

Model větrné elektrárny

V článku je ukázán způsob tvorby simulačního modelu větrné elektrárny s použitím softwarových nástrojů ze sady Matlab/Simulink a naznačeny možnosti využití tohoto modelu v praxi.

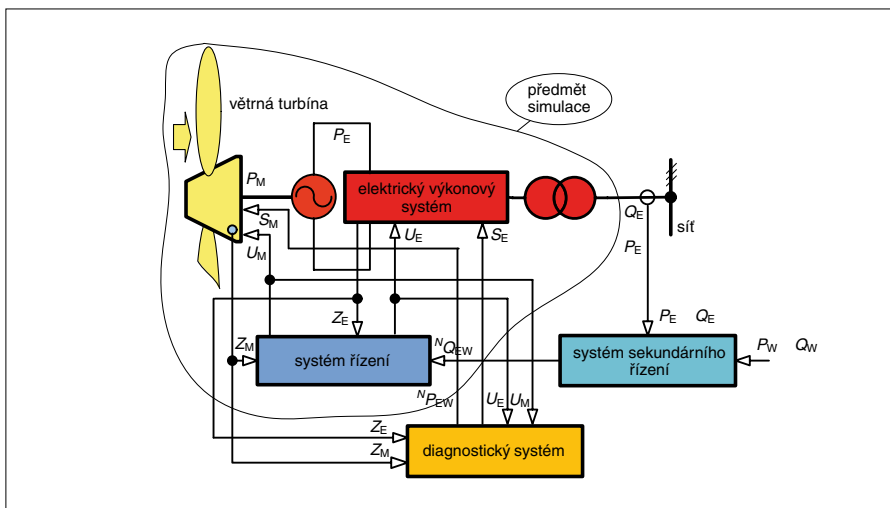
Simulační model větrné elektrárny (*Wind Electric Power Station – WEPS*) popsán v článku byl sestaven pro potřeby:

- návrhu systému pro řízení větrných turbín s výkonem od 1,2 do 5 MW,
- návrhu systému řízení elektrického výkonového systému,
- návrhu systému sekundárního řízení skupiny větrných elektráren,
- návrhu elektrického výkonového systému pro větrné elektrárny s výkonem od 1,2 do 5 MW,
- návrhu diagnostického systému větrné elektrárny,
- koncepčního návrhu generátoru s výkonem 5 MW.

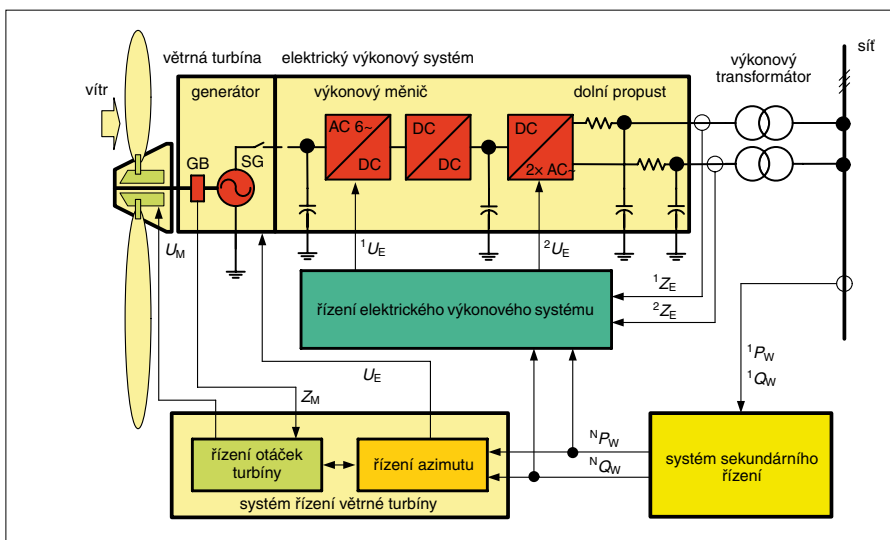
Systém větrné elektrárny

Na obr. 1 jsou znázorněny mechanická část (větrná turbína) a elektrická část (elektrický výkonový systém), které tvoří objekty řízení, popř. diagnostický systém, a vazby mezi nimi, což vše dohromady tvoří systém větrné elektrárny.

Signály měřených veličin Z_M z mechanické části a signály měřených veličin Z_E z elektrické části větrné elektrárny jsou řídicími algoritmy transformovány na signály U_M řídicí mechanickou a signály U_E řídicí elektrickou část zařízení. Řídicí algoritmy budou navrženy jako robustní vzhledem k okolním podmínkám použití větrné elektrárny tak, aby zabezpečovaly minimální regulační odchylku mezi požadovaným a skutečným výkonem generátoru a elektrického výkonového systému. Systém řízení obsahuje nadřazený systém sekundárního řízení, který má zabezpečovat stanovené požadavky na činný výkon $^N P_{EW}$ a jalový výkon $^N Q_{EW}$ poskytovaný jednotlivým elektrickým výkonovým systémem ve skupině větrných elektráren. Provozní stav větrné turbíny i elektrického výkonového systému je identifikován v diagnostickém systému. Spolu se signály Z_M a Z_E jsou na vstup diagnostického systému přiváděny výstupní signály ze systému řízení U_M a U_E . Je-li identifikován havarijní (mimořádný provozní) stav větrné elektrárny, jsou generovány příslušné povely specifikující stav větrné turbíny S_M a stav elektrického výkonového systému S_E pro daný typ havarijního režimu.



