

**Vedecká rada Fakulty elektrotechniky a informatiky  
Slovenskej technickej univerzity v Bratislave**

**Ing. Martin Ernek**

**RIADENIE KRÍZOVÝCH STAVOV ES**

**Autoreferát k dizertačnej práci**

na získanie vedecko-akademickej hodnosti  
**philosophiae doctor**

v odbore doktorandského štúdia:  
**9.2.7 Kybernetika**

Bratislava 2013

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Ústave riadenia a priemyselnej informatiky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

*Predkladateľ:* Ing. Martin Ernek  
Ústav riadenia a priemyselnej informatiky  
Fakulta Elektrotechniky a informatiky, STU v Bratislave  
Ilkovičova 3, Bratislava

*Školiteľ:* prof. Ing. Ján Murgaš PhD.  
Ústav riadenia a priemyselnej informatiky  
Fakulta Elektrotechniky a informatiky, STU v Bratislave  
Ilkovičova 3, Bratislava

*Oponenti:* doc. Ing. Anton Beláň, PhD.  
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky  
Fakulta Elektrotechniky a informatiky, STU v Bratislave  
Ilkovičova 3, Bratislava

prof. Ing. Juraj Altus, PhD.  
Katedra výkonových elektrotechnických systémov  
Elektrotechnická fakulta, Žilinská univerzita v Žiline  
Univerzitná 1, Žilina

Autoreferát bol rozoslaný dňa: .....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná .....  
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia, vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie dňa ....., číslo odboru 9.2.7, odbor doktorandského štúdia: Kybernetika na ústave riadenia a priemyselnej informatiky Fakulty elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19, Bratislava

*Predseda spoločnej odborovej komisie:*

.....

Ústav riadenia a priemyselnej informatiky  
Fakulta Elektrotechniky a informatiky, STU v Bratislave  
Ilkovičova 3, Bratislava

## **Názov**

Riadenie Krízových Stavov Elektrizácie sústavy

## **Anotácia**

Jedným z často diskutovaných krízových stavov elektrizačnej sústavy je ostrovná prevádzka. Zmeny vo výrobe a zaťažení v elektrizačnej sústave majú za následok zmenu frekvencie. Dominantný vplyv na reguláciu frekvencie majú štruktúry regulátorov pre riadenie turbín. Z uvedeného dôvodu sa práca zaoberá vytvorením riadenia frekvencie v ostrovej prevádzke elektrizačnej sústavy. Cieľom práce je vytvorenie riadenia frekvencie, ktoré bude spĺňať energetické a matematické požiadavky na stabilitu a kvalitu regulácie.

## **Kľúčové slová**

elektrizačná sústava, riadenie frekvencie, ostrovná prevádzka, späťoväzobná linearizácia

## **Title**

Control of emergency states in power systems

## **Abstract**

One of the most discussed crisis state of power system is island operation. Changes of power and load balance in power system result in frequency deviations. Structures of turbine controllers have dominant impact on frequency control. The aim of this study is to design a new controller type of frequency in island operation in power system, which will satisfy the energy policies and mathematic conditions on stability and quality of control.

## **Keywords**

power system, frequency control, island operation, feedback linearization

## Obsah

1.	Úvod.....	6
2.	Systém riadenia Elektrizáciej Sústavy (ES) .....	7
2.1.	Model ES.....	7
2.1.1.	Model Synchronného generátora.....	8
2.1.2.	Modelovanie turbín .....	9
2.1.3.	Vodné turbíny..... <b>Chyba! Záložka nie je definovaná.</b>	
2.1.4.	Model elektrizačnej sústavy .....	11
2.2.	Stabilita ES.....	13
2.2.1.	Stabilita ES podľa uhla natočenia rotora, resp. záťažového uhla	14
2.2.2.	Napäťová stabilita ES .....	14
2.2.3.	Frekvenčná stabilita.....	14
2.2.4.	Frekvenčný plán a obranný plán proti šíreniu veľkých porúch v ESSR .....	14
2.2.5.	Porucha typu blackout .....	18
2.2.6.	Ostrovná prevádzka .....	19
2.2.7.	Metódy riadenia nelineárnych systémov .....	20
3.	Simulačný model ES .....	23
3.1.	Model ES pre simuláciu ostrovej prevádzky.....	23
3.1.1.	Schéma siete .....	<b>Chyba! Záložka nie je definovaná.</b>
4.	Riadenie výkonu a frekvencie P/f v ostrovej prevádzke .....	24
4.1.1.	Dôkaz stability centrálného nelineárneho regulátora frekvencie pomocou priamej metódy Lyapunova .....	25
4.1.2.	Návrh a popis schémy centrálného nelineárneho regulátora	26
4.1.3.	Premenné zastúpené v centrálnom nelineárnom regulátore	26
4.1.4.	Výstup centrálného nelineárneho regulátora .....	27
4.2.	Nelineárne riadenie mechanického výkonu vodných turbín .....	27
4.2.1.	Odvodenie nelineárneho regulátora prietoku pomocou metódy vstupno-výstupnej spätnoväzobnej linearizácie s uvažovaním vplyvu všetkých stavov systému .....	28
4.2.2.	Dôkaz stability nelineárneho regulátora prietoku s uvažovaním vplyvu všetkých stavov systému pomocou priamej metódy Lyapunova.....	29
4.2.3.	Simulačné overenie vlastností nelineárneho regulátora prietoku s uvažovaním vplyvu všetkých stavov systému a optimalizácia jeho parametrov.. <b>Chyba! Záložka nie je definovaná.</b>	
5.	Overenie regulačných vlastností centralizovaného regulátora ostrovej prevádzky .....	29

5.1.	Experiment 1 - Porovnanie vlastností regulácie .....	29
5.2.	Experiment 4 - Výpadok paroplynového zdroja v ostrovej prevádzke s vplyvom FO .....	32
5.3.	Experiment 7 - Vzorkovanie vstupných signálov centralizovaného regulátora ostrovej prevádzky s periódou 1s.....	33
5.4.	Experiment 10 – Prelievanie výkonu z EGA do EMO.....	<b>Chyba!</b>
	<b>Záložka nie je definovaná.</b>	
6.	Záver .....	34
	Zoznam literatúry: .....	38

## 1. Úvod

Riadenie krízových stavov elektrizačnej sústavy je v posledných rokoch čoraz väčším predmetom pre diskusie odbornej verejnosti, hlavne po rozsiahlych poruchách typu blackout. Takáto porucha znamená úplný alebo čiastočný rozpad elektrizačnej sústavy. Pre potlačenie vplyvu tejto nebezpečnej poruchy majú prevádzkovatelia elektrizačných sústav vypracované obranné plány. Veľmi častým dôsledkom rozsiahlych porúch je oddelenie elektrizačnej sústavy od prepojeného systému. V takomto prípade je v oddelenej elektrizačnej sústave vyhlásený stav ostrovnej prevádzky a je potrebné obnoviť jej prevádzku a prepojenie so systémom. Prevádzkovatelia môžu pre potreby ostrovnej prevádzky požadovať špeciálne riadiace štruktúry a podporné služby akou je napr. *blackstart*.

Dominantnou súčasťou obranného plánu každej elektrizačnej sústavy je systém odľahčovania záťaže a riadiace štruktúry turbín. Riadenie krízových stavov elektrizačnej sústavy si vyžaduje preštudovať dostupné formy riadenia turbín, či už sa jedná o štandardné riadiace štruktúry používané v elektrárnach alebo nové riadiace štruktúry, ktoré boli zatiaľ len publikované. V ESSR je takouto riadiacou štruktúrou v ostrovnej prevádzke PI regulátor otáčok.

Pre zlepšenie riadiacich systémov turbín je dôležité poznať aj ostatné systémy, ktoré sa nachádzajú v ES. Dôležitým faktorom pri takomto riadení sa ukazuje voľba štruktúry regulátorov a rešpektovanie obmedzení takýchto systémov. Pokiaľ je frekvencia mimo synchronného pásma, systémy pre výrobu elektrickej energie často nepracujú optimálne. Z tohto dôvodu je potrebné poznať najprv fyzikálne správanie daných systémov. Hlavnou úlohou práce je vytvoriť špeciálny typ riadenia pre ostrovnú prevádzku a pri vybočení frekvencie zo synchronného pásma.

Cieľom našej práce je vytvoriť riadenie frekvencie v ostrovnej prevádzke ES, ktoré zabezpečí dobré kvalitatívne regulačné vlastnosti, zvýši bezpečnosť prevádzky ES a jej odolnosť voči poruchám a bude pokiaľ to je možné navrhnuté tak, aby malo čo najjednoduchšiu štruktúru. Navrhované riadenie musí byť matematicky dokázateľné ako aj rešpektovať obmedzenia zo strany energetických smerníc SEPS a ENTSOE. Riadenie by malo byť využiteľné pri pláne obrany aj obnovy ES.

## 2. Systém riadenia Elektrizáčnej Sústavy (ES)

### 2.1. Model ES

Modely jednotlivých komponentov elektrizačnej sústavy (ES) sú stavebné kamene modelu celej ES. Pred navrhnutím modelu ES treba poznať modely jej častí ako sú:

- Modely synchronných generátorov v rôznych výrobných alternatívach a tiež s rôznym stupňom detailizácie opisu fyzikálnych javov.
- Modely turbín, pričom treba rozlišovať turbíny parné, plynové a vodné.
- Modely transformátorov a prenosových vedení.
- Modely rôznych typov pasívnych aj aktívnych záťaží.
- Modely ochrán všetkých vyššie spomínaných prvkov ES.

Tieto stavebné bloky pochádzajú z knižnic programového prostredia Matlab/Simulink a Matlab/SimPowerSystems alebo boli doprogramované do týchto prostredí. Podľa tohto rozdelenia budeme uvažovať knižničné modely a doprogramované modely.

Modelovanie synchronných generátorov (SG) je založené najmä na metóde dvoch reakcií, kedy sa trojfázový stroj opíše v sústave osí d-q spojených s rotujúcim rotorom a pomocou Parkovej transformácie [1] sa získa matematický model opísaný nelineárnymi diferenciálnymi rovnicami s konštantnými koeficientmi. Takto vytvorený model je vhodný pre opis SG s hladkým rotorom aj vyniknutými pólmí. Veľkou výhodou je, že rovnice opisujúce stroj majú konštantné koeficienty. Rád modelu stroja (počet diferenciálnych rovníc) závisí od stupňa zjednodušenia modelu, ktorý je daný účelom použitia modelu. Dosť detailný je model šiesteho rádu a najjednoduchší je model druhého rádu.

Modely turbín sú rozlíšené podľa toho, či sa jedná o parné, plynové, vodné alebo turbíny s kombinovaným cyklom. Parné turbíny sú zložené zariadenia s veľkým počtom rôznych prvkov, a preto sa modelujú najmä najvýznamnejšie komponenty z hľadiska výroby mechanického výkonu a pri modelovaní sa používa prvé priblíženie pomocou sústav prvého rádu. Známym je model parnej turbíny s prehrievačom šiesteho rádu. Plynové turbíny sa používajú v elektrárnach s kombinovaným cyklom, pričom najjednoduchším modelom je sústava prvého rádu. Vodné turbíny môžu byť modelované veľmi jednoducho sústavou prvého rádu s časovou konštantou vody a s nestabilnou nulou v čitateli, ktorá vyjadruje neminimálne fázový charakter modelu. Existujú však podstatne detailnejšie nelineárne modely pre rôzne typy turbín.

Model prenosovej sústavy sa skladá z čiastkových modelov jej prvkov, ako sú rozvodne, transformátory, prenosové vedenia. Patria sem aj rôzne kompenzátory, ochrany a iné prvky. Spoločnou črtou modelovania týchto prvkov je použitie Kirchhoffových.

Zvláštnu časť modelovania ES tvoria všetky riadiace systémy a ochrany, ktoré sa nachádzajú v mnohých elementoch sústavy. Ide o rôznorodé zariadenia a pri vytváraní

celkového modelu ES sa modeluje len ich vplyv na regulované alebo chránené zariadenie. Pre vyšetrovanie špeciálnych funkcií sa môžu vytvárať aj podstatne podrobnejšie modely.

