

8. Setkání uživatelů programu MODES

ČVUT FEL Praha 19.2. 2007

Program

1. seznámení s inovacemi v nové verzi 2.2/11 programu MODES (inovované modely GASA, alternativní modelu regulátoru buzení a systémového stabilizátoru, třívstupový externí regulátor)
2. uživatelské rozhraní MODMAN v.2.11 (automatická tvorba scénářů)
3. verifikace programu

1. INOVACE PROGRAMU MODES

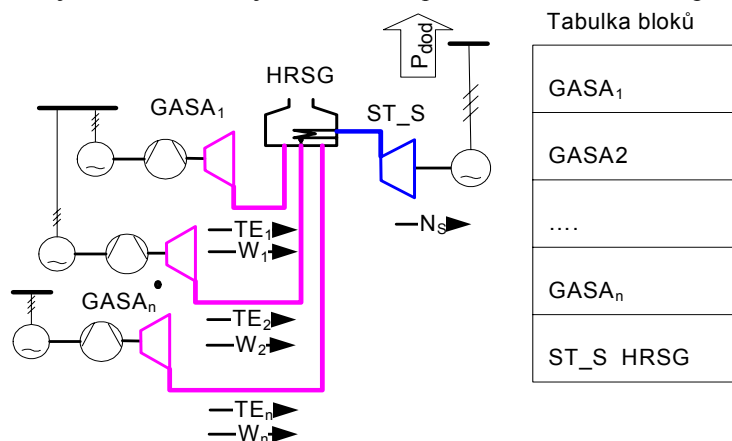
1.1. Inovovaný model paroplynového cyklu - PPC

1. Zatímco předchozí model PPC (implementovaný ve verzi 2.2.10) měl omezení v tom, že:
 - a) jedna plynová turbína (model GASA) zásobuje jeden kotel na zbytkové teplo (model HRSG),
 - b) generátory obou turbín jsou připojeny na jednu přípojnici (uzlu).

Nový model tato omezení částečně překračuje tím, že:

- A) více plynových turbín (modely GASA) může zásobuje jeden kotel na zbytkové teplo (model HRSG),
- B) generátory jednotlivých turbín jsou připojeny na různé přípojnice, přičemž parní turbína musí pracovat do samostatné přípojnice.

Následující obrázek ukazuje alternativní způsob modelování PPC pro případ více plynových turbín zásobujících jeden kotel:



Obr. 1 Uspořádání rozšířeného modelu PPC

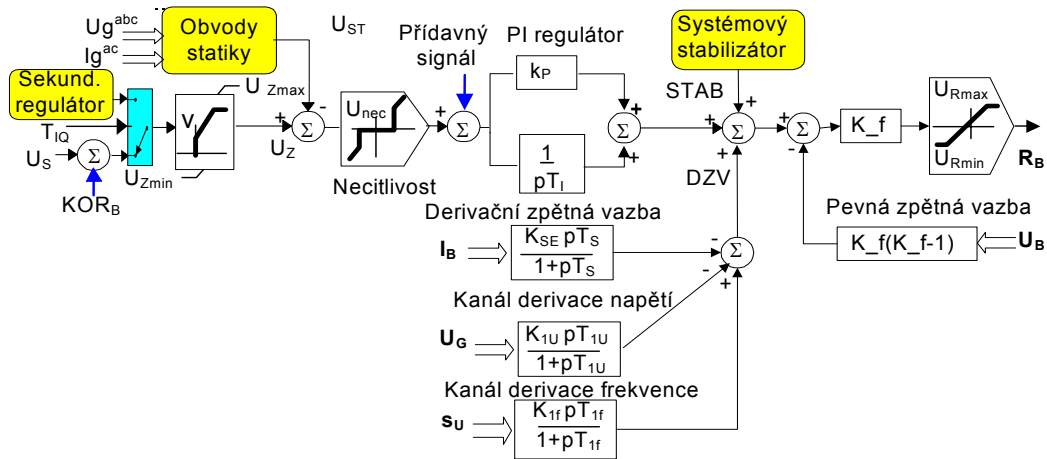
Oproti stávajícímu modelu může být výkon jednotlivých plynových turbín vyveden do samostatných a/nebo společných přípojníc. Naopak výkon parní turbíny musí být vyveden do samostatné přípojnice. Model plynové turbíny GASA je upraven tak, aby na výstupu dával nejen teplotu výfukových plynů na výstupu z turbíny, ale i jejich množství v kg/s. Ekvivalentní teplota výfukových plynů vstupující do vztahu pro výpočet využitelného zbytkového tepla se určí jako vážený průměr teplot jednotlivých plynových turbín.

Bližší o modelování PPC viz také [1] .

1.2. Alternativní modely buzení

2. Je možné modelovat alternativní struktura regulátoru buzení odpovídající ruským regulátorům tzv. silnogo dejstvija, zobrazené na následujícím obrázku. Příznak použití tohoto modelu je jeden parametr navíc na řádku typových parametrů regulátoru buzení. Předposlední čtyři parametry mají odlišný význam od zobecněného regulátoru.

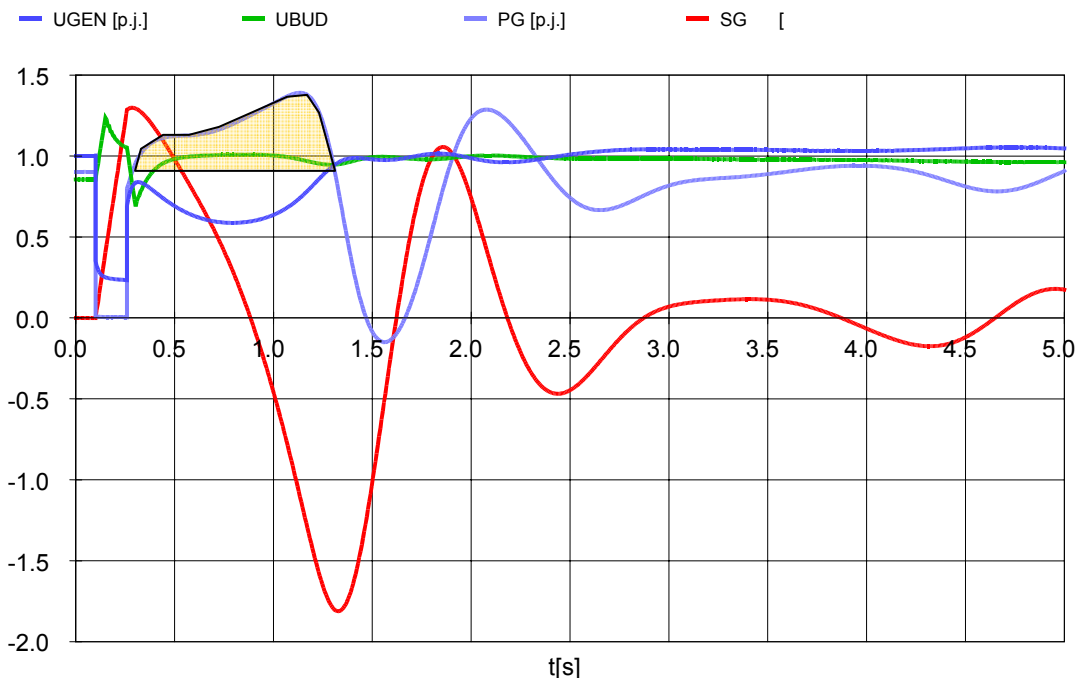
Uzmin	Uzmax	Unec	Kstat	Kp(-)	Kse(-)	Tl(s)	Ts(s)	T1(s)	T3(s)	v(%/s)	Urmax	Urmin	Ulmin	Uimax	T1f	T1u	K1f	K1u	K_f
-------	-------	------	-------	-------	--------	-------	-------	-------	-------	--------	-------	-------	-------	-------	------------	------------	------------	------------	------------



