

OSTROVNÍ PROVOZY ELEKTRÁRENSKÝCH TURBOGENERÁTORŮ PŘIPOJENÝCH NA JEDNU SBĚRNICI ELEKTROZVODNY

Island Operations of Electric Generators Connected to One Substation.

Petr Neuman
NEUREG, s.r.o., Praha

Abstrakt

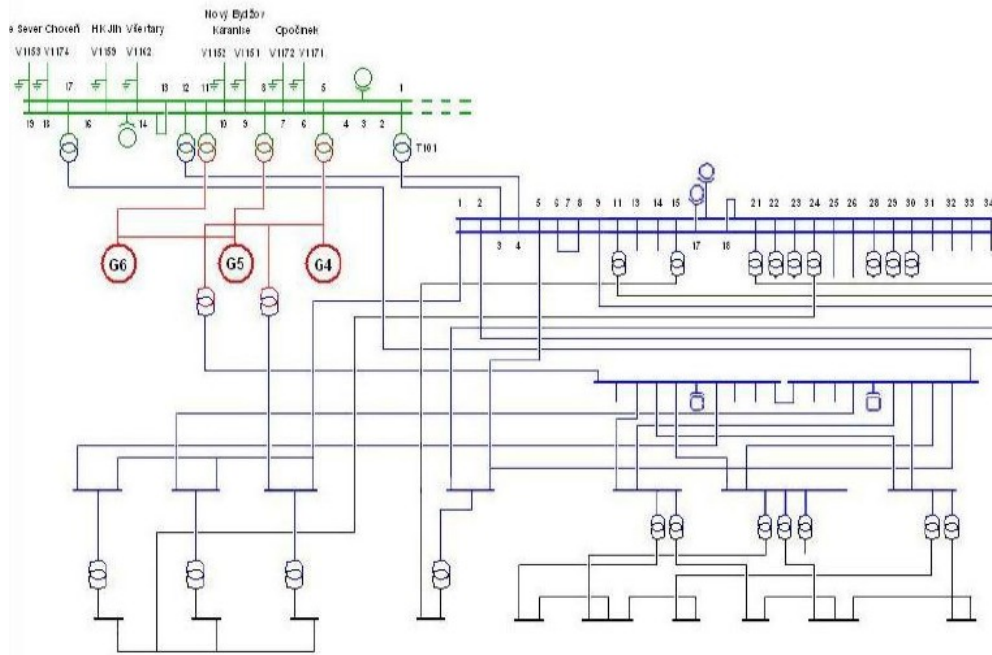
V příspěvku budou nejprve prezentovány simulace odlišných ostrovních provozů elektrárenských turbogenerátorů připojených na jednu sběrnici rozvodny na příkladu teplárny s více paralelně pracujícími synchronními generátory, které jsou připojeny přes jednu elektrorozvodnu do distribuční soustavy. Na simulátoru je instruktorem volena velikost distribuční soustavy do které jsou generátory elektricky připojeny. Pro odlišné ostrovní provozy (jejichž elektrická „tvrdost“ je dána velikostí tzv. výkonového čísla soustavy) budou ukázány výsledky simulací na Operátorském Tréninkovém Simulátoru (OTS) využívaného pro trénink paralelního chodu dvou a více elektrárenských turbogenerátorů / bloků. Obdobný ostrovní provoz víceblokové elektrárny bude projekčně analyzován pro jadernou elektrárnu JETE 1&2. Simulační model je vytvořen v prostředcích MATLAB – SIMULINK. Prezentace přímo navazuje na předcházející autorovy příspěvky přednesené na konferencích Technical Computing v letech 2009 a 2011 [1], [2].

1. Simulace ostrovního provozu na teplárně / elektrárně EOP.

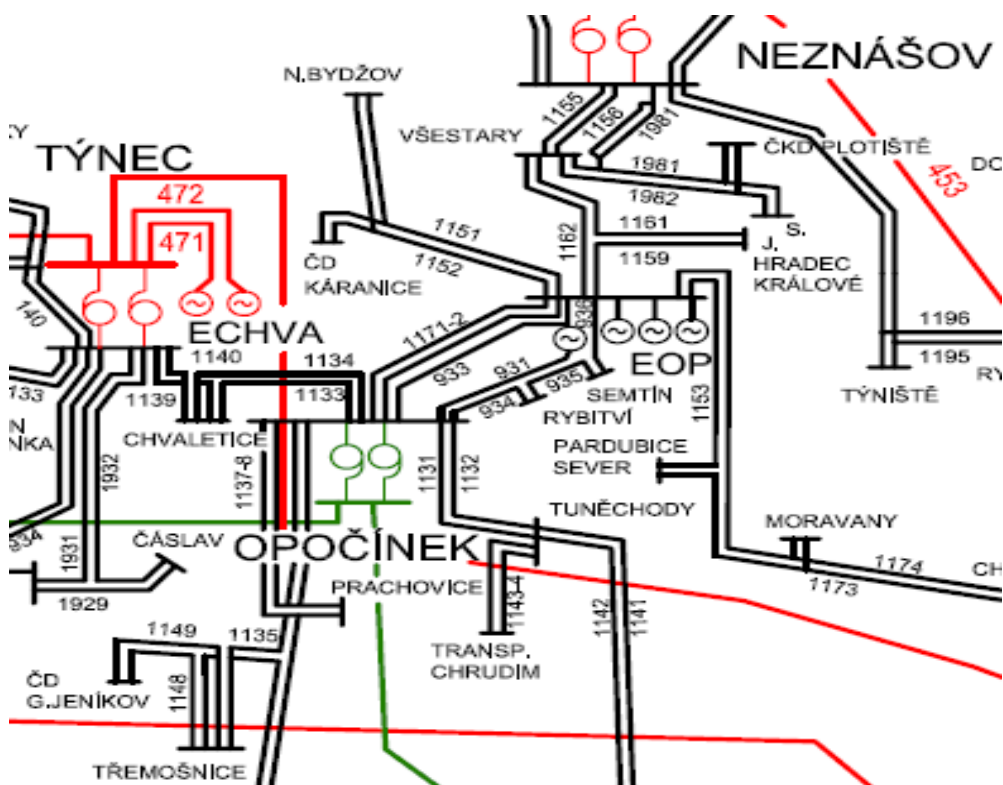
Tréninkové a inženýrské (analytické) Simulátory jsou hlavním nástrojem určeným ke studiu a testování dynamického chování elektrárenských bloků (synchronních generátorů) a elektrických soustav. Je však nezbytné modelovat elektrické části bloků a soustav velmi realisticky a numericky „plnorozsahově“ [12].

