

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Modelování provozu elektroenergetického zdroje
v ostrovním provozu**

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Předložená bakalářská práce se zabývá modelováním stability elektroenergetického systému plynové turbíny v ostrovním provozu. Cílem práce je pomocí matematického modelování Rowenova modelu a práce s programem Matlab a jeho rozšířením Simulink namodelovat vlastní případ ostrovního systému, posoudit dostupnost, přínosy, realizaci ve vybraném případě a následně provést analýzu rizik.

Klíčová slova

Ostrovní provoz, Stabilita elektroenergetického systému, Plynová turbína, Otáčková regulace, Rowenův model

Abstract

This bachelor thesis is focused on the Power system stability of Gas turbines in an Island operation. The aim of this work is to model my own case of the Island operation through mathematical modeling of Rowen's model and computing MATLAB program with its extension Simulink model, to assess its availability, benefits, implementation for the selected case and then to analyze the risks.

Key words

Island operation, Power system stability, Gas turbine, load frequency control, Rowen's model

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou 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 bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 19.6.2020

Michael Bárta

(Nepovinná část)

Poděkování

Chtěl bych poděkovat hlavně svému vedoucímu práce doktorovi Václavu Mužikovi za poskytnuté množství jeho času, odborné vedení a velkou trpělivost. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu při studiu. A v poslední řadě bych rád poděkoval těm, co ve mně nevěřili a tím mi dodali energii tuto práci napsat.

Obsah

ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
SEZNAM OBRÁZKŮ	11
SEZNAM TABULEK	11
1 TEORETICKÝ ÚVOD	12
1.1 ÚVEDENÍ DO PROBLEMATIKY OSTROVNÍHO PROVOZU SYSTÉMU	12
1.1.1 Vliv změny kmitočtu	12
1.1.2 Změna tvrdosti sítě	13
1.1.3 Způsoby regulace dle velikosti ostrova	14
1.1.4 Regulace v otáčkovém režimu	14
1.2 PROVOZNÍ STAVY OSTROVA A JEJICH PROBLEMATIKA	14
1.2.1 Přechod do ostrovního provozu	14
1.2.2 Frekvenční plán	15
1.2.3 Frekvenční odlehčování	16
1.2.4 Rozdělení odběratelů	16
1.2.5 Požadavky pro přechod na ostrovní provoz systému	17
1.2.6 Schopnost startu ze tmy	17
1.2.7 Black-Out	18
1.2.8 Opětovné připojení k soustavě	18
1.2.9 Ostrovní provoz (OP)	18
1.3 EKONOMICKO-ENERGETICKÉ VÝHODY OSTROVNÍHO PROVOZU	19
1.4 PLYNOVÁ TURBÍNA (GT)	19
1.4.1 Braytonův cyklus	19
1.4.2 Otevřený oběh	20
1.4.3 Otevřený oběh turbíny s kombinovanou výrobou tepla a elektřiny	20
1.4.4 Uzavřený oběh	21
1.4.5 Kompresor turbosoustrojí	22
1.4.6 Spalovací komora turbosoustrojí	23
1.4.7 Turbína turbosoustrojí	24
1.5 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ	24
1.5.1 Rowenův model	24
1.5.2 Modelování dynamiky systému	26
1.5.3 Large signal model	26
1.5.4 Small signal model	27
1.5.5 Rozdíl mezi Large and Small signal model	27
2 VLASTNÍ ŘEŠENÍ PROVOZU OSTROVNÍHO SYSTÉMU	29
2.1 ÚVOD DO DANÉ ENERGETICKÉ LOKALITY	29
2.1.1 Zdroj pro ostrov	29
2.1.2 Odběratelé	30
2.1.3 Úpravy pro možnost provozu ostrovního systému	32
2.2 MODEL PRO OPTIMÁLNÍ CHOVÁNÍ OSTROVNÍHO PROVOZU SYSTÉMU	32
2.2.1 Model	32
2.3 VLASTNÍ SIMULACE DANÉHO OSTROVNÍHO SYSTÉMU	35
2.3.1 Nelezení vhodného nastavení turbíny před přechodem do OP	35
2.3.2 Neúspěšný přechod do OP	37
2.3.3 Úspěšný přechod do OP	39
2.3.4 Úspěšný přechod do OP s plným pokrytím odběrů	39
2.3.5 Odlehčení z důvodu další poruchy při OP	40
2.3.6 Vliv změny $Tp1$ na Přechod do OP	41
2.3.7 Vliv změny Kp na Přechod do OP	42
2.4 HODNOCENÍ RIZIK A PŘÍNOSŮ V OSTROVNÍM PROVOZU (OP)	43

3	ZÁVĚR.....	44
3.1	ZHODNOCENÍ DŮLEŽITÝCH POJMŮ PRÁCE	44
3.2	ZHODNOCENÍ APLIKACE VLASTNÍHO ŘEŠENÍ	45
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	46
	PŘÍLOHY	I

Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřená na přechod na ostrovní systém a jeho následovný provoz. Pro tuto práci uvažuji menší vesnici s vnitřním elektrickým zdrojem s malým výkonem okolo 400kW a její simulace pro možný přechod do ostrovního systému. Součástí práce je také návrh dané lokality a jejich odběratelů. Jako zdroj elektrické energie jsem zvolil plynovou turbínu od firmy Aurelia a typ A400 převážně z důvodu ne tak častého využití, a tedy velké neznámosti zdroje veřejností a mnou samotným.

Práci jsem rozdělil na tři základní kapitoly. V první části pojednávám jen o teorii potřebné pro pochopení principů, na kterých je práce založena, anebo dostatečně zajímavých pro jejich zmínění. Mezi, něž patří například Rowenův model, který se využívá pro modelování plynových turbín, úvod do problematiky ostrovního provozu jako je například vliv změny frekvence na jednotlivá zařízení sítě, provozní stavy sítě mezi, něž patří i ostrovní provoz či black-out a podobně. Další důležitou částí je vysvětlení principu plynové turbíny a její využití. A nesmím zapomenout ani na podkapitolu o otáčkové regulaci.

Ve druhé kapitole se přesouvám k vlastnímu řešení mnou navrhovaného zdroje a lokality. V tomto vlastním řešení se zabývám uvedením do lokality, což znamená například uvedení počtu odběru a definice jejich velikosti, samotnou simulací a posouzením výsledků jednotlivých simulací. Simulaci jako takovou jsem provedl v interaktivním programovém prostředí Matlab a jeho rozšířením jménem Simulink, kde jsem vytvořil regulační schéma právě pro plynovou turbínu a její ostrovní provoz. Simulace vytvořené v tomto prostředí používám jako vizuální ukázkou v podobě grafů, nebo v podobě návrhu regulačního schématu. Dané grafy pak komentuji na základě jejich výsledků a dodávám možné důsledky daných situací.

Ve třetí kapitole v rámci závěru už jen shrnuji výsledky práce, mé názory či postřehy o daném tématu a posuzuji vhodnost práce jako takové a porovnání svých výsledků s možnou skutečností.

Doufám, že práce bude pro čtenáře zajímavá, srozumitelná, a dobře čtivá. A pokud možno si z ní odnese nové znalosti či využije její data.

Seznam symbolů a zkratek

OP.....	Ostrovní provoz	
GT.....	Plynová turbína (Gas turbine)	
ES.....	Elektrická síť	
DS.....	Distribuční soustava	
P_{el}	Elektrický výkon turbosoustrojí	[kW]
P_i	Instalovaný elektrický výkon	[kW]
β	Činitel soudobosti	[-]
ASRU.....	Automatická sekundární regulace napětí	
SZD.....	Stupeň zajištění dodávky	
P_j	Jmenovitý výkon turbíny	[kW]
dP.....	Změna odebíraného výkonu	[p.u.]
df.....	Změna frekvence	[Hz]

Seznam Obrázků

OBR. 1.1 SÍŤ ENTSO-E A JEJÍ PROPOJENÍ EVROPY [3]	13
OBR. 1.2 ZOBRAZENÍ P-V A T-S DIAGRAM BRAYTONOVA CYKLU [5]	20
OBR. 1.3 SCHÉMA GT S OTEVŘENÝM BRAYTONOVÝM CYKLEM [5]	20
OBR. 1.4 SCHÉMA S VYUŽITÍM KOMBINOVANÉ VÝROBY TEPLA A EL. ENERGIE [16]	21
OBR. 1.5 SCHÉMA GT S UZAVŘENÝM BRAYTONOVÝM CYKLEM [5]	21
OBR. 1.6 PRŮŘEZ AXIÁLNÍHO KOMPRESORU NA SPOLEČNÉ HŘÍDELI S GT [10]	22
OBR. 1.7 SCHÉMA SPALOVACÍ TURBÍNY SOUPROUDÉ KOMORY SE STABILIZACÍ HOŘENÍ POMOCÍ LOPATKOVÉHO VÍŘIČE [5]	24
OBR. 1.8 CELKOVÝ ROWENŮV MODEL GT Z ROKU 1983 [9]	25
OBR. 1.9 SYSTÉM BUZENÍ V KLASICKÉ FORMĚ ZPĚTNÉ VAZBY [15]	26
OBR. 1.10 ZJEDNODUŠENÝ ROWENŮV LARGE SIGNÁL MODEL GT [12]	27
OBR. 1.11 ZJEDNODUŠENÝ ROWENŮV SMALL SIGNÁL MODEL GT [12]	27
OBR. 2.1. UKÁZKA MOŽNOSTI REALIZACE DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY DANÉ LOKALITY [STUDENTSKÁ VERZE AUTOCAD]	32
OBR. 2.2 MNOU MODELOVANÝ ROWENŮV SMALL SIGNAL MODEL JIŽ S HODNOTAMI PRO REGULACI	33
OBR. 2.3 MNOU MODELOVANÝ ROWENŮV LARGE SIGNAL MODEL S HODNOTAMI PRO REGULACI	34
OBR. 2.4 UPRAVENÝ ROWENŮV SMALL SIGNAL MODEL [12]	35
OBR. 2.5 PI REGULÁTOR PRO ROWENŮV MODEL	35
OBR. 2.6 GRAF ZÁVISLOSTI DF NA T PRO NALEZENÍ OPTIMÁLNÍ HODNOTY DP	36
OBR. 2.7 GRAF ZÁVISLOSTI P NA T PRO NALEZENÍ OPTIMÁLNÍ HODNOTY DP	37
OBR. 2.8 GRAF ZÁVISLOSTI DF NA T PRO NEÚSPĚŠNÝ PŘECHOD DO OP	38
OBR. 2.9 GRAF ZÁVISLOSTI P NA T PRO NEÚSPĚŠNÝ PŘECHOD DO OP	38
OBR. 2.10 GRAF ZÁVISLOSTI DF NA T PRO ÚSPĚŠNÝ PŘECHOD DO OP	39
OBR. 2.11 GRAF ZÁVISLOSTI DF NA T PRO ÚSPĚŠNÝ PŘECHOD DO OP S POKRYTÍM VŠECH ODBĚRŮ	40
OBR. 2.12 GRAF ZÁVISLOSTI DF NA T PRO ODPOJENÍ PODNIKU PORUCHOU BĚHEM OP	41
OBR. 2.13 GRAF ZÁVISLOSTI P NA T PRO PORUCHU BĚHEM OP	41
OBR. 2.14 POROVNÁNÍ VLIVU ZMĚNY TP1 NA PŘECHOD DO OP	42
OBR. 2.15 POROVNÁNÍ VLIVU ZMĚNY KP NA PŘECHOD DO OP	42

Seznam tabulek

TAB. 1 VYMEZENÍ FREKVENCE V HZ PRO PÁSMA PROVOZU [11]	16
TAB. 2 FREKVENČNÍ ODLEHČOVÁNÍ [11]	16
TAB. 3 TABULKA PRO ZJEDNODUŠENÝ PŘEHLED DAT O ODBĚRATELÍCH	31
TAB. 4 HODNOTY PRO REGULACI INSPIROVÁNO Z [16]	34
TAB. 5 HODNOCENÍ RIZIK A PŘÍNOSŮ V OP	43

1 Teoretický úvod

Tento teoretický úvod by měl uvést čtenáře do řešené problematiky v druhé kapitole. Proto se zde zabývám především teorií, kterou jsem použil například při simulacích. Je také důležitá pro pochopení ostrovního provozu (dále jen OP) o jeho úskalí. Součástí úvodu je také teoretické seznámení s použitým zdrojem tedy plynovou turbínou (dále jen GT) a jeho zajímavými částmi či možnostmi. Také se zde pokusím vysvětlit použitý model a jeho použití.

1.1 Uvedení do problematiky ostrovního provozu systému

Problémem přechodu do OP je změna základních fyzikálních parametrů dodávaného elektrického příkonu. Což má vliv na spotřebitele a stejně tak jako na výrobce elektrické energie.

1.1.1 Vliv změny kmitočtu

Jedna ze základních změn je změna kmitočtu ta má negativní vliv na několik důležitých částí energetické soustavy. Z tohoto důvodu se v minulosti realizovalo mezinárodní propojování elektrických soustav pro zvýšení takzvané tvrdosti sítě.