Obr. 2 Alternativní struktura regulátoru buzení

Volbou $k_f=1$ bude struktura alternativního i zobecněného regulátoru obdobná (včetně omezení integrátoru hodnotami U_{Rmin} - U_{Rmax}) s tím rozdílem, že signály DZV a STAB jsou připojeny až na výstup PI regulátoru a ne do součtového bodu (na vstup regulátoru).

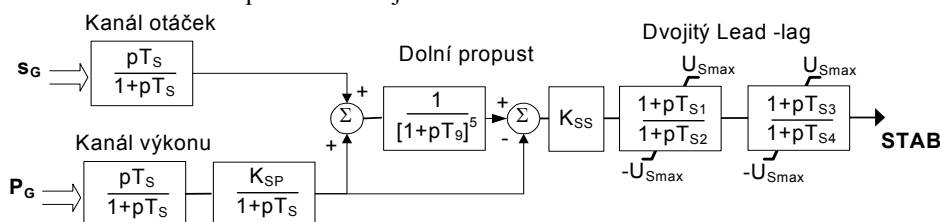
Následující obrázek ukazuje časový průběh veličin generátoru při blízkém třífázovém zkratu.



Obr. 3 Svorkové a budící napětí, výkon a skluz generátoru s regulátorem tzv. silného dejství

Zatímco rychlá tyristorová nezávislé budící soupravy po zkratu nárazově přibudí generátor, je v obrázku přibuzení pomalé – viz zelený průběh UB. Jedná se totiž o bezkroužkové buzení s točivými diodami a navíc vlivem silné pevné zpětné vazby k_f je nárůst zastaven ještě během trvání zkratu. Po vypnutí zkratu způsobí derivační zpětná vazba od svorkového napětí další odbuzování. Tyto vlivy jsou příčinou pozdějšího zotavení napětí, zmenšení elektrického výkonu po vypnutí zkratu a tím i zmenšení brzdící plochy, která je v obrázku pro názornost vybarvena oranžově.

- Pro modelování systémových stabilizátorů PSS2A (implementovaný v budících soupravách Unitrol 5000) je od verze 2.2.11 zaveden alternativní model podle následujícího obrázku:



Obr. 4 Schéma alternativního modelu systémového stabilizátoru

Model má oproti výchozímu modelu PSS2A zjednodušenou strukturu (vynechání dvojitých členů „washout“ na vstupech), ale zachovává hlavní vlastnosti PSS2A, kterými jsou:

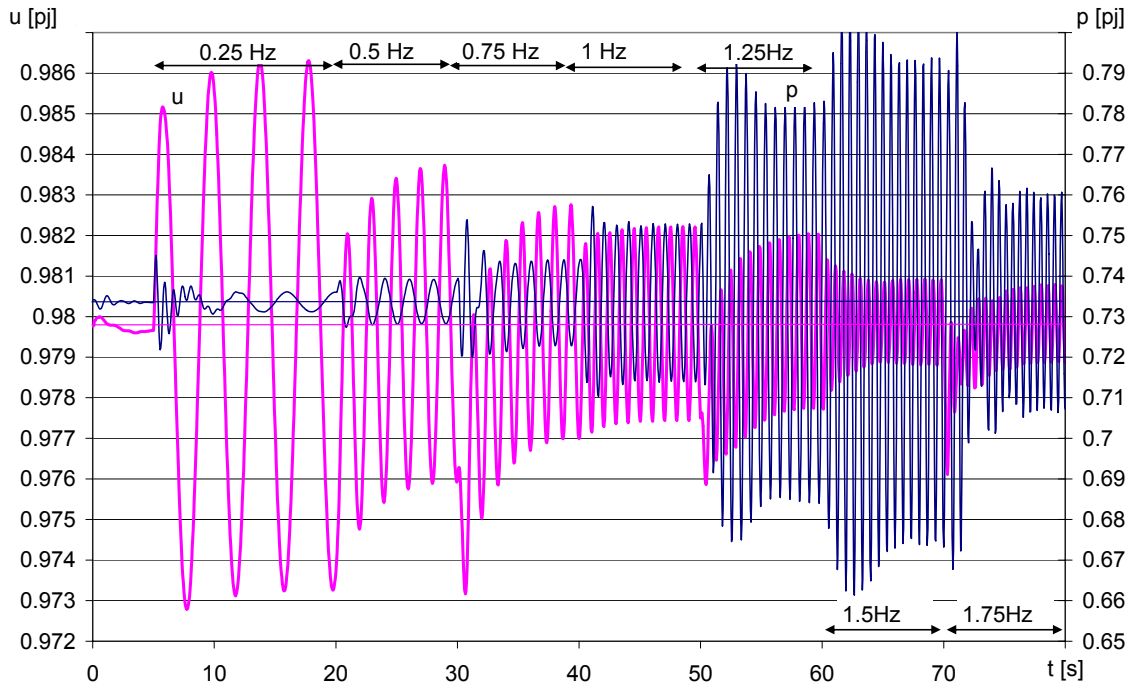
- tlumení zesílení kanálu výkonu pro frekvence vyšší jak $f_{ZS}=1/(2\pi T_S)$ způsobené členem zpoždění 1.řádu

- odfiltrování frekvencí vyšších jak $f_{z9}=1/(2\pi T9)$ dolní propustí, čímž se pro vyšší frekvence (odpovídající elektromechanickým kyvům 1-2 Hz) eliminuje vliv kanálu otáček
- naopak pro nižší frekvence jak $f_{z9}=1/(2\pi T9)$ (odpovídající systémovým kyvům 0.1 -1 Hz) eliminace vlivu kanálu výkonu.