### 2.1.1. Model Synchronného generátora

Dynamický model synchronného generátora(SG) je základným prvkom výstavby modelu elektrizačnej sústavy. Problematike návrhu čo najvernejšieho modelu synchronného generátora je venovaná mimoriadna pozornosť už niekoľko desaťročí. Základné práce v tejto oblasti sú [1], [2]. Najzložitejším modelom SG používaným pri štúdiu dynamických vlastností ES je model šiesteho rádu.

Pre modelovanie synchronného generátora sme použili knižničný model synchronného generátora (Synchronous Machine) z prostredia Matlab/SimPowerSystems, pričom tento model je šiesteho rádu a opísaný rovnicami (2.1) až (2.8) [2].

$$T_{d0}'' \dot{e}_q'' = e'_q - e''_q + i_d (x'_d - x''_d) \quad (2.1)$$

$$T_{q0}'' \dot{e}_d'' = e'_d - e''_d - i_q (x'_q - x''_q) \quad (2.2)$$

$$T'_{d0} \dot{e}'_q = e_b - e'_q + i_d (x_d - x'_d) \quad (2.3)$$

$$T'_{q0} \dot{e}'_d = -e'_d - i_q (x_q - x'_q) \quad (2.4)$$

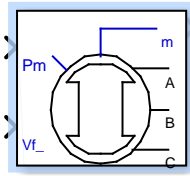
$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H} (p_m - p_e - D\Delta\omega) \quad (2.5)$$

$$\Delta\omega = \omega - \omega_s = \frac{d\delta}{dt} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e''_d \\ e''_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & x''_q \\ -x''_d & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$p_e = (e''_d i_d + e''_q i_q) + (x''_d - x''_q) i_d i_q \quad (2.8)$$





Synchronous Machine

Obr. 2.1. Blok synchrónneho generátora

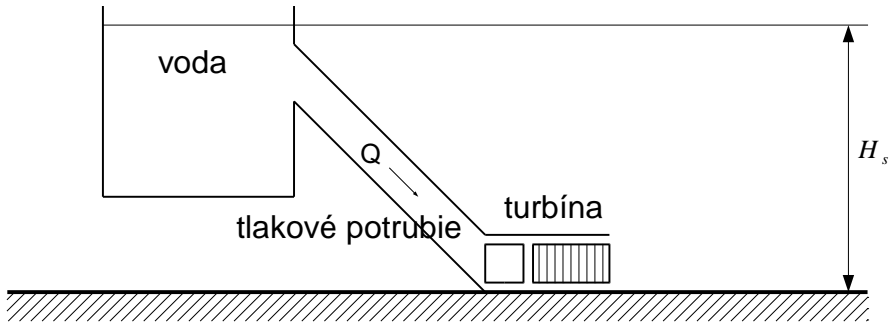
### 2.1.2. Modelovanie turbín

Regulácia výkonu a otáčok musí zohľadniť dynamické správanie sa systému. Tento systém je možné rozdeliť na viacero podsystemov, v ktorých je možné zohľadniť správanie sa jednotlivých fyzických častí: turbína, synchrónny generátor a vonkajší vplyv siete. Typ turbíny má na niektoré kľúčové vlastnosti a dynamické správanie sa elektrárne významný vplyv. Riadenie je teda v istej miere odlišné pre rôzne typy turbín.

### 2.1.3. Model vodnej turbíny [2]

Vodné elektrárne sú často využívané ako zdroj pre primárnu reguláciu frekvencie/ výkonu. Ich vhodnosť pre takéto nasadenie určuje hlavne cena energie, ktorú sú schopné krátkodobo využiť. Pokiaľ sa elektrizačná sústava dostáva do kritického stavu môže regulačná rezerva na týchto elektrárňach zabezpečiť stabilizáciu sústavy. Pri obnove sústavy po poruche typu blackout sú tiež kritickým bodom práve tieto elektrárne. Po ich spustení je možné naštartovať elektrárne (tepelné, jadrové, ...), ktoré nedokážu štartovať bez podania napätia.

Ak voda preteká z vyššej úrovne na nižšiu úroveň cez hydraulickú turbínu, potenciálna energia vody uskladnená vo vyššom zásobníku sa premieňa na mechanickú prácu na hriadeli turbíny. Turbína môže byť buď rovnotlaká alebo protitlaková, a hoci hydraulicky fungujú rôznym spôsobom, práca vykonaná oboma typmi je v oboch prípadoch daná konverziou kinetickej energie.



Obr. 2.2. Schématický diagram vodnej turbíny

Obr. 2.2 zobrazuje diagram inštalácie turbíny, kde voda tečie dolu tlakovým potrubím a cez turbínu a vyteká do dolnej nádrže.

Pokiaľ nie je uvažovaný vplyv trecej sily v turbíne, stratová výška hladiny  $h_1 = 0$  a výška hladiny vody  $h_s = h_0$ , môžeme zapísať rovnicu pre prietok turbínou do nasledovného tvaru:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{1}{T_w} (h_0 - h) \quad (2.9)$$

Ak je ako vstupná veličina pre riadenie turbíny použitá poloha rozvádzacieho kolesa  $g$ , je možné rovnicu pre výšku hladiny vody v potrubí prepísať do nasledovného tvaru:

$$h = \left( \frac{q}{g} \right)^2 \quad (2.10)$$

Ak je nominálny výkon turbíny a generátora rovnaký, koeficient  $A_1 = 1$  a tlmenie  $D = 0$  a prietok pri nulovom výkone turbíny  $q_{n1} = q_0$ , tak rovnica pre mechanický výkon turbíny  $P_m$  v tvare:

$$P_m = h(q - q_0) \quad (2.11)$$

Pri modelovaní riadenia vodnej turbíny je zohľadnený nasledovný model servosystému turbíny:

$$G_s(s) = \frac{g}{u} = \frac{1}{1 + T_s s} \quad (2.12)$$

### 2.1.4. Model elektrizačnej sústavy

Model ES bol vytvorený z hľadiska skúmania prechodných dejov frekvencie. Pohybová rovnica i-teho stroja ES je v tvare:

$$2H_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei} \quad (2.13)$$

Po prenásobení rovnice (2.13) nominálnym výkonom stroja dostávame:

$$2H_i P_{ni} \dot{\omega}_i = (P_{mi} - P_{ei}) P_{ni} \quad (2.14)$$

Zaved'me priemernú hodnotu frekvencie strojov  $\bar{\omega}$  [3]:

$$\bar{\omega} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i P_{ni} \omega_i}{\sum_{i=1}^n H_i P_{ni}} \quad (2.15)$$

Ak sú potom sčítané pohybové rovnice všetkých n generátorov ES môže byť odvodená nasledovná pohybová rovnica ES:

$$2H_c \frac{d}{dt} \bar{\omega} = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei}) P_{ni} = P_G - P_L \quad (2.16)$$

, kde

$$H_c = \sum_{i=1}^n H_i P_{ni}, P_G = \sum_{i=1}^n P_{mi} P_{ni}, P_L = \sum_{i=1}^n P_{ei} P_{ni} \quad (2.17)$$

Je vidieť, že časová konštanta tohoto systému  $H_c$  je závislá od váženého priemeru všetkých zotrvačností strojov a turbín vzhľadom na ich nominálny výkon.  $P_G$  vyjadruje činný výkon všetkých strojov pracujúcich v ES a  $P_L$  vyjadruje výkon odoberaný záťažami. Doba regulácie poruchy, ktorá môže vzniknúť na základe výkonovej nerovnováhy, či už výpadkom prejavovým vo veličine  $P_G$  alebo  $P_L$  je závislá hlavne od časovej konstanty  $H_n$ , vlastností turbín a regulátorov turbín. Členy rovnice sa môžu zmeniť vplyvom porúch v ES. Z hľadiska pohybovej rovnice sú rozoznávané 2 druhy porúch:

- výpadok výroby - zapríčini zmenu parametrov  $P_G$  a  $H_n$  v pohybovej rovnici
- výpadok spotreby - zapríčini zmenu parametra  $P_L$  v pohybovej rovnici

Okamžite po poruche, teda na zmenu výkonovej rovnováhy reaguje priemerná hodnota frekvencie strojov siete vyjadrená  $\bar{\omega}$ . Reakciou na odchylenie uhlovej rýchlosti od nominálnej hodnoty je zmena mechanického výkonu turbín zapríčinená nelineárnymi vlastnosťami turbín, závislými od otáčok stroja a regulácie výkonu/otáčok turbíny. Zmena mechanického výkonu turbín sa prejaví v zmene veľkosti výroby. Ak nie sú uvažované prechodné deje týkajúce sa napätia je možné konštatovať, že veľkosť výroby je súčtom všetkých mechanických výkonov turbín váhovaných ich nominálnym výkonom. Ďalej je možné uvažovať, že záťaž, má okrem zmien jej samotnej veľkosti pri výpadkoch a frekvenčnom odľahčovaní konštantný charakter.

Rýchlosť zmeny mechanického výkonu turbín je obmedzená technologickými obmedzeniami. Z tab. 2.1 je vidieť, že vodné elektrárne sú zdrojom energie, ktorý môže najrýchlejšie zmeniť svoj výkon. Časová konštanta  $2H_c$  pohybovej rovnice ES, nám naznačuje dobu regulácie takejto sústavy. Na základe tohoto faktu a priemernej zmeny rýchlosti nárastu výkonu u všetkých ostatných zdrojov okrem vodných je možné vysloviť hypotézu: Pri regulácii poruchy vyvolanej stratou výroby alebo spotreby je táto strata regulovaná len mechanickým výkonom vodných elektrární a frekvenčným odľahčovaním a jednotkami pre rozpoznanie odpojenia záťaže u parných a paroplynových turbín. Pri ďalšom postupe bude počas poruchy spomínaného typu uvažovaný mechanický výkon turbín na iných zdrojoch ako vodných ako konštantný. Strata spotreby zapríčiňuje nárast frekvencie a môže spôsobiť aktiváciu PLU relé na parných a plynových turbínach. Stabilita ES závisí hlavne od nastavenia frekvenčného odľahčovania, PLU relé a regulátorov otáčok na turbínach.

Elektrárň	Turbína	Maximálna rýchlosť zvyšovania výkonu	Kapacita turbíny v ESSR	Príklad elektrárne
Vodná elektrárň	vodná	10 až 30 [MW/s]	< 100 [MW]	Gabčíkovo 8 x 100 [MW]
Paroplynová elektrárň	plynová	30 [MW/min]	30 až 260 [MW]	PPC Bratislava 173 [MW], PPC Malženice 260 [MW]
Paroplynová elektrárň	parná	12.5 [MW/min]	10 až 120 [MW]	PPC Bratislava 60 [MW], PPC Malženice 120 [MW]
Jadrová elektrárň	parná	12.5 [MW/min]	259 až 273 [MW]	Jaslovské Bohunice 4 x 273 [MW]
Tepelná elektrárň	parná	1.5 až 3 [MW/min]	< 137.5 [MW]	Nováky 6 x 137.5 [MW]

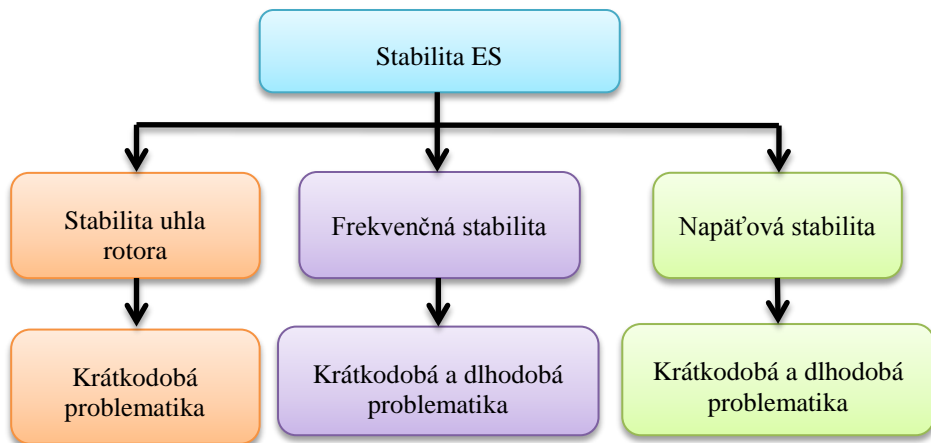
Tab. 2.1. Technologické obmedzenia elektrární a ich turbín v ESSR