Obr. 1. Základní schéma větrné elektrárny



Obr. 2. Blokové schéma zapojení větrné elektrárny

Tab. 1. Hlavní technické parametry modelované větrné elektrárny

Jmenovitý výkon	2 MW
Průměr rotoru	82 m
Efektivní plocha rotoru	5 281 m ²
Počet listů rotoru	3
Jmenovitý zdánlivý výkon	2,081 MV·A
Jmenovitý účinek nastavitelný	1
Jmenovité napětí	400 V
Počet pólových párů	32
Frekvence	50 Hz
Maximální příspěvek ke zkratovému proudu	4 000 A
Generátor	prstencový, synchronní, s proměnnou frekvencí
Způsob připojení k síti	stejnoseměrná spojka se střídačem
Převod transformátoru	0,4/20 kV
Výkon transformátoru	2 300 MV·A
Ztráty nakrátko	16 kW
Ztráty naprázdno	2,25 kW

Předmětem zájmu je dále simulační model větrné turbíny, generátoru, elektrického výkonového systému, transformátoru a systému řízení větrné turbíny, generátoru a výkonového systému. Simulační model má poskytnout podklady pro koncepční návrh uvedených komponent systému větrné elektrárny. Bylo proto přistoupeno k návrhu tzv. fyzikálního modelu (model soustavy sestavený na základě znalosti její fyzické struktury) větrné elektrárny, jenž je popsán v dalším textu.

Fyzikální model větrné elektrárny

Vytvořený fyzikální model vychází z instalace větrné elektrárny v rámci skupiny větrných elektráren (farmy) v Kryštofových Hamrech v Krušných horách (dále „větrná elektrárna“). Hlavní technické, popř. provozní parametry větrné elektrárny jsou uvedeny v tab. 1 a tab. 2.

Blokové schéma zapojení větrné elektrárny je ukázáno na obr. 2. Jde o zapojení využívající elektrický výkonový měnič, který obsahuje usměrňovač, stejnosměrný meziobvod a řízený střídač, doplněný statickým kompenzátozem. Větrná turbína pohání přes převodovku synchronní generátor. Výstup výkonového měniče je připojen přes distribuční transformátor k elektrizačnímu systému.

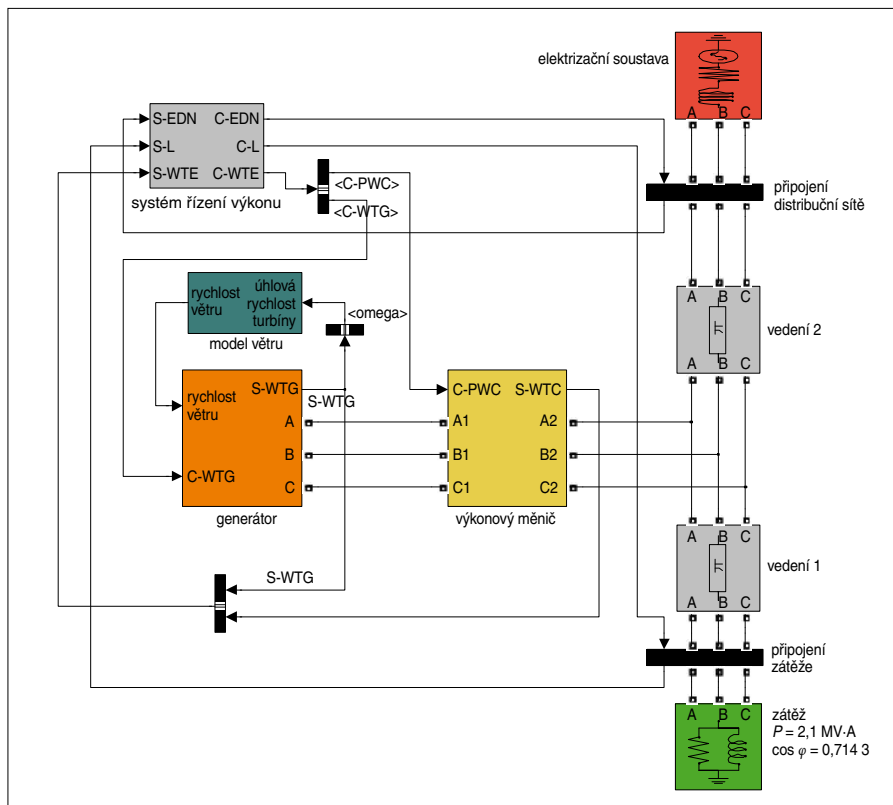
Blokovému schématu na obr. 2 odpovídá zapojení fyzikálního modelu. Celkový fyzikální model větrné elektrárny je ukázán na obr. 3. Model je sestaven s použitím blokových stavebnic (blockset) SimPowerSystems a Power System Toolbox, které jsou součástí výpočetního, modelovacího a simulačního prostředí Matlab-Simulink. Simulační fyzikální model obsahuje model větru, model větrné turbíny a generátoru, model výkonového měniče a model distribučního systému (vedení, spotřeba, vnější zdroje).