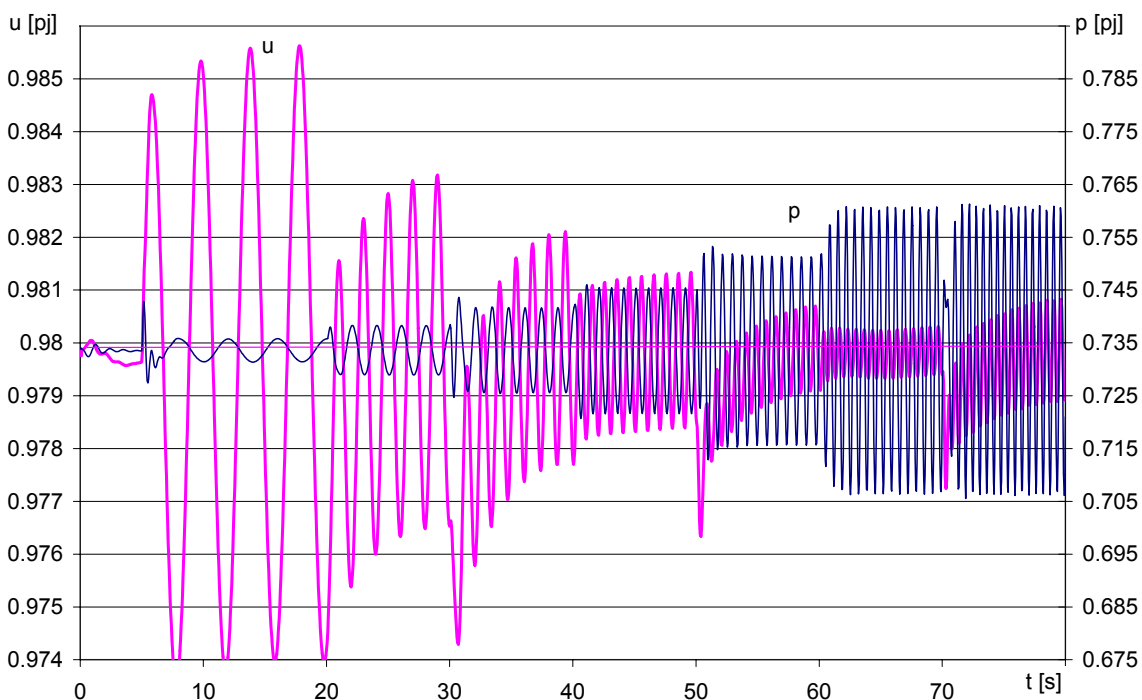
Příznakem použití alternativního modelu jsou dva přidavné parametry TS3, TS4 a T9 v úseku přidavných automatik regulátoru buzení katalogu typových parametrů bloku:

K_{Ss}	K_{SP}	T_S	T_{S1}	T_{S2}	U_{Smax}	U_{OMmax}	U_{OMzad}	T_{IOM}	T_{OM}	K_{dH}	K_{HMP}	I_{HMPzad}	Alfa	T_{IHMP}	U_{Hmax}	T_{dHMP}	k_C	T_{IQ}	Q_{min}	Q_{max}	eQ_{rec}	eQ_{om}	eQ_{mez}	I_{Bmax}	I_{Gmax}	T_{S3}	T_{S4}	T_9
----------	----------	-------	----------	----------	------------	-------------	-------------	-----------	----------	----------	-----------	--------------	------	------------	------------	------------	-------	----------	-----------	-----------	------------	-----------	------------	------------	------------	----------	----------	-------

Alternativní model systémového stabilizátoru byl verifikován porovnáním s měřením frekvenčních charakteristik. Tento tzv. frekvenční test spočívá v tom, že do součtového bodu regulátoru napětí se přivádí harmonický o definované amplitudě ΔU a frekvenci a sleduje se odezva veličin generátoru jako činného výkonu P_G , jalového výkonu Q_G a svorkového napětí U_G a to jednou s vypnutým a jednou ze zapnutým stabilizátorem. Následující obrázky ukazují odezvu činného výkonu a napětí (v poměrných hodnotách) generátoru na harmonický signál o amplitudě 1% při sedmi různých frekvencích od 0.25 do 1.75 Hz.



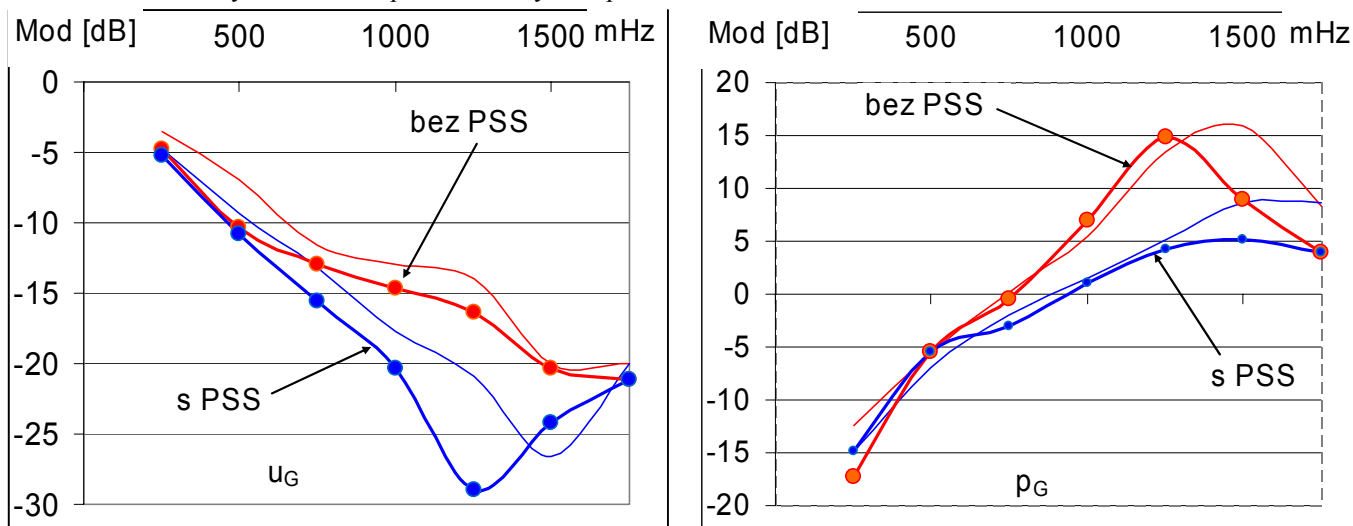
Obr. 5 Časový průběh výkonu (modře) a napětí (fialově) při frekvenčním testu bez PSS



Obr. 6 Časový průběh výkonu (modře) a napětí (fialově) při frekvenčním testu s PSS

Časové průběhy budicího signálu i odezvy jednotlivých provozních veličin jsou ukládány do výstupního souboru a zpracovány přidavným programem HARM_ANA (je součástí balíku programů MODES), který vypočítá zesílení $z_p=\Delta P_G/\Delta U$ a $z_u=\Delta U_G/\Delta U$

přímou v decibelech ($20 \cdot \log(z)$). Na následujících obrázcích jsou vypočítaná zesílení porovnána s měřeními [2] - vpravo pro tlumení činného výkonu a vlevo pro tlumení kyvů napětí.



