

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Provozování bloku Jaderné elektrárny Temelín mimo nominální výkon

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal ROTBAUER**
Osobní číslo: **E12N0134P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Jaderná elektroenergetika**
Název tématu: **Provozování bloku Jaderné elektrárny Temelín mimo nominální výkon**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Shrňte současnou problematiku provozování přenosové elektrizační sítě a jí dopady na výrobní blok JETE.
2. Vyhodnoťte manévrovací schopnosti bloku JETE při změně výkonu dle požadavku nadřazené soustavy.
3. Uveďte možnosti provozu výrobního bloku JETE v ostrovním režimu.
4. Proveďte simulaci přechodného jevu při přepnutí výrobního bloku do ostrovního provozu.
5. Analyzujte dopady provozu elektrárny pod nominálním výkonem na technologickou a jadernou část JETE.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce pojednává o možnostech regulace výkonu Jaderné elektrárny Temelín na požadavek nadřazené soustavy a o schopnosti bloku převzít napájení při rozpadu sítě do ostrovního režimu. Jsou zde uvedena technologická omezení, která doprovázejí změny výkonu bloku. Součástí práce jsou simulace daných přechodových jevů v simulačním programu DYTE.

Klíčová slova

Jaderná elektrárna, Temelín, regulace výkonu, regulace frekvence, přenosová soustava, ostrovní režim, kinetika reaktoru, primární regulace, sekundární regulace, terciální regulace, axiální ofset

Abstract

This diploma thesis deals with infinite control of the Nuclear Power Plant at the request of the transmission system, and the ability to assume power in the disintegration of networks in island operation. There are described technological limitations, that are caused by changes in power. In conclusion, there are a simulation of the transients in simulation program DYTE

Keywords

Nuclear power plant, Temelin, power control, frequency control, transmission system, island mode, reactor kinetics, primary control, secondary control, tertiary kontrol, axial offset

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 7.5.2014

Bc. Michal Rotbauer

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce paní Ing. Janě Jiříčkové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval všem konzultantům za jejich vstřícný přístup i věnovaný čas a také mému bratrovi, který mi poskytl potřebné materiály.

Obsah

OBSAH.....	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	12
ÚVOD.....	13
PROVOZ ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY	14
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY ES.....	14
1.2 VÝKONOVÁ BILANCE.....	15
1.3 KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE	15
1.4 REGULACE FREKVENCE NA STRANĚ VÝROBY	18
1.5 PRINCIP REGULACE FREKVENCE.....	19
1.6 REGULACE NAPĚTÍ NA STRANĚ VÝROBY	20
1.7 PŘETOKY V PROPOJENÝCH ES.....	20
1.8 ZÁPORNÁ CENA ELEKTRINY.....	21
2 MANÉVROVATELNOST BLOKU.....	23
2.1 REGULACE VÝKONU JADERNÉHO REAKTORU	23
2.1.1 Základy reaktorové fyziky	23
2.1.2 Regulační orgány	25
2.1.3 Kinetika reaktoru.....	26
2.1.4 Zpětné vazby.....	28
2.1.5 Xenonová otrava	30
2.1.6 Axiální ofset.....	31
2.2 REGULACE VÝKONU JADERNÉHO BLOKU	33
2.2.1 Princip regulace výkonu jaderného bloku	35
2.2.2 Provoz bloku na výkonu.....	40
2.2.3 Primární regulace	42
2.2.4 Sekundární regulace.....	43
2.2.5 Terciální regulace	44
2.2.6 Regulace napětí.....	45
2.2.7 Dopady na technologickou a jadernou část.....	45
3 OSTROVNÍ REŽIM	46
3.1 SCHOPNOST OSTROVNÍHO PROVOZU	46
3.1.1 Přechod do ostrovního provozu	47
3.1.2 Ostrovní provoz.....	47
3.1.3 Opětovné připojení ostrova k soustavě.....	48
3.2 REGULÁTOR OSTROVNÍHO PROVOZU (ROP)	48
3.3 FREKVENČNÍ OCHRANY	49
3.3.1 Frekvenční relé FREA16	49
3.3.2 Ochrana při převýšení zrychlení.....	49

3.3.3	<i>Frekvenční odlehčování</i>	49
3.3.4	<i>UPR - Ochrana reaktoru od podfrekvence HCČ</i>	50
4	SIMULACE OSTROVNÍHO PROVOZU	51
4.1	SIMULAČNÍ PROGRAM DYTE [15].....	51
4.2	SIMULOVANÉ PRŮBĚHY	52
4.2.1	<i>Přechod do ostrova 500 MW</i>	53
4.2.2	<i>Přechod do ostrova 440 MW</i>	55
4.2.3	<i>Přechod bloku na VS</i>	57
4.3	PODFREKVENČNÍ OCHRANA UPR	59
4.4	SHRNUTÍ SIMULACÍ	62
5	ZÁVĚR	63
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	64
6	SEZNAM PŘÍLOH	1

Seznam symbolů a zkratk

AČ.....	Akční člen
AFD	Axial flux difference
AO.....	Axiální ořet
ASRU.....	Automatická sekundární regulace U/Q
AZ.....	Aktivní zóna
BD.....	Bloková dozorna
CAOC	Constant Axial Offset Control
ČEPS.....	Česká přenosová soustava
DP	Diplomová práce
DS	Distribuční soustava
ED.....	Energetický dispečink
EDU	Elektrárna Dukovany
ENTSO-E.....	Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny
ES.....	Elektrizační soustava
ETE.....	Elektrárna Temelín
HCC	Hlavní cirkulační čerpadlo
HDO.....	Hromadné dálkové ovládání
HK.....	Hlavní kondenzátor
HO.....	Havarijní odstavení
HPK	Hlavní parní kolektor
I.O.....	Primární okruh
II.O.....	Sekundární okruh
JB.....	Jaderný blok
JE	Jaderná elektrárna
<i>k</i>	Koeficient násobení
KO.....	Kompenzátor objemu
<i>l</i>	Střední doba života generace neutronů
LS.....	Limitační systém
MSO.....	Měnič středních otáček
<i>n</i>	Neutron
N	Neutronový tok

NN.....	Napájecí nádrž
OR.....	Organizátor řízení
OSP	Ostrovní provoz
OZE.....	Obnovitelné zdroje energie
PG	Parogenerátor
PNČ.....	Pomocné napájecí čerpadlo
PpS.....	Podpůrná služba provozu PS
PS.....	Přenosová soustava
PSK	Přepouštěcí stanice do kondenzátoru
PT.....	Primární transformátor
R _N	Regulace tepelného výkonu od reaktoru
ROP.....	Regulátor ostrovního provozu
ROR	Rychlé odstavení reaktoru
R _P	Regulace tlaku od reaktoru
RP	Regulační pásmo
RR	Regulační rozsah
R _T	Regulace turbíny od reaktoru
RZV	Rychlozávěrný ventil TG
S.....	Zdroj neutronového toku
TBN	Turbonapaječka
TELETE	Telekomunikační terminál ETE
TG.....	Turbogenerátor
TG _N	Regulace tepelného výkonu od turbogenerátoru
TG _P	Regulace tlaku od turbogenerátoru
UPR.....	Podvýkonové relé HCC
ÚZN	Úplná ztráta napájení
VN.....	Vysoké napětí
VRB	Vrchní reaktorového bloku
VS	Vlastní spotřeba
VVER.....	Tlakovodní reaktor chlazený a moderovaný vodou
VVN.....	Velmi vysoké napětí
β	Podíl zpožděných neutronů
ρ	Reaktivita

Seznam obrázků a tabulek

- Obrázek 1: Základní části ES
- Obrázek 2: Denní diagram spotřeby
- Obrázek 3: Vliv P a Q na parametry sítě
- Obrázek 4: Regulace ES
- Obrázek 5: Blokové schéma řízení otáček
- Obrázek 6: Regulace frekvence
- Obrázek 7: Přetoky v ES ČR
- Obrázek 8: Křivka nákladů bez podpory
- Obrázek 9: Výsledná křivka nákladů s podporou
- Obrázek 10: Štěpná řetězová reakce
- Obrázek 11: Stav koeficientu násobení
- Obrázek 12: Kinetika jaderného reaktoru
- Obrázek 13: Vliv zpětných vazeb při zvyšování výkonu
- Obrázek 14: Reakce xenonu na změnu výkonu
- Obrázek 15: Průběh a kompenzace axiálních oscilací
- Obrázek 16: Obecné schéma JE a akční členy
- Obrázek 17: Přechodové křivky režimu „K“
- Obrázek 18: Pásma regulace JETE
- Obrázek.19: Principiální schéma digitálního regulátoru
- Obrázek.20: Výkon bloku po přechodu do OSP 500 MW
- Obrázek.21: Tlak v HPK po přechodu do OSP 500MW
- Obrázek.22: Polohy regulačních tyčí po přechodu do OSP 500 MW
- Obrázek.23: Tlak v KO po přechodu do OSP 500 MW
- Obrázek.24: Výkon bloku po přechodu do OSP 440 MW
- Obrázek.25: Tlak v HPK po přechodu do OSP 440 MW
- Obrázek.26: Polohy regulačních tyčí po přechodu do OSP 440 MW
- Obrázek.27: Tlak v KO po přechodu do OSP 440 MW
- Obrázek.28: Výkon bloku po přechodu na VS
- Obrázek.29: Tlak v HPK při přechodu na VS
- Obrázek.30: Tlak v KO a poloha RV při přechodu na VS
- Obrázek 31: Polohy regulačních tyčí při přechodu na VS
- Obrázek.32: Průběh frekvence ostrova 80% N_{nom}
- Obrázek.33: Pokles frekvence ostrova 80% N_{nom}
- Obrázek 34: Reakce UPR u různých OSP
- Tabulka 1: Trendy a rozsahy regulací JETE
- Tabulka 2: Stupně frekvenčního odlehčování
- Tabulka 3: Derivace frekvence

Úvod

Diplomová práce se zabývá provozem bloku Jaderné elektrárny Temelín, jakožto součástí elektrizační soustavy. V první části je shrnuta problematika provozu elektrizační soustavy, současné trendy jejího řízení, a dopady na způsob provozování jaderných bloků.

V další části je vyhodnocena manévrovací schopnost jak reaktoru, tak i celého bloku. Jsou zde uvedena technologická a jaderně bezpečnostní omezení, která ovlivňují manévrovatelnost bloku a možnost jeho zapojení do primární, sekundární a terciální regulace frekvence sítě.

V poslední části práce jsou uvedeny požadavky na ostrovní provoz. Je zde zhodnocena schopnost bloku zvládnout přechod do ostrovního provozu.

Součástí diplomové práce jsou simulace, které modelují přechodové děje, nastávající při přechodu bloku do ostrovního provozu o různých výkonových hladinách.

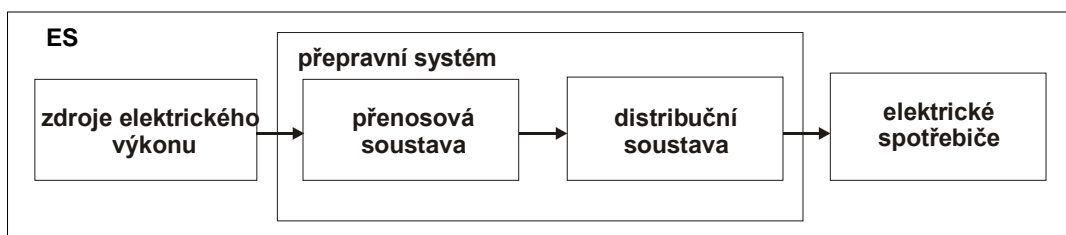
PROVOZ ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY

1.1 ZÁKLADNÍ POJMY ES

Úkolem elektrizační soustavy je zajistit nepřetržitou dodávku elektrické energie v požadované kvalitě všem koncovým zákazníkům.

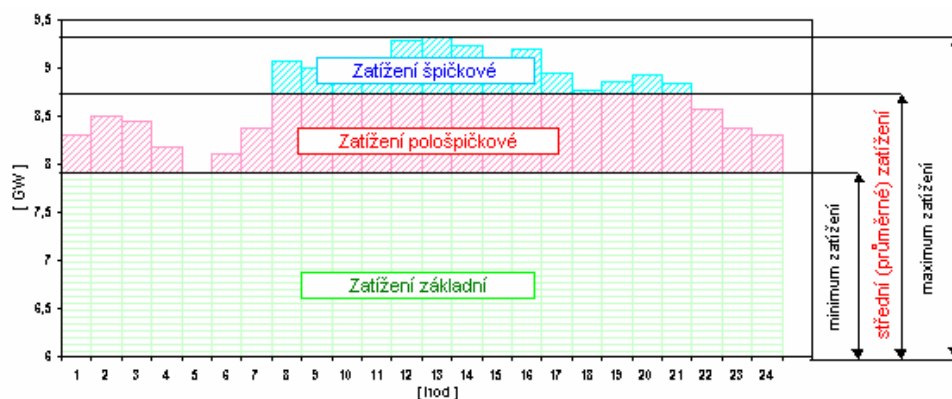
ES je složena ze třech základních podsystémů:

- Zdroje el. výkonu
- Přepavní systém
- Elektrické spotřebiče



Obrázek 1: Základní části ES [1]

- Zdroji elektrického proudu rozumíme elektrárenské bloky malých i velkých výkonů. Dělíme je z hlediska primárních zdrojů (uhelné, jaderné, vodní, ...) a pokrytí denního diagramu zatížení (základní, pološpičkové, špičkové).
- Přenosová soustava zajišťuje přenos elektrické energie na velké vzdálenosti. Za účelem snížení ztrát je zde elektrická energie přenášena na úrovni VVN (400 a 220 kV). Přenos výkonu po vedení velmi vysokého napětí má díky malým proudům nízké činné ztráty.
- Distribuční soustava slouží k přenosu elektrické energie ke koncovým uživatelům. V ČR je provozována na hladinách VVN, VN a NN (nejčastěji 110 a 22 kV).
- Spotřeba elektrické energie je vyjadřována závislostí spotřeby výkonu v čase (roční, týdenní, denní). Jelikož není možné do větší míry skladovat elektrickou energii, je nutné dobře predikovat aktuální spotřebu v ES, aby mohla být pokryta výrobou v elektrických zdrojích.



Obrázek 2: Denní diagram spotřeby [1]

1.2 VÝKONOVÁ BILANCE

PS je zodpovědná za udržení energetické rovnováhy mezi výrobou a spotřebou elektřiny a za její předání do DS v požadovaných kvalitativních parametrech. Ke splnění tohoto úkolu musí mít k dispozici regulační prostředky [1]. Mezi takové patří špičkové (regulační) elektrárny, které jsou schopny najet na požadovaný výkon v krátkém čase a pokrýt tak okamžitě poptávanou elektrickou energii. Takto vyrobená energie je ale velice drahá. Proto je kladen důraz na předvídaní spotřeby el. energie a omezení četnosti odchylek vyrobené el. energie od spotřebované.

Rovnováhu mezi výrobou a spotřebou lze vyjádřit základní bilanční rovnicí jalových a činných výkonů:

$$\vec{S}_v(t) = \vec{S}_s(t) + \vec{S}_z(t) + \vec{S}_a(t) \quad (1.2)$$

Kde:

- S_v je energie vyrobená
- S_s je energie spotřebovaná
- S_z energie přeměněná na ztráty
- S_a energie akumulovaná

Pokud bereme energii připadající na ztráty za konstantní, bilance systému se dá provádět pouze energií na straně spotřeby a výroby nebo využitím akumulovaných zásob energie.

Regulace na straně spotřeby je méně využívanou, neboť její rychlost je malá a rozsah značně omezený. Je velice obtížné ji řídit. Řídícími nástroji mohou být například HDO nebo zvýhodněné tarify, v krajních případech i řízené frekvenční odlehčování zátěže (velcí spotřebitelé).

Regulace pomocí akumulované energie je velice užívaná. Největší výhodou je rychlost a dobrá říditelnost. Oproti tomu je tato energie relativně drahá a její zásoby jsou omezené (např. přečerpávací elektrárny)

Regulace na straně výroby je ekonomicky nejvýhodnější a její rozsah je největší.

1.3 KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE

Udržování rovnováhy systému je důležité z hlediska udržení kvality elektrické energie. Hlavní ukazatele kvality el. energie jsou frekvence a napětí. Jakékoliv narušení bilanční rovnice má vliv na jejich přesně definované parametry. Proto jsou jasně stanoveny meze, ve kterých se musí parametry f a U bezpodmínečně pohybovat. Za kvalitu elektrické energie je zodpovědný provozovatel přenosové sítě, v ČR je to ČEPS. Musí být zajištěna nepřetržitá dodávka elektrické energie

v požadované kvalitě. Kvalitou se rozumí udržování hodnot U a f na stanovených parametrech. K tomuto slouží tzv. systémové služby přenosové sítě, jež mají za úkol:

1) Udržování kvality elektřiny [1]

- udržování souhrnné výkonové zálohy pro primární regulaci frekvence
- sekundární regulace frekvence a činného výkonu
- sekundární regulace napětí
- terciální regulace napětí
- zajištění kvality napěťové sinusovky
- zajištění stability přenosu
- kritéria pro posuzování kvality elektřiny vycházejí z platných technických norem

2) Udržování výkonové rovnováhy v reálném čase [1]

- sekundární regulace frekvence a činného výkonu
- terciální regulace výkonu
- dispečerské zálohy:
 - slouží pro pokrývání výkonové nerovnováhy, která vzniká tím, že účastníci trhu nejsou dlouhodobě (více než cca 2 hodiny) schopni dodržet plánované odběrové diagramy
 - pokrývají nedostatek výkonu vzniklého výpadkem zdrojů nebo větším odebíraným výkonem oproti sjednanému odběrovému diagramu, který provozovatelé zdrojů nebo uživatelé nejsou schopni nebo ochotni nahradit vlastními prostředky

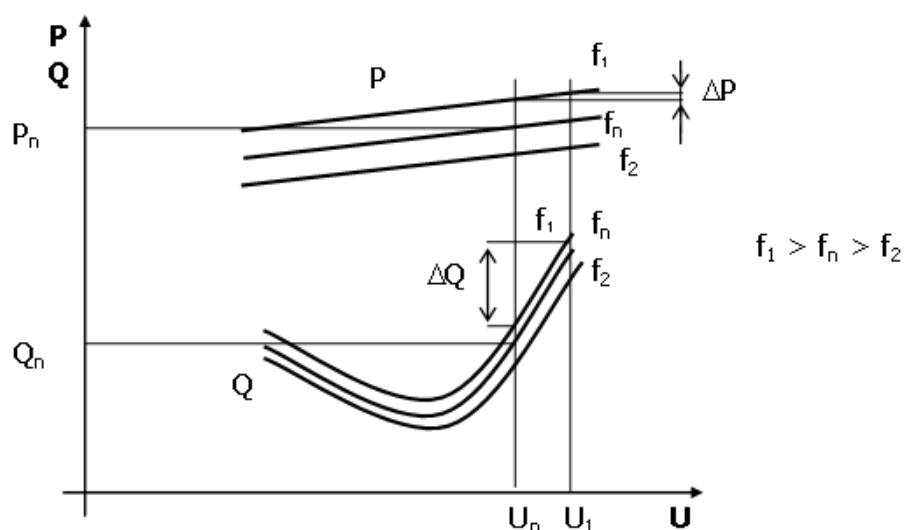
3) Obnovení provozu [1]

- Jako hlavní prostředek se využívá plán obnovy spolu se schopností ostrovního provozu a startu ze tmy
- proces skládající se z najetí bloků bez podpory napětí ze sítě (start ze tmy), postupné obnovy napětí sítě a napájení spotřebitelům dle předem určených priorit a dále z ostrovního provozu částí sítě a postupného sfázování ostrovních provozů
- v případě, že dojde k velké systémové poruše, která není zvládnuta běžnými prostředky (popsanými v plánu obrany proti šíření poruch), může nastat black-out, nebo-li dojít k úplnému nebo částečnému rozpadu soustavy
- v případě takovýchto poruch musí ČEPS zajistit obnovení provozu do normálního stavu. K tomuto účelu má vytvořený plán obnovy

4) Dispečerské řízení [1]

- Kromě uvedených prostředků zahrnuje tato služba ještě:
- zajišťování bezpečnosti provozu prostřednictvím plánu obrany a provozních instrukcí
- řízení propustnosti sítě (toků činných výkonů) pomocí zapojení sítě
- řízení redispečinku - změny vyráběného výkonu konkrétních elektrárenských bloků, které v případě změn vyráběného výkonu odlehčí přetěžované části přenosové soustavy

Nedodržování výkonové bilance přímo vede ke zhoršování kvality přenášené elektrické energie. Z Obrázku 3 je patrné, že narušení bilance činného výkonu způsobuje změnu převážně frekvence a narušení bilance jalového výkonu způsobuje změnu napětí v elektrizační soustavě. Na Obrázku 3 jsou znázorněny statické charakteristiky zatížení jako funkce napětí a frekvence.



Obrázek 3: Vliv P a Q na parametry sítě [1]

A platí závislost:

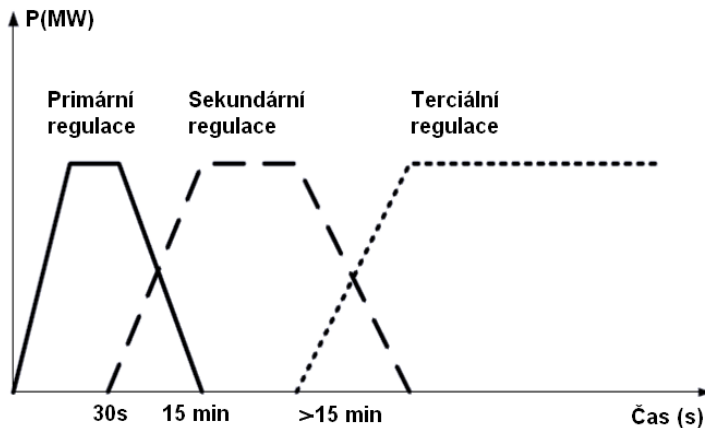
$$P = f(f) \text{ a } Q = f(U) \quad (1.3)$$

Regulace jalového výkonu může být prováděna lokálně, neboť velikost napětí je možno ovlivňovat na přípojních místech pomocí transformátorů.

Regulace činného výkonu musí být prováděna globálně, neboť frekvence je v celé ES stejná. Proto je na regulaci frekvence kladen zvlášť velký důraz.

1.4 REGULACE FREKVENCE NA STRANĚ VÝROBY

Bilanční rovnováha ES je dorovnáována elektrárenskými zdroji. Ve svých regulačních rozsazích (RR) mají regulační pásma (RP), která se využívají pro regulaci frekvence v síti. Tato regulace se provádí ve třech stupních (viz. Obrázek 4).



Obrázek 4: Regulace ES [1]

- **Primární regulace**

Zajišťuje automatické přizpůsobování výkonu zdrojů požadovanému zatížení. Primární regulace musí zapůsobit do 30 sec. od vzniku odchyšky frekvence.

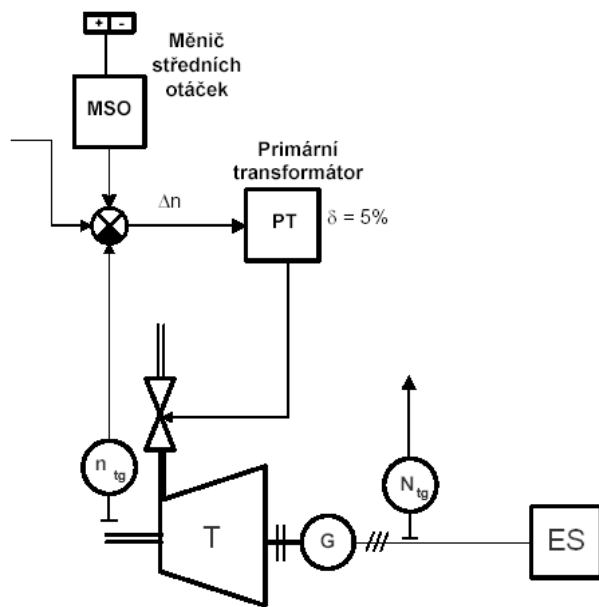
- **Sekundární regulace**

Vyrovňuje frekvenci (a bilanci činných výkonů) na jmenovitou hodnotu 50 Hz. Doba do zapůsobení je max. 15 min.

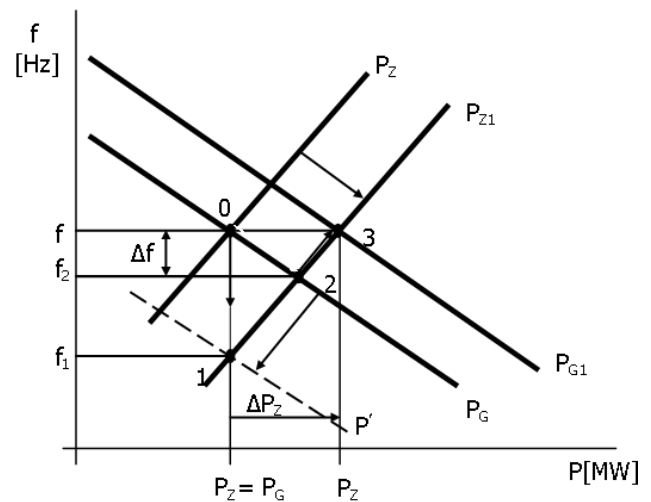
- **Terciální regulace**

Zajišťuje obnovení regulačního pásma pro primární a sekundární regulaci. Působení terciální regulace je požadováno od 30 min. dále.

1.5 PRINCIP REGULACE FREKVENCE



Obrázek 5: Blokové schéma řízení otáček [1]



Obrázek 6: Regulace frekvence [1]

Blokové schéma na Obrázku 5 naznačuje základní způsob regulace frekvence v ES na straně výroby. Regulace se provádí zvyšováním otáček TG. Změna otáček TG se zajišťuje pomocí přivírání a otevírání ventilů přívodu páry na turbínu. To zajišťuje hydraulický transformátor (PT), který je řízen z regulátoru otáček. Citlivost regulace je dána statickou charakteristikou generátoru (viz. Obrázek 6). Je to lineární závislost P na f a její sklon můžeme měnit. Sklon charakteristiky, nebo-li statika je dán součinitelem statiky generátoru k , který vyjadřuje podíl poměrné změny zatížení k poměrné změně kmitočtu. Činitel statiky k se většinou pohybuje okolo 5%.

V případě uvedeném na Obrázku 6 dochází vlivem zvýšení zátěže z P_Z na P_{Z1} k poklesu frekvence z f na f_2 . To je funkce primární regulace. Abychom vyrovnali výkonovou bilanci, aby $P_G = P_Z$, je nutno zvýšit otáčky pomocí měniče středních otáček (MSO). Tím dochází ke zvýšení výkonu zdroje P_G na P_{G1} a ustálení na nominální hodnotě frekvence. Zvýšení výkonu zdroje za účelem vyrovnání nominální frekvence spadá do sekundární regulace. Zdroj tímto ale čerpá ze svého regulačního pásma (daného například maximálním výkonem nebo maximálními otáčkami) a tím jsou jeho regulační možnosti omezené. Z tohoto důvodu se zavádí terciární regulace, která zajišťuje výkonovou rezervu pro sekundární regulaci.

1.6 REGULACE NAPĚTÍ NA STRANĚ VÝROBY

Napětí, jakožto druhý kvalitativní parametr elektrické energie, je na rozdíl od frekvence lokálním parametrem, který může v různých místech ES nabývat jinou hodnotu. Hodnota napětí je závislá na předávaných jalových výkonech. Přenos těchto jalových výkonů je ale zatížen velkými ztrátami v důsledku velké reaktance vedení a transformátorů. Samotné úbytky napětí jsou také značné. Bilance jalových výkonů se tedy nestanovuje pro celou ES, jako je tomu u bilance činných výkonů, ale stanovuje se pro jednotlivé uzly, tzv. pilotní uzly.

Hladinu napětí v pilotním uzlu můžeme měnit:

- změnou hodnoty jalového výkonu,
 - na straně odběru – kompenzace u spotřebitelů
 - na straně výroby – regulace jalového výkonu elektrárenských bloků
- změnou napětí pomocí nastavení převodu transformátorů.