## 2.2. Stabilita ES

Stabilita ES je schopnosťou ES pre dané počiatočné podmienky prejsť po poruchovom stave do stabilného bodu, rovnovážneho stavu s tým že systémové premenné ostávajú ohraničené [4],[5]. Je potrebné uvažovať, že porucha, ktorá spôsobí nestabilitu jedného alebo niekoľkých SG ešte nespôsobí nestabilitu celej ES a nemusí ohroziť prepojený celok. ES je nelineárny a neautonómny systém, v ktorom sa vyskytujú rozličné druhy porúch (neustála zmena zaťaženia, konfigurácie siete až po neočakávané výpadky časti prevádzky po poruchách typu skrat). ES môže zostať v rovnovážnom stave po jednom type veľkej poruchy na jednom mieste, ale rovnaká porucha v inom mieste už môže spôsobiť kolaps jej časti alebo celku. Dôležitým je si uvedomiť, že porucha na jednom zariadení (napr. ochrana vedenia) spôsobí zmeny vo všetkých hlavných systémových veličinách. Z dôvodu poruchy na prvkoch siete ES sa môže prepojený celok dokonca rozdeliť na ostrovy. Typickú ES je možné popísať ako mnohorozmerný systém, ktorého dynamické správanie je ovplyvnené množstvom zariadení s odlišnými charakteristikami. Stabilita je podmienkou rovnovážnosti medzi protismernými silami. V závislosti od topológie siete, operačných podmienok a druhu poruchy pôsobia na ES rozličné protismerné sily. Tieto sily môžu spôsobiť nerovnovážnosť v systéme a viesť k rozličným formám instability. Z dôvodu mnohorozmernosti systému a zložitej komplexnosti problémov stability je vhodné rozdeliť analýzu stability a je potrebné zobrať pri jej posudzovaní do úvahy nasledovné hľadiská[4],[5].

- Hlavná systémová fyzikálna veličina, na ktorej sa prejaví nestabilita
- Veľkosť a typ poruchy, ktorá vplyva na zvolenie metódy výpočtu stability
- Zariadenia, procesy a časový horizont poruchy a udalostí po poruche

Na obr. 2.3 je zobrazená problémová špecifikácia prístupu k stabilite ES.



Obr. 2.3. Problémová špecifikácia prístupu k stabilite ES [4],[5].

### **2.2.1. Stabilita ES podľa uhla natočenia rotora, resp. záťažového uhla**

Stabilita ES podľa uhla rotora označuje schopnosť SG v prepojenom celku zostávať v synchronnej prevádzke po poruche. Závisí od schopnosti získať znova rovnovážny stav medzi elektromagnetickým a mechanickým momentom SG v prepojenom celku. Nestabilita sa prejaví hlavne v strate synchronizmu niektorých SG s prepojeným celkom.

### **2.2.2. Napät'ová stabilita ES**

Napät'ová stabilita označuje schopnosť uzlov ES zostávať na určitých napät'ových úrovniach po poruche. Napät'ovú nestabilitu môže spôsobiť napr. strata veľkej záťaže v jednom mieste a odopnutie prenosových vedení. Tieto faktory môžu mať potom kaskádny vplyv a spôsobiť oscilácie alebo stratu napätia v uzloch ES. Zníženie napätia v uzloch spôsobuje hlavne nárast spotreby reaktívneho výkonu. Strata synchronizmu SG je spôsobená prevádzkou SG na hranici prebudenia alebo podbudenia [6].

### **2.2.3. Frekvenčná stabilita**

Frekvenčná stabilita je schopnosťou ES zotrvať v stave s konštantnou frekvenciou. Závisí od rovnováhy medzi záťažou a výrobou v ES. Nestabilita súvisí s porušením tejto rovnováhy, ktorá môže spôsobiť odopínanie záťaže a SG. Krátkodobá frekvenčná stabilita je termínom týkajúcim sa najmä ostrovej prevádzky. Nestabilitu vo vznikajúcom ostrove môže spôsobiť príliš veľký rozdiel medzi výrobou a spotrebou [7]. Rozdiel týchto dvoch výkonov je regulovaný hlavne regulátormi turbín a frekvenčným odľahčovaním. Pri poklese/náraste frekvencie sa znížia/zvýšia otáčky generátorov, čo môže mať pri určitej hranici za následok odopnutie SG zo siete frekvenčnou ochranou alebo ochranou závislou od napätia a frekvencie V/Hz.

### **2.2.4. Frekvenčný plán a obranný plán proti šíreniu veľkých porúch v ESSR**

Primárna regulácia frekvencie má za úlohu udržiavať rovnováhu medzi výrobou a spotrebou s využitím regulátorov výkonu a otáčok turbín. Z doporučení ENTSOE, spojené bývalé UCTE a NORDEL, vyplýva, že primárna regulácia frekvencie sa má aktivovať pri väčšej zmene frekvencie ako 20 mHz od nominálnej hodnoty 50 Hz [8]. Maximálna kvázistacionárna odchýlka pri primárnej regulácii frekvencie je 180 mHz. Pri kvázistacionárnej odchýlke 200 mHz sa má aktivovať celá primárna regulačná rezerva. Najväčšia dovolená odchýlka frekvencie pri prechodných dejoch je 800 mHz. Takýto pokles však nesmie mať za následok aktiváciu frekvenčného odľahčovania. Tieto hodnoty sú zvolené pre okamžitú stratu 3000 MW výroby. Menej ako 50 % primárnej regulačnej rezervy musí byť aktivovaných do 15 s a od 50 % do 100 % primárnej regulačnej rezervy sa musí aktivovať do 30 s. Toto sú všeobecné ustanovenia a pravidlá pre poskytovateľov služieb v rámci ENTSOE. V týchto inštrukciách však nie je spresnené akými regulačnými štruktúrami majú

prevádzkovatelia riešiť reguláciu výkonu/ frekvencie v ostrovej prevádzke. Ustanovenia SEPS a.s. na našom území znejú nasledovne:

Frekvenčný plán[9] uplatnený v elektrizačnej sústave Slovenskej republiky v súčasnosti je nasledovný: Pri poklese frekvencie na hodnotu:

49,8 Hz

- je realizovaný signál „znížená frekvencia“ vo všetkých dôležitých objektoch energetiky.
- automatický prechod vodných elektrární do otáčkovej regulácie .
- automatické odpojenie od centrálného regulátora P, f a U.
- automatické zvýšenie výkonu všetkých tepelných elektrární.
- ručné zvýšenie výkonu v jadrových elektrárnach.
- automatické odpojenie prečerpávacej vodnej elektrárne Čierny Váh z režimu čerpania.
- identifikácia a odľahčenie extrémne zaťažených elementov siete.

49,6 Hz

- automatické odpojenie ostatných prečerpávacích vodných elektrární z režimu čerpania.
- postupné pripojenie prečerpávacích vodných elektrární na turbínovú prevádzku.

49,0 Hz

- 1. stupeň automatického frekvenčného odľahčenia záťaže v objeme 13,5 %.

48,7 Hz

- 2. stupeň automatického frekvenčného odľahčenia záťaže v objeme 12,5 %.

48,4 Hz

- 3. stupeň automatického frekvenčného odľahčenia záťaže v objeme 12,5 %.

48,1 Hz

- 4. stupeň automatického frekvenčného odľahčenia záťaže v objeme 14,8 %.

48,0 Hz

- automatické odpojenie teplárne Košice a jej prechod na vlastnú spotrebu.

47,5 Hz

- automatické odpojenie všetkých elektrární a ich prechod na vlastnú spotrebu.

Pri náraste frekvencie na:

50,2 Hz

- je realizovaný signál „zvýšená frekvencia“ vo všetkých dôležitých objektoch energetiky
- automatické odpojenie od centrálného regulátora P, f a U.
- automatické zníženie výkonu všetkých tepelných elektrární.
- ručné zníženie výkonu jadrových elektrární.
- automatický prechod vodných elektrární do otáčkovej regulácie.
- identifikácia a odľahčenie extrémne zaťažovaných elementov siete.
- automatické odpojenie prečerpávacej vodnej elektrárne Čierny Váh z turbínovej prevádzky.

50,4 Hz

- automatické odpojenie ostatných prečerpávacích vodných elektrární z turbínovej prevádzky.
- postupné pripojenie prečerpávacích vodných elektrární do režimu čerpania.

51,0 Hz

- automatické odpojenie jadrových elektrární a ich prechod na vlastnú spotrebu.
- automatické odpojenie teplárne Košice a jej prechod na vlastnú spotrebu.

52,0 Hz

- automatické odpojenie paroplynovej elektrárne Bratislava a jej prechod na vlastnú spotrebu.

53,0 Hz

- automatické odpojenie všetkých elektrární a ich prechod na vlastnú spotrebu.

Podľa frekvenčného plánu ESSR je vidieť, že dôležitými nástrojmi pri riadení frekvencie v ostrove sú otáčkový regulátor a frekvenčné odľahčovanie. Cieľom riadenia frekvencie v ostrovej prevádzke je znovu vytvoriť výkonovú rovnováhu, t.j. vyregulovanie frekvencie do pôvodného synchronného pásma, znovu pripojenie záťaže odpojenej pomocou frekvenčného odľahčovania, pokiaľ je to možné obnovenie prevádzky všetkých odpojených elektrární a na záver prepojenie sa s ostatnými synchronnými oblasťami.

### **Plán obnovy sústavy ES SR [10]**

Ak vznikne porucha typu blackout a nastane situácia potreby obnovenia normálnej prevádzky ESSR, ako optimálny sa odporúča tento postup:

1. Okolité synchronne pracujúce sústavy sú funkčné (prípadne časť)
  - 1.1 V prvom rade by vždy mal byť hľadaný spôsob, ako obnoviť prevádzku ESSR z okolitých synchronne pracujúcich sústav. V tejto súvislosti treba zdôrazniť, že v prípade obnovenia prevádzky ESSR z okolitých synchronne pracujúcich sústav pôjde vždy o postupné pripájanie častí



ESSR k synchronne pracujúcim častiam, čím sa do veľkej miery znižia riziká z kruhovania vedení.

1.2 Ďalším krokom v procese obnovy prevádzky ES SR bude zabezpečenie prevádzky EGA. Vzhľadom k existencii synchronne pracujúcej okolitej ES je potrebné zabezpečiť:

- pripojenie elektrickej stanice 400 kV Gabčíkovo k tejto ES,
- postupné pripájanie záťaže v blízkom elektrickom okolí EGA až do úrovne, ktorá bola vzájomne odsúhlasená oboma dotknutými PPS a vopred dohodnutá v prevádzkovej zmluve,
- prifázovanie minimálne troch SG EGA k vytvorenej časti ES a postupné zvyšovanie ich zaťaženia podľa MPP.

1.3 V prvej fáze obnovy prevádzky ES SR z okolitých synchronne pracujúcich sústav treba uskutočniť prepojenia minimálne na tie elektrické stanice, do ktorých je vyvedený výkon z JE. Ide o nasledovné elektrické stanice:

- 400 kV Križovany,
- 400 kV Bošáca,
- 400 kV Veľký Ďur.

1.4 Po nábehu vyššie uvedených systémových staníc je potrebné nabehnúť systémové zdroje ES SR. Ide najmä o tieto zdroje:

- VE Gabčíkovo,
- PPC Malženice a PPC Bratislava,
- EBO, EMO (nezáleží na poradí),
- ENO,
- EVO a ostatné zdroje podľa potreby a možností.

1.5 Následne je potrebné zabezpečiť rozšírenie existujúcej ES prostredníctvom kruhovania vedení, vrátane prepojení na funkčné okolité ES.