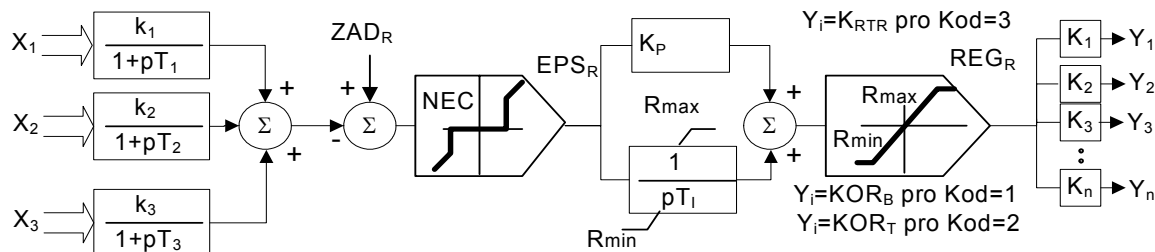
Obr. 7 Frekvenční charakteristiky simulačního výpočtu (tence) a měření (silně)

Červeně jsou kresleny průběhy s vypnutým stabilizátorem a modře se zapnutým. Porovnání obou charakteristik ukazuje kvalitativně na schopnost tlumit kyvy dané frekvence. Charakteristika se zapnutým stabilizátorem (PSS) by měla být vždy pod charakteristikou s vypnutým PSS, aby PSS nezhoršoval tlumení.

V obrázcích jsou tlustou čarou (včetně značek) kresleny i měřené charakteristiky. Je vidět vcelku zanedbatelný rozdíl mezi měřením a simulací u tlumení kyvů činného výkonu pro frekvence odpovídající systémovým kyvům (0.1-1Hz). U napětí jsou rozdíly o něco větší, ale nepřesahují 3 dB. V oblasti lokálních elektromechanických kyvů (1-2 Hz) je přesnost simulace horší a to vlivem o něco větší rezonanční frekvence pro elektromechanické kyvy. Přesto je přesnost simulačního výpočtu dostatečná pro posouzení tlumících schopností systémového stabilizátoru i pro zkoumání vlivu nastavení jednotlivých parametrů na tlumení vnucených kyvů.

1.3. Třívstupový externí regulátor

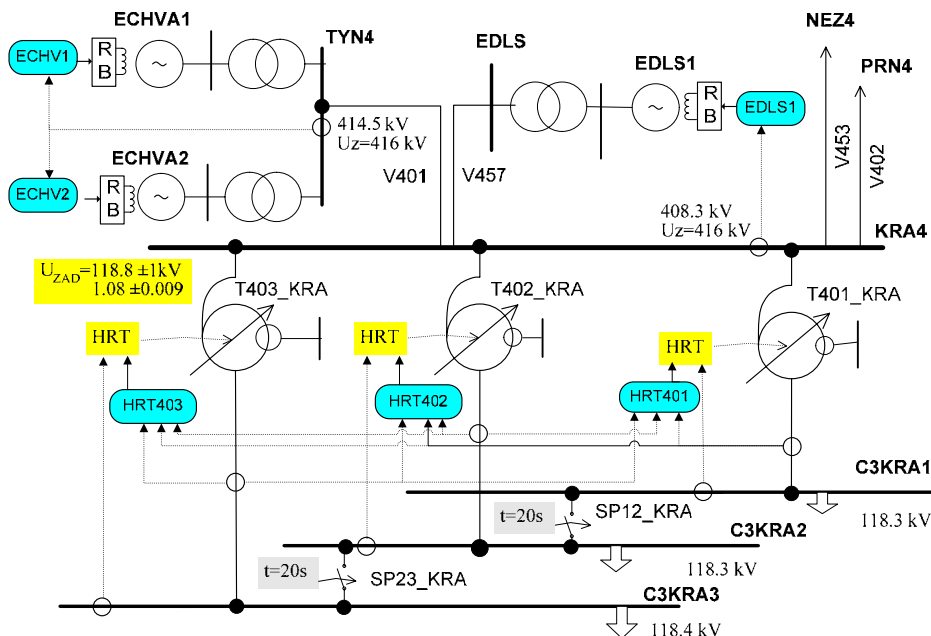
4. V nové verzi je možno používat třívstupový externí regulátor (dosavadní model měl dva vstupy).



Obr. 8 Blokové schéma externího stabilizátoru

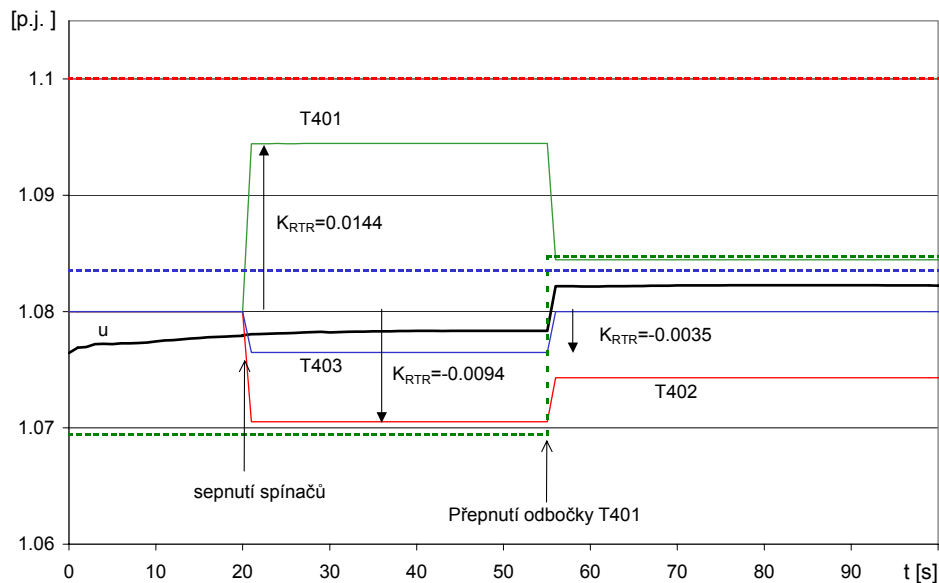
Upravená suma těchto proměnných tvoří regulovanou veličinu. Zadaná hodnota ZAD_R se zadává pro výchozí stav a lze jej měnit během výpočtu zásahem 'SETR'. Regulační odchylka EPS_R se zpracuje v PI regulátoru. Výstup omezovače REG_R slouží ke generaci korekčních signálů Y_1 až Y_n . Regulátor tedy může mít až n výstupů, které se přičítají jako korekční signál k zadané hodnotě regulátoru buzení nebo regulátoru pohonu nebo hladinového regulátoru trať.

Funkčnost nového regulátoru byla testována na případě korekce zadané hodnoty napětí pro tři paralelně pracující transformátory tak, aby jalový výkon se rozložil rovnoměrně. Následující obrázek schématicky popisuje tento případ. Do uzlu KRA4 je vyveden blok EDLS1, který reguluje pomocí externího regulátoru napětí v uzlu. Je znázorněn i sousední pilotní uzel TYN4, jehož napětí regulují bloky ECHVA. Z uzlu KRA4 jsou napájeny tři trojvinuťové transformátory vybavené hladinovými regulátory regulujícími napětí na straně 110 kV. Zadané hodnoty těchto regulátorů jsou korigovány výstupy externích regulátorů HRT401 – HRT403, jejichž parametry jsou nastaveny tak, aby zatížení jalovým výkonem všech traf bylo co nejrovnoměrnější (v poměru jmenovitých výkonů traf).



