

Vladimír Kohan, Zsolt Čonka, Michal Kolcun, Peter Havran, Robert Štefko

Regulácia výkonu veterných elektrární

Podstatou predkladaného článku je opísať princíp výroby elektrickej energie pomocou veternej elektrárne, jej výhody a nevýhody, princíp činnosti regulácie výkonu veternej elektrárne zmenou uhla natočenia lopatiek veternej turbíny a navrhnuť program regulácie v softvéri Matlab. V práci sú popísané výhody a dôvody implementácie regulácie výkonu veternej elektrárne zmenou uhla natočenia lopatiek. Taktiež je v práci spomenuté nariadenie Európskej Komisie a dôvody jeho zavedenia. V závere článku je načrtnutý a rozpracovaný teoretický príklad blízkej budúcnosti, ktorého riešením je poukázanie na dôležitosť regulácie výkonu jednotiek, ktoré slúžia na výrobu elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov (veterná, slnečná elektrárne a pod.). Výsledky práce vypovedajú o skutočnosti, že regulácia výkonu veterných elektrární pomocou zmeny uhla natočenia lopatiek je nevyhnutná súčasť každej veternej elektrárne, ktorá má pracovať a byť pripojená do sústavy..

Kľúčové slová: Obnoviteľné zdroje energie, Elektrická energia, Energia vetra, Veterná elektrárne, Regulácia výkonu, Natočenie lopatiek

The aim of the paper is to describe the principle of electricity production using a wind power plant, its advantages and disadvantages, the principle of wind power control by changing the rotation angle of wind turbine blades and to design a control program in Matlab software. The thesis describes the advantages and reasons for the implementation of wind power regulation by changing the rotation angle of the blades. The paper also mentions a regulation of the European Commission and the reasons for its introduction. At the end of the work is outlined and developed a theoretical example of the near future, whose solution is to point out the importance of power regulation of units used for the production of electricity from renewable sources (wind, solar power, etc.). The results of the work testify to the fact that the regulation of the power of wind power plants by changing the rotation angle of the blades is a necessary part of every wind power plant, which is to operate and be connected to the system.

Keywords: renewable energy sources, Electricity, Wind energy, Wind power plant, Power regulation, Rotation angle of the blades

I. ÚVOD

Najväčšia pozornosť sa venuje systému natáčania lopatiek, ktorý slúži na reguláciu otáčok turbíny, a teda aj reguláciu generovaného výkonu. Sú opísané dva typy natáčania lopatiek (stall a pitch) a rozdelenie systému natáčania pitch podľa toho, aká technológia je používaná na natáčanie. Zároveň sú zmienené jednotlivé výhody a nevýhody daných systémov. Ďalej je stručne vysvetlený dôvod zavedenia nariadenia komisie Európskej Únie 2016/631. Taktiež sú v tejto časti popísané niektoré z úvodných článkov nariadenia, ako napríklad rozsah pôsobnosti a uplatňovanie tohto nariadenia na rôzne výrobné elektriny podľa ich významu. Jadro článku obsahuje reguláciu výkonu veternej elektrárne, ktorá sa venuje návrhu regulácie výkonu v praxi v závislosti od rýchlosti vetra, smeru vetra, aktuálneho uhla natočenia lopatiek rotora a frekvencie siete. Návrh regulácie výkonu je demonštrovaný na počítačovom programe vytvorenom v aplikácii Matlab. V nasledujúcej časti sa pomocou programu vyhodnotili tri rôzne stavy, v ktorých sa veterná elektrárne nachádzala. Z týchto výsledkov sa následne zostrojili grafické závislosti, pomocou ktorých je vysvetlená činnosť regulácie výkonu. V závere sa práca venuje vyhodnoteniu získaných výsledkov a ich využitiu v praxi.

II. VETERNÁ ELEKTRÁREŇ, VIETOR A VETERNÁ ENERGIA

Veterná energia patrí v súčasnosti k jedným z najvyužívanejších obnoviteľných zdrojov. V súčasnosti môžeme povedať, že veterná energetika zažíva vzostup na globálnej úrovni. Najväčší zdroj veternej energie predstavuje otvorené more (offshore). Nedisponuje žiadnymi bariérami, tým pádom je prúdenie vetra kontinuálne a s vyššou rýchlosťou v porovnaní s pevninou. Offshore elektrárne sú schopné vytvoriť o 50% viac energie ako pevninské veterné elektrárne. Výhody veternej elektrárne spočívajú najmä v tom, že nevypúšťa žiadne emisie CO₂ do ovzdušia, jej produkcia odpadu počas prevádzky je nulová, má jednoduchú údržbu a taktiež dlhú životnosť. Medzi jej nevýhody patria vysoké investičné náklady, potenciálny hluk počas prevádzky, prerušovaná výroba energie a výroba len samotnej elektrickej energie. Veterná elektrárne má aj svoje obmedzenia, a tými sú napr. nutná dostupnosť miesta stavby pre ťažkú techniku, vysoké investície do rozvodnej siete a potreba špeciálnej intenzity vetra.[1][2][3][4]

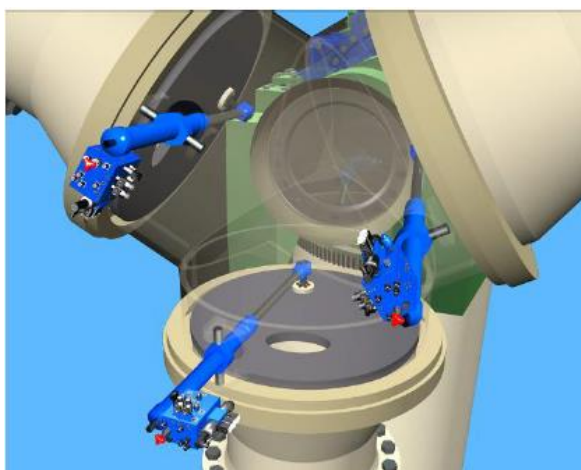
V minulosti bol vietor kvalitatívne charakterizovaný pomocou Beaufortovej stupnice znázornenej v Tab. 1. Využíva sa dodnes. Táto stupnica popisuje rýchlosť vetra na základe vizuálnej diagnostiky. Nie je potrebné použiť žiadne prístroje na meranie. [1][2][7][8]

Tab. 1 Beaufortova stupnica vetra [1]

Beaufortov stupeň	Označenie a rozpoznávacie znaky vetra	Rýchlosť vetra (m/s)
0	bezvetrie - dym stúpa kolmo nahor	0 – 0,2
1	vánok - smer vetra je pozorovateľný podľa pohybu dymu, vietor však ešte nepôsobí na veternú ružicu	0,3 – 1,5
2	slabý vietor - je cítiť na tvári, lístie stromu šelestí, veterná ružica sa začína pohybovať	1,6 – 3,3
3	mierny vietor - lístie stromov a vetvičky v trvalom pohybe, vietor napína zástavky a slabo čerá hladinu stojatej vody	3,4 – 5,4
4	dosť čerstvý vietor - zdvíha prach a útržky papiera, pohybuje slabšími vetvami stromov	5,5 – 7,9
5	čerstvý vietor - listnaté kríky sa začínajú hýbať, na stojatých vodách sa tvoria menšie vlnky so spätnými hrebeňmi	8,0 – 10,7
6	silný vietor - pohybuje hrubými vetvami, telegrafné drôty svišťa, dáždnik robí problémy	10,8 – 13,8
7	prudký vietor - pohybuje celými stromami, sťažuje chôdzu	13,9 – 17,1
8	búrlivý vietor - láme konáre, znemožňuje chôdzu proti nemu	17,2 – 20,7
9	vichrica - spôsobuje menšie škody na stavbách – strháva komíny a krytiny striech	20,8 – 24,4
10	silná vichrica - vyskytuje sa na pevnine zriedka, vyvracia stromy, pôsobí škody na obydliach	24,5 – 28,4
11	mohutná vichrica - vyskytuje sa veľmi zriedka, spôsobuje rozsiahle škody	28,5 – 32,6
12	uragán - ničivé účinky, demoluje ťažké objekty	32,7 a viac