1.6 Pri vzájomnom prepájaní oživených uzlov PS (el. staníc) a prifázovaných zdrojov vo vnútri ESSR postupuje operátor SED tak, aby dosiahol čo najvýhodnejšiu elektrickú schému, a to tak z pohľadu funkcionality vznikajúcej ES SR, ako aj z pohľadu výskytu vhodnej záťaže a priorít. V prípade, že nebude k dispozícii kompletná okolitá synchronne pracujúca ES, bude operátor postupovať spôsobom, ktorý bude pre danú situáciu najvhodnejší.

2. Okolité synchronne pracujúce sústavy nie sú funkčné – totálny blackout

V prípade, že z akýchkoľvek dôvodov by nebolo možné sa pripojiť k zahraničným prenosovým sústavám, a táto situácia by pretrvávala neúnosne dlhú dobu, tak vedúci SED môže po konzultácii s generálnym riaditeľom SEPS, a.s. prikročiť k nábehu zo zdrojov umiestnených v SR. Je potrebné upozorniť, že vytvorenie ostrova SR z miestnych zdrojov SR bez zahraničia je proces omnoho náročnejší a rizikovejší ako postupné pripájanie a oživovanie jednotlivých častí ES SR s pomocou zahraničia.

- 2.1 Podľa platnej PI 935-1 je potrebné zabezpečiť vytvorenie ostrova pre prevádzku EGA pri odpojení sa od ES SR. Obsluha EGA pri odpojení od ES SR a strate vlastnej spotreby prioritne obnovuje vlastnú spotrebu elektrárne a vlastnú spotrebu vodohospodárov a zabezpečuje potrebný výkon pre potrebné manipulácie vodohospodárskych objektov.
- 2.2 Ďalším krokom je vybudovanie kmeňového ostrova:
  - 2.2.1 Ak je k dispozícii PPC Malženice (PPC MA), najvýhodnejšie je kmeňový ostrov budovať v spolupráci s EGA tak, že sa najskôr vytvorí lokálny ostrov pre prevádzku EGA v zmysle PI 935-1. Súčasne je možné rozbehnúť na vlastnú spotrebu PPC MA alebo sa napätie do rozvodne vlastnej spotreby PPC MA podá z vytvoreného ostrova v okolí Gabčíkova. Po prífázovaní PPC MA do ostrova EGA je potrebné preveriť jeho postupné zaťažovanie s rozširovaním lokálneho ostrova o zaťaženie hlavného mesta Bratislavy. Označenie ostrova KO1.
  - 2.2.2 V prípade, že PPC MA nemôže byť naštartovaný, je možné použiť podobný variant ostrova (EGA, PPC BA) a tento použiť na naštartovanie jadrového zdroja (EBO, EMO). Označenie ostrova KO2.
  - 2.2.3 V prípade, že PPC MA ani PPC BA nemôžu byť naštartované, je možné použiť menej výhodný variant kmeňového ostrova (EGA, ENO) a tento použiť na naštartovanie jadrového zdroja (EBO, EMO). Označenie ostrova KO3.
- 2.3 Dispečer spustí proces oživenia potrebných systémových elektrární
- 2.4 Po oživení systémových elektrární pripájať záťaže a tiež menšie zdroje podľa potreby.

### **2.2.5. Porucha typu blackout**

Porucha Blackout je výpadok zásobovania elektrickou energiou v danej oblasti. Príčinami takéhoto zlyhania sú najčastejšie nedostatok výroby, preťaženie vedení, poškodenie časti ES alebo skraty na vedeniach a v rozvodniach. Je však dôležité si uvedomiť ako takáto porucha môže nastať. Podľa viacerých autorov [11],[12] sú

prvotnými faktormi pre vznik takejto poruchy veľké tranzitné toky. Pri všetkých väčších zlyhaniach zaznamenaných vo svete sa deficitná časť sústavy oddeľuje od prebytkovej sústavy kvôli narastajúcemu rozdielu fázových uhlov týchto sústav. Tento narastajúci rozdiel má potom za následok reakciu ochrán na tranzitných vedeniach medzi týmito sústavami a tým ich odpojenie od seba. Pokiaľ prebytková časť sústavy väčšinou udrží svoju prevádzku, deficitná časť smeruje k nevyhnutnému čiastočnému alebo úplnému kolapsu. Pravú príčinu podľa niektorých autorov ale možno hľadať v prílišnej liberalizácii trhu s elektrickou energiou, nepripravenosťou dispečerov na vznik takýchto situácií a nepripravenosťou poskytovateľov služieb prenosovej sústavy na vznik takejto udalosti.

### **2.2.6. Ostrovná prevádzka**

Podľa definície v slovníku ENTSOE [13], European Network Of Transmission System Operators for Electricity, je zadaná ostrovná prevádzka nasledovne: Ostrov reprezentuje časť elektrizačnej sústavy alebo niekoľko elektrizačných sústav, ktoré sú oddelené od hlavného prepojeného systému (oddelenie je následkom odpojenia/ zlyhania prenosových systémových prvkov elektrizačnej sústavy). Definícia podľa slovníka Glossary of Standard Operating Terms organizácie NERC (North American Electric Reliability Corporation)[14] je vo svojom zmysle rovnaká. Schopnosť ostrovej prevádzky je definovaná nasledovne: Jedná sa o schopnosť prevádzky elektrárenského bloku do oddelenej časti vnútornej siete tzv. ostrova. Ostrovná prevádzka sa vyznačuje veľkými nárokmi na regulačné schopnosti bloku [15].

### **Definícia odľahčovania záťaže používaná na území Európy (ENTSOE):**

Odľahčovanie záťaže je odpojenie záťaže zo synchronnej elektrizačnej sústavy, obyčajne vykonané automaticky, pre riadenie systémovej frekvencie v havarijných situáciách [13]. Odľahčovanie záťaže môžeme rozdeliť podľa toho na akú veličinu reaguje relé odpájajúce záťaž. Týmito veličinami sú v praxi napätie a frekvencia. Napäťové odľahčovanie záťaže má za úlohu potlačiť akúkoľvek poruchu v elektrizačnej sústave tak aby nedošlo k napäťovému kolapsu. Frekvenčné odľahčovanie záťaže má za úlohu potlačiť akúkoľvek poruchu v elektrizačnej sústave tak aby nedošlo k frekvenčnému kolapsu.

### **Frekvenčné odľahčovanie**

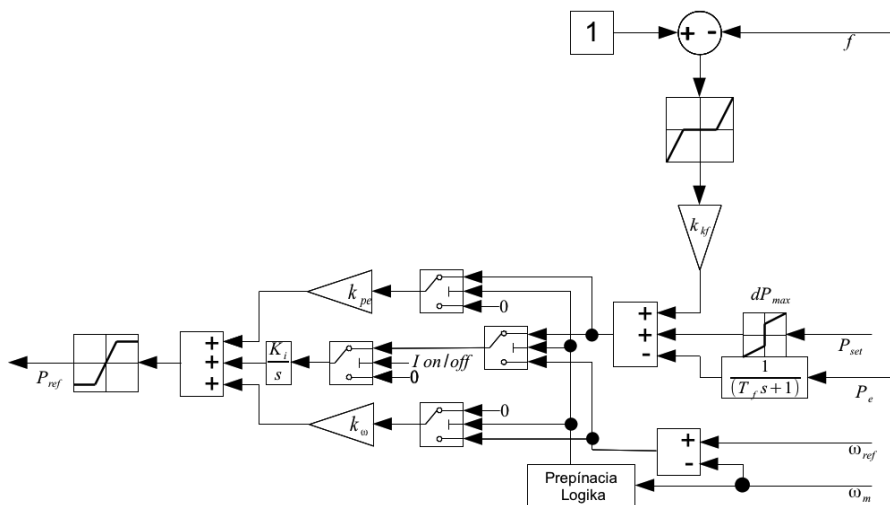
Z odporúčaní ENTSOE [19]:

Je potrebné zadané frekvencie, pri ktorých dôjde k odopínaniu záťaže. ENTSOE doporučuje začať s frekvenčným odľahčovaním pri hodnote frekvencie 49 Hz. Okamžitá hodnota výpadku 3000 MW výroby by mala byť regulovaná iba pomocou primárnej regulácie, bez spustenia frekvenčného odľahčovania. V prípade, že

frekvencia klesne pod úroveň 49 Hz, dôjde k frekvenčnému odľahčovaniu s hodnotou 10-20 % z celkovej spotreby. Každý prevádzkovateľ je zodpovedný za vlastný plán pri frekvenčnom odľahčovaní. V prípade nižších frekvencií je možné, že sa prepojený systém rozpadne do menších sietí. Preto má byť v úvahu koľko záťaže je možné odpojiť pri frekvenčnom odľahčovaní, pre návrat ES späť do rovnovážneho stavu medzi výrobou a spotrebou. Zvyšné frekvencie, pri ktorých dôjde k odľahčovaniu by mali byť teda uvážené prevádzkovateľom sústavy.

## Regulátory pre ostrovnú prevádzku

Regulátory používané pri ostrovej prevádzke nadobúdajú rôzne štruktúry v rozličných elektrizačných sústavách. V ESSR je používané beznárazové prepnutie z regulácie činného výkonu do regulácie otáčok. Beznárazové prepnutie znamená, že pokiaľ dôjde k inicializačnej udalosti (vybočenie frekvencie zo synchronného pásma, vznik ostrovej prevádzky, manuálne prepnutie do regulácie otáčok), tak sa odpojí regulátor výkonu s tým že všetky ventily zostanú v pôvodnej polohe; regulátor otáčok sleduje otvorenie ventilov od regulátora výkonu. Regulátor otáčok môže pri tom nadobúdať rôzne štruktúry (P, PI, PD, PID)[17],[18]. Princiálna schéma zapojenia regulátora výkonu a regulátora otáčok sa nachádza na obr. 2.4.



Obr. 2.4. Princiálna schéma PI - regulátora výkonu a PI- regulátora otáčok používaného na území SR

### 2.2.7. Metódy riadenia nelineárnych systémov

ES je mnohorozmerný systém, ktorého dynamické správanie je možné popísať nelineárnymi diferenciálnymi rovnicami. Pre návrh riadenia je preto nutné brať do úvahy nelineárny charakter systému rovníc, ktoré popisujú ES. V nasledujúcej časti sú

opísané vybrané metódy nelineárneho riadenia použité pri návrhu regulátorov pre ES v ostrovej prevádzke.

### Návrh nelineárneho regulátora pomocou metódy vstupno-výstupnej spätnoväzobnej linearizácie pre SISO systémy [20]

Metóda spätnoväzobnej linearizácie je prístupom pre návrh nelineárneho regulátora. Táto metóda využíva algebraickú transformáciu dynamiky nelineárneho systému na lineárny, tak aby bolo možné pre systém navrhnúť lineárny regulátor. Spätnoväzobná linearizácia pozostáva z exaktnej transformácie stavov. V najjednoduchšej forme spätnoväzobná linearizácia odstraňuje vplyv nelinearit z nelineárneho systému tak, že dynamika uzavretej slučky regulačného obvodu ma lineárny charakter. Táto metóda môže byť jednoducho aplikovaná na systém v tvare (2.18):

$$\dot{x}^{(n)} = f(x) + b(x)u \quad (2.18)$$

kde  $u$  je vstupom nelineárneho systému,  $x$  je výstupom systému a vektor  $\bar{x} = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T$  je stavovým vektorom a  $f(x)$  a  $b(x)$  sú nelineárnymi funkciami stavov. V stavovom priestore je reprezentácia systému nasledovná :

$$\dot{x}^{(n)} = f(x) + b(x)u \quad (2.19)$$

Pre systémy, ktoré môžu byť vyjadrené kanonickou formou riaditeľnosti môžeme pri nenulovom  $b$  pre vstup  $u$  zapísať rovnicu:

$$u \approx \frac{1}{b}(v - f) \quad (2.20)$$

Následne je možné rovnice prepísať na tvar s odstránenou nelinearitou:

$$\dot{x}^{(n)} = v \quad (2.21)$$

Zákon riadenia je potom v tvare (2.22):

$$v = x_d^{(n)} - k_0 x - k_1 \dot{x} - \dots - k_{n-1} x^{(n-1)} \quad (2.22)$$

Zosilnenia  $k_i$  sú pri tom zvolené konštanty, tak že polynóm  $s^n + k_{n-1}s^{n-1} + \dots + k_0$   $s^n + k_{n-1}s^{n-1} + \dots + k_0$  má všetky svoje korene striktné v ľavej polrovine komplexnej oblasti, čo vedie k exponenciálne stabilnej dynamike systému (2.23):

$$x^n + k_{n-1}x^{(n-1)} + \dots + k_0x_0 \quad (2.23)$$

Pre úlohy týkajúce sa sledovania želanej hodnoty výstupom systému, je zákon riadenia zapísaný nasledovne (2.24):

$$v = x_d^{(n)} - k_0e - k_1\dot{e} - \dots - k_{n-1}e^{(n-1)} \quad (2.24)$$

, (kde  $e(t) = x(t) - x_d(t)$  je regulačnou odchýlkou sledovania) vedie k exponenciálne konvergentnému sledovaniu.