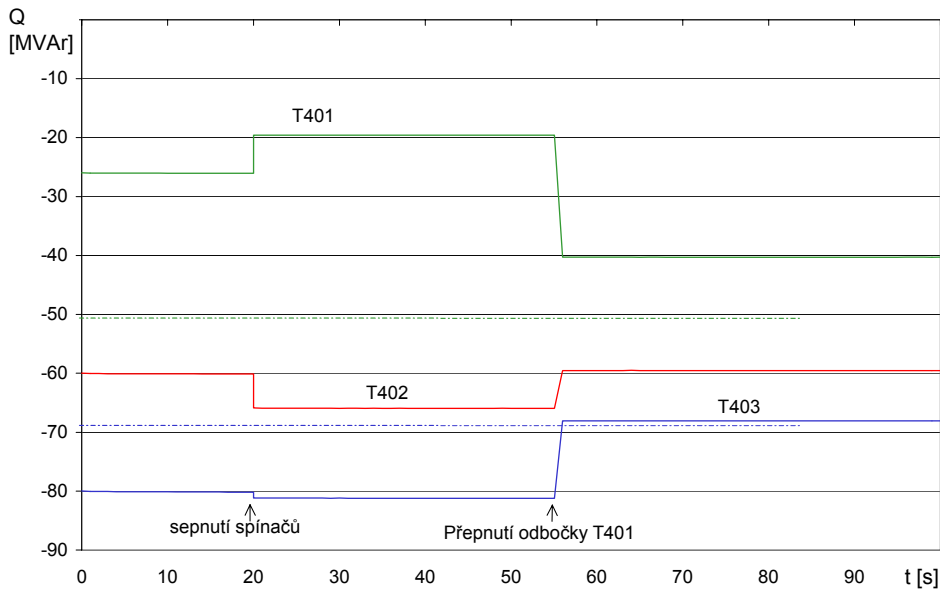
Obr. 9 Schéma modelu pilotního uzlu

Následující obrázky ukazují časové průběhy přechodných dějů po sepnutí tří přípojnic v čase 20 s, kdy transformátory T401, T402 a T403 přejdou do paralelního provozu se stejným napětím u na sekundární straně 110 kV. V okamžiky sepnutí se aktivují externí regulátory, které změni zadané hodnoty napětí (kreslené tenkou čarou) z původní hodnoty 1.08 o hodnotu K_{RTR} . Jelikož pouze u trať T401 bude rozdíl zadané a skutečné hodnoty větší než necitlivost 0.009, dojde jen u tohoto trať k přepnutí odbočky, jak ukazuje zelený tečkovaný průběh převodu trať T401. Převody zbylých trať (kreslené tečkovaně modře a červeně) zůstanou nezměněny:



Obr. 10 Časové průběhy zadaných hodnot a převodů (tečkovaně) trať a napětí na straně 110 kV

Následující obrázek ukazuje časové průběhy jalových výkonů měřených na sekundární straně. Před sepnutím přípojnic tyto výkony odpovídaly odběru zátěže (mají zápornou hodnotu podle konvence, podle které je výkon vytékající z uzlu kladný). Po sepnutí se jalový výkon přerozdělí podle jmenovitého výkonu, uk a převodu jednotlivých trať. To způsobí odlehčení trať T401 a naopak zatížení zbylých dvou. Ideální zatížení (v poměru jmenovitých výkonů) je v obrázku kresleno čerchovaně –zeleně pro trať T401 a T402 s jmenovitým výkonem 250 MVA a modře pro T403 s výkonem 350 MVA. Korekce zadané hodnoty způsobí správně, protože zrovnoměří zatížení T401 a T402 (přiblíží zatížení ideální hodnotě). Zatížení T403 pak bude takřka ideální.



Obr. 11 Časové průběhy toků jalového výkonu

2. UŽIVATELSKÉ ROZHŘANÍ MODMAN

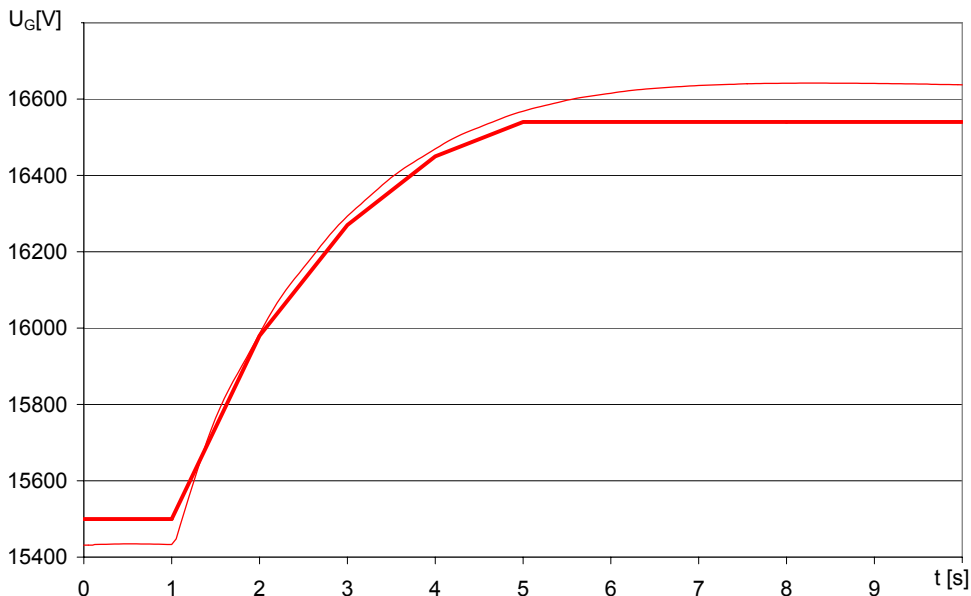
1. V menu **Nástroje** je možno nalézt nový příkaz **Tvorba scénářů**. V případě, že je zadán ve stávajícím scénáři zkrat na vedení po spuštění příkazu se vygeneruje nový scénář, který obsahuje posloupnost zkratů a vypnutí všech vedení, které jsou připojeny do uzlu, v jehož blízkosti byl zkrat zadán. Všechny zkraty se spočítají na jedno spuštění programu MODES (využívá se mechanismus zapamatování stavu soustavy a návrat do tohoto stavu).

3. VERIFIKACE PROGRAMU

Během vývoje a praktického používání dochází k neustálému ověřování správnosti modelů a metod implementovaných v programech MODES. K tomu slouží porovnání výsledků simulačních výpočtů:

- s měřeními
- s výsledky v jiných programech, v [3] jsou např. porovnány průběhy zkratových proudů spočítané programy MODES a ATP.
- se záznamy při systémových poruchách.

Pro verifikaci může být použita (kromě již uvedeného frekvenčního testu) i skoková změna regulační odchylky. Následující obrázek ukazuje měřený (tlustě - převzato z [2]) a simulovaný průběh svorkového napětí při o skoku regulační odchylky o 4%.