Stejně jako u regulace frekvence, rozlišujeme tři stupně regulace napětí:

- terciální regulace napětí – na úrovni celé regulované soustavy, probíhá automaticky, koordinuje toky jalových výkonů s přihlédnutím k ekonomickému provozu ES
- sekundární regulace napětí – na úrovni jednoho uzlu soustavy, udržuje požadovanou hodnotu napětí v daném uzlu, koordinuje výrobu jalové energie bloků
- primární regulace napětí – na úrovni jednoho bloku výroby, reaguje na změny napětí změnou buzení generátoru[1]

1.7 PŘETOKY V PROPOJENÝCH ES

Význam přetoků v propojených soustavách nabývá v dnešní době na stále větší důležitosti. Obecně má propojení soustav kladný vliv na stabilizaci rozvodu elektrické energie, v některých případech ale může vést k opačnému jevu. V poslední době zaznamenává ČR nekontrolovatelný nárůst přetoků, které stupňovitě zatěžují přenosovou síť a způsobují v ní velmi vážné situace. Mezi hlavní důvody, proč přetoky začaly ohrožovat přenosovou soustavu ČR, patří výrazný nárůst množství elektřiny vyrobené z větrných zdrojů, umístěných převážně na severu Německa, v kombinaci s nedostatečnou vnitroněmeckou kapacitou pro její přenos. Situaci ještě umocňuje odstavení první skupiny jaderných elektráren na severu a jihu Německa (přes 8000 MW).

Svůj podíl na současné situaci má také způsob obchodování s elektřinou. Sjednané obchody v

rámci jedné země nebo mezi dvěma zeměmi, vyvolávají fyzikální toky elektřiny, které zdaleka nenásledují obchodní cesty takových tržních transakcí.

Elektřina teče cestou nejmenšího odporu, takže např. export elektřiny z Německa do Rakouska prochází z významné části (až z 50 %) přes Polsko a Česko. Tato cesta je totiž pro elektřinu snazší než přímá cesta uvnitř Německa a dále do Rakouska. [2]

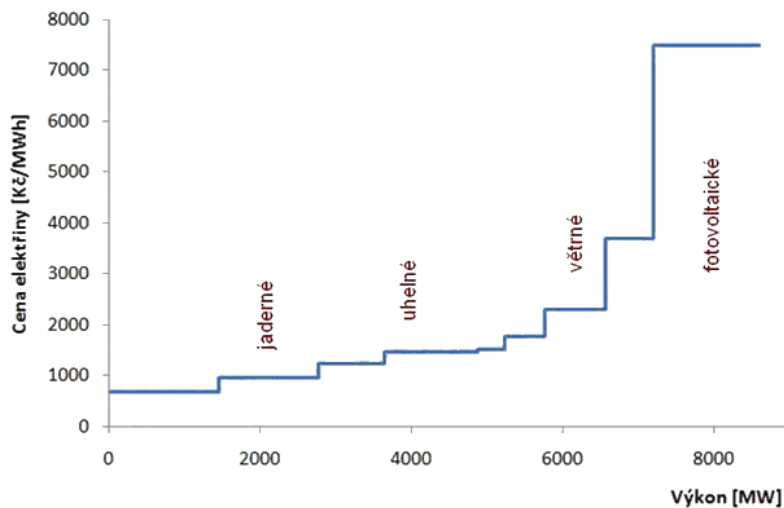


Obrázek 7: Přetoky v ES ČR [2]

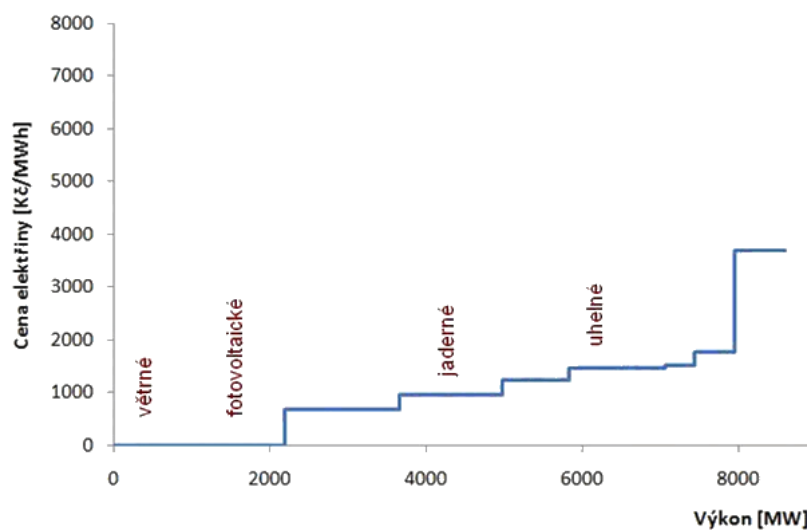
Výsledkem je nadměrné přetěžování našich přenosových tras. To může vést od výpadků některých lokalit až k blackoutu celé soustavy. Prevence těchto krizových situací je projednávána na mezinárodní úrovni. Jde převážně o rozvoj lepší koordinace propojených soustav, posilování přetěžovaných sítí, rychlejší regulace výkonů v jednotlivých ES a v neposlední řadě i výstavba nových přenosových sítí. Všechna tato opatření sebou přinášejí obrovské náklady pro provozovatele přenosových sítí. Přestože blackout celé přenosové sítě je málo pravděpodobný, jeho ekonomické a hospodářské dopady jsou obrovské. Česká republika zatím blackoutu nepodlehla, jeho rizikům ale čelí neustále. Velice se mu přiblížila například roku 2003 při výpadku Itálie, kdy se evropská propojená soustava rozpadla do jednotlivých ostrovů.

1.8 ZÁPORNÁ CENA ELEKTŘINY

Dopad neřízených přetoků elektřiny z obnovitelných zdrojů se projevuje i v oblasti obchodu s elektřinou. Česká republika po vzoru ostatních evropských zemí zavedla povinný výkup elektřiny z OZE. Aby byla elektřina z OZE na trhu s elektřinou konkurenceschopná, byla její cena fiktivně snížena na nulovou hodnotu, přičemž skutečnou hodnotu hradí až koncoví odběratelé ve formě příspěvku na podporu OZE.



Obrázek 8: Křivka nákladů bez podpory [4]



Obrázek 9: Výsledná křivka nákladů s podporou [4]

Ve výsledku je pak pro obchodníky s elektřinou výhodné vykupovat tuto tržně levnou elektřinu z OZE na úkor dražší elektřiny z konvenčních elektráren. To pak vede k logické snaze omezení výroby konvenčních elektráren. Pro omezenou regulační schopnost těchto zdrojů byla zavedena záporná cena elektřiny, která pokrývá vyrovnání odchylek způsobených výrobou přebytečného výkonu z konvenčních elektráren. Pokud v takové situaci chtějí výrobci elektřiny z konvenčních zdrojů svou elektřinu prodat například proto, že nechtějí nebo nemohou výkon elektrárny dostatečně rychle regulovat, jsou v některých případech nuceni ji nabízet za zápornou cenu. [4]

To vede k celkové změně pohledu na způsob pokrývání denního diagramu spotřeby. Nastávají situace, kdy se elektrárny pracující v základním zatížení zahrnují do terciální a dokonce i sekundární regulace. Tento trend se již začíná projevovat i u těch největších, výkonově nejstabilnějších zdrojů, jaderných elektráren. Ne, že by nebylo technicky možné regulací snižovat výkon těchto zdrojů, je to však poněkud nelogické.

2 MANÉVROVATELNOST BLOKU

Jak již bylo řečeno v minulé kapitole, způsob provozování elektrizační soustavy v dnešní době nutí elektrárny, pracující v základním zatížení, ke schopnosti regulovat svůj výkon podle požadavku nadřazené soustavy. Mezi tyto elektrárny patří i jaderné elektrárny, které doposud představovaly výkonově nejstabilnější zdroje.

Jaderná elektrárna se z celkového pohledu neliší od konvenčních tepelných elektráren, významného rozdílu ale nabývá právě ve schopnosti manévrovatelnosti. Zdrojem tepelné energie je zde jaderný reaktor, který má omezené regulační vlastnosti. Na rozdíl od kotle, kde je možnost přerušení přísunu paliva a tím okamžité odstavení, v jaderném reaktoru je palivo trvale vloženo. Vsázka paliva zde probíhá kampaňovitě. Vychladnutí reaktoru je závislé na chladnutí samotného paliva. To vede k rozdílnému přístupu při provozování jaderných a konvenčních elektráren.

Jaderná elektrárna má vzhledem ke dvěma odděleným okruhům možnost rozlišovat 2 přístupy k regulaci výkonu na svorkách generátoru. Za prvé může regulovat tepelný výkon přímo od zdroje tj. jaderného reaktoru. Zde jsou ale jistá fyzikální materiálová a jaderně bezpečnostní omezení a rychlost regulace je do určité míry snížena. Za druhé může být výkon snižován upouštěním páry mimo turbínu za konstantního nebo pomalu se snižujícího tepelného výkonu reaktoru. Možnost upouštění parní produkce je relativně rychlá, ale její rozsah je omezený. Na rychlé přechodové jevy je ale tato možnost dostačující.

2.1 REGULACE VÝKONU JADERNÉHO REAKTORU

Omezení pro manévrování s výkonem reaktoru vychází především z kinetických vlastností reaktoru, které je nutno dodržovat v udržitelné bezpečné oblasti, abychom předešli nekontrolovatelnému šíření štěpné reakce. Zároveň musí být zohledňována životnost paliva a celé reaktorové nádoby.

Na úvod do problematiky v této diplomové práci uvedu možnosti jak regulovat tepelný výkon aktivní zóny a jaká jsou zde omezení.

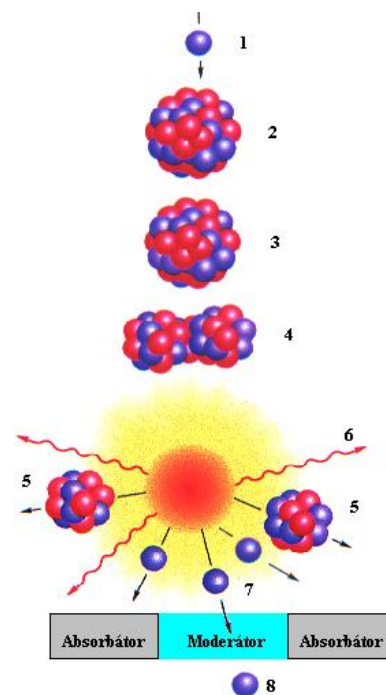
2.1.1 Základy reaktorové fyziky

Tepelná energie u jaderných reaktorů VVER vzniká štěpením těžkých jader U^{235} pomalými neutrony. Při jednom štěpení dochází k uvolnění energie cca 200 MeV a vzniku dalších 2-3 rychlých neutronů a několika produktů štěpení. Rychlé neutrony nemohou samovolně štěpit U^{235} , proto je nutné je zpomalit pomocí moderátoru. Zároveň je možné některé pohlcovat v absorbátoru a tím regulovat počet štěpných reakcí (viz. Obrázek 10). Takovýchto reakcí probíhají v reaktoru

statisíce, proto jde spíše o statistickou záležitost. Reaktor pracující na konstantním výkonu je v tzv. stavu kritičnosti. Kritičnosti reaktoru je dosaženo, když po štěpení jádra U^{235} , absorpci a moderaci zůstane právě jeden pomalý neutron, který je dále schopen štěpení. Kritičnost je vyjadřována tzv. koeficientem násobení k :

$$k = \frac{n_i}{n_{i-1}} \quad (2.1)$$

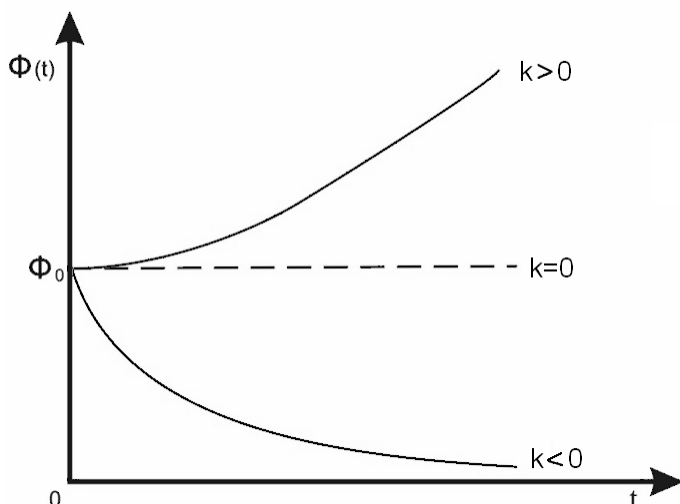
kde n_i je neutron právě vzniklý štěpením
 n_{i-1} je neutron z minulé generace neutronů



Obrázek 10: Štěpná řetězová reakce [5]

Koeficient k může podle vztahu (2.1) nabývat 3 hodnot:

1. $k < 1$ – soustava je podkritická, počet neutronů v řetězové reakci klesá, reakce se nemůže sama udržet;
2. $k = 1$ – soustava je kritická, počet neutronů v reakci je ustálený, reakce se udržuje samočinně;
3. $k > 1$ – soustava je nadkritická, reakce je divergentní, počet neutronů lavinovitě roste.



Obrázek 11: Stav koeficientu násobení [5]

Vzhledem k tomu, že aktivní zóna reaktoru má konečné rozměry, část neutronů během štěpné reakce ji zcela opustí nebo je v ní absorbována. Ty se pak dále štěpné reakce neúčastní, proto je zaveden efektivní násobící koeficient, zohledňující rozměry AZ a pravděpodobnost úniku (P_1, P_2).

$$k_{ef} = k * P_1 * P_2 \quad (2.2)$$

Pro posuzování stavu reaktoru je výhodnější používat veličinu reaktivity vycházející přímo z koeficientu násobení. Reaktivita udává míru změny neutronového toku.

$$\rho = \frac{k_{ef} - 1}{k_{ef}} \quad (2.3)$$

Pokud je reaktor v rovnovážném „kritickém stavu“, je jeho reaktivita nulová. Záporná resp. kladná je v podkritickém, resp. nadkritickém stavu. Protože se velikost reaktivity v provozních podmínkách pohybuje velmi blízko nule, obvykle je vyjadřována jako násobek nějaké malé číselné konstanty.

2.1.2 Regulační orgány

Regulační orgány nám umožňují nastavovat požadovanou hodnotu reaktivity. Jsou tvořeny absorbatory, které pohlcují neutrony a tím řídí řetězovou štěpnou reakci. V reaktorech VVER jsou regulačními orgány regulační tyče (klastry) a kompenzační tyče (popřípadě i kyselina boritá).

Regulační tyče jsou vyrobeny z materiálů s velkým účinným průřezem pro absorpci tepelných neutronů. Takovými materiály jsou např. bór (karbid bóru, bórová ocel), kadmium nebo hafnium. Tyto materiály jsou v podobě klastů zasouvány do vodících trubek palivových souborů. V aktivní zóně je rovnoměrně a symetricky umístěno 61 klastů. Jednotlivé klastry jsou sloučeny do 10-ti skupin regulačních tyčí. Vzhledem k provozním účelům jsou dále jednotlivé skupiny děleny na tzv. odstavné a řídicí skupiny. Odstavnými jsou 1.-6. skupina a slouží především k odstavení reaktoru do podkritického stavu. Za normálního provozu jsou v horní koncové poloze. Řídicími skupinami jsou 7.-10. skupina.

Hlavním regulovaným parametrem je hustota toku neutronů. Chceme-li zvýšit výkon reaktoru, regulační tyče se vytažují z aktivní zóny. Toto vede ke zmenšení parazitní absorpce neutronů a ke zvýšení koeficientu násobení k_{ef} . Při $k_{ef} > 1$ hustota toku a tedy i tepelný výkon reaktoru začínají narůstat. Při dosažení požadovaného výkonu se tyče opět zasunou do takové polohy, při které koeficient násobení bude roven jedné. Štěpná řetězová reakce se ustálí již na vyšší výkonové hladině. Snížení výkonu reaktoru se dosahuje zasunutím regulačních tyčí do aktivní zóny. Tím se koeficient násobení sníží pod jedničku. Protože při $k_{ef} < 1$ hustota toku neutronů neustále klesá, klesá i výkon reaktoru. Po dosažení požadovaného výkonu se tyče opět povytáhnou tak, aby $k_{ef} = 1$. Rychlost manipulace s tyčemi je ve směru zvyšování výkonu silně omezena. [6]

Kompenzační tyče slouží ke kompenzaci přebytku reaktivity v počátku kampaně, dnes se na reaktorech VVER moc nepoužívají a ke kompenzaci je využívána kyselina boritá.

Regulace pomocí kyseliny borité H_3BO_3 se využívá jen při pomalých změnách reaktivity. Vsázka reaktoru je v počátku kampaně silně nadkritická. Ke kompenzaci této nadkritičnosti je do chladicí vody reaktoru přimícháno velké množství H_3BO_3 , které absorbuje velký počet neutronů a udržuje tak reaktor v kritickém stavu. S postupným vyhoříváním paliva se koncentrace H_3BO_3 ve vodě snižuje a tím se uvolňuje potřebná zásoba reaktivity na krytí vyhořívání paliva.

Zásoba reaktivity je fiktivní pojem, který nám udává rozsah změny reaktivity v aktivní zóně, ve kterém můžeme řídit hodnotu reaktivity pomocí regulačních orgánů.

2.1.3 Kinetika reaktoru

Kinetické vlastnosti reaktoru jsou vyjadřovány rovnicemi

$$N(t) = f[\rho(t)] \text{ resp. } N(t) = f[k_{ef}(t)] \quad (2.4)$$

a) Nadkritický reaktor na okamžitých neutronech

Na počátku se v soustavě nachází n_0 neutronů. Relativní přírůstek počtu neutronů, který způsobil jeden neutron za jednu generaci, se nazývá přebytek koeficientu násobení:

$$\Delta k_{ef} = k_{ef} - 1 \quad (2.5)$$

Celkový přírůstek neutronů za jednu generaci bude $n\Delta k_{ef}$. Střední doba života mezi dvěma generacemi jdoucími po sobě se nazývá l . Rychlost změny počtu neutronů v systému bude potom vyjádřena rovnicí:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n\Delta k_{ef}}{l} \quad (2.6)$$

a počet neutronů v čase t vztahem

$$n(t) = n_0 e^{\frac{\Delta k_{ef}}{l} t} \quad (2.7)$$

Toto je základní rovnice pro nadkritický reaktor na okamžitých neutronech. Neutronový tok v tomto případě exponenciálně narůstá (viz. Obrázek 11). Tento stav je u energetických reaktorů nepřijatelný, protože dochází k nekontrolovatelnému rozvoji štěpné reakce ve velmi krátké době. [6]

b) Podkritický reaktor

Chceme-li zvyšovat výkon reaktoru, který je podkritický, tzn. $k_{ef} < 1$, je nutno mít k dispozici v aktivní zóně neutronový zdroj S nezávislý na existenci štěpení uranu v aktivní zóně. Za ten můžeme požadovat neutrony vzniklé zpožděným rozpadem prvků z předešlé kampaně. Neutronový tok po vložení cizího zdroje neutronů do podkritického reaktoru se bude vyvíjet takto:

$$1. \quad N_1 = S \cdot 1$$

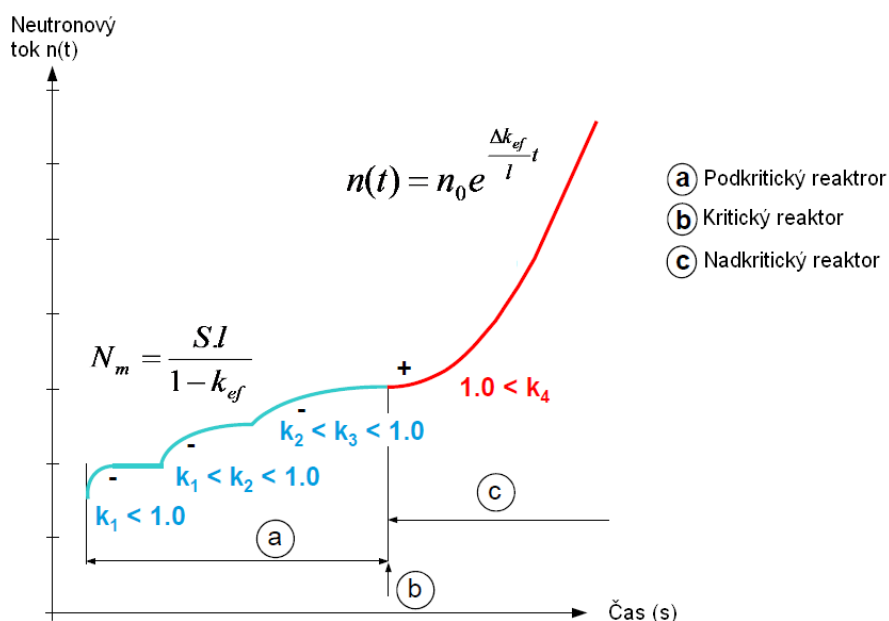
$$2. \quad N_2 = S \cdot 1 + k_{ef} \cdot N_1 = S \cdot 1 + k_{ef} \cdot S \cdot 1$$

$$3. \quad N_3 = S \cdot 1 + k_{ef} \cdot N_2 = S \cdot 1 + k_{ef} \cdot S \cdot 1 + k_{ef}^2 \cdot S \cdot 1$$

$$(m). \quad N_m = S \cdot 1 + \dots + k_{ef} \cdot N_{m-1} = S \cdot 1 (1 + k_{ef} + k_{ef}^2 + \dots + k_{ef}^{m-1}) = S \cdot 1 \cdot \frac{1 - k_{ef}^m}{1 - k_{ef}}$$

$$N_\infty = \lim_{m \rightarrow \infty} N_m = \frac{S \cdot 1}{1 - k_{ef}} = \frac{N}{1 - k_{ef}} \quad (2.8)$$

Ze vztahu (2.8.) plyne, že zvyšování toku podkritického reaktoru probíhá postupně. Na rozdíl od nadkritického stavu, kdy jsme multiplikační faktor k_{ef} zvýšili o Δk_{ef} a tok narůstal exponenciálně, v podkritickém stavu při navýšení o Δk_{ef} (za podmínky $k_{ef} < 1$) má tok tendenci se ustálit na nové konstantní hodnotě N_m .



Obrázek 12: Kinetika jaderného reaktoru [5]

c) Kritický reaktor na zpožděných neutronech

Po dosažení kritičnosti reaktoru je možné na dané výkonové hladině reaktor provozovat

teoreticky do nekonečna. Reaktor je výkonově stabilní. Pokud chceme najet na vyšší, nominální výkon, aniž by došlo k rozvoji nekontrolované štěpné reakce, musíme reaktor uvést do nadkritického stavu na zpožděných neutronech.

Ze vztahu (2.7) je patrné, že exponenciální nárůst toku je závislý na změně koeficientu násobení a na střední délce doby života jedné generace neutronů. Střední doba života l_o okamžitých neutronů vzniklých v okamžiku štěpení jádra U^{235} se pohybuje od 10^{-5} až 10^{-3} s. Ze vztahu (2.7) je zřejmé, že hustota toku neutronů a tím i výkon reaktoru by při hodnotě střední doby života neutronů 10^{-3} s velice rychle narůstal. Již za jednu sekundu při změně $\Delta k_{ef} = 0,001$ zvětšila by se hustota toku e-krát [6]. To je z hlediska bezpečného provozu energetických reaktorů zcela nepřípustné.

Naštěstí ve skutečném reaktoru je celková střední doba života jedné generace neutronů mnohem delší. Podíl na tom má existence zpožděných neutronů, které vznikají rozpadem štěpných produktů až několik okamžiků po štěpení U^{235} . Střední doba života l_z zpožděných neutronů se u paliva U^{235} pohybuje okolo 0,1 s. Celková střední doba života jedné generace daná součtem $l=l_o+l_z$ se tak výrazně prodlužuje a je tedy možné po malých změnách reaktivity zvyšovat výkon. Je nutné ale dodržet podmínku $\Delta k_{ef} < 1-\beta$, kde β vyjadřuje podíl zpožděných neutronů z celkového počtu neutronů. Pro palivo U^{235} nabývá hodnoty $\beta=0,0065$. Nárůst reaktivity nesmí přesáhnout tuto hodnotu, neboť by začal převládat vliv okamžitých neutronů a výkon by začal prudce exponenciálně stoupat.

2.1.4 Zpětné vazby

Tepelná energie uvolňovaná v jaderném reaktoru při štěpení paliva způsobuje růst teplot jednotlivých složek aktivní zóny. Při tom se mění jaderně fyzikální konstanty závislé na teplotě a vlivem tepelné dilatace se zmenšuje hustota materiálu. V nepatrné míře se mění geometrie a rozměry aktivní zóny. Všechny tyto změny mají vliv na neutronovou bilanci v aktivní zóně a projevují se změnou reaktivity štěpného systému.

Z hlediska stability systému má velký význam, zda je růst teploty reaktoru spjat s kladnou nebo zápornou reaktivitou. V reaktorech VVER odpovídá rostoucí teplotě záporná reaktivita a reaktor je teplotně stabilní. [7]

- **Teplotní koeficient:**

- a) Změna teploty paliva – má vliv na pravděpodobnost štěpení. Se zvyšující se teplotou narůstá absorpční schopnost neutronů v palivu a dochází k tzv. Dopplerovu jevu.

b) Změna teploty moderátoru – zvýšení teploty moderátoru vede ke snížení jeho hustoty, což má za následek zhoršení moderačních vlastností moderátoru a tím i snížení pravděpodobnosti štěpení.

- **Tlakový koeficient:**

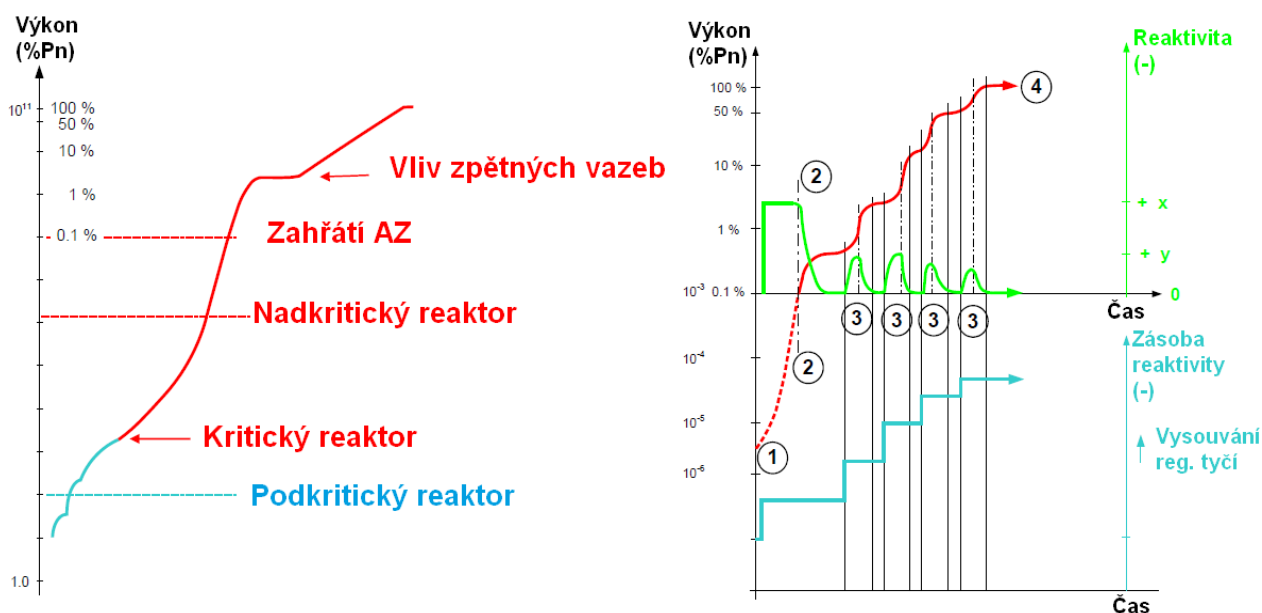
Při poklesu tlaku dochází k nepatrnému snížení reaktivity. Je zanedbatelný.