A. Hydraulický PITCH systém

Natáčanie v tomto prípade zabezpečujú čerpadlá (Obr. 1). Čerpadlá vytvárajú požadovaný tlak, ktorý pôsobí na hydraulický piest. Tento piest je pevne spojený s vnútornou časťou lopatky. Vysúvaním alebo zasúvaním piesta do valca sa mení uhol nábehu lopatky. Systém je riadený pomocou ventilov so zabudovanou inteligenciou a digitálnou komunikáciou. Tieto riadiace systémy zvyšujú výkon turbíny a zlepšujú diagnostiku na diaľku. Čerpadlo a motor sú zvyčajne namontované v gondole s hydraulickými piestami upevnenými v náboji. Hydraulický pitch systém je vhodný, ak je potrebné časté a silnejšie natáčanie uhla lopatiek. [22][29][30]



Obr. 1 Konštrukcia hydraulického systému natáčania lopatiek [29]

Hydraulický pitch systém je osvedčená a bezpečná technológia, ktorá sa používa oveľa dlhšie ako iné systémy. Zabezpečuje vysoko spoľahlivé ovládanie sklonu lopatiek. Ponúka veľmi dlhú životnosť

hydraulického systému, vysokú odolnosť voči vibráciám a tepelnému namáhaniu. [29][30]

Zahŕňa v sebe hydraulický pohon, lineárny prevodník (zabudovaný v pohone), hriadeľ, ložiskový systém pre pohon, rozdeľovač natáčania vrátane ventilov, tlakové potrubie (distribučný systém), držiak tlakového potrubia, vinutú pružinu, snímač uhla natočenia lopatiek, otočnú spojku, hadice nachádzajúce sa v náboji rotora a v gondole, a mnoho ďalších zariadení. [29][30]

Medzi výhody tohto systému patrí:

Presnosť, Dostatočný krútiaci moment (úmerný tlaku v systéme), Jednoduchá regulácia tlaku, Rýchlosť v natáčaní (čas odozvy ventilov a hydraulických pohonov sa meria rádovo v milisekundách), Ochrana proti vysokému veternému zaťaženiu, Zabezpečená optimalizácia pri výrobe elektrickej energie, Obmedzený maximálny výkon, Výkonné kruhové natáčanie lopatiek (pri veľkých turbínach).

Existuje mnoho faktorov, prečo je vhodné použiť hydraulický systém natáčania. Je vhodný pre všetky klimatické podmienky. Zapojenie systému je flexibilné. Núdzové zastavenie funguje aj bez elektrického napájania vďaka vinutej pružine zakomponovanej v hydraulickom systéme, ktorá v sebe uchováva energiu potrebnú na natočenie lopatiek do nulovej polohy v prípade poruchy. Monitorovanie stavu je pomerne jednoduché. Jeho hydraulický systém je konštrukčne nekomplikovaný, tým je údržba nenáročná. Hydraulický systém je celkovo lacnejší počas celej doby životnosti (investičné náklady, náklady na údržbu a servis). [29][30][31]

S hydraulickým pitch natáčaním neprichádzajú len výhody, ale aj nevýhody, medzi ktoré patrí:

Počas servisu a výmeny dielov v zariadení je potrebný vysoký stupeň čistoty, V obvode sa môžu vyskytnúť netesnosti, je možné tomu predísť výberom správnych komponentov, pravidelným servisom a údržbou, Vyššia spotreba energie, Možné riziko pre životné prostredie v dôsledku úniku hydraulickej kvapaliny [29][30]

B. Elektrický pitch systém

Pri elektrickom pitch systéme natáčania lopatiek (Obr. 2) je natáčanie zabezpečené pomocou jednosmerného motora. Typické pre tento systém je, že na každej lopatke sa nachádza len jeden motor slúžiaci na natáčanie. Motor disponuje veľkým krútiacim momentom, pomocou ktorého pohybuje lopatkami po jednotlivých zuboch. V prípade núdze alebo poruchy nabitú akumulátory alebo ultra kondenzátory natočia lopatky turbíny pod zaťažením do nulovej (neutrálnej) polohy. [22][29]



Obr. 2 Konštrukcia elektrického systému natáčania lopatiek [31]

Zahŕňa v sebe napr. servomotor s brzdou, snímač servomotora, skriňu prevodovky, elektrické spínače, mechanický doraz, prevodové koleso na ložisku lopatky, prevodové koleso na prevodovke, mazací systém kolesa prevodovky, akumulátory, držiak akumulátorov, monitorovací systém akumulátorov, vykurovací systém (pre chladné podnebné oblasti), snímač uhla natočenia lopatiek, atď. [22][29][31]

Medzi výhody tohto systému patrí:

Nepoužíva sa hydraulická kvapalina, Nulové zaťaženie pre životné prostredie, Nižšia spotreba energie

Pri využívaní elektrického pitch systému existujú tieto problémy a nevýhody:

Problémy s batériou – náročné sledovanie stavu, nízky výkon pri nízkej teplote, častá potreba výmeny (každé dva až tri roky), Problém s mazaním prevodových stupňov kvôli malým posuvom, Veľmi komplexné riešenie – skladá sa z množstva komponentov, zložitá zapojenie, oprava pri poruche je náročná, Problém medzi vôľami v ozubených kolesách [29][31]

C. Hybridný pitch systém fgsd

Tento systém natáčania je kombináciou elektrického a hydraulického systému. V tomto prípade zmenu uhla natočenia lopatiek zabezpečuje elektrický systém, zatiaľ čo bezpečnostné prvky, ktoré bránia poškodeniu lopatiek a rotora, zabezpečuje hydraulický systém. V tomto prípade je riziko úniku hydraulickej kvapaliny rapídne znížené, keďže natáčanie lopatiek vykonáva elektromotor. Náklady na spotrebu energie sa tým zredukujú. Veľká výhoda tohto hybridného systému spočíva v tom, že prevádzkovatelia sa nemusia starať o akumulátory, a v prípade ich zlyhania nedochádza k poškodeniu komponentov turbíny. [32]

III. NARIADENIE KOMISIE EURÓPSKEJ ÚNIE 2016/631

Jedná sa o nariadenie komisie Európskej Únie (EÚ), v ktorom sa uvádza sieťový predpis pre požiadavky na pripojenie výrobcov elektrickej energie do elektrizačnej sústavy.

Európska komisia toto nariadenie zaviedla v dôsledku neustáleho nárastu počtu výrobcov elektrickej energie, ktorí sa pripájajú do Európskej elektrizačnej sústavy (ENTSO-e). Má slúžiť na to, aby výrobcovia, ktorí sa budú chcieť pripojiť do sústavy a sú považovaní ako nové významné jednotky, splnili požadované podmienky, ktoré sú v tomto nariadení spísané. Podmienky tohto nariadenia nie sú záväzné pre už existujúce jednotky, ktoré slúžia na výrobu elektrickej energie a jednotky, ktoré sú v pokročilom stave plánovania, ale ktoré neboli doposiaľ ukončené. Samozrejme, o uplatnení nariadenia na konkrétne jednotky môže rozhodnúť náležitý regulačný orgán, poprípade členský štát EÚ. Ide hlavne o to aby sa vedeli do sústavy integrovať výrobcovia elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov. Preto je potrebné, aby títo výrobcovia spĺňali požiadavky zadefinované v nariadení a boli schopní regulovať výkon svojich elektrární podľa zaťaženia siete (v závislosti od frekvencie siete).