Jedním z problémů pro výrobce je, že u obvodu parní turbíny dojde při snížení kmitočtu k namáhání lopatek turbíny odstředivou silou a dynamickým proudem přehřáté páry z jednotlivých rozváděcích kanálů. Tento jev je nebezpečný a může při něm dojít k poškození celého soustrojí, pokud jsou rázy opakované a překročí mez pevnosti materiálu. To se může projevit až po určitém čase provozu a z toho důvodu jsou dlouhodobě hodnoty kmitočtu omezeny jen v rozsahu 49,5-50,5 Hz. Dále také při změně kmitočtu dochází ke ztrátám výkonu vlivem rázů lopatek, proto má parní turbína největší účinnost při jmenovitém kmitočtu. Dalším z nepříznivých jevů, je vliv na vlastní spotřebu elektráren. Například při snížení frekvence je pokles výkonu na oběhových čerpadlech ventilátorů, elektronapáječek, dmychadlech atd. ty totiž přímo závisí na rychlosti otáčení. [1]

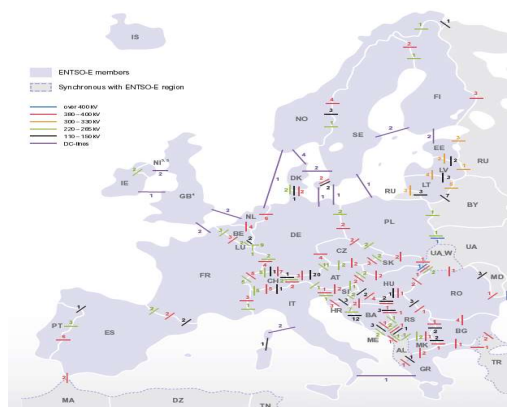
Změna kmitočtu má vliv také na odběratele, a to zejména v příkonu asynchronních a synchronních motorů. U asynchronních motorů při snížení frekvence poklesnou otáčky, zároveň dojde k nárůstu magnetizačního proudu v důsledku většího magnetického toku. U

obou typů motoru dochází ke snížení výkonu. U synchronního dochází k samovolnému odbuzování a tím i k zatěžování sítě induktivním proudem, což vede ke zhoršení účinnosti sítě. Asynchronní může na druhou stranu při větším poklesu frekvence zase trpět na zvýšené oteplení. Zdánlivý odpor zářivek s tlumivkou při nižší frekvenci klesne a tím se proud a výkon zvětšují, naopak na čistě odporové spotřebiče to nemá žádný vliv. [1]

Neměnné to nebude ani pro provozovatele elektroenergetické přenosové soustavy. Transformátory totiž při konstantním napětí a poklesu frekvence zvyšují svůj magnetizační proud podobně jako u asynchronních motorů. Tím vzrůstá jalové zatížení sítě, což vede k horšímu účinnosti sítě, a to má neblahý vliv na ekonomičnost sítě. Transformátory mají podobně jako alternátory zvýšené oteplení, které se musí kontrolovat. [1]

1.1.2 Změna tvrdosti sítě

Pro pochopení nutnosti předchozího bodu je třeba zmínit několik informací o změně takzvané tvrdosti elektrické soustavy. Při změně zatížení dochází k požadavku na elektrickou síť ať už na snížení nebo zvýšení dodávaného výkonu zdroje nebo zdrojů. Čím větší je procentuální změna tohoto požadavku oproti celkovému výkonu, tím větší vznikne kolísání frekvence v síti. Každá z těchto změn musí být vyregulována změnou výkonu zdrojů sítě a tím dojde k opětovné rovnováze mezi spotřebou a výrobou elektrické energie. Z tohoto důvodu je požadavkem co nejtvrdší síť, to znamená co nejrozsáhlejší (s co nejvíce zdroji a odběry). V praxi to vypadá tak, že je propojena prakticky celá Evropa. Česká republika patří do sítě ENTSO-E.



Obr. 1.1 Síť ENTSO-E a její propojení Evropy [3]

V OP, kterému se tato práce věnuje, je síť ovšem daleko měkčí, a proto nastává velký problém s regulací dané sítě a v případě překročení regulační schopnosti může dojít

k lokálnímu black-out. To je u tvrdé sítě, jako je právě ENTSO-E daleko méně pravděpodobné.[1] [2] [3]

1.1.3 Způsoby regulace dle velikosti ostrova

Při přechodu do OP systému se musíme zabývat velikostí takového ostrova především z důvodu typu regulace takového systému. Pokud je daný ostrov v rozsahu několik desítek až stovek zdrojů například při rozdělení na oblasti velikosti ČR, kde je stále v provozu centrální řízení, mohou zdroje dále fungovat ve standardním typu primární a sekundární regulace zajišťující výkonovou rovnováhu a frekvenci co nejbližší 50 Hz.

Pokud se však jedná o ostrov v menším rozsahu, je síť (např. měst, vesnic nebo třeba jen jednoho domu s vlastním zdrojem) mnohem měkčí, a tedy musíme přejít do stavu regulace v otáčkovém režimu. Pro tuto práci budeme uvažovat právě o takovém stavu, a proto ho blíže popisují v další podkapitole. [1][2][4]

1.1.4 Regulace v otáčkovém režimu

Při běžném provozu se reguluje přes klasickou primární a sekundární regulaci, která reguluje výkon. U té dojde při změně zátěže k regulaci, u níž zůstane trvalá chyba na frekvenci. U tvrdé sítě není problém, protože se síť doreguluje změnou výkonu jiného zdroje.

Při přechodu do ostrovního provozu nebo při změně frekvence zdroje mimo rozsah $\pm 0,2$ Hz od jmenovité hodnoty (50 Hz) musí dojít k přepnutí do tzv. izochronní kontroly. Ta je definována jako udržení frekvence neboli rychlosti otáčení hřídele bez ohledu na změnu zatížení sítě. Toho se dosahuje použitím proporčního a integračního regulátoru (PI). Často bývá také ve spojení s derivačním členem, čímž vzniká PID regulátor. [7][8]

1.2 Provozní stavy ostrova a jejich problematika

1.2.1 Přechod do ostrovního provozu

Přechod do OP se dá rozdělit na nahodilý a plánovaný. K nahodilému dochází v důsledku závady na nadřazené elektrické soustavě. A jak již bylo uvedeno, zdroj, který přechází do OP, musí být schopen přepnout do regulace v otáčkovém režimu. Na úspěšný přechod má vliv především rozdíl výkonů nesmí totiž dojít k příliš velké změně frekvence (výpočet změny frekvence viz rovnice (1)).

$$\frac{df}{dt} = \frac{\Delta P \cdot f_n}{T_m \cdot S_{NG}} \quad [Hz, MW, Hz, s, MVA] \quad (1)$$

Při plánovaném OP, na rozdíl od nahodilého, je možnost přípravy a dochází k němu převážně z důvodu plánované odstávky ať už z důvodů údržby, nebo revize v nadřazené síti. Při plánovaném OP můžeme připravit síť, aby zdroj dodával přibližně stejnou hodnotu výkonu jako je odběr v síti provozované v OP, tím bude rozdíl výkonů co nejmenší. Můžeme se setkat s problémem, kdy zdroj není schopen pokrýt požadavek sítě. V ten moment musí dojít k odpojení odběrů na základě třídy odběru a tím doregulovat rovnováhu sítě před odepnutím. [4]

1.2.2 Frekvenční plán

Frekvenční plán je plán pro případ klesání frekvence, který je odstupňovaný ději:

1. Nedovolit propad frekvence do hodnoty, kdy začne působit frekvenční odlehčování. Tomu budu věnovat v následující podkapitole.
2. V případě neúspěchu přejít k frekvenčnímu odlehčování pomocí lokálního a systémového automatického odlehčování a pokusit se tím zamezit dalšímu propadu frekvence, které by mohli začít být nebezpečné pro zařízení v síti.
3. Dále se snažit zamezit dalšímu klesání frekvence a případně přejít do ostrovního provozu některých částí ES.
4. Pokud ani tyto předchozí kroky nebudou dostatečné, pak musí dojít k odpojení ES a včasnému odpojení elektráren do provozu vlastní spotřeby.

U každého typu elektrárny je mezní hodnota frekvence pro provoz jiná. ČEPS uvádí hodnoty v dokumentu [11] (viz Tab. 1).

Typ elektrárny Provoz	Uhelné	JE		VE	PVE		Paro- plynové	OZE a nové VM
		EDU	ETE		turbína	čerpání		
Normální bez omezení	48.5-50.5	48.5-50.5		48.5-50.5	48.5-50.5	49.5-50.5	48.5-51.5	49-51
Časové omezení	46-48.5 50.5-53	47.5-48.5 50.5-52.5	47.9-48.5 50.5-51.5	46-48.5 50.5-53	46-48.5 50.5-53	49-49.5 50.5-52(53)	48-48.5 51.5-52	47.5-49 51.-51.5
Nepřípustný	f > 53 f < 46	f > 52.5 f < 47.5	f > 51.5 f < 47.9	f > 53 f < 46	f > 53 f < 46	f > 52(53) f < 49	f > 52 f < 48	f > 51.5 f < 47.5
Automatické odpojení od ES	f > 53 f < 47.5	f > 52.5 f < 47.9	f > 51.5 f < 47.9	f > 50.2(51.5) f < 47.5	f > 50.2(51.5) f < 47.5	f > 52(53) f < 49.8-49.2	f > 52 f < 48	f > 51.5 f < 47.5

Tab. 1 Vymezení frekvence v Hz pro pásma provozu [11]

1.2.3 Frekvenční odlehčování

Při přesazení určité meze frekvence (viz tabulka 2.) musí dojít k odlehčování soustavy. Tím dojde ke snížení ΔP a podle vzorce (1) i k menšímu Δf . V systému frekvenčního odlehčování je připraveno 50 % celkového netto zatížení ES ČR. Relé dávají signál k vypnutí příslušnému vypínači bez umělého časového zpoždění. Zátěž je tedy odepnutá v čase sestávajícího z času potřebného pro změření frekvence a vypínacího času příslušného vypínače. [11]

Stupeň / frekvence [Hz]	1. /49	2. /48.7	3. /48.4	4. /48.3	5. /48.1	6. /48.0
Objem odlehčované zátěže [%] z netto zatížení na území, na kterém příslušný PDS zajišťuje distribuci	10	10	10	2	10	8

Tab. 2 frekvenční odlehčování [11]

1.2.4 Rozdělení odběratelů

Frekvenční odlehčování odpojuje výkon neboli odběry na základě tří stupňů. Nejprve se snaží odpojovat třetí stupeň, poté druhý stupeň a ideálně se snaží, aby nedošlo k odpojení prvního stupně. Tyto stupně jsou definovány takto:

1. Odpojení může způsobit ohrožení na zdraví, velké ekonomické škody, nebo se jedná o krizovou infrastrukturu.
2. Odpojení způsobí ekonomické škody.
3. Nedojde k žádným větším škodám na straně odběratele.

Do prvního stupně převážně patří nemocnice, firmy, kde při přerušení může dojít ke zničení celé budoucí série výrobků, anebo poškození drahých výrobních zařízení. Sem patří krizová infrastruktura jako třeba důležité vojenské objekty. Druhý stupeň tvoří většinou

střední firmy, kde by odstávka způsobila zamezení výroby. Třetí stupeň je pak všechno ostatní jako například domácnosti, či školy.

1.2.5 Požadavky pro přechod na ostrovní provoz systému

Při přechodu do OP je nutné odpojit danou síť od DS, dále také vymezit část, kterou bude zdroj v ostrově napájet. Při samotném přechodu je nutné řídit se frekvenčním plánem a v závislosti na zdroji také Tab. 1 a daným rozsahem frekvence pro zdroj. Dále jsou nutné následujících kroky pro úspěšný přechod:

1. Přejít do otáčkové regulace.
2. Odpojení dálkové regulace výkonu.
3. Odpojení ASRU ze systému terciální regulace napětí.
4. Aperiodický a stabilní přechod otáček na nastavenou hodnotu (standartně 50 Hz), v případě kritického stavu odepnutí podle frekvenčního odlehčování nebo až jen na vlastní spotřebu elektrárny. [4]

1.2.6 Schopnost startu ze tmy

V případě, že selže frekvenční plán a dojde k black-out, můžeme přejít do ostrovního provozu startem ze tmy neboli rozběhu zdroje bez podpory stability sítě. Snažíme se docílit jmenovitých otáček zdroje. Tento start je nepostradatelná součást obnovy po black-out. Všechny zdroje nejsou tohoto startu schopné. Některé pro rozběh potřebují právě podporu stability sítě a elektrickou energii jako například jaderné elektrárny. Pro tento účel definuje ČEPS v dokumentech [11] a [13] následující provozní instrukce:

- PI ČEPS 620-5 „Koordinace obnovy soustavy po poruše typu black-out“
- PI ČEPS 620-11 „provoz a fázování ostrovů“
- PI ČEPS 620-11 „Odstraňování poruch v provozu přenosové a distribučních soustav“

1.2.7 Black-Out

V předchozí kapitole byl zmíněn pojem black-out. Ten je definován jako rozsáhlý výpadek zásobování elektrickou energií v elektrizační soustavě. Tento výpadek může být i v rozsahu několik států. Příčinou je narušení bilanční rovnováhy. Ta je definována jako rovnost mezi okamžitou výrobou a okamžitou spotřebou. K tomu dojde překročením regulační schopnosti zdrojů a dalších opatření jako je frekvenční plán. V důsledku toho se v elektrizační síti začne měnit frekvence do nepřijatelných hodnot (viz podkapitola o vliv změny kmitočtu a tabulka 1.), dále dojde ke změně výkonů a kolísání napětí. To způsobuje reakci frekvenčních a napěťových ochran. Propojená přenosová soustava se rozpadne, což způsobí následný dominový efekt, a tedy rozpad i nižších napěťových hladin. [14]