- **Dutinový koeficient:**

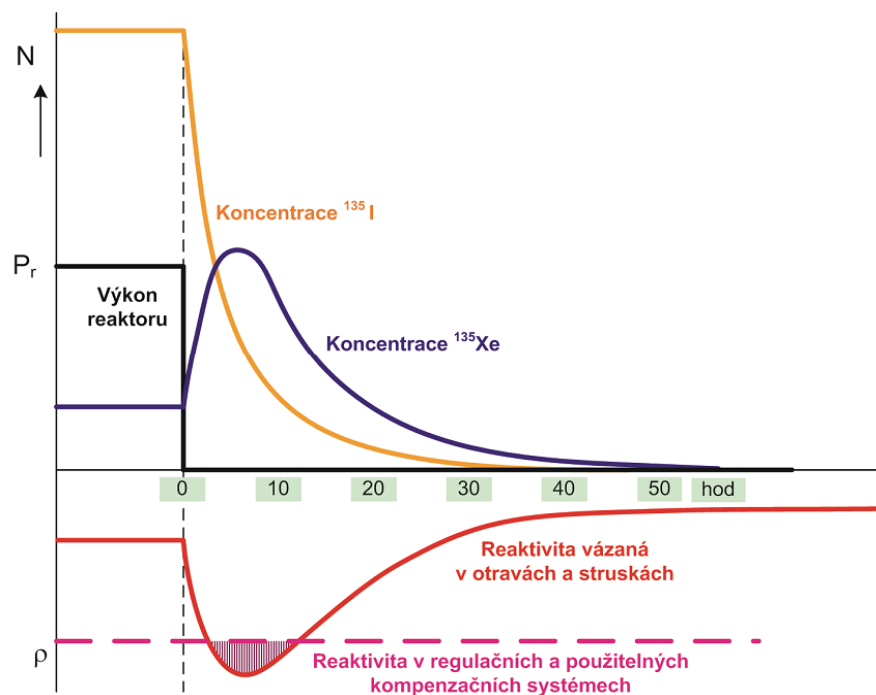
Dutiny (bublinky) v moderátoru lehkovodního reaktoru způsobují horší moderaci neutronů a pokles reaktivity. U tlakovodních VVER se příliš neprojevuje. Na důležitosti nabývá v havarijních situacích, kdy může dojít k varu chladiva.

Z těchto koeficientů má nejsilnější vliv na reaktivitu systému teplotní koeficient, který je u reaktorů VVER silně záporný. Jeho vlivem dochází k automatickému stabilizování narůstajícího neutronového toku v návaznosti na vzrůstající teplotě.

Na Obrázku (13) je znázorněn průběh zvýšení výkonu reaktoru na nominální hodnotu. V oblasti 1- 2 se výkon reaktoru pohybuje ve studeném pásmu, kdy je reaktor provozován jako nadkritický na zpožděných neutronech bez působení zpětných vazeb. Vysunutím regulační tyče uvolníme jisté množství reaktivity a výkon začne narůstat. Po dosažení výkonu 1% P_n (bod 2) se začíná projevovat zvýšená teplota paliva a moderátoru jako zpětná vazba výkonu. Díky záporným koeficientům reaktivita klesá a tím se výkon sám ustaluje na nové hladině (bod 3). Zásoba reaktivity se nám však nevrací. Ke zvýšení výkonu na novou hladinu je nutné ji opět uvolnit částečným vysunutím regulační tyče. Takto se postupuje až k dosažení nominálního výkonu P_n (bod 4).



Obrázek 13: Vliv zpětných vazeb při zvyšování výkonu [5]



Obrázek 14: Reakce xenonu na změnu výkonu [14]

Tyto fyzikální jevy mohou nastávat i v opačném případě, kdy prudkým zvýšením výkonu dojde k rychlému vyhoření Xe^{135} , tím tedy i ke snížení množství absorbátoru a navýšení reaktivity.

2.1.6 Axiální ofset

U rozměrnějších aktivních zón jako má VVER 1000, může vlivem xenonových oscilací dojít až k rozdělení zóny na více částí, kdy každá část vykazuje rozdílnou reaktivitu, tedy i tepelný výkon. To je z hlediska kontroly výkonu nepřijatelné.

Po dosažení požadovaného výkonu manipulací regulační tyče, je výkon celé AZ $P_{stř} = \text{konst.}$ Při manipulaci s tyčí se však v AZ rozbíhá dynamický děj, který vede ke střídavému kolísání neutronového toku v axiální rovině AZ, tedy i k různým hladinám výkonu. Přestože celkový výkon AZ $P_{stř}$ je konstantní, výkony v horní části AZ P_h a v dolní části P_d se mohou lišit. Dochází zde k difúzi Xe^{135} z místa s jeho vyšší koncentrací do místa s nižší koncentrací. Nerovnoměrnost v axiálním rozložení výkonu se nazývá axiální ofset a je dán vztahem:

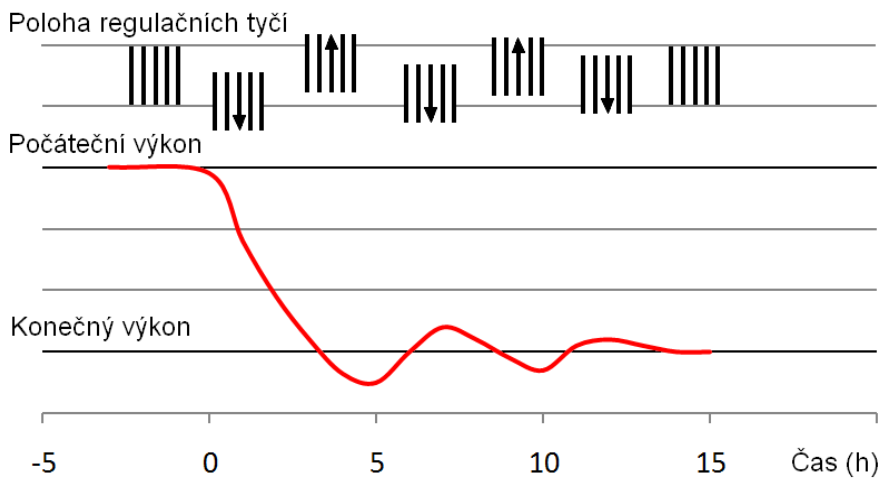
$$AO = \frac{P_h - P_d}{P_h + P_d} = \frac{\Delta I}{P_{stř}} \quad (2.10)$$

kde P_h - je výkon horní poloviny aktivní zóny,
 P_d - je výkon dolní poloviny aktivní zóny,
 $P_{stř}$ - je relativní výkon aktivní zóny,
 ΔI - je axiální diference neutronového toku, též udávaná jako AFD

Axiální ofset je tedy koeficient nerovnoměrnosti, který dává představu o axiálním rozložení výkonu. Je-li axiální ofset větší než nula, znamená to, že více než polovina výkonu je produkována horní polovinou aktivní zóny. Je-li axiální ofset menší než nula, znamená to, že více než polovina výkonu je produkována dolní polovinou aktivní zóny.

Aby bylo zamezeno vzniku větších axiálních oscilací výkonu, je nutné udržovat hodnotu AFD ve vymezeném pásmu. To je pro různé výkonové hladiny definované jinak. Nad výkonovou hladinou 90% N_{nom} se indikovaný AFD musí udržovat uvnitř cílového pásma, šířka pásma je $\pm 5\%$ od požadované střední hodnoty AFD. Pokud se AFD při těchto výkonových hladinách vychýlí z cílového pásma, musí být do 15 minut vrácen zpět do cílového pásma, jinak se musí tepelný výkon okamžitě snížit pod 90% N_{nom} .

Mezi výkonovými hladinami 50% až 90% N_{nom} se musí AFD udržovat uvnitř cílového pásma, ale může se na dobu nepřevyšující jednu hodinu vychýlit. Avšak musí se udržovat v tzv. CAOC obálce – oblasti, jejíž záporná, resp. kladná hodnota je pro výkonovou hladinu 90% N_{nom} definována rozsahem $\pm 11\%$ AFD a dále se rozšiřuje pro každé 2% N_{nom} o $\pm 1\%$ AFD k 50% N_{nom} , kde tedy dosahuje hodnot $\pm 31\%$ AFD.



Obrázek 15: Průběh a kompenzace axiálních oscilací

Axiální oscilace mají jen omezenou amplitudu a vyskytují se s malou frekvencí. Přesto je nutné je dle daných zásad držet ve svém vymezeném pásmu. Postupně se utlumují ručním řízením regulačních tyčí nebo přidáváním a ředěním kyseliny borité. Ta má působení na změnu reaktivity v celé AZ konstantní, což je v dané situaci vyhovující.

V Příloze 3 je uveden graf dovoleného pásma AFD.

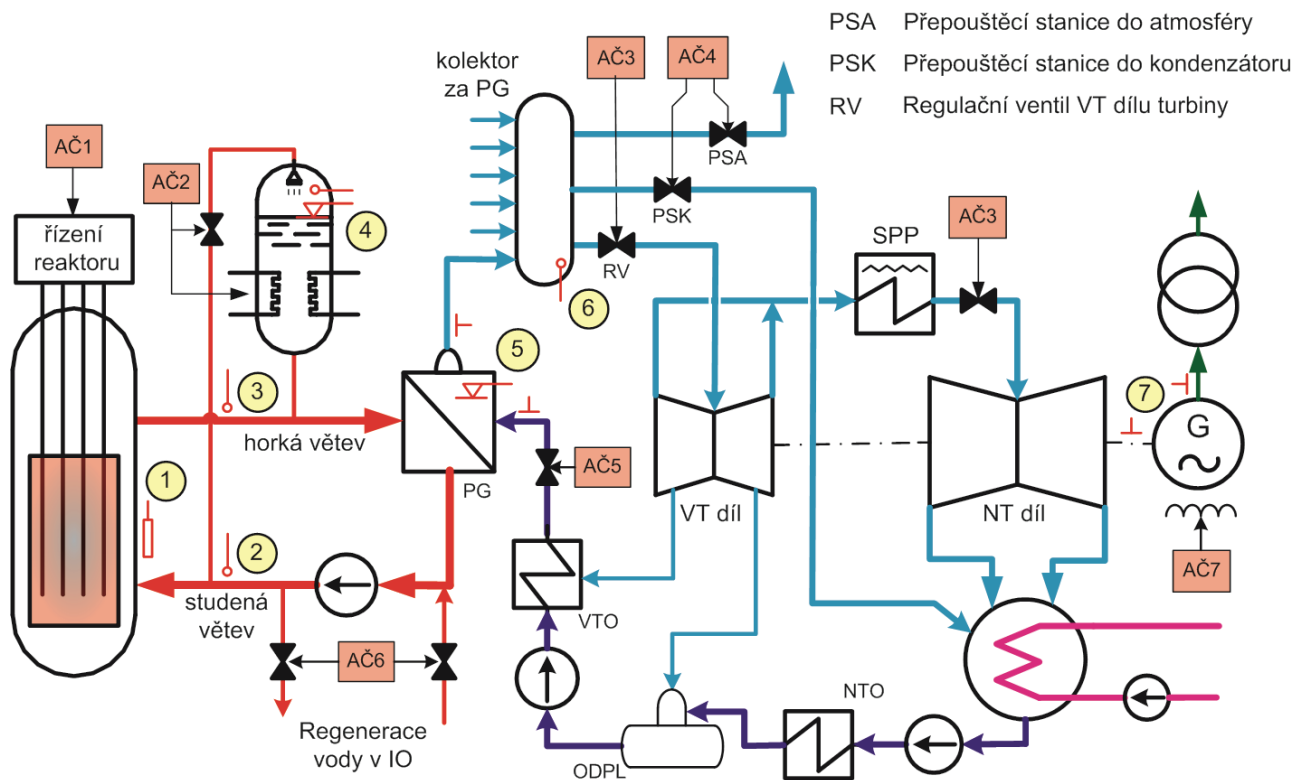
2.2 REGULACE VÝKONU JADERNÉHO BLOKU

V předchozí kapitole byly popsány kinetické procesy, které ovlivňují manévrovatelnost výkonu jaderného reaktoru. Na jejich základě byly zavedeny trendy a rozsahy regulace výkonu reaktoru, kterými je reaktor bezpečně říditelný. Volba těchto trendů je silně konzervativní vzhledem k fyzikálním (kinetickým) omezením regulace výkonu. Důvodem je určitá rezerva daná limitami a podmínkami klíčových bezpečnostních parametrů, ale zároveň i snaha o šetrnost k technologickému zařízení a palivu v aktivní zóně. Například u palivových článků se změnou výkonu změní teplota chladiva nepatrně (maximálně o několik stupňů), ale teplota paliva podstatně (až o několik set stupňů). Vlivem toho vznikají teplotní napětí, která mohou vyvolat deformaci palivových souborů, případně jejich dehermetizaci a následnou kontaminaci primárního okruhu. [14] Výsledné trendy jsou tedy silně poddimenzované a vycházejí z optimálních materiálových vlastností technologie jak primárního, tak i sekundárního okruhu.

Jaderný blok jako celek je složitý systém, kde hodnota výsledného elektrického výkonu nezávisí jen na okamžité hodnotě tepelného výkonu reaktoru, ale je ovlivňována mnoha vedlejšími vlivy. Jaderná energie prochází transformacemi do různých forem. V primárním okruhu se jaderná energie přeměňuje na tepelnou energii a ta se dále v sekundárním okruhu mění na kinetickou a poté až na elektrickou. V systému od reaktoru až ke svorkám generátoru dochází vlivem transformací a z podstaty termodynamických zákonů ke ztrátám energie. Zároveň může být energie odváděna i akumulována dle požadavků obsluhy (např. regulace tlaku v HPK upouštěním páry). Tím je zajištěna jakási pružnost systému, díky které jaderná elektrárna může zvládat přechodové děje spojené se změnou výkonu v delším časovém intervalu.

Přesto řídicí systém musí zajistit požadovanou rovnováhu mezi výkonem generovaným reaktorem a výkonem odebraným sekundárním okruhem a předaným elektrizační soustavě v relativně krátkém čase. Strategii řízení provozu bloku jaderné elektrárny při normálních provozních režimech určující závislost jeho hlavních parametrů na změně výkonu nazýváme regulační program. [14] Regulační program určuje základní schémata zapojení hlavních i pomocných regulátorů bloku a nastavení jejich citlivostí.

Pro znalost aktuálního stavu systému a schopnost jeho řízení je nutné znát základní provozní parametry a mít k dispozici dostatek akčních členů, kterými je možné jej řídit. Primární i sekundární okruh jsou protkány stovkami čidel a měřících přístrojů poskytující obsluze aktuální hodnoty teploty, tlaku, průtoku, atd. Za akční členy lze považovat například různé ventily, čerpadla, elektroohříváky a sprchové systémy. Na Obrázku 16 je uvedeno obecné schéma JE, kde jsou vyznačeny hlavní měřené veličiny obou okruhů a akční členy, kterými je možné je ovlivňovat.



Obrázek 16: Obecné schéma JE a akční členy [14]

Měřené veličiny:

1. měření neutronového toku, výkonu reaktoru
2. teplota a průtok ve studené větvi I.O.
3. teplota a průtok v horké větvi I.O.
4. tlak v I.O., hladina v KO
5. průtok napájecí vody do PG, průtok páry z PG a hladina vody v PG
6. tlak páry v hlavním parním kolektoru
7. otáčky generátoru a napětí

Akční členy:

- AČ1 řízení výkonu reaktoru, polohou regulačních tyčí
- AČ2 regulace tlaku v I.O. pomocí sprchy a elektrických ohříváků
- AČ3 regulace otáček turbíny, respektive výkonu elektrárny
- AČ4 regulace, snižování tlaku v případě nadlimitních hodnot
- AČ5 regulace hladiny v PG
- AČ6 regulace hladiny v kompenzátoru objemu
- AČ7 regulace napětí, respektive jalového výkonu [14]

2.2.1 Princip regulace výkonu jaderného bloku

Řízení takto složitého systému vyžaduje zapojení automatické regulační techniky, protože schopnosti obsluhy řídit systém ručně v reálném čase jsou z hlediska okamžité kontroly stavu systému omezené. Obsluha bloku tak slouží jako dozorný článek, kontrolující správnou funkci automatických systémů, a má jen omezené možnosti zásahu do systému. Má pravomoc zadávat změny požadovaných parametrů, pouze však ve vymezeném pásmu limitačních systémů (LS). Na důležitosti pak nabývá v mimořádných situacích, kdy se stav systému může nacházet mimo oblast, ve které je schopen fungovat automaticky.

Z pohledu manévrovatelnosti bloku je potřebné řídit blok tak, aby hlavní regulované parametry bloku byly udržovány v jejich stanovených pracovních oblastech a nedocházelo k aktivaci omezujících automatik výkonu reaktoru.

Omezující automatiky výkonu reaktoru jsou obsaženy v limitačním systému, přičemž se z ochrany reaktoru pro potřeby LS přebírají vypočítávané hodnoty související s rychlostí změny výkonu reaktoru, rezervou do krize varu, a parametry odvozené od hodnoty axiálního offsetu. [10]

Limitační systém (LS) je ochranný a řídicí systém, jehož účelem je omezení nebo snížení výkonu reaktoru až po jeho případné úplné odstavení, a který je aktivován při dosažení (překročení) některé hodnoty jeho nastavení.

Pokud LS i ochrana reaktoru působí od stejného parametru, pak hodnoty nastavení LS jsou selektivně posunuty vůči hodnotám nastavení ochrany reaktoru tak, aby působení LS předcházelo působení ochrany reaktoru. [10]

2.2.1.1 Regulace z hlediska hlavní regulované veličiny

Při uvažování konstantního průtoku primárním okruhem, je možno ovlivňovat předávaný tepelný výkon reaktoru jen za pomoci střední teploty v I.O., nebo tlaku v HPK, tedy v II.O. Tyto hlavní parametry jsou regulovány a na jejich základě zavádíme 2 rozdílné přístupy k řízení bloku:

A) Regulace střední teploty chladiva

Změnou výkonu se mění pouze teplotní rozdíl mezi horkou a studenou větví prim. okruhu. Zvýšením výkonu turbín se zvýší odebírané množství páry z parogenerátoru a poklesne její tlak i teplota na výstupu z PG. Zvýšeným odběrem tepla se sníží teplota chladiva na výstupu z PG a do reaktoru proudí chladnější médium. V aktivní zóně poklesne teplota, což vyvolá kladnou změnu reaktivity a zvýšení tepelného výkonu reaktoru. Tím se

zvýší i střední teplota chladiva na hodnotu blízkou původní. Tepelný výkon reaktoru tedy s jistou úměrou sleduje odebíraný výkon z elektrárny. [14]

- Mezi hlavní výhody tohoto reg. programu patří:

-Malé změny teploty chladiva I.O. – nedochází k nežádoucímu pnutí v palivu AZ, není za potřeby kompenzovat změny objemu chladiva (menší kompenzátor).

-Samoregulační vlastnost – malé odchylky teploty chladiva jsou samovolně kompenzovány zápornými zpětnovazebními vlastnostmi AZ. Regulační orgány je nutno použít ke kontrole reaktivity jen v případech, kdy je změna výkonu žádaná rychleji, než je schopna samoregulace (vliv tepelných kapacit chladiva).

-Tento režim vhodně vyhodnocuje poruchy primárního okruhu. Např. při výpadku HCČ poklesne průtok chladiva, což vyvolá zvýšení teploty v AZ a na to reaktor reaguje snížením reaktivity. Ke stejnému jevu dochází například při poruše PG, kdy sníženým odvodem tepla v II.O. na růstá teplota v I.O., a tím se opět snižuje výkon.

- Hlavní nevýhodou tohoto reg. programu jsou velké změny teploty a tlaku páry v I.O. – je nutné dimenzovat sekundární okruh na vyšší parametry páry. (odolnější HPK)

B) Regulace tlaku v HPK

Program s konstantním tlakem páry a tedy i konstantní teplotou sytosti je výhodný z hlediska sekundárního obvodu. Výhody a nevýhody tohoto reg. programu jsou opačné než v předešlém případě.

Změnou výkonu se mění střední teplota chladiva v reaktoru (za současného udržování konstantního tlaku a teploty páry v II.O.). To vyvolá nežádoucí změnu reaktivity vlivem teplotních součinitelů – reaktor se svými samoregulačními vlastnostmi „brání“ změně výkonu. Proto je nutné změnu reaktivity kompenzovat zásahy akčních orgánů regulátoru výkonu reaktoru. Změna teploty chladiva vyvolá i poměrně velké změny objemu chladiva v prim. okruhu (asi 7 % při plné změně výkonu). Je proto potřebné instalovat větší kompenzátor objemu, který je schopen svými regulačními obvody tyto změny zvládnout. Výhodou tohoto reg. programu je zvýšení účinnosti tepelného cyklu a nižší nároky na konstrukci parogenerátoru. [14]

2.2.1.2 Regulace z hlediska priority řízení

Regulaci tlaku páry a tím i strukturu regulačního obvodu lze v daném reg. programu realizovat dvěma způsoby podle volby priorit v řízení. Rozhodujícím faktorem je, zda je důležitější chod reaktoru a na tom závislý vyrobený elektrický výkon, nebo zda bude JE řízena podle požadavků distribuční soustavy a reaktor se svým výkonem bude přizpůsobovat. [14]

A) Ze strany reaktoru ($R_N + TG_P$)

Výkon bloku je řízen reaktorem a turbogenerátor se přizpůsobuje tomuto výkonu tak, aby byla zachována tepelná bilanční výkonová rovnováha.

V tomto módu může obsluha regulovat výkon ručně, tj. vysouváním a zasouváním regulační skupiny tyčí (2cm/s). Nebo může nechat řídit výkon prostřednictvím regulátoru neutronového výkonu. Navolení cílové hodnoty výkonu musí provést obsluha na zadavačí výkonu a to v povoleném pásmu limitačního systému. Tlak v parním kolektoru je udržován na konstantní hodnotě regulačními ventily turbín.

Nevýhodou je, že v tomto módu regulátor výkonu sám nereaguje na poruchy v sekundárním okruhu.

B) Ze strany TG ($TG_N + R_P$ nebo R_T)

Výkon bloku je řízen výkonem turbogenerátoru a regulací na reaktoru je tento výkon udržován tak, aby byla zachována bilanční výkonová rovnováha. Je to základní mód pro řízení TG ve výkonové regulaci a pro řízení TG v ostrovním režimu. Umožňuje připojení primární, sekundární i terciální regulace. Reaktor je v tomto módu zařazen do regulace tlaku v HPK, nebo střední teploty chladiva.

Tento mód nemusí působit správně při poruchách spojených s poklesem nebo ztrátou tlaku (porušení celistvosti potrubí, poruchy přepouštěcích ventilů apod.), kdy vydává signál ke zvýšení výkonu, naopak při poruchách spojených se vzrůstem tlaku (výpadek turbíny) působí správně, tj. snižuje výkon reaktoru [14]

2.2.1.3 Organizátor řízení

Do organizátoru řízení zadává operátor požadované hodnoty parametrů, a ten pak zajišťuje pozvolnou změnu a udržení parametru na požadované hladině. Vymezuje tak zároveň i povolenou pracovní oblast výkonu reaktoru, aby nedošlo k překročení výkonového limitu limitačního systému. Organizátor řízení může pracovat v různých módech a režimech, mezi kterými přepíná operátor nebo systém automaticky.

Pro zadání požadovaného parametru a jeho hodnoty slouží zadavače organizátoru řízení:

A) Zadavač výkonu reaktoru

Stanovuje cílově zadaný výkon reaktoru a trend jeho změny. Zároveň vymezuje maximální hodnotu cílového výkonu a průběh trendu změny pod hodnotami limitačního systému.

Zadavač výkonu automaticky omezuje maximální trend zadávání výkonu reaktoru, pro výkonové změny v rozsahu 45 až 100 % N_{nom} rychlostí 1 % $N_{nom}/min.$, pro výkonové změny v rozsahu 0 až 45 % N_{nom} rychlostí 3 % $N_{nom}/min.$

Hodnota trendu je nastavitelná operátorem v rozsahu od 0 do 3 % $N_{nom}/min.$ [10]

B) Zadavač střední teploty chladiva

Stanovuje cílovou hodnotu střední teploty chladiva a trend její změny.

Trend zadané hodnoty střední teploty chladiva je nastavitelný v rozsahu 0 až 30 °C/hod.

Zadanou střední teplotu chladiva lze nastavit v rozsahu 270 až 320 °C, základní nastavení je 278,6 a 305 °C. [10]

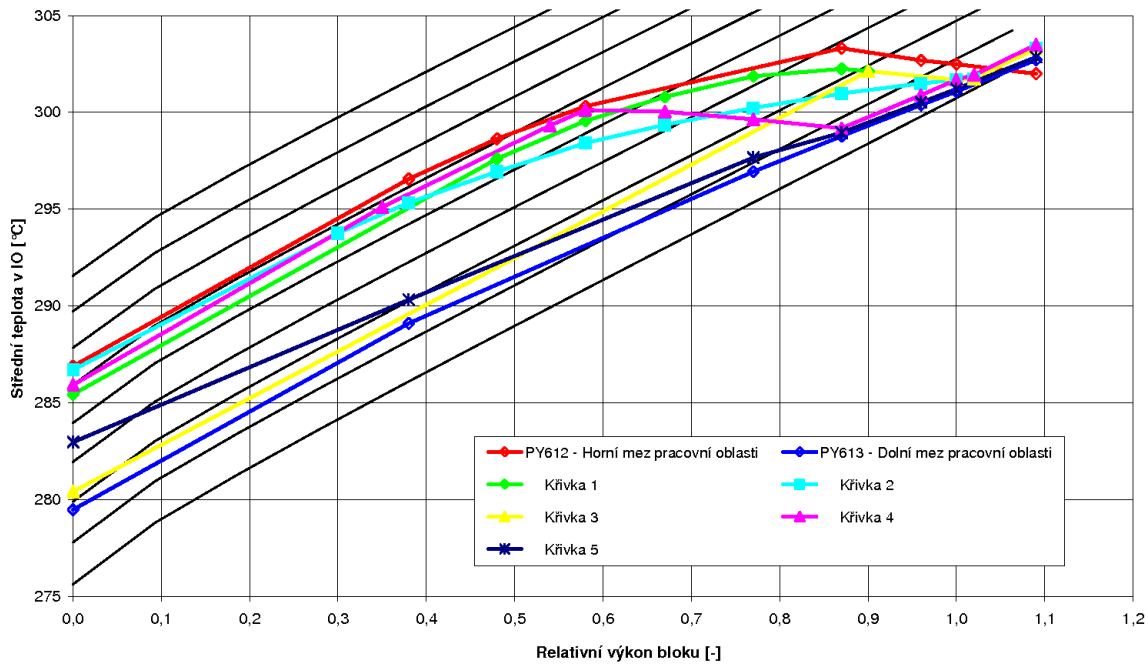
C) Zadavač tlaku v hlavním parním kolektoru

V tomto režimu, zvaném „K“, je provozován blok na výkonu nejčastěji. Režim „K“ zajišťuje, že se žádaná hodnota tlaku v HPK nachází při všech výkonových změnách uvnitř pracovní oblasti. Podstata režimu „K“ spočívá ve stanovení předpisu, podle kterého se v závislosti na výkonu reaktoru mění žádaná hodnota tlaku v HPK. Závislost žádaného tlaku v HPK na výkonu reaktoru se nazývá „Křivka režimu K“. Pomocí Křivky režimu „K“ předvolené obsluhou se v organizátoru řízení průběžně vyhodnocuje žádaná hodnota tlaku v HPK, která je zadavačem tlaku předávána do příslušného regulátoru. [10]

Tyto křivky byly stanoveny ze zkušeností s provozem bloku a obsluha je nemůže měnit. Může pouze na základě stavu bloku navolit regulátoru jednu z nich:

- Křivka 1 je navržena tak, aby JB mohl být provozován s proměnným výkonem za účelem plnění podmínek elektrizační soustavy s respektováním projektových vlastností ETE.
- Křivka 2 je navržena pro režim postupného odstavování jaderného bloku z N_{nom} do horké rezervy.
- Křivka 3 je navržena pro najetí jaderného bloku.

- Křivka 4 je určena pro provoz bloku na sníženém výkonu ve výkonovém rozsahu od cca 40 % N_{nom} do cca 80 % N_{nom} .
- Křivka 5 umožňuje změny výkonu jak při konstantní střední teplotě chladiva, tak i při konstantním tlaku páry v HPK.
- Křivka 6 umožňuje změny výkonu jak při konstantní střední teplotě chladiva, tak i při konstantním tlaku páry v HPK. [10]



Obrázek 17: Přechodové křivky režimu „K“ [10]

2.2.1.4 Regulační obvod

Blok ETE je vybaven skupinou regulátorů, které umožňují při správném nastavení a správné sestavě udržovat vybrané parametry v požadovaných mezích. Hlavními částmi regulačního obvodu jsou regulátor výkonu reaktoru a regulátor TG.

