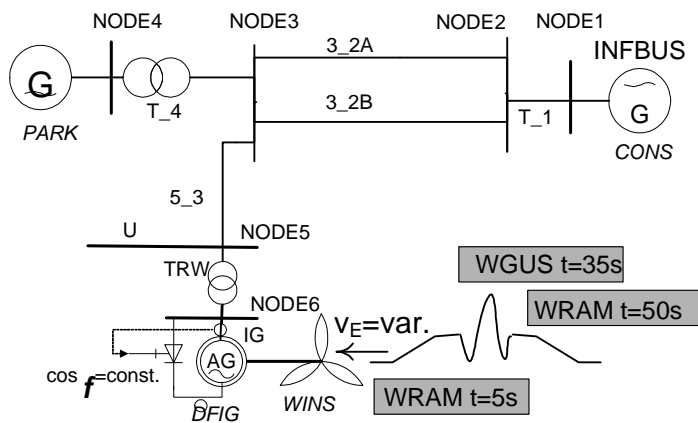


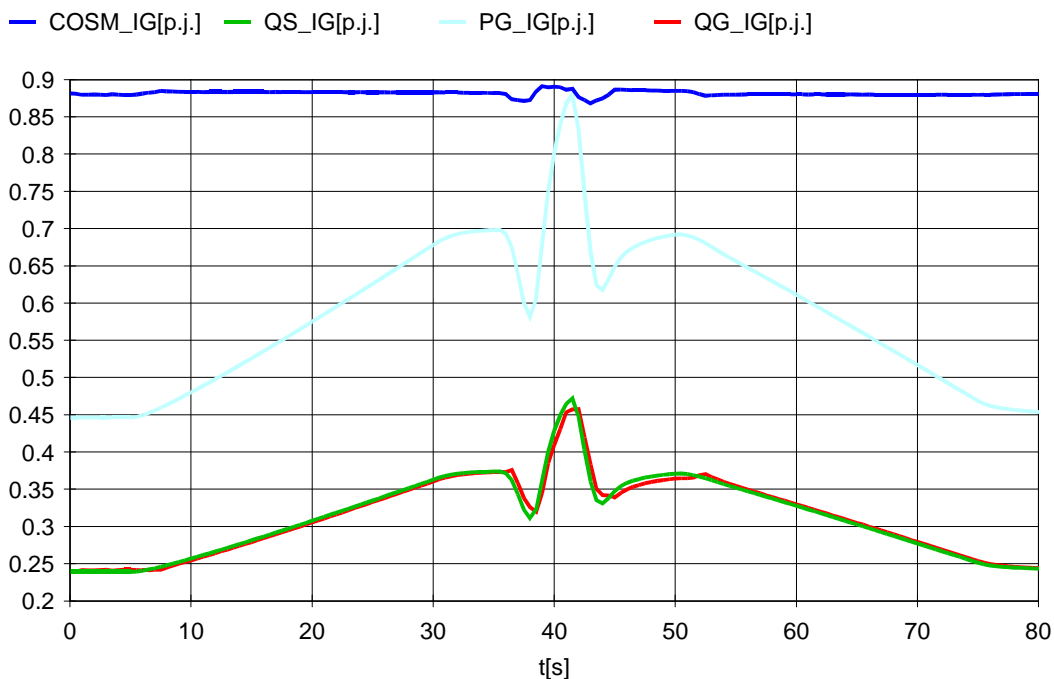
Případy COS_DFIG a COSZDFIG

Chování modelu DWIG poháněného větrnou turbínou (model WIND) v režimu regulace účinníku $\cos\varphi = \text{konst.}$

První případ COS_DFIG ukazuje schopnost DFIG udržet zadanou hodnotu účinníku (danou výchozím chodem sítě) při změnách činného výkonu danou změnou rychlosti větru. Režim regulace účinníku je navolen zápornou hodnotou T_{IQ} v typových parametrech přídatných automatů regulátoru buzení. Modelovaná soustava je obdobná jako v předchozích případech projektu WIND_TUR a je znázorněna na následujícím obrázku.



Obrázek ukazuje průběhy svorkového účinníku, činného a jalového výkonu.



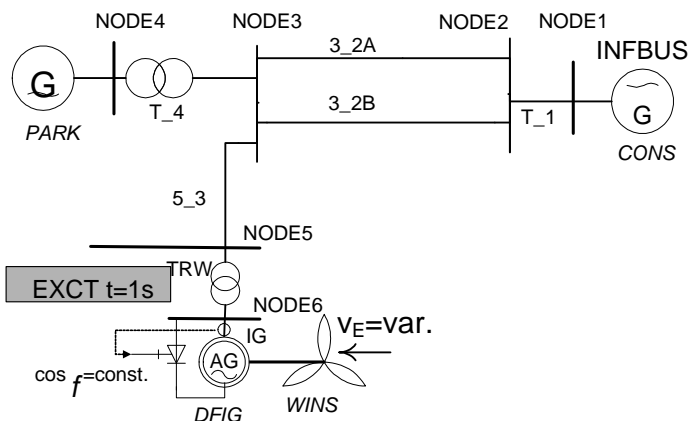
Je vidět, že i při velkých změnách výkonu kolem 40 s je regulátor schopen udržet zadaný účinník.

Změna zadaného účinníku se provádí standardní zásahem EXCT (MODES rozpozná regulačním režimu podle hodnoty parametru T_{IQ}). Ve scénáři je nutno rozlišit jestli se jedná o dodávku jaloviny nebo naopak odběr, to se provede druhým parametrem zásahu (kladná hodnota 1 značí dodávku a záporná -1 odběr Q).

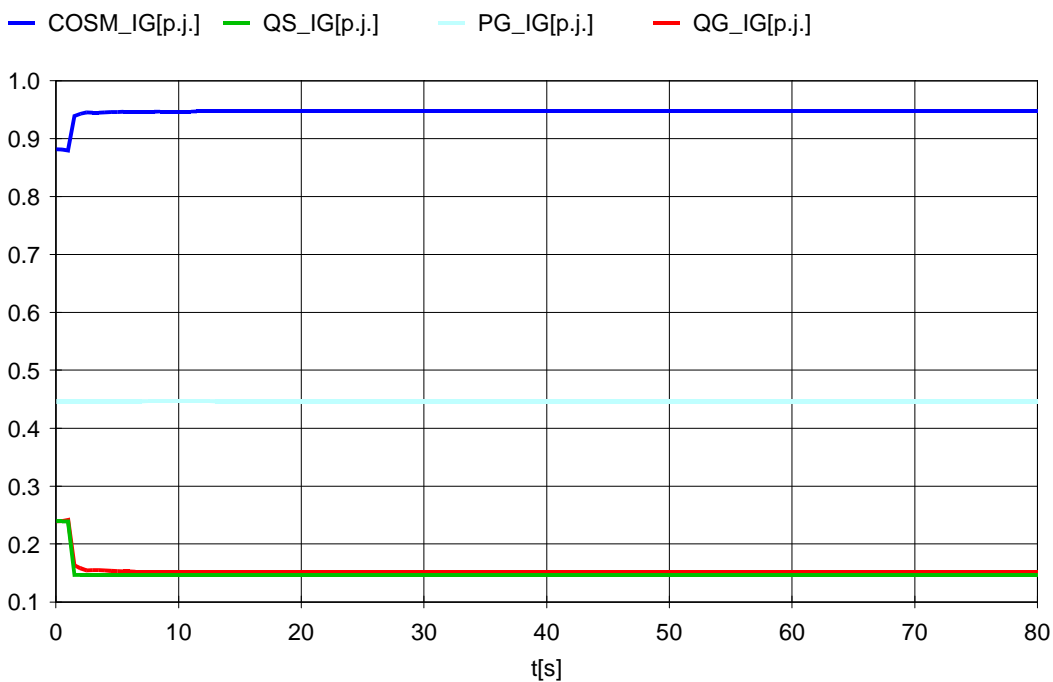
Případ COSZDFIG demonstruje změnu účinníku z výchozí hodnoty 0.88 na 0.95 s dodávkou jaloviny. Změna se provede v následujícím zásahem ve scénáři:

```
1, 'EXCT'
1
'IG' , 0.95 , 1
```