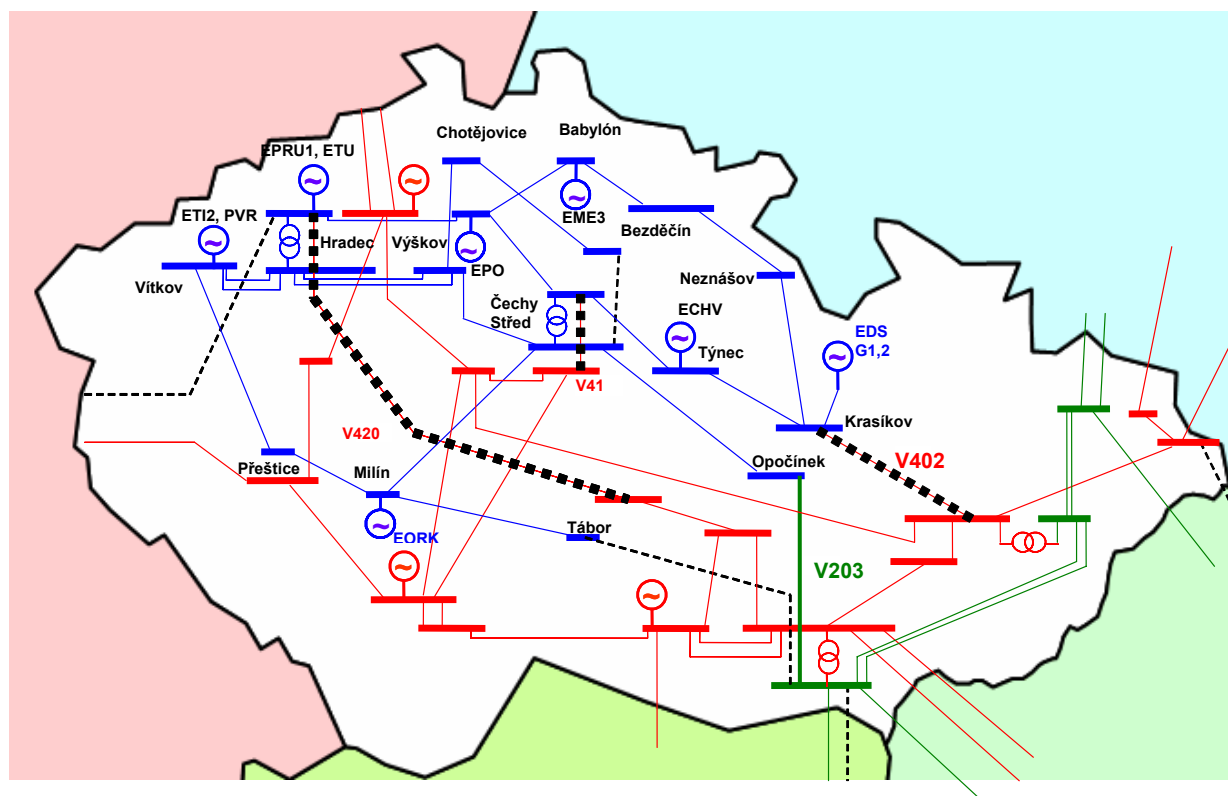


Obr. 12 Časové průběhy svorkového napětí při skokové změně regulační odchylky

Simulační výpočet dobře sleduje začátek přechodného děje, dochází při něm k určitému překyvům, který však není velký.

V loňském roce došlo k řadě velkým systémovým poruch (viz např. [4] a [5]). Síťový simulátor tvoří důležitý prostředek pro analýzu příčin a následků takových poruch. Zároveň může taková analýza sloužit i pro verifikaci použitého dynamického modelu. Ukážeme to na příkladu dvou poruch z 25.7. a 3.8.2006.

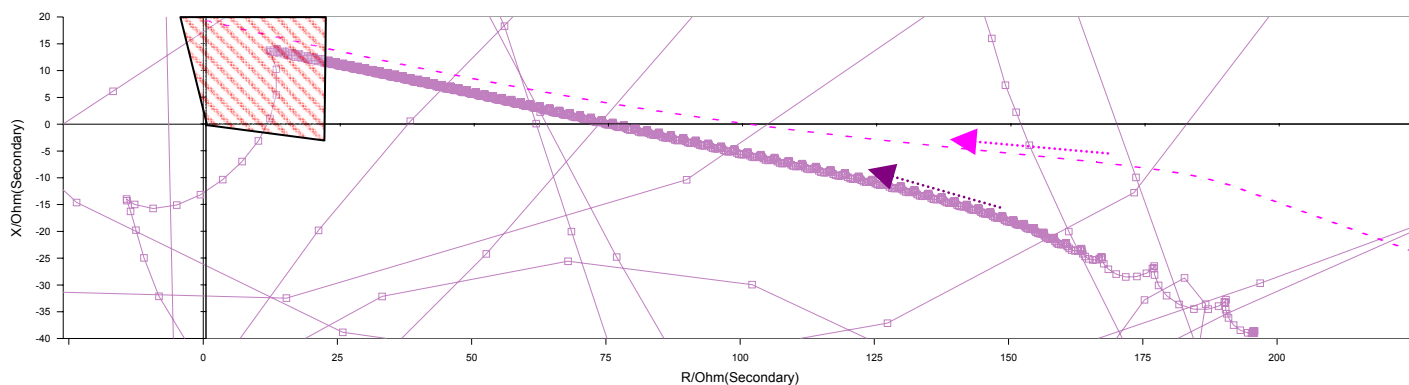
Následující schéma ukazuje situaci v přenosové soustavě 25.7.2006 krátce po poledni , kdy vedení V402, V415 a V420 byla vypnuta pro přetížení a poruchu.



Obr. 13 Schéma přenosové soustavy –stav z 25.7.2006 v 12:07

Po vypnutí vedení V402 zůstala část přenosové soustavy (v obrázku vyznačená modřou) propojena se zbytkem jen jedním vedením V203. Toto vedení během necelé sekundy po výpadku vedení V402 vypnuto ochranami a modrá část přenosové soustavy přešla do ostrovního provozu, čímž se zabránilo šíření poruchy a zachoval se stabilní provoz.

Vypnutí zajistila distanční ochrana měřící zdánlivou impedanci. ukazuje trajektorii zdánlivé impedance měřené v rozvodně Opočíněk.