- Regulátor výkonu reaktoru umožňuje řídit výkon ručně nebo automaticky pomocí zadavače výkonu reaktoru (trendem). Řízení výkonu je realizováno pohybem regulačních tyčí. Regulátor výkonu reaktoru může pracovat ve 3 režimech – R_N , R_T , R_P . V režimu regulace podle neutronového toku se pohybuje regulační rozsah v rozmezí 3 – 100% N_{nom} , u režimu regulace podle střední teploty v rozsahu 15 – 100% N_{nom} a u režimu podle tlaku v HPK v rozmezí 15 – 100% N_{nom} .
- Regulátor výkonu TG umožňuje řídit výkon ručně nebo automaticky v režimu sledování výkonu TG nebo tlaku v HPK. Řízení je realizováno otvíráním/zavíráním regulačních

ventilů TG.

Regulační obvod dále sestává z ostatních regulátorů, kterými jsou:

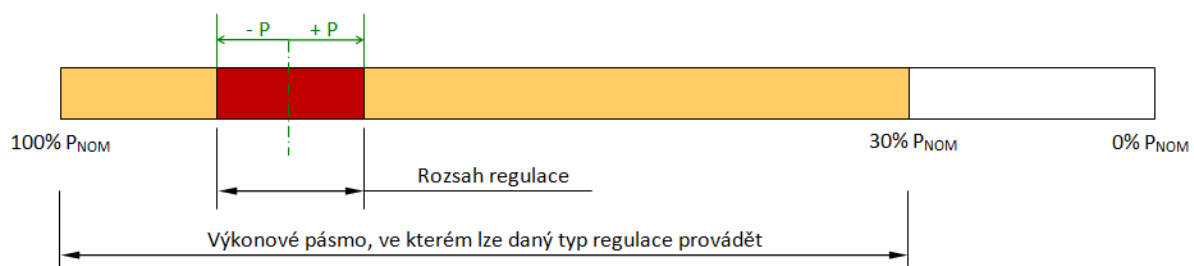
- Regulátor hladiny v HK
- Regulátor tlaku a hladiny NN
- Regulátor průtoku PNČ
- Regulátor hladiny v PG
- Regulátor otáček TBN
- Regulátor průtoku PSK
- Regulátor hladiny v KO
- Regulátor tlaku v KO

2.2.2 Provoz bloku na výkonu

Z provozního i ekonomického hlediska je nejjednodušší provozovat blok na nominálním výkonu, tj. v základním diagramu provozu elektrizační soustavy. Projekt ETE také ale umožňuje oba bloky ETE provozovat na sníženém výkonu, v primární regulaci frekvence, v dispečerském řízení i v terciální regulaci (týdenní i denní diagram zatížení ES).

Jsou-li splněny příslušné limitní podmínky, je technicky možné po neomezeně dlouhou dobu v rámci kampaně provozovat blok na výkonu od 30% do 100% N_{nom} . Stav systému a zařízení odpovídá stavu jako při normálním provozování bloku, pokud snížení výkonu nebylo způsobeno zásahem limitačního systému. [8]

Každá změna výkonu je doprovázena změnami teplot a tlaků v I.O. a II.O. a změnami v distribuci výkonu v AZ reaktoru. Výkonové změny, ať ručně nebo automaticky prováděné, mohou být prováděny buď od reaktoru k turbíně nebo od turbíny k reaktoru. Každá změna v rovnováze mezi dodávkou elektrické energie do ES a její spotřebou se projeví změnou frekvence v ES. Frekvence ES je jeden z hlavních kvalitativních parametrů dodávané elektrické energie pro spotřebitele. Cílem je udržovat frekvenci na nominální hodnotě 50Hz. Tato hodnota je udržována automaticky výrobními bloky, které jsou zapojeny do primární, popřípadě i sekundární regulace. [8]



Obrázek 18: Pásmo regulace ETE

PRIMÁRNÍ REGULACE	SEKUNDÁRNÍ REGULACE	TERCIÁLNÍ REGULACE	
[DÚP 496; 463;701]	[DÚP 496; 407; 463;701; PP TC001]	PROJEKT[DÚP 496; 407;463;701]	NABÍDKA PŘÍPRAVY PROVOZU
VÝKONOVÉ PÁSMO: 500 - 1060 MW _E	VÝKONOVÉ PÁSMO: 500 - 1060 MW _E	VÝKONOVÉ PÁSMO: 300 - 1060 MW _E	VÝKONOVÉ PÁSMO: 500 - 1060 MW _E
ROZSAH: MAX. ± 20 MW _E	ROZSAH: MAX. ± 50 MW _E		
TREND: ZPĚTNÉ VAZBY (OD SÍTĚ, RESP. TG K RE)	TREND: MAX. 10 MW _E /MIN	TREND: PÁSMO 30% - 45% N _{NOM} MAX. 3% N _{NOM} /MIN (MAX. 30 MW _E /MIN) PÁSMO 45% -100% N _{NOM} MAX. 1% N _{NOM} /MIN (MAX. 10 MW _E /MIN)	TREND: MAX. 1% N _{NOM} /MIN (MAX. 10MW _E /MIN)

Tabulka 1: Trendy a rozsahy regulací frekvence ETE

V současné době nevyužívá ani jeden blok ETE žádnou z uvedených regulací frekvence. Přestože jsou na to bloky po technické stránce připraveny (byly už takto realizovány v projektu a dále i rozšířeny), z hlediska šetrnosti k technologickému zařízení je blok nevyužívá. V blízké budoucnosti se uvažuje o znovuzavedení bloků do terciální regulace po vyřešení problémů s axiálními oscilacemi a praskáním paliva. Nabídka přípravy provozu na sekundární a primární regulaci se v blízké době nepřipravuje. **Bloky se aktivně účastní jen primární a sekundární regulace napětí.**

Pro úplnost dané problematiky budu v následujících kapitolách popisovat principy a funkce jednotlivých regulací i přesto, že je elektrárna v současnosti nevyužívá.

2.2.3 Primární regulace

Primární regulací kmitočtu se rozumí soubor technických prostředků, zajišťujících rychlou změnu výkonu bloku (řádově v čase několika sekund), jako reakci na změnu kmitočtu elektrizační soustavy. Jedná se o autonomní proporcionální regulaci bloku, která slouží k základní stabilizaci kmitočtu ES.

$$\Delta N_{pr} = \frac{f - f_z}{S_{pr}} \times \frac{N_{nom}}{f_z} \times 100 \quad (2.11)$$

N_{pr} - změna výkonu JB vyvolaná odchylkou kmitočtu [MW]

N_{nom} - nominální výkon bloku [MW]

f - skutečná hodnota kmitočtu [Hz]

f_z - žádaná hodnota kmitočtu [Hz]

S_{pr} - nastavená statika primární regulace kmitočtu [%][10]

Primární regulace představuje automatické změny výkonu bloku do velikosti $\pm 2\% N_{nom}$. Projekt ETE umožňuje zapojit oba bloky do primární regulace, v souladu s požadavky propojené soustavy ENTSO-E. Zapojení bloku do primární regulace provádí obsluha BD na příkaz VRB. Blok je možné zapojit do primární regulace pouze tehdy, je-li regulace turbíny v režimu TG_N a regulace reaktoru v režimu R_P popřípadě v režimu R_T . Projekt doporučuje, aby reaktor byl v režimu R_P a aby byla navolena některá K-křivka, s využitím jejího izotermického plata. Podle hladiny výkonu se bude jednat o křivku K1, nebo K4

Provoz bloku v primární regulaci se předpokládá využívat na hladinách výkonu vyšších než $30\% N_{nom}$, tedy v plném regulačním rozsahu bloku (RRT). Po povelu na zapojení bloku do primární regulace organizátor řízení vyšle signál na připojení korektoru frekvence v řídicích obvodech TG. [8]

Tento povel dále aktivuje v obvodech regulace rozšíření pásma necitlivosti regulátoru tlaku z hodnoty 1°C na $1,4^\circ\text{C}$. Rozšíření pásma necitlivosti je současně navoleno i pro regulátor reaktoru v módu regulace střední teploty pro případné využití tohoto regulátoru v primární regulaci. Organizátor řízení při navoleném korektoru frekvence v režimu TG_N a R_P , neomezuje největší možnou zadanou hodnotu výkonu reaktoru. Při nastavení primární regulace se výkon bloku řídí zadáváním výkonu ze strany TG. Zadaný výkon TG je určen součtem výstupu korektoru frekvence a výstupu zadavače výkonu TG. [10]

Po zapojení bloku do primární regulace dojde k vyrovnání výkonu mezi reaktorem a turbínou vlivem samoregulačních vlastností reaktoru, tj. bez změny polohy klastrů. Při vzniku požadavku na

změnu výkonu TG se tento požadavek odreguluje tak, že 50% změny je pokryto do 5 sekund a zbytek do 30 sekund. Protože blok pracuje v regulaci od turbíny k reaktoru, tyto změny se nejprve projeví na turbíně a následně poté na reaktoru. Tím je zajištěno, že změna na reaktoru je pomalá, akumulace tepla v I.O. i II.O. je veliká, protože pásmo necitlivosti tlaku v HPK Δp_{HPK} je větší než nula (0,2 MPa). Proto nedojde k okamžité změně polohy klastrů. Následně se projeví zpětnovazební efekty a i při delším setrvání na změněné hladině výkonu se nemusí poloha klastrů měnit. [8] Změny tlaku v HPK by neměly být kompenzovány regulátorem reaktoru ani zapůsobením PSK. Necitlivost regulátoru reaktoru musí být nastavena tak, aby vyhovovala očekávaným změnám parametrů při primární regulaci. [10]

Počet výkonových změn do velikosti $\pm 2\% N_{\text{nom}}$ není za dobu životnosti bloku nijak omezen a proto primární regulace nezpůsobuje snižování životnosti zařízení bloku. [8]

Pro začátek palivové vsázky je charakteristické, že zpětné vazby od teploty chladiva jsou poměrně malé. To způsobuje větší změny tlaku v HPK a teplot v I.O. (v porovnání s koncem palivové vsázky), což může vést až k omezení výkonu generátoru působením korektoru tlaku v HPK.

Průběh přechodových procesů je pro konec palivové vsázky obecně stejný, jako pro její začátek. Liší se však velikost zpětných vazeb AZ, protože jsou výrazně vyšší změny reaktivity od změny teploty chladiva. Změny tlaku v HPK jsou proto poměrně malé a ani při velkých výkonech bloku a velkých hodnotách korekčního signálu korektoru frekvence k omezení výkonu generátoru působením korektoru tlaku v HPK nedojde, a to ani po dlouhodobém požadavku na změnu. [10]

2.2.4 Sekundární regulace

Sekundární regulací kmitočtu a předávaných výkonů se rozumí soubor technických a programových prostředků (LFC), zajišťujících kvalitu (kmitočet) elektrické energie a regulaci sjednané výměny energie mezi partnery v propojené soustavě. V případě výpadku výroby nebo spotřeby v soustavě ČR musí sekundární regulace ČR (při současné funkci primární regulace všech bloků pracujících v propojené soustavě) dosáhnout rovnováhy mezi výrobou a spotřebou ČR, tj. obnovit kmitočet v propojené soustavě a saldo předávaných výkonů na žádanou hodnotu během několika málo minut. [10]

Projekt ETE předpokládá změny $\pm 10\% N_{\text{nom}}$. Tyto změny jsou ale omezeny šířkou pásma regulace klastry (povolené polohy klastrů a nesmí dojít k vodovyměně) a povolenou změnou axiálního ofsetu ($\pm 5\%$). Šířka pásma pro sekundární regulaci je silně ovlivněna stavem palivové vsázky. Na začátku kampaně dosahuje axiální ofset vyšších hodnot a pro dodržení požadavku

regulace bez vodovýměny je nutno pásmo regulace zúžit na $\pm 5\%$ N_{nom} .

Proto je pro bloky ETE v současné době odzkoušena a schválena tato regulace pro změny výkonu $\pm 5\%$ N_{nom} (a prakticky se moc měnit nebude). Teoreticky je možno provozovat blok od výkonu 30% N_{nom} , prakticky se předpokládá využití této regulace od 50% N_{nom} . [8]

Sekundární regulaci volí operátor. Prostřednictvím OR operátor nastaví mód regulace TG_N a tím se nastaví řízení výkonu bloku od TG k reaktoru. Prostřednictvím zadavače výkonu TG je řízen výkon bloku. Cílová hodnota zadavače výkonu TG je řízena z dispečinku prostřednictvím terminálu elektrárny TELETE. Terminál elektrárny rovněž přenáší informace z jednotlivých bloků ETE do ústředního dispečinku.

Řízení tlaku volí operátor na zadavačí tlaku v HPK v módu „K“ dle křivek K1 nebo K4. [10] Počet výkonových změn do velikosti $\pm 5\%$ N_{nom} není za dobu životnosti bloku nijak omezen a proto sekundární regulace nezpůsobuje snižování životnosti zařízení bloku. [8]

2.2.5 Terciální regulace

Jedná se o změny výkonu iniciované dispečinkem ES na základě predikce nízkého zatížení. Nejčastěji se jedná o tzv. víkendovou regulaci, kdy je nutno pro nedostatečný odběr snížit výrobu elektrické energie i o několik desítek procent. Vlastní snížení, nebo i zvýšení výkonu se provede na základě požadavku energetického dispečinku, VRB dá pokyn obsluze BD, a ta buď od turbíny k reaktoru, nebo od reaktoru k turbíně pomocí pracovních stanic a zadavačů, nebo i třeba ručně (změnou polohy klastrů nebo regulačního ventilu TG) provede požadovanou změnu. [8]

Terciální regulace se provádí buď prostřednictvím zadávání cílového výkonu bloku operátorem na základě požadavků dispečinku, nebo v dálkovém řízení, kdy se cílový výkon bloku mění přímo z regulátoru na dispečinku.

Pokud je blok řízen ze strany TG, zadává se cílový výkon na zadavačí TG. Jestliže je blok řízen ze strany reaktoru, zadává se cílový výkon na zadavačí výkonu reaktoru a TG je v řízení tlaku v HPK.

Po změně cílového výkonu bloku na zadavači se začíná měnit žádaná hodnota výkonu na regulátoru výkonu TG. Změnou odběru páry turbínou se mění tlak v HPK, teplota sytosti v PG a teploty v I.O. Výkon AZ se mění vlivem zpětných vazeb od teploty chladiva. Vzrůstá rozdíl mezi žádaným a skutečným tlakem v HPK, který je kompenzován pohybem regulačních tyčí. [10] V případech větší změny výkonu než 50% N_{nom} může vlivem většího rozdílu mezi žádaným a skutečným tlakem HPK docházet k zapůsobení sprchového systému HPK, který rozdíl snižuje.

Při větších změnách výkonu a na delší dobu dochází i ke změnám koncentrace kyseliny borité, jejíž novou hodnotu stanoví výpočtem provozní fyzik. [8]

2.2.6 Regulace napětí

A) Sekundární regulátor napětí v pilotním uzlu R400 kV Kočín (ASRU)

Regulátor je určen pro řízení napětí v pilotním uzlu rozvodu VVN, což je v případě JE Temelín rozvodna 400 kV Kočín.

Parametry napětí v síti 400kV - 400 až 420 kV s tol. +/- 1,5 kV od zadané hodnoty

B) Primární regulátor napětí

Napětí na straně 24 kV alternátoru reguluje primární regulátor, který je ovládán číslicovým systémem PRIMIS. Žádanou hodnotu je možné nastavovat ručně, povely z řídicího systému, ze systému PRIMIS, nebo automaticky ze sekundárního regulátoru napětí v pilotním uzlu Kočín (ASRU). Maximální nastavení primárního regulátoru napětí je $1,1 U_n$ [10]

2.2.7 Dopady na technologickou a jadernou část

- 1) **Praskání paliva** – Rychlou změnou teploty palivových tablet dochází k tepelnému pnutí, nabobtnání a ke vzniku mikrotrhlinek na palivu. Ve výsledku pak může docházet k netěsnostem pokrytí a úniku štěpných plynů do primárního okruhu.
- 2) **Axiální ofset** - U rozměrnějších aktivních zón může vlivem xenonových oscilací dojít až k rozdělení zóny na více částí, kdy každá část vykazuje rozdílnou reaktivitu, tedy i tepelný výkon. To je z hlediska kontroly výkonu nepřijatelné. (viz. Kapitola 2.1.6)
- 3) **Výkonový efekt na konci kampaně** – Nedoporučuje se využívat možnosti terciální regulace na konci kampaně (v její poslední třetině až čtvrtině), to platí pro velké změny výkonů. Důvodem je možné opětovné nedosažení 100% N_{nom} požadovaným trendem.
- 4) **Omezení turbíny** – Pro turbosoustrojí jsou definována zakázaná výkonová pásma, kde není dovoleno stabilizovat výkon. Vzhledem k namáhání lopatek, způsobeného vibracemi, není povoleno pásmo 650 až 850 MWe. Provoz TG na výkonech pod 30% N_{nom} je nežádoucí z hlediska eroze lopatek.

3 OSTROVNÍ REŽIM

Bloky JE Temelín pracují v normálním provozu do elektrizační soustavy. V této propojené soustavě je prováděna řada opatření pro udržení požadované kvality el. energie, bilance vyráběných i spotřebovávaných výkonů a stability soustavy.

Přesto však může v takto provozované synchronně pracující soustavě dojít k poruchám, které povedou k odepnutí určité oblasti sítě od zbytku ES. Tím vznikne provozní stav nazývaný ostrovní režim, ve kterém pracuje určitá část ES, která se oddělila od původní propojené ES, samostatně s vlastní frekvencí. Tento ostrov může obsahovat různý počet zdrojů a spotřebičů el. energie. Hodnota frekvence v ostrovu a její změny závisí na bilanci dodávky a odběru činného výkonu této oblasti. V ostrovu výkonově deficitním kmitočet klesá, v ostrovu výkonově přebytkovém stoupá. Velikost ostrova, do kterého bude pracovat blok ETE, nelze předem stanovit. Může být značně rozdílná: od velké části ES s dalšími bloky synchronně pracujících elektráren na jedné straně, po minimální ostrov, který představuje turbogenerátor napájející vlastní spotřebu. [10]

Ostrovní provoz bloku se vyznačuje rychlými změnami systémových veličin – frekvence a napětí, což souvisí s tím, že zdroj pracuje do izolované části soustavy. Blok přechází automaticky do regulačního režimu ostrovního provozu při poklesu frekvence pod 49,8 Hz a při vzrůstu frekvence nad 50,2 Hz. Změny zatížení ostrova představují velké nároky na regulaci činného výkonu výroby. Zatížení je proměnné, a tím vyvolané změny napětí a frekvence musí být blok schopen řešit svou autonomní regulací (na rozdíl od paralelního provozu, při kterém jsou změny napětí a frekvence řešeny prostřednictvím systémových služeb). [11]

3.1 SCHOPNOST OSTROVNÍHO PROVOZU

Schopnost bloku pracovat do ostrovní sítě je jednou s podpůrných služeb provozu PS (PpS). Obecné zásady práce bloku v ostrovní síti jsou uvedeny přímo v Kodexu PS. Bloky ETE jsou v souladu s těmito požadavky, je však preferováno hledisko bezpečného provozu jaderného bloku před aktivní účastí v této podpůrné službě. Schopnost bloku zvládnout ostrovní provoz je i přes všechny technické komplikace přínosná pro zvýšení jaderné bezpečnosti. Ostrovní provoz (OSP) na vlastní spotřebu představuje další stupeň zajištění dodávky elektrické energie do všech systémů elektrárny.

V koncepci ETE je tato podpůrná služba členěna do dvou principiálních funkcí:

- a) **Aktivní** podpora OSP sítě - schopnost detekce OSP sítě a stabilní práce bloku do sítě v OSP
- b) **Pasivní** podpora OSP sítě a zajištění bezpečnosti bloku - zregulování na VS. Tím si blok zachová integritu jako zdroj, který může být opět přiřazován k síti v rámci obnovování jejího provozu. [13]

3.1.1 Přechod do ostrovního provozu

Přechod do ostrovního provozu bloku je charakterizován obvykle náhlou změnou frekvence a vznikem bilanční nerovnováhy činného, případně jalového výkonu. Při přechodu do ostrovního provozu (jehož vznik je indikován vhodným frekvenčním relé, které je nastaveno na hodnotu danou frekvenčním plánem) je nutné okamžitě zajistit:

1. změnu režimu regulace bloku na proporcionální regulaci otáček
2. odpojení dálkové regulace výkonu (vypojení zdroje ze sekundární regulace f a P)
3. odpojení ASRU ze systému terciární regulace napětí
4. aperiodický a stabilní přechod otáček na novou hodnotu, která je dána frekvencí v ostrovu a nastavenými parametry regulace otáček. Výkon bloku se v mezním případě může změnit z hodnoty jmenovitého výkonu až k hodnotám vlastní spotřeby.
5. odepnutí bloku od vnější sítě do provozu na vlastní spotřebu (i z jmenovitého zatížení) nebo na provoz do vyčleněné části DS. Přechod na otáčkovou regulaci musí být stabilní.
6. přepnutí potřebných regulací zdroje do režimu vhodného pro ostrovní provoz
7. další provoz podle pokynů přenosové a distribuční soustavy [11]

3.1.2 Ostrovní provoz

Regulace bloku a technologické zařízení bloku musí zajistit:

1. stabilní paralelní spolupráci s ostatními elektrárnami zapojenými v ostrovu
2. adekvátní odezvu dodávaného činného a jalového výkonu na změny frekvence a napětí, a to i při práci s nenominálními parametry napětí a frekvence. Adekvátní odezvou rozumíme tzv. idealizovanou závislost výkonu bloku P_{id} na stacionární (po odeznění rychlých elektromechanických přechodných dějů) odchylce frekvence f :

$$P_{id} = P_0 - \frac{100}{\delta} \times \frac{P_n}{f_n} \times \Delta f \quad (2.12)$$

kde: δ je statika proporcionálního regulátoru otáček (doporučená hodnota je 4 až 8 %), P_0 je výkon bloku před přechodem do ostrovního provozu nebo hodnota daná základním otevřením regulačních prvků (reg. ventilů u parních turbín, ovladače paliva u plynových, a rozváděcího/oběžného kola u vodních turbín) v případě, že elektrárna provedla změnu výkonu na pokyn dispečera DS.

3. dle pokynů dispečera DS měnit dostatečně jemně a plynule otáčky (výkon) soustrojí (elektrárny) a regulovat napětí [11]

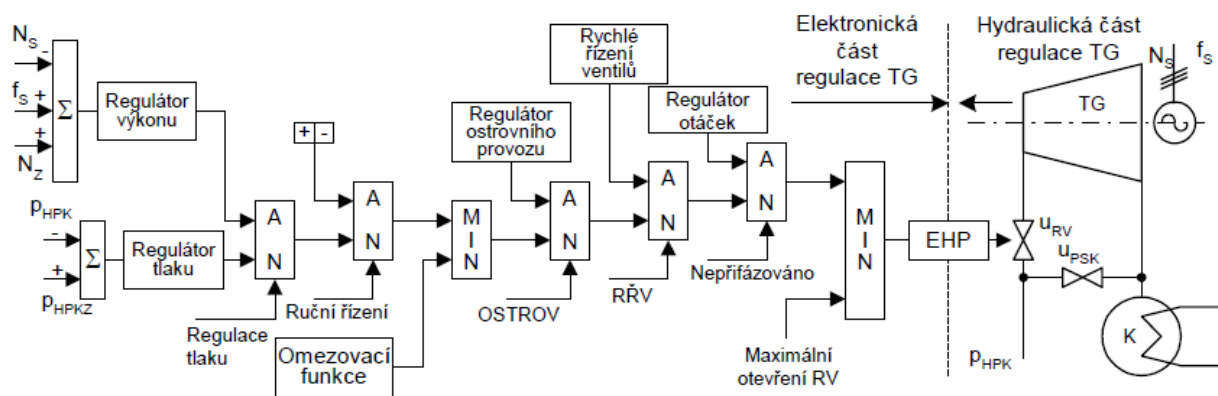
3.1.3 Opětovné připojení ostrova k soustavě

Blok musí být schopen:

1. pracovat v režimu ostrovního provozu po dobu minimálně 2 hodin,
2. dle pokynů dispečera DS regulovat frekvenci ostrova dostatečně plynule a jemně, tak aby mohlo dojít v daném místě k opětovnému přifázování ostrova k propojené soustavě,
3. blok musí být schopen připojení k vnější síti při kmitočtu dle frekvenčního plánu a svorkovém napětí ($92 < u < 108$)% U_n ,
4. v případě, že se blok fází v rozvodně DS, musí být blok schopen přivést napětí po blokovém vedení do této rozvodny. [11]

3.2 REGULÁTOR OSTROVNÍHO PROVOZU (ROP)

V ostrovním provozu je potřeba omezit velké a rychlé změny výkonu primárního zdroje, a tak je část parní produkce odregulována pomocí přepouštěcích stanic do kondensátoru (PSK). Tato část výkonu je pak k dispozici pro kompenzaci rychlých změn zátěže ostrova a zabránění nepovolených změn výkonu reaktoru. [12] Provoz bloku ETE v ostrovním provozu zajišťuje samostatná část regulátoru turbíny nazvaná regulátor ostrovního provozu (ROP). Do režimu ROP se blok přepíná frekvenčním relé FREA16 při odchylce frekvence větší jak 200 mHz. Vlastní ROP je tvořen vlastním proporcionálním regulátorem otáček, základního otevření (BO) a omezovací regulací tlaku (viz. Příloha 1). Blok musí pružně automaticky reagovat na potřebu výkonu ostrova, což umožní otáčková regulace s vhodnými parametry, tj. malou necitlivostí a vhodnými dynamickými vlastnostmi, a vhodná struktura regulací bloku. Regulátor otáček má nastavitelné zesílení (statiku) a možnost omezení rychlosti změny výstupu v závislosti na tom, zda je tlak regulován reaktorem nebo přepouštěcími stanicemi PSK. Základní otevření zajišťuje tzv. beznárazové přepínání regulátoru z režimu regulace výkonu/tlaku do ROP. Omezovací regulace tlaku působí při poklesech tlaku. V režimu ROP regulace reaktoru přechází do regulace tlaku. [12]



Obrázek.19: Principiální schéma digitálního regulátoru [12]

3.3 FREKVENČNÍ OCHRANY

Normální provoz ES je z hlediska kmitočtu definován v rozsahu 49,8-50,2 Hz (odpovídá otáčkám TG v rozsahu 2988 –3012 ot/min), kde je kmitočet udržován činností primární a sekundární regulace P a f. Pokud se frekvence udržuje v tomto pásmu, neprovádějí se žádné zásahy.

3.3.1 Frekvenční relé FREA16

Při překročení těchto hranic tj. při dosažení odchylky $\pm 0,2$ Hz, začíná působit ochrana FREA16 ve dvou stupních:

1. Při překročení frekvence pod 49,8 Hz nebo nad 50,2 Hz působí první stupeň el. ochrany FREA16 na přepnutí z výkonové regulace na regulaci ostrovní bez časového zpoždění.
2. Při překročení mezi frekvence pod 47,9 Hz s nastaveným časovým zpožděním 0,8 s, a nad 51,5 Hz s nastaveným zpožděním 15s, které překlene přechodné zvýšení kmitočtu při odlehčení TG, dojde od druhého stupně ochrany FREA 16 k odpojení bloku od soustavy blokovým vypínačem 400 kV (v rozvodně Kočín), regulace TG se přepíná z „ostrovní“ na otáčkovou a současně blok reguluje na vlastní spotřebu. [10]

3.3.2 Ochrana při převýšení zrychlení

Při větších odchylkách frekvence působí další stupně ochran, které chrání samotný generátor. Pro úspěšné zvládnutí rychlého odlehčení TG působí ochrana při převýšení zrychlení (elektronický regulátor akcelerace). Od signálu zrychlení 150 ot/min/s , jsou-li současně otáčky TG $> 3012 \text{ ot/min}$, působí signál na urychlovač a magnety ventilů a klapky TG. Pokud jsou otáčky TG $> 3012 \text{ ot/min}$ nebo $< 2988 \text{ ot/min}$, potom se základní otevíření ventilů snižuje nebo zvyšuje rychlostí 1 %/min , dokud se frekvence v ostrovní soustavě neustálí v rozmezí 49,8 - 50,2 Hz. [10]. Při zvýšení otáček nad 3330 ot/min , působí ochrana TG od zvýšených otáček a odstavuje TG.