Pro získání publikovaných výsledků byl využit Operátorský Tréninkový Simulátor (OTS) elektrárenských rozvodů v režimu ostrovního provozu [10], který byl vyvinut, dodán a uveden do provozu v elektrárně Opatovice (EOP) společností NEUREG, s.r.o.

Pro ilustraci rozsahu modelované elektrárny a distribuční soustavy jsou uvedena následující jednopólová schémata.

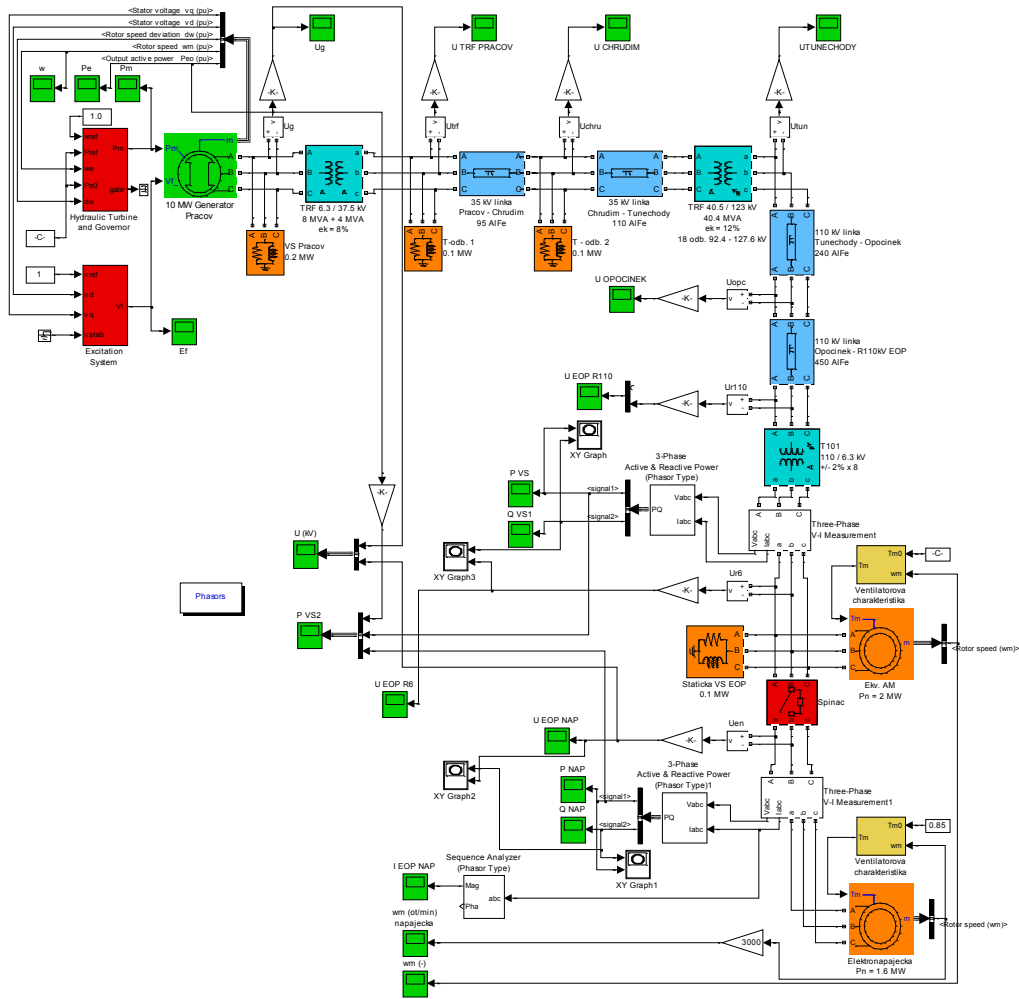


Obr. 1: Jednopolové schéma “poloviny” rozvodny elektrárny EOP

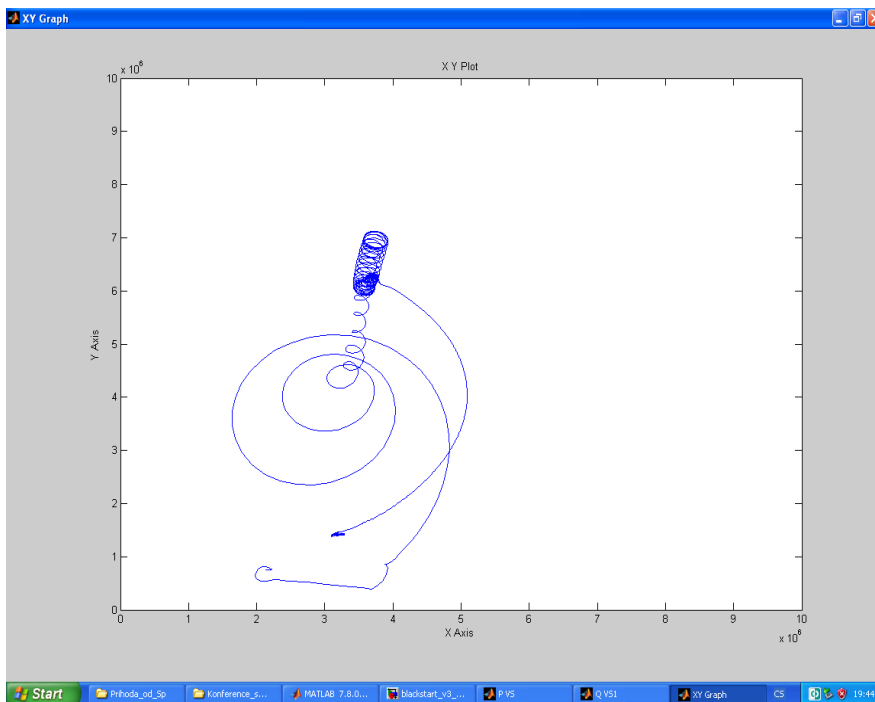


Obr. 2: Jednopolové schéma regionální distribuční soustavy pro simulaci procesu Blackstart.

Z literatury [1] uvádíme pro ilustraci modelování a simulace procesu BlackStart následující schéma.

