

Jozef Rusnák, Karel Máslo, Petr Trubač

Modelování větrné elektrárny s dvojitě napájeným asynchronním generátorem

Abstrakt

Príspevok prezentuje výsledky výpočtov realizované dvoma simulačnými nástrojmi MODES a EUROSTAG uskutočnené na jednoduchom modeli sústavy obsahujúcom veterné elektrárne s dvojitou napájaným asynchrónnym generátorom.

ÚVOD

Větrné elektrárny (VtE) patří mezi obnovitelné zdroje energie a jejich instalovaný výkon narůstá ve světě a v Evropě zvláště. Jejich popisem se zabývala řada předchozích publikací (viz např. [1] - [8]).

Vzhledem k specifickým vlastnostem VtE kladou na ně síťové kodexy (stanovující podmínky připojování a provozování – viz např. [9], [10] určité požadavky, týkající se např. chování Vte při poruchách v síti. Jednou z možností prokázat plnění požadavků síťových kodexů je simulační výpočet na verifikovaném dynamickém modelu, který věrohodně reprodukuje odezvy VtE na vnější změny napětí, frekvence a rychlosti větru..

Takové dynamické modely jsou potřebné i pro výpočty dynamické stability a slouží i k pochopení základních principů fungování a dynamického chování VtE.

Rovněž podle požadavků UCTE stanovených v Provozních příručkách (tzv. „Operational Handbooks“ – viz [11]) musí každý provozovatel přenosové soustavy implementovat počítačové modely pro výpočty stability.

Tento příspěvek ukazuje a porovnává výsledky výpočtů provedené dvěma síťovými simulátory MODES a EUROSTAG. Výpočty byly provedeny na jednoduché soustavě, jejíž dynamické chování lze snadno interpretovat.

I. MODEL SOUSTAVY

Jednopolové schéma modelované soustavy je na obrázku 1. Vybrané data modelu (společná pro oba simulátory) jsou popsána v následujících tabulkách.

TABUĽKA 1
Hodnoty záťaží v uzloch NHV1 a NHV3

	NHV1	NHV3
P [MW]	200	20
Q [MVar]	60	6

TABUĽKA 2
Parametre vedení (U_v=110 kV, S_v=100 MVA)

Vedenia medzi uzlami	NHV1-NHV2-1 NHV1-NHV2-2 NHV2-NHV3	NHV2-NLOAD1 NHV2-NLOAD2
Typ	185AlFe6	185AlFe6
Délka vedenia [km]	20	10
Celkový odpor vedenia [p.u.]	0,025785	0,01289
Celková reaktancia vedenia [p.u.]	0,06711	0,03355

TABUĽKA 3
Parametre trojvlnitových transformátorov T201, TFO_WT1, TFO_WT2

	T201	TFO_WT1	TFO_WT2
Miesto pripojenia vinutí (prim./sek./terc.)	NHV0/NHV1/NHVT	NLOAD1/NST1/NRT1	NLOAD2/NST2/NRT2
Menovité výkony vinutí [MVA]	250/250/100	25/25/6	
Menovité napätia [kV]	400/121/10,5	110/0,69/0,69	
Straty naprázdno [%]	0,145	0	
Magnetizačný prúd [%]	0,21	0	
Straty nakrátko ΔP_{k12} [%]	0,24	0,6	
Straty nakrátko ΔP_{k13} [%]	0,1	0,6	
Straty nakrátko ΔP_{k23} [%]	0,25	0,6	
napätie nakrátko u_{k12} [%]	13,2	11,985	
napätie nakrátko u_{k13} [%]	37,3	11,985	
napätie nakrátko u_{k23} [%]	22,4	11,985	

TABUĽKA 4
Parametre transformátora T401

Odpor [p.u.]	0,000185
Reaktancia [p.u.]	0,00769
Menovitý výkon transformátora [MVA]	250
Prevod	15,75 kV/400 kV