1.2.8 Opětovné připojení k soustavě

OP není trvalé řešení problému z hlediska náročnosti regulace v tomto systému a také stability této sítě. Také ostrovní provoz nemusí zvládat pokrýt celý požadavek odběru, a tak může zásobovat jen prioritní odběry. Je tedy nutné přejít zpět na běžný chod co nejdříve. Přejít se provádí tak, že se frekvence reguluje na pokyn dispečera přenosové soustavy, aby mohlo dojít k takzvanému přifázování zpět k síti při frekvenci podle frekvenčního plánu a jmenovitém napětí v intervalu mezi 92-108 %. V OP však musí pracovat nejméně dvě hodiny. [13][4]

1.2.9 Ostrovní provoz (OP)

Pokud se podaří přechod do OP ať už při přímo z odpojení od sítě nebo po startu ze tmy, nastává samotný OP. U něj musí dojít k zajištění těchto podmínek:

1. Stabilní paralelní spolupráce zdrojů v ostrově.
2. Adekvátní odezva činného a jalového výkonu na změny frekvence a napětí.
3. Dostatečně plynulá změna otáček a regulace napětí. [4]

1.3 Ekonomicko-energetické výhody ostrovního provozu

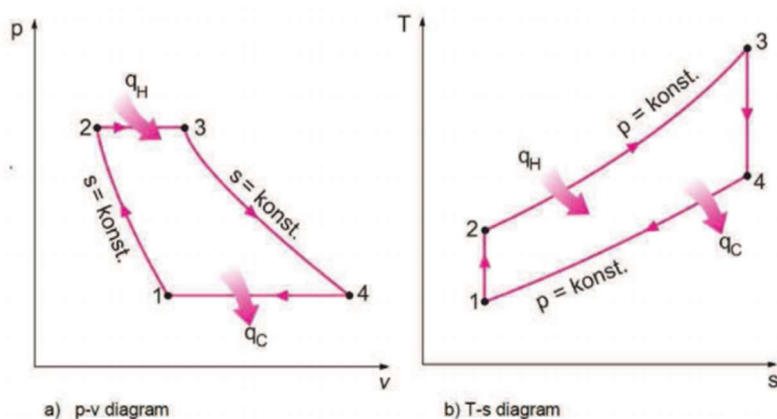
OP může mít obrovské ekonomické výhody, protože není nutný výpadek, a s tím spojené ekonomickým ztráty při odstávce nebo poruše v nadřazené soustavě. Na druhou stranu to se do určité míry dá zajistit například dodávkou z více míst nebo okružní energetickou sítí. Samotný OP však ekonomicky výhodný není, protože provoz zdrojů, které jsou dostatečně regulovatelné, nepatří k těm nejvýhodnějším. Další z teoretických výhod je snížení ztrát na transformátorech a vedení, avšak z hlediska regulace je pro nás důležitá tvrdost sítě, kterou s pár zdroji nedosáhneme.[14]

1.4 Plynová turbína (GT)

Plynová turbína (dále jen GT neboli anglická zkratka slovního spojení gas turbine) je typem tepelného motoru s nepřetržitým vnitřním spalováním. U většiny je teoretickým základem Braytonův cyklus s plynem jako pracovním látkou. Pro zjednodušení popisují všechny postupy se vzduchem jako pracovním plynem, ale lze využít větší množství plynů hlavně u GT s uzavřeným okruhem. Svou mechanickou energii získává expanzí vzduchu na lopatkách. GT je pojem značící pouze, že pracovní látkou je tedy plyn. Proto se v některých odborných zdrojích ujal pojem rozšiřující na parní turbosoustrojí, což je parní turbína i s příslušenstvím jako je kompresor, spalovací komora a podobně. [5][10]

1.4.1 Braytonův cyklus

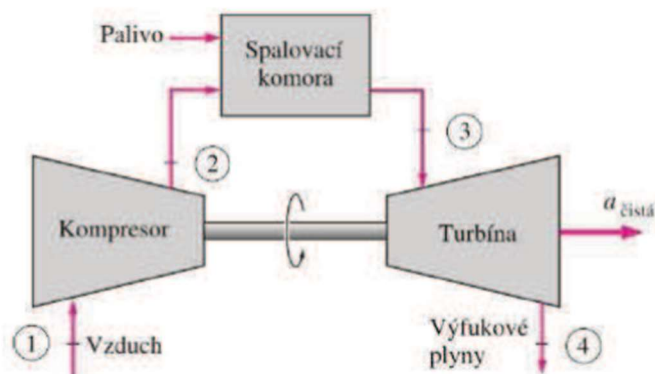
Jedná se o ideální tepelný oběh tvořený čtyřmi vratnými změnami při konstantním tlaku. Tyto čtyři změny jsou termodynamické děje, kde pro parní turbíny s otevřeným oběhem je mezi body 1-2 (body viz Obr. 1.2) stlačení vzduchu kompresoru (adiabatická komprese). Mezi body 2-3 je u otevřeného oběhu spalování paliva a tím ohřátí vzduchu (izobarický přívod tepla). Dalším dějem je mezi 3-4 adiabatická expanze spalin na lopatkách turbíny. Posledním dějem, který uzavírá cyklus je mezi 4-1 je výfuk zbytku spalin do okolí (izobarický odvod tepla). Často bývá zbylá energie těchto spalin využita dále například pro ohřev vody. [5][6][10]



Obr. 1.2 zobrazení p-v a T-s diagram Braytonova cyklu [5]

1.4.2 Otevřený oběh

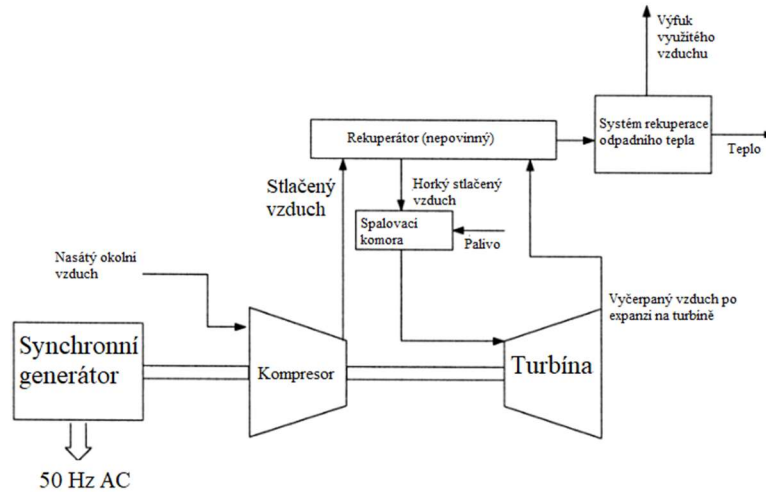
Otevřený oběh u GT jsem již částečně popisoval v rámci kapitoly o Braytonově cyklu, přesto ho raději popíši znovu v rámci Obr. 1.3. Na začátku tohoto oběhu dochází k nasávání vzduchu kompresorem a jeho stlačení. Tento stlačený vzduch se pak vhání do spalovací komory, kde dochází k míšení paliva a stlačeného vzduchu, který vzplane, a vznikají spaliny. Tyto spaliny jsou pak hnány na lopatky turbíny, kde expandují. Tím se turbína roztáčí a vzniká mechanická energie na hřídeli. [5]



Obr. 1.3 Schéma GT s otevřeným Braytonovým cyklem [5]

1.4.3 Otevřený oběh turbíny s kombinovanou výrobou tepla a elektřiny

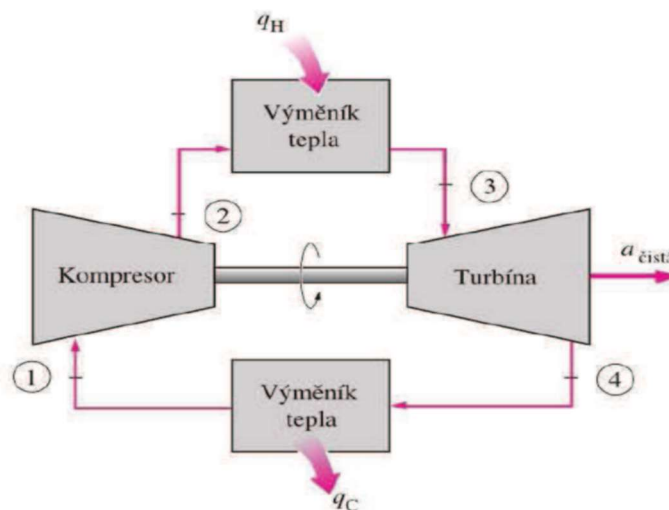
Jedná se o častou aplikaci drobné úpravy otevřeného oběhu, který získá část energie zbytkové energie výfukových plynů. Všeobecně se jedná o úpravu, která zvedá účinnost systému většinou využívaná u větších výkonů. K výměně tepla tedy přechodu energie z výfukových plynů dochází v systému rekuperace odpadního paliva (Viz. Obr. 1.4) nepovinnou částí je pak Rekuperátor, který může zvedat účinnost přeměny. [17]



Obr. 1.4 Schéma s využitím kombinované výroby tepla a el. Energie [16]

1.4.4 Uzavřený oběh

Uzavřený oběh je GT méně využívaný především proto, že vzduch není problém vypouštět teplý do okolí. Už zde není spalovací komora, ale jsou zde dva výměníky tepla. Princip je hodně podobný, pouze místo spalovací komory se předává energie v jednom z výměníků tepla. A po expanzi na turbíně nedochází k výfuku spalin, ale opět putují do druhého výměníku tepla, kde dojde k ochlazení zpět na pracovní teplotu. Toto ochlazení se provádí vodou. To je jedna z hlavních nevýhod, která ovlivní cenu. Jedná se o složitější systém, a tedy i méně spolehlivý. Dva výměníky navíc jsou také důvodem prodražení celkových nákladů. Výhodou je však čistota pracovní látky, a tedy i menší opotřebování lopatek turbíny, kompresoru a dalších komponent. Další výhodou je vyšší měrný výkon a vyšší termická účinnost v porovnání s otevřeným oběhem. [5]

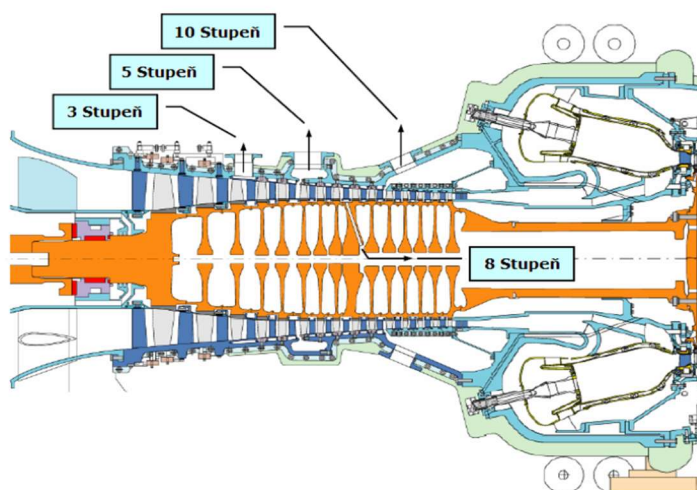


Obr. 1.5 Schéma GT s uzavřeným Braytonovým cyklem [5]

1.4.5 Kompresor turbosoustrojí

Kompresor je v turbosoustrojí přístroj pro stlačení vzduchu. Mohou se dělit na objemové a rychlostní. K stlačování u objemových kompresorů dochází pohybem pístu ve válci, který zmenšuje objem nasátého plynu. Rychlostní naopak zvyšují kinetickou energii plynu. Tato energie je v difuzoru transformována na energii tlakovou. Mezi tyto zařízení patří také lopatkové kompresory, které se dále dělí podle směru, jakým plyn do kompresoru vstupuje na axiální, radiální a diagonální. Lopatkové mohou být připojeny na společnou hřídel. V tom případě se označují jako turbokompresory. Pro spalovací turbíny se používají pouze kompresory rychlostní. [5]

Axiální turbokompresory dodávají velké objemové toky, proto se používají u turbín velkých výkonů. Mají stator a rotor. Na vnitřní část statoru jsou připevněny statorové lopatky, rotor je pak tvořen hřídelí, na níž jsou rotorové lopatky. Tyto lopatky jsou buď rovnotlaké nebo přetlakové. Přetlakový kompresorový stupeň vzniká, pokud jsou statorové i rotorové lopatky tvořeny symetrickými přetlakovými profily. U něj dochází k rozdílu tlaku před a za statorovou mříží. To umožňují symetrické lopatky, které způsobí kompresi v obou mřížích. Při použití rovnotlakých lopatek na statoru a přetlakových u rotoru vzniká rovnotlaký kompresorový stupeň. Tady dochází ke kompresi pouze v rotorové části, statorové pak mění jen směr proudícího plynu. [5]



Obr. 1.6 Průřez axiálního kompresoru na společné hřídeli s GT [10]