Stabilita riadenia pomocou spätnoväzobnej linearizácie je zaručená ak systém spĺňa nasledovné podmienky:

- Relatívny rád systému  $n$  pri návrhu riadenia je rovný rádu nelineárneho systému
- Stav a výstupná veličina nelineárneho systému musia byť ohraničené
- Nuly systému musia ležať v stabilnej polovine

Metóda spätnoväzobnej linearizácie nezaručuje konvergenciu riešenia pre systémy s neminimálne fázovým charakterom. Najjednoduchším prístupom pre potlačenie vplyvu núl systému s neminimálne fázovým charakterom je modifikácia rozmiestnenia núl v návrhu nelineárneho systému a jeho výstupnej veličiny. Nuly a výstupná veličina systému môžu byť ovplyvnené zmenou stavov modelu, resp. zmenou polohy snímačov a sensorov. Ďalšou z možností ako potlačiť vplyv neminimálnej fázovosti výstupnej veličiny nelineárneho systému je aproximácia novej výstupnej veličiny bez vplyvu nelinearit, ktoré spôsobujú neminimálnu fázovosť systému. Návrh riadenia ale potom nemôže spĺňať požiadavku úplného sledovania žiadanej hodnoty výstupnou veličinou.

### **Lyapunovova teória stability [20] - Priama metóda stability podľa Lyapunova**

Základná filozofia priamej metódy stability podľa Lyapunova spočíva v matematickom rozšírení fyzikálneho pozorovania: Ak je všetka energia systému (mechanická alebo elektrická) spojito vyčerpaná, musí sa systém, či už lineárny alebo nelineárny dostať do rovnovážneho stavu. Podľa tohto tvrdenia je možné predpokladať, že stabilitu systému môžeme posudzovať iba podľa jedinej skalárnej funkcie. Teorém stability môžeme uplatniť na skalárnu funkciu popisujúcu energiu nasledovne:

- Nulová energia korešponduje s požiadavkou rovnovážneho bodu ( $x = 0, \dot{x} = 0$ )
- Asymptotická stabilita implikuje konvergenciu energie k nule
- Nestabilita je spôsobená nárastom energie

Stav  $x^*$  sa nazýva rovnovážnym stavom (alebo rovnovážnym bodom) systému ak  $x(t)$  je rovné  $x^*$  a zostáva rovným  $x^*$  pre celý budúci čas. Podmienky stability podľa Lyapunova:

1. Lyapunovova funkcia LF  $V(x)$  musí byť spojitá, diferencovateľná a pozitívne definitná skalárna funkcia  $V: R^n \rightarrow R$ , pre ktorú platí  $V(x) > 0$ .
2. Funkčná hodnota LF  $V(x)$  v rovnovážnom bode  $x = 0$  musí byť  $V(0) = 0$
3. Derivácia LF  $V(x)$  musí byť záporne definitná funkcia  $\dot{V}(x) < 0$  pozdĺž trajektórie vyšetřovaného systému. Ak platí že  $\dot{V}(x) < 0 \quad \forall x \in R^n$  hovoríme, že rovnovážny bod je globálne asymptoticky stabilný.

### 3. Simulačný model ES

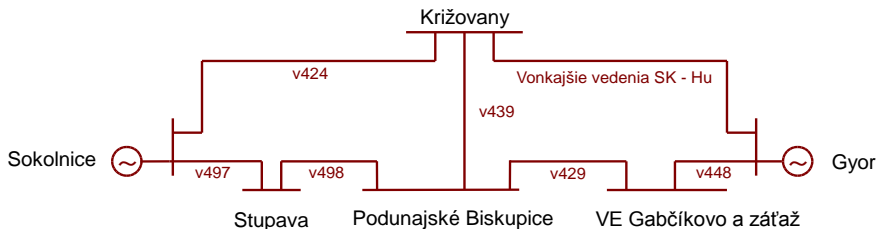
Navrhnuté a zdokumentované princípy riadenia nie je možné aplikovať v reálnej prevádzke ES z dôvodu možných finančných a materiálnych strát. Pre uvedené dôvody je potrebné vytvoriť simulačný model, ktorý musí byť verifikovaný pokiaľ je to možné meraniami alebo znalosťami o ES. Na tomto modeli budú navrhované a zdokumentované princípy riadenia overené experimentálne.

#### 3.1. Model ES pre simuláciu ostrovej prevádzky

Overenie regulačných vlastností riadenia frekvencie v ostrovej prevádzke si vyžaduje vytvorenie zložitého simulačného modelu, ktorý v sebe zahŕňa základné stavebné bloky:

- Model elektrárenského bloku EB
- Modely prvkov siete – vedenie, transformátor, záťaž

Vymedzená časť Slovenskej elektrizačnej sústavy, ďalej len VCESSR, zobrazená na obr. 3.1, je prepojená dvoma vedeniami so zahraničnými sieťami ENTSOE v uzloch Sokolnice a Gyor. V tejto časti ESSR sa nachádzajú modelované uzlové sústavy: Stupava, Podunajské Biskupice, VE Gabčíkovo a záťaž



Obr. 3.1. Schéma siete

#### 4. Riadenie výkonu a frekvencie P/f v ostrovnej prevádzke

Riadenie výkonu a frekvencie ES v ostrovnej prevádzke musí spĺňať požiadavky zo strany energetických smerníc a matematické požiadavky týkajúce sa konvergencie regulácie frekvencie v ES. Cieľom tejto kapitoly je navrhnúť riadenie frekvencie a výkonu ES pri splnení predošlých požiadaviek. Model centralizovaného regulátora ostrovnej prevádzky

##### Centralizované riadenie ostrovnej prevádzky

Centralizované riadenie ostrovnej prevádzky má za úlohu regulovať frekvenciu vzniknutého ostrova tak aby zdroje zaradené do tejto regulácie boli rovnomerne zaťažované pri výpadkoch výroby alebo spotreby. Tento typ riadenia umožňuje pri nezkreslených informáciách a znalostiach o sieti dosiahnuť nulovú regulačnú odchýlku. Model ES je v tvare: Ak sú sčítané pohybové rovnice všetkých  $n$  generátorov ES výsledkom je pohybová rovnica ES:

$$2H_c \frac{d}{dt} \bar{\omega} = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei}) P_{ni} = P_G - P_L \quad (4.1)$$

Potom prepísaním rovnice (4.1) do tvaru:

$$\frac{d}{dt} \bar{\omega} = \frac{P_{G0} + \Delta P_G - P_L}{2H_c} = \frac{P_{G0} + u - P_L}{2H_c} \quad (4.2)$$

kde  $P_{G0}$  je výkon generátorov pred výpadkom do ostrovnej prevádzky a  $u$  je výkon o ktorý sa zvýši/ zníži výkon generátorov počas poruchy vplyvom centrálnej regulácie.

##### Návrh riadenia centrálneho nelineárneho regulátora frekvencie pomocou metódy spätňoväzobnej linearizácie

Vzhľadom na nelineárny charakter systému je možné centralizované riadenie ostrova navrhnúť metódou spätňoväzobnej linearizácie (kap. 2.2.7). Výstup systému je váhovaná stredná hodnota otáčok generátorov, ktorá bude ďalej označovaná ako frekvencia ostrova:

$$y = \bar{\omega} \quad (4.3)$$

Derivácia výstupnej veličiny:

$$\frac{d}{dt} \bar{\omega} = \frac{P_{G0} + u - P_L}{2H_c} \quad (4.4)$$



V rovnici je prítomná akčná veličina a preto je možné zapísať:

$$\dot{y} = \frac{P_{G0} + u - P_L}{2H_c} = v \quad (4.5)$$

Zákon riadenia je možné získať úpravou vzťahu (4.5):

$$u = 2H_c v + P_L - P_{G0} \quad (4.6)$$

kde lineárna časť regulátora s výstupom v:

$$v = -k_1 e \quad (4.7)$$

#### 4.1.1. Dôkaz stability centrálného nelineárneho regulátora frekvencie pomocou priamej metódy Lyapunova

Pre navrhnuté riadenie je vykonaný dôkaz stability pomocou Lyapunovovej funkcie (LF). Pre n strojov pracujúcich v ostrovej prevádzke z hľadiska stability otáčok/frekvencie je možné zapísať nasledovnú Lyapunovovu funkciu:

$$V(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = V(\omega_i) = \sum_{i=1}^n \frac{\omega_i^2}{2} \quad (4.8)$$

Funkcia (4.8) spĺňa podmienku 1 lebo  $V(\omega_i) > 0$  a je spojitá a diferencovateľná na  $R^n$ . Rovnako funkcia (4.8) spĺňa podmienku 2 lebo  $V(0) = 0$ . Derivácia funkcie  $V(\omega_i)$  pozdĺž trajektórie systému (4.2) bude:

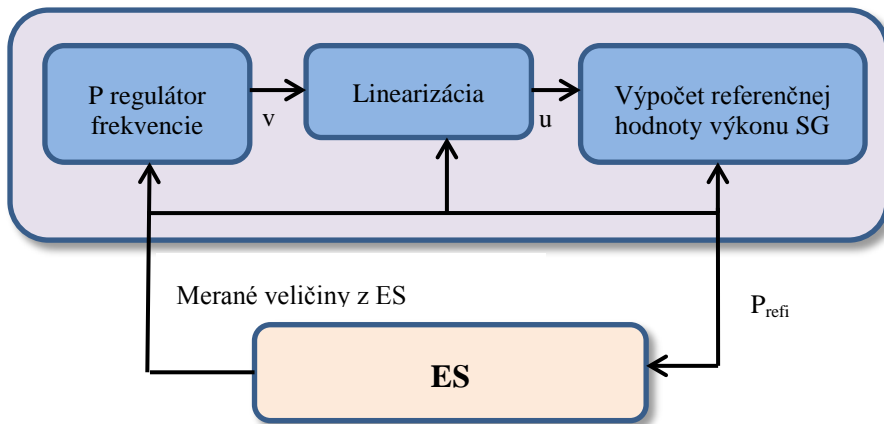
$$\begin{aligned} \dot{V}(\omega_i) &= \sum_{i=1}^n \omega_i \dot{\omega}_i = \sum_{i=1}^n \omega_i \frac{(P_{mi} - P_{ei})}{2H_i} = \sum_{i=1}^n \omega_i \frac{H_i P_{ni}}{H_i P_{ni}} \frac{(P_{mi} - P_{ei}) P_{ni}}{2H_i P_{ni}} = \\ &= \bar{\omega} \frac{d}{dt} \bar{\omega} = \bar{\omega} v = -k_1 \bar{\omega}^2 \end{aligned} \quad (4.9)$$

A teda funkcia (4.8) spĺňa podmienku 3 a je Lyapunovova, čo vedie k exponenciálnej stabilnej dynamike ES. Je potrebné pripomenúť, že tento centralizovaný regulátor stabilizuje sústavu len z hľadiska frekvencie a dlhodobých dejov. Vplyv krátkodobých javov z hľadiska napätia a záťažového uhla nie je pri návrhu zohľadnený.