TABUĽKA 5
Parametre veterných generátorov a budičov VTE

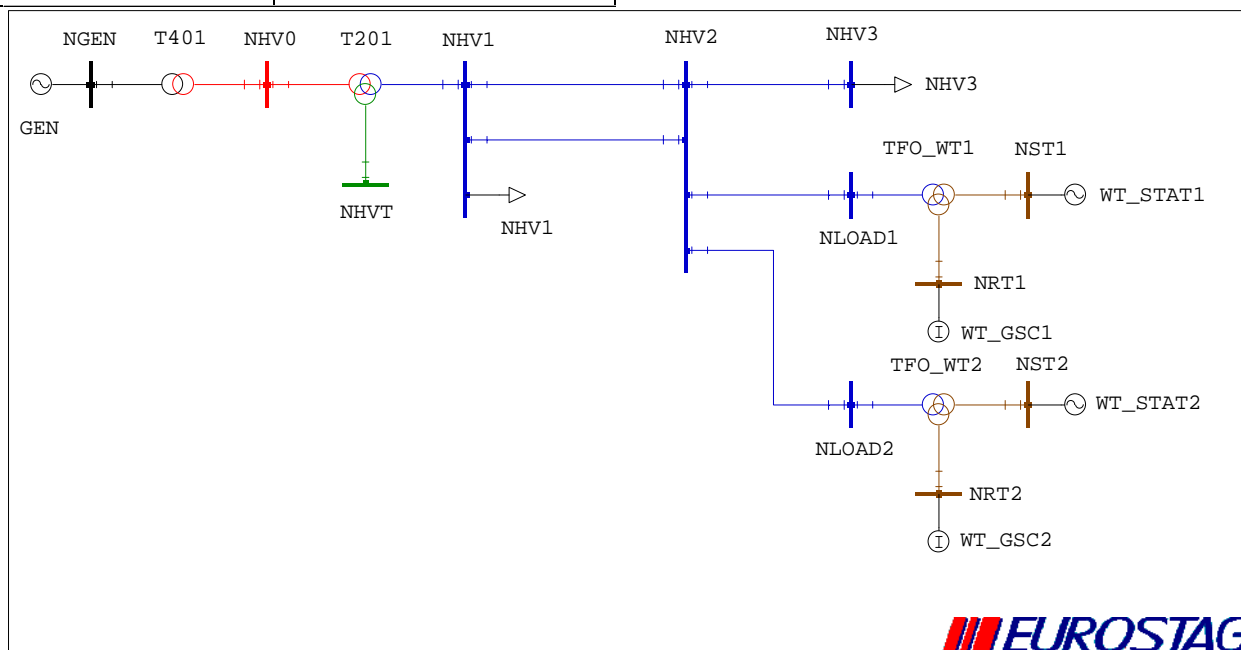
Menovitý zdánlivý výkon jedného veterného parku [MVA]	20
Menovité napätie jedného generátora [V]	690
Konštanta zotrvačnosti [MWs./MVA]	3,527
Synchronne otáčky rotora [p.u.]	0,9
Minimálne otáčky rotora [p.u.]	0,56

Maximálne otáčky rotora [p.u.]	1,122
Menovitý zdanlivý výkon budiča [MVA]	6

TABULKA 6
Parametre generátora GEN ($U_v=15,75$ kV, $S_v=220$ MVA)

Menovitý výkon turbíny [MW]	200
Činný výkon generátora [MW]	220
Menovité napätie na svorkách generátora [kV]	15,75
Počet vinutí	4
Rezistencia statorového vinutia [Ω]	0,00166
Zvod statora [%]	16,6

Synchrónna/prechodná/rázová reaktancia v pozdĺžnej osi [%]	191/26,7/19,9
Synchrónna/prechodná/rázová reaktancia v priečnej osi [%]	182/36,3/20,4
Prechodná/rázová konštanta v pozdĺžnej osi [s]	7,7/0,04
Prechodná/rázová konštanta v priečnej osi [s]	2,3/0,03
Konštanta zotrvačnosti [MWs./MVA]	0,85



Obr. 1 Jednopolové schéma modelovanej soustavy.

