



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

SPOLUPRÁCE ELEKTRÁRENSKÝCH BLOKŮ - OPTIMALIZACE PROVOZNÍCH PARAMETRŮ

POWER PLANT UNITS COOPERATION - OPTIMIZATION OF OPERATING PARAMETERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Hromádka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

BRNO 2016

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Martin Hromádka

ID: 164290

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Spolupráce elektrárenských bloků - optimalizace provozních parametrů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište a zpracujte principy výroby a rozvodu elektrické energie pro různé energetické zdroje.
2. Provedte podrobný rozbor technologického schématu tepelné elektrárny a specifikujte možnosti zvyšování účinnosti výrobních bloků.
3. Na základě platných legislativních předpisů proveďte výpočet pro spolupracující energetické zdroje - sestavte matematický model takového systému.
4. Energeticko-ekonomické vyhodnocení navrženého technického řešení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 24.5.2016

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

HROMÁDKA, M. Spolupráce elektrárenských bloků - optimalizace provozních parametrů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 41 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D..

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Petru Mastnému, Ph.D. za jeho rady, vstřícnost při konzultacích a čas, který mi věnoval při řešení dané problematiky.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



Bakalářská práce

Spolupráce elektrárenských bloků – optimalizace výrobních parametrů

Martin Hromádka

vedoucí: doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2016

Brno



Bachelor's Thesis

Power plant units cooperation – optimization of operating parameters

by

Martin Hromadka

Supervisor: doc. Ing. Petr Mastny, Ph.D.

Brno University of Technology, 2016

Brno

ABSTRAKT

Práce má za cíl popsat princip fungování tepelné kondenzační elektrárny, popsat problematiku týkající se zvyšování účinnosti výrobních bloků a sestavit matematický model paralelně spolupracujících bloků. V práci je rovněž vysvětlena základní problematika rozvodu elektrické energie a fungování elektrizační soustavy České republiky.

V práci jsou provedeny výpočty dvou paralelně spolupracujících bloků pro případ, kdy optimalizované výkony nevybočují z regulačních rozsahů, ale také pro případ, kdy vybočují. Jako součást práce byl zhotoven matematický model, který na základě zadaného výkonového požadavku v síti optimalizuje výkony mezi tři paralelně spolupracující bloky tak, aby byly celkové náklady na provoz co nejmenší. V modelu je rovněž možno provést kompletní výpočet měrných spotřeb a tepelných účinností na základě libovolně zadaných parametrů, a to pro pět různě technologicky vybavených bloků.

KLÍČOVÁ SLOVA: tepelná elektrárna; spolupráce elektrárenských bloků; tepelná účinnost; zvyšování tepelné účinnosti; regenerační ohřev; přehřívání páry; paralelní chod; matematický model; elektrárenský blok

ABSTRACT

This bachelor's thesis aims to describe the principle of operation of thermal power plant as well as to describe the issues related to increasing the efficiency of production units. Another task was to create a mathematical model of cooperation of power plant units. The thesis also deals with the fundamental issues of power distribution as well as deals with the functioning of the electricity system in Czech republic.

In this thesis there are also calculated two sample examples of two parallel cooperated units. In the first example, the optimized electric power is not outside of the control range but in the second, the optimized electric power is outside of the range. So there are two types of the calculations. As a part of the thesis there was made a mathematical model. The mathematical model based on the specified demand load in the network optimizes the eclectic power of three cooperating parallel units. This should lead to the fact that the operating costs will be minimized. In the model there is also a complete calculation of specific consumption and thermal efficiency. The reader of the thesis is able to do these calculations in five possible options.

KEY WORDS:

thermal power plant; power plant units cooperation; thermal efficiency; increasing of the thermal efficiency; feedwater heater; reheating steam; parallel operation; mathematical model; power plant unit

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
1 ÚVOD.....	13
2 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA.....	14
2.1 ELEKTRICKÁ SÍŤ	14
2.2 PŘENOSOVÁ SOUSTAVA.....	15
2.3 DISTRIBUČNÍ SÍŤ	16
2.4 KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE	16
3 KONDENZAČNÍ TEPELNÉ ELEKTRÁRNY	17
3.1 PŘEHLED VÝROBEN ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	17
3.2 PRINCIP FUNGOVÁNÍ KONDENZAČNÍ TEPELNÉ ELEKTRÁRNY	18
3.3 HLAVNÍ VÝPOČTY TÝKAJÍCÍ SE KONDENZAČNÍ ELEKTRÁRNY	19
3.4 ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI PARNÍHO OBĚHU	22
3.4.1 SNÍŽENÍ TLAKU KONDENZÁTORU	22
3.4.2 ZVYŠOVÁNÍ PARAMETRŮ ADMISNÍ PÁRY	24
3.4.3 PŘIHRÍVÁNÍ PÁRY	24
3.4.4 REGENERAČNÍ OHŘEV NAPÁJECÍ VODY	26
4 PARALELNÍ SPOLUPRÁCE ELEKTRÁRENSKÝCH BLOKŮ.....	29
4.1 PODPŮRNÉ SLUŽBY (PPS).....	30
4.1.1 PRIMÁRNÍ REGULACE FREKVENCE BLOKU (PR)	31
4.1.2 SEKUNDÁRNÍ REGULACE VÝKONU BLOKU (SR)	31
4.1.3 MINUTOVÁ ZÁLOHA (MZ _T) (T = 5, 15, 30 MINUT).....	31
4.1.4 SNÍŽENÍ VÝKONU (SV ₃₀).....	32
4.1.5 SEKUNDÁRNÍ REGULACE U/Q (SRUQ)	32
4.1.6 SCHOPNOST OSTROVNÍHO PROVOZU (OP).....	32
4.1.7 SCHOPNOST STARTU ZE TMY (BS)	32
4.2 HOSPODÁŘSKY VÝHODNÉ ROZDĚLENÍ VÝKONŮ PARALELNĚ PRACUJÍCÍCH BLOKŮ V ES	32
4.2.1 PŘÍKLAD OPTIMÁLNÍHO ROZDĚLENÍ VÝKONŮ MEZI DVA PARALELNĚ SPOLUPRACUJÍCÍ BLOKY (VÝKONY NEVYBOČUJÍ Z REGULAČNÍCH ROZSAHŮ BLOKŮ)	36
4.2.2 PŘÍKLAD OPTIMÁLNÍHO ROZDĚLENÍ VÝKONŮ PŘI DVOU PARALELNĚ PRACUJÍCÍCH BLOCÍCH (VÝKON NĚKTERÉHO Z BLOKŮ JE MIMO REGULAČNÍ ROZSAH)	37
5 ENERGETICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ NAVRŽENÉHO TECHNICKÉHO ŘEŠENÍ.....	38
5.1 MATEMATICKÝ MODEL	38
5.2 VYHODNOCENÍ NAVRŽENÉHO TECHNICKÉHO ŘEŠENÍ	38
ZÁVĚR.....	39
POUŽITÁ LITERATURA	40

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2.1: Uspořádání elektrizační soustavy</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2.2: Druhy rozvodů.....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2.3: Distribuční oblasti.....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 3.1: Vývoj používaných zdrojů pro výrobu elektrické energie v EU.....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 3.2: Schéma Rankin-Clausiova parního oběhu.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 3.3: i-s diagram Rankin-Clausiova parního oběhu.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3.4: Průtočné a oběhové (cirkulační) chlazení</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3.5: Teploty a tlak v kondenzátoru při různých typech chlazení.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3.6: T-s diagram znázorňující přehřívání páry, schéma s mezipřehříváním</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3.7: Běžné uspořádání regeneračního systému.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3.8: Principiální schéma zapojení regeneračního ohřevu napájecí vody</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 4.2: Dispečink společností ČEPS, a. s.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 4.3: Spotřební charakteristika bloku</i>	<i>33</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