3.3.3 Frekvenční odlehčování

U deficitních ostrovů je nutné pomocí frekvenčního odlehčování co nejrychleji zajistit snížení odebíraného výkonu na hodnotu blízkou nominálnímu výkonu elektrárny. Snížení výkonu zátěže probíhá skokově ve čtyřech stupních pomocí frekvenčních relé instalovaných v rozvodnách 110 kV a 22 kV. Jednotlivé stupně jsou uvedeny v Tabulce 2. Potenciálně udržitelný ostrov napájený jedním blokem ETE proto nesmí představovat zátěž vyšší než $200\% N_{\text{nom}}$, tedy 2110 MW.

	1.	2.	3.	4.
Stupeň / frekvence [Hz]	49	48,7	48,4	48,1
Objem odlehčené zátěže [%]	12	12	12	14

Tabulka 2: Stupně frekvenčního odlehčování [12]

3.3.4 UPR - Ochrana reaktoru od podfrekvence HCČ

Další frekvenční ochrana, kterou je blok vybaven je Ochrana reaktoru od podvýkonu a podfrekvence HCČ - UPR. Tato ochrana reaguje na pokles příkonu HCČ pod 50% $P_{HCČ}$ po dobu 0,9 s. (nominální činný příkon HCČ je $P_{HCČ}=5000$ W), kterému odpovídá frekvence $f=39,7$ Hz nebo vybavuje při rychlosti poklesu frekvence $df/dt = 1,4$ Hz/s. UPR vydává signál na ROR a uzavření RZV turbogenerátoru při snížení elektrického činného příkonu 3 ze 4 HCČ pod nastavenou mez.

Tabulka mezních frekvencí pro jednotlivé frekvenční ochrany je uvedena v Příloze 2.

4 SIMULACE OSTROVNÍHO PROVOZU

Na základě předem probrané problematiky jsem v inženýrském simulačním programu WinDYTE 8.0 provedl simulace ostrovních provozů na různých výkonových hladinách. Zaměřil jsem se především na přebytkové ostrovy, kdy hrozí při nedostatečně rychlém snížení výkonu bloku nárůst frekvence nad dovolenou mez. Zvládnutí výkonově deficitních ostrovů závisí na rychlém frekvenčním odlehčování. Po odlehčení většinou pak dochází k výkonovému překmitu do ostrova mírně přebytkového.

4.1 SIMULAČNÍ PROGRAM DYTE [15]

Simulační program je založen na simulačním jazyku MODYS. Tento simulátor je určený pro simulaci chování jaderného bloku jaderné elektrárny Temelín (DYTE) a jaderné elektrárny Dukovany (SIMED) při normálních a abnormálních režimech na PC. Umožňuje monitorovat časové průběhy technologických parametrů jako jsou výkon, teplota, tlak a hladiny v jednotlivých složkách jaderné elektrárny. Dále pak umožňuje sledovat stav regulačních a ochranných systémů.

Moduly, ze kterých je simulátor sestaven, se dají dělit do 5-ti skupin:

- **moduly vstupních dat** – jsou zadána základní data, definovány aproximace a dopočteny zbývající parametry (např. jmenovité hodnoty, které nelze zadat přímo)
- **moduly popisující jednotlivé technologické celky** – soustavy diferenc. a algebraických rovnic popisujících dynamiku jednotlivých částí jaderné elektrárny (AZ, TG atd.)
- **moduly regulačních obvodů** - soustavy diferenciálních a algebraických rovnic popisujících dynamiku měřících čidel, regulátorů. Simulované řídicí algoritmy respektují znalosti řídicího systému. (U jaderné elektrárny Dukovany např.: TVER – původní regulátor turbíny, ARM – původní analogový regulátor reaktoru; u jaderné elektrárny Temelín pak regulace bloku TCS – řídicí systém turbíny, RLCS – limitační systém a regulátor reaktoru)
- **moduly ochranného systému technologických celků** – rovnice logických vztahů popisujících limitační a blokovací podmínky (u elektrárny Dukovany se jedná o tyto systémy: RTS – systém pro rychlé odstavení reaktoru, ESFAS – systém pro spouštění technických prostředků pro zajištění bezpečnosti bloku apod.)
- **moduly pro výstup výsledků** –
 - a) pro výstup analogových veličin – tabulky a uživatelský výstup s definovanými veličinami
 - b) výstup logických hodnot veličin – zápis souborů na disk – soubor pak lze převést do souboru ve znakové formě a seřadit buď podle veličin nebo podle času změn

Používaný simulátor DYTE nemá v sobě implementovanou ochranu od podfrekvence HCČ UPR. Tato ochrana vydává při rychlém poklesu frekvence (1,4 Hz/s) signál na ROR. Níže uvedené simulace jsou tedy provedeny bez zásahů UPR, vliv UPR na stabilitu ostrova bude zhodnocen dodatečně.

Model turbíny v simulátoru odpovídá reálnému chování z pohledu sekundárního okruhu elektrárny. Ovšem z pohledu generátoru a odezvy na vnější elektrickou síť reálnému chování ne zcela odpovídá. Jeví se o něco „lehčí“, tudíž dochází k rychlejším nárůstům otáček při náhlém odlehčení. U menších ostrovů proto může docházet k zapůsobení ochrany od akcelerace otáček (3330 ot/min).

Zároveň u simulovaných dějů dochází ke skokové změně zátěže ostrova v čase 0. V reálné soustavě by se požadovaný výkon měnil s určitou setrvačností spotřeby a přechodovými ději při rozpadu sítě do ostrova. To má také za následek rychlejší navýšení otáček.

Z těchto důvodů může dojít k výsledkům, které nebudou zcela odpovídat reálnému chování bloku v ostrově, nebo výsledkům provedeným v jiných simulačních programech.

4.2 SIMULOVANÉ PRŮBĚHY

Zátěže ostrovů jsem snižoval po 10% až do velikosti VS. V mezních výkonech jsem pak volil menší krok, abych přesně určil mez, kdy ostrov není udržitelný. Tímto způsobem jsem určil 3 rozdílné odezvy bloku na ostrovní provoz v závislosti na velikosti zatížení:

1) Do výkonu **44%** je ostrov **zvladatelný** (při zanedbání UPR)

- Otáčky nepřesahují 3330 ot/min – čidlo akcelerace nepůsobí
- Překmit otáček nad 3090 ot/min není delší než 15 s. (trvá cca 10 s – FREA 2° nepůsobí)

2) Od výkonu **44 %** je ostrov **nezvladatelný**

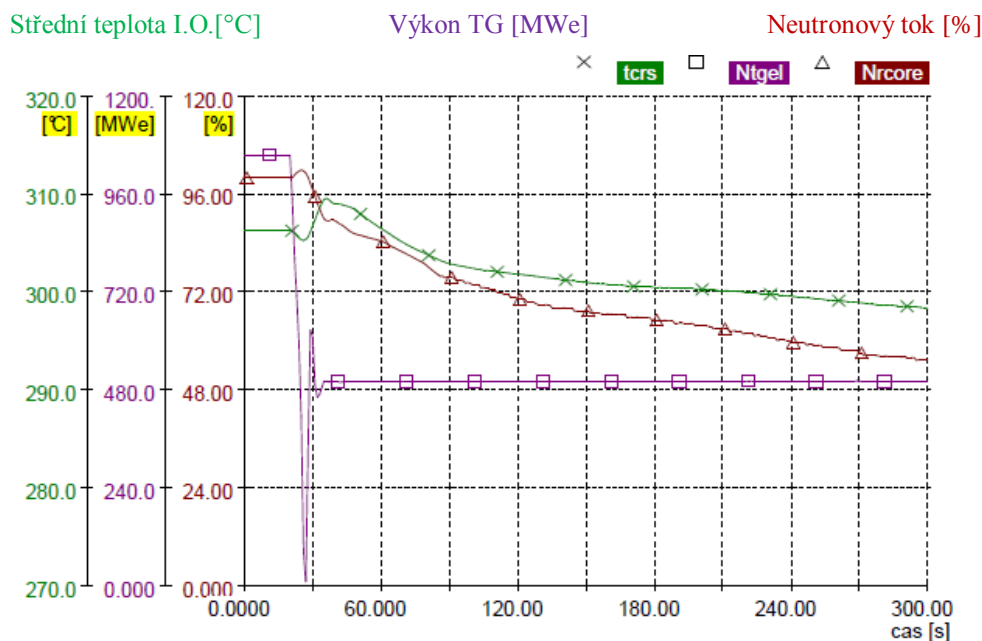
- Překmit otáček nad 3090 ot/min není delší než 15 s. (trvá cca 10 s – FREA 2° nepůsobí)
- Otáčky jsou vyšší než 3330 ot/min – čidlo akcelerace působí a odstává TG

3) Provoz na **VS (5%)** je **zvladatelný**

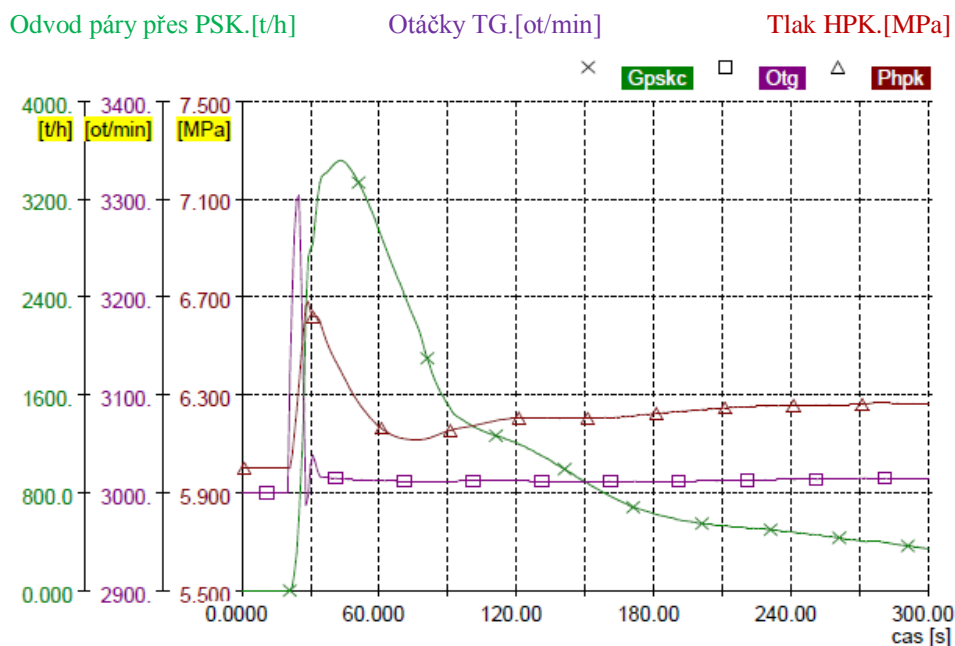
Působení LS (c) a snížení výkonu RE na 38 %, přebytek páry odvádí PSK

Z výše uvedených zhodnocení zvladatelnosti ostrovů jsem vybral 3 typové ostrovy, na kterých budu simulované děje popisovat. Jde o zvladatelný ostrov 500 MW, nezvládnutý ostrov 440 MW a o sjetí bloku na vlastní spotřebu o výkonu 50 MW. Ostatní průběhy jsou uvedeny v Přílohách 4 až 13.

4.2.1 Přechod do ostrova 500 MW



Obrázek.20: Výkon bloku po přechodu do OSP 500 MW



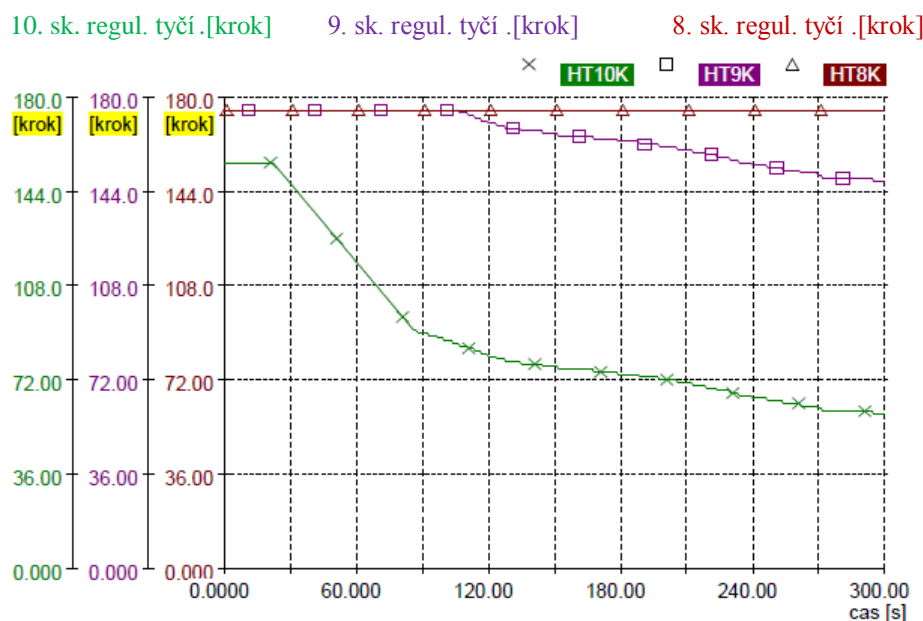
Obrázek.21: Tlak v HPK po přechodu do OSP 500 MW

V čase 20 s dochází k přepnutí bloku do ROP. Náhlé odlehčení TG má za následek přechodné zvýšení otáček (tedy i frekvence) do doby, kdy se otevrou ventily do PSK a začnou odvádět přebytek parní produkce mimo turbínu. Tento přechodný jev má za následek nárůst tlaku v HPK i KO. Pro snížení tlaku v KO spouští sprchový systém. Nárůst frekvence TG má vliv na otáčky HCČ. Ty se dočasně zvýší a ochladí tak v prvním okamžiku chladivo I.O. Ochlazení je pak doprovázeno mírným zvýšením reaktivity a nárůstem neutronového toku. ROP začíná nejrychlejším trendem

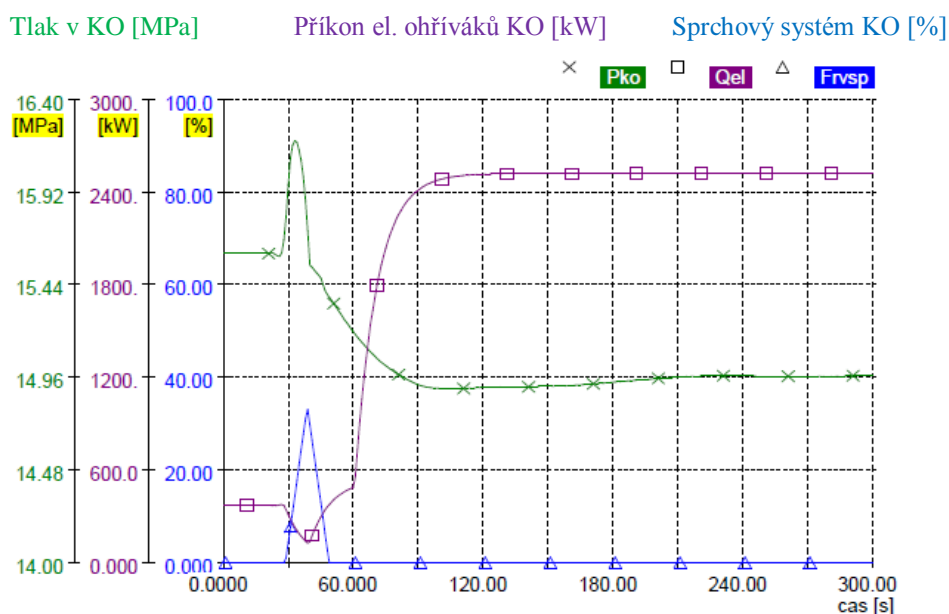
2cm/s zasouvat 10. skupinu regulačních tyčí.

V čase 40 s dochází k ustálení otáček TG s mírnou nadfrekvencí. Tlak v HPK se snižuje a PSK se uzavírají se snižujícím se výkonem reaktoru. Pokles teploty v I.O. má za následek pokles tlaku v KO, což je kompenzováno elektroohříváky v KO. 9. skupina regulačních tyčí omezuje nárůst reaktivity od zpětných teplotních vazeb reaktoru.

V čase 120 s lze považovat přechodový proces za ukončený, hlavní parametry I.O. a II.O. jsou ustálené, doprovázené jen snižujícím se výkonem reaktoru.

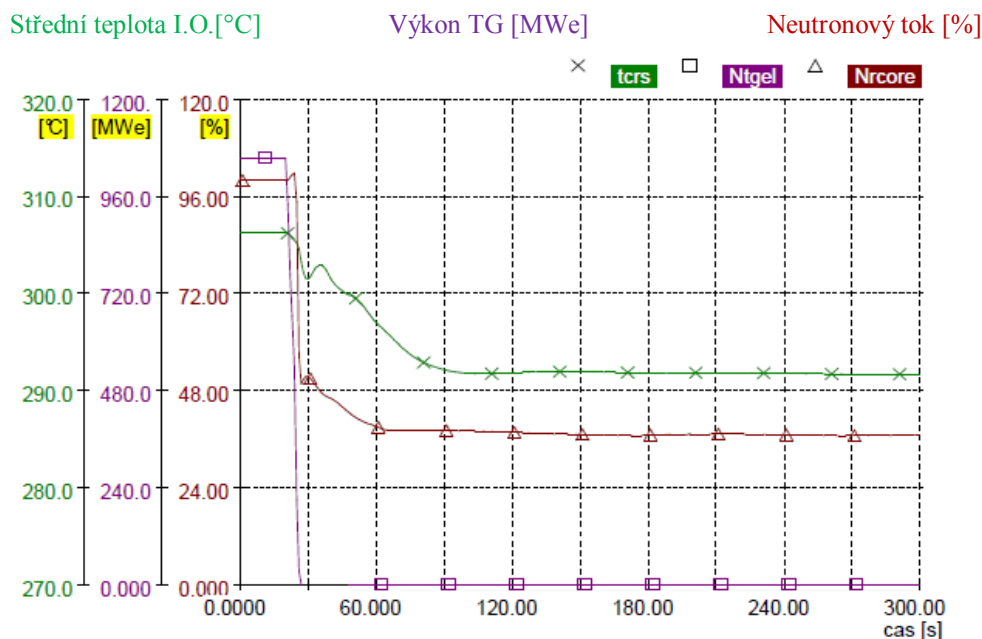


Obrázek.22: Polohy regulačních tyčí po přechodu do OSP 500 MW

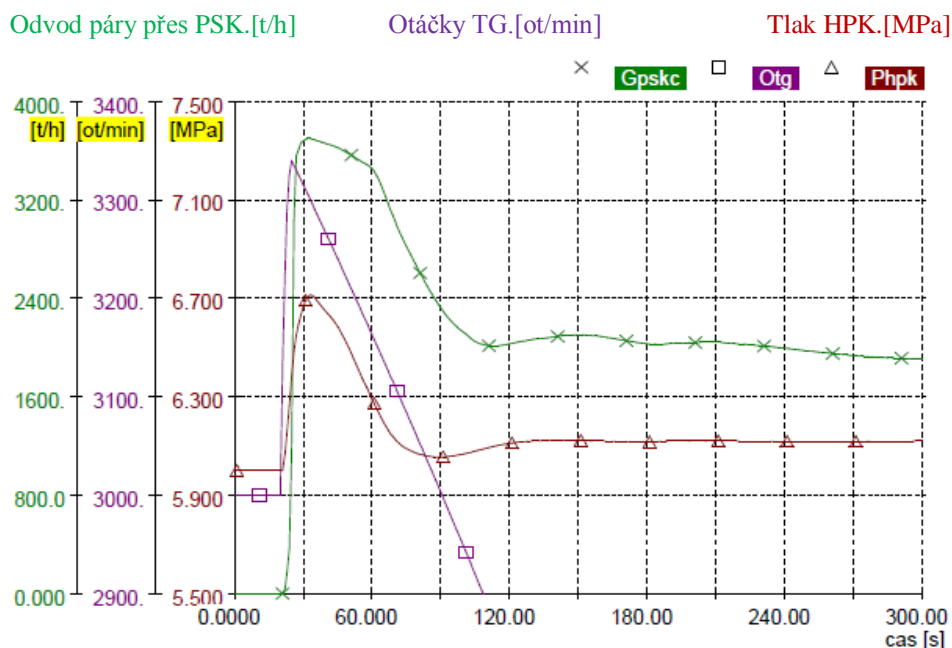


Obrázek.23: Tlak v KO po přechodu do OSP 500 MW

4.2.2 Přechod do ostrova 440 MW



Obrázek.24: Výkon bloku po přechodu do OSP 440 MW

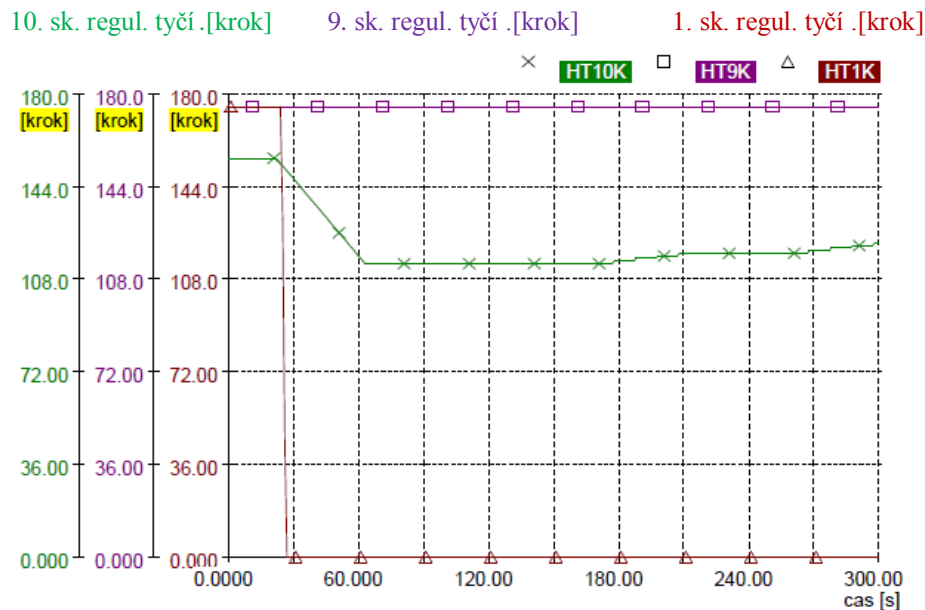


Obrázek.25: Tlak v HPK po přechodu do OSP 440 MW

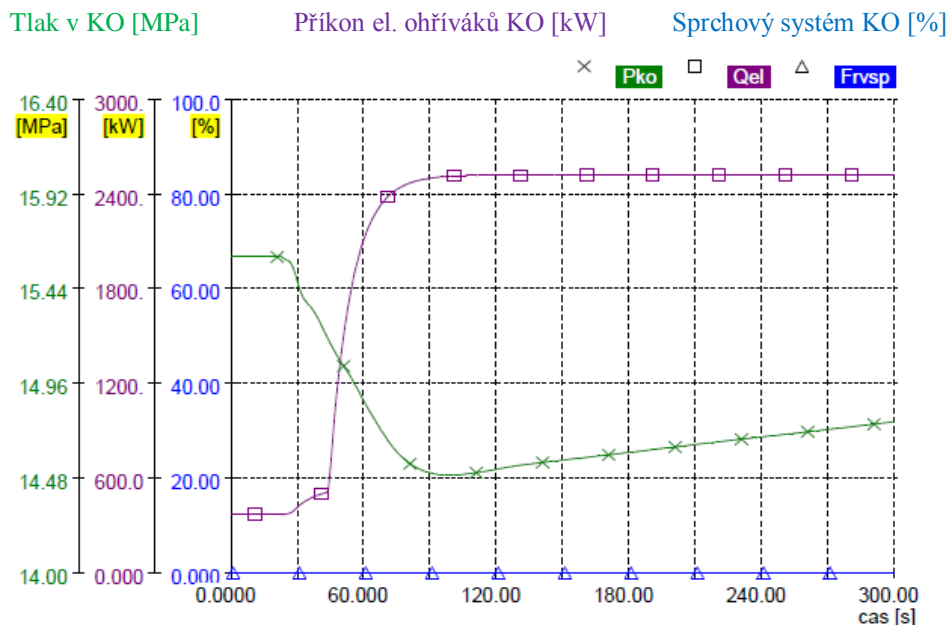
V čase 20 s dochází k přepnutí bloku do ROP. Náhlé odlehčení TG má za následek přechodné zvýšení otáček (tedy i frekvence) nad mez 3330 ot/min, což vede k zapůsobení ochrany TG od vysokých otáček. Dochází k uzavření RZV a aktivaci LS(c), tedy pádu 1. skupiny regulačních tyčí. To vede k rychlému snížení výkonu reaktoru na hodnotu 38% N_{nom} . Zvýšený tlak v HPK je odváděn přes PSK, přívod páry na TG je uzavřen a soustrojí dobíhá svou setrvačností. K nárůstu tlaku v KO nedochází, neboť je výkon reaktoru skokově snížen působením LS(c).

V čase 40 s jsou spuštěny elektroohříváky v KO a vyrovnávají tlak primárního okruhu. 10. skupina regulačních tyčí kompenzuje zpětné vazby reaktoru od snížené teploty.

V čase 120 s lze považovat přechodový děj za ukončený, výkon reaktoru je udržován na hodnotě 38% N_{nom} , TG je odstaven a snižuje otáčky, přebytek páry je odváděn přes PSK. Hlavní parametry I.O. a II.O. jsou ustálené.