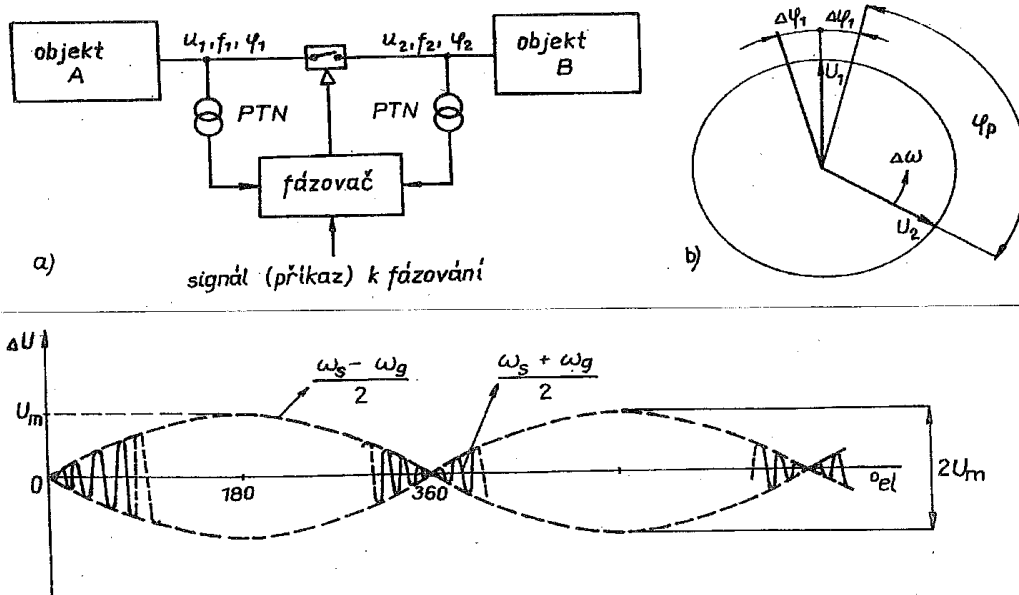


Obr. 3: Model ostrovního provozu VE Práčov – EOP v programu SimPowerSystems



Obr. 4: Charakteristika P-Q vlastní spotřeby 6.3 kV elektrárny EOP

Literatura [2] se zabývala simulací procesu fázování s použitím zařízení SYNCHROTAKT, což velmi úzce souvisí s dnešním hlavním tématem, tedy s realizací ostrovních provozů. Pro připomenutí uvádíme přehledové schéma a ilustrativní operátorskou "obrazovku".



Obr.5: Přehledové schéma fázování

K tréninku fázování se obvykle při stanovení přípustné chyby fáze vychází z požadavku, aby počáteční točivý moment při zapnutí generátoru na síť byl menší než jeho jmenovitý moment. Tomu obvykle odpovídá chyba fáze **8 – 12 °**, stejně jako v provozní praxi.

Z hlediska simulace je nutný realistický model zařízení SYNCHROTAKT, který musí být trojfázový, protože reálné zařízení SYNCHROTAKT má funkci odvozenou z měření dvou fází ze tří, z těch pak je po jejich digitálním zpracování (filtrace, rekonstrukce 1.harmonické 50 Hz) stanoveno rozdílové napětí mezi těmito fázemi, a to na straně obou spínaných objektů.

Z průběhu **rozdílového napětí** se stanoví „rozdíl fázových napětí **dU** (sítě i generátoru)“, ale také rozdíl úhlů **dφ** (je-li $dφ = konst$, jedná se o „**kruhování**“), a rovněž rozdíl frekvencí **df** („**fázování**“).

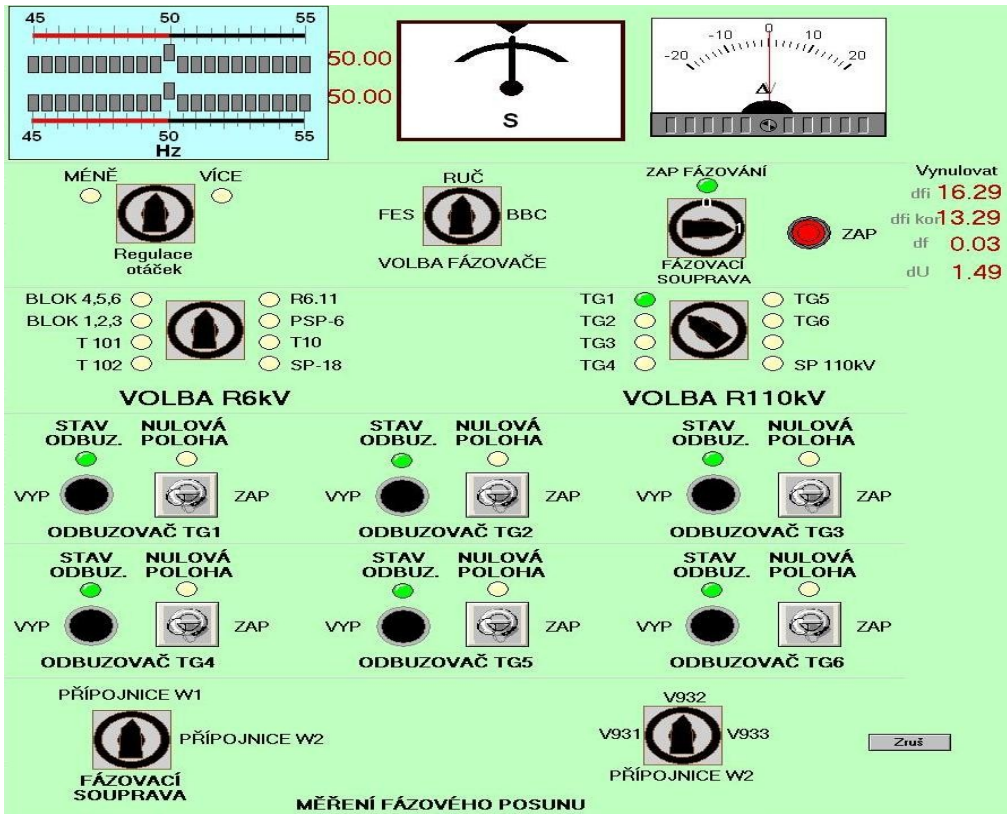
Přes analogové nebo digitální měřáky si dispečer nastavuje a kontroluje podmínky synchronizace“ a následně realizuje fázování / kruhování.