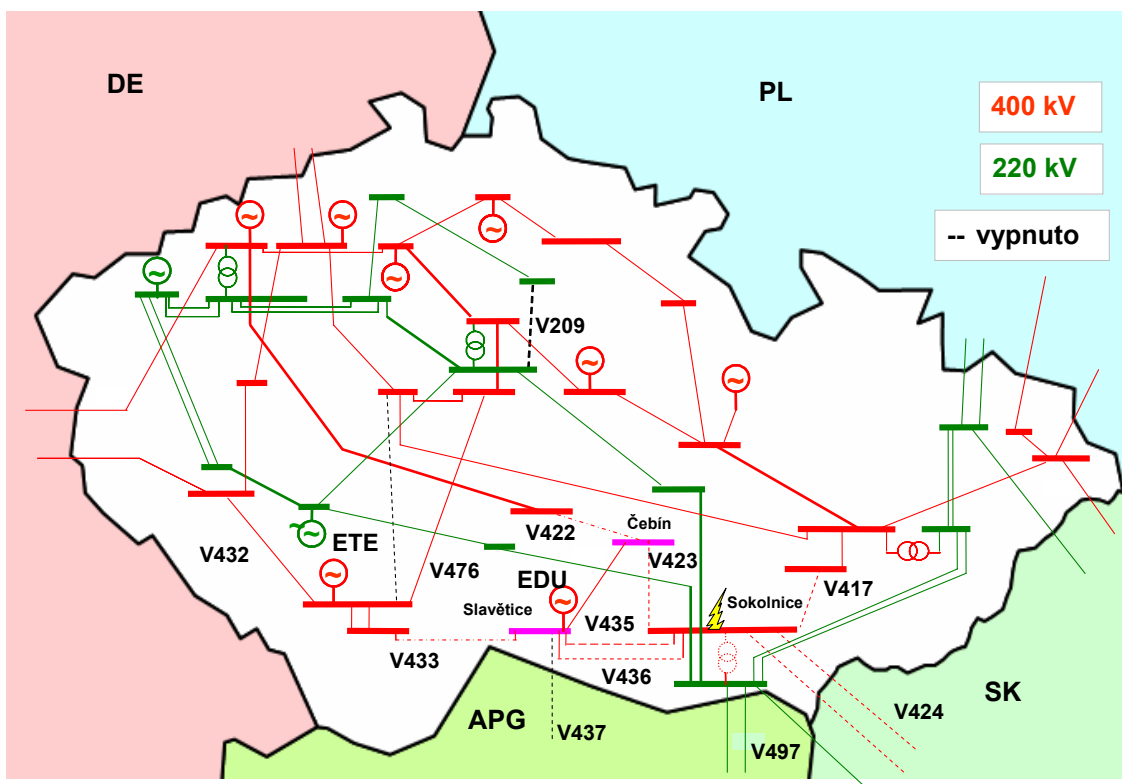
Obr. 14 Porovnání měření a výpočtu zdánlivé impedance vedení V203 v r. Opočíněk

Měřená trajektorie je kreslena tmavější barvou. Koncový bod zdánlivé impedance se v komplexní rovině RX pohybuje ve směru šipky z hodnot s velkým odporem R směrem k ose imaginárních hodnot X. V určitém čase trajektorie proniká do 1.zóny distanční ochrany (její charakteristika je dokreslena v horní části obrázku). Jelikož 1.zóna nemá závoru proti kývání, dává ochrana povel na vypnutí okamžitě, jakmile trajektorie dosáhne hranice charakteristiky. K vypnutí došlo asi 60 ms po překročení hranice 1.zóny, což představuje vlastní dobu vypínače.

Tečkovaně světlejší fialovou je kreslena trajektorie spočítaná simulacním výpočtem na dynamickém modelu. Je vidět dobrá shoda měření se simulací zvláště v okolí nulové reálné složky. Relevantní pro srovnání je hustě trajektorie značkováná čtverečky. Řídce značkováná měřená trajektorie ukazuje kývání po vypnutí vedení.

Je vidět dobrá shoda měřeného a simulovaného průběhu – síťový simulátor je schopen postihnout i činnost distančních ochran měřících zdánlivou impedanci.

Jako další příklad přechodné stability ukážeme chování elektrárenských bloků při zkratu, ke kterému došlo 3.8.2006. Situaci ukazuje následující obrázek:



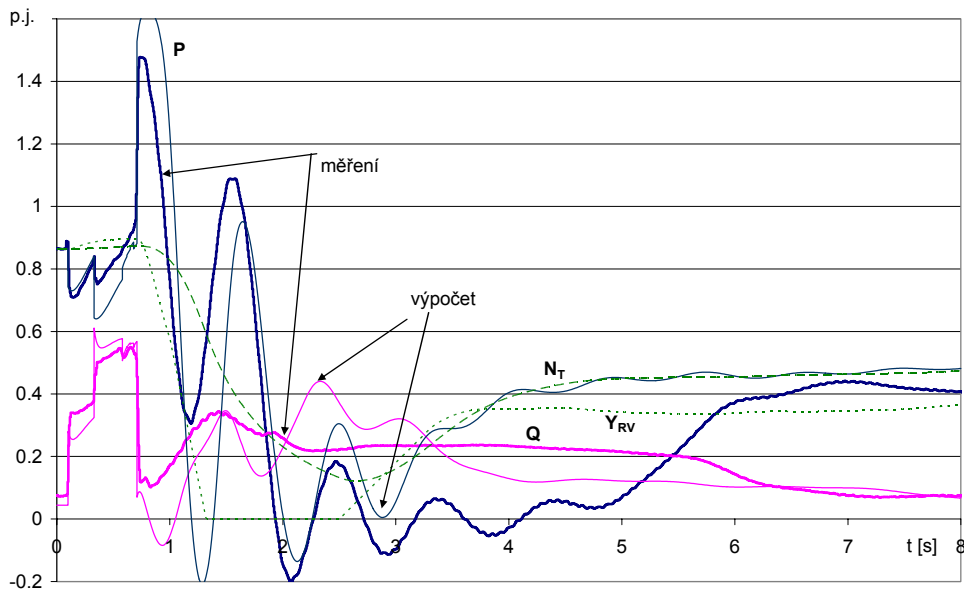
Obr. 15 Schéma poruchy v přenosové soustavě – 3.8.2006 v 14:51

Ke zkratu došlo na přípojnicích rozvodny 400 kV Sokolnice za probíhající dlouhodobé rekonstrukce, kdy není možné provozovat rozdílovou ochranu přípojnic. Jelikož se jednalo o přípojnicový zkrat, vypnuly 2.stupně ochran v delších časech (zkrat na vedení je vypínán 1.stupni v časech kratších než 100 ms) všechna vedení a vazební transformátor připojené do této rozvodny (v obrázku vyznačeno čárkovaně). Porucha měla následující časový průběh (za počátek časové osy budeme pro zjednodušení považovat čas 100 ms před vznikem zkratu) :

1. $t=0.1$ s: dvoufázový zemní zkrat v r. Sokolnice
2. $t=0.32$ s: dvoufázový zemní zkrat v r. Sokolnice se změní na třífázový
3. $t=0.58$ s: distanční ochrany vypínají vedení V417, V435, V436 a transformátor v r. Sokolnice
4. $t=0.62$ s: distanční ochrana vypíná vedení V424
5. $t=0.65$ s: distanční ochrana vypíná vedení V497
6. $t=0.68$ s: distanční ochrana vypíná vedení V423
7. $t=0.71$ s: distanční ochrany vypínají vedení V433 a V422.

Vypnutím vedení V423 v čase $t=0.68$ s byl zkrat eliminován (trval celkově 580 ms) a krátce na to vypnutím vedení V433 a V422 se dostaly rozvodny 400 kV Slavětice a Čebín do ostrovního provozu, jak je v naznačeno fialovou barvou.

Následující obrázek ukazuje porovnání měřených a vypočítaných průběhy činného a jalového výkonu generátoru (P a Q) vzdálenější elektrárny ETE, jejíž výkon byl do zbytku soustavy vyveden dvěma vedeními V432 a V476.