Model větru

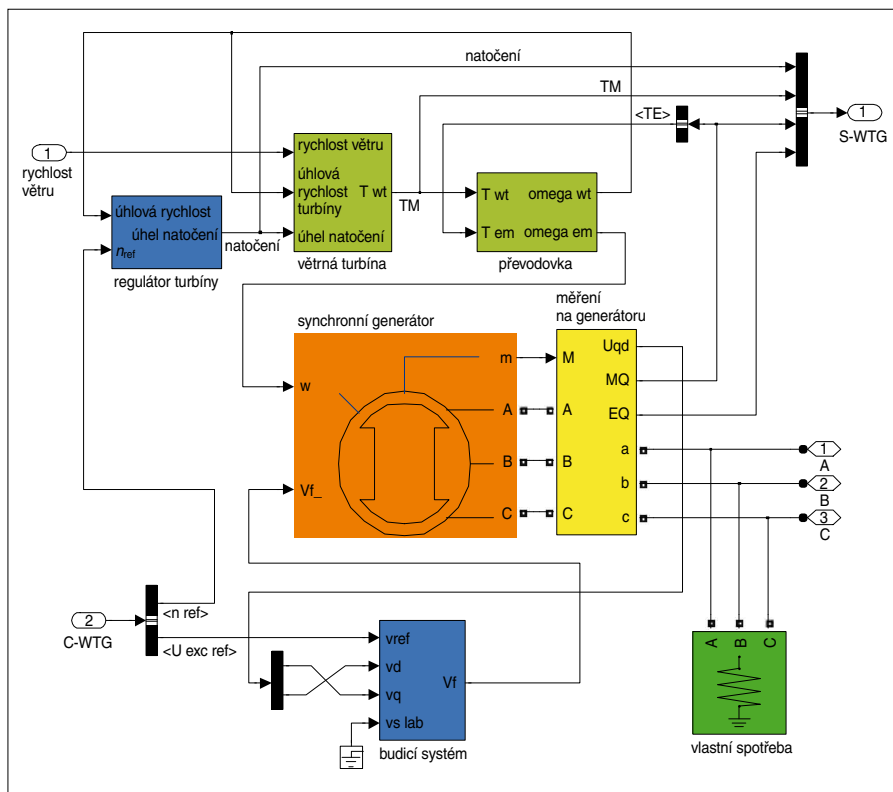
Časová řada hodnot rychlosti větru se generuje na základě průměru hodnot rychlosti větru podél osy rotoru větrné turbíny. Základ tvoří generátory bílého šumu, které jsou obarveny Kaimalovými filtry. Algoritmus byl vyvinut v RISØ National Laboratory.

Model větrné turbíny a generátoru

Model větrné turbíny a generátoru je vytvořen z bloků obsažených ve stavebnici SimPowerSystems Blockset. Simulační model větrné turbíny a generátoru je ukázán na obr. 4, kde je navíc doplněn modelem převodovky, modelem měřicího zařízení veličin generátoru a vlastní spotřebou větrné elektrárny. Obvod řízení budicího napětí je součástí blokové stavebnice. Otáčky (úhlovou rychlost) větrné turbíny řídí PID regulátor, zabezpečující požadovanou hodnotu otáček rotoru větrné tur-



Obr. 3. Fyzikální model větrné elektrárny



Obr. 4. Model větrné turbíny a generátoru

Tab. 2. Provozní parametry modelované větrné elektrárny

Odstavení při rychlosti větru	22 až 28 m·s ⁻¹
Provozní otáčky rotoru turbíny	6 až 19,5 min ⁻¹
Jmenovitá rychlost větru	12 m·s ⁻¹
Náběhová rychlost větru	2,5 m·s ⁻¹

bíny vhodným nastavením úhlu náběhu (na-
točení) listů větrné turbíny. Rotující setrvač-
né hmoty (moment setrvačnosti rotoru větrné
elektrárny a synchronního generátoru) urč-
jící mechanické dynamické vlastnosti větrné
turbíny jsou soustředěny v modelu převodovky.
Konstantní převodový poměr převodovky
je zvolen tak, aby při provozních otáčkách
turbíny byla frekvence proudu z generátoru
na jmenovité hodnotě.

Model výkonového měniče

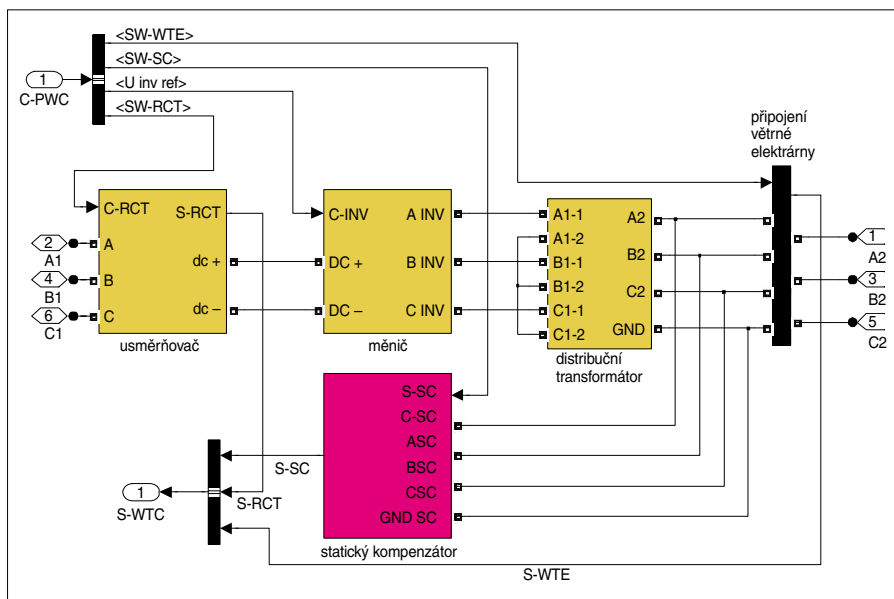
Model elektrického výkonového měniče
obsahuje model usměrňovače, model říze-
ného střídače a model statického kompen-
zátoru (obr. 5).