Příklad: Zapínací čas t_z „fázovacího spínače“ zpožďuje zapínací povel. Za čas t_z se vzájemná poloha fázorů U_1 a U_3 změní o úhel

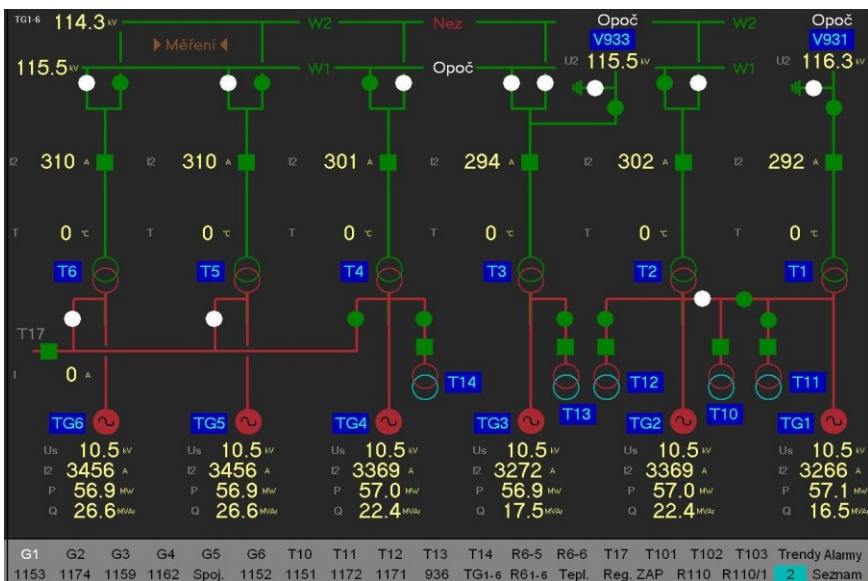
$$f_{ip} = d(\omega) \cdot t_z = 2 \cdot (\pi) \cdot d(f) \cdot t_z \quad (1)$$

- Fázovač musí tedy vyslat zapínací povel s předstihem f_{ip} .
- **SYNCHROTAKT** musí také nastavit kmitočet TG tak, aby **zrychlovací moment vytvářený turbínou**, nabyl přijatelné hodnoty pro fázování.

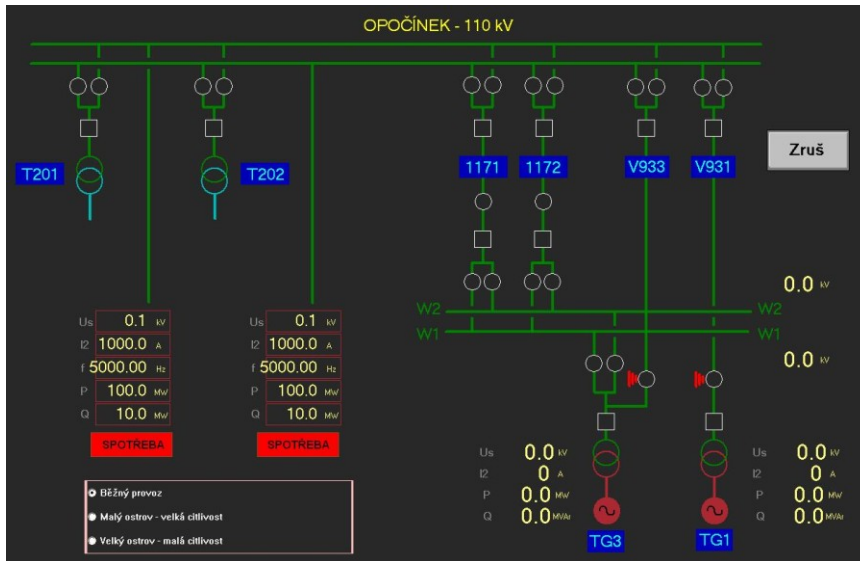
Dynamický náraz při fázování je závislý na velikosti rozdílu kmitočtu a na nedostatku nebo přebytku zrychlovacího momentu turbíny. Pokud by byl zrychlovacího moment větší, může TG přejít přes synchronní stav tak rychle, že s fázování nenastane (okamžitá rychlost bude mít tak velký překmit na přechodové charakteristice, že do oblasti „synchronního stavu“ po překmitu se dostane až po čase delším než je přípustný čas, nastavený na SYNCHROTAKTu).



Obr. 6: Emulace skříně fázování, instruktor – stav „Přifázováno“



Obr. 7: Obrazovny SCADA šesti elektrických synchronních generátorů



Obr.8: Obrazovny SCADA s volbou velikosti distribuční sítě

Legenda obrázku 8:

Běžný provoz, tj. s nekonečně velkou sítí = Infinite Power Grid

Malý ostrov = Small Power Grid

Velký ostrov (střední) = Intermediate Power Grid

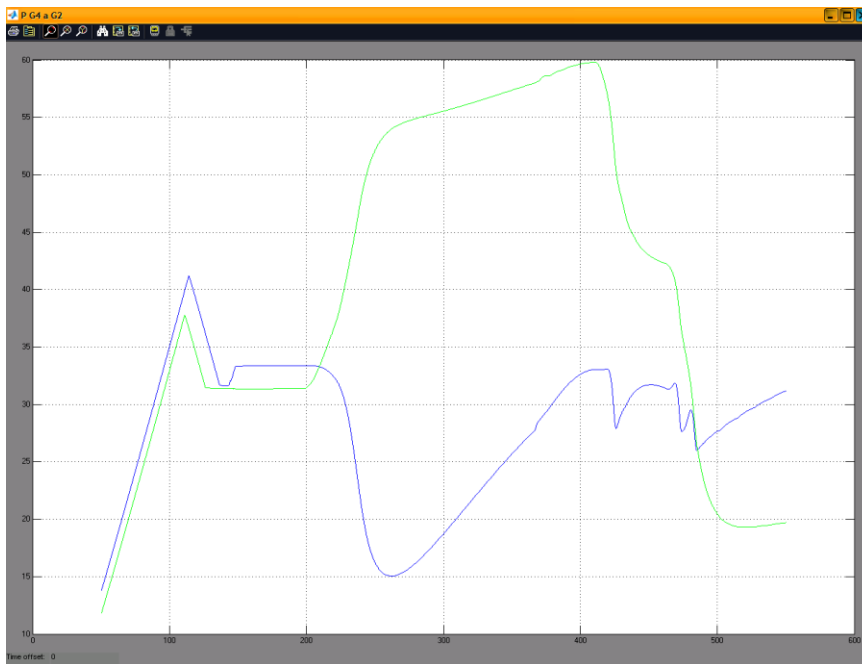
2. Simulátory konvenčních (fosilních) elektráren a tepláren.