BS	schopnost startu ze tmy	
ES	elektrizační soustava	
EU	Evropská unie	
f	frekvence	[Hz]
f_n	zadaná frekvence	[Hz]
G	generátor	
h_t	tepelný spád turbíny	[J·kg ⁻¹]
CHČ	chladicí čerpadlo	
i	entalpie	[J·kg ⁻¹]
i_1	entalpie odebrané páry z vysokotlaké části turbíny	[J·kg ⁻¹]
i_1'	entalpie kondenzátu za vysokotlakým ohřívákem	[J·kg ⁻¹]
i_2	entalpie odebrané páry ze středotlaké části turbíny	[J·kg ⁻¹]
i_3	entalpie odebrané páry z nízkotlaké části turbíny	[J·kg ⁻¹]
i_a	entalpie admisní páry	[J·kg ⁻¹]
i_k	entalpie výstupní páry z turbíny	[J·kg ⁻¹]
i_k'	entalpie zkondenzované vody	[J·kg ⁻¹]
i_{kad}	entalpie na výstupu z turbíny při adiabatické expanzi	[J·kg ⁻¹]
k	konstanta	
K	kotel	
KO	kondenzátor	
KVET	kombinovaná výroba elektřiny a tepla	
M	množství teplonosné látky	[t/h]
M_1	množství odebrané páry z vysokotlaké části turbíny	[t/h]
M_2	množství odebrané páry ze středotlaké části turbíny	[t/h]
M_3	množství odebrané páry z nízkotlaké části turbíny	[t/h]
m_{sp}	měrná spotřeba páry v turbíně	[t/Wh]
M_u	spotřeba paliva za hodinu	[t/h]
MZ_t	minutová záloha	
N_i	náklady i-tého bloku	[Kč/h]
NČ	napájecí čerpadlo	
NN	napájecí nádrž	

NN	nízké napětí	
NT	nízkotlaká turbína	
NTO	nízkotlaký ohřívák	
O	odplyňovač	
OP	schopnost ostrovního provozu	
OV	ohřívák vody	
OZE	obnovitelné zdroje energie	
p_a	tlak admisní páry	[Pa]
P_e	výkon na svorkách generátoru	[W]
p_k	kondenzační tlak	[W]
p_{mp}	mezipřihřívací tlak	[Pa]
P_n	nominální výkon bloku	[W]
PpS	podpůrné služby	
PR	primární regulace frekvence bloku	
Př	přehřívák	
PVE	přečerpávací vodní elektrárna	
Q	jalový výkon	[VAr]
q_1	přivedené teplo	[J/kg]
q_2	odvedené teplo	[J/kg]
q_e	měrná spotřeba tepla na výrobu elektrické energie	[J/Wh]
Q_k	tepelný výkon kotle	[J/h]
Q_{kp}	tepelný příkon kotle	[J/h]
Q_n	výhřevnost paliva	[J/kg]
Q_{pal}	výhřevnost paliva	[J/kg]
Q_t	spotřeba tepla v turbíně	[J/h]
q_t	měrná spotřeba tepla v turbíně	[J/Wh]
RZMZ ₁₅	minutová regulační záloha dosažitelná do 15 minut	
RZMZ ₃₀	minutová regulační záloha dosažitelná do 30 minut	
RZMZ ₅	minutová regulační záloha dosažitelná do 5 minut	
RZMZ _{t-}	záporná minutová regulační záloha	
RZMZ _{t+}	kladná minutová regulační záloha	
RZSR	regulační záloha (primární regulace)	
s	entropie	[J/K]
SR	sekundární regulace výkonu bloku	

SRUQ	sekundární regulace U/Q	
STO	směšovací ohříváč	
SV ₃₀	snížení výkonu	
t	čas	[s]
T	termodynamická teplota	[K]
T	turbína	
t_a	teplota admisní páry	[°C]
t_{vt}	teplota mokrého teploměru	[°C]
U	napětí	[V]
VN	vysoké napětí	
VT	vysokotlaká turbína	
VTO	vysokotlaký ohřívák	
VVN	velmi vysoké napětí	
x	suchost páry	
ZVN	zvlášť vysoké napětí	
δ	statika primární regulace	
Δf	odchylka od frekvence	[Hz]
Δh	rozdíl entalpií za přehřívákem a před ním	[J/kg]
$\Delta i'$	přírůstek energie	[J/kg]
ΔP	požadovaná změna výkonu bloku	[W]
Δq_{reg}	energie potřebná na ohřátí napájecí vody na danou teplotu	[J]
Δt_m	minimální teplotový spád	[K]
$\eta_{E, tep}$	celková tepelná účinnost elektrárny (bloku)	[-]
η_g	účinnost generátoru	[-]
η_k	účinnost kotle	[-]
η_m	mechanická účinnost	[-]
η_p	účinnost potrubí	[-]
η_t	termická účinnost	[-]
η_{td}	termodynamická účinnost turbíny	[-]
η_{tv}	vnitřní termodynamická účinnost	[-]
η_{VTO}	účinnost povrchového ohříváku	[-]

1 ÚVOD

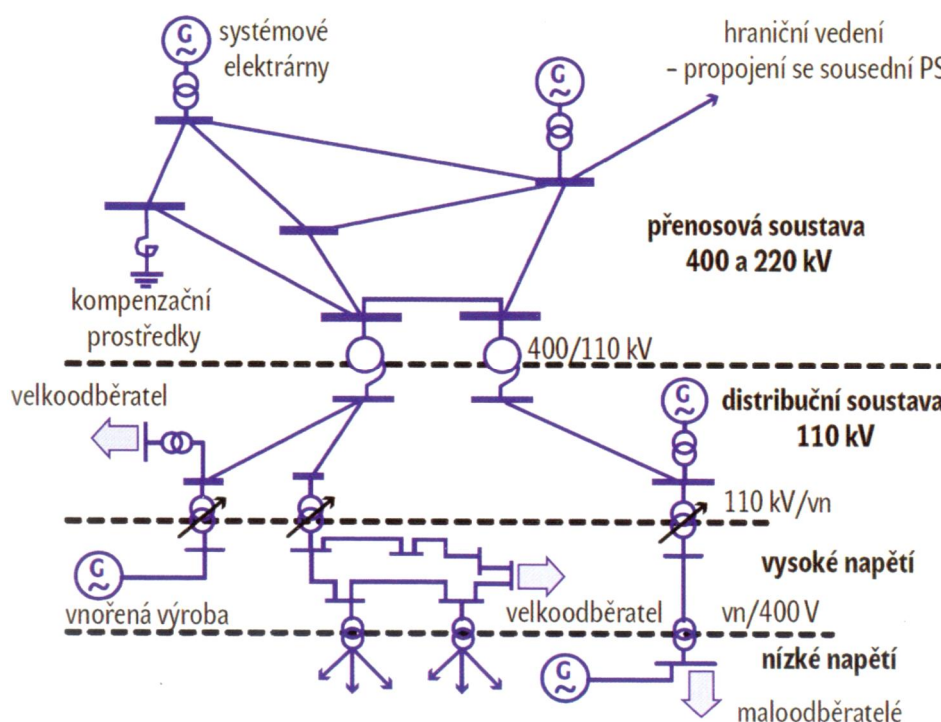
Bakalářská práce má za úkol seznámit čtenáře s fungováním elektrizační soustavy České republiky stejně tak jako s problematikou a funkcí přenosové a distribuční soustavy. Po přečtení práce by čtenář měl být rovněž schopen vysvětlit základní princip fungování kondenzačních tepelných elektráren a vypočítat optimalizaci paralelně spolupracujících bloků.

Práce se podrobně zabývá kondenzačními tepelnými elektrárnami. V kapitole o kondenzačních tepelných elektrárnách je podrobně vysvětlen jejich princip, na jehož základě vyrábějí tyto elektrárny elektrickou energii. Rovněž jsou zde vysvětleny hlavní způsoby, kterými lze zvyšovat účinnost tepelného oběhu, a tím pádem i celé elektrárny. Základní výpočty, pomocí kterých jsme schopni spočítat například spotřebu paliva, množství páry jdoucí na turbínu nebo také celkovou účinnost tepelné kondenzační elektrárny, jsou velmi důležitou součástí bakalářské práce, protože z těchto výpočtů se vycházelo pro sestavení matematického modelu. V práci je rozebrána problematika paralelní spolupráce elektrárenských bloků, výhody paralelního chodu, podmínky přifázování generátoru k síti a problematika podpůrných služeb.

Jedním z cílů v rámci kapitoly o paralelní spolupráci elektrárenských bloků je sestavit matematický model paralelního chodu bloků.

2 ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVA

Pod pojmem elektrizační soustava (ES) si můžeme představit všechno, co souvisí s výrobou elektrické energie, její distribucí, až po spotřebu. Jedná se o soubor společně pracujících zařízení pro přenos energie z výroby až do domácností. Do ES tedy můžeme zařadit paralelně pracující výroby elektrické energie se společnou zálohou výkonu, zařízení pro přenos elektrické energie, její transformaci, distribuci, ale také ochranné, zabezpečovací, informační a řídicí systémy. Hlavním úkolem ES je bezpečně a spolehlivě dodat požadované množství elektrické energie o dané kvalitě k odběratelům, a to s nejnižšími možnými náklady. Základní struktura ES je znázorněna na Obr. 2.1.