Modelovaná soustava je stejná, jak v předchozím případě:

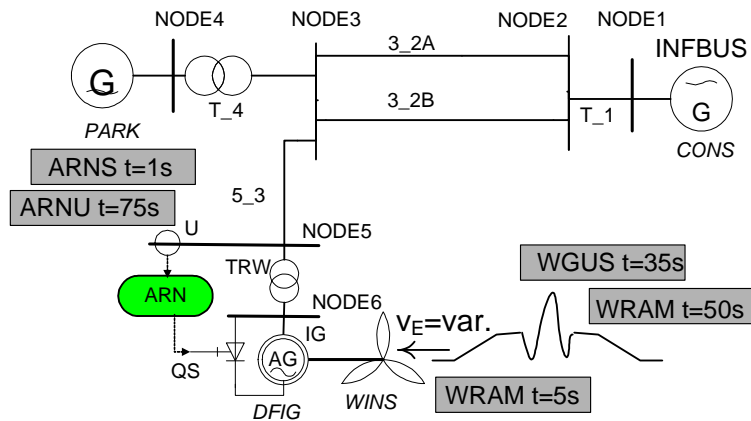


Časový průběh veličin je zobrazen na následujícím obrázku:

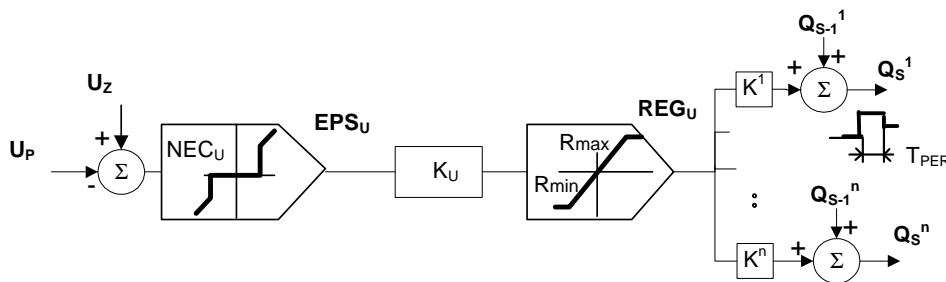


Regulátor velmi rychle vyreguluje účinník snížením dodávky jalového výkonu na požadovanou hodnotu.

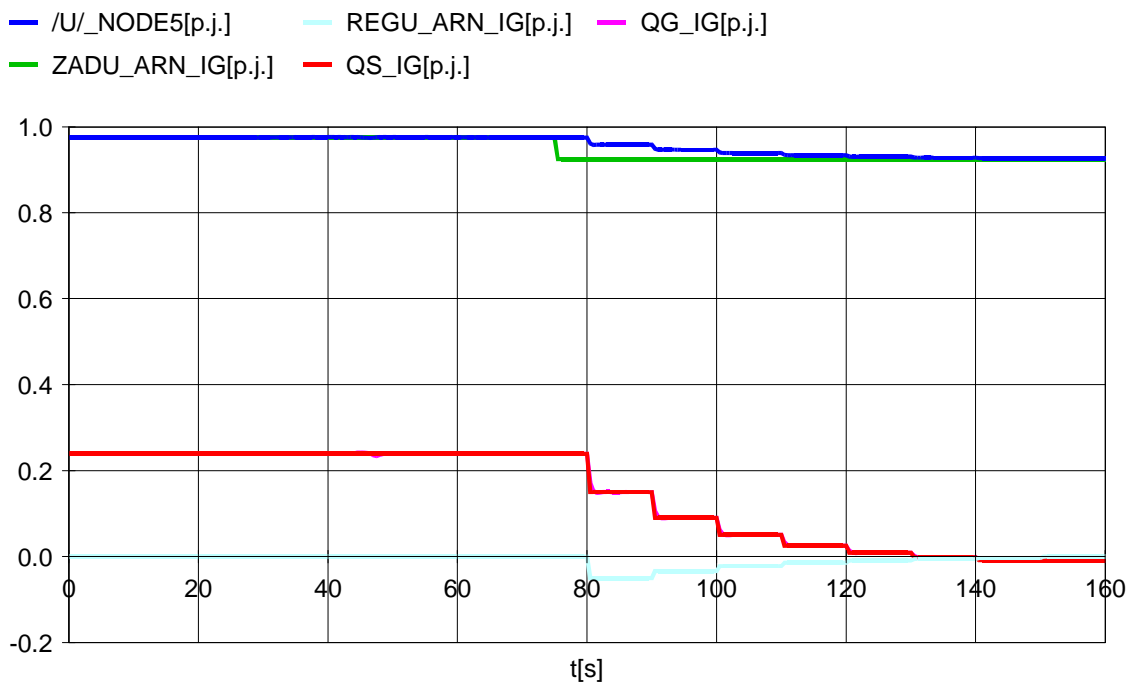
Schéma případu je na následujícím obrázku:



ARN má pulzní charakter, to znamená, že mění hodnotu QS tak dlouho, až je napětí v pilotním uzlu doregulováno do pásma necitlivost. Podmínkou ovšem je, aby regulační blok/bloky měly dostatečný regulační rozsah (ARN nedovolí vybočení ze zadaného P-Q diagramu). Blokové schéma ARN je na dalším obrázku.



Obr. 1. ukazuje časový průběh regulace s pulzním charakterem změny požadované hodnoty jalového výkonu QS.

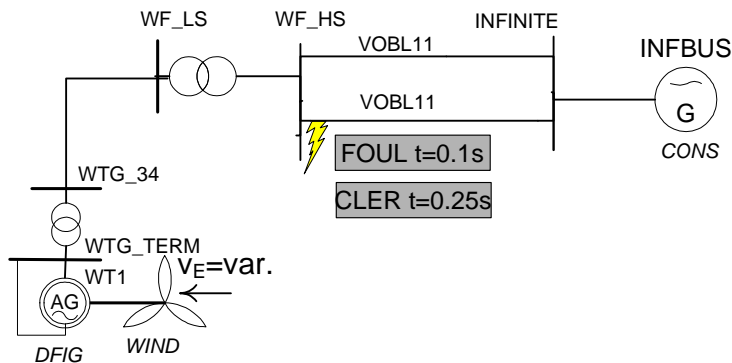


Obr. 1 časový průběh veličin modelu ARN a DFIG při změně zadané hodnoty napětí pilotního uzlu REGU
Napětí je doregulováno během 5 cyklů.