#### 4.1.2. Návrh a popis schémy centrálneho nelineárneho regulátora

Centrálny regulátor ostrovnej prevádzky, zobrazený na obr. 4.1, sa skladá z nasledovných základných stavebných blokov:

- Blok P regulátor frekvencie, modelovaný podľa rovnice (4.7).
- Blok Linearizácia, modelovaný podľa rovnice (4.6).
- Blok Výpočet referenčnej hodnoty výkonu SG



Obr. 4.1. Schéma centrálneho nelineárneho regulátora ostrovnej prevádzky

#### 4.1.3. Premenné zastúpené v centrálnom nelineárnom regulátore

Zákon riadenia je síce na prvý pohľad tvorený jednoduchou rovnicou bez vplyvu nelinearít ale je potrebné si uvedomiť, že pre realizáciu regulátora je nutné mať k dispozícii a merať veľké množstvo premenných:

1. Je potrebné zidentifikovať parameter  $H_i$  – zotrvačnosť pre všetky generátory a turbíny, ktoré sa nachádzajú v ostrove ES, aj tých ktoré nebudú pracovať v regulácii frekvencie.
2. Nominálny výkon všetkých generátorov  $P_{ni}$ .
3.  $P_{Go}$  - výkon generátorov pred výpadkom časti ES do ostrovnej prevádzky.
4.  $P_L$  - aktuálne zaťaženie sústavy, môže byť merané podľa uzlových sústav alebo získané z činného výkonu generátorov.
5. Frekvencia v mieste centrálneho regulátora ak nie sú k dispozícii otáčky jednotlivých strojov  $\omega_i$ .

#### 4.1.4. Výstup centrálného nelineárneho regulátora

Výstupnú hodnotu centrálného regulátora  $u$  je potrebné prepočítať na referenčné hodnoty výkonu zdrojov zaradených do centrálnnej regulácie frekvencie v ostrove. Prepočet výstupnej hodnoty centrálného regulátora frekvencie na referenčné hodnoty výkonu zdrojov má lineárny charakter, nakoľko sú do tejto regulácie zaradené len vodné zdroje. Nie je pri tom uvažovaný rozdiel rýchlosti nárastu a poklesu výkonu u rôznych typov vodných zdrojov. Ostatné zdroje (jadrové, tepelné, plynové) nie je vhodné v centrálnnej regulácii frekvencie ostrovnej prevádzky využívať pokiaľ nie je uvažované rýchle ventilovanie, kvôli pomalej rýchlosti zvyšovania/ znižovania výkonu oproti časovej konštante ES v ostrovnej prevádzke. Pri výpočte referenčnej hodnoty výkonu zdrojov je uplatnené obmedzenie výrobnjej kapacity každého zaradeného zdroja, tak aby táto hodnota nebola vyššia ako výrobná kapacita zdroja alebo nebola nižšia ako nula.

#### 4.2. Nelineárne riadenie mechanického výkonu vodných turbín

Výstupom nadradeného regulátora frekvencie ostrovnej prevádzky je zmena referenčnej hodnoty výkonu zaradených vodných zdrojov do regulácie frekvencie. Úpravou vzťahov v kapitole **Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.** je získaný model systému pre odvodenie rovníc nelineárneho regulátora mechanického výkonu. Použitím nasledovnej substitúcie a neuvažovaním zmeny vo výške hladiny v nádrži  $h_0 = 1$ :

$$x_1 = g, x_2 = q, a = 1/T_s, b = 1/T_w \quad (4.10)$$

Výsledný model systému:

$$\dot{x}_1 = a(u - x_1) \quad (4.11)$$

$$\dot{x}_2 = b \left( 1 - \left( \frac{x_2}{x_1} \right)^2 \right) \quad (4.12)$$

Ako výstupná veličina bude uvažovaný prietok turbínou  $q$ , pretože mechanický výkon turbíny má neminimálne fázový charakter. Návrh nelineárneho regulátora pomocou metódy spätnoväzobnej linearizácie nezaručuje konvergenciu riešenia u systémov s neminimálne fázovým charakterom. Pokiaľ má turbína pri nulovom prietoku nulový výkon je možné prepísať vzťah pre mechanický výkon turbíny nasledovne:

$$P_m = hq \quad (4.13)$$

Z hľadiska hodnoty ustáleného stavu je vidieť, že  $x_{1ust} = x_{2ust}$  a teda  $h_{ust} = 1$ . V ustálenom stave je potom  $P_{musr} = h_{ust} x_{2ust}$  a teda referenčná hodnota výkonu  $P_{mref} = x_{2ref}$ .

#### 4.2.1. Odvodenie nelineárneho regulátora prietoku pomocou metódy vstupno-výstupnej spätnoväzobnej linearizácie s uvažovaním vplyvu všetkých stavov systému

Predchádzajúci návrh regulátora prietoku (mechanického výkonu) vodnej turbíny používal pre metódu vstupno-výstupnej spätnoväzobnej linearizácie len výstup systému  $x_2$ . Nasledujúci návrh používa pri návrhu regulátora obidva stavy systému. Výstup systému je:

$$y = x_2 \quad (4.14)$$

Derivácia výstupnej veličiny:

$$\dot{y} = \dot{x}_2 = b \left( 1 - \left( \frac{x_2}{x_1} \right)^2 \right) \quad (4.15)$$

Keďže v tomto vzťahu ešte nie je prítomný vstup systému  $u$ , je nutné derivovať výstupnú veličinu ešte raz:

$$\ddot{y} = \ddot{x}_2 = b \left( 1 - \left( \frac{x_2}{x_1} \right)^2 \right) = -2b \frac{x_2}{x_1} \left( \frac{\dot{x}_2 x_1 - \dot{x}_1 x_2}{x_1^2} \right) = -2b \frac{1}{x_1^2} x_2 \dot{x}_2 + 2b \frac{1}{x_1} h a u - 2b h a = v \quad (4.16)$$

Zo vzťahu (4.16) je potom odvodená rovnica linearizácie pre  $u$ :

$$u = \frac{v x_1^2 + 2b x_2 \dot{x}_2 + 2ab h x_1^2}{2ab h x_1} \quad (4.17)$$

Rád systému je rovný relatívnemu rádu, teda nie je prítomný žiaden vnútorný stav a teda je splnená podmienka konvergencie metódy spätnoväzobnej linearizácie nelineárneho riadenia. Rovnica lineárneho regulátora je zvolená nasledovne:

$$v = -k_1 e - k_2 \dot{e} \quad (4.18)$$

Pričom:

$$e = x_2 - x_{2ref} \quad (4.19)$$

#### 4.2.2. Dôkaz stability nelineárneho regulátora prietoku s uvažovaním vplyvu všetkých stavov systému pomocou priamej metódy Lyapunova

Pomocou Lyapunovovej metódy stability ukážeme odvodenie stability systému pre navrhnuté riadenie. Lyapunovova funkcia je zvolená nasledovne:

$$V(x_2, \dot{x}_2) = k_1 \frac{x_2^2}{2} + \frac{\dot{x}_2^2}{2} \quad (4.20)$$

Funkcia (4.20) spĺňa podmienku 1 pre  $k_1 > 0$  lebo  $V(x_2, \dot{x}_2) > 0$  a je spojitá a diferencovateľná na  $R^n$ . Rovnako funkcia (4.20) spĺňa podmienku 2 lebo Derivácia Lyapunovovej funkcie:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x_2, \dot{x}_2) &= k_1 x_2 \dot{x}_2 + \dot{x}_2 \ddot{x}_2 = k_1 x_2 \dot{x}_2 + \dot{x}_2 v = \dot{x}_2 (k_1 x_2 + v) \\ &= \dot{x}_2 (k_1 x_2 + v) = \dot{x}_2 (k_1 x_2 - k_1 x_2 - k_2 \dot{x}_2) = -k_2 \dot{x}_2^2 \end{aligned} \quad (4.21)$$

Derivácia Lyapunovovej funkcie je záporná a podmienka stability 3 je splnená.

### 5. Overenie regulačných vlastností centralizovaného regulátora ostrovnej prevádzky

Regulačné vlastnosti navrhnutého riadenia boli overené nasledujúcimi experimentmi. Navrhnuté centralizované riadenie je porovnávané so zavedenou štruktúrou riadenia v ESSR.

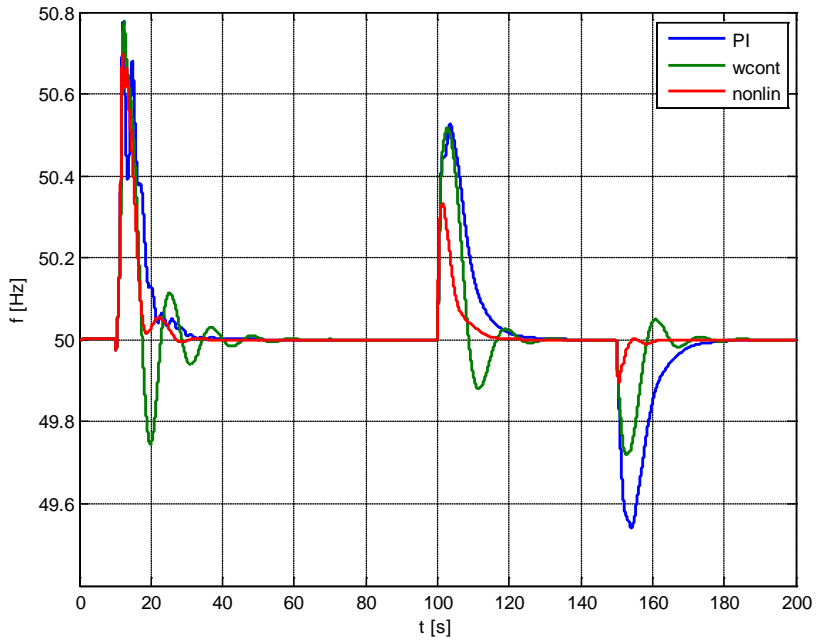
#### 5.1. Experiment 1 - Porovnanie vlastností regulácie

Experiment 1 sa zaoberá porovnaním regulačných vlastností decentralizovaného prístupu regulácie frekvencie v ostrovnej prevádzke a centralizovaného prístupu. Ako porovnávací experiment sú vybrané nasledovné poruchové stavy počas simulačného experimentu:

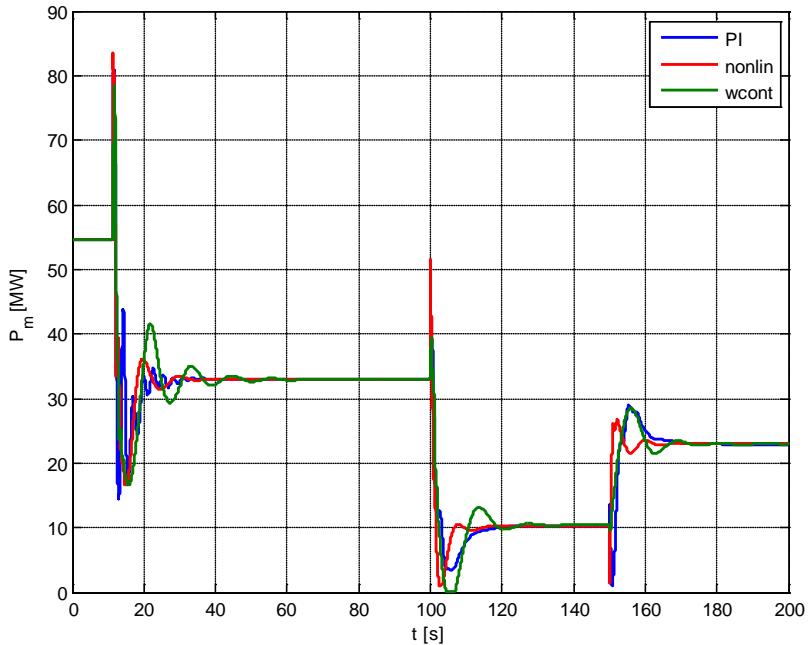
- Výpadok do ostrova v 10 s, Strata 82MW záťaže v 100 s, Strata najväčšieho vodného zdroja v 150 s, s výrobou 30 MW po výpadku záťaže v 100 s

Porovnávané štruktúry pri experimente 1:

- Klasická PI regulácia otáčok, označovaná v obr. ako *wcont*
- PI regulátor ostrovnej prevádzky, označovaný v obr. ako *PI*
- Nelineárny regulátor ostrovnej prevádzky, označovaný v obr. ako *nonlin*