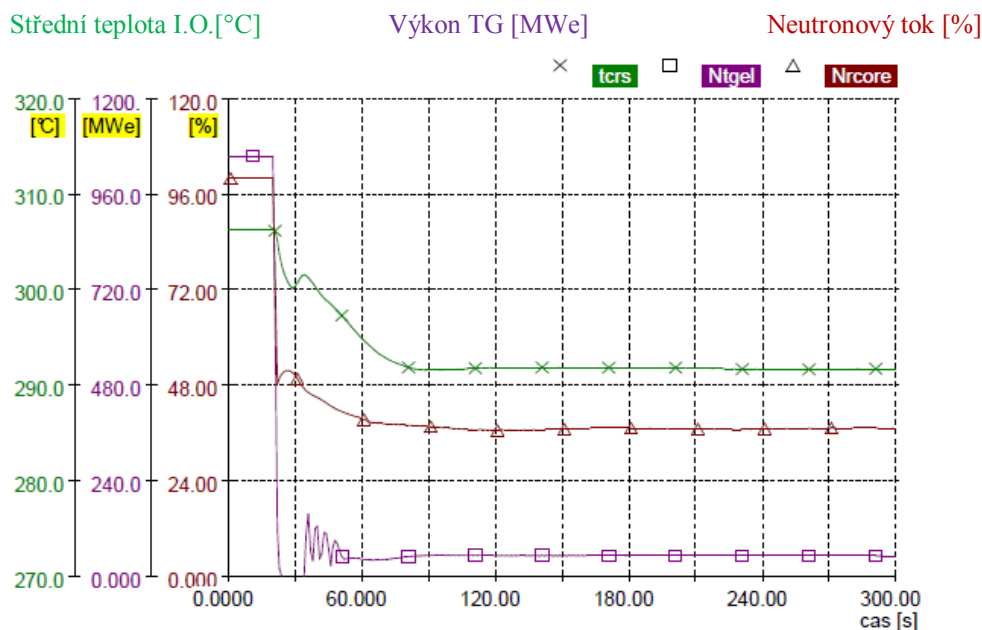


Obrázek.26: Polohy regulačních tyčí po přechodu do OSP 440 MW

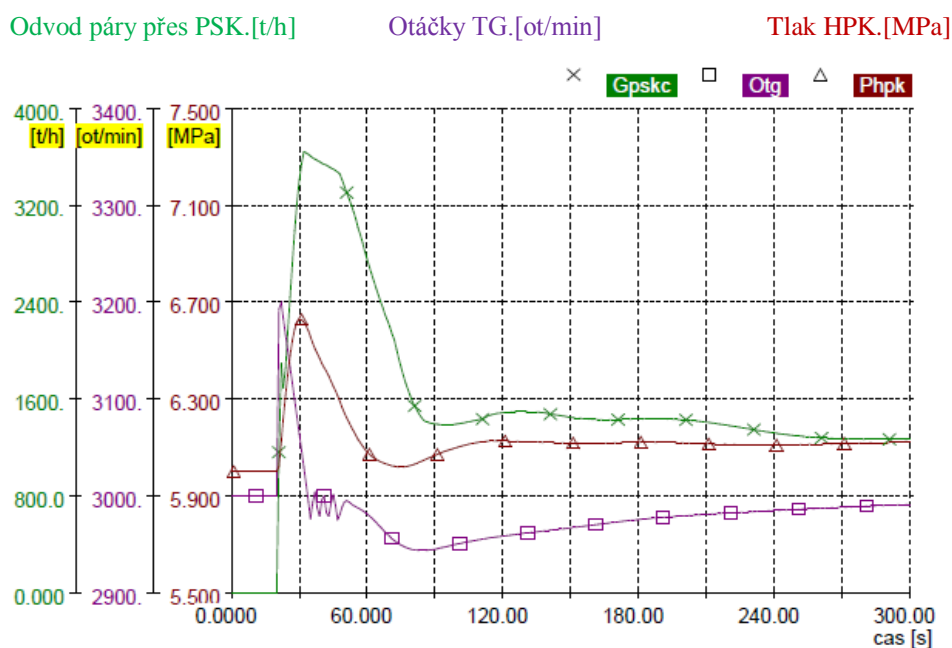


Obrázek.27: Tlak v KO po přechodu do OSP 440 MW

4.2.3 Přejít blok na VS



Obrázek.28: Výkon bloku po přechodu na VS

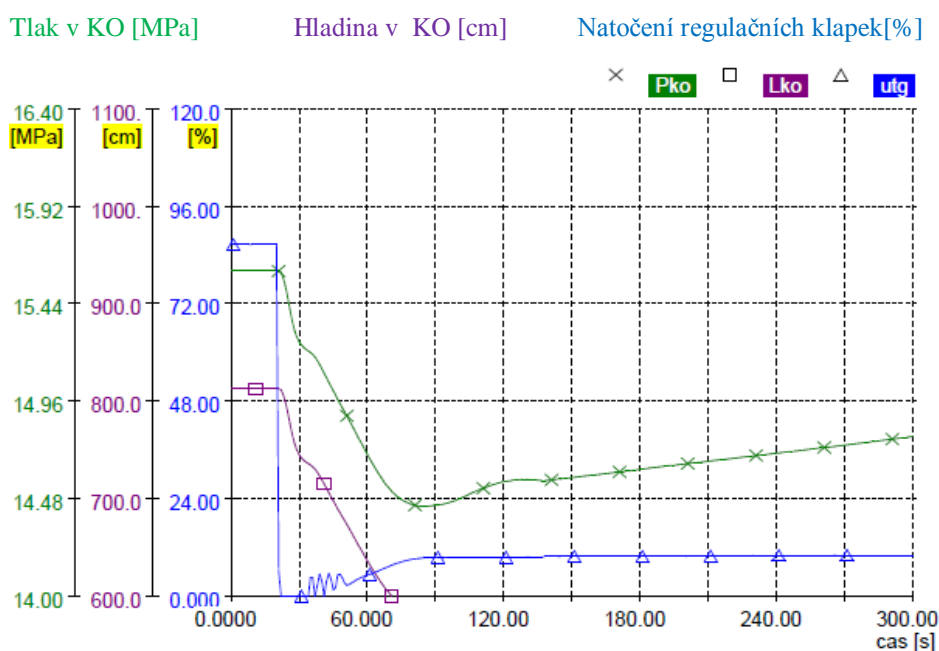


Obrázek.29: Tlak v HPK při přechodu na VS

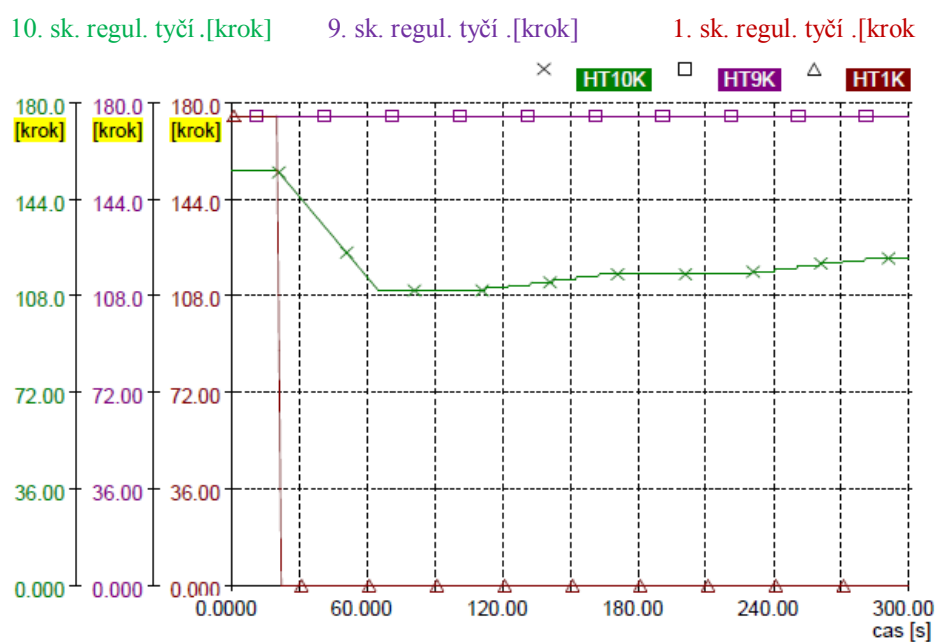
V čase 20 s dochází k odpojení bloku od sítě 400 kV síťovým vypínačem a blok přechází do provozu na VS. Přívod parní produkce na TG je na okamžik zcela přerušeno, aby bylo minimalizováno přeběhnutí otáček. RZV však zůstávají i nadále otevřené, uzavření je provedeno urychlovačem a regulačními ventily. Výkon reaktoru je rychle omezen působením LS(c) na $38\%N_{nom}$ (pád 1. skup. tyčí). Přebytková pára je odváděna přes PSK.

V čase 40 s dochází k doregulování otáček TG na nominální. Vzhledem k tomu, že generátorový vypínač je stále sepnut, TG je značně brzděn odběrem spotřebičů ve VS. Jsou spuštěny elektroohříváky v KO a vyrovnávají tlak primárního okruhu. 10. skupina regulačních tyčí kompenzuje zpětné vazby reaktoru od snížené teploty.

V čase 120 s lze považovat přechodový proces za ukončený, výkon reaktoru a otáčky TG jsou ustáleny, přebytek páry je odváděn přes PSK. Provoz TG na VS je výrobcem povolen pouze po dobu 15 minut, poté je nutné jej přirázovat nebo odstavit.



Obrázek.30: Tlak V KO a poloha RV při přechodu na VS



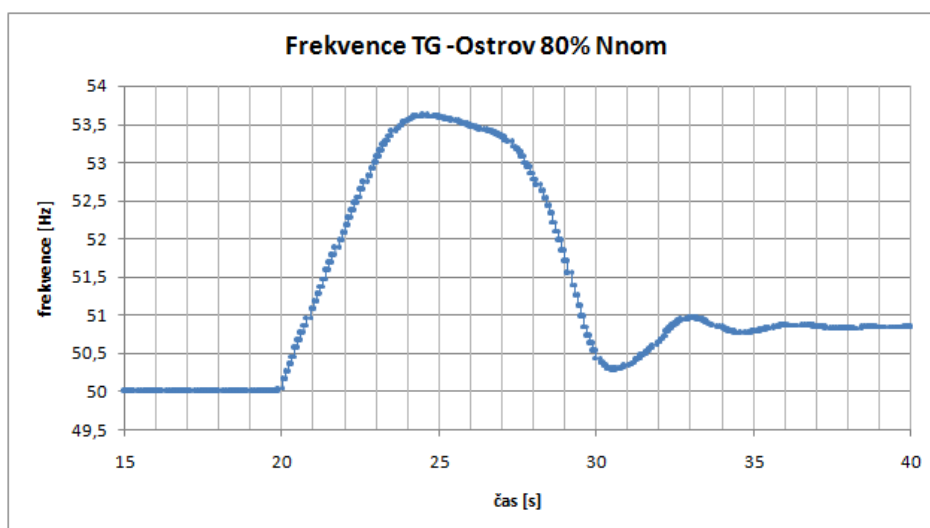
Obrázek 31: Polohy regulačních tyčí při přechodu na VS

4.3 PODFREKVENČNÍ OCHRANA UPR

Ochrana UPR chrání HCČ před provozem na sníženém výkonu pod 50% $P_{HCČNom}$. UPR měří činný elektrický příkon HCČ. Ten je úměrný $P \sim f^3$, proto je provoz HCČ silně závislý na frekvenci napájecího napětí. Ochrana působí při snížení výkonu pod 50% $P_{HCČ}$ po dobu 0,9 s. (nominální činný příkon HCČ je $P_{HCČ}=5000$ W), kterému odpovídá frekvence $f=39,7$ Hz.

U přebytečných ostrovů, které jsem simuloval, je pokles frekvence na tuto mezní hodnotu nepravděpodobný. Dochází naopak k prudkému zvýšení frekvence a následně ke kmitavému ustálení na nové vyšší hodnotě.

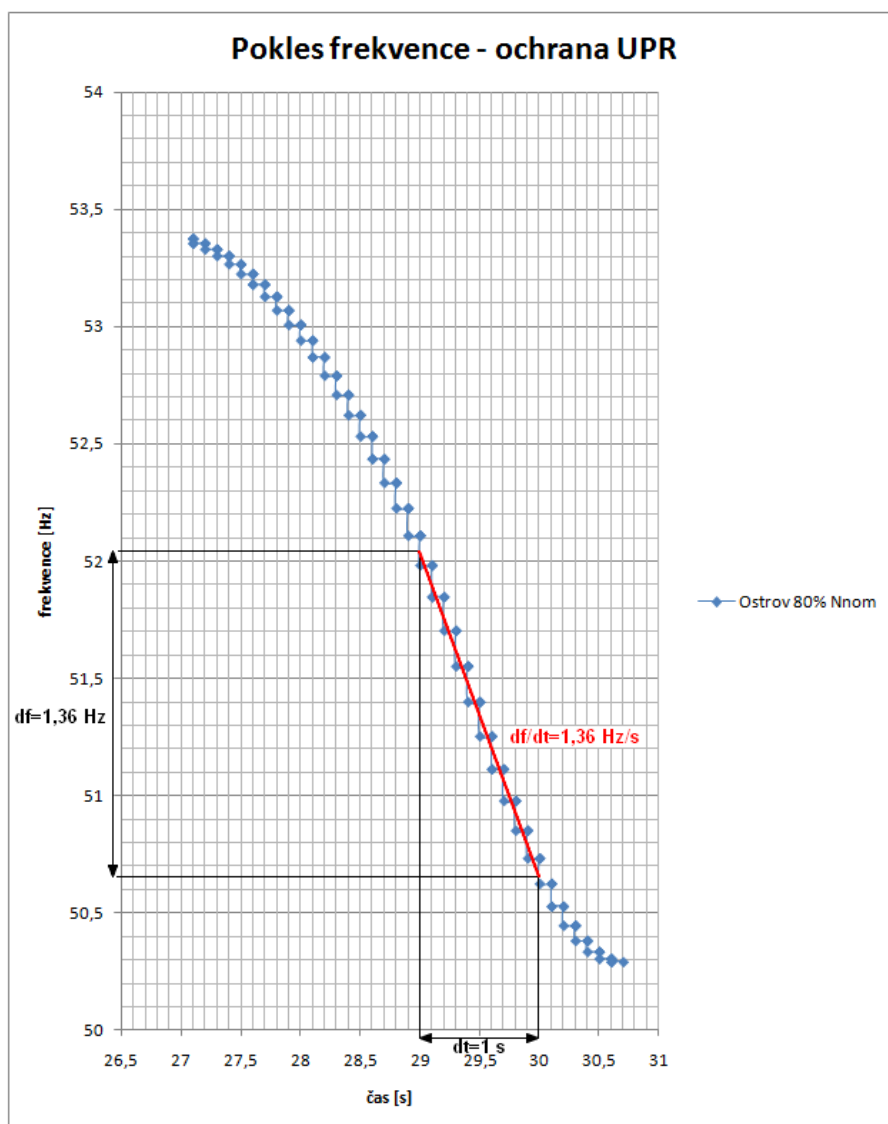
UPR ale může vybavit i při rychlém poklesu frekvence, resp. při záporné derivaci frekvence větší než $df/dt=1,4$ Hz/s. K tomuto stavu může dojít právě při kmitavém ustalování otáček TG. UPR poté vydává signál na ROR a uzavření RZV turbogenerátoru.



Obrázek.32: Průběh frekvence ostrova 80% N_{nom}

Ze simulovaných přechodových procesů vyplývá, že právě ochrana UPR zásadním způsobem omezuje udržitelnost bloku ETE v ostrovním provozu. Již při ostrovech nižších než 80% N_{nom} dochází během prvního poklesu otáček TG k překročení hodnoty $df/dt=1,4$ Hz/s, což má za následek okamžité odstavení reaktoru signálem na ROR. Derivace frekvence roste se zmenšující se zátěží; maximální hodnoty $df/dt=2,66$ Hz/s nabývá u ostrova 70% N_{nom} . Poté opět klesá a od zátěže ostrova pod 35% N_{nom} nepřesahuje hodnotu $df/dt=1,4$ Hz/s a UPR nebude působit.

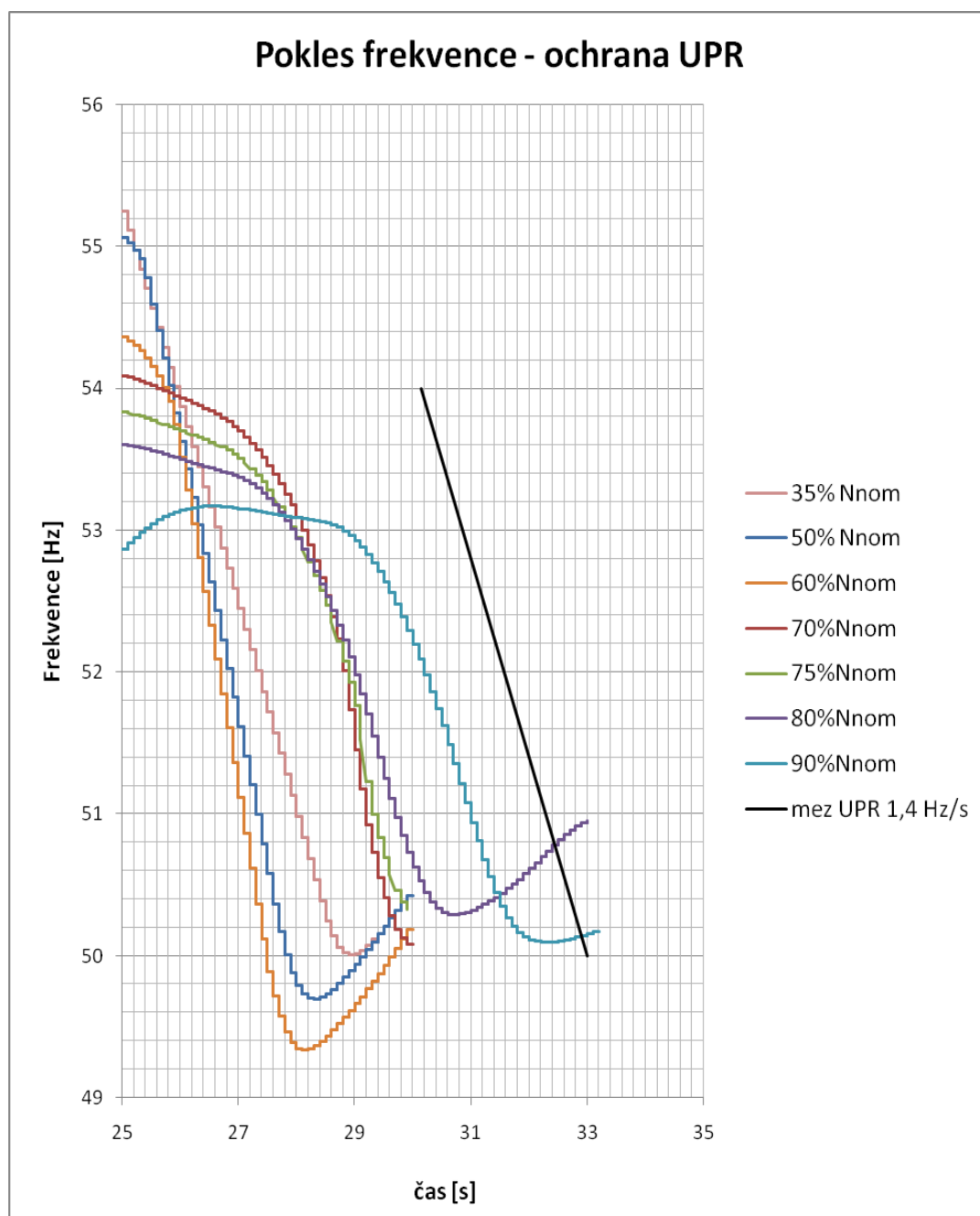
Na Obrázku 32 a 33 je uveden průběh poklesu frekvence při ustalování otáček TG u ostrova 80% N_{nom} .

Obrázek.33: Pokles frekvence ostrova 80% N_{nom}

U působení ochrany UPR se nejvíce projevuje nedokonalost simulovaného děje. Simulátor uvažuje skokovou změnu odebíraného výkonu. Na to reaguje turbína rychlými změnami otáček. V reálné soustavě by se požadovaný výkon měnil s určitou setrvačností spotřeby a přechodovými ději při rozpadu sítě do ostrova, tím by tedy změny otáček TG nebyly tak rychlé a vysoké. Zároveň je simulovaná turbína o něco „lehčí“, takže její akcelerace je vyšší. Právě z těchto důvodů kromě působení ochrany od akcelerace otáček dochází i k působení ochrany UPR dříve, než by k tomu docházelo v reálné soustavě. Jak je patrné z Tabulky 3, k vybavení ochrany UPR dochází u ostrovů mezi 80% - 35% N_{nom} .

P_{OST}	[% N_{nom}]	90	80	75	70	60	50	40	35	30
df/dt	[Hz/s]	1,36	1,36	2,5	2,66	2,25	2,1	1,6	1,39	1,38

Tabulka 3: Derivace frekvence



Obrázek 34: Reakce UPR u různých OSP

4.4 SHRNU TÍ SIMULACÍ

Nejzásadnějším problémem bloku při přechodu do ostrovního provozu je pomalá rychlost snižování výkonu. Jelikož velikost ostrovu může být proměnlivá, blok si musí zachovávat výkonovou rezervu a ke snižování tepelného výkonu reaktoru dochází pomalu zadaným trendem, přičemž přebytečný výkon se odvádí v podobě páry přes PSK. Ty ale jsou schopny otevřít jen s určitým zpožděním, proto v prvním okamžiku přechodu do ostrova dochází k přeběhu otáček, tedy i k navýšení frekvence. Vzhledem k tomu, že simulátor DYTE uvažuje skokovou změnu výkonu do ostrova, je tento přeběh otáček TG větší a rychlejší, než by tomu bylo v reálné soustavě. Zásadně se tím tedy omezuje pásmo, ve kterém lze dle simulátoru blok v ostrovním provozu udržovat. Na vysoké otáčky TG reaguje ochrana otáček TG od výkonu 44% N_{nom} , na rychlost poklesu otáček reaguje ochrana UPR od 80% N_{nom} . Vzhledem k tomu, že tyto ochrany vybavují ihned po přechodu do ostrova, je nepravděpodobné že by operátor stihl reagovat a převést provoz bloku na vlastní spotřebu. UPR vydává příkaz na rychlé odstavení reaktoru, tedy pád více skupin regulačních tyčí, blok přechází do stavu ÚZN a je závislý pouze na nouzových systémech napájení.

Na rozdíl od ostrovního provozu, přechod bloku na vlastní spotřebu není pro technologii I.O. a II.O. v první fázi tak náročný. Výkon reaktoru je snížen okamžitě zásahem LS(c) neboť není nutno počítat s proměnlivou zátěží. Přesto ale reaktor dodává více výkonu než je zapotřebí. Proto je opět přebytek páry odváděn přes PSK. Díky malému odběru ostrova VS (50 MW) je možné na okamžik uzavřít regulační ventily TG, aby byl v první fázi přechodu omezen přeběh otáček. TG dotáčející se svou setrvačností je pak intenzivně brzděn odběrem spotřebičů ve VS, proto je nutné co nejrychleji vyregulovat množství páry přiváděné na turbínu a opět dosáhnout nominálních otáček. Zásadní problém provozu na VS je pak v jeho délce. Požadavkem PS je zajistit provoz na VS po dobu minimálně 2 hodin. To ale blok ETE nezvládá, protože nízká zátěž turbíny způsobuje nežádané vibrace, které ji mohou poškodit. Z důvodu šetrnosti k turbíně se tedy uvažuje o provozu na VS řádově v minutách až desítkách minut.

Při popisu simulátoru DYTE jsem uvedl některé nedostatky, které mohou zkreslit výsledné přechodové děje. Ze srovnání výsledků s jinými simulátory vyplývá, že zhoršením akceleračních vlastností turbíny dojde ke snížení maximální hodnoty otáček a prodloužení prvního překmitu. Tím nedochází k odstavení TG zapůsobením ochrany od otáček. Na druhou stranu dochází k zapůsobení ochrany od přetlaku v KO, neboť turbína během prvního překmitu neodebírání tolik parní produkce. Další prvopříčinou odstavení může být působení druhého stupně FREA16, protože navýšení otáček nad mez 3090 ot/min se může prodloužit z 10 sekund na více jak 15 sekund. UPR z důvodu menší dynamiky procesu působí také o něco později.

5 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá současnou problematikou provozu elektrizační soustavy a současnými trendy při jejím řízení. Před tím, než bylo popsáno samotné zapojení bloku ETE v provozované elektrizační soustavě a jeho podíl na regulaci frekvence a napětí, byly uvedeny základní principy regulace výkonu jaderného reaktoru, vycházející z podstaty jaderné a reaktorové fyziky. V práci jsou popsány principy regulace výkonu bloku jako jednotného systému od zdroje tepelné energie až ke svorkám generátoru.

Přestože z teoretických předpokladů je možné jaderný blok řídit v rámci požadavků elektrizační soustavy jako zdroj v regulaci napětí a frekvence, v současné době do těchto regulací zařazen není, přestože je na ně po technické stránce připraven. Blok se podílí pouze na primární a sekundární regulaci napětí. Regulace frekvence (tedy regulace činného výkonu) je obecně spojena s problémy týkajícími se snižování životnosti paliva a technologie bloku. Z hlediska ekonomického a jaderně bezpečnostního nejsou tedy v současnosti regulace frekvence povoleny.

Druhá část diplomové práce byla věnována ostrovnímu provozu bloku ETE. Schopnost bloku jaderné elektrárny zvládnout přechod do ostrovního provozu je výhodná kromě podpory ES i ve zvýšení jaderné bezpečnosti. Přechod do ostrova je však doprovázen rychlými změnami hlavních parametrů elektrárny, na což mohou reagovat limitační a bezpečnostní systémy bloku, a vést tak k jeho odstavení. Z tohoto důvodu bylo provedeno několik simulací, které určily obecné hranice, do jaké úrovně je možno ostrov provozovat, a příčiny, které vedou k jeho nezvládnutí. Provedené simulace jsou však zatíženy odchylkou simulovaného a reálného děje. Z výsledků provedených simulací vyplývá, že blok ETE je schopen zvládnout přechod do ostrova menšího o 20% N_{nom} , poté je z důvodu zapůsobení frekvenčních ochran TG odpojen od sítě nebo zcela odstaven.

Zregulování výkonu bloku na úroveň VS je zvládnutelné, provoz na této hladině je ale z technologických důvodů omezen na několik minut, poté je nutné blok přirázovat nebo odstavit.

Simulátor DYTE dokáže věrně simulovat pochody v Jaderné elektrárně Temelín. U těchto extrémně dynamických jevů, kterými bezesporu přechody do ostrovních režimů jsou, jsem však narazil na jeho jisté nedostatky. Na druhou stranu chování ostrovní sítě je jen stěží předvídatelné a může se projevat v mnoha variantách. Proto je i nadále nutné věnovat pozornost tomuto stavu elektrizační sítě a připravovat na něj jak elektrárenské bloky, tak i elektrizační síť jako celek.