Případ GE_WECCZ a GE_WECCN

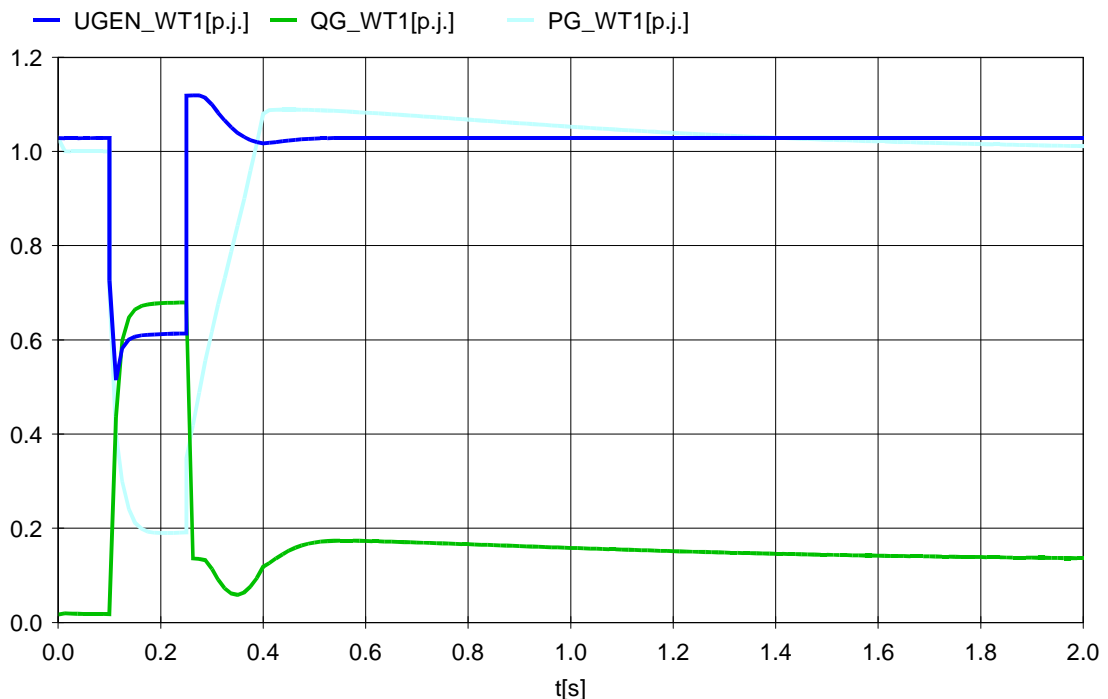
Chování inovovaného modelu DFIG poháněného větrnou turbínou (model WIND) při blízkém zkratu -GE_WECCZ

Případ prokazuje odolnost moderních dvojitě napájených asynchronních generátorů při blízkém zkratu („ride through fault capability“). Modelovaná soustava je převzata z [1]. Větrný park o sumárním výkonu 100 MW je modelován jako jeden ekvivalentní zdroj podle následujícího obrázku.



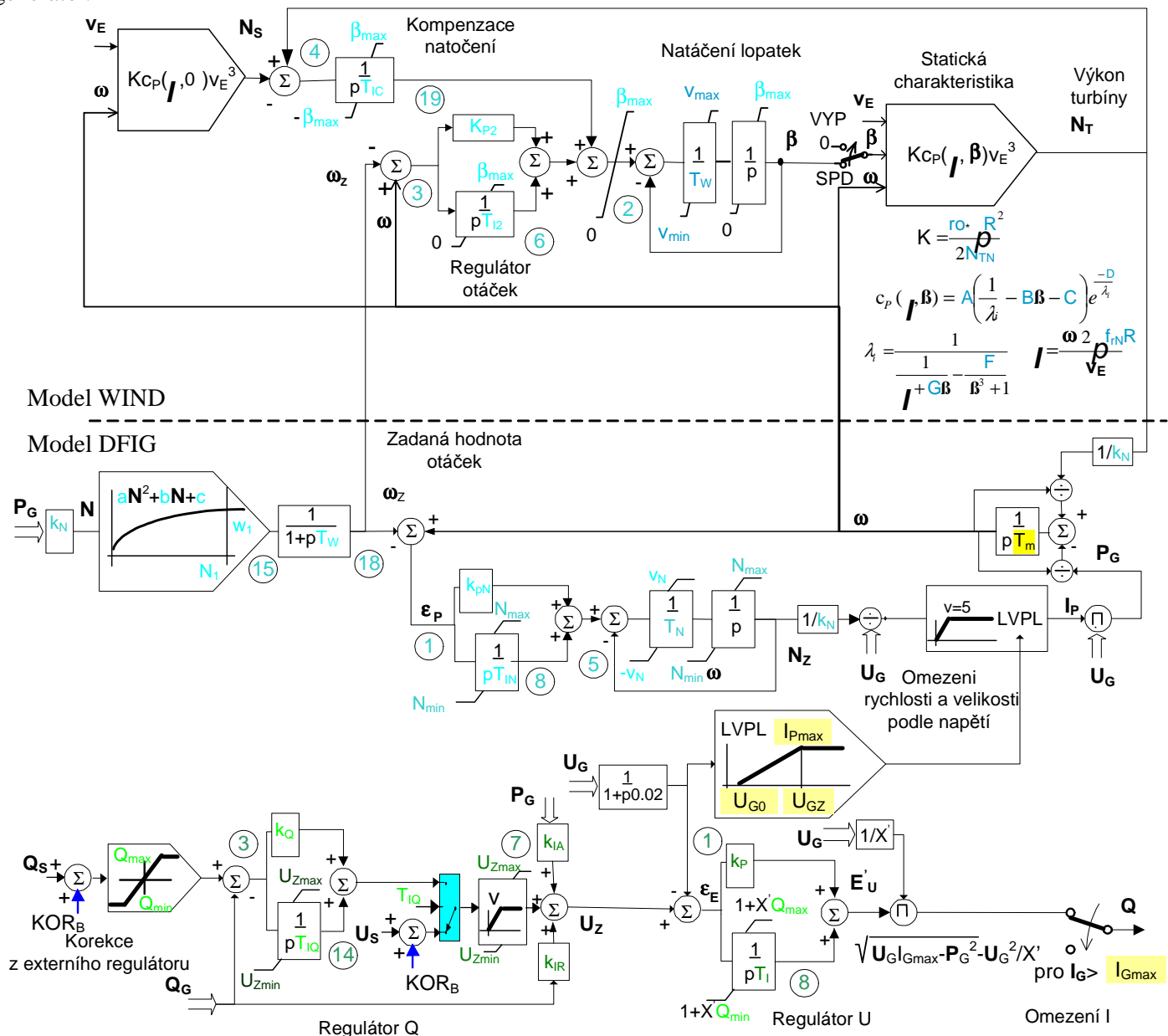
Dynamické chování parku je sledováno pro zkrat na jednom z paralelních vedení. Zkrat trvá 150 ms, pak se vedení vypíná z obou stran.

Poslední obrázky ukazují průběhy svorkového napětí, činného a jalového výkonu.



Je vidět stabilní průběh s rychlým tlumením přechodných dějů. Simulované průběhy odpovídají referenčnímu výpočtu z [1]. Během zkratu dodává DFIG jalový výkon tak, aby nebyl překročen dovolený proud generátoru I_{Gmax} (viz podrobnější popis modelů dále). Činný výkon je omezen podle velikosti napětí mechanismem LVPL („Low Voltage Power Logic“). Po vypnutí zkratu narůstá činný výkon trendem 5 p.j./s na původní hodnotu danou rychlostí větru v_E .

Následující obrázek ukazuje propojení modelů WIND pro větrnou turbínu a DFIG pro dvojitě napájený as. generátor.



Obr. 1 Bloková schémata modelů WIND a DFIG

Regulace spočívá ve dvou oddělených a nezávislých částech při činný a jalový požadovaný výkon N_z a Q . Cílem regulace N_z 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 (model WIND), takže zadaná hodnota otáček se určuje v závislosti na skutečné dodávce výkonu do sítě P_G . V případě výkonové nerovnováhy (rozdílu mezi výkonem turbíny N_T a výkonem generátoru P_G) a vzniku regulační odchylky ϵ_p je požadovaný výkon N_z měněn trendem v_N , aby se dostal do souladu s výkonem turbíny. 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.