Dané nariadenie, ktoré Európska komisia prijala, sa skladá zo VII hláv, obsahuje 14 kapitol a 72 článkov. Nižšie je stručný prehľad obsahu. [33]

Hlava I – Všeobecné ustanovenia

Hlava II – Požiadavky

Hlava III – Postup oznámenia o prevádzke na účely pripojenia

Hlava IV – Zhoda

Hlava V – Výnimky

Hlava VI – Prechodné opatrenia pre vznikajúce technológie

Hlava VII – záverečné ustanovenia [33]

Ďalej obsahuje:

Rozsah pôsobnosti, Uplatňovanie na existujúce jednotky na výrobu elektrickej energie, Stanovenie významu jednotky na výrobu elektrickej energie, Uplatňovanie nariadenia na výrobné elektrickej energie, výrobné prečerpávacích elektrární, priemyselné areály, jednotky kombinovanej výroby tepla a elektriny [33]

IV. NÁVRH REGULÁCIE VÝKONU VETERNEJ ELEKTRÁRNE

Regulácia výkonu veternej elektrárne sa zabezpečuje prostredníctvom zmeny uhla natočenia lopatiek rotora. Zmenou uhla natočenia lopatiek rotora sa upravuje plocha, ktorou je lopatka vystavená vetru. Mení sa uhol nábehu. Jedná sa o tzv. pitch reguláciu. Dôležitou podstatou je, aby lopatky rotora boli správne natočené voči smeru vetra. Tento kompletný proces sa uskutočňuje na základe požiadaviek siete, ktoré sa neustále menia. Z týchto informácií vyplýva, že k tomu, aby bolo možné regulovať výkon, potrebujeme tieto vstupné údaje:

rýchlosť vetra, smer vetra, aktuálny stav siete, teda frekvenciu siete, informácie o aktuálnom uhle natočenia lopatiek rotora.

Ďalšie požiadavky:

Vstupné údaje v norme, Nastavenie turbíny, Potrebné regulovať výkon, Výroba bez regulácie, Potrebné natočenie gondoly, Natočenie gondoly, Výpočet vyrábaného výkonu, Výpočet zmeny výkonu potrebnej na reguláciu, Výpočet požadovaného výkonu, Realizovateľná plná regulácia?, Neúplná regulácia výkonu/ Využitý plný rozsah natočenia lopatiek, Regulácia výkonu/Natočenie lopatiek.

B. Regulácia výkonu veterných elektrární v počítačovom programe

Pre správnu predstavu, ako by principiálne mala fungovať regulácia výkonu veternej turbíny pomocou natáčania uhla lopatiek, bol vyhotovený program. Program bol vyhotovený v aplikácii Matlab. Program je možné vyhotoviť aj v iných aplikáciách ako je napríklad Eplan..

V. POSTUP VÝPOČTU REGULÁCIE VÝKONU V PROGRAME

1. krok

Do programu sa nezadáva alebo sa neupravujú parametre a hodnoty, ktoré sú fixné, medzi ktoré patrí:

- Frekvencia siete = požadovaná frekvencia = $f_n = 50$ Hz,
- Výkonové charakteristiky turbíny (závislosť výkonu turbíny od uhla natočenia lopatiek)

> charakteristiky sú v programe pevne zadefinované a sú vyhotovené podľa nami zvolených hodnôt,

> výkonové charakteristiky, podľa ktorých sa riadi program, nie sú zhotovené podľa skutočných hodnôt a meraní z praxe. Oslovených bolo viac ako 30 spoločností z celého sveta, ktoré sa zaoberajú výrobou a zhotovovaním veterných elektrární, ale ani jedna firma neposkytla žiadne údaje o závislostiach výkonu od uhla natočenia lopatiek. Je to ich know-how a verejne nie sú tieto údaje dostupné. Preto boli vyhotovené a do programu implementované výkonové charakteristiky (Obr. 4),

> výkonové charakteristiky sú určené len na principiálnu ukážku ako funguje regulácia výkonu veternej elektrárne zmenou uhla natočenia lopatiek turbíny,

> vyhotovené sú štyri výkonové charakteristiky, podľa ktorých sa program riadi; každá výkonová charakteristika je určená pre rôzne rozmedzia rýchlosti vetra,

> ak je rýchlosť vetra (RV): $0 \text{ m/s} \leq RV < 3 \text{ m/s}$ - rýchlosť vetra je príliš nízka, turbína stojí = nevyrába žiadny výkon,

> ak je rýchlosť vetra (RV): $3 \text{ m/s} \leq RV < 8 \text{ m/s}$ - maximálny možný vyrábaný výkon je 500 kW,

> ak je rýchlosť vetra (RV): $8 \text{ m/s} \leq RV < 15 \text{ m/s}$ - maximálny možný vyrábaný výkon je 1000 kW,

> ak je rýchlosť vetra (RV): $15 \text{ m/s} \leq RV < 22 \text{ m/s}$ - maximálny možný vyrábaný výkon je 1600 kW,

> ak je rýchlosť vetra (RV): $22 \text{ m/s} \leq RV \leq 30 \text{ m/s}$ - maximálny možný vyrábaný výkon je 5000 kW,

> ak je rýchlosť vetra (RV): $30 \text{ m/s} < RV$ - rýchlosť vetra je príliš vysoká, hrozí poškodenie turbíny; lopatky turbíny sa manuálne alebo automaticky natočia do neutrálnej polohy, kedy turbína zastaví a nebude vyrábať žiadny výkon.

2. krok

Do programu sa zadajú potrebné parametre. Tieto parametre sú základné, pomocou ktorých sa určia parametre turbíny. Všetky zadané parametre sú aktuálne, s ktorými veterná turbína pracuje. Neurčuje sa napríklad výška stožiaru, rozmer gondoly, rozmer lopatiek, výkon a parametre generátora, atď.

- Skutočná frekvencia siete = aktuálna frekvencia siete = f_s [Hz]

> môže byť zadaná ľubovoľná hodnota frekvencie napr. 49,8 Hz; 50,3 Hz

- Statika veternej elektrárne = S [%]