Model usměrňovače se skládá z modelu
tří jednofázových můstků a modelu stejno-
směrného meziobvodu. Model řízeného stř-
ídače vychází ze zapojení třífázového řízeného
střídače tvořeného bipolárními tranzist-
ory s izolovaným hradlem typu IGBT. Model
těchto spínacích prvků je součástí stavebnice
SimPowerSystems Blockset. Součástí modelu
řízeného střídače je regulátor frekvence mě-
niče. Jde v podstatě o PID regulátor, na je-
hož výstupu je diskretní zdroj signálu s mo-
dulací šířkou pulzu (PWM) přiváděného na
hradla prvků IGBT. Za modelem řízeného
střídače je zapojen model pásmové propusti
tvořené indukčancí a kapacitancí. Na výstup
modelu měniče je připojen model distribuč-
ního transformátoru.

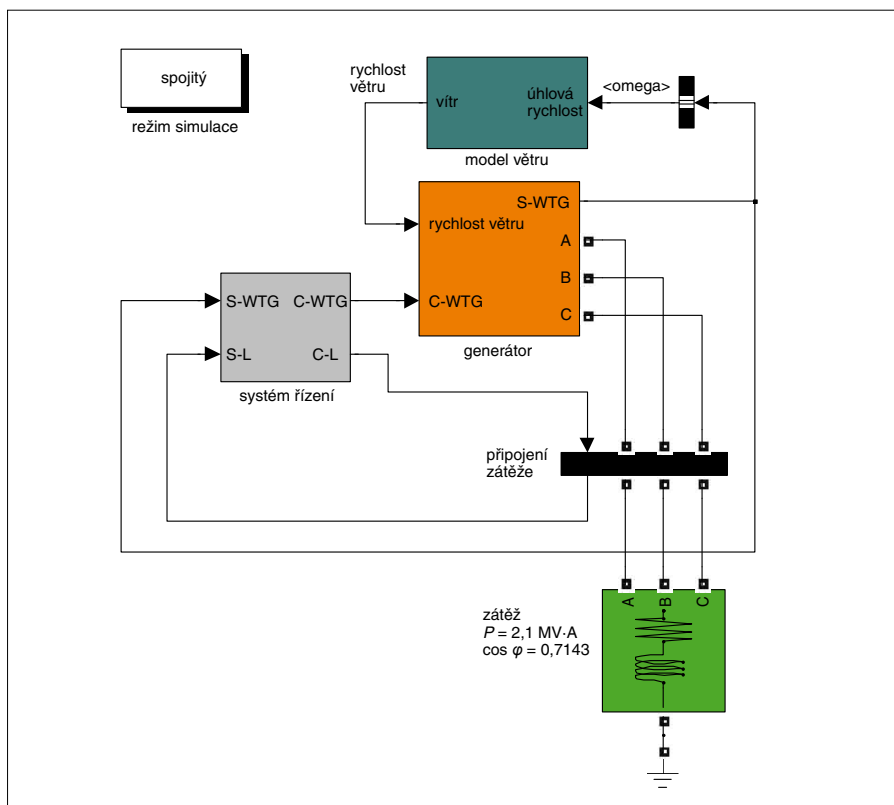
Základem modelu statického kompenzá-
toru je kompenzační kondenzátor zapojený
mezi dva řízené třífázové usměrňovače se-
stavené z prvků IGBT. Řízení usměrňovače
tvoří akční člen, na jehož vstup je přiváděn
signál z PID regulátoru, zabezpečujícího ur-
čené napětí na kompenzačním kondenzátoru.
Napětí na kompenzačním kondenzátoru
určuje hodnotu indukčního jalového výkonu
dodávaného do elektrizační sítě.

Simulace větrné elektrárny

Z uvedeného popisu je patrné, že mo-
del větrné elektrárny obsahuje velký po-
čet spínacích prvků. Stavů spínacích prv-
ků patří do množiny stavů větrné elektrárny
jako dynamického systému. Spínací prvky
ovlivňují jiné prvky stavového vektoru, kte-
rými jsou např. proudy kotvy synchronního
generátoru nebo napětí na kondenzátoru
stejnoseměrného meziobvodu, kompenzač-
ního kondenzátoru apod. Je proto zřejmé,
že uvedený model větrné elektrárny je neli-
neární dynamický systém. Simulovat chod
větrné elektrárny znamená řešit příslušné
nelineární diferenciální rovnice. Důsled-
kem je velmi krátký integrační krok řešení
diferenciálních rovnic, a tudíž velmi dlouhá
doba simulace. Ukázalo se, že proces si-
mulace elektrického výkonového měniče je
rychlejší v diskretním režimu než ve spo-
jitém režimu. Větrná turbína a generátor