II. MODEL DFIG V PROGRAMU MODES

Přechodné děje v obou vinutích asynchronního stroje jsou v běžném provozu zanedbány, protože jsou mnohem rychlejší v porovnání s vyšetřovanými elektromechanickými ději. Dominantní roli přebírá frekvenční měnič, který je v součinnosti s regulačními obvody schopen přizpůsobovat činný i jalový výkon požadavkům jak na efektivní využití kinetické energie (rychlosti) větru, tak i na minimalizaci zpětných vlivů stroje na síť. V běžném provozu s napětím větším než je 70 % jmenovité hodnoty je dodávka činného i jalového výkonu daná výstupy z regulátorů P a Q:

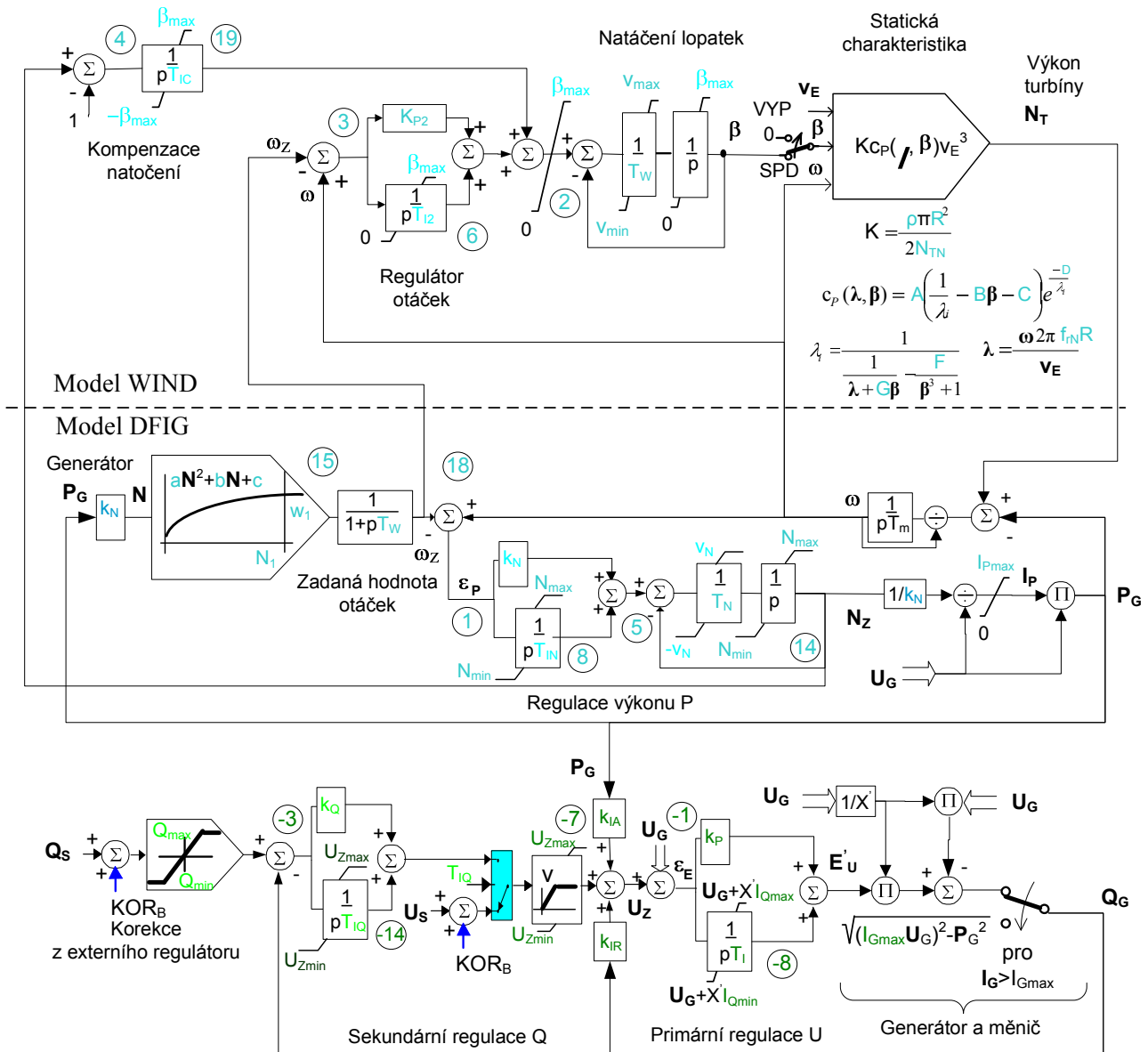
Regulace spočívá ve dvou oddělených a nezávislých částech pro činný a jalový výkon P a Q. Cílem regulace P je přizpůsobovat činný výkon dodávaný do sítě, aby odpovídal výkonové rovnováze soustrojí, tedy především výkonu vyráběnému větrnou turbínou v závislosti na rychlosti větru. V modelu se předpokládá spolupráce s větrnou turbínou s proměnnými otáčkami WIND, takže zadaná hodnota otáček se určuje v závislosti na skutečném dodávce výkonu do sítě P_G . V případě výkonové nerovnováhy (rozdíl mezi výkonem turbíny N_T a výkonem generátoru P_G) a vzniku regulační odchylky ε_p je požadovaný výkon měněn trendem v_N , aby se dostal do souladu