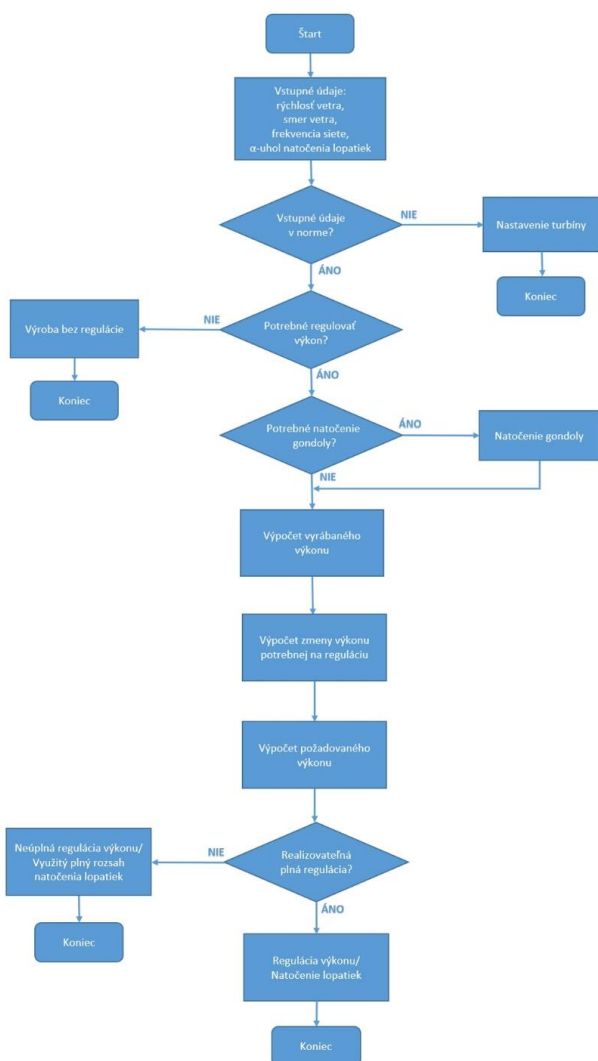
> môže byť zadaná ľubovoľná hodnota statiky napr. 4 %; 6%

- Natočenie turbíny/gondoly voči smeru vetra = NT [%]

> môže byť zadaná hodnota natočenia turbíny/gondoly od 0 % (natočenie 0% znamená, že gondola je natočená správne na smer vetra) do 180 % (natočenie 180 % znamená, že gondola je natočená maximálne nesprávne na smer vetra)

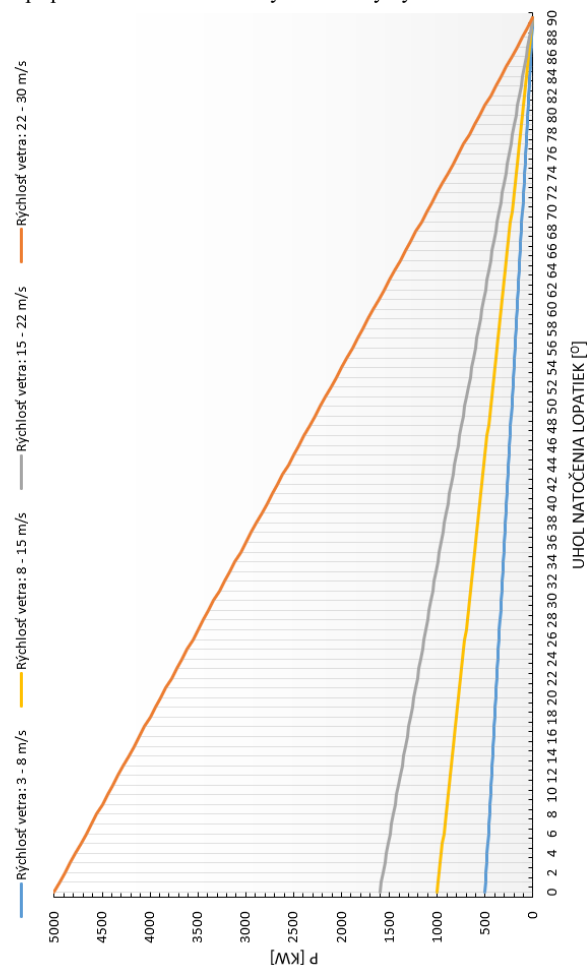
- Rýchlosť vetra = RV [m/s]

> môže sa zadať hodnota rýchlosti vetra len od 3 m/s (vrátane) do 30 m/s (vrátane). Ak sa zadá rýchlosť vetra pod 3 m/s, turbína stojí, pretože rýchlosť vetra je nedostačujúca na výrobu. Ak sa zadá rýchlosť vetra nad 30 m/s, lopatky sa automaticky natočia do neutrálnej/vypnutej polohy, aby sa veterná turbína nepoškodila. V tomto prípade veterná turbína nevyrába žiadny výkon.



Obr. 3 Vývojový diagram regulácie výkonu veternej elektrárne (zdroj: archív autora)

Grafická závislosť výkonu turbíny od natočenia uhla lopatiek



Obr. 4 Grafická závislosť výkonu turbíny od natočenia uhla lopatiek (zdroj: archív autora)

rýchlosť vetra nad 30 m/s, lopatky sa automaticky natočia do neutrálnej/vypnutej polohy, aby sa veterná turbína nepoškodila. V tomto prípade veterná turbína nevyrába žiadny výkon.

> môže byť zadaná hodnota rýchlosti vetra od 3 m/s (rýchlosť 3 m/s je najnižšia rýchlosť, pri ktorej veterná turbína dokáže dodávať výkon do siete)

- Natočenie lopatiek = NL [%]

> môže byť zadaná hodnota uhla natočenia lopatiek od 0 % (natočenie 0 % znamená, že uhol lopatiek je natočený najlepšie ako sa dá, a vyrába maximálny výkon) do 90 % (natočenie 90 % znamená, že uhol lopatiek je natočený na vypnutú polohu, teda veterná turbína stojí a nevyrába žiadny výkon).

3. krok

Podľa zadaných parametrov sa následne v programe vypočítajú tieto hodnoty:

- Aktuálny výkon = P [kW]

> výkon vyrábaný turbínou podľa zadaných parametrov; je určený z výkonových charakteristík veternej turbíny; je udávaný v kW pre detailnejšie viditeľné zmeny výkonu

- Výkonové číslo veternej elektrárne = Lambda [MW/Hz]

• Rozdiel medzi menovitou hodnotou frekvencie f_n [Hz] a skutočnou hodnotou frekvencie siete f_s [Hz]

- Požadovaná zmena výkonu = dP [kW]

> požadovaná zmena výkonu, ktorú je potrebné vykonať, aby skutočná frekvencia siete f_s [Hz] sa dostala na požadovanú, teda nominálnu hodnotu 50 Hz

> zmena výkonu je vypočítaná/určená z rozdielu frekvencií dF [Hz] pomocou vzorcov v programe

- Celkový výkon po započítaní zmeny výkonu = P_c [kW]

> ak je potrebné znížiť frekvenciu, požadovaná zmena výkonu dP [kW] sa odpočíta od aktuálneho výkonu P [kW]

> ak je potrebné zvýšiť frekvenciu, požadovaná zmena výkonu dP [kW] sa pripočíta k aktuálnemu výkonu P [kW]

- Finálne natočenie lopatiek turbíny

> program prepočíta požadovanú zmenu výkonu dP [kW] na zmenu uhla natočenia lopatiek [%] podľa zadaných výkonových charakteristík

> ak je potrebné znížiť frekvenciu, vypočítaná zmena uhla lopatiek NLU [%] sa pripočíta k aktuálnemu natočeniu lopatiek NL [%]

> ak je potrebné zvýšiť frekvenciu, vypočítaná zmena uhla lopatiek NLU [%] sa odpočíta od aktuálneho natočenia lopatiek NL [%].

VI. PRÍKLADY A VÝSLEDKY VÝPOČTU PROGRAMU

Príklad č.1

V prvom prípade sa rieši prípad, kedy je frekvencia siete nedostatočná $f_s = 49,5$ Hz, teda pod stanovenou úrovňou $f_n = 50$ Hz. Vtedy musí regulácia veternej elektrárne zaevidovať odchýlku a začať s natáčaním a zmenou uhla lopatiek rotora. Výkon je potrebné zvýšiť o hodnotu, ktorú vypočíta program, a teda meniť uhol lopatiek tak, aby dokázala turbína vyrobiť vyšší výkon. Vo výstupe je možné skontrolovať zadané parametre, podľa ktorých program počíta, a taktiež sa oboznámiť s výsledkami regulácie. Proces natáčania je znázornený na Obr. 6, výstup z programu je na Obr. 5.