Nyní uvedeme několik časových průběhů veličin u generátorů G2 a G4, které jsou připojeny na jednu elektrickou přípojnicí W1.

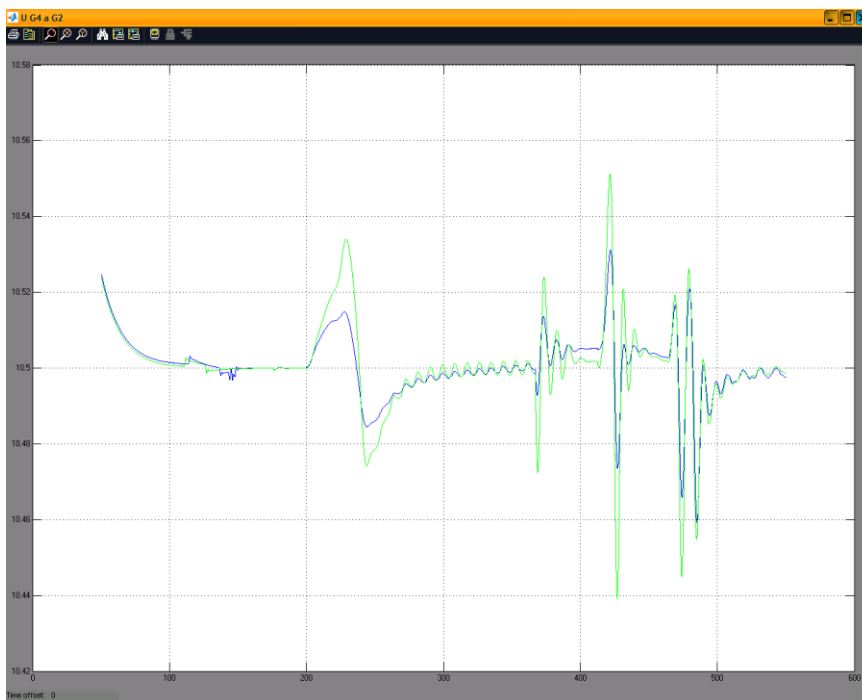
Jak již bylo řečeno, jedná se o uhelnou teplárnu EOP (6 x 60 = 360 MWe), která je však i dodavatelem PpS pro provozovatele přenosové soustavy ČEPS, a plní tedy funkci systémové elektrárny pro plnění systémových (SyS) a podpůrných (PpS), stejně jako velké jaderné elektrárny (JETE – 2 x 1080 = 2160 MWe, FA3 EPR – 1 x 1700 MWe).

Legenda k následujícím časovým průběhům na obrázcích 9. až 12.

v čase 115 sekund	změna výkonu (blok G2 - zelená, blok G4 - modrá)
do času 115 sekund	generátory připojeny do nekonečně tvrdé soustavy (Infinite Power Grid)
po čase 200 sekund	změna na střední velikost (Intermediate Power Grid – rozvodna Opoč)
v čase 360 sekund	změna na malou soustavu (Small Power Grid – rozvodna Opočinek)



Obr.9: Časové průběhy činného výkonu generátorů G2 a G4 (změny v čase 115, 200, 360 s)



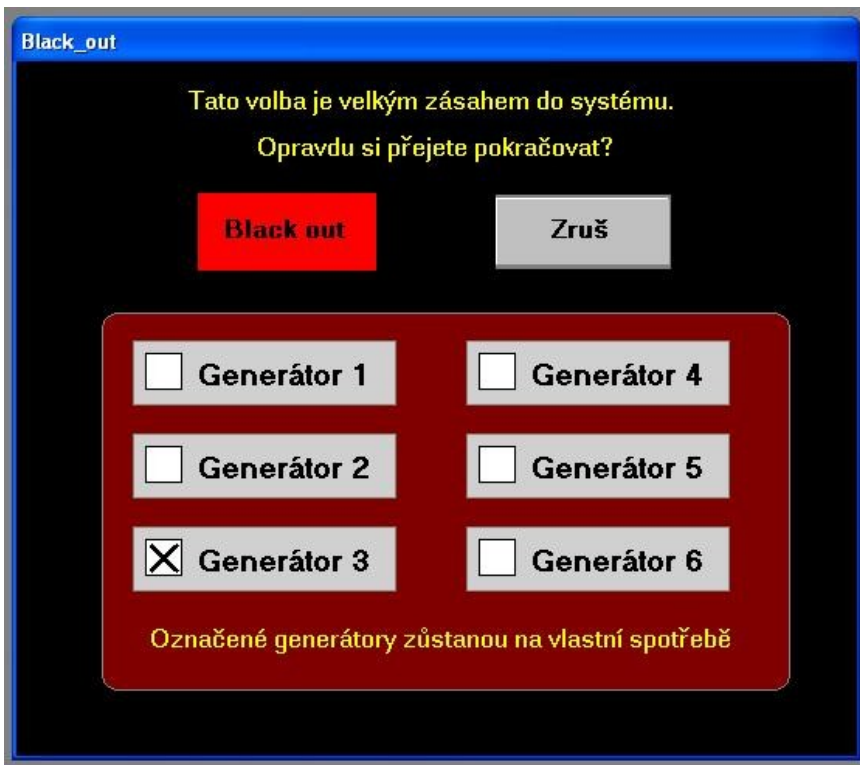
Obr.10: Časové průběhy napětí generátorů G2 a G4 (změny v čase 115, 200, 360 s)