s výkonem turbíny N_T . Naopak při poklesu dodávky do sítě P_G (např. vlivem zkratu) se zmenšují zadané otáčky ω_z (vstupující i do modelu turbíny), čímž se zmenšuje akcelerace soustrojí.

Regulace Q může obdobně jako u synchronního generátoru pracovat v primární nebo sekundární regulaci v závislosti na hodnotě parametru T_{IQ} . Jestliže je nulový, regulátor reguluje svorkové napětí, případně modifikované statikami jalovým a/nebo činný výkonem (volbou parametrů k_{IR} a k_{IA}).

Pro $T_{IQ}>0$ reguluje regulátor jalový výkon generátoru. V obou případech lze k zadané hodnotě přičítat korekční signál z externího regulátoru a simulovat tak např. regulaci napětí sítě (v pilotním uzlu). V případě, že proud překročí jmenovitou hodnotu o 10% je jeho hodnota regulována dodávkou Q na jmenovitou hodnotu (dodávka činného výkonu má přednost před regulací napětí). Pro $T_{IQ}<0$ reguluje regulátor na konstantní účinník.

Výkon turbíny N_T je určen součinem konstanty K (poloviční součin hustoty vzduchu a plochy vrtule), účinnosti turbíny c_p a třetí mocniny rychlosti větru. Účinnost turbíny závisí na činiteli rychloběžnosti λ a úhlu natočení β podle vztahu převzatého z [12].



Obr. 2 Blokové schéma modelu DFIG včetně modelu větrné turbíny WIND.

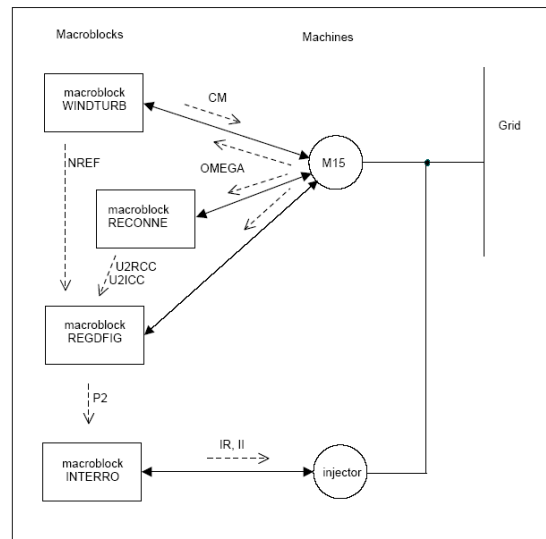
III. MODEL DFIG V PROGRAME EUROSTAG

Model VtE v programe EUROSTAG [13] pozostáva z modelu DFIG modelovanom indukčným strojom s rotorom pripojeným k napáťovému zdroju (typ M15) a injektoru (IR,II) a z tzv. makroblokov WINDTURB, REGDFIG, RECONNÉ a INTERRO.

Model DFIG v programe EUROSTAG je znázornený na Obr. 4. Štruktúra a prepojenia medzi jednotlivými tzv. makroblokmi modelovanými v programe EUROSTAG sú zobrazené na Obr. 3.

Makroblok WINDTURB počíta mechanický moment (CM) a optimálnu referenčnú rýchlosť rotora (NREF) na základe užívateľom zadanej rýchlosti vetra (@VENT) a aktuálnej rýchlosti rotora (OMEGA). Hodnota NREF vstupuje do makrobloku REGDFIG.