Obr. 2.1: Uspořádání elektrizační soustavy [1]

2.1 Elektrická síť

Pomocí elektrických sítí, složených ze vzájemně spojených elektrických vedení a elektrických stanic, dochází k přenosu a rozvodu elektrické energie. Elektrická síť má za úkol přenést elektřinu z výroby ke spotřebiteli.

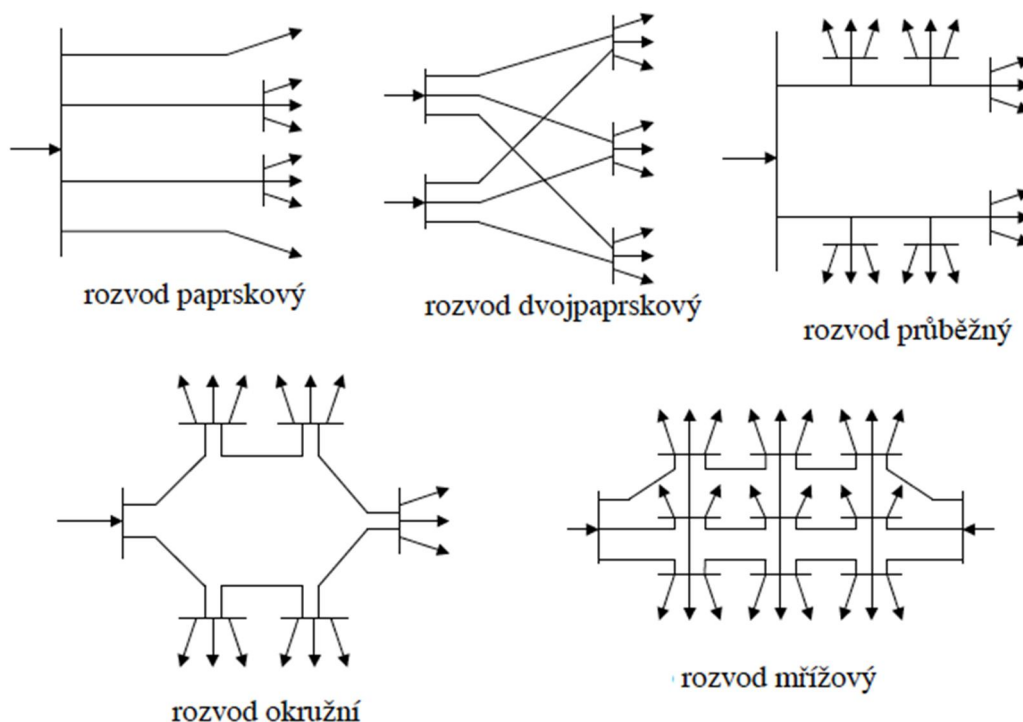
Elektrickou síť můžeme dělit podle účelu na:

- přenosové sítě
- distribuční sítě
- průmyslové sítě

Elektrické sítě jsou z hlediska uspořádání rozděleny na:

- otevřený rozvod
 - jedná se o vedení, které je napájeno pouze z jedné strany

- o patří sem paprskový a průběžný rozvod, které můžeme vidět na Obr. 2.2
- o není vhodný k napájení důležitých odběrů
- o u otevřených rozvodů může docházet ke značnému kolísání napětí na konci vedení
- uzavřený rozvod
 - o napájení odběru probíhá vždy ze dvou nebo více stran
 - o patří sem okružní síť a mřížová síť, které jsou k vidění na Obr. 2.2
 - o u těchto druhů rozvodů je větší bezpečnost dodávky elektřiny při poruše na vedení, a to právě díky napájení z více stran



Obr. 2.2: Druhy rozvodů [1]

2.2 Přenosová soustava

Přenosová (rozvodná) soustava je považována za páteř elektrizační soustavy a má za úkol udržovat toky elektřiny po celém území České republiky v neustálé rovnováze. Zároveň je spojena s elektrizačními soustavami sousedních států a reguluje elektřinu, která k nám proudí z ciziny nebo naopak proudí od nás do ciziny za účelem obchodu. Je to soustava, složená ze společně propojených vedení a zařízení zvláště vysokého napětí (ZVN) 400 kV, velmi vysokého napětí (VVN) 220 kV, ale také některých vedení a zařízení VVN 110 kV. V České republice spadá ke konci roku 2015 do přenosové soustavy asi 5419 km vedení o napětí 400 kV a 220 kV, 84 km o napěťové hladině 110 kV, dále také 41 rozvodů a 71 transformátorů. Řízení energetických soustav je obecně považováno za velice složitý proces a z toho důvodu se musí soustava neustále modernizovat a rozšiřovat. Při přenosu energie se dodržuje tzv. kritérium $n-1$, které říká, že když vypadne jeden prvek soustavy, tak nedochází k závažné poruše a nedochází tak k přetížení ostatních prvků rozvodné soustavy. V České republice řídí přenosovou soustavu společnost ČEPS, a.s.

2.3 Distribuční síť

V České republice je elektrická energie po transformaci z přenosové soustavy rozváděna ke spotřebitelům pomocí tzv. distribučních (rozvodových) soustav, které vlastní různé energetické společnosti. Česká republika má svoji distribuční soustavu rozdělenou na tři distribuční oblasti. Tyto oblasti vlastní společnosti ČEZ distribuce, a.s., E.ON distribuce, a.s. a PREdistribuce, a.s. Jaké postavení zaujímají na mapě České republiky můžeme vidět na Obr. 2.3.



Obr. 2.3: Distribuční oblasti [15]

Distribuční soustavy v České republice jsou vedeny na velmi vysoko napěťové hladině (VVN) 110 kV, na vysokonapěťové hladině (VN) 22 kV a 35 kV, ojediněle na VN 6 kV a 10 kV, a také na hladině nízkého napětí (NN) 230/400 V.

2.4 Kvalita elektrické energie

V České republice má každý odběratel právo na odběr elektrické energie o jasně stanovené kvalitě. Provozní parametry určující kvalitu elektrické energie jsou napětí U , frekvence f , stejně tak jako sinusový průběh napětí a symetrie třífázových napětí. Frekvence f je celosystémový parametr, který je ve všech místech elektrizační soustavy při ustáleném provozu ES stejný, kdežto napětí U je parametr místní, a proto má v odlišných místech ES různou velikost. S plynoucím časem dochází rovněž ke kolísání těchto parametrů, a proto je snahou výrobců a distributorů držet tyto parametry neustále na předepsaných úrovních.

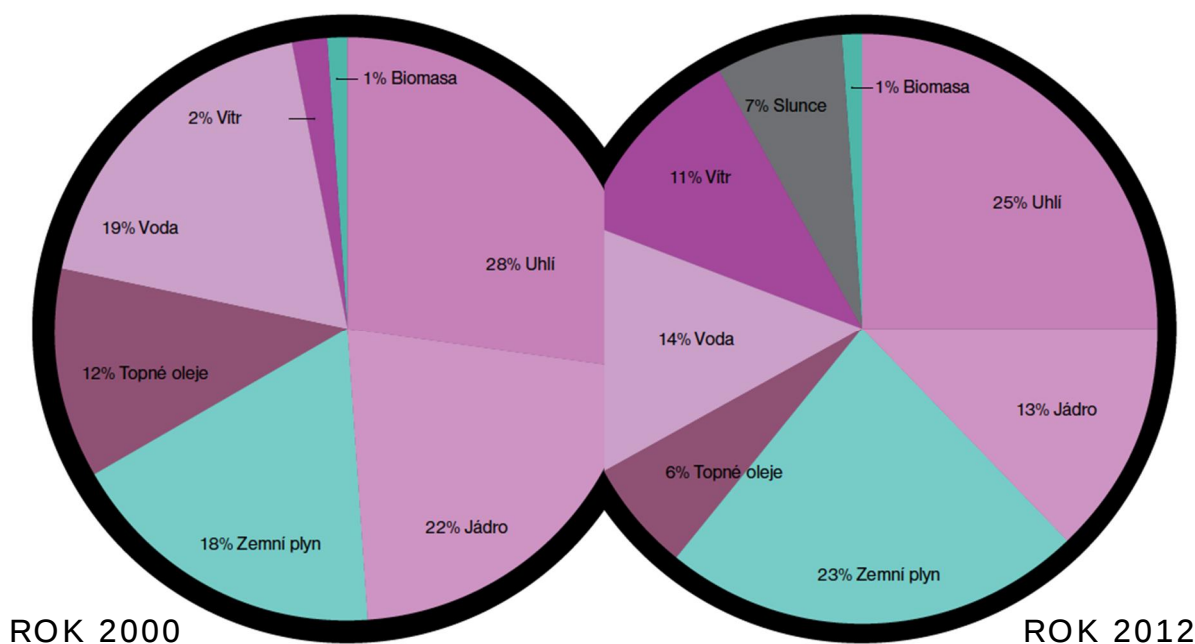
3 KONDENZAČNÍ TEPELNÉ ELEKTRÁRNY

3.1 Přehled výroben elektrické energie

Výrobní elektrické energie, tzv. elektrárna, je místo kde dochází k výrobě elektrické energie. Při tomto procesu dochází v závislosti na zdroji k přeměně primární energie na energii elektrickou. Můžeme tedy tvrdit, že elektřinu nevyrábíme přímo, ale dostáváme ji přeměnou z energií primárních zdrojů. Podle použitého primárního zdroje můžeme elektrárny dělit na:

- tepelné – dochází zde k výrobě tepelné energie tzv. chemickou exotermickou reakcí, tedy spalováním fosilních paliv, jako např. hnědého a černého uhlí, nafty nebo plynu, která se přemění pomocí technologického procesu elektrárny na energii elektrickou
- jaderné – tepelná energie, která se ve výrobně přeměňuje na elektrickou se získává řízenou jadernou reakcí, tzv. štěpením jader, což je zatím jediná bezpečně zvládnutá forma nukleárních reakcí
- vodní – ve vodních elektrárnách se k výrobě elektrické energie využívá polohová a pohybová energie vody
- elektrárny obnovitelných zdrojů energie (OZE) – elektřina se zde získává pomocí energie slunce, větru, ale také spalováním biomasy

Elektrická energie je jednoduchý produkt, vzniklý v jednom technologickém procesu. Nedá se naakumulovat, je neskladná, a tak platí, že elektřina, která se v daný okamžik vyrobí, musí být ihned také spotřebována. Elektrická energie je také stejnorodá, to znamená, že nezáleží na tom v jaké elektrárně byla energie vyrobena, protože všechny typy elektráren vyrobí na konci technologického procesu stejnou energii. Jak bylo výše uvedeno, v každé elektrárně je zapotřebí nejprve získat energii z nějakého primárního zdroje, a pak tuto energii s příslušnou účinností přeměnit v energii elektrickou. Pro výrobu elektřiny v České republice odjakživa převládá výroba z neobnovitelných zdrojů energie, respektive fosilních paliv, ačkoliv za posledních pár let se velice zvedl podíl OZE. Jak se za posledních pár let měnilo použití jednotlivých zdrojů pro výrobu elektrické energie v Evropské unii (EU) můžeme vidět na Obr. 3.1.

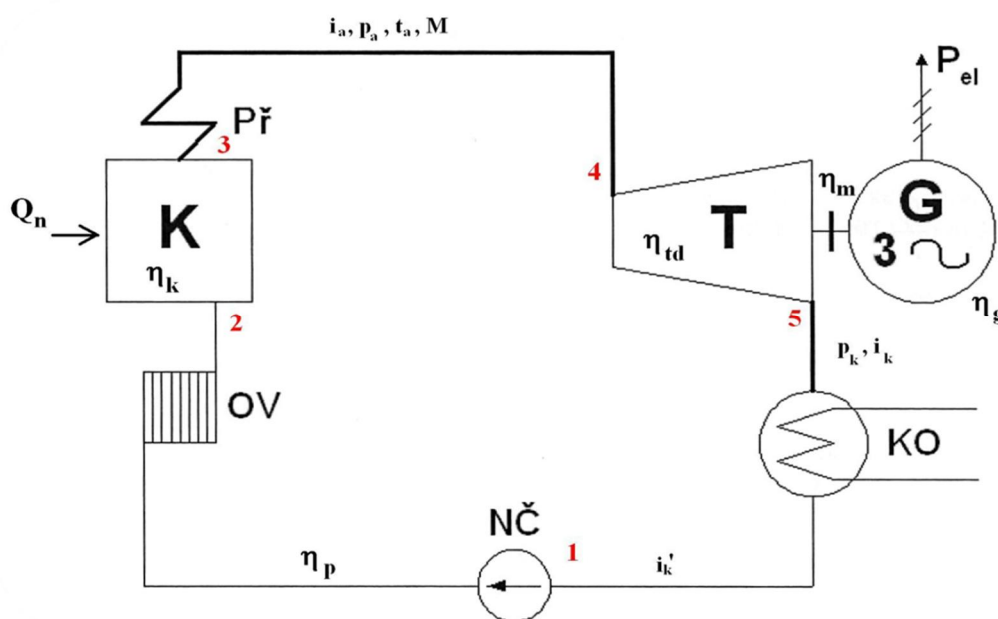


Obr. 3.1: Vývoj používaných zdrojů pro výrobu elektrické energie v EU [7]

V České republice se v roce 2014 vyrobilo zhruba 86 tisíc GWh elektřiny na svorkách generátorů, přičemž instalovaný výkon byl asi 20,7 MW. Kdežto spotřeba brutto se pohybovala kolem 70 TWh a z toho saldo dělalo asi -16 tisíc GWh. Saldo nám udává kolik energie bylo exportováno do ciziny, a to v případě záporné hodnoty, nebo naopak v případě kladné hodnoty se jedná o import energie. V roce 2014 bylo trvale záporné saldo a vývoz za celý rok činil právě výše zmiňovaných 16 TWh, což potvrzuje fakt, že Česká republika za posledních pár let opakovaně, rok od roku, exportuje energii do ciziny.

3.2 Princip fungování kondenzační tepelné elektrárny

Jak jsme si již výše mohli všimnout, v tepelných elektrárnách dochází ke spalování fosilních paliv za účelu získání tepelné energie, která může být dále přeměněna v mechanickou a elektrickou. Na rozdíl od tepláren a kombinovaných výroben elektřiny a tepla (KVET), kondenzační elektrárny slouží pouze k výrobě energie. Přeměnu primární chemické energie ukryté v palivu na konečnou elektrickou energii nám zprostředkovávají tzv. tepelné oběhy elektráren, pod kterými si můžeme představit určitý cyklus, ve kterém probíhá několik za sebou následujících termodynamických změn. Většina tepelných (parních) elektráren využívá tzv. Rankin-Clausiova parního oběhu k přeměně tepelné energie na mechanickou, a ta se poté pomocí generátoru mění na elektrickou. Tento oběh je znázorněn na Obr. 3.2 a průběhy entalpií a entropií v oběhu můžeme sledovat v i-s diagramu na Obr. 3.3.



Obr. 3.2: Schéma Rankin-Clausiova parního oběhu [16]

Voda je napájecím čerpadlem (NČ) vháněna do ohříváku vody (OV), kde je kapalina za stálého tlaku ohřívána. Poté vstupuje napájecí voda do kotle (K), do kterého se souběžně přivádí některý z primárních zdrojů, který je posléze v kotli spálen. Chemická energie z primárního zdroje, paliva, se tedy přemění na tepelnou, která ohřívá vodu procházející kotlem. Voda se v kotli přeměňuje na sytou páru, která je ještě za stálého tlaku admisní páry (p_a) přehřáta v přehřívači (Př) na vyšší teplotu. Poté už přehřátá pára pokračuje na turbínu, kde odevzdává svoji energii turbíně (T), vykoná tedy práci, a turbína se roztočí. Nastává zde termodynamický děj, kterému se říká adiabatická expanze. V reálné turbíně se ale nejedná o ideální adiabatickou, resp. izoentropickou expanzi, protože dochází vlivem ztrát při expanzi a třením k mírnému zvýšení entropie a entalpie, což můžeme vidět na Obr. 3.3. Rozdíl entalpií před turbínou a za

V i-s diagramu na Obr. 3.3 můžeme tedy pozorovat výše popsané procesy. Mezi bodem 1-2 dochází k ohřátí napájecí vody, která poté vstupuje do kotle, kde mezi body 2-3 mění své skupenství na páru, která je posléze mezi 3-4 ohřátá na tzv. přehřátou páru. Přehřátá pára vstupuje na turbínu, kde expanduje mezi 4-5, a pak už je výstupní pára z turbíny pomocí chladicího systému zkondenzována 5-1.