Obr. 5.1. Simulačné výsledky pre experiment 1 – frekvencia sústavy



Obr. 5.2. Simulačné výsledky pre experiment 1 – mechanický výkon turbíny na stroji EGA1

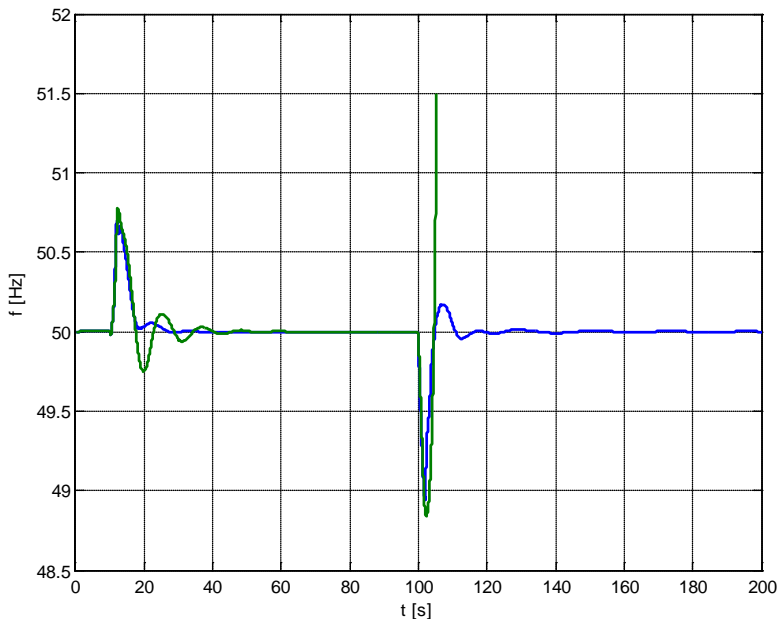
Po vytvorení ostrovej prevádzky odpojením od prepojeného celku cez vedenia V497 a V448 v 10 s musí byť vyrovnaná nerovnováha medzi výrobou a spotrebou činného a jalového výkonu. Riadenie výkonu a frekvencie je prepnuté do režimu ostrovej prevádzky. Frekvencia vo všetkých troch vyšetovaných prípadoch dosiahne svoje maximum v 2.5 s po poruche, pričom odchýlka frekvencie pri použití štruktúry s označením *nonlin* je nižšia o 100 mHz. Regulačný proces je ukončený pri štruktúrach používajúcich centrálnu riadenie za 20 s od vytvorenia ostrova. Štruktúra riadenia s otáčkovým regulátorom ukončí regulačný proces za 50 s od vytvorenia ostrova. Vo všetkých prípadoch je trvalá regulačná odchýlka nulová. Keďže váhy, cez ktoré sú prepočítavané želané hodnoty regulátorov výkonu turbín zúčastnených na centrálnej regulácii frekvencie sú rovnaké a nastavenie parametrov regulátorov otáčok turbín je tiež rovnaké, vo všetkých prípadoch je mechanický výkon, na ktorý zareguluje turbína rovnaký. Výpadok záťaže v 100 s spôsobí nárast frekvencie pri prípadoch so štruktúrou riadenia turbín v otáčkovej regulácii. Pri použití nelineárnej formy centralizovaného riadenia je nárast odchýlky frekvencie 320 mHz. Doba regulácie je rovnako nižšia ako v ostatných dvoch prípadoch. Jedna z turbín regulujúcich frekvenciu vo vzniknutej ostrovej prevádzke musí zmeniť svoj výkon na

nulový pre odľahčenie prebytku výkonu výroby. S týmto obmedzením sa nedokážu vysporiadať ostatné prípady okrem nelineárneho centralizovaného riadenia frekvencie, nakoľko toto riadenie prepočítava participačné koeficienty turbín v každom kroku simulácie. Poslednou časťou experimentu 1 je strata najväčšieho vodného zdroja s výrobou 30 MW. V tejto časti je najjednoduchšie pozorovať rozdiel medzi vyšetrovanými prípadmi. V prípade s riadením frekvencie vo forme otáčkovej regulácii turbín je pokles frekvencie 280 mHz. Najlepšie sa s poruchou vysporiada centralizovaná riadiaca štruktúra frekvencie s nelineárnou formou riadenia.

## 5.2. Experiment 4 - Výpadok paroplynového zdroja v ostrovej prevádzke s vplyvom FO

Náhle odpojenie väčšieho paroplynového zdroja *ppc\_power* znamená pre ES stratu 120 MW výroby. Experiment dokumentuje priebeh počas takejto rozsiahlej poruchy na strane výroby. Porovnávané štruktúry pri experimente 3:

- Klasická PI regulácia otáčok
- Nelineárny regulátor ostrovej prevádzky



Obr. 5.3. Simulačné výsledky pre experiment 4 – frekvencia sústavy

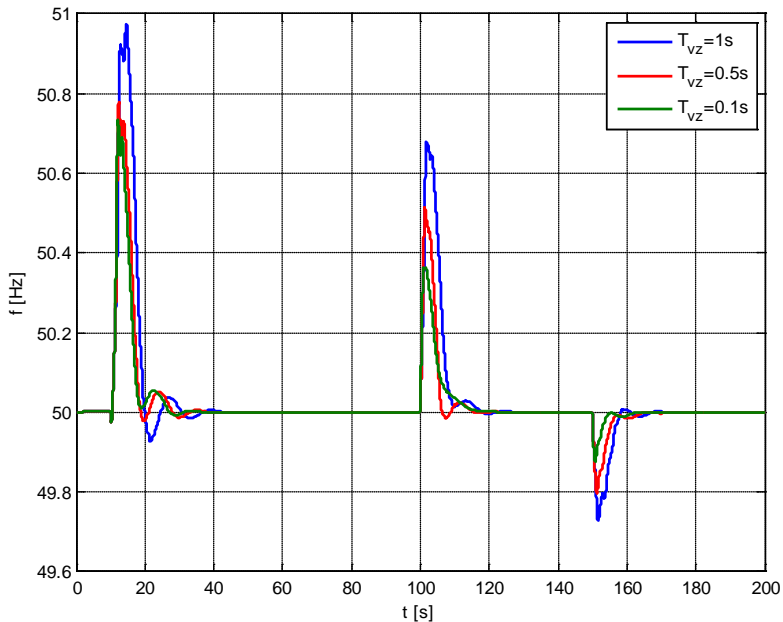


Výpadok väčšieho paroplynového zdroja má za následok pri použití riadenia frekvencie vo forme otáčkovej regulácie reakciu nadfrekvenčných ochrán generátorov a blackout sústavy. K stabilizácii nepomôže ani reakcia frekvenčného odľahčovania ES. Centralizované nelineárne riadenie frekvencie situáciu po vyniknutej poruche stabilizuje a nie je jeho následkom aktivácia ochrán generátorov, pričom je aktivovaný prvý stupeň frekvenčného odľahčovania záťaže o veľkosti 72 MW.

### 5.3. Experiment 7 - Vzorkovanie vstupných signálov centralizovaného regulátora ostrovej prevádzky s periódou 1s.

Momentálny stav merania veličín v ESSR umožňuje meranie s periódou vzorkovania 1s. Z uvedeného dôvodu je dôležité verifikovať navrhnutý centralizovaný regulátor s rozdielnou periódou vzorkovania vstupných a výstupných signálov. Scenár experimentu je rovnaký ako v kap. 5.1. Perióda vzorkovania vstupných signálov je nastavená nasledovne:

- a) Perióda vzorkovania  $T_{vz} = 1\text{ s}$
- b) Perióda vzorkovania  $T_{vz} = 0.5\text{ s}$
- c) Perióda vzorkovania  $T_{vz} = 0.1\text{ s}$



Obr. 5.4. Simulačné výsledky pre experiment 7 – frekvencia sústavy

Nastavenie periódy vzorkovania vstupných signálov centralizovaného nelineárneho riadenia frekvencie ES má významný vplyv na kvalitu regulácie. Toto nastavenie do veľkej miery ovplyvňuje veľkosť odchýlky frekvencie. Periódu vzorkovania by bolo možné znižovať do hranice 20 ms, teda  $1/f_n$ , pri ktorej sú snímané otáčky turbíny, resp. frekvencia svorkového napätia generátora. Pribeh frekvencie pre  $T_{vz} = 0.1$  s zobrazený na obr. 5.4 má porovnateľné kvalitatívne regulačné vlastnosti ako priebehy pri predchádzajúcom spojitom meraní veličín.

## 6. Záver

Účelom tejto práce bolo zdokumentovať postupy a navrhnúť riadenie pri riešení krízových stavov elektrizačných sústav. Dominantný vplyv pre riadenie takýchto stavov majú riadiace štruktúry turbín (regulátory pre ostrovnú prevádzku, otáčkové regulátory, špeciálne regulačné slučky v regulátoroch výkonov ...) a systémy pre frekvenčné odľahčovanie. Tieto nástroje majú za úlohu zabrániť frekvenčnému kolapsu sústavy.

Teoretický základ práce tvorí kap. 2. Prvá časť tejto kapitoly pojednáva o modelovaní ES, o modeli generátora o regulátoroch SG a turbín, fyzikálnych modeloch a vlastnostiach turbín a elektrární etc. Turbíny sú podľa fyzikálnej podstaty rozdelené na: vodné, parné a plynové. K uvedeným typom turbín sú popísané reálne riadiace štruktúry alebo riadiace štruktúry, ktoré boli zatiaľ len predmetom publikácii pri snahe o ich vylepšenie. Pre riadenie frekvencie v ostrovnej prevádzke má význam využiť len vodné zdroje nakoľko tepelné, jadrové atď. zdroje dokážu meniť svoj výkon výrazne pomalšie bez uvažovania rýchleho ventilovania.

V kapitole sú ďalej opísané riadiace štruktúry pre riadenie ostrovnej prevádzky. Tieto riadiace štruktúry sú typické pre každého prevádzkovateľa sústavy, avšak samotná regulácia otáčok má niektoré spoločné črty. Táto časť práce ďalej pojednáva o poruche typu blackout a o jej historicky najznámejších prípadoch vo svete. Ďalej sú rozobrané pravidlá pre frekvenčný a obranný plán ESSR a ENTSOE.

Poslednou teoretickou časťou práce je teória nelineárneho riadenia pomocou spätnoväzobnej linearizácie a Lyapunovova teória stability. Pomocou metódy spätnoväzobnej linearizácie sú navrhované v práci regulátory výkonu a frekvencie. Tieto návrhy sú podporené Lyapunovovou teóriou stability.

Pre návrh a syntézu riadenia ES v ostrovnej prevádzke bol vytvorený model vyhradenej časti ESSR popísaný v kap. 3.1. Tento model obsahuje základné stavebné bloky ES, napr. transformátory, vedenia, generátory a riadiace štruktúry SG. Modelovaná vyhradená časť ESSR je zaťažená 484 MW spotreby činného výkonu, pričom 127 MW výroby je exportovaných do zahraničnej siete ES Maďarska. Cez vyhradenú časť ESSR je modelovaný tranzitný tok o veľkosti 720 MW.

Záverečná kap. 4 bola venovaná hlavne riadiacej štruktúre regulátora ostrovnej prevádzky a experimentálnej verifikácii riadenia frekvencie v ostrovnej prevádzke. Centralizované riadenie frekvencie v ostrovnej prevádzke zlepšuje kvalitatívne vlastnosti regulácie frekvencie oproti decentralizovaným štruktúram riadenia opísaným v kap. Jednou z nevýhod centralizovaného riadenia s nelineárnym regulátorom je vyššia technická náročnosť pri realizácii, nakoľko regulátor otáčok turbíny je prítomný na všetkých turbínach. Problematickými sú jeho technická náročnosť z hľadiska merania veličín a potrebných parametrov pre správnu funkčnosť regulátora.

Pre použitie vodných zdrojov v centralizovanej regulácii frekvencie bolo potrebné pre ne navrhnúť regulátory výkonu, ktoré by potlačali nelineárne správanie mechanického výkonu vodnej turbíny. Z tohto dôvodu bola použitá metóda spätnoväzobnej linearizácie pre návrh riadenia mechanického výkonu týchto zdrojov.