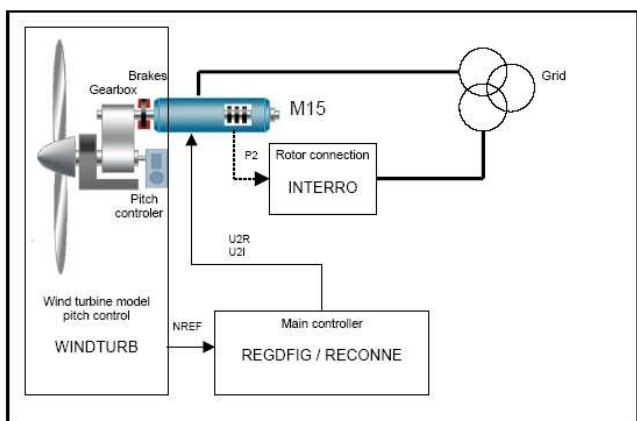
Makroblok REGDFIG počíta napätia rotora (U2R a U2I) na reguláciu rotorových prúdov a činný výkon rotora (P2) na základe referenčnej rýchlosti rotora NREF a aktuálnej rýchlosti rotora.



Obr. 4 Modelovanie DFIG v programe EUROSTAG [13]

Makroblok RECONNE riadi prevádzku generátora počas doby odpojenia statora. V prípade poklesu napätia spôsobenom napr. skratom je statorová ochrana schopná okamžite odpojiť stator od siete a v prípade vrátenia funkcií do normálu ho znovu pripojiť.

Makroblok INTERRO reguluje injektor (WT_GSC) a modeluje sieťovú stranu frekvenčného meniča. Vstupom do makrobloku je hodnota činného výkonu generovaná rotorom (P2) a výstupom je prúd injektovaný do siete.



Obr. 5 Prepojenia medzi makroblokmi modelu v programe EUROSTAG [13]

IV. SIMULAČNÍ VÝPOČTY

V obou programech byl simulován následující scénář:

TABUĽKA 7

Scénář událostí simulačního výpočtu

UDALOSTĚ	ČAS [s]	
	Začiatok	Koniec
Štart dynamickej simulácie.	0	
Konštantná rýchlosť vetra 7 m/s pre WT_STAT1.	0.	10.
Konštantná rýchlosť vetra 7 m/s pre WT_STAT2.	0.	15.
Zníženie rýchlosti vetra na 0 m/s pre WT_STAT1.	10	40
Zníženie rýchlosti vetra na 0 m/s pre WT_STAT2.	15	45
Zvýšenie rýchlosti vetra na 22 m/s pre WT_STAT1.	50	160
Zvýšenie rýchlosti vetra na 22 m/s pre WT_STAT2.	55	165
Konštantná rýchlosť vetra 22 m/s pre WT_STAT1.	160	175
Konštantná rýchlosť vetra 22 m/s pre WT_STAT2.	165	180
Veterný park WT_STAT1 odpojený od siete.	165	
Veterný park WT_STAT2 odpojený od siete.	170	
Zníženie rýchlosti vetra na 7 m/s pre WT_STAT1.	175	193
Zníženie rýchlosti vetra na 7 m/s pre WT_STAT2.	180	198
Konštantná rýchlosť vetra 7 m/s pre WT_STAT1.	193	280
Konštantná rýchlosť vetra 7 m/s pre WT_STAT2.	198	280

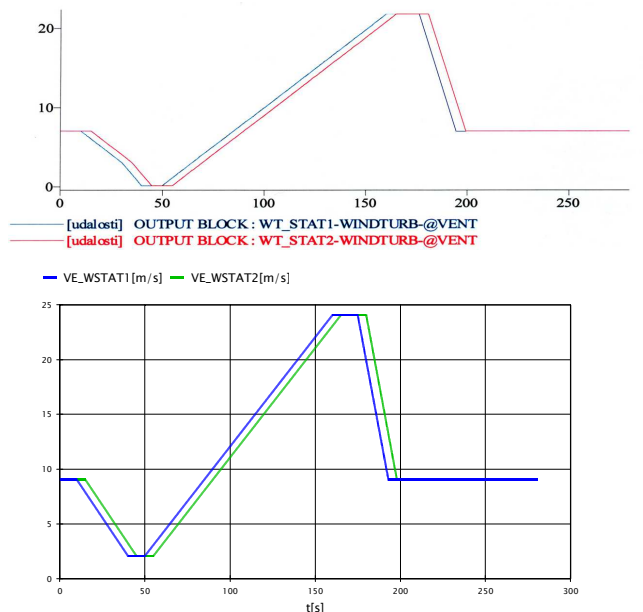
Pripojenie a postupný štart veterného parku.	200	206
Pripojenie a postupný štart veterného parku.	201	207
Rozpojenie vedenia NHV1-NHV2-2.	220	
Zvýšenie záťaže v uzle NHV3.	250	
Koniec dynamickej simulácie.	280	

Následující obrázky porovnávají časové průběhy přechodných dějů získané simulačními výpočty v programech EUROSTAG (obrázek nahoře) a MODES (obrázek dole).