Obr. 5. Model elektrického výkonového měniče



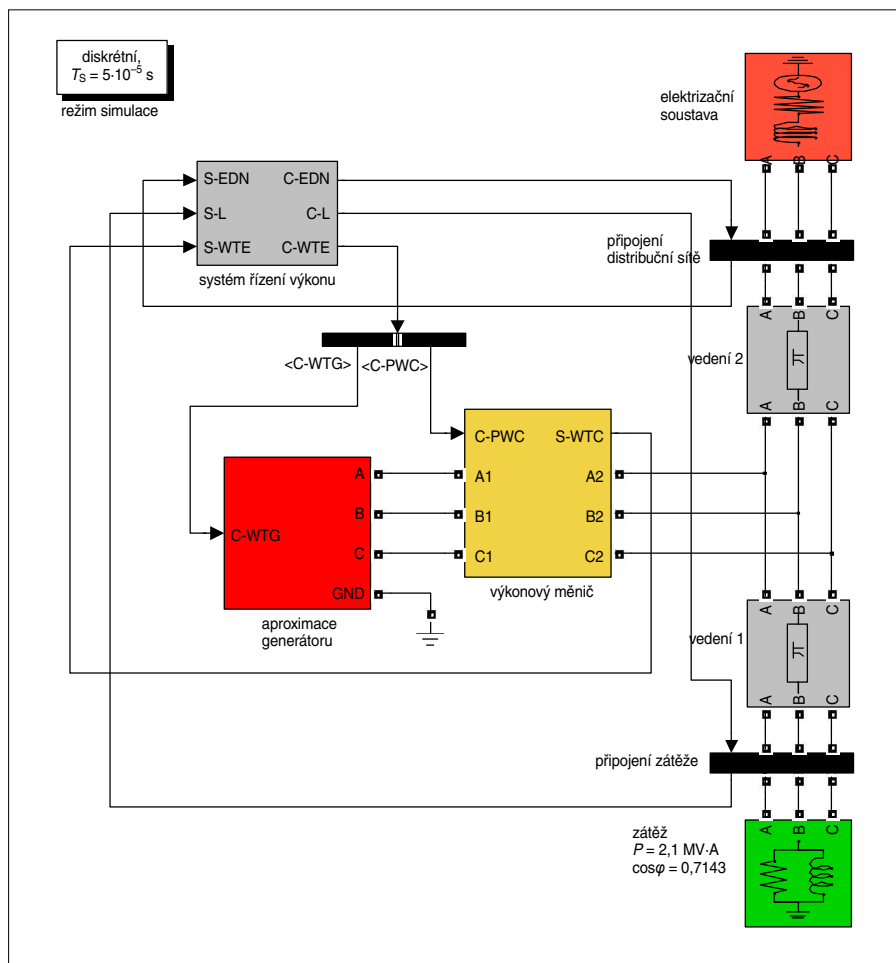
Obr. 6. Spojitě simulovaná část větrné elektrárny

byly naopak simulovány rychleji ve spo-
jitém režimu. Tento rozpor byl vyřešen roz-
dělením simulačního modelu větrné elek-
trárny na dvě části, každé simulované v od-
lišném režimu.

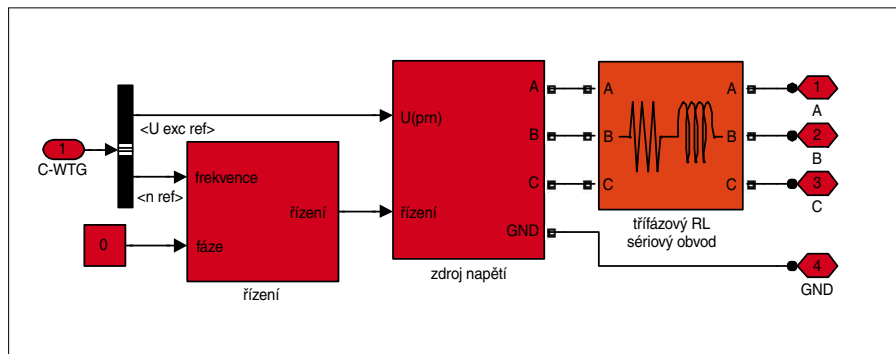
Chování první části větrné elektrárny, re-
prezentované modelem větru a modelem vě-
trné turbíny a generátoru, bylo simulováno ve
spojitém režimu. Model výkonového měniče
a statického kompenzátoru byl přitom nahra-
zen ekvivalentní třífázovou zátěží. Schéma

modelu části elektrárny simulované ve spo-
jitém režimu je ukázáno na obr. 6.

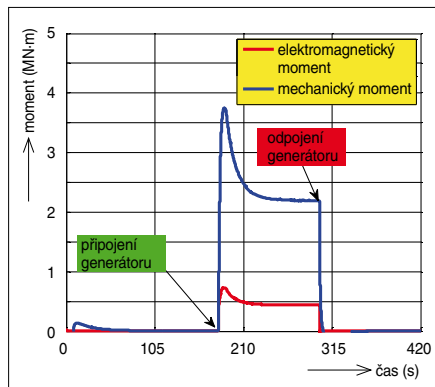
Při simulaci elektrického výkonového mě-
niče probíhající v diskretním režimu byly mo-
dely větru, větrné turbíny a generátoru nahra-
zeny ideálním řízeným zdrojem zapojeným
v sérii se sériovým obvodem RL aproximují-
cím statorovou impedancí generátoru (obr. 7,
obr. 8). Takto lze simulovat dynamické vlas-
tnosti generátoru při relativně rychlých dějích
při modelování elektrické výkonové části



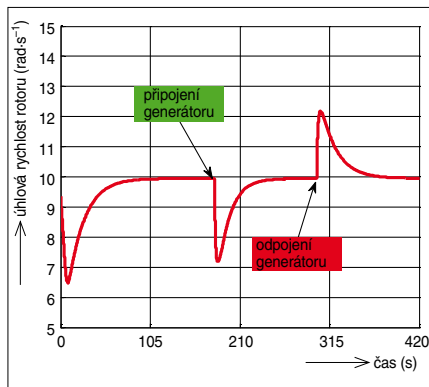
Obr. 7. Diskrétně simulovaná část větrné elektrárny



Obr. 8. Detail aproximace generátoru z obr. 7



Obr. 9. Průběhy momentů generátoru a větrné turbíny



Obr. 10. Průběh úhlové rychlosti rotoru větrné turbíny

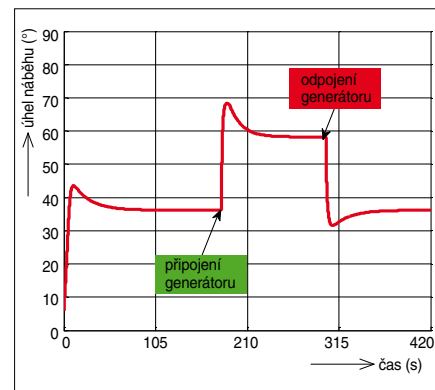
elektrárny. Předpokládá se, že pomalé mechanické děje na straně větrné turbíny nebudou mít podstatný vliv na děje v modelu výkonového měniče.