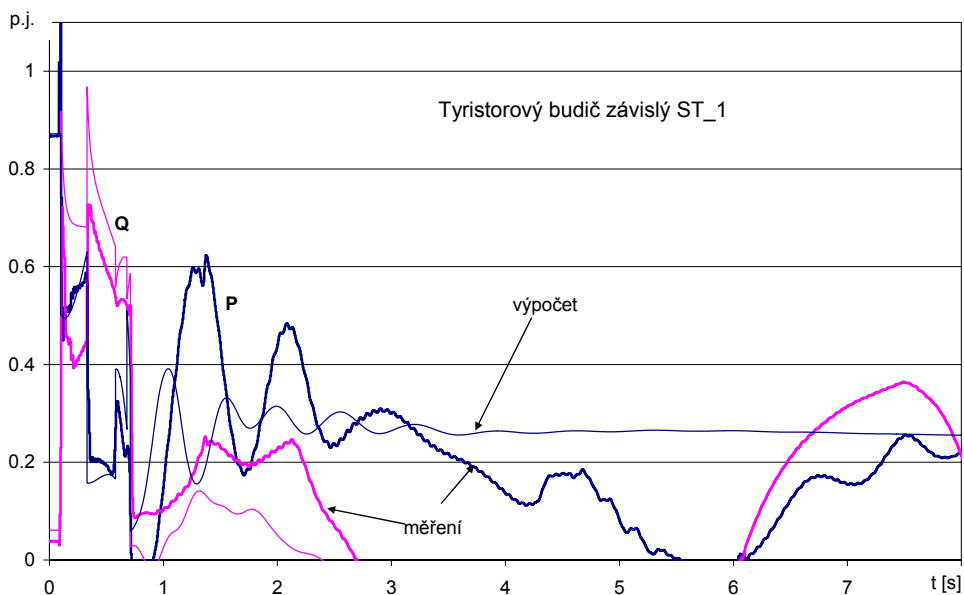


Obr. 16 Porovnání měřených (tučná čára) a vypočítaných průběhů výkonů P a Q

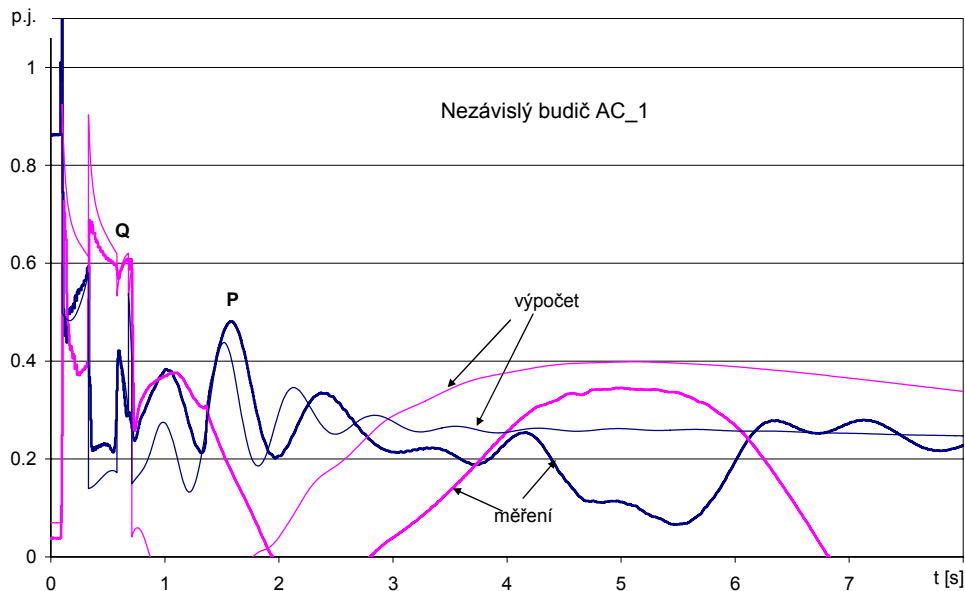
Na první části průběhu (od 0.1 do 0.68 s) jsou patrné vidět jednotlivé komutace v síti (zkraty a vypnutí vedení). Simulační výpočet vcelku věrně reprodukuje měřené průběhy (pro zjednodušení vstupních dat byl počáteční dvoufázový zemní zkrat modelován jako dvoufázový).

Po vypnutí zkratu dojde k stabilnímu kývavému přechodnému ději. Stabilní přechod je umožněn i tím, že v regulačním systému turbíny byl od překročení nastaveného zrychlení rotoru turbíny aktivován tzv. elektrický urychlovač, který způsobil rychlé zavírání regulačních ventilů turbíny (v obrázku je vypočítaný průběh polohy regulačních ventilů kreslen tečkovaně jako proměnná Y_{RV}) a odpovídající snížení výkonu turbíny (v obrázku kresleno čárkovaně jako proměnná N_T).

V poněkud odlišné situaci byla elektrárna EDU, která byla blíže místu poruchy a která se po vypnutí vedení V433 a V422 octla v ostrově. Následující obrázky ukazují porovnání měřených a vypočítaných průběhů činného a jalového výkonu generátoru (P a Q).



Obr. 17 Měřené (tučná čára) a vypočítané průběhů výkonů P a Q pro blok se závislým budičem



Obr. 18 Měření (tučná čára) a vypočítané průběhů výkonů P a Q pro blok s nezávislým budičem

Jsou kresleny průběhy na dvou blocích, z nichž každý měl jiný typ budící soupravy. Závislé buzení je realizováno řízeným tyristorovým můstkem napájeným ze svorkového napětí generátoru. Nezávislé buzení představuje pomocný alternátor (na hřídeli s hlavním generátorem) jehož napětí je usměrněno v neřízeném můstkovém usměrňovači. Více podrobností je uvedeno v [6]

Porovnání měřených a vypočítaných průběhů ukazuje dobrou shodu – síťový simulátor je schopen věrně reprodukovat přechodné děje i u složitých poruch jako jsou zkraty (nesymetrické i symetrické) a přechody do ostrovního provozu.

Dynamický model musí být ověřovaný porovnáním vypočítaných průběhů elektrických a mechanických veličin (např. napětí, proudů, výkonů a otáček) s dostupnými měřeními. Takto prověřený a komplexní model lze pak využít jak pro kontrolu a návrh ochran, tak i pro implementaci v dalších aplikacích, např. v dispečerském trenažéru

Literatura

- [1] K. Máslo : Model a testování ostrovního provozu paroplynového cyklu, sborník III. Mezinárodního vědeckého symposia Elektroenergetika, St.Lesná, září 2005
- [2] Ověření funkce systémového stabilizátoru TG12 v EDU, Technická zpráva ORGREZ z 8.12.2006
- [3] V.Mach, K. Máslo: Model asynchronního generátoru, 7. mezinárodní konference Automatizace energetických procesů, Zlín květen 2006
- [4] K. Máslo: Popis poruch v přenosové soustavě ČR, vzniklých 25. 7. 2006, Energetika č.9/2006
- [5] K. Máslo: Zpráva o systémové poruše v propojení UCTE, k níž došlo 4.11.2006, Energetika č.12/2006
- [6] K. Máslo: Dynamický model ES - použití v dispečerském tréninkovém simulátoru, seminář Aktuální otázky a vybrané problémy řízení ES, Poděbrady listopad 2006