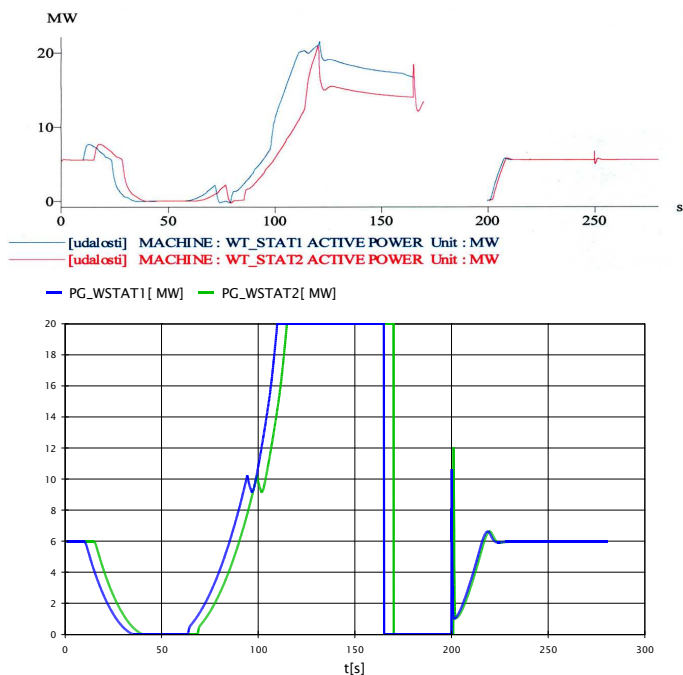
Na Obr. 5 je průběh rychlosti větru, který představuje rozruch v soustavě. Podle změny větru se mění výkon dodávaný oběma elektrárnami do sítě Výkon VtE závisí na rychlosti větru, jak ukazují průběhy činných výkonů generátorů na Obr. 6. Po poklesu rychlosti větru klesá rovněž dodávka výkonu a po opětovném nárůstu rychlosti na hodnotu kolem 15 m/s dávají turbíny maximální výkon 20 MW.

Tento výkon je v programu MODES udržován pomocí natáčení lopatek turbíny (v blokovém schématu modelu na Obr. 2 je úhel natočení lopatek označen β , na Obr. 7 je časový průběh natočení lopatek označen jako BETA). Po vypnutí generátoru se lopatky turbíny natočí na maximální hodnotu, aby se vyregulovala rychlost otáčení na zadanou hodnotu (na Obr. 2 je zadaná hodnota regulace otáček označena ω_z , na Obr. 7 je časový průběh označen jako WZAD). Po zapnutí generátoru se otáčky vyregulují na optimální hodnotu, při které má turbína pro danou rychlost větru nejlepší účinnost.

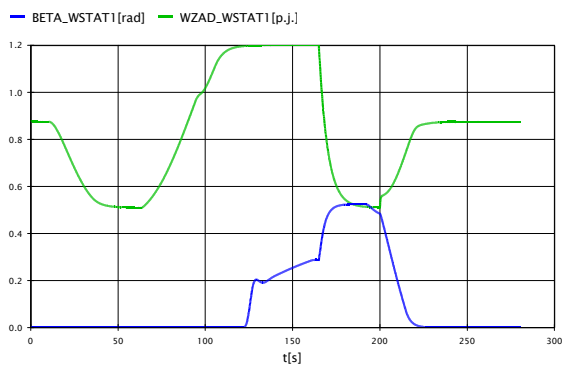
Při změnách výkonu VtE i změnách zatížení ostrova (jedná se o ostrovní provoz, kdy paralelně spolupracuje jedna parní turbína a dvě větrné bez připojení k nadřazené soustavě) dochází k změně frekvence ostrova) jak ukazují obrázky 8 (v programu MODES je zobrazována přímo odchylka frekvence od jmenovité hodnoty SU).