Radiální turbokompresory jsou naopak vhodné vzhledem k menšímu objemu toku pro menší a střední výkony. Mají však větší stlačení než axiální. Plyn vstupuje do rotorového kola axiálně a z oběžného kola pak vystupuje radiálně do pevného difuzoru. Ke kompresi

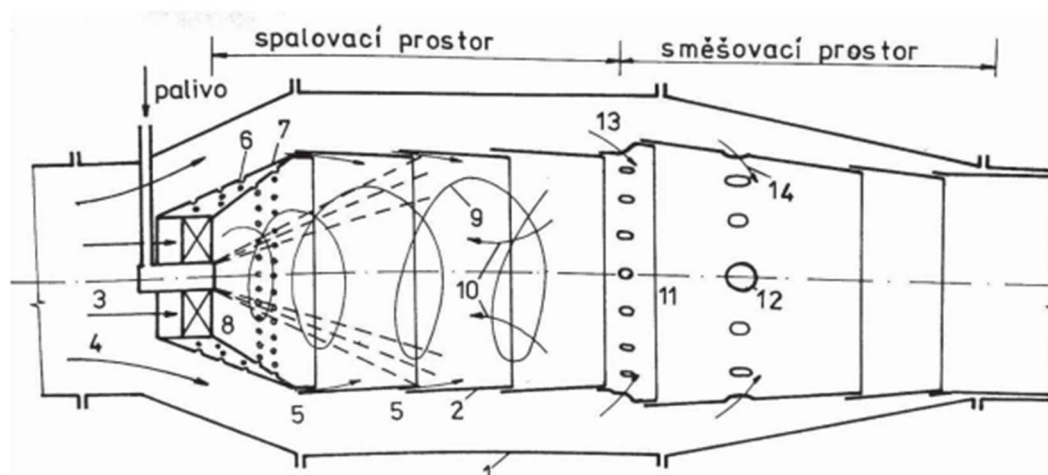
dochází v oběžném kole, kde se zvýší rychlost plynu. Částečně k tomu dochází díky odstředivým silám. V difuzoru dochází ke zpomalení a zvýšení tlaku. Lopatky mohou být radiální, dozadu zahnuté a dopředu zahnuté. Naším cílem je se přiblížit izoentropické komprese při niž se všechna energie používá pro stlačení a nedochází k ohřívání plynu. [5]

1.4.6 Spalovací komora turbosoustrojí

Jedná se o zařízení nutné pro chod spalovacích turbín s otevřeným oběhem. Podle vzájemného pohybu paliva a stlačeného vzduchu jsou komory souprouté nebo protiprouté. Úkolem zařízení je za pomoci spalování paliva s využitím oksličovadla v pracovní látce dosáhnout zvýšení teploty pracovního plynu pro následnou expanzi na lopatkách turbíny. Problémem je zajištění stability hoření v proudu vzduchu o velké rychlosti při relativně malé rychlosti hoření. Pro řešení toho problému se používá tzv. Aerodynamická stabilizace, která je založena na vyvolání zpětného proudu směsi žhavých spalin a vzduchu, které rychle zahřívají a způsobují zažehnutí paliva. Jeden ze způsobů stabilizace je pomocí mezikruhového lopatkového víříče. Ten je umístěn v souose s přívodem paliva. Spalovací vzduch se při průchodu víříče uvede do šroubovitého pohybu (rotace). V důsledku toho se zvýšení tlaku na stěnách plamence a snížení v ose spalovacího prostoru. To vyvolá zpětný proud žhavých spalin a vzduchu. [5]

Plamenec musí být chlazen v důsledku velkých teplot spalin, které dosahují až 1300 °C. Chlazení se provádí proudem vzduchu po jeho povrchu, který by měl být přibližně stejně velký jako proud spalin v plamenci. K regulaci spalování dochází pomocí obsahu vzduchu ve směsi. To znamená, že čím méně vzduchu ve směsi tím více se plamen stáhne k hořáku. [5]

Pro spalování v komorách se používají paliva pevná kapalná i plynná. Důležitým aspektem u paliv je jejich mechanická a chemická čistota. Ty mají neblahý vliv na výhřevnost. Dnes se používají převážně paliva plynná a kapalná. Výhodou kapalných je jednoduchost konstrukce komory a jsou převážně vyrobená z ropy a hnědouhelného dehtu. Plynná paliva mají za výhodu snadného promíchání plynného paliva a vzduchu. [5]



Obr. 1.7 Schéma spalovací turbíny s dopravní komorou se stabilizací hoření pomocí lopatkového víříče [5]

1.4.7 Turbína turbosoustrojí

Turbína je stroj, který slouží ke změně kinetické a tlakové energie spalin na mechanickou energii na hřídeli. Turbíny se dělí na radiální a axiální. Radiální turbíny se používají jako záložní zdroje nižších výkonů v použití s jednodušším radiálním kompresorem. Velké zdroje jsou pak většinou s axiální turbínou.

Radiální turbíny mají při nižších výkonech stále dobrou účinnost a mají menší objemové průtoky. Jejich výkon se pohybuje od kilowatt do jednotek megawatt. Používají se i u tzv. mikroturbín, které mohou nahradit i pístové spalovací motory.

Axiální turbína se většinou skládá z několika stupňů. Počet stupňů může ovlivňovat účinnost. Princip jejich činnosti je podobný jako u kompresorů. [5]

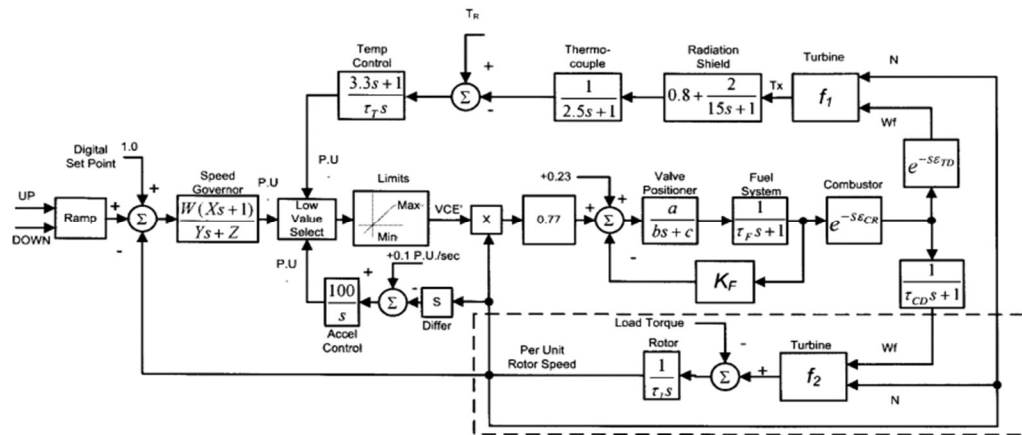
1.5 Matematické Modelování

1.5.1 Rowenův model

Rowenův model je matematický popis GT, který Rowen popsal nejdříve v roce 1983 v modelu pro vysoké zatížení. V roce 1992 rozšířil tento model o model účinku vodicích lopatek (IGV) na plynovou dynamiku turbíny, a to zejména teplotu výfukových plynů. A dále připravil cestu pro přesnější modelování operací GT instalované jako součást kombinovaného cyklu (CCGT).

Pro použití Rowenova modelu musí platit tyto tři předpoklady:

1. Musí se jednat o těžkou GT provozovanou v jednoduchém cyklu bez zpětného získávání tepla.
2. Otáčky jsou udržovány v rozsahu 95-107% jmenovité hodnoty.
3. Plynové soustrojí pracuje při teplotě 15 °C a okolním tlaku 101,325kpa.



Obr. 1.8 celkový Rowenův model GT z roku 1983 [9]

Rowenův model má tři regulační smyčky. Jedná se o smyčky pro regulaci otáček, teploty, a zrychlení. Regulační smyčka otáček může pracovat buď ve standardním nebo v izochronním režimu (viz podkapitola 1.1.4.). Teplotní regulační smyčka představuje omezení výkonu v důsledku oteplení. Měří se teplota výfukových plynů pomocí řady termočlánků s radiačními štíty. A smyčka zrychlení reguluje, aby nedošlo k překročení rychlosti generátoru v případě ztráty zatížení. Dynamika turbíny v Rowenově modelu je v podstatě vyrobena z funkčních bloků f_1 a f_2 a zpožděním spojeným s transportem proudících plynů a spalovacími procesy. Blok f_1 je funkce toku paliva a rychlosti rotoru která vypočítá teplotu spalin turbíny (viz. rovnice (2)). Blok f_2 je opět funkce toku paliva a rychlosti rotoru, avšak vypočítává točivý moment turbíny (Viz. rovnice (3)).

$$f_1 = TR - a_{f1} * (1 - w_{f1}) - b_{f1} * speed \quad (2)$$

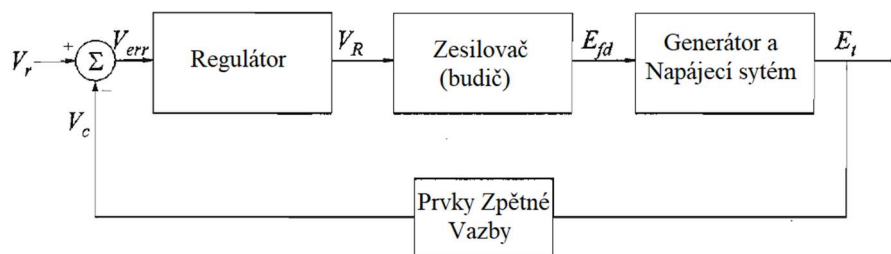
$$f_2 = a_{f2} - b_{f2} * (1 - w_{f1}) - c_{f2} * speed \quad (3)$$

U rovnic (1) a (2) jsou koeficienty a_{f1} až c_{f2} konstanty, TR označuje jmenovitou teplotu spalin, Speed je odchylka rychlosti rotoru a w_{f1} označuje tok paliva. [9]

1.5.2 Modelování dynamiky systému

Efektivita budicího systému při zvyšování stability energetického systému je dána klíčovými charakteristikami. V této části identifikujeme a definujeme výkonnostní opatření, která určují tyto charakteristiky a slouží jako základ pro vyhodnocení a specifikaci výkonu systému buzení. Obr. 1.7 je znázornění reprezentující systém řízení pro popis řízení systémů pomocí zpětné vazby.

Výkon systému buzení závisí na vlastnostech zesilovače, generátoru a napájecím systému. Protože je systém nelineární, je vhodné použít dynamický výkon ve velkém signálu výkonů. Pro malý signál výkonu je odezva fakticky lineární. [15]

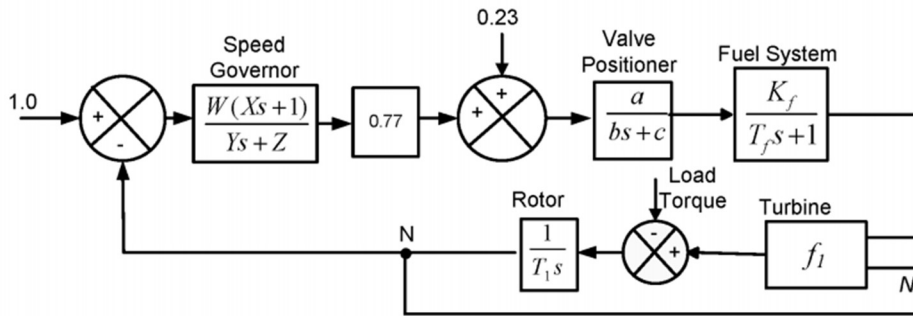


Obr. 1.9 systém buzení v klasické formě zpětné vazby [15]

1.5.3 Large signal model

Modelování velkých signálů je běžná metoda analýzy používaná v elektronickém inženýrství k popisu nelineárních zařízení z hlediska základních nelineárních rovnic. V obvodech obsahujících nelineární prvky jako jsou tranzistory, diody a vakuové trubice, mají střídavé signály za „podmínek velkého signálu“ dostatečně vysokou hodnotu, že je třeba vzít v úvahu nelineární účinky.

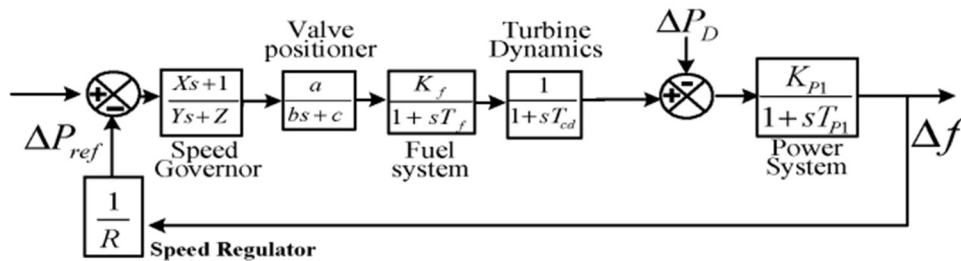
„Velký signál“ je opakem „malého signálu“, což znamená, že obvod lze s dostatečnou přesností redukovat na linearizovaný ekvivalentní obvod kolem svého pracovního bodu. [15]



Obr. 1.10 Zjednodušený rowenův large signál model GT [12]

1.5.4 Small signal model

Modelování malých signálů je běžná technika analýzy v elektronickém inženýrství, která se používá k přibližování chování elektronických obvodů obsahujících nelineární zařízení s lineárními rovnicemi. Je použitelná pro elektronické obvody, ve kterých mají střídavé signály, časově proměnné proudy a napětí v obvodu malou velikost ve srovnání s jednosměrnými přepínacími proudy a napětími. Model s malým signálem je obvod ekvivalentní střídavému proudu, ve kterém jsou nelineární obvodové prvky nahrazeny lineárními prvky, jejichž hodnoty jsou dány aproximací charakteristické křivky prvního řádu (lineární) v blízkosti bodu předpětí.[15]



Obr. 1.11 Zjednodušený rowenův small signál model GT [12]

1.5.5 Rozdíl mezi Large and Small signal model

Velký signál je jakýkoli signál, který má dostatečnou velikost, aby odhalil nelineární chování obvodu. Signál může být stejnosměrný signál, střídavý signál nebo skutečně jakýkoli jiný signál. Jak velký signál musí být (v rozsahu) před tím, než je považován za velký signál, závisí na obvodu a kontextu, ve kterém je signál používán. V některých vysoce nelineárních obvodech je třeba prakticky všechny signály považovat za velké signály.