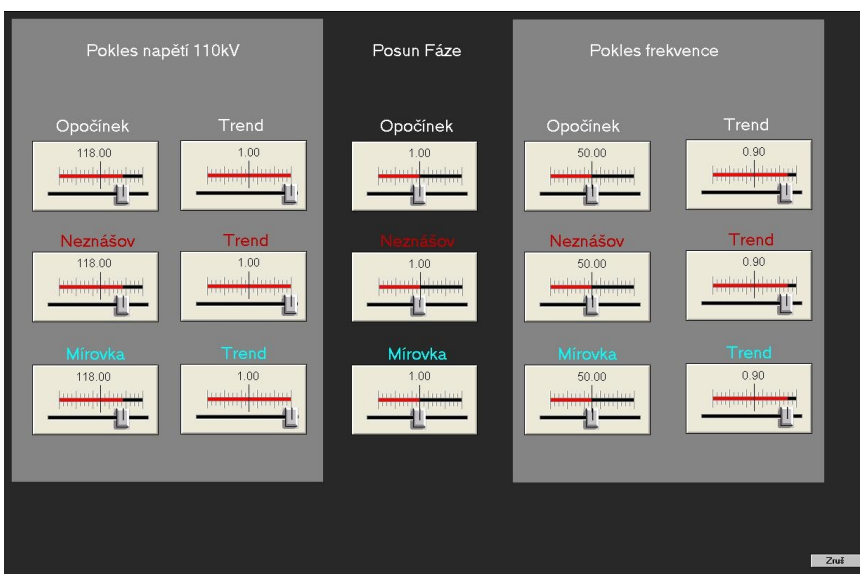
Obr. 11: Časové průběhy otáček generátoru G4 (změny v čase 115, 200, 360 s)



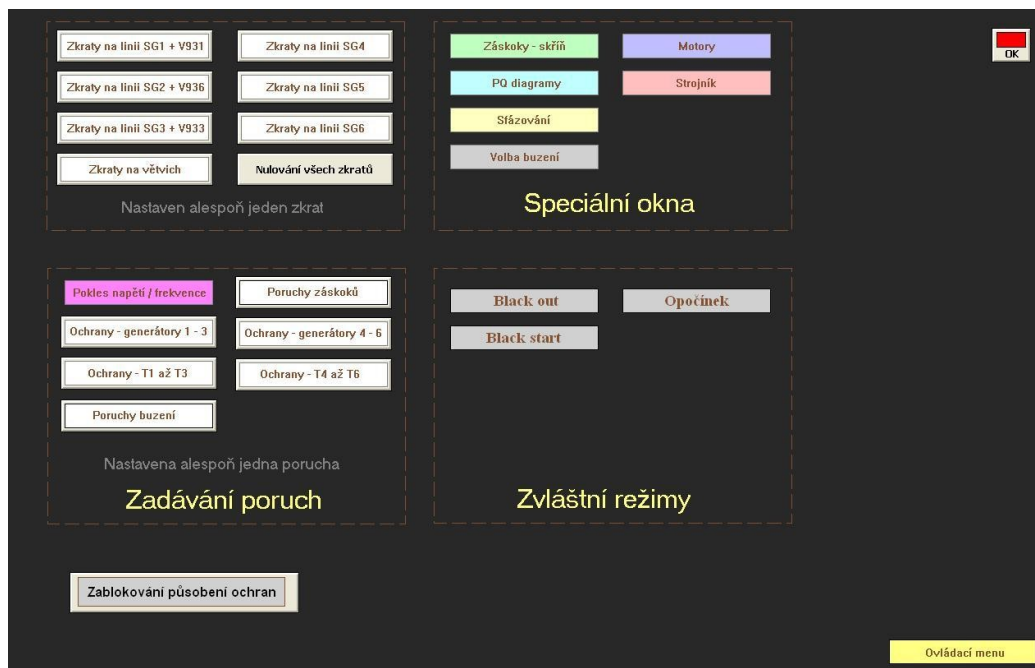
Obr. 12: Časové průběhy otáček generátoru G2 (změny v čase 115, 200, 360 s)



Obr. 13: Ovládací obrazovka pro BlackOut



Obr. 14: Instruktorová ovládací obrazovka pro změny na rozvodnách OPOČ, NEZ, MÍR (napětí, fázový úhel, frekvence)



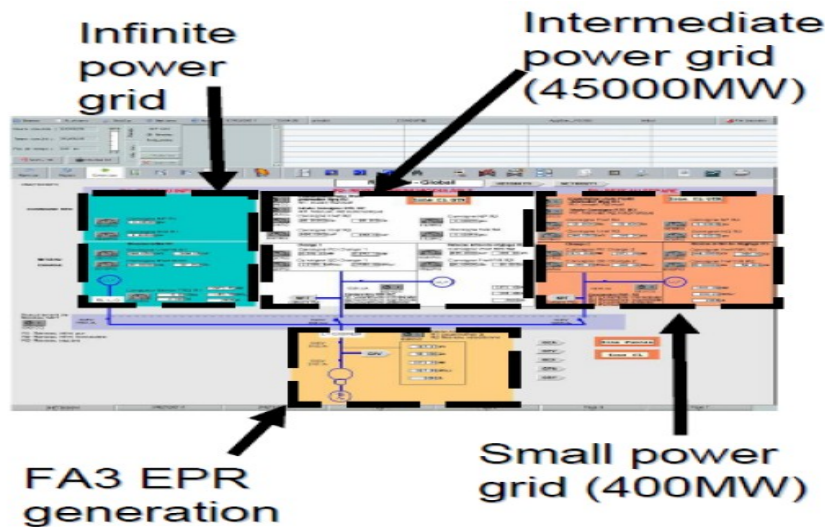
Obr. 15: Instruktorová ovládací obrazovka pro zadávání poruch a režimů (volba zkratů a působení ochran, poruchy, BlackOut - BlackStart)

3. Simulátory jaderných elektráren

3.1. Projekt v zahraničí.

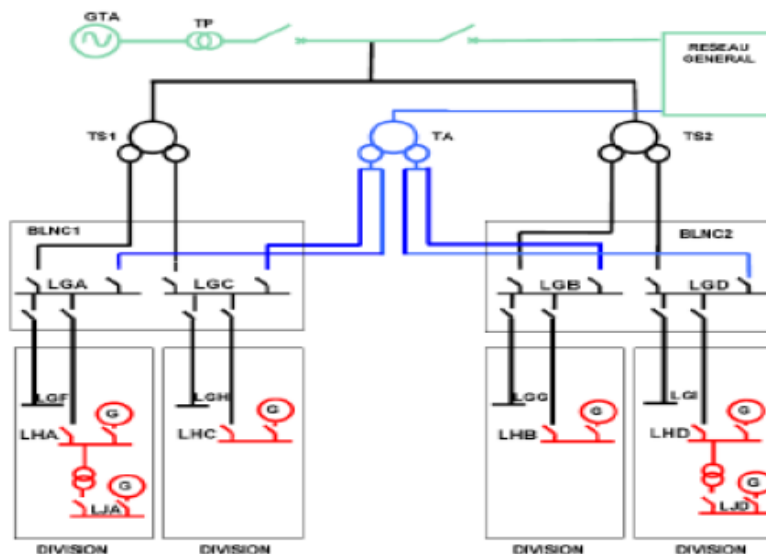
V oblasti simulátorů a trenažerů Jaderných elektráren je pokrok největší a někdy ani ne vynucený platnou legislativou – viz následující příklad z Francie (na rozdíl od Česka, kde se realizuje pouze to, co je legislativou a platnými předpisy přímo vyžadováno).