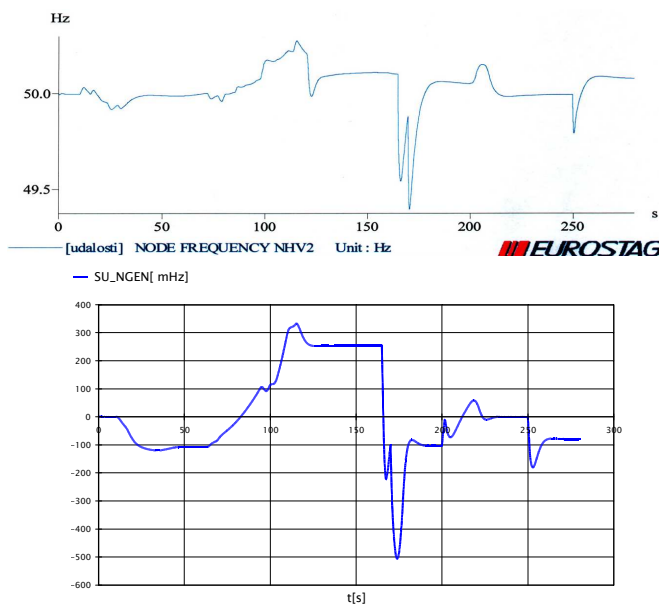
Obr. 5 Časový průběh rychlosti větru v m/s



Obr. 6 Časový průběh výkonů generátorů v MW

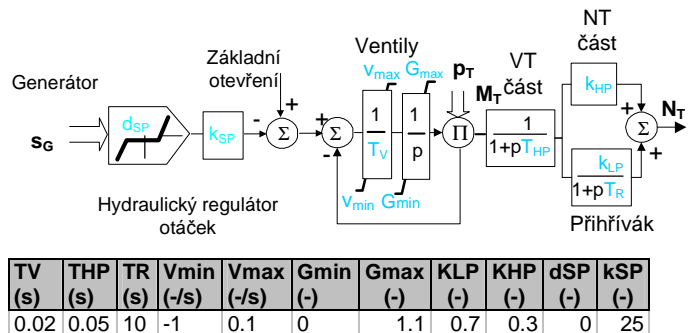


Obr. 7 Časový úhlu natočení lopatek a zadanych otáček v programu MODES



Obr. 8 Časový průběh frekvence ostrova

V programu MODES je parní turbína modelována jednoduchým modelem podle následujícího obrázku:

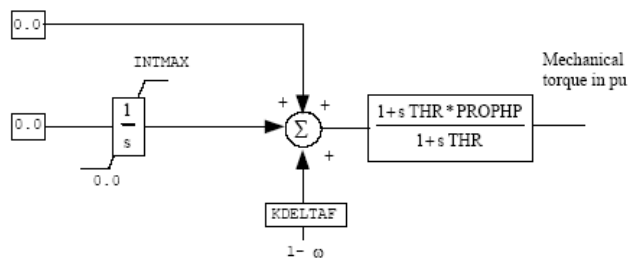


TV (s)	THP (s)	TR (s)	Vmin (-/s)	Vmax (-/s)	Gmin (-)	Gmax (-)	KLP (-)	KHP (-)	dSP (-)	kSP (-)
0.02	0.05	10	-1	0.1	0	1.1	0.7	0.3	0	25

Obr. 9 Blokové schéma modelu parní turbíny včetně parametrů

Otevření ventilů je regulováno proporcionálně podle odchylky otáček generátoru od jmenovité hodnoty (skluzu s_G) se zesílením 20, což odpovídá statice 5%.

V programe EUROSTAG je turbína modelovaná nasledovne [13]:



s	INTMAX (-)	KDELTA (-)	THR (s)	PROPHP (-)
Laplaceov operátor	1,1	25	10	0.3

Mechanický točivý moment turbíny je v p.u. k menovitému výkonu turbíny.