3.3 Hlavní výpočty týkající se kondenzační elektrárny

$$M(i_a - i_k) = \frac{k \cdot P_e}{\eta_m \cdot \eta_a} \quad (3.1)$$

i_a entalpie admisní páry (kJ·kg⁻¹)

i_k	entalpie výstupní páry z turbíny	(kJ·kg ⁻¹)
k	konstanta	
P_e	výkon na svorkách generátoru	(MW)
η_m	mechanická účinnost	(-)
η_g	účinnost generátoru	(-)

To jak se nám přeměňuje tepelná energie na mechanickou práci nám udává tzv. vnitřní termická účinnost Rankin-Clausiova cyklu:

$$\eta_{tv} = \frac{i_a - i_{kad}}{i_a - i'_k} \quad (-) \quad (3.2)$$

i_{kad} je entalpie na výstupu z turbíny při adiabatické expanzi (kJ.kg⁻¹)

i_k' je entalpie zkondenzované vody (kJ.kg⁻¹)

Další důležitá rovnice nám umožňuje vypočítat termodynamickou účinnost turbíny. Termodynamická účinnost turbíny nám udává, s jakou procentuální účinností dochází na turbíně k ideální adiabatické expanzi. Jinak řečeno, jak moc docházelo v průchodu páry turbínou ke tření a ztrátám prostřednictvím úniku tepla. Celkovou termodynamickou účinnost kondenzačních turbín vypočítáme jako

$$\eta_{td} = \frac{i_a - i_k}{i_a - i_{kad}} \quad (-) \quad (3.3)$$

a vyskytuje se přibližně okolo 65% až 88%. Nyní jsme pomocí předchozích dvou rovnic schopni vypočítat celkovou tepelnou účinnost základního Rankin-Clausiova oběhu jako:

$$\eta_t = \eta_{tv} \cdot \eta_{td} = \frac{i_a - i_{kad}}{i_a - i'_k} \cdot \frac{i_a - i_k}{i_a - i_{kad}} = \frac{i_a - i_k}{i_a - i'_k} \quad (-) \quad (3.4)$$

kde

η_{tv} vnitřní termodynamická účinnost (-)

η_{td} termodynamická účinnost turbíny (-)

Tepelný výkon kotle se vypočítá jako

$$Q_k = M \cdot (i_a - i'_k) \quad (\text{GJ/h}) \quad (3.5)$$

a tepelný příkon kotle jako:

$$Q_{kp} = \frac{Q_k}{\eta_k \cdot \eta_p} \quad (\text{GJ/h}) \quad (3.6)$$

kde

η_k účinnost kotle (-)

η_p účinnost potrubí. (-)

Účinnost kotle je

$$\eta_k = \frac{Q_k}{Q_n \cdot M_u} \quad (-) \quad (3.7)$$

kde

Q_n výhřevnost paliva (kJ/kg)

M_u spotřeba paliva za hodinu (kg/h)

Tím se dostáváme ke vzorečku pro celkovou tepelnou účinnost elektrárny (bloku), která je:

$$\eta_{E,tep} = \frac{k \cdot P_e}{Q_{kp}} \quad (-) \quad (3.7)$$

nebo když dosadíme za příkon kotle, tak můžeme psát

$$\eta_{E,tep} = \frac{k \cdot P_e}{Q_k} \cdot (\eta_k \cdot \eta_p) \quad (-) \quad (3.8)$$

Dalším velice důležitým ukazatelem pro každou elektrárnu jsou tzv. technicko-ekonomické ukazatele, mezi které můžeme řadit např. hmotnostní průtok chladicí vody, hmotnostní průtok pracovního média, měrné spotřeby tepla, páry, ale také paliva. Měrná spotřeba tepla na výrobu elektrické energie se vypočítá jako

$$q_e = \frac{Q_{kp}}{P_e} \quad (\text{kJ/kWh}) \quad (3.9)$$

měrná spotřeba páry v turbíně je

$$m_{sp} = \frac{M}{P_e} \quad (\text{kg/kWh}) \quad (3.10)$$

měrná spotřeba tepla v turbíně

$$q_t = \frac{Q_k}{P_e} \quad (\text{kJ/kWh}) \quad (3.11)$$

a měrná spotřeba paliva je

$$m_u = \frac{M_u}{P_e} \quad (\text{kg/kWh}) \quad (3.12)$$

kde M_u je hodinová spotřeba paliva (kg/h), která se vypočítá jako

$$M_u = \frac{Q_{kp}}{Q_{pal}} \quad (\text{kg/h}) \quad (3.13)$$

přičemž Q_{pal} je výhřevnost paliva (kJ/kg).

3.4 Zvyšování účinnosti parního oběhu

Pokud se bavíme o snižování účinnosti parního oběhu, ať už se jedná o modernizaci nějakého bloku, či o návrh úplně nového bloku s tepelným oběhem, vždy se jedná o velice důležité problematice. To jakou použijeme technologii totiž neovlivňuje pouze celkovou tepelnou účinnost zařízení, ale také ekonomické stránky provozu, stejně tak jako spolehlivost provozu. Účinnost parního oběhu lze zvýšit buď zvýšením tepla dodaného, nebo zmenšením tepla odvedeného, respektive oběma způsoby zároveň. Termickou účinnost poté dostaneme jako

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} \quad (-) \quad (3.13)$$

kde q_2 je odvedené teplo (J/kg) a q_1 je teplo přivedené (J/kg).

Zvyšování účinnosti tepelného oběhu můžeme provádět více způsoby, které si podrobněji vysvětlíme níže. V tepelném oběhu většiny elektráren jsou obvykle zařazeny technologie, které zvyšují účinnost oběhu, společně.

3.4.1 Snižování tlaku kondenzátoru

Kondenzátor, resp. celý chladicí okruh, má v tepelném oběhu za úkol zkondenzovat páru, která vykonala práci na turbíně, a to při co nejmenší teplotě a tlaku. Čím menšího tlaku se nám podaří v kondenzátoru dosáhnout, tím větší práci vykoná každý kg páry expandující v turbíně. Standartní kondenzační tlak se pohybuje v rozmezí od 0,001 až 0,01 MPa. Při snižování kondenzačního tlaku se musí dávat pozor, neboť při nízkých kondenzačních tlacích dochází ke zvyšování vlhkosti v posledních stupních turbíny, což může mít za následek erozi lopatek, ale také energetické ztráty. Ke zkapalnění páry z turbíny dochází v kondenzátoru na vnějších teplosměnných plochách výměníků, kterými proudí chladicí voda, které pára odevzdá svoji energii. Snižování tlaku kondenzátoru je podmíněno zvýšením vakua. Vakuum v kondenzátoru můžeme zvýšit těmito způsoby:

- a) použitím nižší teploty chladicí vody,
- b) větším množstvím průtoku chladicí vody,
- c) zvětšením teplosměnné plochy kondenzátoru.

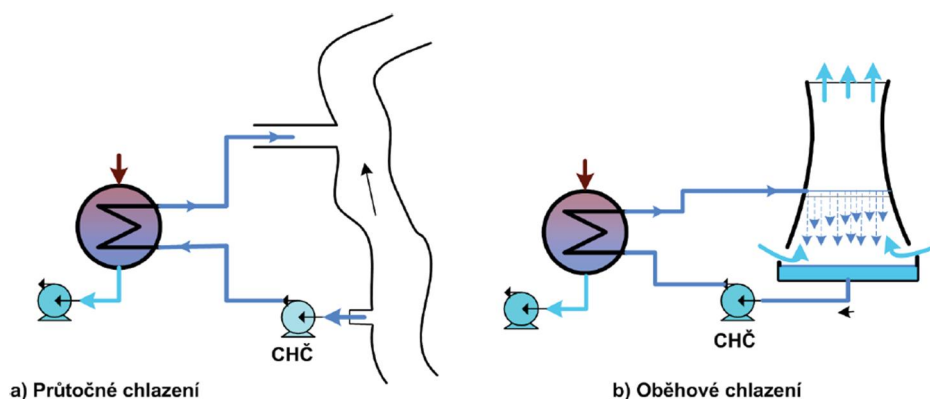
Za nejvýhodnější považujeme první způsob, tedy snížení teploty chladicí vody, jelikož zde není zapotřebí žádné investice. V druhém případě bychom totiž sice zvětšili vakuum, tím zmenšili tlak kondenzátoru, naproti tomu by se nám ale zvýšila vlastní spotřeba energie na pohon čerpadel. Stejně tak i ve třetím případě bychom museli počítat se zvýšenými investičními náklady.