Malý signál je AC signál (technicky to je signál mající nulovou průměrnou hodnotu) superponovaný na zkreslený signál (nebo superponovaný na stejnosměrný konstantní

signál). Toto rozlišení signálu na dvě složky umožňuje použít techniku superpozice pro zjednodušení další analýzy. (Pokud se v kontextu použije superpozice.)

Při analýze přínosu malého signálu do obvodu jsou nelineární složky, které by byly stejnosměrnými složkami, analyzovány odděleně s ohledem na nelinearitu. [15]

2 Vlastní řešení provozu ostrovního systému

2.1 Úvod do dané energetické lokality

Tato lokalita je smyšlená. Nejedná se tedy přímo o nějakou reálnou lokalitu převážně z důvodu neznalosti potřebných dat a problémy s jejich získáním. Byla volně inspirována jednou českou vesnicí s lokálním zdrojem popisovaným v podkapitole 2.1. Všechny odběry jsou pak vhodně zvolené na základě mého předpokladu o takové vesnici. Provedení připojení dané sítě k je opět jen předpoklad pro snadnou realizaci přechodu do OP.

2.1.1 Zdroj pro ostrov

Jeden ze zajímavých zdrojů pro ostrovní provoz je pístový spalovací generátor od firmy GE - JGS 208 GS-L.L. Všechny jeho parametry jsou v datasheetu, který je volně dostupný na internetu. Zde uvádím jen hodnoty potřebné či související s regulací zdroje a základním popsáním zdroje.

Technická data:

- Typ motoru: J208 GS- C21
- Princip: 4-Stroke
- Konfigurovaný v jedné linii
- Typ Generátoru: STAMFORD – HC534 E
- Jmenovitá frekvence: $f = 50$ Hz
- jmenovité otáčky: $n = 1500$ ot/min
- Jmenovité napětí: $U_n = 400$ V
- Jmenovitý elektrický výkon: $P_{el} = 330$ kW
- Účinnost při jmenovitém výkonu: $\eta = 38,8\%$

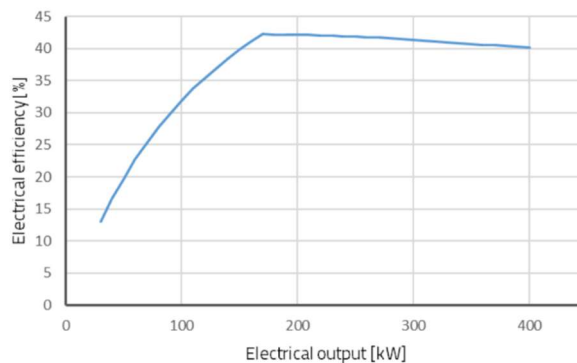
Nejdůležitějším parametrem je pro nás určitě maximální výkon na svorkách výstupu z elektrárny. Další podstatné hodnoty jsou hodnoty při 75 % výkonu kde je $P_{el} = 247$ kW při $\eta = 37,6$ a 50 % výkonu kde $P_{el} = 163$ kW při $\eta = 35,1$ %. Tyto hodnoty poukazují na to, že by se mohlo jednat o dobrý zdroj pro regulaci sítě na základě nízkého poklesu účinnosti při změně zatížení neboli výkonu.

Pro realizaci jsem zvolil Plynovou turbínu od firmy Aurelia-A400 data jsou opět v datasheetu, který součást přílohy [Příloha1]

Technická data:

- Typ pohonu: A400
- Konfigurovaný v jedné linii
- Jmenovitá frekvence: $f = 50 \text{ Hz}$
- Jmenovité napětí: $U_n = 400 \text{ V}$
- Jmenovitý elektrický výkon: $P_{el} = 400 \text{ kW}$
- Účinnost při jmenovitém výkonu: $\eta = 40,2\%$

Velice zajímavé u toho zdroje je, že účinnost neklesá s klesajícím elektrickým výkonem do více než 50 % jmenovitého výkonu, a naopak i lehce roste. Což naznačuje opět dobrý zdroj pro regulaci. Bohužel však datasheet neobsahuje příliš údajů. To pro samotnou realizaci není velkým problémem. [Příloha1]



Obr. 2.1 Účinnost GT Aurelia A400 v závislosti na výkonu [příloha1]

2.1.2 Odběratelé

Uvažujeme tři odběry, kterými jsou:

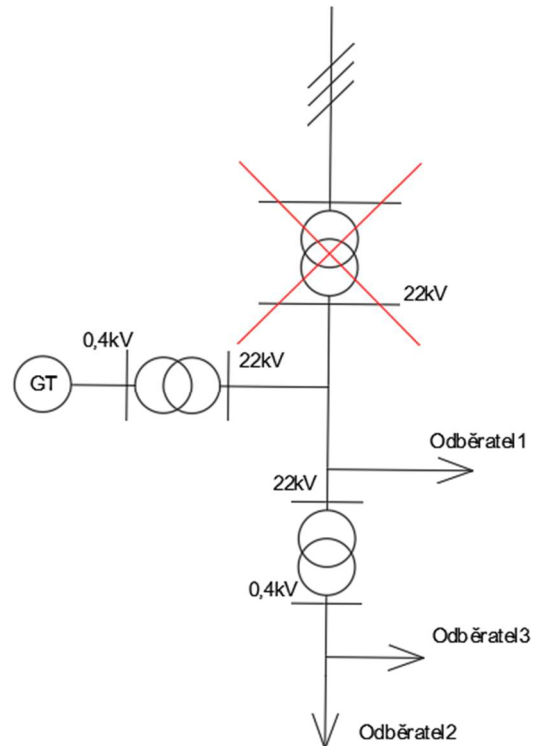
1. Jeden menší podnik s celkovým instalovaným výkonem $P_{i1a} = 300 \text{ kW}$ a soudobostí $\beta_{1a} = 0,8$. Definoval bych tento podnik jako výrobní závod ve standardních časech výroby jen ranní směny a vyrábějící jen ve všední dny mezi časy 5:30-14:00 a jako druhý stupeň odběratele. V jiné časy a dny považujeme odběratele za 3 stupeň a $P_{i1b} = 10 \text{ kW}$ jen na nějaké základní osvětlení například se soudobostí $\beta_{1b} = 1$

2. Vesnice zhruba o 300 obyvatelích, tedy o 100 domech o průměrné velikosti i spotřebě. Pro zjednodušení neberu v úvahu elektrické vytápění. Avšak zase беру v potaz, že všichni vaří na elektrických vařičích a mají elektrické bojler. Tím by se měla chyba alespoň trochu vykompenzovat. Navíc je velice pravděpodobné, že GT používá zbytkové teplo popsané v podkapitole 1.4.3 pro ohřev vody, ale nevíme o jaké velikosti a dále se tím nezabývám, protože to není tématem práce. Navíc Rowenův model není konstruován pro tento účel. Zde беру instalovaný výkon tohoto odběru $P_{i3} = 1000\text{kW}$ a soudobost jsem rozdělil podle časů pro zjednodušení jen na dva časové intervaly od 01:00 do 13:00 na $\beta_{2a} = 0,2$ a od 13:00 do 01:00 $\beta_{2b} = 0,65$
3. Je krizová infrastruktura vesnice. Zde může být třeba osvětlení nebo městský úřad v dané vesnici. Charakterizujeme jej jako druhý stupeň odběratele s instalovaným výkonem $P_{i3} = 40\text{kW}$ ve všechny časy a soudobostí $\beta_3 = 0,75$

	časový interval	Instalovaný výkon P_i [kW]	soudobost β [-]	Poznámka
Odběratel1	5:30-14:00	300	0,8	jen všední dny, 2. úroveň SZD
	14:00-5:30	10	1	
Odběratel2	1:00-13:00	1000	0,3	každý den, 3. úroveň SZD
	13:00-1:00	1000	0,65	
Odběratel3	-	40	0,75	celý den, 2. úroveň SZD

Tab. 3 tabulka pro zjednodušený přehled dat o odběratelích

Pro tyto odběratele a zdroj realizovaných podle Obr.2.1 budeme navrhovat regulaci v dalších podkapitolách.



Obr. 2.1. Ukázka možnosti realizace distribuční soustavy dané lokality [studentská verze Autocad]

2.1.3 Úpravy pro možnost provozu ostrovního systému

Předpokládáme, že chceme danou lokalitu provozovat v ostrovním systému, proto musíme zajistit určité základní úpravy například realizovat buď automatiku odepínání odběrů, nebo mít vyškolenou obsluhu, která zajistí dané odepínání a připojování zátěží. Pokud také dojde k poruše ve vyšší úrovni, než je transformátor v této vizualizaci musí dojít k odpojení toho transformátoru, aby nedocházelo k napájení jiných odběrů, než pro které je realizace připravena. Samozřejmě musí dojít k přechodu do otáčkové regulace.

2.2 Model pro optimální chování ostrovního provozu systému

2.2.1 Model

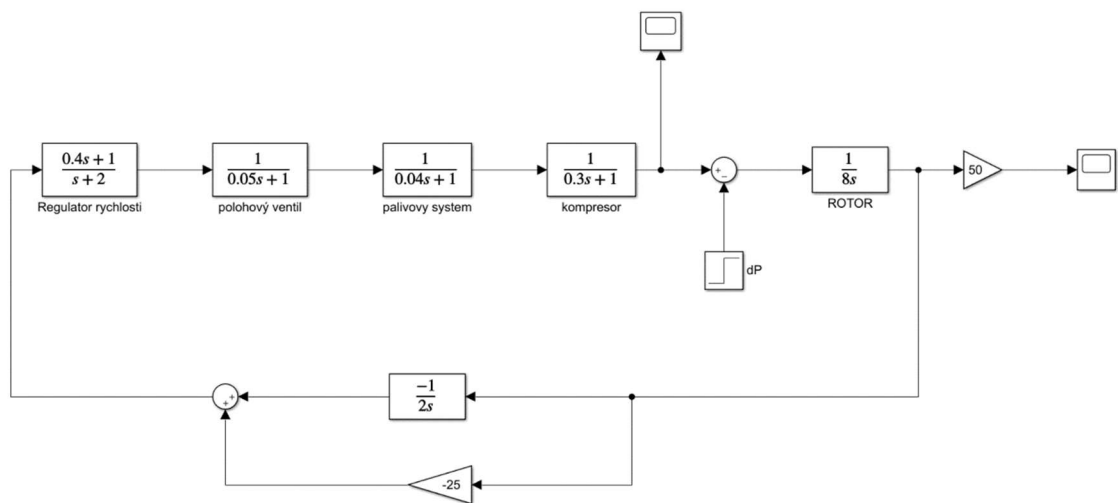
Pro modelování využívám program Matlab a jeho rozšíření Simulink, simuluji GT, o které byla zmínka v podkapitole 2.1.1. Dále využívám Rowenův model popsany již v podkapitole 1.5. Budu však modelovat jen zjednodušenou verzi o jedné zpětnovazební smyčce, a to regulaci rychlosti.

Nejprve je důležité zmínit, co vlastně regulujeme a proč. Jde nám v podstatě o zjištění reakce GT při otáčkové regulaci na změnu požadovaného výkonu a zjednodušeně řečeno, jak se s tím tato GT vyrovná v rámci kontroly odchylky frekvence od jmenovité v čase tedy:

$$\Delta f = f(t) \quad (4)$$

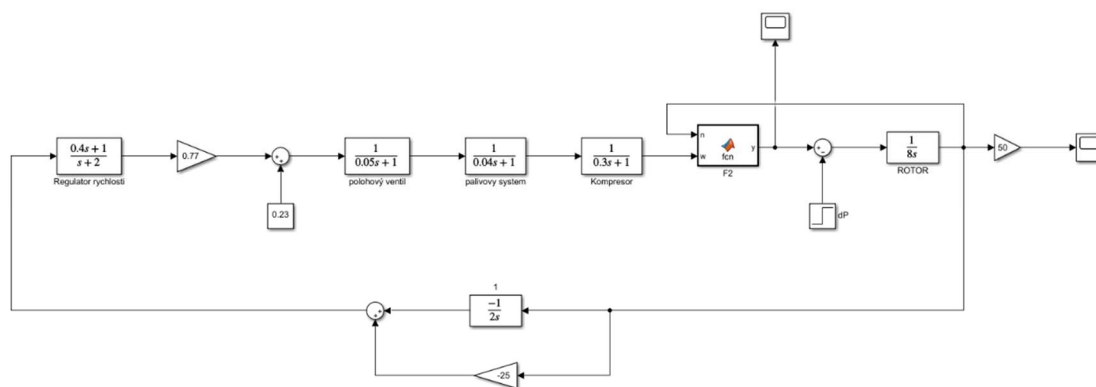
Přesto, že mám namodelované funkční oba typy tedy Small i Large signal model budu převážně používat jen výsledky ze Small signal modelu. Ukázalo se totiž, že při takovéto regulaci jsou výsledky z obou téměř totožné, což je pravděpodobně způsobné zanedbatelným zpětným vliv odchylky rychlosti rotoru (Δf) na samotnou regulaci Large signal modelu. Tato zpětný vliv je totiž způsoben funkcí f_2 viz rovnice (3).