Vybrané výsledky simulace

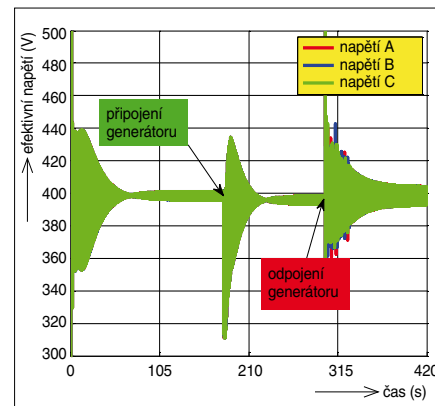
Jako ukázka možností využití již popsaných modelů jsou v dalším textu ukázány průběhy nejdůležitějších fyzikálních veličin, které jsou výsledkem dvou různých simulací.

První skupina ukázek je ze simulace chování části větrné elektrárny simulované ve spojitém režimu.

Na obr. 9 jsou uvedeny časové průběhy elektromagnetického momentu synchronního stroje a mechanického momentu na hřídeli



Obr. 11. Průběh úhlu natočení listů rotoru větrné turbíny

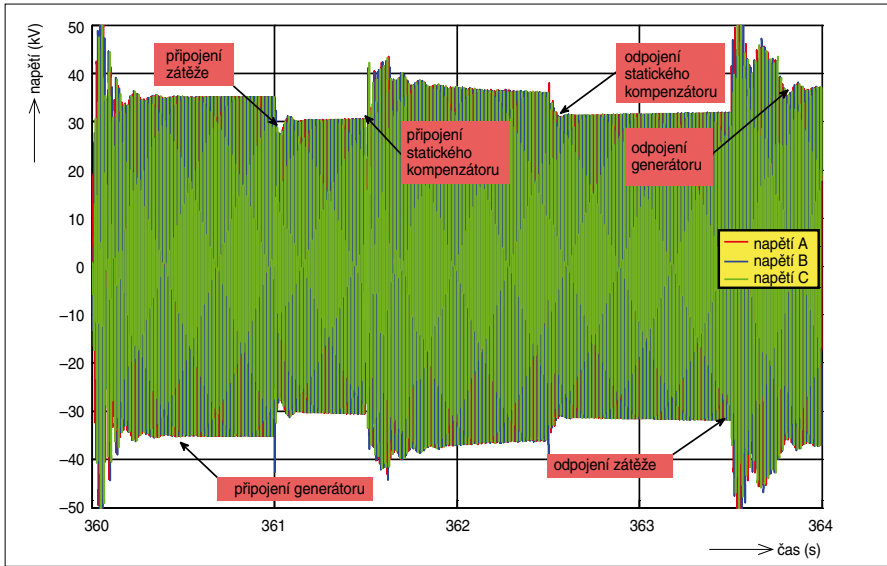


Obr. 12. Průběh efektivních hodnot napětí na kotvě generátoru

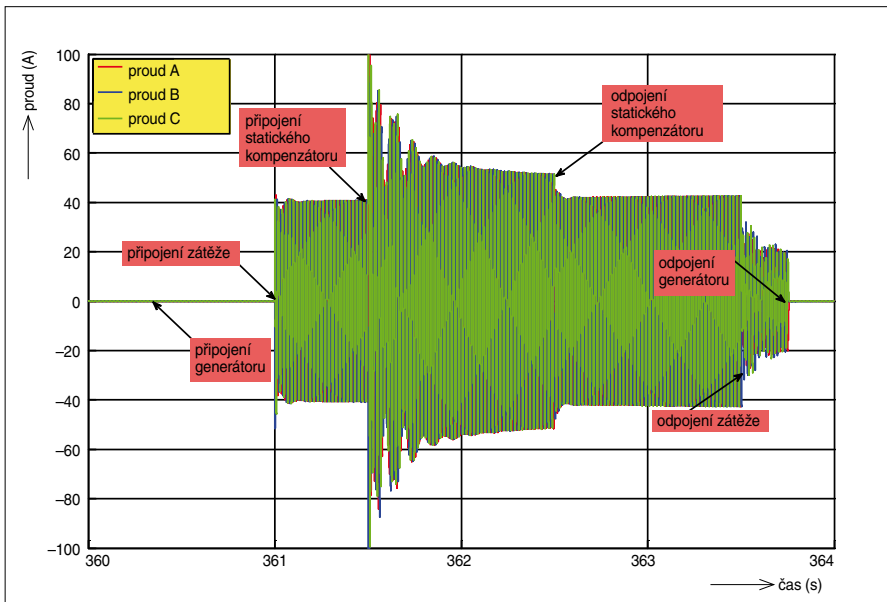
větrné turbíny. V čase 180 s byla větrná elektrárna připojena k distribuční síti a v čase 300 s odpojena. Je zde patrný vliv převodovky mezi větrnou turbínou a generátorem (otáčky generátoru jsou násobkem převodového poměru a otáček větrné turbíny).

Činnost regulátoru otáček (úhlové rychlosti) rotoru větrné turbíny je ukázána na obr. 10 a obr. 11. Požadavkem jsou konstantní otáčky rotoru, jichž se dosahuje vhodným nastavením úhlu náběhu (natočení) jeho listů.

