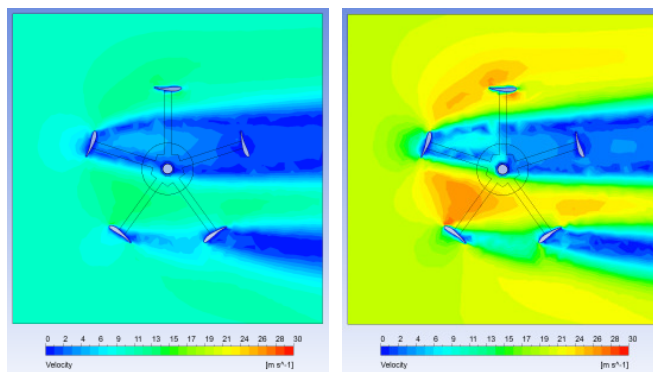
4.1 Analýza větrného motoru

Vlastní numerická analýza probíhá tak, že motor je nejprve fixován v jeho ose otáčení. Rychlost větru, kterou uvažujeme během celého výpočtu jako konstantní, je volena z rozsahu $v_w = (2 \div 25) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Analýzou těchto vstupních zatěžovacích podmínek získáme statickou charakteristiku větrného motoru. Jinak řečeno, určíme velikost statického momentu, který vzniká na lopatkách stroje při zastaveném rotoru pro danou rychlost větru – $M_S = f(v_w)$.



Obrázek 8: Rozložení tlaků při rychlosti větru 10 a 20 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Na Obrázku 8 je pro názornost zachyceno rozložení tlaku na příčném řezu motoru pro zvolenou rychlost větru $v_w = 10$ a $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a na stejném příčném řezu je pak na Obrázku 9 vidět i rozložení rychlostí.

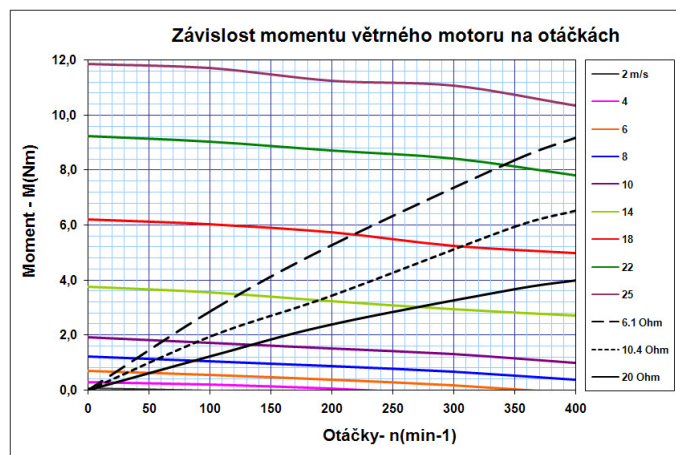


Obrázek 9: Rychlostní poměry při rychlosti větru 10 a 20 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Účinkem větru proudícího kolem lopatek se díky rozdílu tlaků dává motor do pohybu a vzniká relativní pohyb mezi lopatkou a proudícím médiem. Moment větrného motoru poklesne a otáčky se po určité době ustálí na konstantní hodnotě. Tuto úlohu bychom museli řešit jako časově závislou ve spojení s mechanickými konstantami motoru i připojeného generátoru a jedná se tedy o značně komplikovaný problém.

Abychom se vyhnuli takovému složitému řešení, eliminujeme časovou závislost tak, že vypočteme velikost momentu vznikajícího na lopatkách motoru pro předem definované brzdné otáčky - n_B . Volba těchto otáček není nahodilá a vychází z charakteristik generátoru, který je na větrný motor připojen. Hodnotu brzdných otáček volíme v rozsahu $n_B = (100 \div 400) \text{ min}^{-1}$.

Postupným výpočtem jednotlivých zatěžovacích bodů získáme parametrické závislosti momentu motoru při zvolených otáčkách a definované rychlosti větru $M = f(n_B, v_W)$, viz Obrázek 10.