Fixné hodnoty zapísané v programe:

Frekvencia siete = požadovaná frekvencia = $f_n = 50$ Hz,

Výkonová charakteristika turbíny (závislosť výkonu turbíny od uhla natočenia lopatiek pre rýchlosť vetra (RV): $22 \text{ m/s} \leq RV \leq 30 \text{ m/s}$ s maximálne možným vyrábaným výkonom 5000 kW).

Voliteľné hodnoty potrebné pre výpočet regulácie výkonu:

Skutočná frekvencia siete = aktuálna frekvencia siete = 49,5 Hz,

Statika veternej elektrárne = 4 %,

Natočenie turbíny/gondoly voči vetru = 96°,

Aktuálna rýchlosť vetra = 27 m/s,

Aktuálne natočenie lopatiek turbíny = 34°.

Regulácia výkonu - vypočítané hodnoty:

Je potrebné natočiť turbínu do smeru vetra presne o 96°,

Výkonové číslo veternej elektrárne = 1,555 MW/Hz,

Aktuálny výkon vyrábaný turbínou = 3111,1 kW,

Rozdiel medzi požadovanou a skutočnou frekvenciou = 0,5 Hz,

Potrebná zmena výkonu, zvýšenie = 777,775 kW,

Výsledný výkon po zvýšení = 3888,88 kW,

Uhol natočenia lopatiek turbíny po regulácii výkonu = 20°.

```
PROGRAM NA VÝPOČET REGULÁCIE VÝKONU V ZÁVISLOSTI OD FREKVENCIE SIETE,
POMOCOU ZMENY UHLA NATOČENIA LOPATIEK VETERNEJ TURBÍNY

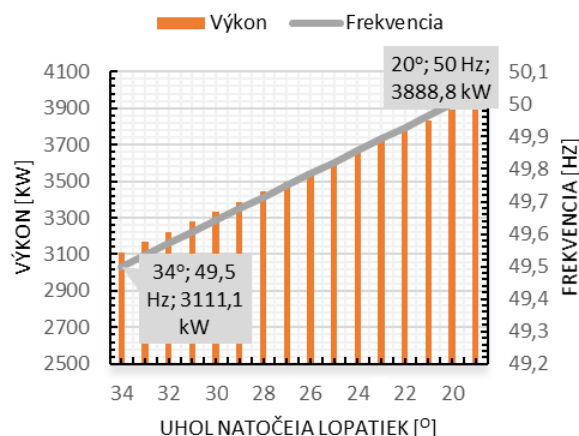
Nominálna=požadovaná hodnota frekvencie siete= 50 Hz
Skutočná=aktuálna hodnota frekvencie siete= 49.5 Hz
Statika veternej elektrárne= 4 [percentá]
Natočenie turbíny na smer vetra= 96 stupňov
Aktuálna rýchlosť vetra= 27 m/s
Aktuálne natočenie lopatiek turbíny= 34 stupňov

*****
Turbínu je potrebné natočiť do smeru vetra o 96 stupňov.
Výkonové číslo veternej elektrárne= 1.55555 [MW/Hz]
Aktuálny výkon vyrábaný turbínou= 3111.1 [kW]
Rozdiel medzi menovitou a skutočnou frekvenciou= 0.5 [Hz]= 500 [mHz]
Výkon turbíny je potrebné zvýšiť o 777.775 [kW],
vtedy bude skutočná frekvencia na požadovanej úrovni (50 Hz)

*****
Výkon turbíny sa zvýšil o hodnotu 777.775 [kW] z 3111.1 [kW] na 3888.88 [kW]!
Lopatky turbíny sa natočili z 34 stupňa/hov na 20 stupňov! Čo sa rovná potrebnej zmene výkonu!>>
```

Obr. 5 Výstup z programu Matlab - Príklad č.1 (zdroj: archív autora)

Regulácia výkonu turbíny (zvyšovanie) pri rýchlosti vetra 22-30 m/s



Obr. 6 Grafická závislosť regulácie výkonu – zvyšovanie (zdroj: archív autora)

Na Obr. 6 možno pozorovať systém natáčania lopatiek veternej turbíny v činnosti. Vďaka jeho práci je možné regulovať výkon veternej elektrárne podľa požiadaviek siete. Na ľavej strane grafickej závislosti sa nachádza zvislá hlavná os s hodnotami výkonov [kW]. Táto os znázorňuje aktuálnu veľkosť vyrábaného výkonu veternou

turbínou. Na pravej strane grafickej závislosti sa nachádza zvislá vedľajšia os s hodnotami frekvencie [Hz]. Táto vedľajšia os znázorňuje aktuálnu, teda skutočnú hodnotu frekvencie siete. V spodnej časti grafu sa nachádza vodorovná os, ktorá znázorňuje uhol natočenia lopatiek v stupňoch [°]. Výkon je v grafe znázornený oranžovými stĺpcami a jeho veľkosť možno odčítať z hlavnej zvislej osi na ľavej strane. Frekvencia je v grafe znázornená sivou priamkou a jej veľkosť možno odčítať z vedľajšej zvislej osi na pravej strane. Pri aktuálnej rýchlosti vetra 27 m/s je turbínou vyrábaný výkon o hodnote 3111,1 kW. Uhol natočenia lopatiek je v tomto prípade rovný 34°. Pri aktuálnej situácii v sieti, kedy má frekvencia hodnotu 49,5 Hz, je tento výkon potrebné zvýšiť o požadovanú hodnotu. Táto hodnota sa v danom prípade rovná 777,775 kW. Výkon sa zvyšuje kvôli nízkej frekvencii siete. Je potrebné, aby veterná elektrárňa vyregulovala svoj výkon a hodnota frekvencie sa zvýšila o 0,5 Hz na hodnotu 50 Hz. Výkon elektrárne je potrebné zvyšovať dovtedy, kým sa frekvencia nebude rovnať 50 Hz. Zároveň možno pozorovať, ako sa so zmenou uhla natočenia lopatiek mení aj veľkosť vyrábaného výkonu. Čím viac sa uhol natočenia lopatiek zmenšuje, tým viac stúpa výroba výkonu a tým zákonite stúpa aj frekvencia siete. Regulácia výkonu sa zastaví na hodnote 3888,88 kW, kedy je frekvencia na požadovanej hodnote 50 Hz. Uhol lopatiek je natočený na hodnotu 20°. Regulácia výkonu veternej elektrárne je dokončená.