Následující obrázek ukazuje obrazovku **Tréninkového simulátoru jaderné elektrárny FA3 EPR**, kde instruktor může zvolit velikost elektrické sítě do které je elektrická energie vyvedena. Tréninkový simulátor francouzské JE Flamanville FA3 EPR, kde instruktor může vybrat velikost soustavy Small Power Grid (400 MW), nebo Intermediate Power Grid (45000 MW), nebo Infinitive Power Grid, nekonečně tvrdou soustavu [11].



Obr.16: Grafický výstup pro volbu dynamického modelu elektrické soustavy

Simulator FA3 EPR modeluje všechny scénáře ztráty napětí až do úplného Blackoutu a kompletní najetí - Blackstart. Jsou tam modelovány Externí síť, Hlavní generátor, Nouzová externí síť, Havarijní dieselgenerátory, Nouzové dieselové motory a baterie pro celý čas výpadku.



Obr.17: Realistické scénáře elektrických rozvodů

K obrázku 1. lze dodat, že velikosti ostrovů pro elektrárnu EOP (120; 3000; ∞ [MW]) jsou pochopitelně menší než pro jadernou elektrárnu Flamanville FA3 EPR (400; 45000; ∞ [MW]).

Rozsah modelování jednoho bloku JE je dán platnými normami pro jadernou energetiku, ale pro realizaci pokročilého inteligentního (Smart) Simulátoru je takové modelování nedostatečné. Simulátor striktně dodržující normy nemůže třeba simulovat paralelní provoz více generátorů připojených do jedné sběrnice rozvodny. Proto takové simulace nejsou realistické pro ostrovní provoz více zdrojů energie – energetických bloků.

3.2. Trénink operátorů jaderné elektrárny JETE

Operátoři „sekundáru“ bloků 1 a 2 jaderné elektrárny JETE by potřebovali **Analytický (Generický) Simulátor**, na kterém by mohli trénovat řízení malého ostrovního provozu (**600 MW - Small Power Grid**) dvou TG1 a TG2 připojených do jedné rozvodny. K tomu by stačil model dvou turbogenerátorů se zjednodušeným (generickým) modelem primární části. Není nutný model dvou kompletních bloků včetně detailního plnorozsahového modelu „primární“ jaderné části – jaderného reaktoru.

Příkladem pro simulaci je stav, kdy oba bloky mají stejný výkon:

B1 ... 300 MW

B2 ... 300 MW

Blok B1 zvýší výkon o 350 MW a sleduje se jednak dynamická odezva bloku B2 a také „chování operátora sekundární části bloku“

Pro ilustraci výkonových rozsahů bloku JETE a velikosti soustavy do které jsou bloky připojeny uvádím následující:

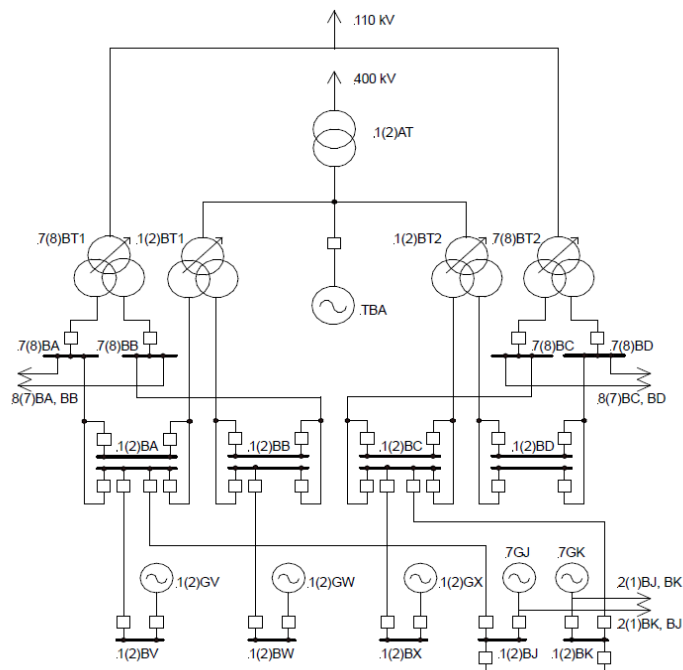
Vlastní spotřeba ... 90 – 100 MW

Provozní rozsah ... 100 – 1000 MW

Provozní režimy: BlackOut, BlackStart –
 BlackStart Station – Own Consumption Grid (200 MW),
 Island Operation - Small Power Grid (200 – 600 MW),
 Intermediate Power Grid (2.000 – 10.000 MW)
 Infinite Power Grid (celá soustava ENTSO-E, ∞ [MW]),

Obecně změna výstupu bloku cca o 300 MW.

Regulace frekvence a činných výkonů "faP", regulace napětí a jalových výkonů "U a Q". Sledování dynamických jevů "houpání výkonu a frekvence" při paralelním provozu více turbogenerátorů (bloků 1, 2; po dostavbě JETE bloků 1,2, a bloku 3 nebo 4)
 Simulace těchto jevů vyžaduje detailní modelování synchronních generátorů a vyvedení elektrického výkonu do připojené přenosové soustavy.



Obr. 18: Jednopolové schéma elektrické rozvodny bloků JETE 1 & 2

3.2.1. Možnosti a podmínky simulace zkoumaných dynamických jevů.

Simulátor JETE blok 1.

HW a SW konfigurace: operační systém **LINUX**, servery simulátoru **SGI Altix 450**, původní pracovní stanice SGI Indigo 2 nahrazeny standardními **PC s procesory Intel**

Integrační krok numerických výpočtů na stávajícím simulátoru $T_{int} = 80$ [ms],

Tedy „simulační výpočtový bod“ /počet vzorků v poměru k periodě/, (svb): 1 x za 4 [ot]

[pomocný výpočet ... $T_{int} : T_{per} = 80 : 20 = 4$,... tzn. pouze 0.25 vzorku na periodu],

tzn. možnost **reálné simulace pouze jevů s frekvencí do velikosti $f=0.625$ Hz**

[pomocný výpočet ... $1000 : (80 \times 20) = 0.625$],

Při předpokladu nutnosti 20 vzorků na jednu periodu, tzn. svb: 20 x za 1 [ot] pro simulaci změny síťové frekvence $f=50$ Hz by bylo nutné vzorkovat s krokem 1 [ms].