Tab. 1 Seznam parametrů DFIGR z katalogu typových parametrů regulátoru turbíny

$N1(-)$	$w1(-)$	$TIN(s)$	$TW(s)$	$TN(s)$	$kpN(-)$	$a(-)$	$b(-)$	$c(-)$	$vN(-/s)$
0.707	1.2	0.5	5	0.05	5	-0.6	1.4	0.51	0.45

Zadaná hodnota otáček ω_z vstupuje do regulátoru turbíny, který ovládá natáčení lopatek – úhel β . Požadovaná hodnota natočení je dána součtem výstupu kompenzace natočení a regulátoru rychlosti. Pro zajištění stabilního provozu má kompenzace natočení (optimalizuje úhel β pro dosažení největšího výkonu turbíny pro danou rychlost větru a otáčky) integrační charakter a regulace otáček naopak proporcionální (integrační část je nepoužita). Typové parametry jsou v následující tabulce.

Tab. 2 Seznam parametrů WINDS z katalogu typových parametrů přídatných automatik regulátoru turbíny

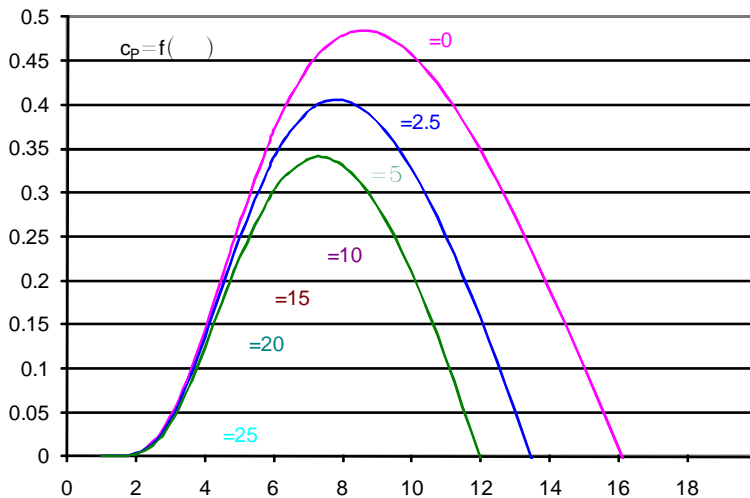
$bmax(st)$	$Kp2(-)$	$TIC(s)$	$TI2(s)$
30	200	1	0

Žlutě vyznačené parametry v Obr. 1 jsou součástí typových parametrů generátoru – viz Tab. 6:

Výkon turbíny N_T je v poměrných hodnotách určen účinnosti turbíny c_p a třetí mocniny ekvivalentní rychlosti větru v ose rotoru v_E , dělené jmenovitou účinností c_{pN} (při jmenovité rychlosti větru v_{En}).

Účinnost turbíny c_p závisí na činiteli rychloběžnosti λ a úhlu natočení β .

R je poloměr rotoru turbíny, f_m je jmenovitá frekvence otáčení rotoru. A,B,C,D,F a G jsou volitelné parametry. Příklad závislosti účinnosti na λ a β pro třílistou vrtuli jsou zobrazeny na Obr. 2 pro parametry dle Tab. 3.

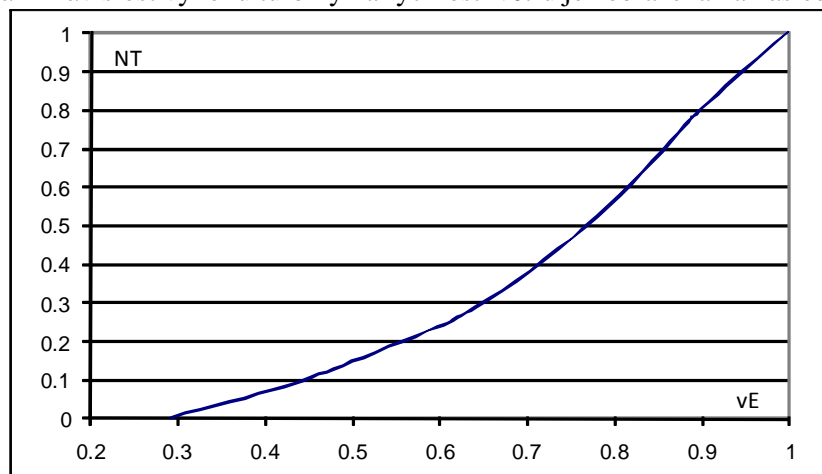


Obr. 2 Závislost c_p na λ a β

Tab. 3 Seznam použitých parametrů WIND22 pro model větrné turbíny z katalogu typových parametrů turbín

k_N	T_W s	A	B	C	D	V_{min} st/s	V_{max} st/s	G	F	ρ kg/m ³	N_{min}	N_{max}	R m	v_{En} m/s	f_m Hz
1	3	80	0.0384	0.065	18.4	-3	3	-0.02	-0,003	1,225	0	1	40	12	0,263

Pro zadaný průměr vrtule, jmenovité rychlosti větru a 120% jmenovité rychlosti otáčení vychází jmenovitý výkon turbíny 2.2 MW. Stacionární závislost výkonu turbíny na rychlosti větru je zobrazena na následujícím obrázku:



Obr. 3 Závislost výkonu turbíny na rychlosti větru

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 definovaném místě). V případě, že proud překročí hodnotu I_{Gmax} je hodnota Q regulována tak, aby proud generátoru tuto hodnotu nepřekročil. Pro $T_{IQ} < 0$ reguluje regulátor na konstantní účinník.

V tabulkách jsou typové parametry modelů použité pro následující výpočty:

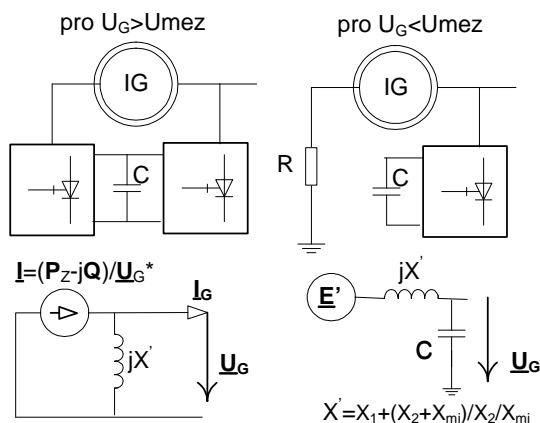
Tab. 4 Seznam parametrů DFIGP pro model DFIG z katalogu typových parametrů regulátoru buzení

U_{zmin}	U_{zmax}	K_p	$T_I(s)$	$v(\%/s)$	$K_{IA}(-)$	$K_{IR}(-)$
0.8	1.2	1	0.025	10	0	0

Tab. 5 Seznam parametrů DFIG pro model DFIG z katalogu parametrů přidavných automatik regulátoru buzení

$k_Q(-)$	$T_{IQ}(s)$	$Q_{min}(-)$	$Q_{max}(-)$
0	0	-0.8	0.8

Generátor včetně frekvenčního měniče je v běžném provozu modelován staticky pomocí Nortonova vstříku I paralelně s náhradní reaktancí motoru X' (viz např. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a nejnovější doporučení f. GE Energy [1]).



Obr. 4 Schéma modelu DFIG napájeného do rotoru frekvenčním měničem

Nortonův vstřík je spočítán z požadovaného výkonu P_Z jako součinu činného proudu I_p (průmětu fázoru proudu generátoru I_G do fázoru svorkového napětí U_G) a amplitudy svorkového napětí U_G a požadovaného jalového výkonu Q . V běžném provozu s napětím větším než U_{mez} je dodávka činného i jalového výkonu daná výstupy z regulátorů P_Z a Q .

Při poklesu svorkového napětí pod určitou hodnotu U_{mez} rotorová část frekvenčního měniče zablokuje a rotorový obvod se zkratuje přes přídatný odpor R , takže asynchronní generátor přejde do režimu s kotvou nakrátko. Síťová část měniče zůstává zapojena a kapacita meziobvodu C je trvale připojena na svorky, což ukazuje druhá část Obr. 4. Při poklesu svorkového napětí pod hodnotu U_{mez} je generátor modelován přechodným napětím za přechodnou reaktancí, což odpovídá modelu ELM1.