Přestože dnešní trend provozu elektrizační soustavy tlačí provozovatele jaderných bloků ke zvyšující se flexibilitě a pružnosti regulace činného výkonu, stále převažuje jaderně bezpečnostní a dlouhodobě ekonomické hledisko při provozování těchto bloků. Jaderné elektrárny tak i nadále zůstávají dominantním zdrojem pracujícím převážně v základním zatížení.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] DVORSKÝ, Emil. Přednášky MR. *Informace pro studenty*. [online]. 15.12.2013 [cit. 2013-12-15]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~dvorsky/>
- [2] ČEPS. *FAQ*. [online]. 15.12.2013 [cit. 2013-12-15]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Media/Stranky/FAQ.aspx>
- [3] ČEZ. *Výroba elektřiny*. [online]. 15.12.2013 [cit. 2013-12-15]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/zvazovana-dostavba-elektřiny-temelin/duvody-dostavby.html>
- [4] BECHNÍK, Bronislav. <http://www.czrea.org>. [online]. 25. června 2010 [cit. 2013-12-15]. Dostupné z: <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika/ERU-prispevek2011>
- [5] MOURLEVAT, L. *Master of Science in Nuclear Energy – CORE OPERATION* [online]. 2010. [cit. 2013-12-15].
- [6] FJFI. *Reaktorová fyzika I*. [online]. 30.8.2004 [cit. 2013-12-15]. Dostupné z: http://www.fjfi.cvut.cz/reaktorova_fyzika1/
- [7] 1981, 1. vyd, česky, SNTL / Populární přednášky o fyzice, Sv. 31, Praha, 271 stran
- [8] ODEHNAL, Jaroslav. *Učební texty pro doškolení personálu UJE – Provoz JE VVER 1000*. :ČEZ, 2003. ISBN .
- [9] Eridanus. *Fyzika: Rozpadové řady radioaktivních prvků*. [online]. 15.12.2013 [cit. 2013-12-15]. Dostupné z: http://eridanus.cz/id32402/ve%282da/pr%282i%281rodni%281_ve%282dy/fyzika/
- [10] ÚJV ŘEŽ A.S. *DÚP 496: Manevrovatelnost bloku JE Temelín*. 2012.
- [11] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. *Pravidla provozování distribučních soustav: Pravidla pro podpůrné služby (pps) zdrojů připojených k sítím provozovatele distribuční soustavy*. 2011.
- [12] MÁSLA, Karel. *Dynamické chování es při změnách frekvence: Ostrovní provoz*. 2004
- [13] ÚJV ŘEŽ A.S. ENERGOPROJEKT PRAHA OP 832: *Rozbor ostrovních režimů JETE*. 2004.
- [14] DOLEŽAL, Jaroslav, Jiří ŠTASTNÝ, Jan ŠPETLÍK, Stanislav BOUČEK a Zbyněk BRETTSCHEIDER. *Jaderné a klasické elektrárny*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 259 s. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [15] ZBOŘIL, Miroslav. Využití modelování a simulace při testování řídicích programů. In: *Pmconsulting* [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://www.pmconsulting.cz/download/Zbor_TEST_SIM.pdf

6 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Zjednodušené schéma uspořádání ROP bloku ETE [12]

Příloha 2: Tabulka frekvencí a otáček souvisejících s ostrovním provozem [10]

Příloha 3: Cílová (dovolená) pásma pro AO [10]

Příloha 4: Přechod bloku do ostrova 90% N_{nom}

Příloha 5: Přechod bloku do ostrova 80% N_{nom}

Příloha 6: Přechod bloku do ostrova 70% N_{nom}

Příloha 7: Přechod bloku do ostrova 60% N_{nom}

Příloha 8: Přechod bloku do ostrova 50% N_{nom}

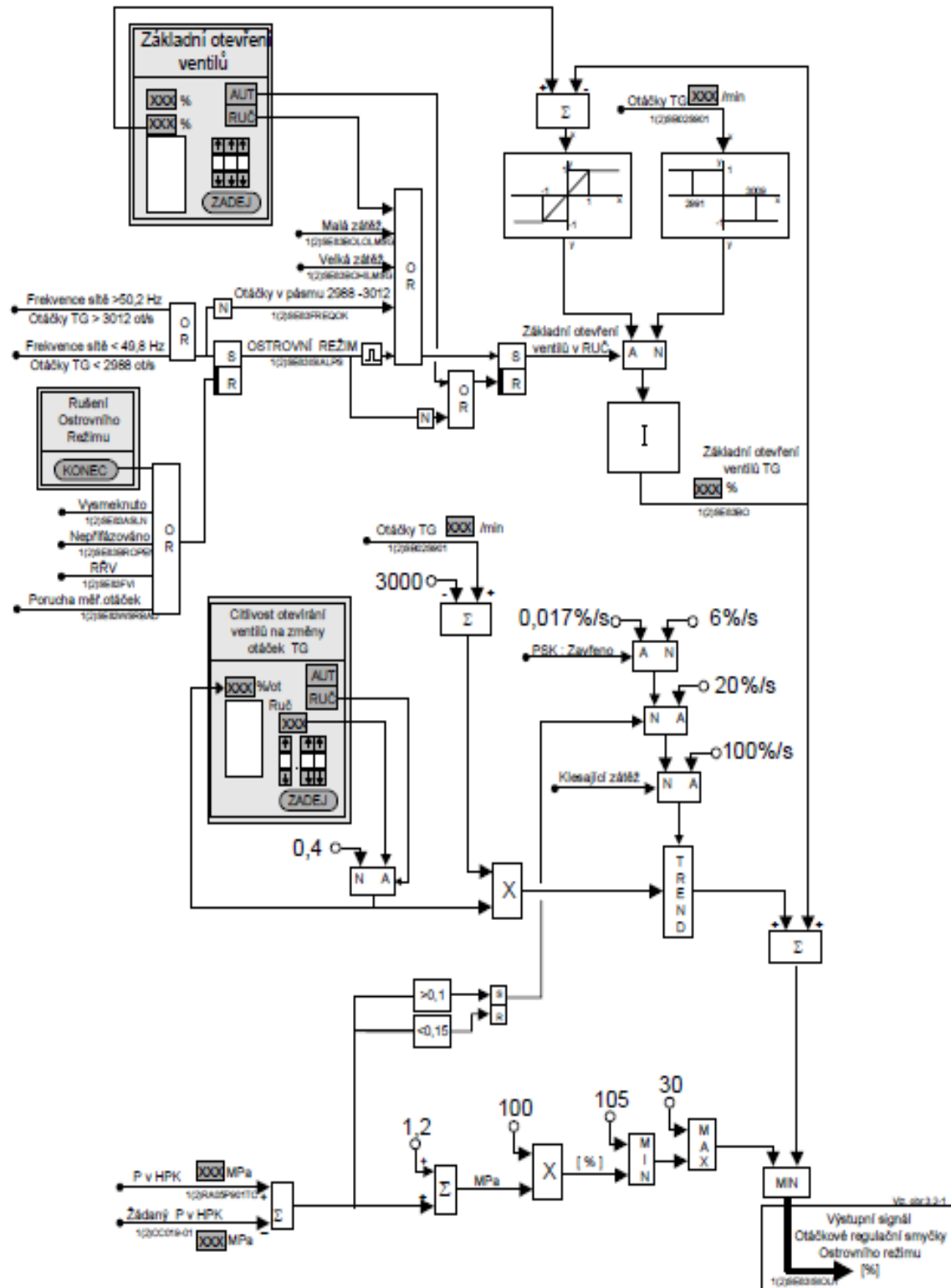
Příloha 9: Přechod bloku do ostrova 44% N_{nom}

Příloha 10: Přechod bloku do ostrova 40% N_{nom}

Příloha 11: Přechod bloku do ostrova 30% N_{nom}

Příloha 12: Přechod bloku do ostrova 20% N_{nom}

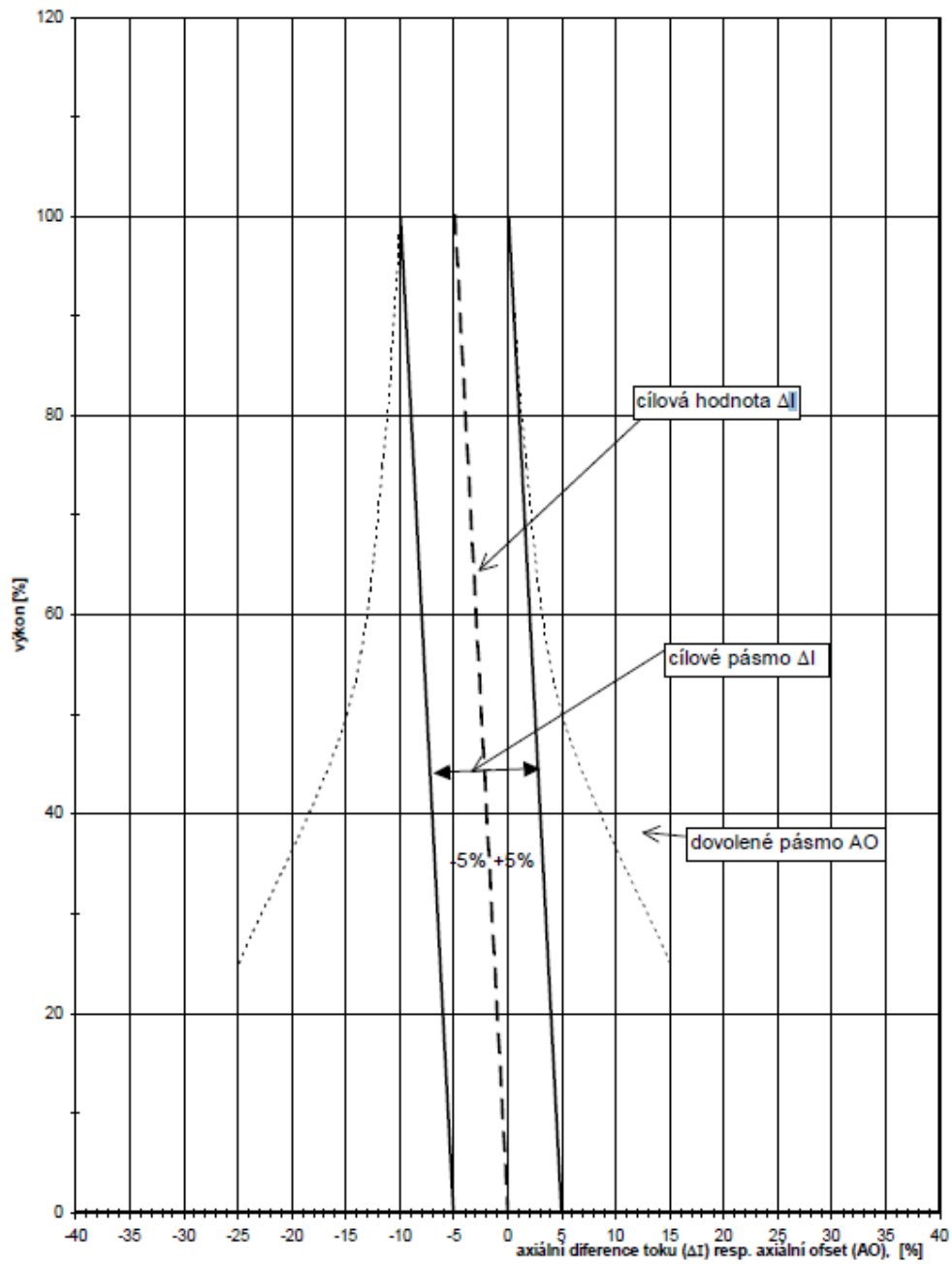
Příloha 13: Přechod bloku na VS



Příloha 1: Zjednodušené schéma uspořádání ROP bloku ETE [12]

frekvence (Hz)	otáčky TG (n/min)	Regulátor TG před zapůsobením ochrany	Ochrana	Zpoždění (s)	Popis
55,5	3330		TG		Elektronická ochrana od čidla otáček
55	3300 *		TG		Tlak primárního oleje
54,5 až 55,5	3270 až 3330 *		TG		Pojistné hydraulické relé
51-53	3060 až 3180 *		TG		Dvupolohový transformátor oleje - regulátor působí na regulační ventily v rozsahu uvedených otáček
	> 150 ot/min/sec		TG		Akcelerační regulátor hydraulický, nastavení: nad elektronickým zrychlením
50,11666	> 3012 * > 150 ot/min/sec		TG		Elektronické vyhodnocení akcelerace vysílá 1s pulz na magnety a urychlovač 1)
52	3120	P, PI	1SP-F39	1,0	Aktivace urychlovače TG
51,5	3090	P	1SP-F392 (2.stupeň FREA)	15,0	Odpojení generátoru od sítě, přechod na vlastní spotřebu
51,32	3079,2	P			Horní mez otáček ostrova
50,2	3012	P	1SP-F392 (1.stupeň FREA)	0,0	Start ostrovního provozu
50	3000	P			Nominální otáčky TG
49,8	2988	P	1SP-F392 (1. stupeň FREA)	0,0	Start ostrovního provozu
48,08	2884,8	P			Dolní mez otáček ostrova
47,9	2874	P/PI	1SP-F392 (2.stupeň FREA)	0,8	Odpojení generátoru od sítě, přechod na vlastní spotřebu
47	2820	PI	1SP-F39 Blokování podpětím, uvolnění od povelu na uzavření VTRZV	0,0	Provozní odstavení TG

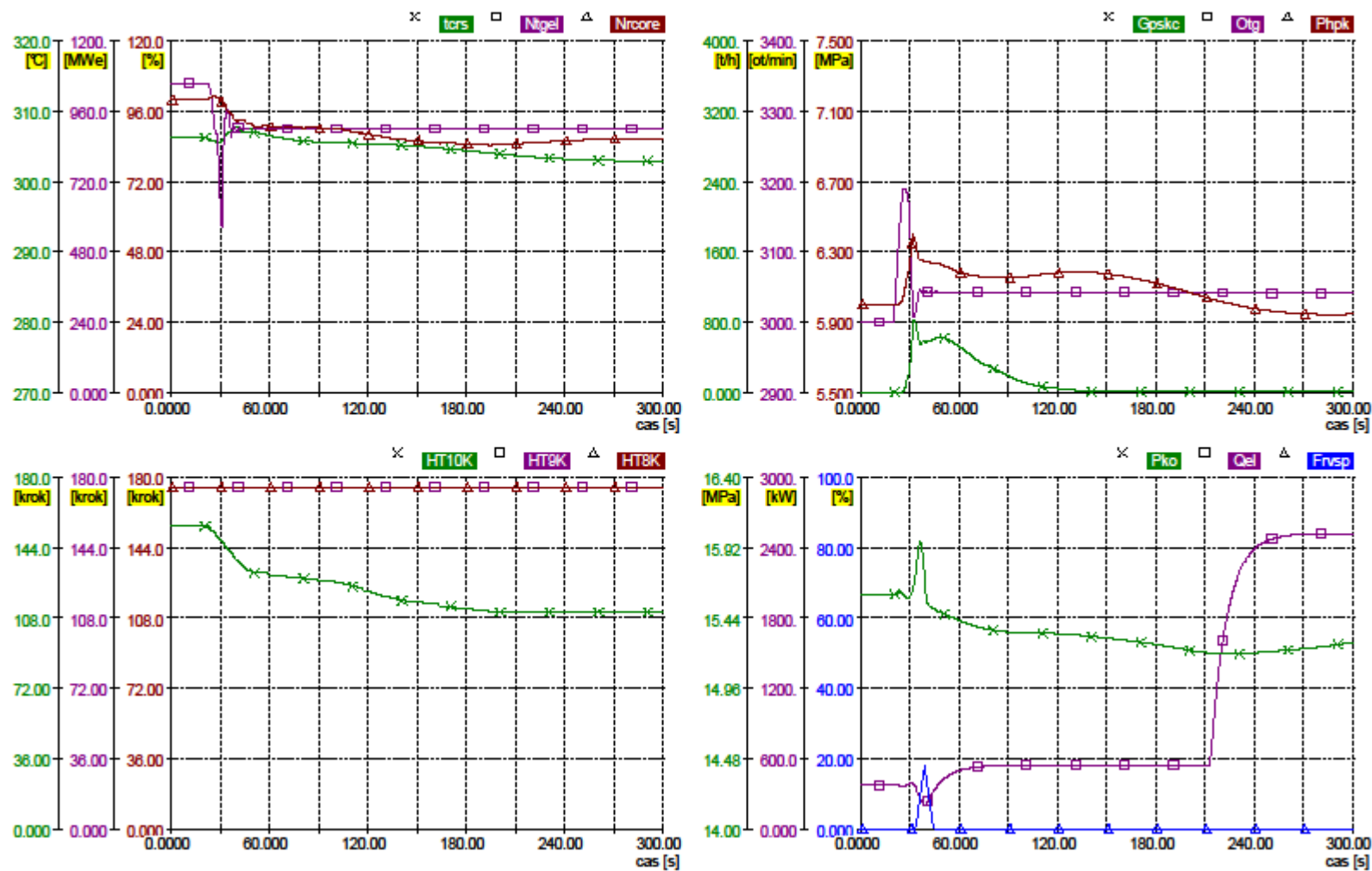
Příloha 2: Tabulka frekvencí a otáček souvisejících s ostrovním provozem [10]



Příloha 3: Cílová (dovolená) pásma pro AO [10]

otacky, May 01 20:05:53 2014

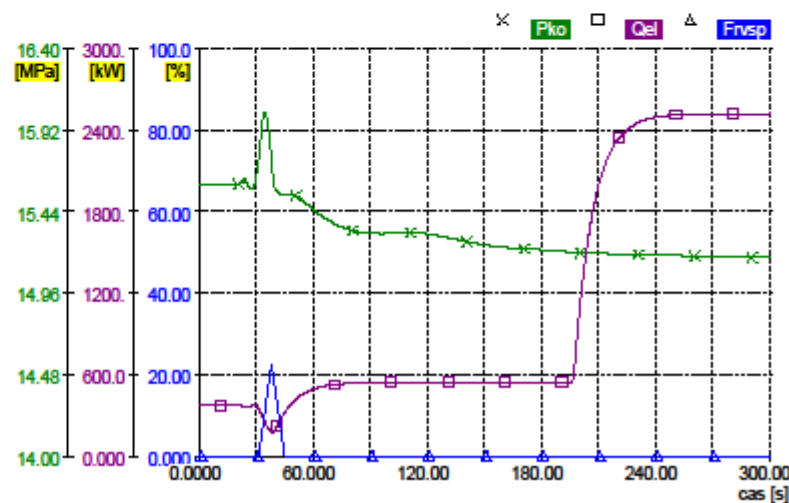
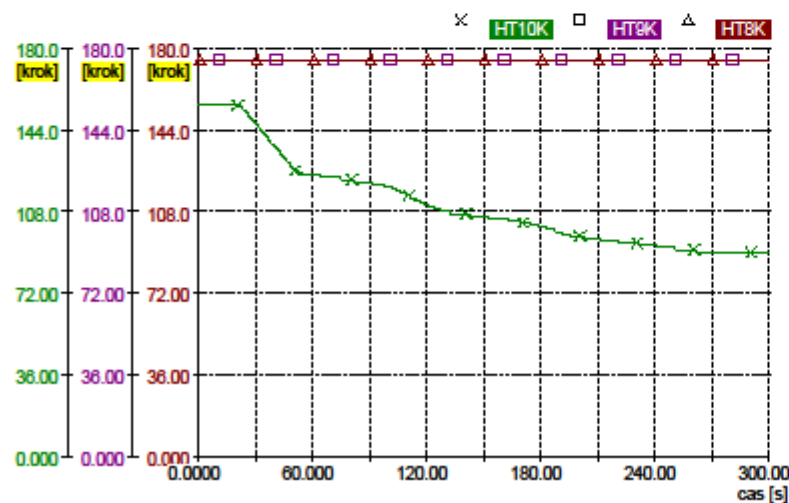
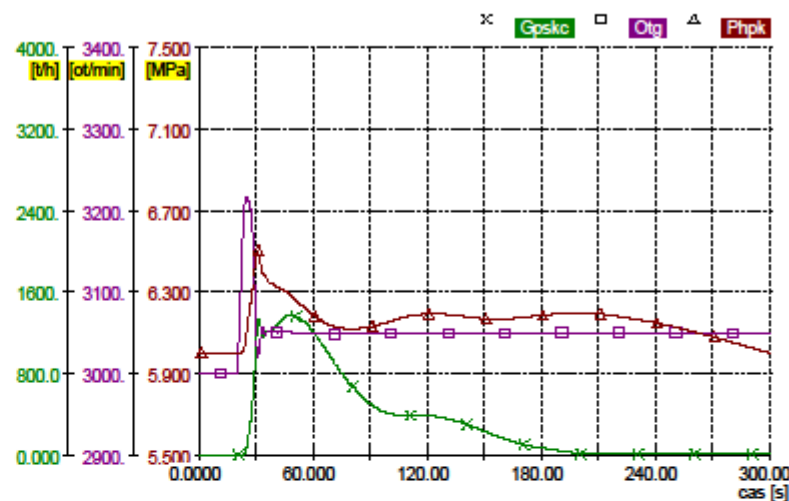
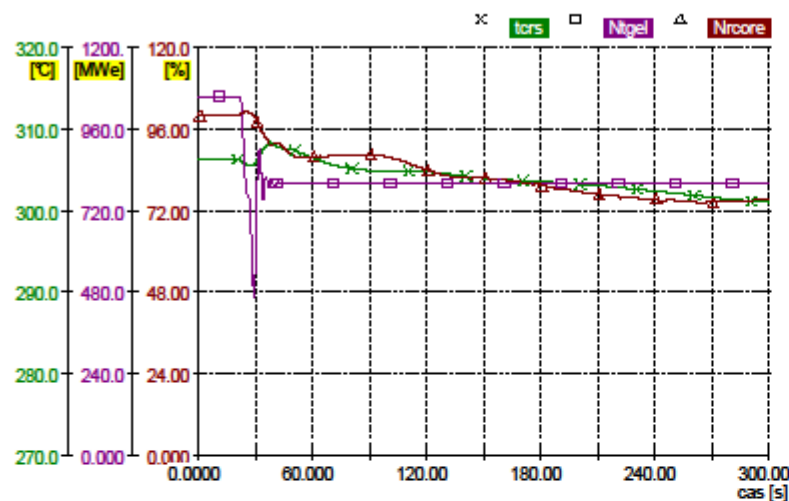
ETE