Obr. 10 Blokové schéma modelu turbíny vrátane parametrov

V. ZÁVĚR

V rámci EÚ je plánovaný výrazný nárast inštalovaného výkonu veterných elektrární. Na tento stav nie je ES, budovaná na báze centrálnych zdrojov, prispôbena. Z tohto dôvodu je potrebné vyšetrovať vplyv veterných elektrární na ES ešte pred ich pripojením do siete. [16, 17]

Na základe dosiahnutých výsledkov možno konštatovať, že simulačné prostriedky MODES a EUROSTAG sú vhodnými nástrojmi na modelovanie prevádzky veterných elektrární a ich spolupráce s elektrizačnou sústavou.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja prostredníctvom finančnej podpory č. APVT-20-026902 a Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva SR a Slovenskej akadémie vied prostredníctvom finančnej podpory VEGA č. 1/4075/07.

LITERATÚRA

- [1] K.Máslo: Modelování větrných elektráren pro výpočty dynamické stability, sborník 7. semináře E2004, Praha září 2004
- [2] K.Máslo: Vliv větrných elektráren na provoz ES, sborník konference CIRED, Tábor listopad 2004
- [3] V.Mach, K. Máslo: Model asynchronního generátoru, 7. mezinárodní konference Automatizace energetických procesů, Zlín květen 2006
- [4] V.Mach, K. Máslo. Verifikace modelu asynchronního stroje v programech ATP a MODES měřením Sborník konference ELEN 2006 pořádané ČVUT , Praha září 2006
- [5] K. Máslo, A. Kasembe: Požadavky Kodexu PS na větrné elektrárny z hlediska dynamické stability, sborník konference ELEN 2008 pořádané ČVUT, Praha září 2008
- [6] K. Máslo, A. Kasembe: Wind Farm Equivalent for Transient Stability Calculations, sborník konference ELEN 2008 pořádané ČVUT, Praha září 2008
- [7] K. Máslo, A. Kasembe: Požadavky na větrné elektrárny z hlediska dynamické stability, sborník konference CIRED, Tábor listopad 2008
- [8] J. Rusnák, M. Hvizdoš, J.Tkáč: Modelling of DFIG-based wind power plants operation, 10.mezinárodní konference Electric Power Engineering, Dlouhé Stráně květen 2009
- [9] Kodex PS –část.I Plánování rozvoje PS, dostupný na <http://www.ceps.cz>
- [10] K.Procházk. Zvláštní požadavky na farmy VtE připojované do sítí 110 kV, sborník konference CIRED, Tábor listopad 2008
- [11] UCTE Operational Handbook Policy 3: Operational Security http://www.ucte.org/library/ohb/Policy3_v13.pdf
- [12] Slootweg J.G., Polinder H., Kling W.L., “Reduced Order Models of Actual Wind TurbineConcepts”, IEEE Young Researchers Symposium, Leuven, February, 2002
- [13] Tractebel and Electricité de France: Eurostag – Documentation, Release 4.3.
- [14] Tractebel and Electricité de France: Eurostag – Tutorial, October 2002.
- [15] Mešter, M., Chladný, V.: Analýza elektrizačnej sústavy pomocou programu Eurostag In: EE - Odborný časopis pre elektrotechniku a energetiku, roč. 11, mimoriadne číslo, október 2005. Bratislava: Spolok absolventov a priateľov FEI STU (EF SVŠT) v Bratislave, 2005, s. 92-94. ISSN 1335-2547
- [16] Mešter, M.: Realita obnoviteľných zdrojov energie. In: EE časopis : Odborný časopis pre elektrotechniku a energetiku. roč. 9, č. 6 (2003), s. 13-15. ISSN 1335-2547.
- [17] Hvizdoš, M., Tkáč, J.: Pripojovanie decentralizovaných zdrojov elektriny do distribučnej siete. In: EE časopis : Časopis pre elektrotechniku a energetiku. roč. 14, mimoriadne č., október (2008), s. 81-85. ISSN 1335-2547.

ADRESY AUTORŮ

Ing. Karel Máslo, CSc, maslo@ceps.cz
Ing. Petr Trubač, trubac@ceps.cz
ČEPS, a.s., Elektrárnská 774/2, 101 52 Praha, Česká Republika,
Ing. Jozef Rusnák, PhD. jozef.rusnak@tuke.sk
FEI TUKE, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, 041 20 Košice,
Slovenská republika