Príklad č.2

V druhom prípade sa rieši opačný prípad, a to taký, kedy je frekvencia siete privysoká $f_s = 50,2$ Hz, teda nad stanovenou úrovňou $f_n = 50$ Hz. Pri zaevidovaní odchýlky musí regulácia veternej elektrárne začať s natáčaním a zmenou uhla lopatiek rotora. Výkon je v tomto prípade potrebné znížiť o vypočítanú hodnotu, teda meniť uhol lopatiek tak, aby dokázala turbína znížiť vyrábaný výkon. Výstup z programu je možné vidieť na Obr. 7. Vo výstupe je možné skontrolovať zadané parametre, podľa ktorých program počíta, a taktiež sa oboznámiť s výsledkami regulácie. Proces natáčania je znázornený na Obr. 8, výstup z programu je na Obr. 7.

```
PROGRAM NA VÝPOČET REGULÁCIE VÝKONU V ZÁVISLOSTI OD FREKVENCIE SIETE,
POMOCOU ZMENY UHLA NATOČENIA LOPATIEK VETERNEJ TURBÍNY

Nominálna=požadovaná hodnota frekvencie siete= 50 Hz
Skutočná=aktuálna hodnota frekvencie siete= 50.2 Hz
Statika veternej elektrárne= 4 [percentá]
Natočenie turbíny na smer vetra= 96 stupňov
Aktuálna rýchlosť vetra= 27 m/s
Aktuálne natočenie lopatiek turbíny= 14 stupňov

*****
Turbínu je potrebné natočiť do smeru vetra o 96 stupňov.
Výkonové číslo veternej elektrárne= 2.1111 [MW/Hz]
Aktuálny výkon vyrábaný turbínou= 4222.2 [kW]
Rozdiel medzi menovitou a skutočnou frekvenciou= 0.2 [Hz]= 200 [mHz]
Výkon turbíny je potrebné znížiť o 422.22 [kW],
vtedy bude skutočná frekvencia na požadovanej úrovni (50 Hz)

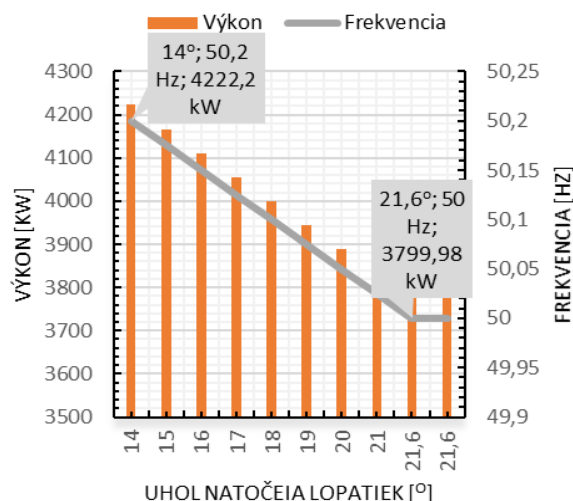
*****
Výkon turbíny sa znížil o hodnotu 422.22 [kW] z 4222.2 [kW] na 3799.98 [kW]!
Lopatky turbíny sa natočili z 14 stupňa/rov na 21.6 stupňov! čo sa rovná potrebnej zmene výkonu!>>
```

Obr. 7 Výstup z programu Matlab - Príklad č.2 (zdroj: archív autora)

Na Obr. 8 možno pozorovať systém natáčania uhla lopatiek veternej turbíny v činnosti. Vďaka jeho práci je možné regulovať výkon veternej elektrárne podľa požiadaviek siete. Osi grafickej závislosti sú v tomto prípade označené rovnako ako predchádzajúcim príklade. Taktiež označenie výkonu a frekvencie je v grafe znázornená rovnakými farbami.

Pri aktuálnej rýchlosti vetra 27 m/s je turbínou vyrábaný výkon o hodnote 4222,2 kW. Uhol natočenia lopatiek je v tomto prípade rovný 14°. Pri aktuálnej situácii v sieti, kedy má frekvencia hodnotu 50,2 Hz, je tento výkon potrebné znížiť o požadovanú hodnotu. Táto hodnota sa v danom prípade rovná 422,22 kW. Výkon sa znižuje kvôli vysokej frekvencii siete. Je potrebné, aby veterná elektrárňa vyregulovala svoj

výkon a hodnota frekvencie sa znížila o 0,2 Hz na hodnotu 50 Hz. Výkon elektrárne je potrebné znižovať dovtedy, kým sa frekvencia nebude rovnať 50 Hz. Zároveň možno pozorovať, ako sa so zmenou uhla natočenia lopatiek mení aj veľkosť vyrábaného výkonu. Čím viac sa uhol natočenia lopatiek zväčšuje, tým viac klesá výroba výkonu a tým zákonite klesá aj frekvencia siete. Regulácia výkonu sa zastaví na hodnote 3799,98 kW, kedy je frekvencia na požadovanej hodnote 50 Hz. Uhol lopatiek je natočený na hodnotu 21,6°. Regulácia výkonu veternej elektrárne je dokončená.



Obr. 8 Grafická závislosť regulácie výkonu – znižovanie (zdroj: archív autora)

Príklad č.3

V treťom názornom prípade sa rieši situácia, kedy je frekvencia siete $f_s = 49,8$ Hz, čo znamená, že je nižšia ako menovitá frekvencia $f_n = 50$ Hz. Pri zistení odchýlky musí regulácia veternej elektrárne začať s natáčaním a zmenou uhla lopatiek rotora. Výkon je v tomto prípade potrebné zvýšiť o vypočítanú hodnotu. Je potrebné zmeniť uhol natočenia lopatiek tak, aby dokázala turbína zvýšiť vyrábaný výkon. Výstup z programu je možné vidieť na Obr. 9. Vo výstupe je možné skontrolovať zadané parametre, podľa ktorých program počíta, a taktiež sa oboznámiť s výsledkami regulácie. Proces natáčania je znázornený na Obr. 10. Tento príklad je špecifický v tom, že regulácia výkonu nebude úplná kvôli maximálne využitému rozsahu.

```
PROGRAM NA VÝPOČET REGULÁCIE VÝKONU V ZÁVISLOSTI OD FREKVENCIE SIETE,
POMOCOU ZMENY UHLA NATOČENIA LOPATIEK VETERNEJ TURBÍNY

Nominálna=požadovaná hodnota frekvencie siete= 50 Hz
Skutočná=aktuálna hodnota frekvencie siete= 49.8 Hz
Statika veternej elektrárne= 4 [percentá]
Natočenie turbíny na smer vetra= 35 stupňov
Aktuálna rýchlosť vetra= 27 m/s
Aktuálne natočenie lopatiek turbíny= 4 stupňov

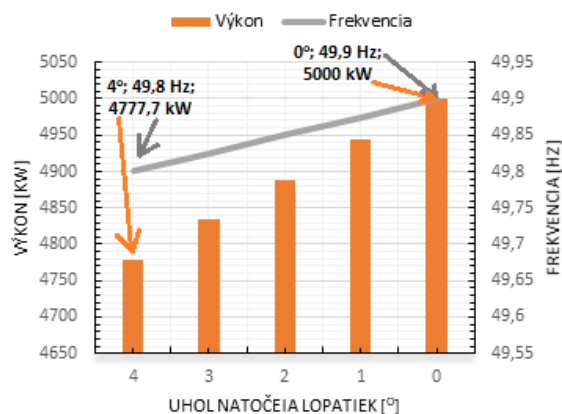
*****
Turbínu je potrebné natočiť do smeru vetra o 35 stupňov.
Výkonové číslo veternej elektrárne= 2.38885 [MW/Hz]
Aktuálny výkon vyrábaný turbínou= 4777.7 [kW]
Rozdiel medzi menovitou a skutočnou frekvenciou= 0.2 [Hz]= 200 [mHz]
Výkon turbíny je potrebné zvýšiť o 477.77 [kW],
vtedy bude skutočná frekvencia na požadovanej úrovni (50 Hz)

*****
Výkon turbíny nie je možné zvýšiť o požadovanú veľkosť!
To znamená, že lopatky turbíny nie je možné natočiť o požadované stupne!
Výkon turbíny bude na maxime už po natočení o 4 stupeň/stupňov!
= zvýšenie výkonu turbíny len o 222.3 [kW] na 5000 [kW]!>>
```