Právě první a druhý způsob zmenšování tlaku se mohou v teplých krajinách nebo i u nás v létě negativně projevit na chodu elektráren, neboť když je v létě při vysokých teplotách málo vody, resp. pokud má vysokou teplotu, tak je problém elektrárnu, která využívá průtočný systém chlazení, uchládit. Mezi další příčiny nesprávného chodu kondenzátoru můžeme řadit poruchu chladících čerpadel, špatně fungující vývěvu, která odsává vzduch, ale také netěsnost kondenzátoru. A jelikož ve většině případů mají všechny výše uvedené případy dopad na zvýšení tlaku, tak tím pádem mají dopad i na ekonomiku provozu. „Např. zvýšení tlaku kondenzace ze 4 kPa na 5 kPa, (tedy o 1 setinu atmosférického tlaku!!) vyvolá zkrácení expanze o cca 30 kJ/kg, které se např. u 100 MW turbíny projeví poklesem výkonu o cca 2,5 ÷ 3 MW.“ [4]

3.4.1.1 Způsoby chlazení

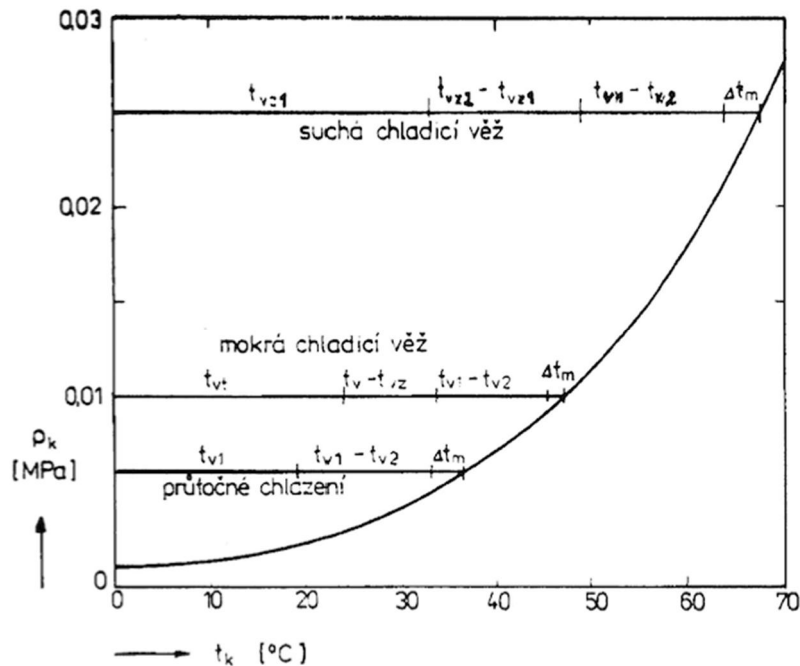
Mezi hlavní typy chlazení patří jednoznačně průtočné chlazení a oběhové (cirkulační) chlazení. První ze zmíněných se využívá hlavně v elektrárnách, které leží v bezprostřední blízkosti vodních toků nebo moří. Voda poté proudí přímo do kondenzátoru, kde přijímá teplo odevzdané párou. Ohřátá voda, většinou o 3 °C až 5 °C, se poté vrací zase zpět do říčního toku či moře. Jedná se o nejjednodušší, co se do výše investic týče, nejlacinější, ale také nejefektivnější, systém chlazení. Nejefektivnější je právě z toho důvodu, protože dosahuje nejnižší hodnoty kondenzačního tlaku, a tím pádem dosahuje vysoké termické účinnosti tepelného oběhu.

U druhého typu chlazení, tedy oběhového, voda cirkuluje mezi chladicí věží a kondenzátorem. Celý proces funguje tak, že chladicí čerpadlo načerpá vodu z bazénu pod chladicí věží do kondenzátoru, kde přijme skupenské teplo páry a ohřátá voda putuje do chladicí věže. Tam je ohřátá voda rozstřikovávána pomocí sprch a při svém pádu se kapky vody ochlazují proudícím vzduchem, k jehož proudění se v případě věže s přirozeným tahem využívá komínový efekt. V případě věže s umělým tahem je komínový efekt nahrazen ventilátory. Na Obr. 3.4 lze vidět princip obou typů chlazení.



Obr. 3.4: Průtočné a oběhové (cirkulační) chlazení [4]

Jako další systém používaný ke kondenzaci páry odvedené z turbíny nám slouží tzv. suché chlazení, do kterého můžeme zařadit suché chladicí věže a vzduchové kondenzátory. V suché chladicí věži je voda z kondenzátoru chlazená v tepelných výměnících voda-vzduch, zkonstruovaných z žebrových trubek. Rovněž jako u mokrých chladicích systému, tak i u mokrých mohou být věže buď bez ventilátoru, nebo s ventilátorem, který zajišťuje proudění vzduchu. Vzduchové kondenzátory berou páru rovnou z turbíny do žebrovaných trubek, kde po ochlazení vzduchem dochází ke kondenzaci. Nevýhodou je, že vzhledem k nízké tepelné kapacitě vzduchu musí být dodáno velké množství vzduchu, a proto se u tohoto druhu používá ventilátor. Využití suchého chlazení nachází uplatnění hlavně tam, kde je nedostatek vody pro mokré chlazení. Na Obr. 3.5 lze vidět jaký tlak má kondenzátor při daných teplotách, a to pro všechny tři výše uvedené systémy chlazení.



Obr. 3.5: Teploty a tlak v kondenzátoru při různých typech chlazení, t_{vi} [°C] – teplota mokrého teploměru, Δt_m [K] – minimální teplotový spád, index: vz – vzduch, v – voda, 1 – vstup, 2 – výstup [2]

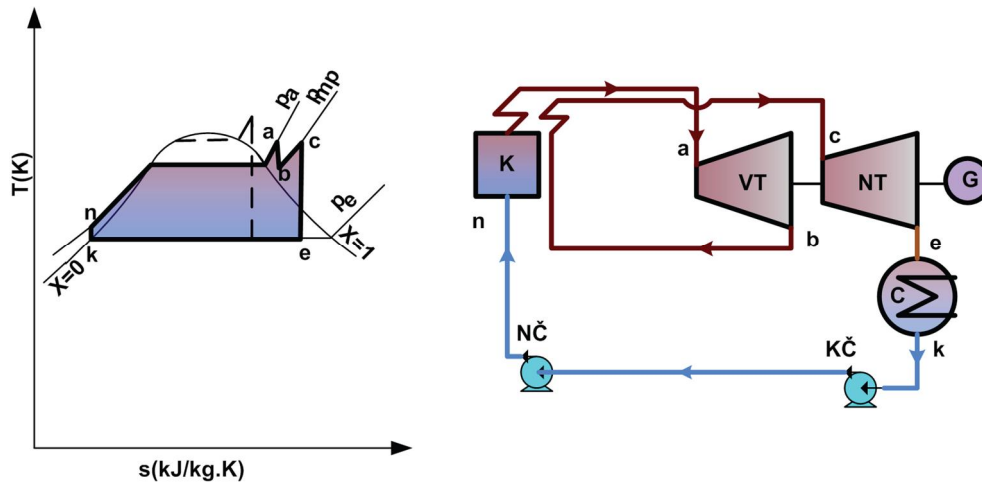
3.4.2 Zvyšování parametrů admisní páry

Zlepšit účinnost tepelného oběhu, resp. zvýšit parametry admisní páry, lze provést více způsoby. Jedná se buď o zvyšování tlaku admisní páry nebo teploty, anebo zvyšování jak teploty, tak tlaku zároveň. Zvyšování tlaku a teploty admisní páry je ovšem částečně limitováno. Vzhledem k tomu, že se jedná o páru velmi vysokého tlaku a teploty, tak se musí počítat i s možnými problémy, které souvisejí s pevnostmi materiálů, konstrukčními požadavky a s bezpečnostními opatřeními. Zvyšováním tlaku vstupní páry dochází ke zvyšování vlhkosti na konci expanze, což může mít za následek snižování termodynamické účinnosti turbíny. Proto se používá zároveň i zvyšování teploty admisní páry, jejíž zvýšení naopak zmenšuje vlhkost na konci expanze, a tím pádem zvětšuje termodynamickou účinnost turbíny. Vlhkost na konci expanze by neměla být větší než 12 % až 14 %, jinak by mohlo docházet působením vodních kapek k erozi lopatek. V praxi se používají, s ohledem na typ kotle, tlaky dosahující hodnot maximálně 18 MPa u kotlů s přirozenou cirkulací. Tlaky vyšší než 22,14 MPa, tedy nadkritické, se používají u kotlů průtočných. S použitím nadkritického tlaku se setkáváme hlavně u moderních energetických oběhů. Teploty admisní páry se pohybují v rozmezí od 400 do 650 °C.