[pomocný výpočet: integrační krok $T_{int} = 20 : 20$]

Nastavení **Systémového stabilizátoru PSS**, jehož účelem je tlumit nízkofrekvenční kývání rotoru SG, odpovídá rozdělení elektromechanického kývání do tří kategorií:

- 1.Mezioblastní (odlehle oblasti ES) Typické pásmo 0.2 – 0.5 Hz
- 2.Místní kmity Typické pásmo 0.7 – 2.0 Hz
- 3.Kmitání mezi jednotlivými stroji Typické pásmo 1.5 – 3.0 Hz

Simulátor JETE tedy neodsimuluje kmity ad 3., částečně kmity ad 2. ($0.625 \neq 0.7$), a vůbec ne kmity ad 1. !!!.

Frekvenční ($f= 50$ Hz) modelování a simulace synchronních generátorů (zejména třífázová) s reálným systémem buzení jsou **nestabilní** (problémy s numerickou stabilitou výpočtu)!

4. Závěry

Tréninkové a inženýrské (analytické) simulátory umožňují provádět simulační testy složitých provozních režimů, které není možné provádět v reálném provozu. Pouze na jaderné elektrárně Černobyl to operátoři bloku zkusili (ale jen jednou).

1. námět pro autora i HUMUSOFT:

Pokud by se model JE s dvěma a více bloky realizoval v prostředí „MATLAB–SIMULINK–(SimPowerSystems)“ bylo by řešením rozdělit rozsáhlý model na více submodelů a submodel „elektro“ simulovat s výrazně kratší periodou vzorkování?

Například submodel „výparník - parní buben – parní generátor“ simuluje pomalé tepelné jevy, i když zase dvoufázově (tři zákony zachování = first principles, každý dvoufázově), tzn. 6ti rovnicový model. Při zjednodušení tím, že rovnice hybnosti směsi kapaliny a páry řeší jejich separaci „drift-flux“ modelem, počítáme s 5ti rovnicovým model.

2. námět pro autora i HUMUSOFT:

Submodel „výparník - parní buben – parní generátor“ realizovat v prostředí COMSOL-Multifysics?

Literatura

- [1] Neuman, P. a kol. BlackStart jako zvláštní případ ostrovního provozu. 17. ročník konference TECHNICAL COMPUTING Prague 2009.
- [2] Neuman, P. Možnosti simulace zařízení SYNCHROTAKT u trenažerů elektráren a elektrárenských soustav. 19. ročník konference TECHNICAL COMPUTING Prague 2011.
- [3] Hlaváč, J.. Budící souprava PRISMIC A50, 71.25 MVA. BRUSH SEM, Plzeň, 2006.
- [4] Neuman, P.: Dynamické modely TG a soustav (rozvodny, distribuční a přenosové soustavy) pro DTS. Odborný seminář Aktuální otázky a vybrané problémy řízení elektrizační soustavy, 11. ročník PODĚBRADY 2006.
- [5] Neuman, P.: Dispečerské trenažéry pro trénink manipulací v kritických stavech elektrizační soustavy. Odborný seminář 12. ročník PODĚBRADY 2007.
- [6] Neuman, P. Dynamic models for simulation of power system in the states close critical for analysis and training of dispatchers. Cyklus E2007, Prague, 2007.
- [7] Neuman, P., et. al. BlackStart as a special case of island operation. 14th International Energy Conference PODEBRADY, Poděbrady, Czech Republic, 2009/a.
- [8] Neuman, P., et. al. Simulation of electromechanical and electromagnetic transients as Ancillary Services of BlackStart. Int. Conference ELEKTROENERGETIKA 2009, Stará Lesná, Slovakia, 2009/b.
- [9] Neuman, P. Models of synchronous generator and transformers for dispatch training simulators and real time digital simulators. In Proceedings of IFAC Symp. on Control of Power Systems and Power Plants, Tampere, Finland, 2009.
- [10] Neuman, P. Power Plants and Boilers Models for Operator Training Simulators. In Proceedings of IFAC World Congress, Milan, Italy, 2011.
- [11] Neuman, P. Smart Grid methods of Transmission System Operators for improved Power System Control. In Proceedings of IFAC World Congress, Milan, Italy, 2011.
- [12] Neuman, P. (2012a). Power Plant and Turbogenerator models for Engineering and Training Simulators. In Proceedings of IFAC Symp. on Control of Power Systems and Power Plants, Toulouse, France, 2012/a.
- [13] Neuman, P. Dispečerské trenažéry a síťové simulátory pro SMART elektrizační soustavy. Odborný seminář 17. ročník PODĚBRADY 2012/b.
- [14] Neuman, P. Smart Grid applications for improved Power System Control. In Proceedings of IFAC Symp. on Control of Power Systems and Power Plants, Toulouse, France, 2012/c.
- [15] Neuman, P. Požadavky na tréninkové simulátory (DTS/OTS) – společný trénink provozovatelů elektrizačních soustav (PPS, PDS) a operátorů elektráren (jaderných, paroplynových, uhelných) / Requirements for Training Simulators (DTS/OTS) – joint team Training of TSO, DSO and Power Plant Operators (Nuclear, Combine Cycle, Coal-fired). Odborný seminář 18. ročník PODĚBRADY 2013.
- [16] Neuman, P. a M. Hladík (2013). Rozvoj jaderné energetiky, krátkodobý do roku 2030 a dlouhodobý do roku 2050. Odborný seminář 18. ročník PODĚBRADY 2013.
- [17] Neuman, P. a M. Hladík. Rozvoj jaderné energetiky, krátkodobý do roku 2030 a dlouhodobý do roku 2050. Odborný seminář 18. ročník PODĚBRADY 2013.
- [18] Schrupf, L. Plnorozsahové simulátory pro výcvik operativního personálu energetických bloků. Odborný seminář 12. ročník PODĚBRADY 2007.

Petr Neuman
Studnická 2128/27
Horní Počernice
193 00 Praha
Tel.: +420 777 648 906
E-mail: neumanp@volny.cz