Přechodné děje v obou vinutích jsou v běžném provozu zanedbány, protože jsou dostatečně rychlé v porovnání s vyšetřovanými elektromechanickými ději. Dominantní roli přebírá frekvenční měnič, který v součinnosti s regulačními obvody je schopen přizpůsobovat činný i jalový výkon požadavkům na efektivní využití rychlosti větru a na neovlivňování sítě.

Typové parametry modelu DFIG jsou v následující tabulce:

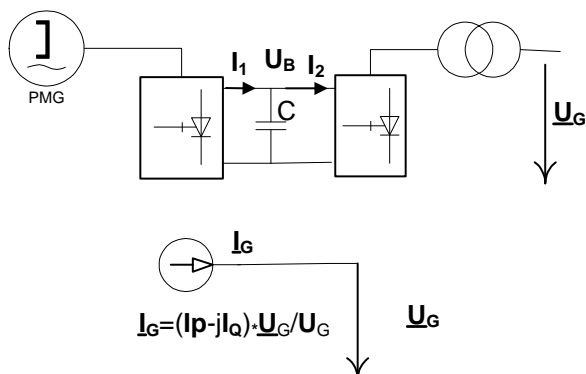
Tab. 6 Seznam parametrů DFIGEU pro model DFIG z katalogu typových parametrů asynchronních strojů

Idef (1)	Sp (1/min)	Umez	R	Tm (s)	X1	X20	X21	Xmi	R1	R20	R21	C	UG0	UGZ	IGmax	IPmax
1	1500	0	0.03	7	0.08	0.099	0.099	3.29	0.007	0.009	0.009	1	0.5	0.9	1.15	1.1

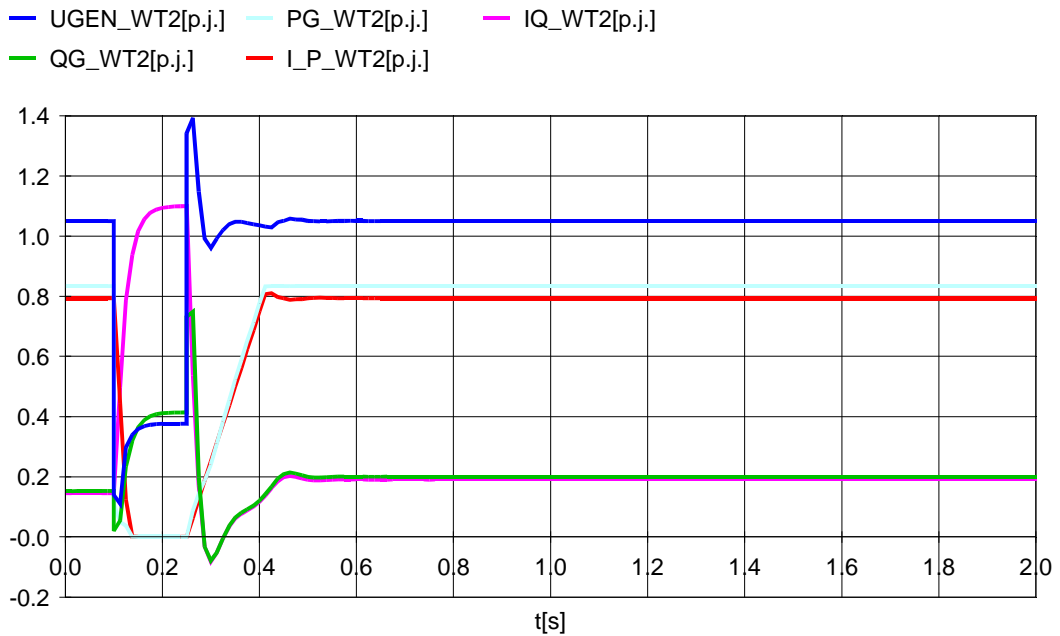
Parametr Idef určuje způsob výpočtu parametrů rotoru – v našem případě se pro DFIG zadává 1. Náhradní reaktance se spočítá obvyklým způsobem: $X' = X_1 + X_{20} * X_{mi} / (X_{20} + X_{mi})$.

Chování inovovaného modelu PMGC poháněného větrnou turbínou (model WIND) při blízkém zkratu - GE_WECCN

Případ prokazuje odolnost moderních plnovýkonových frekvenčních měničů při blízkém zkratu („ride through fault capability“). Modelovaná soustava je obdobná jako u předchozího případu, jen místo modelu generátoru DFIG je zadán synchronní stroj s modelem PMGC (z ang. „Permanent Magnet Generator with Converter“). Oproti předchozí verzi je PMGC (v souladu s [1]) modelován jako Nortonův ekvivalent bez náhradní admitance – viz následující obrázek:

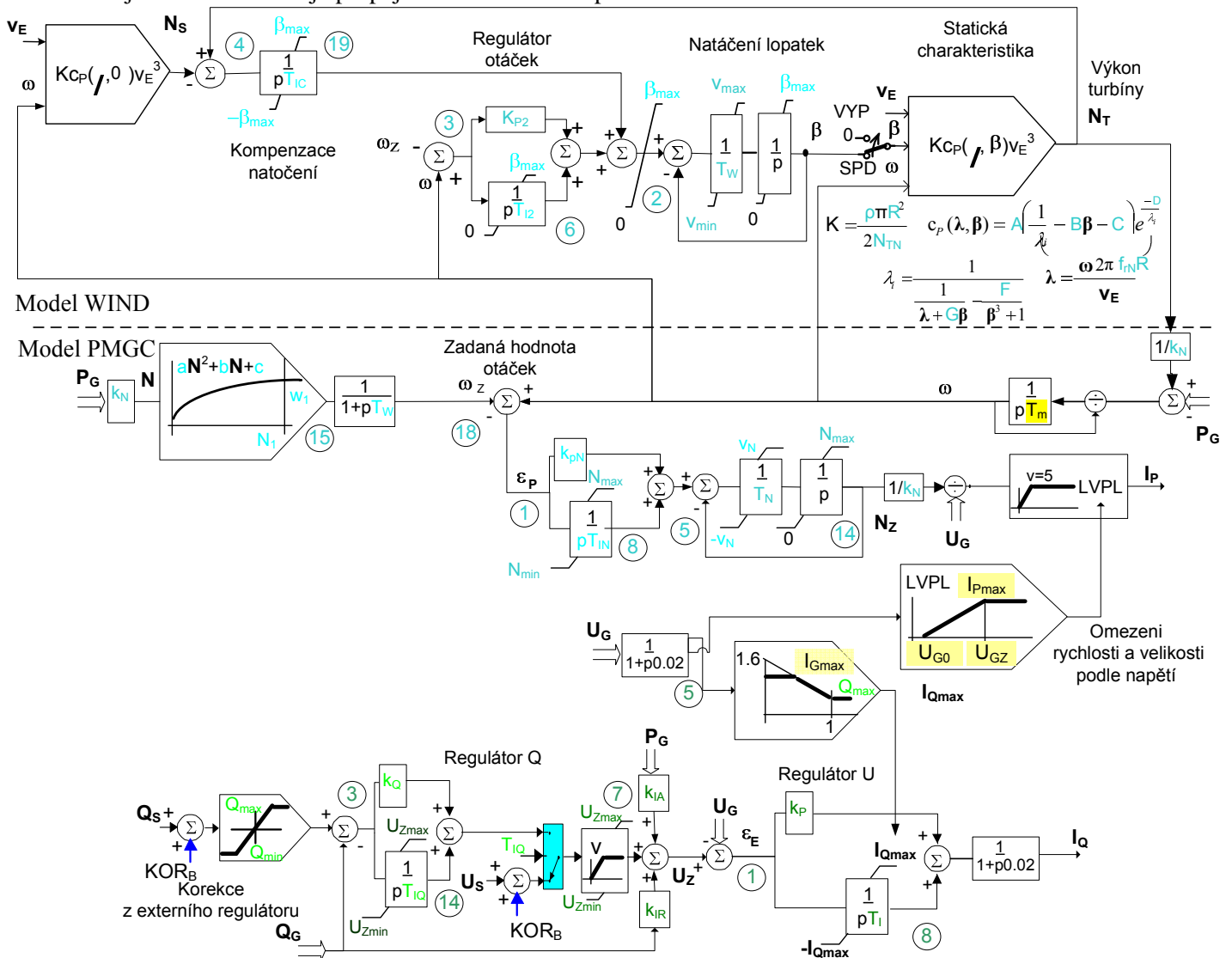


Následující obrázek ukazuje průběhy svorkového napětí, činného a jalového výkonu a činné a jalové složky proudu.