3.4.3 Přihřívání páry

Dalším možným způsobem, jak zvýšit účinnost tepelného oběhu je přihřívání páry, tzv. mezipřihřívání. Princip funguje tak, že admisní pára vykoná na vysokotlaké turbíně práci, expanduje, to je samozřejmě doprovázeno poklesem tlaku, a pak se tato pára s nižším tlakem vrací buď zpátky do parogenerátoru, kde je přihřívána obvykle na stejnou teplotu jako při vstupu na turbínu, anebo může být uplatněn druhý způsob přihřívání páry, tedy vstupní parou ve výměníku. Poté již tato přihřátá pára vstupuje na nízkotlakou turbínu, kde klasicky expanduje na kondenzační tlak. Schéma oběhu s mezipřihříváním můžeme vidět na Obr. 3.6. Přihřívání páry, jak jsme již uvedli výše, nezlepšuje pouze tepelnou účinnost oběhu, ale také snižuje vlhkost

v turbíně na konci expanze. Přehřívání páry je zařazeno hlavně do oběhů, které pracují s nadkritickými tlaky admisní páry. Vysvětlení je takové, že pokud by se pára nepřehřívala, tak by expanze proběhla hluboko do oblasti mokré páry, což by mělo za následek zvýšení koncové vlhkosti páry a s tím spojené riziko vzniku eroze na lopatkách turbíny, doprovázeno snížením termodynamické účinnosti turbíny. Tento fakt můžete vidět znázorněn čárkovanou čarou v T-s diagramu na Obr. 3.6, kde dochází k expanzi páry hluboko do oblasti mokré páry. V literatuře se uvádí, že v oběhu, kde je admisní tlak vyšší než 13 MPa, je vhodné, vzhledem k materiálovému zatížení i termodynamické účinnosti turbíny, zařadit mezipřehřívání.



Obr. 3.6: T-s diagram znázorňující přehřívání páry, schéma s mezipřehříváním [4]

Samozřejmě v praxi se používá také dvojnásobné přehřívání páry, to znamená, že se dvakrát přeruší expanze, při které dvakrát klesne tlak i teplota, která se pak znovu přehřívá na původní teplotu admisní páry. Dvojnásobné přehřívání páry je typické pro nadkritické hodnoty tlaku vstupní páry. Obecně se uvádí, že v případě jednonásobného přehřívání se zvyšuje tepelná účinnost o 6 až 8 %. Musíme zde ale uvažovat ještě ztráty v přehříváku, a také ztráty vzniklé v parovodech, které dělají kolem 1 až 1,5 %. U dvojnásobného přehřívání se udává zvýšení tepelné účinnosti při nadkritických hodnotách admisní páry asi 1,5 až 2 %. Jak jsme si již výše řekli, druhý způsob, jak pomocí mezipřehřívání zlepšit účinnost tepelného cyklu, využívá tepelného výměníku, ve kterém je zexpandovaná pára ohřívána admisní párou. Při ohřívání admisní párou jsme ale schopni dosáhnout pouze teploty odpovídající tlaku admisní páry. Tento druh přehřívání je účelný hlavně z toho důvodu, že zmenšuje vlhkost na konci turbíny, což snižuje riziko eroze lopatek a zároveň zvětšuje termodynamickou účinnost.

Pokud máme v tepelném oběhu zařazeno přehřívání páry, tak se nám změní rovnice pro výpočet tepelné bilance turbosoustrojí, která bude s jedním přehříváním:

$$M(i_a - i_k + \Delta h) = \frac{k \cdot P_e}{\eta_m \cdot \eta_g} \quad (3.14)$$

kde Δh je rozdíl entalpií za přehřívákem a před ním. Na Obr. 3.6 by tedy rozdíl entalpií byl $\Delta h = c - b$. Rovněž se nám také změní výpočet tepelného výkonu kotle, který bude:

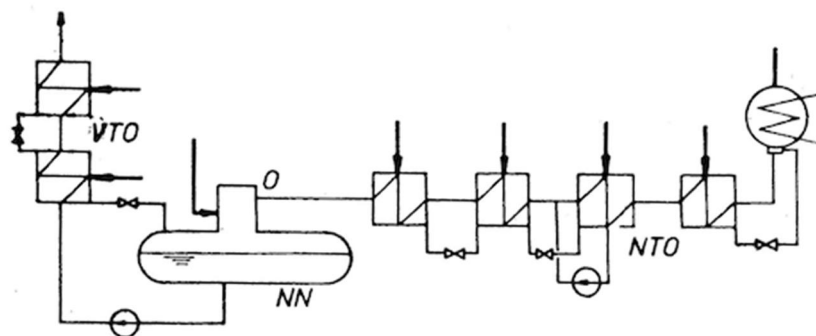
$$Q_k = M \cdot (i_a - i'_k + \Delta h) \quad (\text{GJ/h}) \quad (3.15)$$

3.4.4 Regenerační ohřev napájecí vody

Princip metody zvyšování účinnosti tepelného oběhu spočívá v tom, že napájecí voda, která putuje z kondenzátoru do kotle, je na své cestě ohřata prostřednictvím odběrové páry z turbíny v tepelném výměníku pára-voda na vyšší teplotu. Prostřednictvím jednoho či více odběrů, což záleží na počtu regeneračních ohřevů, dochází k tomu, že expandující pára odebraná z turbíny předává v tepelném výměníku tepelnou energii napájecí vodě. Regenerační ohříváky jsou většinou povrchové tepelné výměníky, které jsou konstruovány tak, že v uzavřeném prostoru je odebraná pára z turbíny, kdežto napájecí voda protéká trubkami, na jejichž povrchu dochází ke kondenzaci páry. Energie potřebná na ohřátí napájecí vody na určitou teplotu je $\Delta q_{reg} = i_{nv}' - i_k'$, což je stejná energie která by byla potřeba dodat vodě v kotli, kdyby nebylo regeneračních ohřevů. Tento fakt nás může vést k otázce, zdali se vůbec vyplatí provozovat regenerační ohřevy. Zařazením regeneračního ohřevu do oběhu je v kondenzátoru odvedeno méně bezužitkového tepla, což zásadně zvyšuje tepelnou účinnost oběhu. Jinými slovy můžeme tvrdit, že pára, která byla odebrána z turbíny za účelem předat tepelnou energii napájecí vodě, zkondenzuje, ale vrací se zpět do oběhu. Tento odběr expandující páry z turbíny má za následek, že se snižuje množství odvedeného tepla v kondenzátoru, a tím pádem se nám jednak zvyšuje tepelná účinnost cyklu, ale také se nám snižuje spotřeba chladicí vody v kondenzátoru, stejně tak jako jeho rozměry.

Existují dva způsoby, jakým lze odvádět kondenzát zpět do oběhu. První způsob je tzv. kaskádování kondenzátu. Druhý je tzv. zapojení s přečerpáním kondenzátu. První způsob není vhodný po termodynamické stránce, neboť dochází k mísení kondenzátu z ohřevu o vyšším tlaku s párou ohříváku o nižším tlaku a dochází zde ke ztrátám vzniklým míšením. Proto, aby se u tohoto způsobu zmenšili ztráty, se často používá dochlazovač, který zchladí kondenzát. Druhý způsob je tzv. zapojení s přečerpáním kondenzátu, který je pomocí čerpadla přečerpán za ohřívák do napájecí vody. U vysokotlakých ohříváků se používá většinou kaskádovité zapojení, kde je kondenzát tímto způsobem dopraven až do napájecí nádrže, kdežto u nízkotlakých ohříváků se tyto dva způsoby odvádění kondenzátu většinou kombinují.

Regenerační ohřevy bývají většinou tvořeny za sebou seřazenými vysokotlakými a nízkotlakými ohříváky, které jsou od sebe odděleny odplynovacím zařízením a napájecí nádrží. Většinou je takto za sebou umístěno 6 až 9 stupňů regeneračního ohřevu. Větší počet stupňů regeneračního ohřevu se už nepoužívá, neboť účinnost se zvyšuje jen velmi nepatrně. Odplynovací zařízení, jak už název napovídá, slouží k odplynění napájecí vody, ale nejen to, slouží rovněž jako směšovací ohříváč. Klasické uspořádání regeneračního systému můžeme vidět na Obr. 3.7, kde VTO jsou vysokotlaké ohříváky, NTO jsou nízkotlaké ohříváky, O je odplynovač a NN je napájecí nádrž.