Obrázek 10: Moment větrného motoru v závislosti na otáčkách a rychlosti větru

Čím více těchto zatěžovacích bodů analyzujeme, tím přesnější pak bude určení výsledné výkonové charakteristiky větrného motoru $P = f(v_W)$. Jak dále Obrázek 10 ukazuje, má větrný motor s rostoucími otáčkami klesající tendenci momentu. Jednotlivé charakteristiky (označeny plnými barevnými čarami) se jen mírně zakřívují podle aktuální hodnoty brzdných otáček n_B .

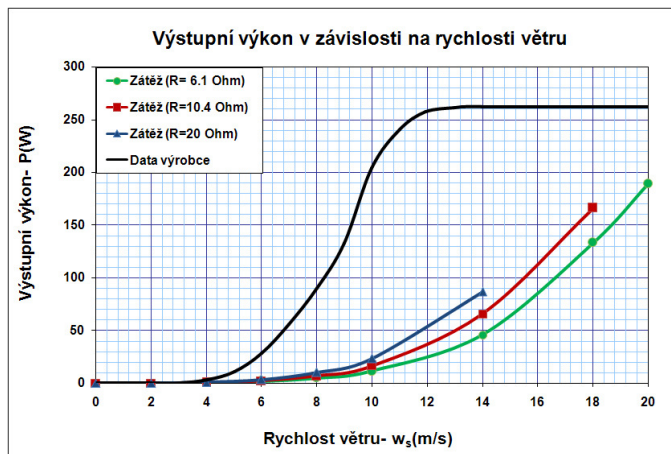
4.2 Výkonová charakteristika větrného motoru

Vypočtené hodnoty z provedených analýz větrného motoru a výsledky laboratorního měření zatěžovacích charakteristik generátoru musíme sjednotit na celkovou momentovou charakteristiku závislou na otáčkách $M = f(n)$.

Elektrický výkon generátoru pro definovanou zátěž tedy přepočteme přes jeho účinnost v daném zatěžovacím bodě na moment a otáčky na hřídeli. Promítnutím zatěžovacích křivek generátoru (na Obrázku 10 zobrazeno přerušovanou čarou) do momentové charakteristiky větrného motoru získáme průsečíky, které odpovídají pracovním bodům větrné elektrárny pro danou zátěž generátoru a rychlost větru.

Pokud nyní odečítáme v jednotlivých průsečících hodnoty příslušného momentu a otáček pro zatěžovací křivku generátoru, získáme výkonovou charakteristiku větrné elektrárny $P = f(v_W)$ pro definovanou zátěž na svorkách generátoru. Na Obrázku 11 je zachycena tato charakteristika pro 3 zvolené odporové zátěže generátoru - $R = (6, 10, 20)\Omega$.

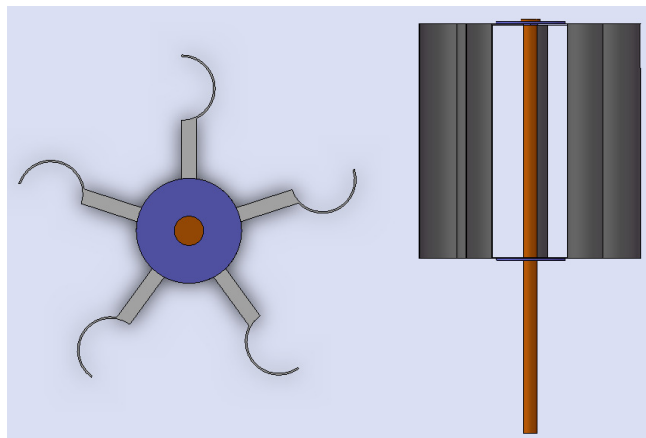
Vzájemným porovnáním vypočtených výkonových charakteristik se závislostí, kterou udává výrobce, zjistíme nepříjemný fakt, že z hlediska trvalé dodávky výkonu je konstrukční uspořádání elektrárny zcela nevýhodné. Praktická pozorování a měření na větrném motoru tuto okolnost potvrdila a dále ukázala, že konstrukční uspořádání větrného motoru je velmi špatně řešeno. Větrná elektrárna nedosahuje ani 1/3 výkonu, kterou garantuje výrobce, resp. požadovaného výkonu je dosaženo až při velmi velkých rychlostech větru.