Centralizovaná regulácia frekvencie bola potom overená simulačnými experimentmi opísanými v kap. 5. Tento systém riadenia môže zvýšiť bezpečnosť ES v ostrovnej prevádzke pokiaľ budú dobre zidentifikované koeficienty zotrvačnosti generátorov a turbín, pokiaľ bude zabezpečené stabilné meranie mechanického a elektrického výkonu elektrární a tento systém bude zabezpečený proti poruchovým stavom stavu pripojenia a odpojenia elektrárne. Implementácia takýchto postupov môže potom zlepšiť obranyschopnosť elektrizačnej sústavy alebo minimalizovať prípadné škody pri rozsiahlych poruchách a urýchliť obnovu prevádzky ES.

### **Zoznam publikácií autora:**

Murgaš, Ján - Ernek, Martin: Blackstart of Combined Cycle Power Plants in Slovak Power System. In Internatianol Review of Automatic Control (IREACO) - ISSN 1974-6059. - Vol. 6, No. 2 (2013), s. 201-205

Foltin, Martin - Ernek, Martin: Matlab (7) SimPowerSystems. In: AT&P Journal. - ISSN 1335-2237. - Roč. 16, č. 11 (2009), s. 64-65

Murgaš, Ján - Poliačik, Michal - Ernek, Martin: Effective Speed Controller in Island Operation. In: AT&P Journal Plus. - ISSN 1336-5010. - č. 2. Riadenie v energetike (2008), CD-Rom

Murgaš, Ján - Ernek, Martin: Význam veľkých vodných elektrární v havarijnom riadení ES. In: ATP Journal. - ISSN 1335-2237. - Roč. 20, č. 1 (2013), s. 42-43

Poliačik, Michal - Ernek, Martin - Murgaš, Ján: Adaptívne riadenie dávkovania liečiv. In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. - ISSN 1335-2547. - Roč. 14, mimoriadne číslo (2008), s. 156-159

Blaho, Michal - Ozimy, Juraj - Ernek, Martin - Foltin, Martin : ZigBee Implementation in Railroad Model. In: Technical Computing Prague 2011 : 19th Annual Conference Proceedings. Prague, Czech Republic, November 8, 2011. -

Prague : Institute of Chemical Technology, 2011. - ISBN 978-80-7080-794-1. - CD-Rom

Eleschová, Žaneta - Beláň, Anton - Murgaš, Ján - Ernek, Martin: Influence of the Conditions of Power Lines Connection on Restoration of Power System after Blackout.

In: Electric Power Engineering 2009 : Proceedings of the 10th International Scientific Conference. Kouty nad Desnou, Czech Republic, 12.-14.5.2009. - Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009. - ISBN 978-80-248-1947-1. - CD-Rom

Ernek, Martin - Poliačik, Michal: Cooperation of Wind Power Plants with Slovak Power system. In: International Symposium "Energetics 2008" : Ohrid, Macedonia, 9.-11.10.2009. - : Association of Energy Department Engineers of Macedonia, 2008. - S. 8 s.

Ernek, Martin - Foltin, Martin : Power Extension LibraryIn: Technical Computing Prague 2009 : 17th Annual Conference Proceedings. Prague, Czech Republic, 19.11.2009. - Prague : Humusoft, Ltd., 2009. - ISBN 978-80-7080-733-0. - CD-Rom

Ernek, Martin - Foltin, Martin : Primary Control of Voltage and Power in Slovak Power System. In: Technical Computing Prague 2008 : 16th Annual Conference Proceedings. Prague, Czech Republic, 11.11.2008. - Praha : Humusoft s.r.o, 2008. - ISBN 978-80-7080-692-0. - CD-Rom

Foltin, Martin - Ernek, Martin: Model of Slovak Power System Using Simpowersystem. In: Technical Computing Prague 2007 : 15th Annual Conference Proceedings. Prague, Czech Republic, 14.11.2007. - Praha : Humusoft s.r.o, 2007. - ISBN 978-80-7080-658-6. - CD-Rom

Foltin, Martin - Ernek, Martin - Hnát, Juraj: Simpowersystem in Education. In: Technical Computing Prague 2006 : 14th Annual Conference Proceedings. Praha/ČR/, 26.10.2006. - Praha : Humusoft s.r.o, 2006. - ISBN 80-7080-616-8. - CD-Rom

Pavlúsová, Andrea - Foltin, Martin - Ernek, Martin: Modelling of Heating Systems. In: Technical Computing Prague 2009 : 17th Annual Conference Proceedings. Prague, Czech Republic, 19.11.2009. - Prague : Humusoft, Ltd., 2009. - ISBN 978-80-7080-733-0. - CD-Rom

Poliačik, Michal - Ernek, Martin: Qualitative Aspects of Wind Energy. In: International Symposium "Energetics 2008" : Ohrid, Macedonia, 9.-11.10.2009. - : Association of Energy Department Engineers of Macedonia, 2008. - S. 6 s.

Ernek, Martin - Murgaš, Ján - Gramblička, Miroslav: Dynamic Characteristics Analysis of Power System in Island Operation. In: Power Engineering 2010. International Scientific Event. - Bratislava : STU v Bratislave. - Power Engineering 2010. Control of Power Systems : 9th International Scientific Conference. Tatranské

Matliare, Slovak Republic, 18.-20.5. 2010. - Bratislava : STU v Bratislave, 2010. - ISBN 978-80-89402-25-0, CD-Rom[7]

Foltin, Martin - Ernek, Martin - Murgaš, Ján: Model of 400 kV Slovak Power System. In: Kybernetika a informatika 2008 : Medzinárodná konferencia SSKI. Ždiar, Slovenská republika, 10.-14. február 2008. - Bratislava : STU, 2008. - ISBN 978-80-227-2828-7. - CD-Rom

Ilka, Adrian - Ernek, Martin: Modeling and Control System of Wind Power Plants with Pumped Storage Hydro Power Plant. In: Renewable Energy Sources 2013 : 4th International Scientific Conference OZE 2013. Tatranské Matliare, Slovakia, May 21-23, 2013. - Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2013. - ISBN 978-80-89402-64-9. - S. 495-500

Ilka, Adrian - Ernek, Martin: Modelovanie veternej turbíny pomocou MatLab/SimPower Systems. In: ŠVOČ 2011 : Študentská vedecká a odborná činnosť. Zborník vybraných prác. Bratislava, Slovak Republic, 4.5.2011. - Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2011. - ISBN 978-80-227-3508-7. - S. 355-361

Murgaš, Ján - Ernek, Martin: Blackstart of Combined Cycle Power Plants in Slovak Power System. In: Power Engineering 2012. Control of Power Systems 2012 [elektronický zdroj] : 10th International Scientific Conference CPS 2012. Tatranské Matliare, Slovakia, May 15-17, 2012. - Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2012. - ISBN 978-80-89402-47-2. - S. 183-184

Murgaš, Ján - Poliačik, Michal - Ernek, Martin: Effective Speed Controller in Islands Operation. Control of Power Systems '08 : 8th International Conference. Štrbské Pleso, Slovak Republic, 11.-13.6.2008. - Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2008. - ISBN 978-80-227-2883-6. - CD-Rom

Murgaš, Ján - Ernek, Martin: Optimization of PSS Parameters. In: Power Engineering 2012. Control of Power Systems 2012 [elektronický zdroj] : 10th International Scientific Conference CPS 2012. Tatranské Matliare, Slovakia, May 15-17, 2012. - Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2012. - ISBN 978-80-89402-47-2. - S. 179-180

Murgaš, Ján - Miklovičová, Eva - Ernek, Martin - Gramblička, Miroslav: Power System Emergency Control. In: Power Engineering 2010. International Scientific Event. - Bratislava : STU v Bratislave. - Power Engineering 2010. Control of Power Systems : 9th International Scientific Conference. Tatranské Matliare, Slovak Republic, 18.-20.5. 2010. - Bratislava : STU v Bratislave, 2010. - ISBN 978-80-89402-25-0, CD-Rom[9]

Murgaš, Ján - Ernek, Martin - Farkas, Ľudovít - Hnát, Juraj - Murgaš, Tomáš: Lekárska kybernetika v službách zvyšovania kvality života. In: Transfer. - ISSN 1337-9747. - Roč. 4, č. 3 (2012), s. 14-15

### Zoznam literatúry:

- [1] Concordia, C.: Synchronous Machines, Theory and Performance, Wiley, New York, 1951.
- [2] J. Machowski, J.W. Bialek, J.R. Bumby, Power System Dynamics Stability and Control Second Edition, John Wiley And Sons, Ltd., 2008
- [3] The MathWorks, "SimPowerSystems User's Guide, version 5.7", 2012
- [4] M.K. Pal, "Lecture Notes on Power System Stability", Edison, New Jersey, June, 2007
- [5] P. Kundur, "Power System Stability and Control", New York: McGraw- Hill, 1994
- [6] T. Van Cutsem and C. Vournas, Voltage Stability of Electric Power Systems. Norwell, MA: Kluwer, 1998.
- [7] N. Hatziaargyriou, E. Karapidakis, D. Hatzifotis, "Frequency stability of power system in large islands with high wind power penetration", Bulk Power System Dynamics Control Symposium - IV Restructuring, vol. PAS-102, Aug. 24–28, 1998, Santorini, Greece.
- [8] ENTSOE, "P1 – Policy 1: Load-Frequency Control and Performance",  
[http://www.entsoe.eu/library/publications/ce/oh/Policy1\\_final.pdf](http://www.entsoe.eu/library/publications/ce/oh/Policy1_final.pdf)
- [9] SEPS a.s., "Technické Podmienky Pre Pripojenie, Prístup A Prevádzkovanie Prenosovej Sústavy Dokument E prílohy",  
[http://www.sepsas.sk/seps/Dokumenty/TechnickePodmienky/TP\\_E\\_SED\\_08\\_2008.pdf](http://www.sepsas.sk/seps/Dokumenty/TechnickePodmienky/TP_E_SED_08_2008.pdf)
- [10] J. Murgaš a kol., "Správa o výpočtoch k inovácii Plánu obnovy prevádzky ES SR po poruche typu „Blackout“", Správa k ZoD 2010-0192-1171510, 2011
- [11] J. W. Bialek, "Blackouts in the US/Canada and continental Europe in 2003: is liberalisation to blame?", Power Tech, 2005 IEEE Russia, 2005
- [12] Y. V. Makarov, V. I. Reshetov, V. A. Stroeve, N. I. Voropai, "BLACKOUTS IN NORTH AMERICA AND EUROPE: ANALYSIS AND GENERALIZATION", Power Tech, 2005 IEEE Russia, 2005
- [13] ENTSOE, (2004, Jún) ENTSOE G – Glossary [E],  
[http://www.entsoe.eu/library/publications/ce/oh/glossary\\_v22.pdf](http://www.entsoe.eu/library/publications/ce/oh/glossary_v22.pdf)

- [14] NERC, Joint Glossary Working Group, NPCC Glossary of Terms, 2007
- [15] SEPS a.s., Dispečerský poriadok pre riadenie elektrizačnej sústavy SR, 2007
- [16] K. Máslo, “Dynamický Model ES Pro Dispečerský Trenažér”, Control of Power & Heating Systems 2006, p23 – 1 - p23 – 16, 2006
- [17] J. Murgaš, J. Bízik, L. Jurišica, V Veselý, Š. Kozák, D. Mudrončík, I. Sekaj, M. Bartková, “Identifikácia Parametrov Regulátorov Napätia A Výkonu Evo, Teko, Eno, Ved, Vet”, Správa k ZOD 56/260/96, Bratislava, Október 1996
- [18] S. Granfors, “Online testing of generating units on their ability to regulate frequency during restoration of an islanded grid”, Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE
- [19] ENTSOE, “Load-Frequency Control And Performance Appendix 1”,  
[http://www.entsoe.eu/fileadmin/user\\_upload/library/publications/ce/oh/appendix1\\_v19.pdf](http://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/library/publications/ce/oh/appendix1_v19.pdf), 2004
- [20] J.J.E. Slotine, W. Li, Applied nonlinear control, Prentice hall, Inc. , 1991