Obr. 9 Výstup z programu Matlab - Príklad č.3 (zdroj: archív autora)

Na obr. 10 možno pozorovať systém natičania lopatiek veternej turbíny v činnosti. Vďaka jeho práci, je možné regulovať výkon veternej elektrárne podľa požiadaviek siete. Osi grafickej závislosti sú v tomto prípade označené rovnako ako predchádzajúcom príklade. Taktiež označenie výkonu a frekvencie je v grafe znázornená rovnakými farbami. Pri aktuálnej rýchlosti vetra 27 m/s je turbínou vyrábaný výkon o hodnote 4777,7 kW. Uhol natočenia lopatiek je v tomto prípade rovný 4°. Pri aktuálnej situácii v sieti, kedy má frekvencia hodnotu 49,8 Hz, je tento výkon potrebné zvýšiť o požadovanú hodnotu. Táto hodnota sa v danom prípade rovná 477,77 kW. Výkon sa zvyšuje kvôli nedostatočnej frekvencii siete. Je potrebné, aby veterná elektrárňa vyregulovala svoj výkon a hodnota frekvencie sa zvýšila o 0,2 Hz na hodnotu 50 Hz. Výkon elektrárne je potrebné zvyšovať dovtedy, kým sa frekvencia nebude rovnať 50 Hz. V tomto prípade nastáva situácia, kedy nie je možné výkon elektrárne vyregulovať úplne.

Z vyhodnotenia vypočítaných hodnôt možno konštatovať, že súčet hodnoty aktuálneho vyrábaného výkonu a potrebnej zmeny výkonu na vyregulovanie frekvencie siete ($4777,7 \text{ kW} + 477,77 \text{ kW} = 5255,47 \text{ kW}$) je väčší ako maximálny možný vyrábaný výkon 5000 kW. Z toho vyplýva, že lopatky rotora by bolo potrebné natočiť o viac ako 40, čo je taktiež viac ako je krajná hranica natočenia. V tomto prípade sa regulácia výkonu zastaví na maximálnej hodnote 5000 kW, kedy je uhol natočenia lopatiek 0°. Regulovaný výkon má hodnotu len 222,3 kW. Frekvenciu siete nie je možné vyregulovať na predpísanú hodnotu 50 Hz. Regulácia výkonu veternej elektrárne je neúplná. Graf neúplnej regulácie je znázornený na Obr. 10. V tomto okamihu je potrebné, aby boli medzi sebou prepojené viaceré veterné elektrárne, ktoré by spolu komunikovali a dokázali zvýšný výkon v sieti vyregulovať.



Obr. 10 Grafická závislosť neúplnej regulácie výkonu – zvyšovanie (zdroj: archív autora)

VII. ZÁVER A ODPORÚČANIA PRE PRAX

Predmetom práce bolo vytvorenie návrhu regulácie výkonu veternej elektrárne prostredníctvom systému natičania lopatiek rotora a zhotovenie počítačového programu na demonštráciu regulácie výkonu v praxi pri presne určených poveternostných podmienkach. Návrh regulácie výkonu bol vytvorený pomocou vývojového diagramu. Pri zostrojení vývojového diagramu regulácie boli použité vzorce pre výpočet zmeny výkonu v závislosti od frekvencie siete a jeho následný prepočet na stupne, o ktoré sa má lopatka rotora natočiť. Počítačový program bol vyhotovený v aplikácii Matlab. Z výsledkov simulácie boli vytvorené grafické závislosti, na ktorých je viditeľné,

ako regulácia výkonu veternej elektrárne pracuje. Výkon veternej elektrárne je možné znižovať, ale taktiež zvyšovať podľa požiadaviek siete. Regulácia výkonu pomocou natičania lopatiek rotora má podstatný význam pre sieť a výrobu elektrickej energie. S určitou možnosťou možno povedať, že najvhodnejšie by bolo, ak by sa v čo najkratšom možnom čase regulácia výkonu implementovala na čo najviac veterných elektrární. Podľa prostredia a podnebia, v ktorom bude veterná elektrárňa pracovať, je možné použiť vhodný systém natičania lopatiek podľa jeho výhod a nevýhod. Na výber je viacero alternatív, a to elektrický, hydraulický alebo hybridný systém. Je potrebné, aby systém natičania lopatiek reagoval na zmeny frekvencie a reguloval výkon s dostatočnou rýchlosťou, presnosťou, a za každých podmienok.

Vytvorenie návrhu (vývojového diagramu) a programu regulácie výkonu prinieslo pozitívne výsledky, ale zároveň ukázalo ďalšie možnosti a nejasnosti pri využívaní tejto technológie. Simulácia regulácie výkonu v počítačovom programe neuvažuje s prepájaním a vyregulovaním výkonu na viacerých veterných elektrárnach súčasne. Taktiež vyhotovené výkonové charakteristiky, ktoré popisujú závislosť aktuálneho výkonu od uhla natočenia lopatiek, nevychádzajú zo skutočných meraní, keďže nebolo možné získať tieto hodnoty. Pre lepšie a presnejšie výsledky regulácie výkonu by bolo vhodné vykonať simuláciu na konkrétnom type veternej elektrárne s príslušnými parametrami a so skutočnými výkonovými charakteristikami.

Reguláciu výkonu nových výrobných jednotiek, ktoré sa považujú za významné, popisuje nariadenie komisie Európskej únie 2016/631. Kvôli čoraz väčšiemu rozmachu veterných elektrární v Európe aj vo svete je potrebné, aby sa regulácia výkonu implementovala do praxe. Pretože ak sa regulácia výkonu z obnoviteľných zdrojov, či už je to elektrická energia vyrábaná z vetra, slnečného žiarenia alebo aj iného obnoviteľného zdroja, nezavedie a nezačne využívať, môže vzniknúť výrazný problém s rovnováhou výkonov v sústave, teda rovnováhou medzi výrobou a spotrebou. Daný problém sa za pár rokov môže stať skutočnosťou, ak sa technológie na reguláciu výkonu z obnoviteľných zdrojov nezavedú do praxe. Pre lepšiu predstavu možno uviesť situáciu, ktorá môže nastať v blízkej budúcnosti. V danom okamihu len 1/3 z celkovej výroby elektrickej energie bude tvorená výrobou napríklad z jadrových, vodných alebo tepelných elektrární, a zvyšné 2/3 bude tvoriť výroba elektrickej energie z veterných a slnečných elektrární. V tomto prípade existujú dva typy problémov. Prvý predstavuje spôsob ako zabezpečiť, aby celková výroba výkonu v sústave bola dostačujúca a pokrývala dopyt, keďže človek nevie ovládať počasie, a teda presne povedať v aký čas bude vyrábané dané množstvo výkonu. Druhý problém spočíva v zabezpečení, aby celková výroba výkonu v sústave nebola nadbytočná a neprekračovala dovolené limity. Ani v tejto situácii nie je možné predpovedať konkrétne hodnoty vyrábaného výkonu v danom časovom okamihu. Teoreticky môže nastať situácia, že v celej Európe bude slnečný deň a zároveň sa na oblohe nebude nachádzať žiaden mrak. Vtedy budú slnečné elektrárne v Európe vyrábať maximálny výkon. Súčasne bude v rovnaký deň na celom území a pobrežiach Európy fúkať vietor dosť silný na to, aby veterné elektrárne vyrábali maximálny výkon. Nastáva otázka: „Čo s týmto prebytočným výkonom?“. Nemal by ho kto odobrať a to by bol pre sústavu problém, keďže vždy musí byť zachovaná rovnováha v sústave. Preto je potrebné a nutné, aby sa výkon, nie len veterných elektrární, ale aj všetkých ostatných elektrární, reguloval.