Členy jako polohový ventil, palivový systém, kompresor a rotor jsou prvky reprezentující prvky turbosoustrojí a jejich reakce na změnu požadovaného výkonu. (Viz. Obr 2.2)



Obr. 2.2 Mnou modelovaný Rowenův small signal model již s hodnotami pro regulaci

U Large signal modelu nám do obvodu přibývá hlavně funkce f_2 (viz (3)) a násobení 0,77 s přičítání 0,23, což reprezentuje maximální možnou regulaci do 77 % a zbylých 23 % jako nutně neregulovatelnou část.

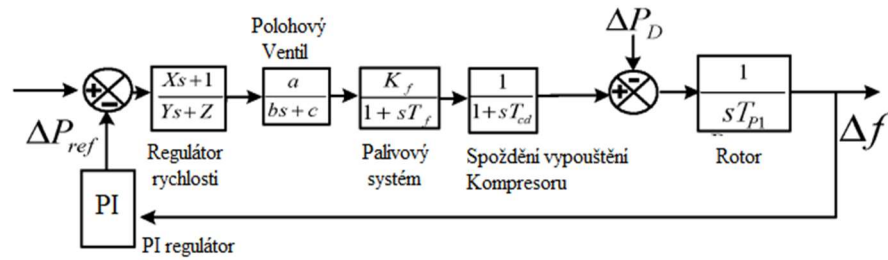


Obr. 2.3 Mnou modelovaný Rowenův large signal model s hodnotami pro regulaci

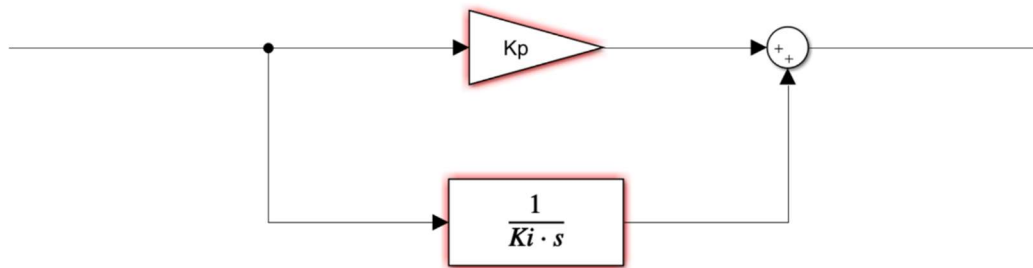
Vzhledem k tomu, že nemáme dostupná data o jednotlivých prvcích regulačního schématu a nemáme je ani možnost změřit pro daný zdroj, hodnoty tedy vhodně zvolíme na základě předpokladů a jiných simulací podobně velkých zdrojů. Hodnoty pro turbínu jsou inspirované především ze zdroje [16] pro regulátor a generátor, dále pak hodnotami především z regulační knihovny k síťovému simulátoru MODES od doc. Másla. Pro samotnou realizaci jsem použil zjednodušený Rowenův Small signal model, který jsme upravili ze zdroje [12] (viz Obr. 2.2). a dále PI regulátor (viz Obr. 2.3). Samotné hodnoty pro regulaci jsou uvedeny v Tab. 4

značka	hodnota	význam
X	0,4	Konstanty regulátoru rychlosti
Y	1	
Z	2	
a	1	Konstanty polohového ventilu
b	0,05	
c	1	
Kf	1	konstantní zisk palivového systému
Tf	0,04	časová konstanta palivového systému
Tcd	0,3	časová konstanta vypouštění kompresoru
Tp1	8	časová konstanta rotoru
Kp	25	Konstanta regulátoru
Ti	2	

Tab. 4 Hodnoty pro regulaci inspirováno z [16]



Obr. 2.4 Upravený Rowenův small signal model [12]



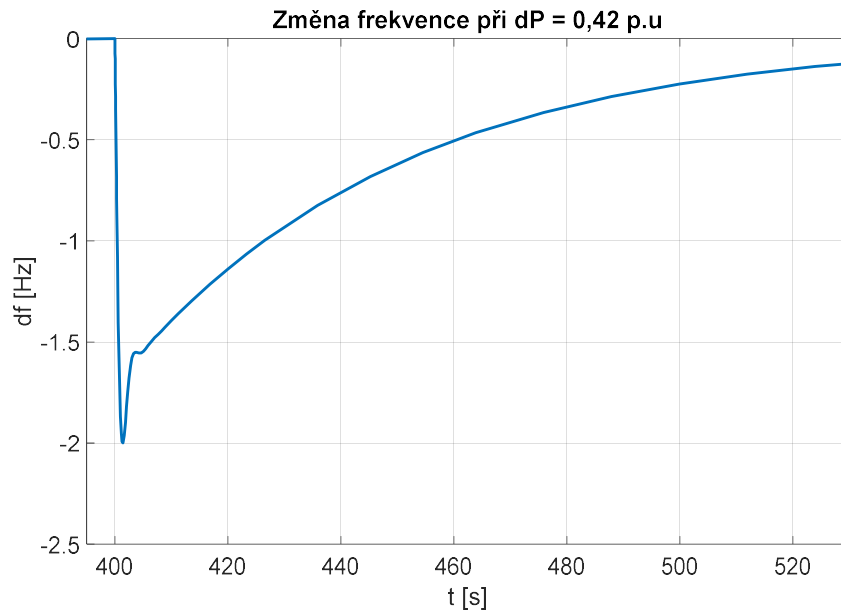
Obr. 2.5 PI regulátor pro Rowenův model

2.3 Vlastní simulace daného ostrovního systému

Pro vlastní simulaci jsem si vybral následujících sedm stavů. Jistě by se dala vymyslet daleko větší škála různých stavů, avšak bylo by to více méně jen lehké upravování hodnot v rámci lehké změny vizualizace. Ale výsledná logika by zůstala stejná. Těchto sedm stavů jsem popsal v následujících podkapitolách. Přechod do OP je v simulacích realizován v čase 400 sekund z důvodu ustálení regulace stroje po rozběhu.

2.3.1 Nelezení vhodného nastavení turbíny před přechodem do OP

Touto podkapitolou se snažím najít ideální nastavení výkonu GT před potenciálním přepnutím do ostrovního provozu. Toto hodnotu se pokusím určit podle maximální změny výkonu tak, aby Δf bylo do hodnoty 2 Hz i přesto, že bychom pravděpodobně mohli považovat až do 2,5 Hz (podle tab. 1.) Hodnota pro GT není přesně v tabulce definována. Z toho důvodu jsem použil hodnotu pro paro-plynné turbíny. Ty se samozřejmě konstrukcí liší, ale přijde mi to jako rozumná hodnota i z hlediska podkapitoly 1.1.1.

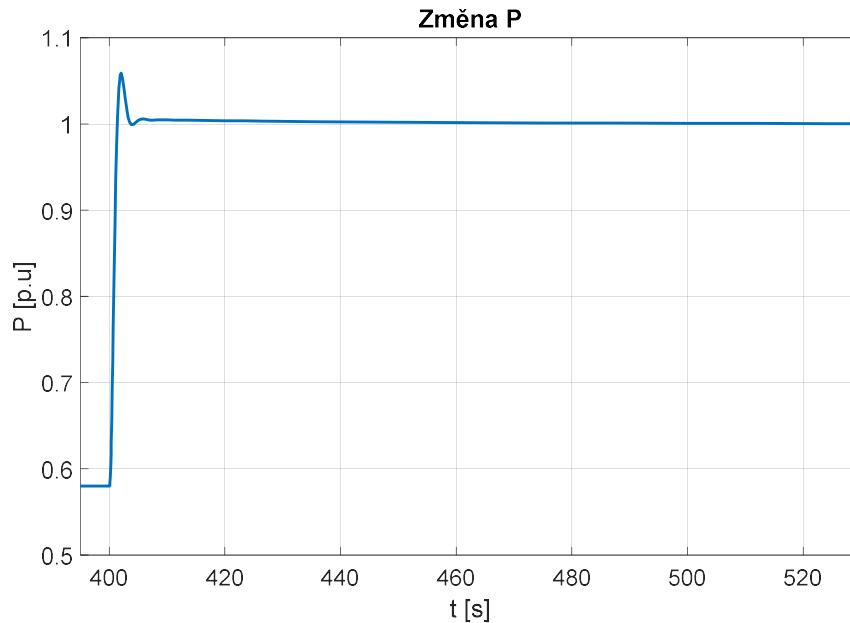


Obr. 2.6 Graf závislosti df na t pro nalezení optimální hodnoty dP

Z Obr. 2.6 je patrné, že maximální hodnota $dP = 0,42$ p.u, tedy z toho vypočítaná referenční hodnota výkonu zdroje před vstupem (P_{ideal}) do OP je:

$$P_{ideal} = (1 - dP) * P_j = (1 - 0,42) * 400 = 232kW \quad (5)$$

Tato hodnota je zajímavá především tím, že jsme z ní stále schopní doregulovat do P_j v případě výpadku. Zajímavostí této hodnoty je, že podle obr. 2.1 má GT stále účinnost okolo 40 % což poukazuje na to, že i při tomto výkonu není provoz GT pro provozovatele příliš nevýhodný a neprodlužuje se tedy návratnost.



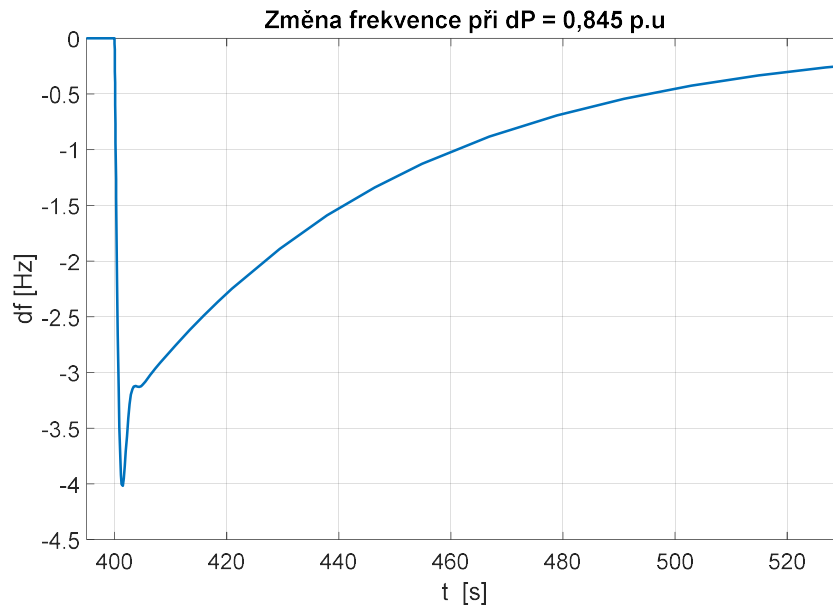
Obr. 2.7 Graf závislosti P na t pro nalezení optimální hodnoty dP

V grafu je viditelné přesažení jmenovité hodnoty výkonu. To však není v takto krátkodobé hodnotě a v úrovni přesažení problém. Tento graf pro další úspěšné přechody již vkládat nebudu z důvodu technické podobnosti.

2.3.2 Neúspěšný přechod do OP

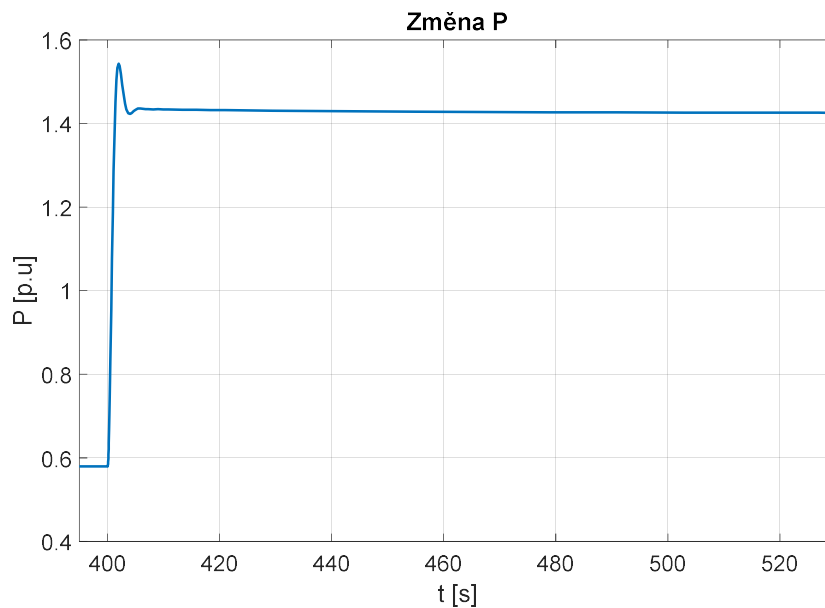
Další zajímavá situace nastane ve chvíli, kdy nedojde k úspěšnému přechodu do OP. Všeobecně v rámci našeho simulování se dá říct, že neúspěšný přechod nastává ve chvíli, kdy $df > |2|$ Hz. Ale pro kladnou hodnotu může dojít k připojení nějakého druhu umělého odběru.