Příloha 4: Přejchod bloku do ostrova 90% N_{nom}

otacky, May 01 20:19:54 2014

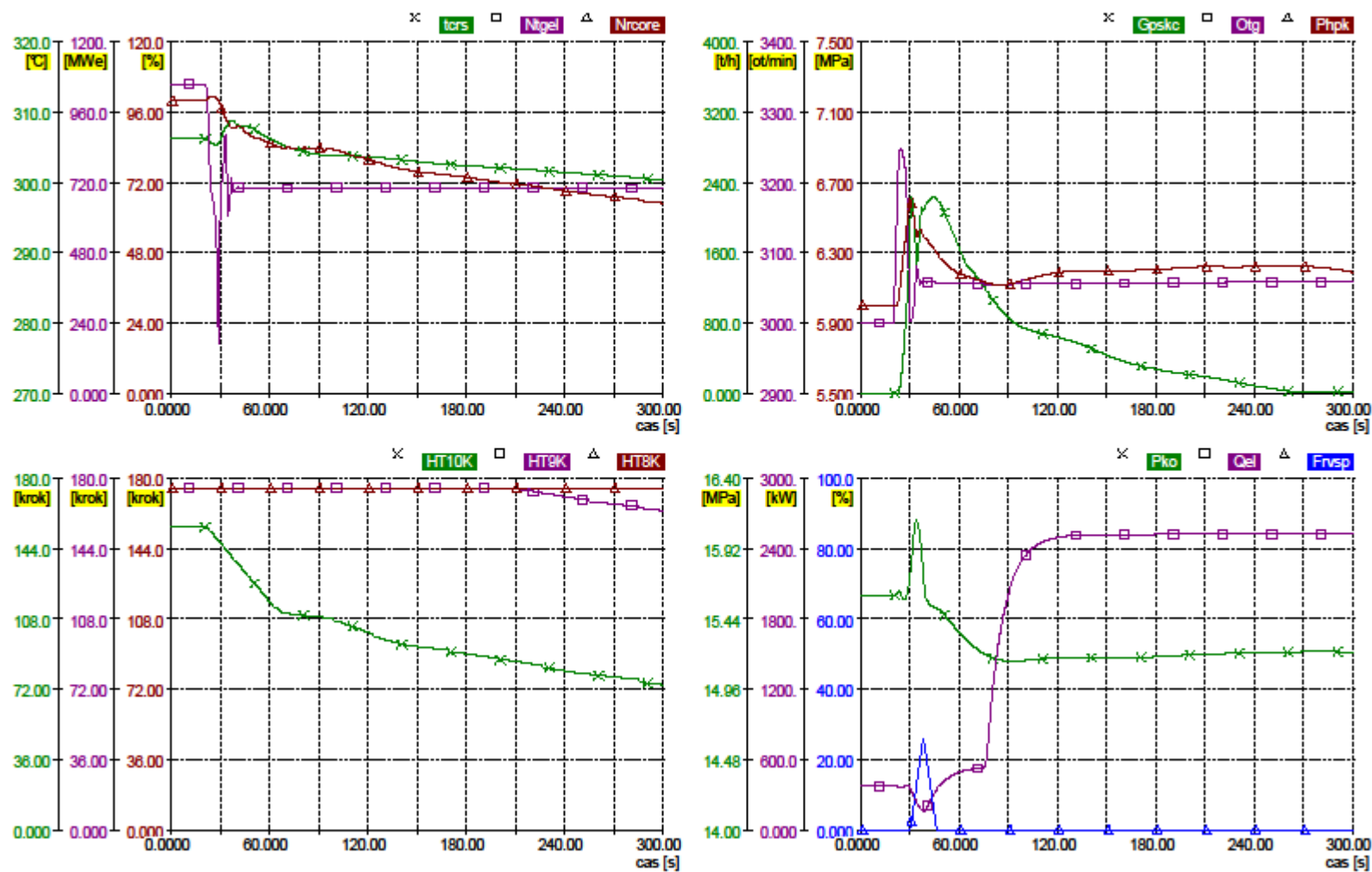
ETE



Příloha 5: Přejchod bloku do ostrova 80% N_{nom}

otacky, May 01 20:22:15 2014

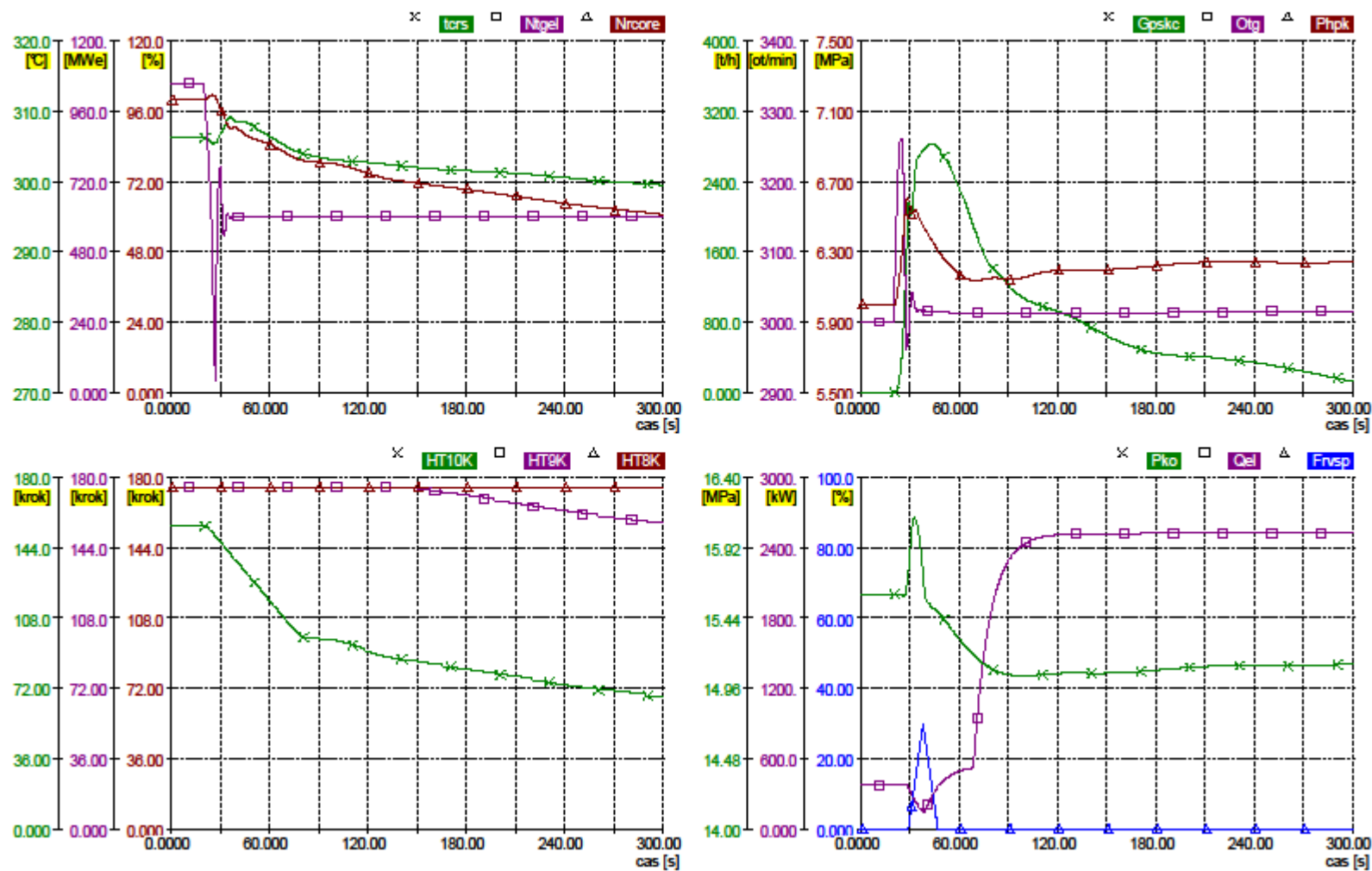
ETE



Příloha 6: Přejchod bloku do ostrova 70% N_{nom}

otacky, May 01 20:24:52 2014

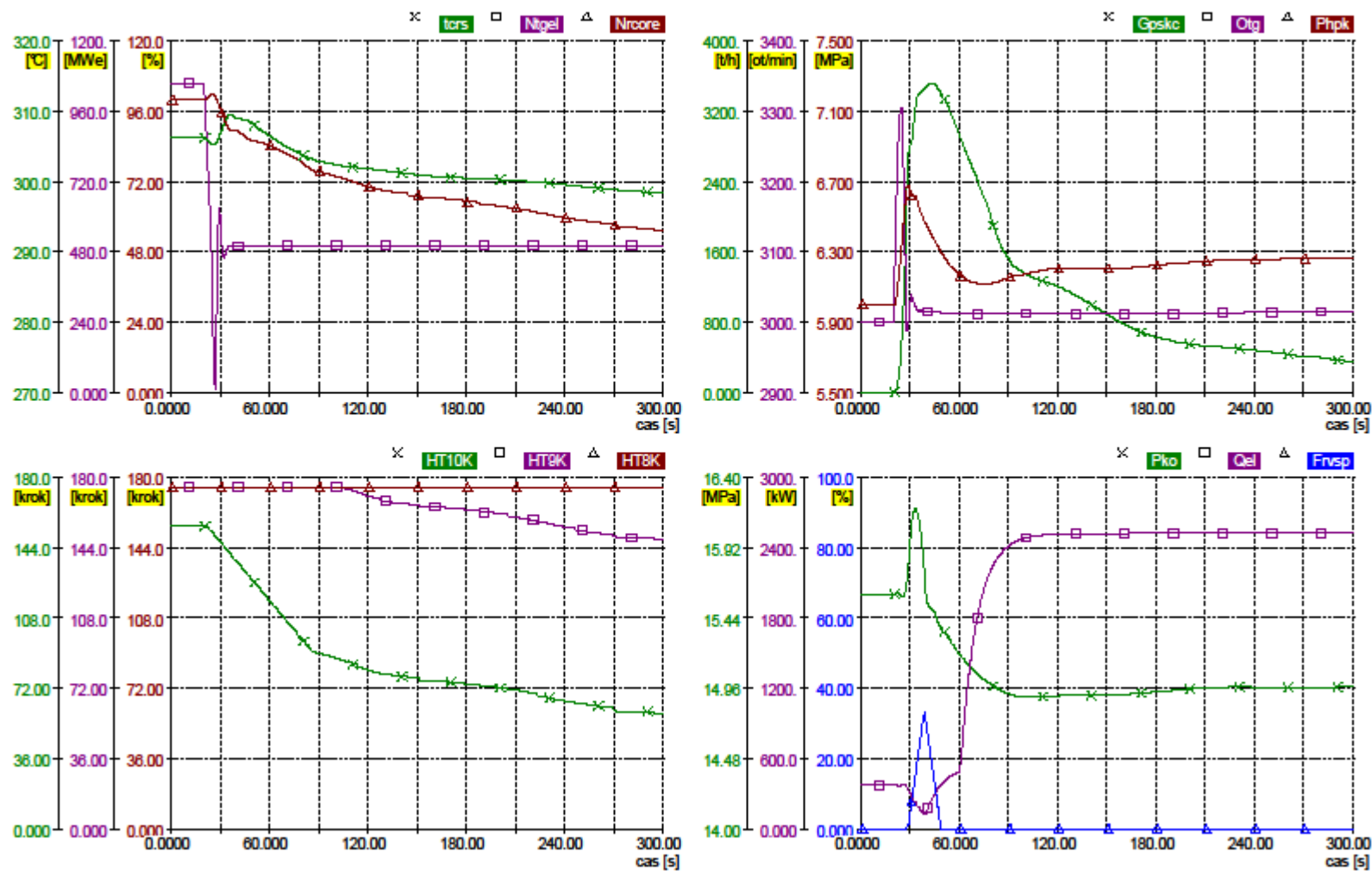
ETE



Příloha 7: Přejchod bloku do ostrova 60% N_{nom}

otacky, May 01 20:27:56 2014

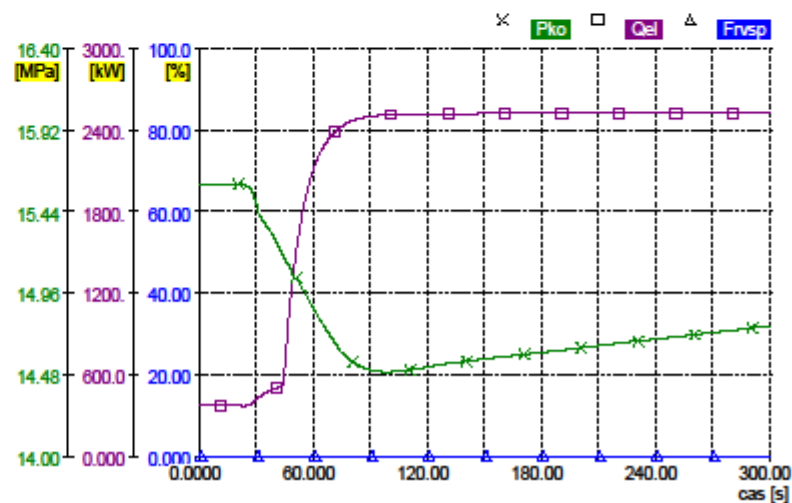
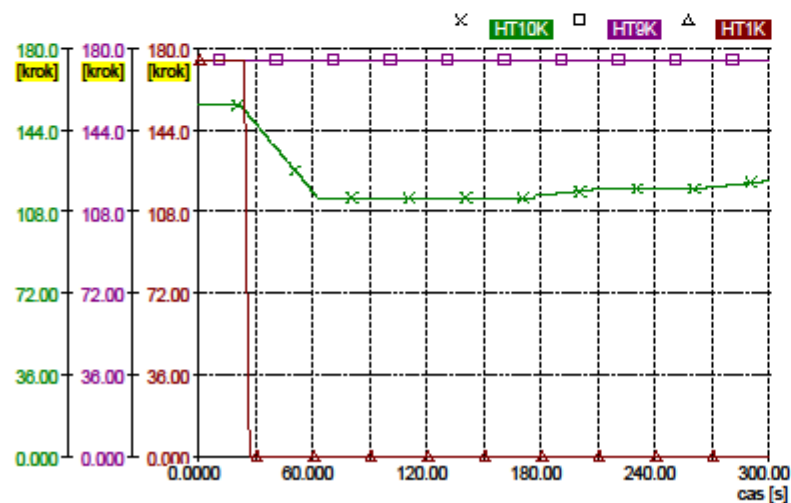
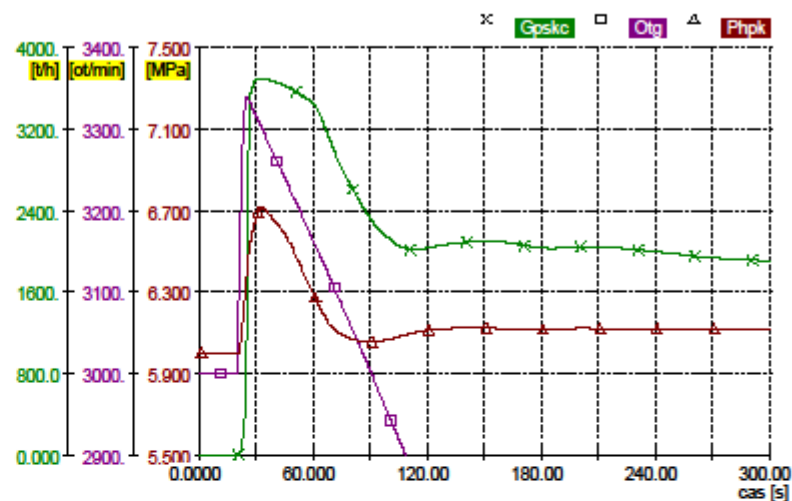
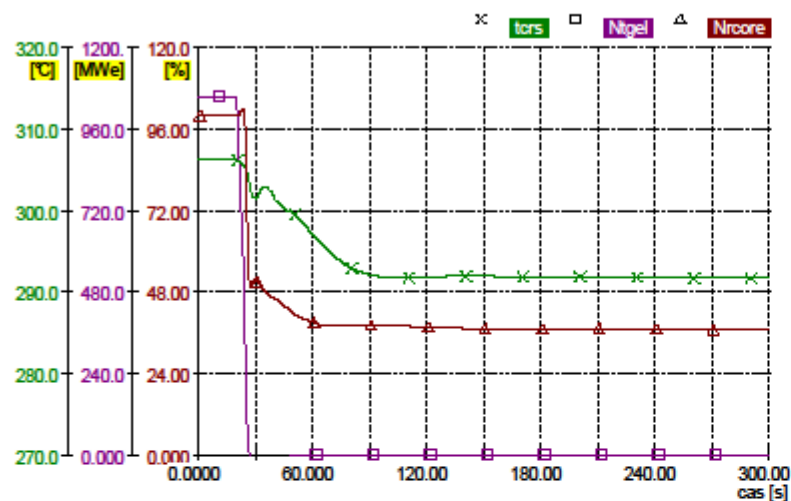
ETE



Příloha 8: Přejchod bloku do ostrova 50% N_{nom}

otacky, May 01 20:42:28 2014

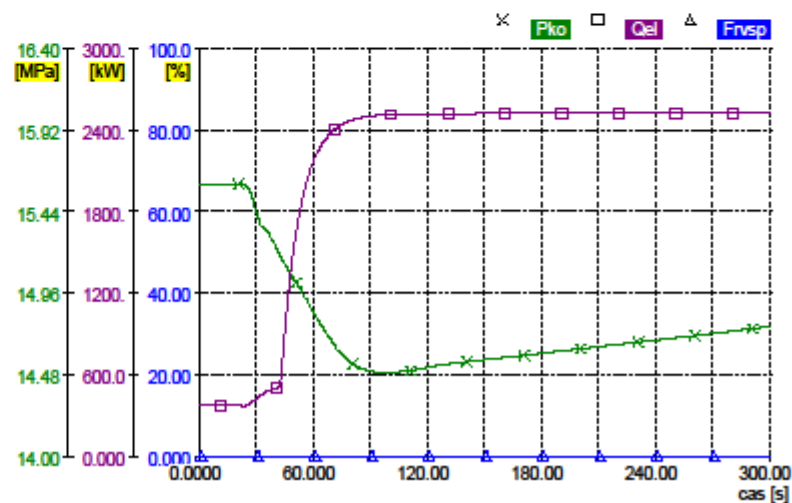
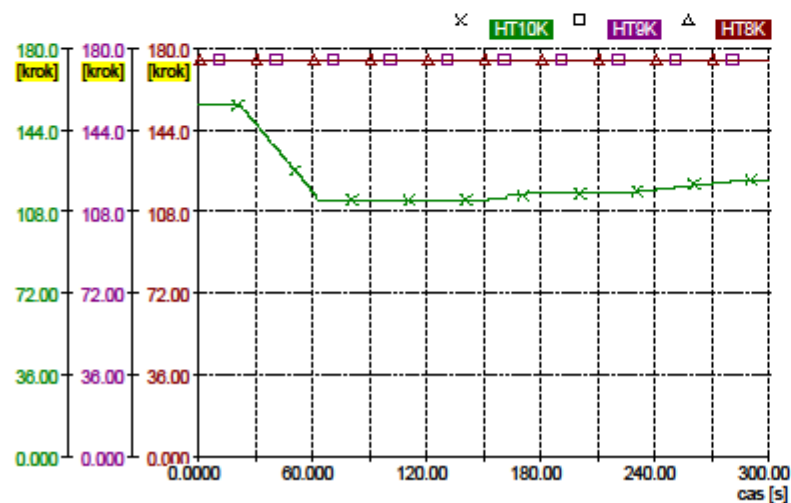
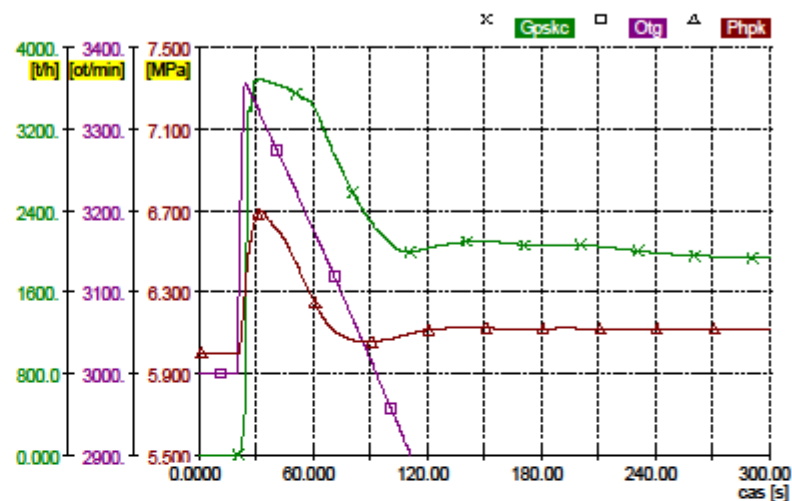
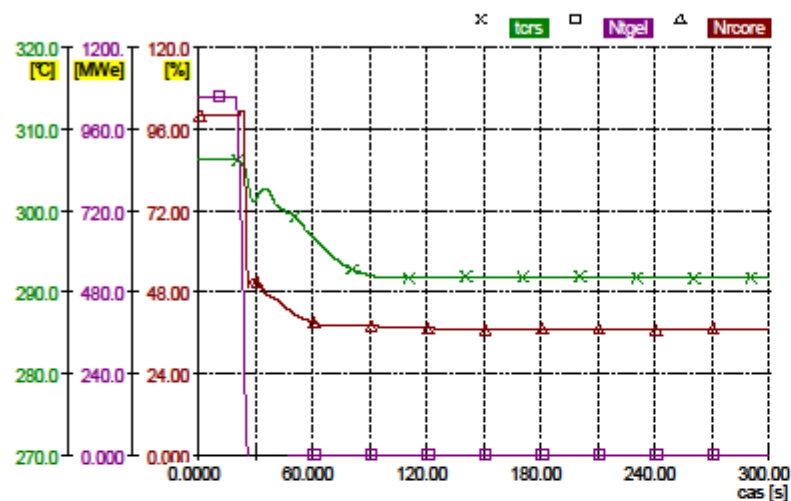
ETE



Příloha 9: Přejchod bloku do ostrova 44% N_{nom}

otacky, May 05 13:28:05 2014

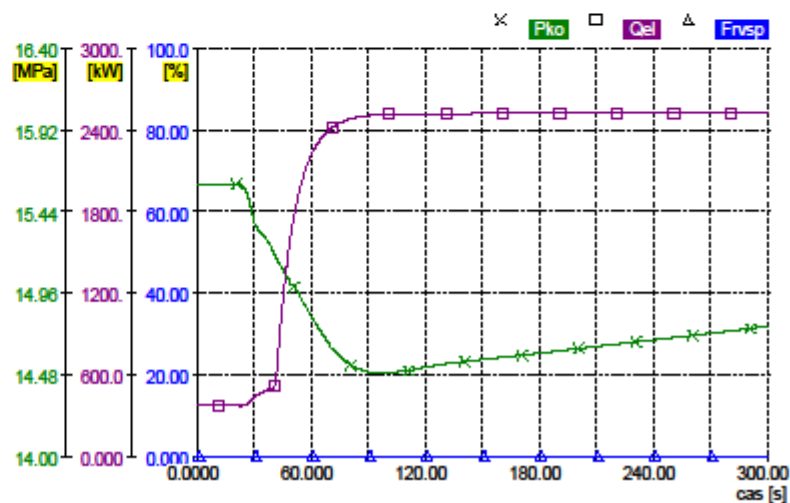
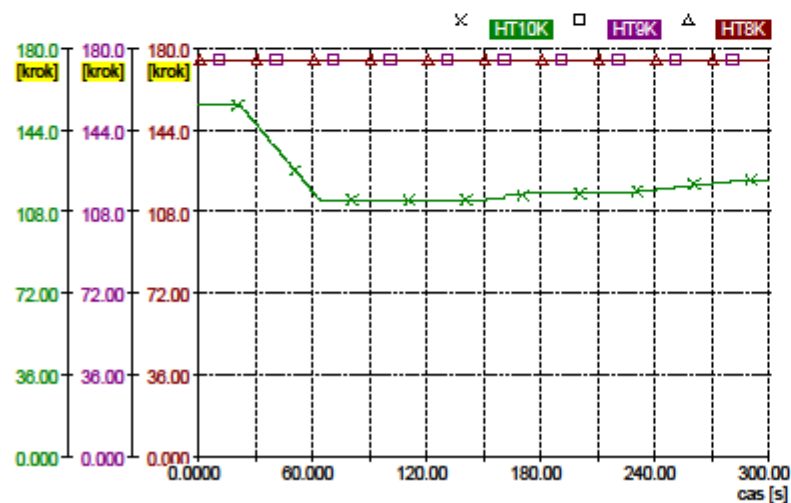
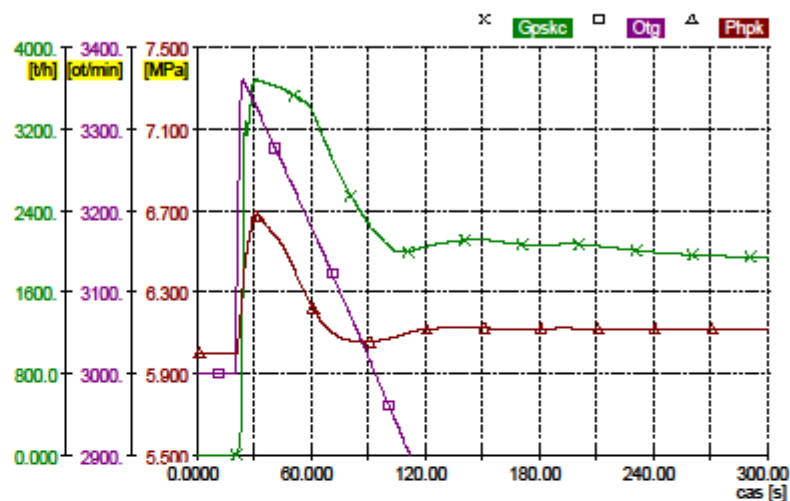
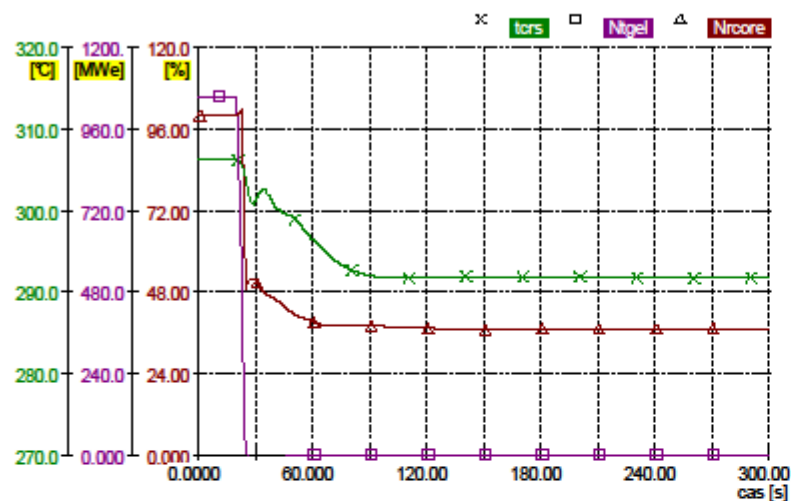
ETE



Příloha 10: Přechod bloku do ostrova 40% N_{nom}

otacky, May 05 13:30:00 2014

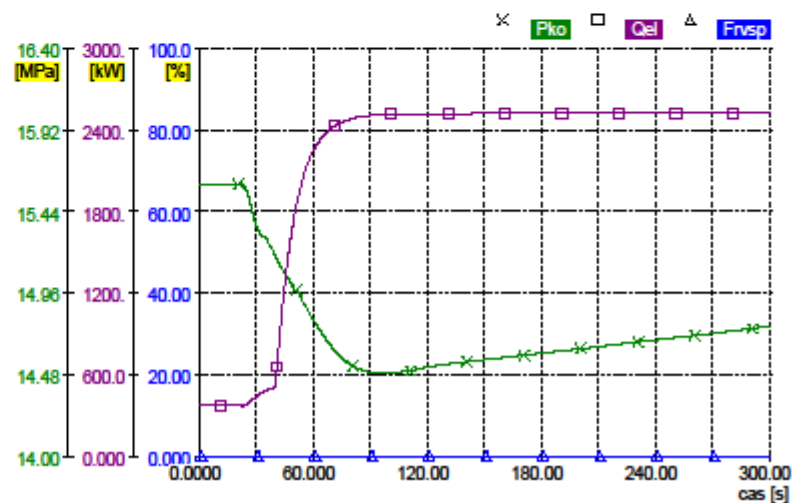
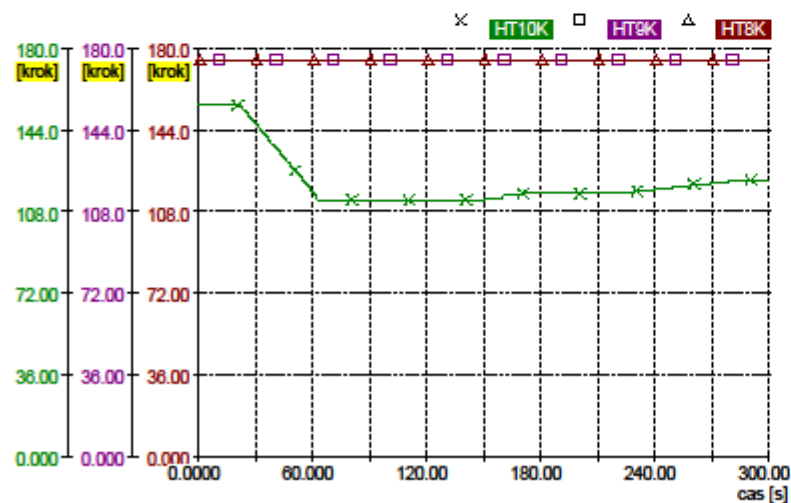
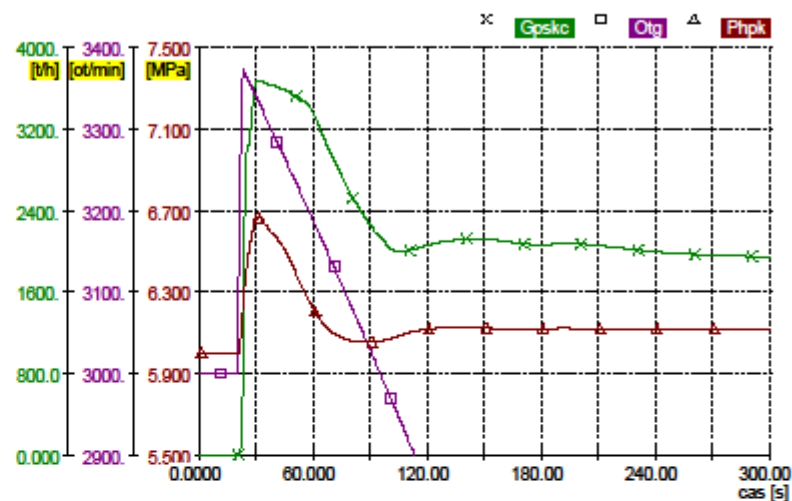
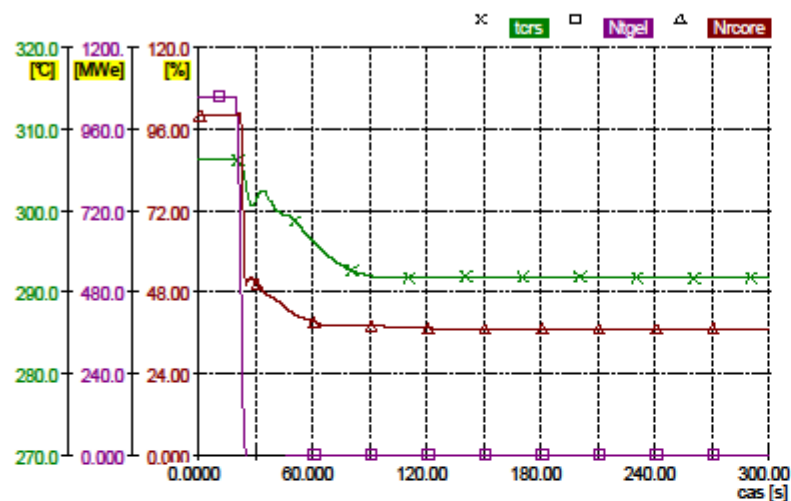
ETE



Příloha 11: Přechod bloku do ostrova 30% N_{nom}

otacky, May 05 13:31:04 2014

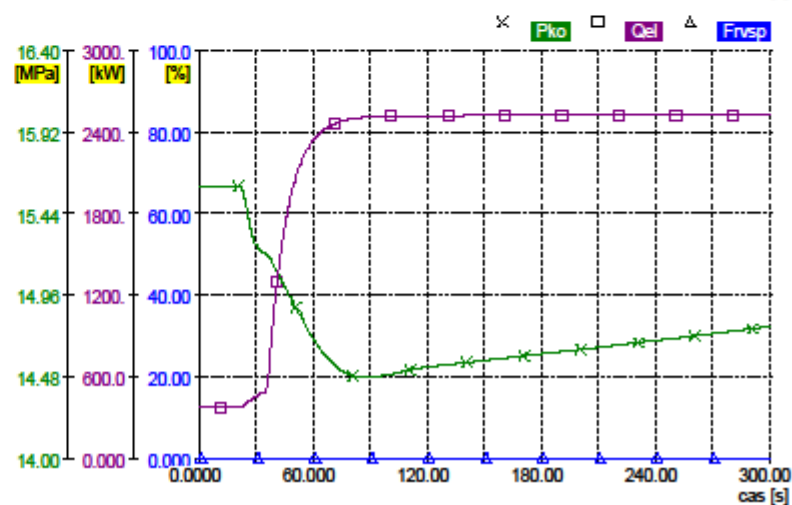
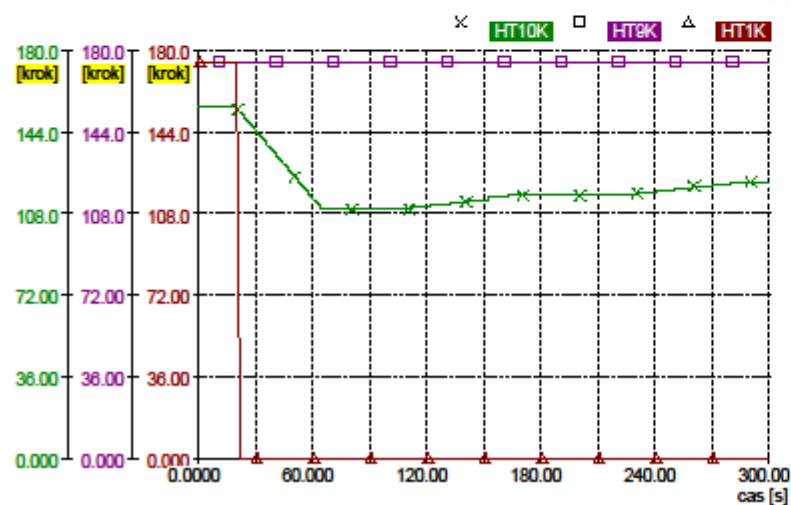
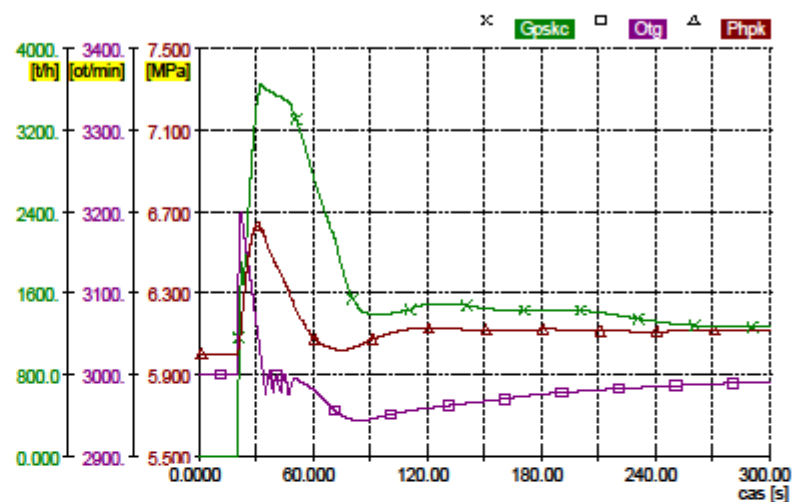
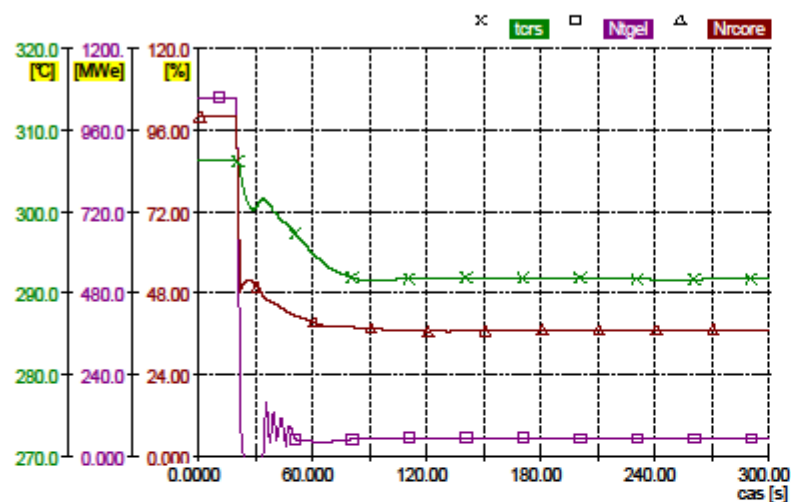
ETE



Příloha 12: Přechod bloku do ostrova 20% N_{nom}

otacky, May 01 20:48:40 2014

ETE



Příloha 13: Přechod bloku na VS