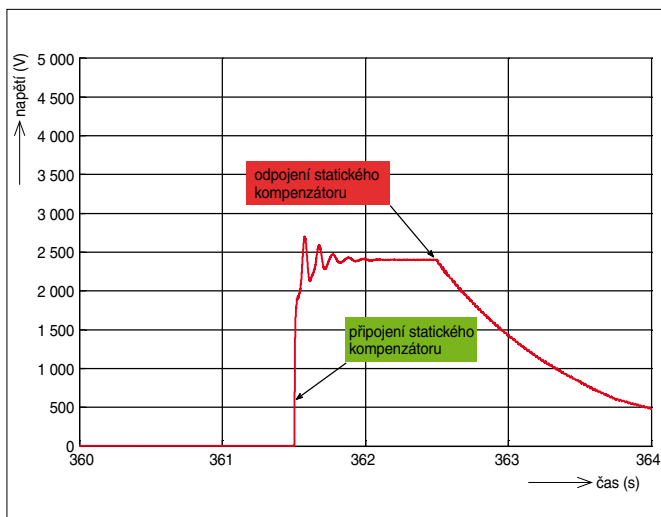
Na obr. 12 jsou ukázány průběhy efektivních hodnot napětí na kotvě generátoru počítané pro jmenovitou frekvenci 50 Hz. V oka-



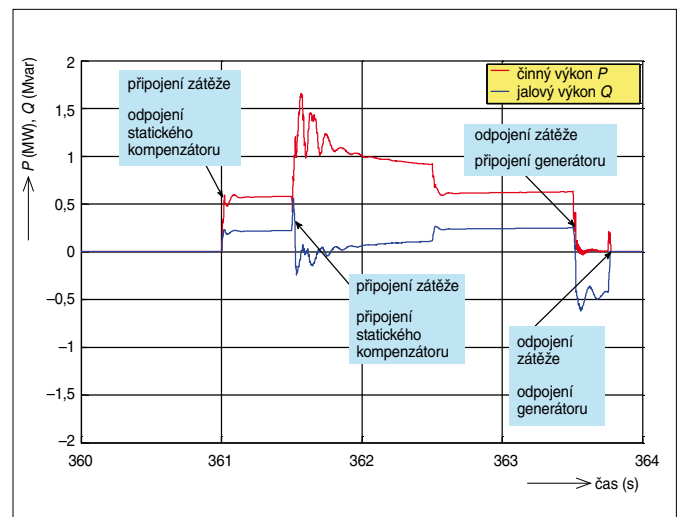
Obr. 13. Průběhy napětí na výstupu z elektrárny



Obr. 14. Průběhy proudů na výstupu z elektrárny



Obr. 15. Průběh napětí na kompenzačním kondenzátoru



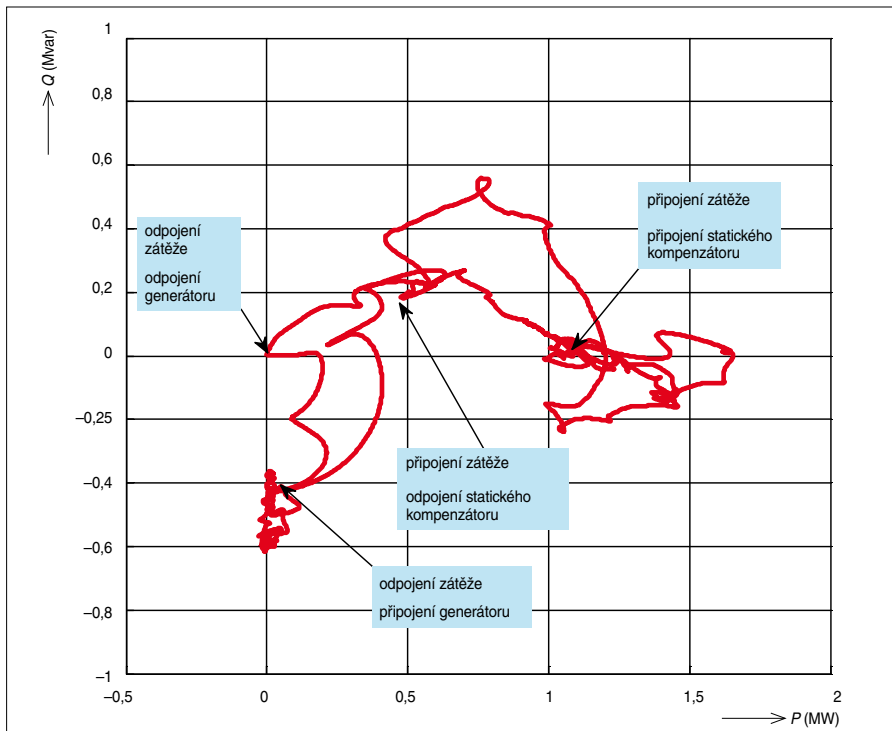
Obr. 16. Průběh činného a jalového výkonu elektrárny

mžiku rozběhu větrné turbíny a v okamžicích připojení generátoru k síti, popř. jeho odpojení od sítě, se hodnota frekvence lišila od nominální. To je příčinou rozkmitu efektivní hodnoty napětí.