Pro naše odběry k tomu může dojít například v pátek v 10:00. z hodnot viz. Tab. 4 si můžeme dopočítat, že hodnota pro požadovaného výkonu je 570kW. V tomto případě uvažujeme případ, kdy nedojde k automatickému odpojení odběrů. Jako startovní hodnotu výkonu vyráběného před poruchou bereme hodnotu P_{ideal} z podkapitoly 2.3.1.



Obr. 2.8 Graf závislosti df na t pro neúspěšný přechod do OP

Z Obr. 2.8 je patrné, že při takovémto přechodu přesáhneme hodnotu 2 Hz jednoduše a určitě by se zdroj odpojil. V lepším případě by spadl do režimu vlastní spotřeby. Naopak v tom horším by došlo k black-out tohoto zdroje a muselo by dojít ke startu za tmy.



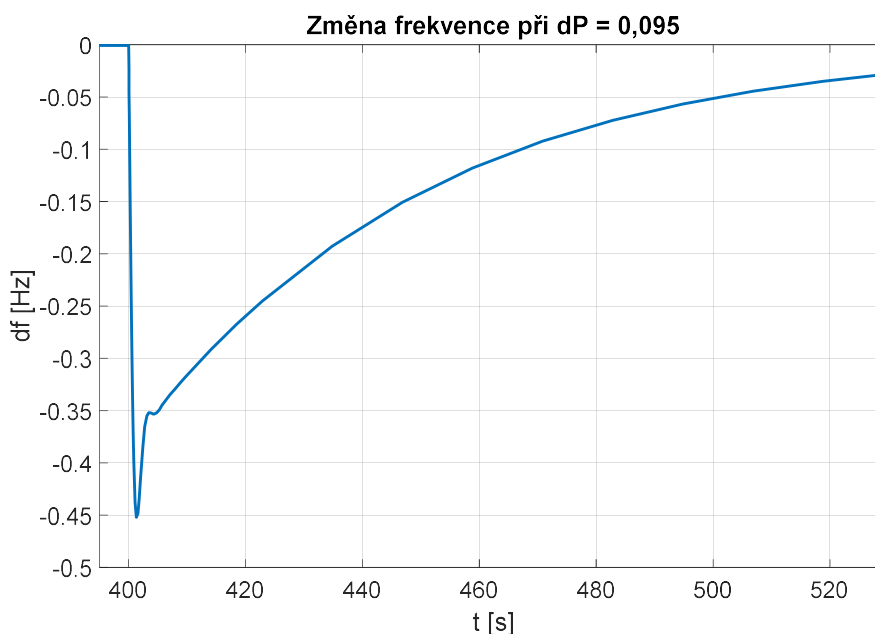
Obr. 2.9 Graf závislosti P na t pro neúspěšný přechod do OP

Z grafu na Obr. 2.9 je navíc vidět, že by došlo k dlouhodobému relativně velkému přetížení. Což je nepřijatelné a po nějaké době by došlo zaručeně k reakci ochran a k odpojení z toho důvodu. Dále také předpokládám, že pokud bych použil celý Rowenův model, regulační smyčka oteplení by nedovolila doregulovat tento stav.

V tomto případě by došlo k ekonomickým ztrátám a znemožnění provozu například Úřadu nebo by narušení provozu venkovního osvětlení. To se dá brát jako narušení bezpečnosti.

2.3.3 Úspěšný přechod do OP

V tomto případě simuluji velice podobný stav jako přechozí, s tím rozdílem, že v tomto případě dojde k automatickému odpojení odběru číslo 2. - vesnice. Tedy hodnota požadovaného výkonu odběru je 270kW.

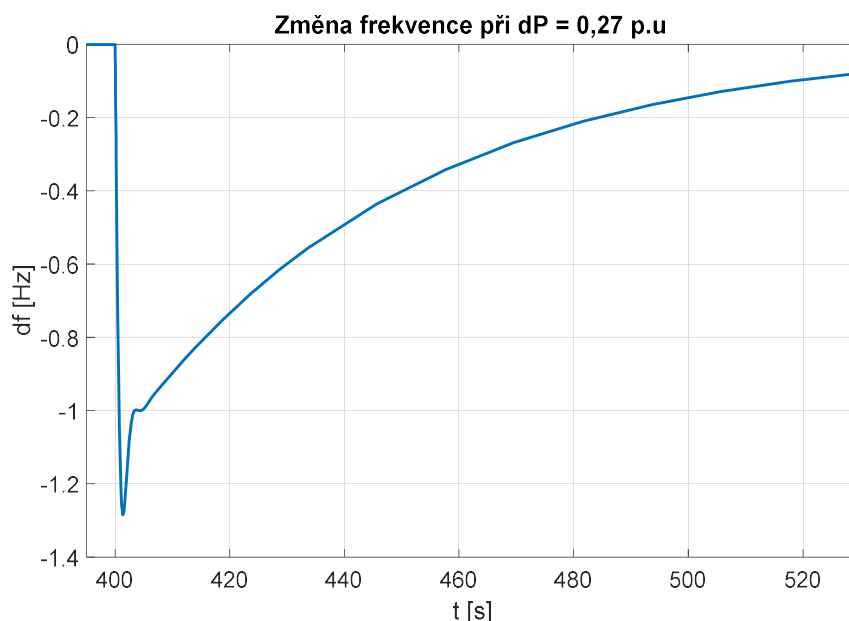


Obr. 2.10 Graf závislosti df na t pro úspěšný přechod do OP

Z grafu na Obr. 2.10 je vidět úspěšný přechod do OP. Sice nedošlo k pokrytí všech odběrů, ale alespoň nevznikly velké ekonomické ztráty v podniku a byl zajištěn provoz krizové infrastruktury. V rámci možností dané situace se tedy jedná určitě o pozitivní situaci.

2.3.4 Úspěšný přechod do OP s plným pokrytím odběrů

Další možností realizace je v jiném čase, a to například v sobotu v 10:00, kde je výkon odběrů 340kW. Opět budeme uvažovat výkon před poruchou P_{ideal}

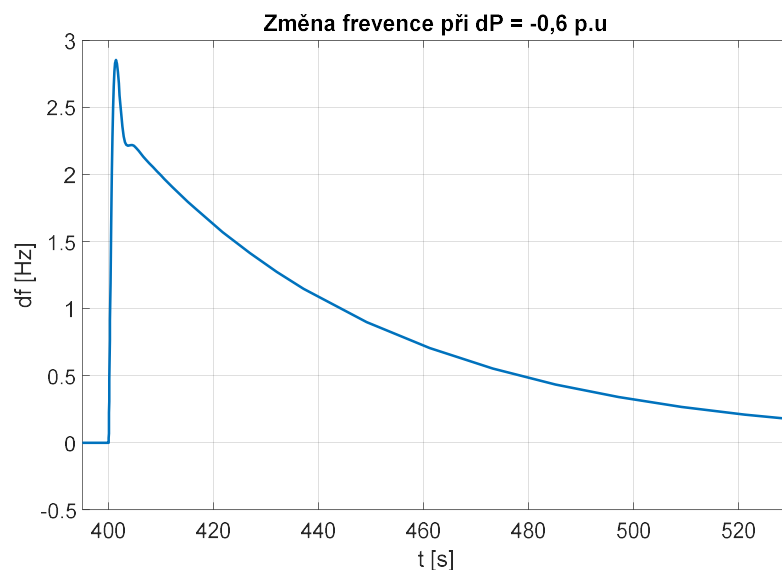


Obr. 2.11 Graf závislosti df na t pro úspěšný přechod do OP s pokrytím všech odběrů

Zde není graf nějak zvlášť zajímavý. Za zajímavé považuji to, že v této síti s OP systému může docházet k momentům, kdy zdroj zvládne bez problémů pokrýt všechny odběry, i přestože instalovaný výkon je více než 3krát větší výkon zdroje.

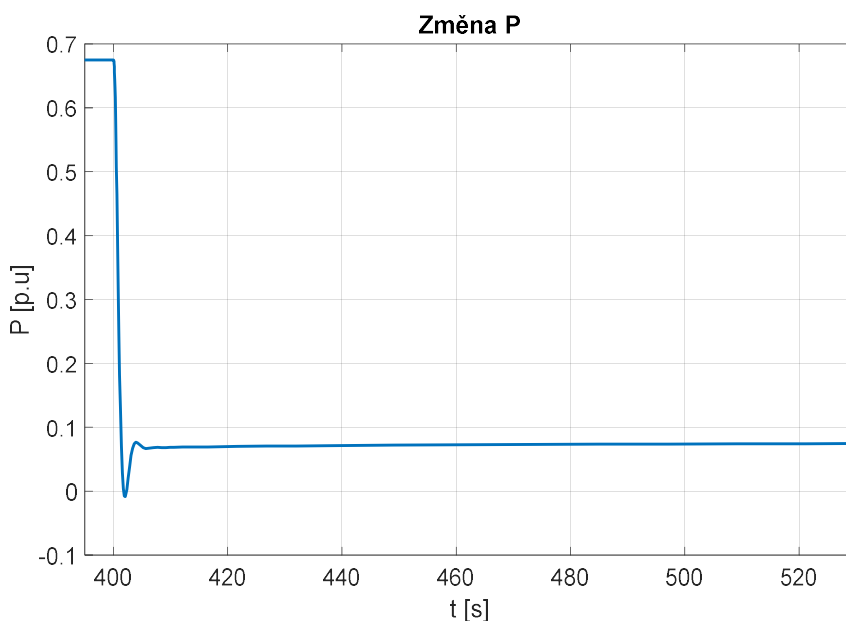
2.3.5 Odlehčení z důvodu další poruchy při OP

V této podkapitole uvažuji, že již došlo k přechodu do ostrovního systému a k jeho ustálení. Po nějaké době provozu došlo k další poruše na transformátoru k podniku, tedy náhlému odpojení odběru 1. Tento stav nastane po ustálení stavu z podkapitoly 2.3.3. Výchozí výkon je 270kW a dojde k odpojení odběru 1, tedy odpojení 240kW. Z výsledku simulace lze určit, zda to zdroj zvládne, nebo bude muset dojít k připojení umělého odběru.



Obr. 2.12 Graf závislosti df na t pro odpojení podniku poruchou během OP

Z grafu na Obr 2.12 jasně vyplývá, že je df větší než 2 Hz, GT nebude uregulována a je tedy nutné připojení umělé spotřeby pro udržení zdroje v předepsaných mezích frekvence. Určitě bude v zájmu provozovatele tuto umělou spotřebu postupně odpojit. Nejedná se však o tak zásadní problém jako v případě podkapitoly 2.3.2.

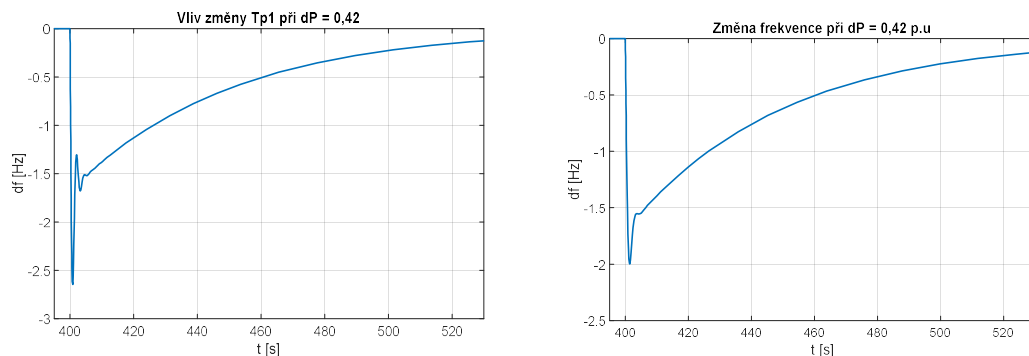


Obr. 2.13 Graf závislosti P na t pro poruchu během OP

2.3.6 Vliv změny T_{p1} na Přechod do OP

Dalším bodem, který se pokusím zhodnotit je vliv změny časové konstanty rotoru na přechod do OP. Budeme uvažovat naprosto stejný případ jako v podkapitole 2.3.1. Kde jsme zjistili ideální nastavení výkonu turbíny. Jedinou změnou tedy bude K_{p1} (časová konstanta

rotoru) kterou změním z 8 na hodnotu 4. A porovnáme s výsledky z již zmiňované podkapitoly.