Je opět vidět stabilní průběh s rychlým tlumením přechodných dějů. Simulované průběhy odpovídají referenčnímu výpočtu z [1]. Během zkratu dodává PGMC jalový výkon tak, aby nebyl překročen dovolený proud generátoru I_{Gmax} . Činný výkon je omezen podle velikosti napětí mechanismem LVPL („Low Voltage Power Limiter“). Po vypnutí zkratu narůstá činný výkon trendem 5 p.j./s a se vrací na původní hodnotu danou rychlostí větru v_E .

Následující obrázek ukazuje propojení modelů WIND pro větrnou turbínu a PMGC.



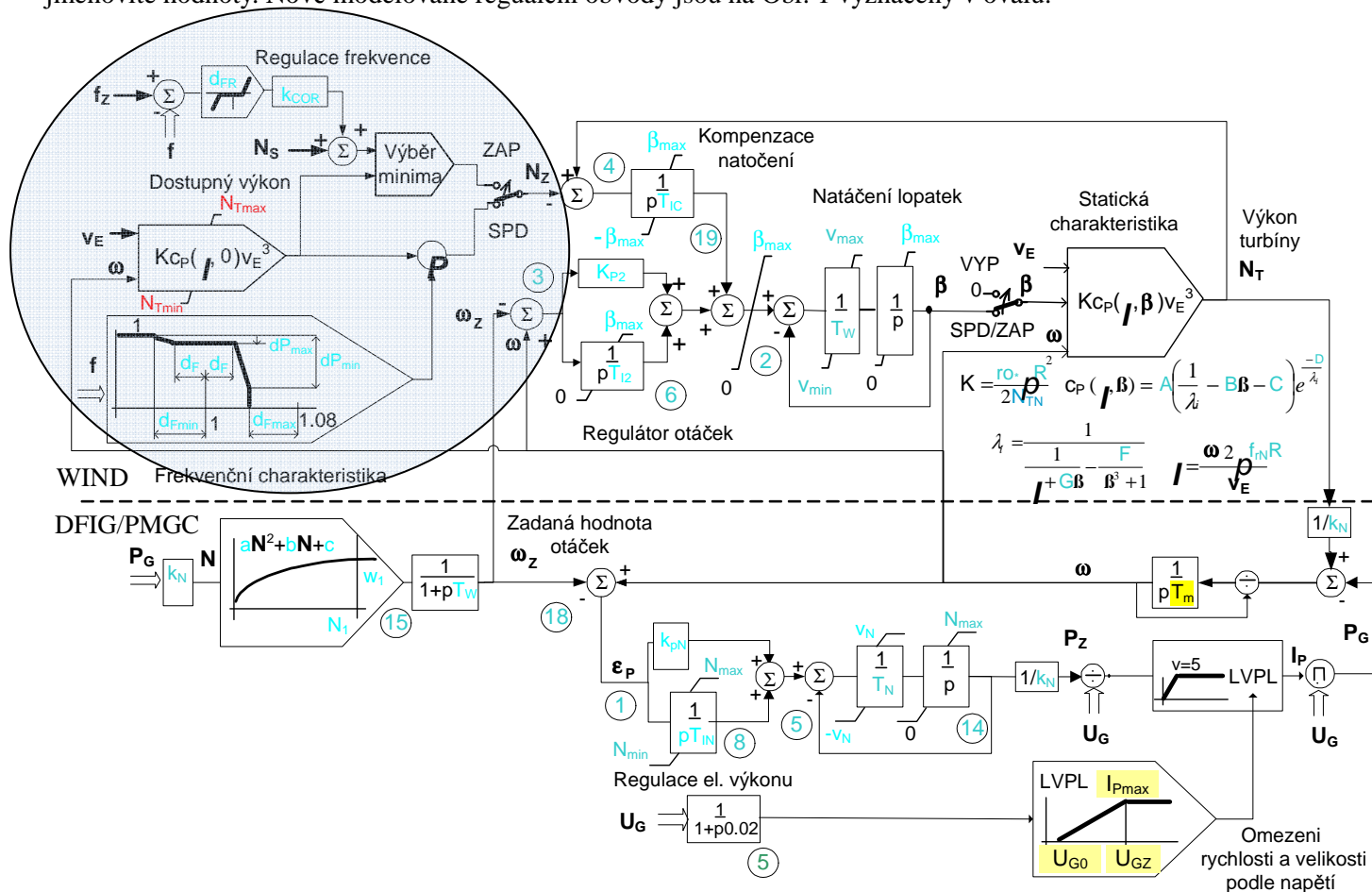
Obr. 5 Bloková schémata modelů WIND a PMGC

Princi regulace je obdobný jako u předchozího modelu DFIG.

Případy WECCZVET a WECCZATS

Chování inovovaného modelu WIND při změnách frekvence sítě

Případy prokazují schopnost inovovaného modelu větrné turbíny WIND reagovat na odchylky frekvence sítě od jmenovité hodnoty. Nově modelované regulační obvody jsou na Obr. 1 vyznačeny v oválu.



Obr. 6 Bloková schémata propojení modelu WIND s modely PMGC a DFIG

Turbína může pracovat ve třech regulačních režimech. Standardní režim je regulace otáček (zadávaná klíčovým slovem SPD v databázi dynamických modelů bloků). Kompensace natočení vyreguluje výkon turbíny na dosažitelný výkon případně modifikovaný v závislosti na frekvenci sítě f (pro nenulové parametry dP_{min} a dP_{max}). Druhým režimem je zapnutá regulace výkonu (zadávaná klíčovým slovem ZAP), kdy turbína může pracovat jak v primární regulaci frekvence, tak v sekundární regulaci na požadovanou hodnotu N_s . Velikost primární regulační rezervy se zadává hodnotou PRR jako parametr bloku. Neregulovaná turbína se zvolí klíčovým slovem VYP. Typové parametry týkající se regulace frekvence jsou zadávány v úseku regulátoru turbín:

N_1	w_1	T_{IN} (s)	T_W (s)	T_N (s)	k_{pN}	K_{COR}	a	b	c	v_N (-/s)	dP_{min} (%)	dF_r (%)	d_F (%)	d_{Fmin} (%)	d_{Fmax} (%)	dP_{max} (%)
1	1.47	0.6	50	0.05	6	20	-0.75	1.59	0.63	0.45	95	0	0.4	4	4	5

Tab. 7 Seznam parametrů PMGCGE z katalogu typových parametrů regulátoru turbíny

Ostatní parametry modelu jsou v následujících tabulkách.