Druhá skupina ukázek se týká simulace chování „diskrétní“ části větrné elektrárny (tj. simulované v diskrétním režimu). Předpokladem byl ustálený stav mechanické („spojité“) části elektrárny. Bylo posuzováno chování modelu po dobu 4 s jeho chodu. Na obr. 13 a obr. 14 jsou ukázány průběhy napětí, popř. proudů. V čase 1 s byla připojena zátěž při odpojeném statickém kompenzátoru. Po připojení zátěže kleslo napětí na kotvě generátoru v důsledku proudového zatížení. V čase 1,5 s byl připojen statický kompenzátor. Důsledkem je vzrůst proudového výkonem dodávaným do statického kompenzátoru (spotřebič činného výkonu), který je spotřebičem kapacitního jalového výkonu, tj. zdrojem indukčního jalového výkonu. Vlivem připojení zdroje indukčního jalového výkonu vzrůstá napětí na kotvě generátoru. V čase 2,5 s byl statický kompenzátor odpojen, což mělo za následek pokles napětí i proudů. V čase 3,5 s byl generátor větrné elektrárny odpojen od zátěže. Simulační výpočet probíhal v podmínkách, kdy v distribuční síti byly odpojeny všechny zdroje napětí a připojeno nominální zatížení.

Na obr. 15 je ukázán průběh napětí na kompenzačním kondenzátoru. Zřetelně je patrná činnost regulátoru napětí na kompenzačním kondenzátoru, a tím regulace kompenzačního výkonu.

Na obr. 16 jsou ukázány průběhy činného a jalového výkonu na výstupu z větrné elektrárny. Je zde zřejmá funkce statického kompenzátoru, po jehož připojení klesá jalový výkon Q ve prospěch nárůstu činného výkonu P . Vnější zdroje napětí (proudu) jsou odpojeny. Na obr. 17 je odpovídající diagram P - Q .



Obr. 17. Diagram P-Q

Závěr

Model větrné elektrárny popsany v článku bude využíván jako základ pro analýzu vlivu dynamických vlastností větrné elektrárny na provoz elektrizační distribuční soustavy. Jde zejména o návrh řídicích algoritmů pro řešení úloh predikce činného výkonu a řízení (kompenzace) jalového výkonu.

Poděkování

V publikaci byly použity výsledky získané při práci prováděné v rámci Národního programu výzkumu II (2C), realizovaného za finanční podpory ze státních prostředků prostřednictvím Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR.

Literatura:

- [1] IOV, F. – HANSEN, A. D. – SØRENSEN, P. – BLAABJERG, F.: *Wind Turbine Blockset in Matlab/Simulink*.
- [2] – : *SimPowerSystems 5 – User's Guide*. The MathWorks Inc.

Ing. Jiří Marek, CSc., Unis, a. s. (marek@unis.cz)

NI Energy Forum – hledání nových cest v energetice

Společnost National Instruments (NI) uspořádala 8. října 2009 bezplatnou jednodenní konferenci s názvem NI Energy Forum, na které představila svá řešení reagující na výzvy současné energetiky.

Systémy NI se uplatní jak při výrobě energie z obnovitelných zdrojů, tak při zdokonalování technologií využívajících tradiční zdroje energie. Za velmi účinný nástroj přispívající k efektivní výrobě energie pokládají odborníci NI sledování výkonu a provozního stavu točivých strojů, např. sledování generátoru ve vodní elektrárně nebo turbíny větrné elektrárny (vibrace, tlaky, rychlost otáčení, teploty, napětí a proud). Monitorování stavu materiálů (*structural health*) eliminuje neplánované výpadky, optimalizuje běh strojů, zkracuje odstávky a snižuje náklady na údržbu.

V oblasti přenosu energie nacházejí produkty NI uplatnění při řízení heterogenních zdrojů energie a zajišťování kvality energie, zatímco při spotřebě energie napomáhají ke zlepšení energetické efektivity a snížení emisí. Pro náročná měření v energetice lze použít moduly pro sběr dat (DAQ), které firma NI dodává již dvacet let a nyní přichází i s jejich bezdrátovým řešením.

Další cestu vedoucí ke snížení spotřeby elektrické energie strojních zařízení nabízí-

jí vestavné (*embedded*) počítače společnosti NI, které jsou využívány např. pro inteligentní systém řízení průmyslových motorů.

Z konkrétních řešení bylo na konferenci NI Energy Forum představeno např. využití softwaru NI LabVIEW a hardwaru CompactRIO k optimalizaci a řízení spotřeby energie v reálném čase v provozu na recyklování oceli ve firmě Nucor. Firma Elcom zde prezentovala své systémy pro monitorování a analýzu elektrické energie.

Na uvedené konferenci dostaly slovo také partnerské firmy NI a univerzity, které v ČR ve svých projektech využívají techniku NI. Firma Valcon představila použití modulu DAQ a softwaru LabVIEW při řešení automatického čištění elektrárenského kotle. Posluchači se také dověděli o diagnostických měřeních vibrací a dynamických veličin otáčivých strojů ve firmě Technická diagnostika. Na ČVUT využívají LabVIEW

k simulaci hybridního vozidla s palivovým článkem a na ostravské technické univerzitě vyvinuli přenosný systém pro měření parametrů vozidel s různým typem pohonu.

Firma Dewetron představila svůj systém kontroly přepětí pláště jaderného reaktoru.

Na konferenci NI Energy Forum byla demonstrována činnost zařízení k natáčení fotovoltaických panelů podle polohy slunce. Sledování slunce může zlepšit výkon fotovoltaických elektráren o 25 až 40% v závislosti na geografické poloze. Pro natáčení dvouosého sledovače slunce byl vyvinut algoritmus v LabVIEW ke sledování slunce, který využívá PID řízení v uzavřené smyčce. Poloha panelů je snímána senzory polohy, s nimiž komunikuje modul I/O Compact RIO, zpracovává digitální signály a vysílá signály akčním členům, které panel natácejí.



Obr. 1. Na konferenci NI Energy Forum byla demonstrována činnost zařízení k natáčení fotovoltaických panelů podle polohy slunce

Panel natáčejí.

(ed)