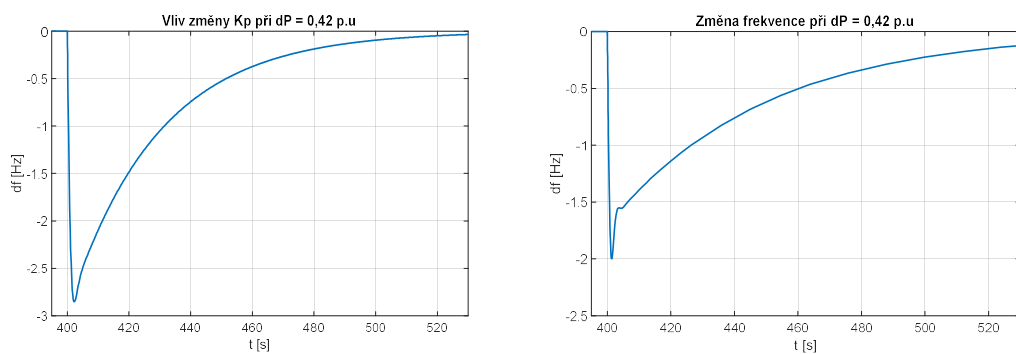


Obr. 2.14 Porovnání Vlivu změny T_{p1} na přechod do OP

Z Obr 2.14 je patrné, že změnou časové konstanty rotoru T_{p1} nastane méně stabilní přechod, který pro danou hodnotu dokonce spadne do oblasti reakce frekvenčních ochran. To tedy znamená neuregulovanou situaci.

2.3.7 Vliv změny K_p na Přechod do OP

Poslední mnou realizovanou simulací je porovnání reakce při změně K_p (proporční konstanty regulátoru). Používám opět nastavení z podkapitoly 2.3.7. Jediná změna je K_p z hodnoty 25 na 15.



Obr. 2.15 Porovnání Vlivu změny K_p na přechod do OP

Opět nás změna dostala do stavu, kdy reagují frekvenční ochrany a došlo by k selhání regulace. Zvláště zajímavá je změna průběhu a rychlosti regulace.

2.4 Hodnocení Rizik a přínosů v Ostrovním provozu (OP)

Výhody	Nevýhody
Nezávislost na centrálním řízení a dodávce energie z centralizovaných zdrojů a tím snížení ekonomických ztrát při výpadku či black-out	Drahé pořizovací náklady na vybavení a samotný provoz OP
Ušetření na nákladech rozsáhlé transformace a ztrátách na vedení	Snižování zkratového výkonu v důsledku snižování velkých synchronních točivých strojů a celkově snížením velikosti sítě
I přes nedostatečný výkon možnost provozu alespoň "krizové infrastruktury" oblasti	V distribuční soustavě převládají obnovitelné zdroje typu fotovoltaických elektráren, kterým chybí pevná mechanická vazba, ty musíme úměrně vybalancovat dobře regulovatelnými zdroji
Při black-out využití zdroje pro obnovu sítě	Obtížná regulace, která závisí na schopnostech zdroje a stavech sítě

Tab. 5 Hodnocení rizik a přínosů v OP

3 Závěr

3.1 Zhodnocení důležitých pojmů práce

OP je velice zajímavý pojem, který v současnou chvíli není úplně tématem dne vzhledem ke kvalitě většiny české sítě a jen velice ojedinělým a krátkodobým výpadkům v ní. Zajímavým se podle mě stává hlavně v hůře zásobovaných oblastech, kde dochází například vlivem přírodních jevů k častým poruchám dodávky a stojí za bližší zkoumání. Problémem je obtížnost samotné regulace a nákladů na vybavení pro její realizaci a provoz. Je určitě otázkou, jak výhodná je schopnost udržet síť i v době výpadku oproti ztrátám způsobeným jejím výpadkem. U tohoto posuzování vše záleží na zvolené lokalitě a určitě by to bylo zajímavým pojednáním jiné práce. Osobně považuji ostrovní systém za dobrý nápad, obzvláště pro tyto menší oblasti. Dále se mi hodně líbí v současné době často realizované inteligentní domy, které jsou samy schopny přejít do ostrova. To už se však bavíme o úplně jiných zdrojích, než je GT a podobné.

Všeobecně bych řekl, že i přes značné výhody OP (například není nutná rozsáhlá transformace) je nutné připustit, že jeho aplikace je určena spíše pro krizové situace a nikoliv pro běžný chod. Tvrdost sítě je nepopíratelnou výhodou současného nastavení propojení Evropy.

GT je pro mě velice zajímavý pojem v oblasti výroby elektrické energie a určitě má své velké uplatnění u podobně velikých zdrojů, jako ten použit v mé bakalářské práci. tedy mezi desítkami kilowatt až jednotkami megawatt. Bohužel pro nesériovou výrobu nejsou příliš rozšířené a více se používají spalovací pístové motory. Hlavně díky jejich ceně. Zajímavé je pak také využití kombinované plynové a parní turbíny. Z mého pohledu úplně největší výhodou GT je pak jejich velká účinnost, která je často zvýšená dodatečným využitím zbytkového tepla „odpadního“ vzduchu. A nesmíme zapomínat ani na relativně malý zastavěný prostor pro zdroj v hodnotách stovek kilowatt například. Na základě toho mám pocit, že v příští době můžeme očekávat přibývání podobných zdrojů v síti. A to nejen z důvodu jejich relativně dobré regulovatelnosti.

3.2 Zhodnocení aplikace vlastního řešení

Vlastní řešení považuji za poměrně úspěšné a pevně věřím tomu, že se mi povedlo naznačit v něm diskutovanou problematiku a zároveň i řešení jednotlivých stavů. Za nejvíce zajímavé považuji, že je tato turbína v použitém provedení simulace schopna realizovat změnu výkonu o 42 % při udržení stanoveného rozsahu frekvence tedy že $df < 2$ Hz, což poukazuje na opravdu dobrý typ zdroje řešení ostrovního provozu.

Cílem mých vzorových simulací bylo poukázat na možné stavy, které mohou v přechodu na OP nastat a přiblížit se tak skutečnému OP. Velkým rozdílem mezi skutečností a mými simulacemi však zůstává, že ve skutečné síti se mění požadovaný výkon neustálými skoky, a tedy dochází k jejich neustálé regulaci.

Po shrnutí výsledků musím konstatovat, že realizace OP pro mnou definovanou lokalitu je realizovatelné a dostupné. A to hlavně díky dobrému zdroji a vhodně nadefinované lokalitě.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] HAVLÍČEK, Karel. *Řízení, regulace a měření elektrizačních soustav*. 1. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1984.
- [2] MÁŠLO, Karel. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013.
- [3] MAJLING, Eduard. *Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny (ENTSO-E)* [online]. 25. červenec 2015, 17:10 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/evropska-sit-provozovatelu-prenosovych-soustav-elektriny-entso-e>
- [4] MUŽÍK, Václav. *Optimalizace výroby a spotřeby elektrické energie v režimu ostrovního provozu*. Plzeň, 2019. Disertační Práce. Západočeská Univerzita v Plzni.
- [5] BUKÁČEK, Miroslav. *SPALOVACÍ TURBÍNY* [online]. Brno, 2014 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86959. Bakalářská Práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. JIŘÍ POSPÍŠIL, Ph.D.
- [6] Wikipedia contributors. Gas turbine. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2020 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Gas_turbine
- [7] DULAU, Mircea a Dorin BICA. Simulation of Speed Steam Turbine Control System. *Procedia Technology* [online]. 2014, **1016**(2013.12.554), 1-8 [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/275536111_Simulation_of_Speed_Steam_Turbine_Control_System
- [8] MUŽÍK, Václav. *PROPOJENÍ ELEKTROENERGETICKÝCH ZDROJŮ V PLZNI – OSTROVNÍ PROVOZ* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/14922/1/DP_MUZIK_2014.pdf#page=19&zoom=100,176,713. Diplomová Práce. Západočeská Univerzita v Plzni.
- [9] YEE, Soon Kiat, Jovica V. MILANOVIC a F. Michael HUGHES. Overview and Comparative Analysis of Gas Turbine Models for System Stability Studies. *IEEE Transactions on Power Systems* [online]. 2008, **23**(1), 108-118 [cit. 2020-06-14]. DOI: 10.1109/TPWRS.2007.907384. ISSN 0885-8950. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4374139/>
- [10] TRTÍK, Jan. *Uvádění do provozu plynové spalovací turbíny* [online]. Brno, 2012 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=51749#page=16&zoom=100,98,401. Diplomová Práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [11] CEPS, a.s. kodex-ps-cast-v-18.pdf.[Online]. Available: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>
- [12] S. Selva Kumar, R. Joseph Xavier and S. Balamurugan, "Small signal modelling of gas turbine plant for load frequency control," 2016 Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE), Bangalore, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESTSE.2016.7516506.
- [13] VOŇKA, Jakub. *Hodnocení možnosti ostrovních provozů v České republice*. V Plzni, 2019. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Václav Mužík.
- [14] BURDEK, Zdeněk. *Blackout a ostrovní provoz*. *Tzb-info* [online]. Děčín: ČEZ Distribuce, 2019 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/19683-blackout-a-ostrovní-provozy>
- [15] KUNDUR, Prabha. *Power system stability and control*. 1. New York: Electric Power Research Institute, 1994. ISBN 0-07-035958-X.
- [16] GUDA, S. R., C. WANG a M. H. NEHRIR. Modeling of Microturbine Power Generation Systems. *Electric Power Components and Systems* [online]. 2006, **34**(9), 1027-1041 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1080/15325000600596767. ISSN 1532-5008. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15325000600596767>
- [17] PILAVACHI, P.A. Power generation with gas turbine systems and combined heat and power. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2000, **20**(15-16), 1421-1429 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1016/S1359-4311(00)00016-8. ISSN 13594311. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431100000168>

Přílohy

Příloha 1:



Aurelia A400

The most efficient small gas turbine in the world. The Aurelia A400 provides 400 kW_e with an electrical efficiency greater than 40%. The turbine is a twin-spool, intercooled and recuperated (IRG2) gas turbine. The turbine is of modular construction and is designed to utilise a wide range of fuels, from standard liquid and gaseous fuels to biogas, biodiesel, flare gasses and even synthetic and recovered gases.



Illustrated image

Product features and benefits

- Modular design
- Active magnetic bearings
- Single-can combustion chamber
- Remote monitoring
- High speed power generation
- Highest electrical efficiency in class
- Worldwide service network
- No lubricants, no friction, no wear
- Low emissions
- Zero vibration
- Indoor and outdoor installations
- Minimal maintenance and down-time
- Integrated inlet air filters

The most efficient small gas turbines in the world

www.aureliaturbines.com



Electrical performance & network

Electrical efficiency LHV	40,2 %
Electrical output to net	400 kW _e
Output voltage	362...440 V
Output frequency	48...63 Hz
Maximum output current at 400VAC	597 A
Electrical connection	3 phases, 4 wires
Grid code	NC RfG, others on request
EMC level	IEC 61800-3 for IT networks

Exhaust characteristic

NO _x emissions at 15% O ₂	<15 ppm / V
CO emissions at 15% O ₂	<15 ppm / V
Exhaust gas flow at full power	2,2 kg/s
Exhaust gas temperature at full power	185 °C
Exhaust energy at full power	1.188 MJ/h
Heat recovery from intercooler	278 kW
Heat recovery from exhaust gas	240 kW
Exhaust gas O ₂ level	17,5 %

Dimensions, weight & clearances

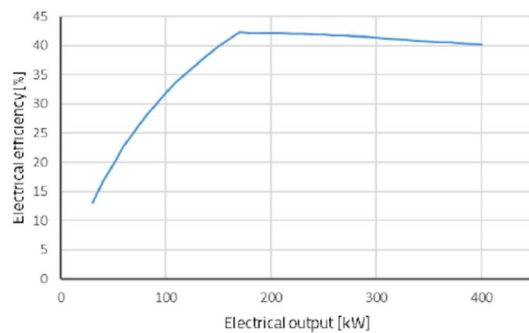
Enclosure protection	IP 34
Dimensions (WxHxL)	3,000 x 3,300 x 9,700 mm
Weight	25,000 kg
Clearances/service area	
Left / right	3.000 mm
Front	1.500 mm
Rear	1.500 mm
Above	1.500 mm

Temperature limitations

Cooling air relative humidity	RH 0...95%	Non-condensing, Non-corrosive
Operating temperature	-20...40 °C	Below 0 °C cold weather starting procedure
Storage temperature	-10...50 °C	

Permitted chemical vapours according to IEC 60721-3-2.

Partial load efficiency



Fuels

Due to the modular design the combustion chamber is easily adjustable to meet the requirements of different fuels. Turbine is designed to use all standard liquid and gaseous fuels and gives options for non-standard fuels.

Fuel flow LHV	3,582 MJ/h
Maximum allowed H ₂ S content	< 5.000 ppm
Net heat rate LHV	8,955 kJ/kWh
Gaseous fuel inlet pressure min/max	700...800 kPa(g)
Liquid fuel inlet pressure min/max	0... +50 kPa(g)

Acoustic emissions

Acoustic emissions at nominal power less than 75 dB(A) @ 10 meters from the turbine.

Directives & Certifications

The turbine has been designed according to following standards:

- Machinery directive [MD] 2006/42/EC, 2009/127/EC
- Low voltage directive [LVD] 2006/95/EC
- Electromagnetic compatibility [EMC] 2004/108/EC
- Noise directive 2000/14/EC