POĎAKOVANIE

VEGA 1/0757/21 "Výskum možností implementovania Wide Area Monitoring Systémov (WAMS) do elektrizačnej sústavy"

Projekt APVV-19-0576 „Sebestačnosť elektroenergetiky v podmienkach liberalizovaného trhu s elektrinou

LITERATÚRA

- [1] DŽMURA, J. Elektrárne. Učebný text, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Košice, 2011, s. 72.
- [2] KOLCUN, M., DŽMURA, J., MEŠTER, M., PAVLÍK, M. Elektrárne. Technická univerzita v Košiciach, 2017, s. 202, ISBN 978-80-553-3119-5.
- [3] QUASCHNING, V. Obnoviteľné zdroje energií. Praha: Grada, 2010. Staviteľ., s.165-168, 173-178, ISBN 9788024732503.
- [4] TUMOVÁ, O.-V. Stav větrné energetiky v Evropě a České republice. V Elektro. [Online]. 2009. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38355.pdf>>
- [5] FUTUREWIND. Eneco purchases electricity Haliade-X prototype. [Online]. 17.12.2019. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<https://www.futurewind.nl/2019/12/17/eneco-purchases-electricity-haliade-x-prototype/>>
- [6] MHI VESTAS. MHI Vestas' V164-9.5 MW turbine to be tested at Clemson University, SC. [Online]. 27.10.2017. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<http://www.offshorewindindustry.com/news/mhi-vestas-v164-95-mw-turbine-to-tested>>
- [7] TKÁČ, J. Veterné elektrárne s vertikálnou osou. In: Elektroenergetika. Roč. 5, č. 2 (2012), s. 48 – 51. ISSN 1337-6756.
- [8] BENDA, V. Obnoviteľné zdroje energie. 1. vyd. Praha: Profi press, 2012. ISBN 978-80-86726-48-9.
- [9] KALAMEN, L. Veterné turbíny. [Online]. 2020. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<https://www.slideserve.com/graham/vetern-turb-ny>>
- [10] KOVEL. Veterná elektrárň. [Online]. 2007. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<http://www.kovel.sk/userfiles/news/veterna.pdf>>
- [11] JOHNSON. Turbine review. [Online]. 27.1.2009. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<https://wiki.duke.edu/display/wwt/Turbine+review>>
- [12] KOLCUN, M., DŽMURA, J., MEŠTER, M., PAVLÍK, M. Elektrárne. Technická univerzita v Košiciach, 2017, s. 202, ISBN 978-80-553-3119-5.
- [13] MENET, J.L., BOURABAA, N. Increase in the savonius rotors efficiency via a parametric investigation. [Online]. Január 2004. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/228957621_Increase_in_the_Savonius_rotors_efficiency_via_a_parametric_investigation>
- [14] EXCLUS. Excluss MagLev VAWT Darrieus Savonius hybrid wind turbine systems. [Online]. 2014. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<http://www.solar.exclus.com/wind-power/how-maglevs-work.html>>
- [15] WIKIPEDIA. Savonius wind turbine. [Online]. 8.11.2017. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Savonius_wind_turbine>
- [16] WIKIWAND. Troposkína. [Online]. 2015. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<http://www.wikiwand.com/sl/Troposkína>>
- [17] POŠIK, J. Veterné elektrárne. [Online]. 3.8.2011. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<http://www.posterus.sk/?p=11191>>
- [18] OZE. Veterná energia. [Online]. 2018. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<http://www.oze.stuba.sk/oze/veterna-energia/>>
- [19] VOBORIL, D. Veterné elektrárny - princíp, rozdelení, elektrárny v ČR. oEnergetice.cz [online]. 2015. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<https://oenergetice.cz/elektřina/veterné-elektřárny-princip-cinnosti-zakladni-rozdeleni/>>
- [20] HAU, E. Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics. Third, translated edition. New York: Springer, [2013]. ISBN 978-3- 642-27150-2.
- [21] GEOCACHING. Ostrý vrch. [Online]. 8.3.2014. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <https://www.geocaching.com/geocache/GC5A5MX_ostry_vrch?guid=1825eb35-6832-41d7-9e89-9146dea4ad8>
- [22] ENERCON. Technical Description. ID: D0617713-7. [Online]. 25.1.2019. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<http://www.enercon.de>>
- [23] HANSEN, P. Modular towers and the quest for stronger wind. [Online]. 10.2.2010. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<https://www.windpowerengineering.com/modular-towers-and-the-quest-for-stronger-wind/>>
- [24] Bywaters, G., Mattila, P., Costin, D., Stowell, J., John, V., Hoskins, S., Lynch, J., Cole, T., Cate, A., Badger, C., Freeman, B. Northern Power NW 1500 Direct-Drive Generator. [Online]. 2007. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/40177.pdf>>
- [25] GOUDARZI, N., ZHU W. D. A review on the development of wind turbine generators across the world. [Online]. 20.6.2013. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s40435-013-0016-y>>
- [26] ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY. The Inside of a Wind Turbine. [Online]. 2019. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<https://www.energy.gov/eere/wind/inside-wind-turbine>>
- [27] NIDEC. Dedicated range up to 5MW. [Online]. 2019. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<https://acim.nidec.com/generators/leroy-somer/products/power-alternators/alternators-for-windturbines>>
- [28] ŠKORPIK, J. Větrné turbíny a ventilátory. [Online]. 8.7.2019. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<https://www.transformacni-technologie.cz/22.html>>
- [29] WIND POWER WORKS. Pitch systems of the future—under all climatic conditions. [Online]. 1.5.2020. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<https://www.fsenergy.com/wp-content/uploads/2017/04/hydraulic-pitch-systems-of-the-future.pdf>>
- [30] KURZ INDUSTRIAL SOLUTIONS. What Are the Differences Between Hydraulic and Electric Pitch Systems? [Online]. 24.6.2020. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<https://kurz.com/hydraulics-electric-pitch-systems-differences/>>
- [31] IFM ELECTRONIC AB. Wind turbine with gearbox. [Online]. 2017. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <http://eval.ifm-electronic.com/ifms/web/apps-by-industry/cat_060_020_010.html>
- [32] DVORAK, P. Pitch controls: electric, hydraulic, or something new? [Online]. 5.6.2009. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<https://www.windpowerengineering.com/pitch-controls-electric-hydraulic-or-something-new/>>
- [33] EURÓPSKA KOMISIA. Nariadenie komisie (EÚ) 2016/631. [Online]. 14.4.2016. [Datum: 1.5.2020]. Dostupné z: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/ALL/?uri=CELEX%3A32016R0631>>
- [34] KOLCUN, M., GRIGER, V., BEŇA, E., RUSNÁK, J. Prevádzka elektrizačnej sústavy. Technická univerzita v Košiciach, 2007, s. 202, ISBN 978-80-8073-837-2.

ADRESY AUTOROV

Vladimír Kohan, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, vladimir.kohan@tuke.sk

Zsolt Čonka, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, zsolt.conka@tuke.sk

Michal Kolcun, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, michal.kolcun@tuke.sk

Peter Havran, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, peter.havran@tuke.sk

Robert Štefko, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, robert.stefko@tuke.sk