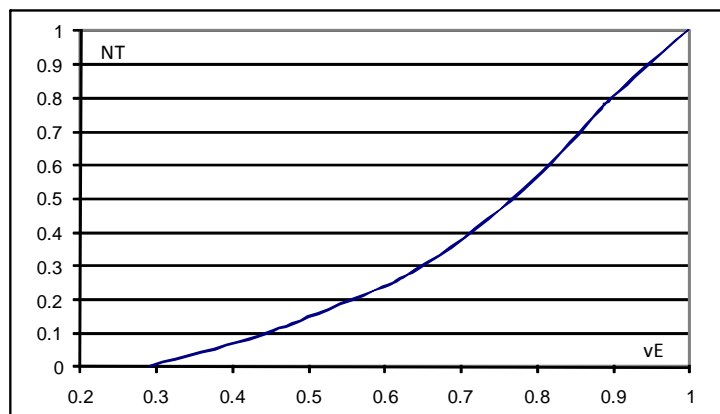
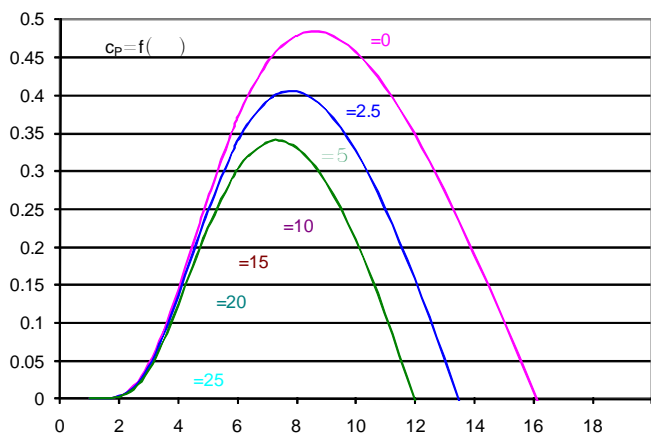
$b_{max}(st)$	$K_{p2}(-)$	$TIC(s)$	$TI2(s)$
27	150	0.2	0

Tab. 8 Seznam parametrů WINDGE z katalogu typových parametrů přídatných automatik regulátoru turbíny

k_N	T_W s	A	B	C	D	v_{min} st/s	v_{max} st/s	G	F	ρ kg/m ³	N_{min}	N_{max}	R m	v_{En} m/s	frn Hz
1.11	0.3	80	0.0038	0.065	18.4	-10	10	-0.02	-0.003	1.225	0	1.11	50	12.5	0.263

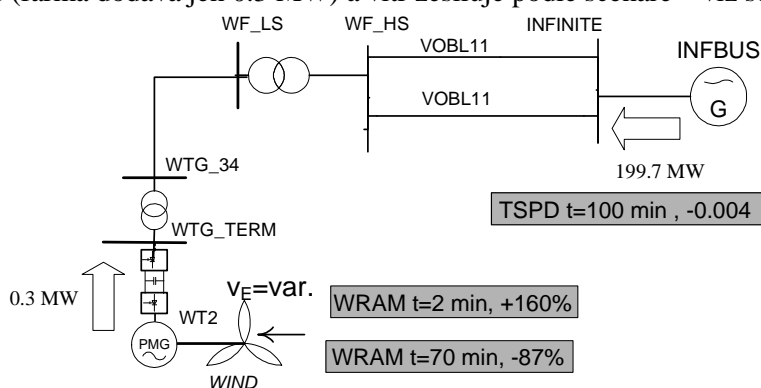
Tab. 9 Seznam použitých parametrů WIND25 pro model větrné turbíny 2.5 MW z katalogu typových parametrů turbín

Odpovídající statické charakteristiky turbíny jsou na následujících obrázcích:



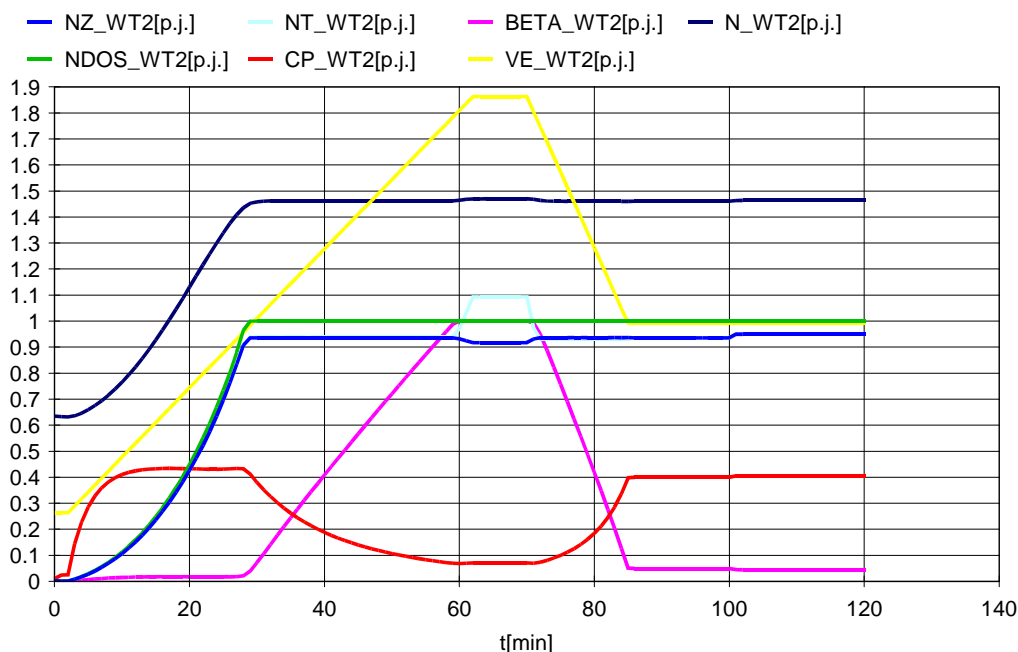
Obr. 7 Závislosti c_p na λ a β α výkonu turbíny NT na rychlosti větru v_E

Nejprve budeme sledovat dynamické chování modelu v jednoduché ostrovní síti skládající se z ekvivalentního zdroje INFBUS o výkonu 2000 MW a větrné farmy WT2 o výkonu 100 MW. Oba zdroje jsou v regulaci otáček. Ve výchozím stavu je malý vítr (farma dodává jen 0.3 MW) a vítr zesiluje podle scénáře – viz schéma případu WCCZVET:



Obr. 8 Schéma případu WCCZVET s rampovou změnou rychlosti větru a změnou výkonu bloku INFBUS

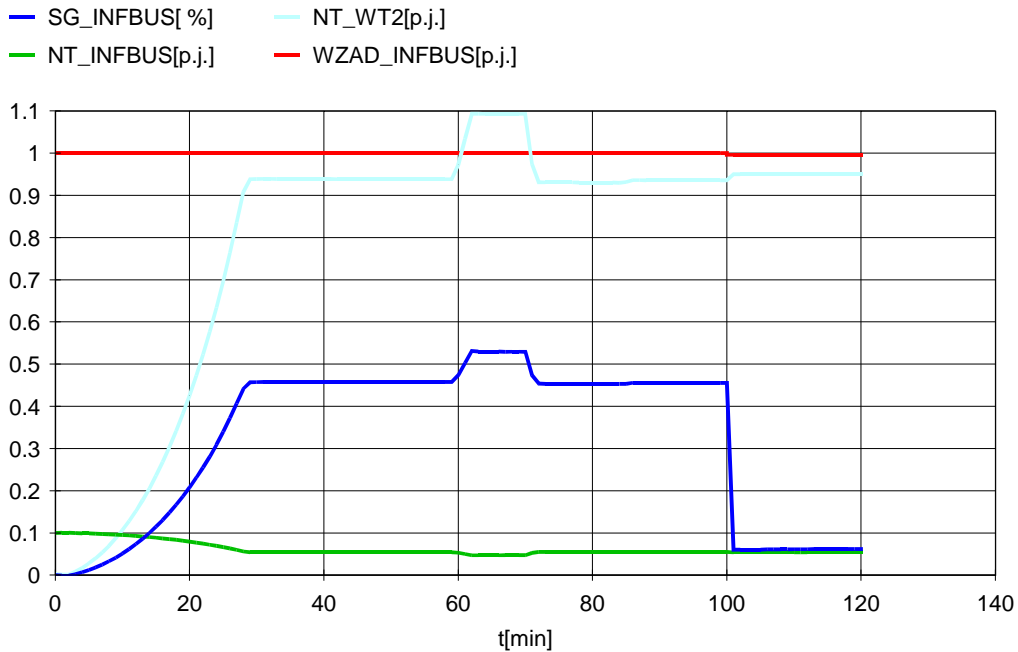
Následující obrázek ukazuje průběhy přechodných dějů (CP je účinnost turbíny a BETA úhel natočení):