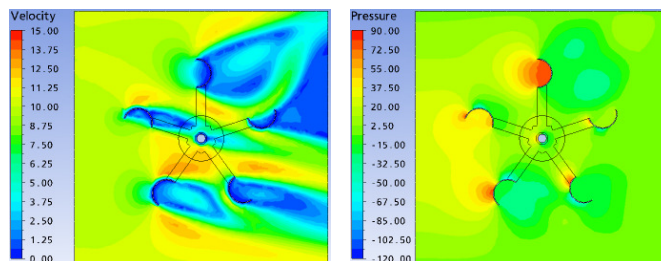
Obrázek 11: Výkonová charakteristika větrné elektrárny

4.3 Modifikovaná verze větrného motoru

U vertikálních uspořádání větrného motoru posuzované konstrukce je rozhodujícím parametrem především průměr a délka listů. Pokud zachováme průměr motoru, lze vlastní výkon motoru změnit vhodným tvarem listů. V našem případě jsme se rozhodli pro žlabový tvar listů, který je snadný nejen pro výrobu a také montáž. Vlastní konstrukční uspořádání větrného motoru je vidět na Obrázku 12.



Obrázek 12: Modifikovaná varianta motoru



Obrázek 13: Rozložení rychlostí a tlaků u nové verze motoru

Podobně jako u předchozí verze větrného motoru byla i u této verze provedena CFD simulace a vypočteny hodnoty

jednotlivých momentů v závislosti na otáčkách a rychlosti větru. Ukázka výpočtu rychlostních a tlakových poměrů je vidět na Obrázku 13.

Už první porovnávací výpočty ukazují, že statický moment větrného motoru narostl skoro 4x oproti původní konstrukční variantě. Provedení větrného motoru s lopatkami ve tvaru žlabu je výhodnější především u malých rychlostí větru, klade však vyšší nároky nejen na upevnění lopatek ke hřídeli generátoru, ale hlavně na mechanickou tuhost sloupu.

Po výpočtu tlakových a rychlostních poměrů vlastní optimalizace nekončí. Po návrhu uspořádání a tvaru lopatek musí následovat mechanický výpočet, který ověří chování celého systému z hlediska mechanické pevnosti a také dynamiky.

5 Závěr

Uvedený příspěvek ukazuje na možnosti využití CFD analýzy pro optimalizaci konstrukce větrného motoru. Jak ukázala vlastní analýza, původní konstrukce není příliš optimální a větrný motor nedosahuje potřebných parametrů. Metodika použitá pro vyhodnocování charakteristiky větrného motoru využívá kombinace CFD výpočtů a hodnot z reálného měření na generátoru. Vzhledem k časové náročnosti simulace bylo pro vlastní vyhodnocení použito pouze několik pracovních bodů. I přes toto zjednodušení lze výslednou charakteristiku větrného motoru stanovit s relativně dobrou přesností.

Větrný motor je ve spojení s generátorem primárně navržen pro ostrovní režim a v současnosti slouží jako jeden z autonomních zdrojů pro napájení veřejného osvětlení, které jsou provozovány na VŠB-TU Ostrava. Výkon generátoru je přes neřízený usměrňovač a regulátor vyveden na baterie a slouží k jejich nabíjení. Z baterií se pak odebírá výkon pro vlastní osvětlení.

V současnosti se připravuje monitoring celkové funkčnosti hybridního systému z pohledu toku výkonů a z naměřených dat pak bude možné posoudit celkovou účinnost navrženého systému.

Poděkování

Práce vznikla jako součást projektu: Výzkum spolehlivosti energetických soustav v souvislosti s ekologií netradičních zdrojů a oceněním nedodané energie MSM 6198910007, a také projektu: Využití hybridních obnovitelných zdrojů elektrické energie SP/201073.

6 Literatura

- [1] Wind Map [online]. 2010-[cit. 2010-03-31]. Available from: <http://www.ufa.cas.cz/vetrna-energie/img/vetrna_mapa.gif>
- [2] AIR BREEZE [online]. 2010-[cit. 2010-03-31]. Available from: <<http://airbreeze.com>>.
- [3] Kačor, P., Mišák, S.: Increasing of Efficiency of PM Synchronous Generator for Wind-Power Plant, 11th International Scientific Conference Electric Power Engi-

neering 2010; (IEEE EPE 2010), 2010, Brno:VUT Brno, ISBN 978-80-214-4094-4