Obr. 9 Průběhy otáček N, rychlosti větru VE, dosažitelného, požadovaného a skutečného výkonu turbíny NDOS, NZ a NT

Rychlost větru začíná narůstat po druhé minutě. V první fázi asi do 28 minuty požadovaný výkon NZ sleduje nárůst dosažitelného výkonu NDOS (daný nárůstem rychlosti větru VE), turbína pracuje s velkou účinností a malým úhlem BETA (daným přiškrcením výkonu pro dosažení 5% regulační rezervy dP_{max} - viz Obr. 1 a Tab. 1). Po dosažení jmenovité rychlosti větru je výkon regulován natáčením listů vrtule – úhel BETA se zvětšuje, až dosáhne v 60 minutě svého maxima. Výkon turbíny NT pak přesáhne zadanou hodnotu NZ a překročí i jmenovitý výkon (v modelu je dovolena přetížitelnost 11% daná parametrem N_{max} - viz Obr. 1 a Tab. 3). Po poklesu rychlosti větru k jmenovité hodnotě je zadaný výkon menší než 95 %. Je to dáno tím, že v ostrově je odchylka frekvence větší jak 0.4 % (což je

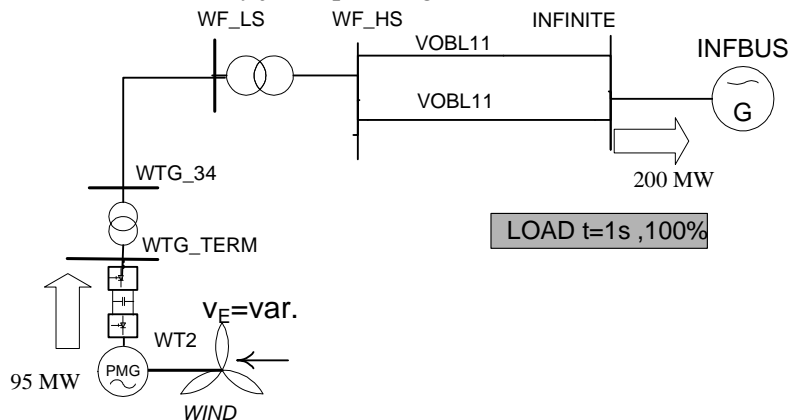
hodnota parametru dF z Tab. 1), takže zadaná hodnota výkonu se zmenšuje v souladu s frekvenční charakteristikou (viz Obr. 1 a Tab. 1). Průběh odchylky frekvence (měřený odchylkou otáček SG bloku INFBUS) a výkony obou turbín NT jsou patrné z následujícího obrázku:



Obr. 10 Průběhy otáček N, rychlosti větru VE, dosažitelného, požadovaného a skutečného výkonu turbíny NDOS, NZ a NT

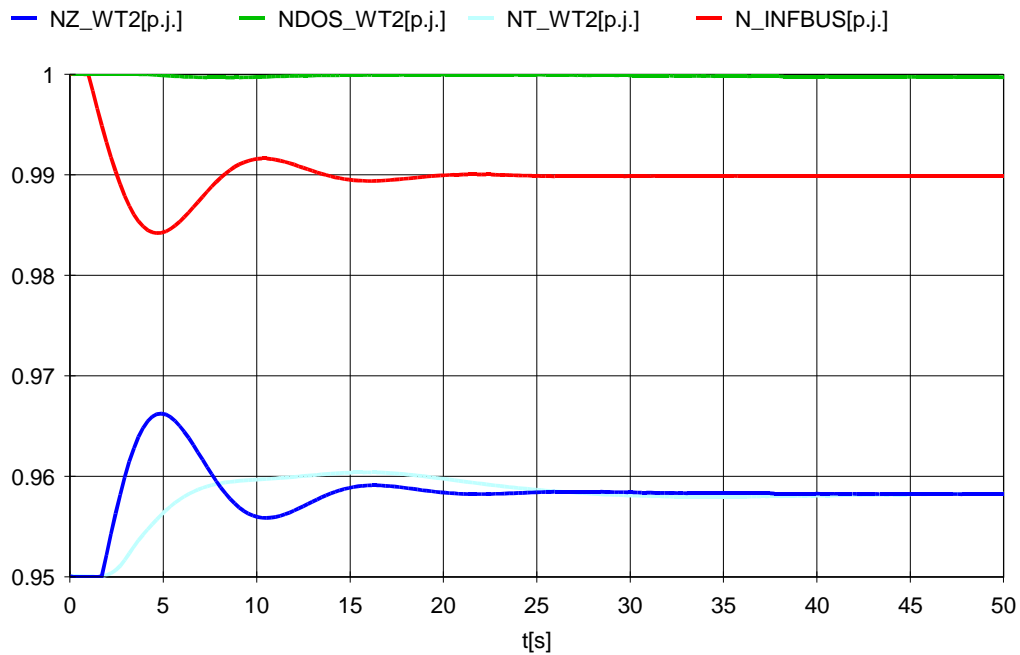
Přebytek výkonu v ostrově (daný nárůstem výkonu větrné turbíny WT2) je odregulován blokem INFBUS, který je v regulaci otáček a má regulační rozsah od nuly do jmenovitého výkonu. Výkon ekvivalentního bloku INFBUS je 20 x větší než je výkon větrné farmy WT2, takže odchylky frekvence ostrova jsou vcelku malé a při změně výkonu bloku WT2 prakticky z nuly na 95 % výkonu je odchylka frekvence necelé 0.5 % (daná výkonovým číslem ostrova, které je určeno převážně proporcionálním zesílením regulace otáček bloku INFBUS (parametr $kp2$). Ustálená odchylka frekvence se odstraní změnou zadané hodnoty regulace otáček WZAD, což se provede v čase $t=100$ zásahem TSPD. Po poklesu odchylky frekvence pod mez dF se výkon větrné turbíny zvětší na 95% v souladu s frekvenční charakteristikou.

Opačný vliv na frekvenci ostrova bude mít skoková změna zátěže simulovaná zásahem LOAD v případě WCCZATS – viz následující schéma (oba bloky jsou opět v regulaci otáček):



Obr. 11 Schéma případu WCCZATS se skokovou změny zatížení v uzlu INFINITE na dvojnásobek

Obr. 12 ukazuje průběhy frekvence sítě (měřené otáčkami N bloku INFBUS) a výkonů větrné farmy WT2. Tentokrát fouká jmenovitý vítr již ve výchozím stavu, takže WT2 má plný dosažitelný výkon NDOS a pracuje s pětiprocentní rezervou $NZ=95$.



Obr. 12 Průběhy otáček N, dosažitelného, požadovaného a skutečného výkonu turbíny NDOS, NZ a NT - případ WCCZATS

Stacionární odchylka frekvence činí -1%, čili je přibližně dvojnásobná jako v předchozím případě, ale v opačném směru. Zadaný výkon NZ kopíruje tvar odchylky frekvence, výkon větrné farmy sleduje zadaný výkon se zpožděním daným dynamikou kompenzace natáčení lopatek.

Reference

- [1] K. Clark, N. W. Miller, J. J. Sanchez-Gasca: Modeling of GE Wind Turbine-Generators for Grid Studies, GE Energy report Version 4.4, 2009