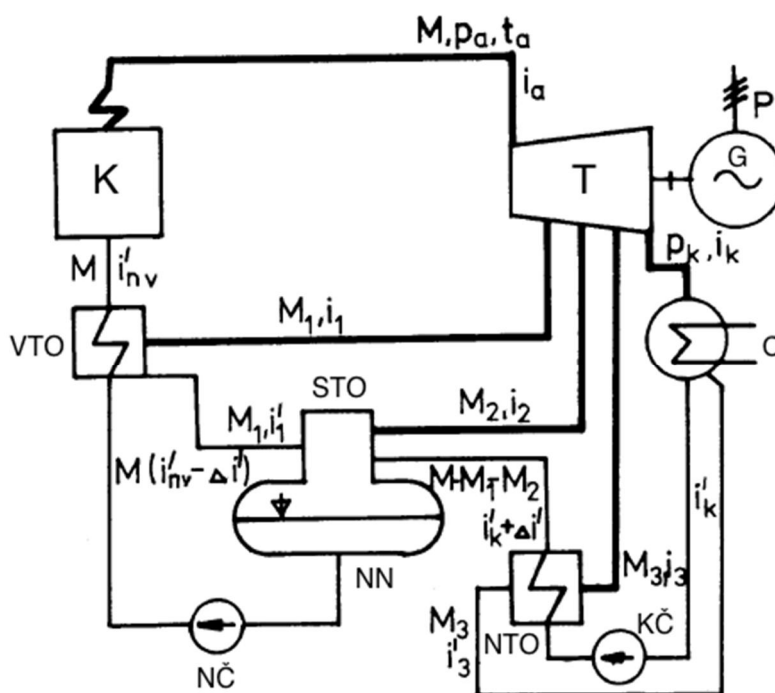


Obr. 3.7: Běžné uspořádání regeneračního systému [5]

V odborné literatuře se můžeme dočíst, že pokud máme za sebou více stupňů regeneračního ohřevu, tak nejvyšší tepelnou účinnosti oběhu dosáhneme tehdy, je-li na každém stupni stejný přírůstek energie. Tento druh zvyšování tepelné účinnosti, tedy pomocí regeneračního ohřevu napájecí vody, je velmi markantní a u moderních bloků dokáže zlepšit celkovou termickou účinnost oběhu až o 10 %.

3.4.4.1 Rovnice energetické bilance kondenzační turbíny pro třístupňový regenerační ohřev

Budeme vycházet ze schématu na Obr. 3.8, kde můžeme vidět zjednodušené tepelné schéma s třístupňovým regeneračním ohřevem, který obsahuje nízkotlaký, vysokotlaký a směšovací ohřívák.



Obr. 3.8: Principiální schéma zapojení regeneračního ohřevu napájecí vody [17]

Nejprve stanovíme rovnice tepelné bilance pro jednotlivé ohříváky. U těchto rovnic budeme vycházet z faktu, že vstupní energie se rovná té výstupní. U vysokotlakého ohříváku bude tvar rovnice vypadat takto:

$$(M_1 \cdot i_1) \cdot \eta_{VTO} + M \cdot (i'_{nv} - \Delta i') = M \cdot i'_{nv} + M_1 \cdot i'_1 \quad (3.16)$$

kde:

M množství teplotnosné látky

M_1 množství odebrané páry z vysokotlaké části turbíny

i_1 entalpie odebrané páry z vysokotlaké části turbíny

i'_1 entalpie kondenzátu za vysokotlakým ohřívákem

η_{VTO} účinnost povrchového ohříváku

i'_{nv} entalpie napájecí vody

$\Delta i'$ přírůstek energie

U směšovacího ohříváku bude rovnice tepelné bilance:

$$M_2 \cdot i_2 + (M - M_1 - M_2) \cdot (i_k' + \Delta i') + M_1 \cdot i_1' = M \cdot (i_{nv}' - \Delta i') \quad (3.17)$$

kde:

M_2 množství odebrané páry ze středotlaké části turbíny

i_2 entalpie odebrané páry ze středotlaké části turbíny

i_k' entalpie vody tekoucí z kondenzátoru

A u nízkotlakého ohříváku bude rovnice tepelné bilance:

$$M_3 \cdot i_3 + (M - M_1 - M_2) \cdot i_k' = (M - M_1 - M_2) \cdot (i_k' + \Delta i') + M_3 \cdot i_3' \quad (3.18)$$

kde:

M_3 množství odebrané páry z nízkotlaké části turbíny

i_3 entalpie odebrané páry z nízkotlaké části turbíny

i_3' entalpie kondenzátu za nízkotlakým ohřívákem

Rovnice tepelné bilance turbosoustrojí se třemi odběry poté je

$$M \cdot (i_a - i_k) - M_1 \cdot (i_1 - i_k) - M_2 \cdot (i_2 - i_k) - M_3 \cdot (i_3 - i_k) = \frac{k \cdot P_e}{\eta_m \cdot \eta_g} \quad (3.19)$$

4 PARALELNÍ SPOLUPRÁCE ELEKTRÁRENSKÝCH BLOKŮ

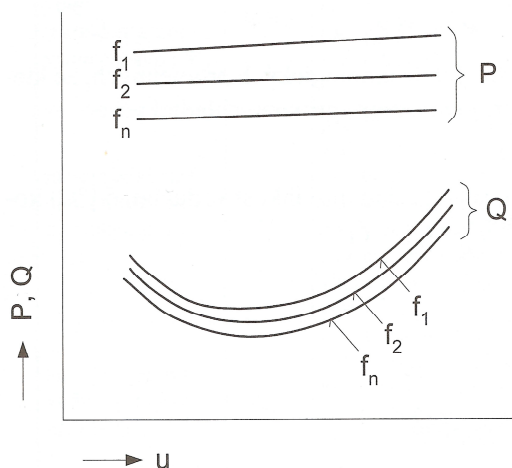
Paralelní spolupráce, resp. paralelní chod, znamená, že 2 nebo více elektrárenských bloků pracuje do společné rozvodné sítě. Jak je již výše uvedeno, v přenosové síti se udržuje stálé napětí a kmitočet v určitých tolerancích, které jsou dány příslušnými normami. Takové trojfázové síti říkáme tvrdá síť a vzhledem k tomu, že do ní dodává elektrickou energii několik elektrárenských bloků současně, musí se alternátor připojit paralelně, to znamená, že při připojování alternátorů k síti se musí dodržovat určité podmínky, aby došlo k hladkému připojení bez nárazů jak proudových, tak mechanických.

Podmínky připojení alternátoru k síti:

- stejná efektivní hodnota napětí alternátoru a sítě
- stejná frekvence alternátoru a sítě
- napětí alternátoru i sítě musí být ve fázi (okamžité hodnoty napětí stejné fáze alternátoru a sítě musí být v okamžiku připojení stejné)
- stejný sled fází alternátoru a sítě

Při nedodržení těchto podmínek hrozí zničení alternátoru. Pokud jsou tyto podmínky splněny, může se alternátor tzv. přifázovat, resp. připojit k tvrdé síti.

Řízení ES, resp. její ustálený chod, vychází z faktu, že dodávaný činný a jalový výkon je rovný činnému a jalovému příkonu zatížení. Pokud dojde k vychýlení této výkonové rovnováhy, napětí a kmitočet se budou měnit podle Obr. 4.1.



Obr. 4.1: Závislost činného a jalového výkonu na frekvenci a napětí [2]

Z Obr. 4.1 je zřejmé, že činný výkon je více citlivý na změny frekvence a na změny napětí méně, kdežto u jalového výkonu je tomu naopak. Pokud nastane v ES tato nerovnováha, musí být zajištěna regulace napětí, které udává vyrovnanost jalových výkonů v uzlu, a kmitočet, který udává vyrovnanost bilance činných výkonů v ES. Veškeré nesouměrnosti těchto typů v síti musí být v určitém čase doregulovány, aby byla zajištěna bezpečná dodávka elektřiny. Touto problematikou se zabývá další podkapitola.

Hlavní výhoda paralelního chodu spočívá v tom, že můžeme pomocí paralelně zařazených bloků vyrobit více energie. V případě potřeby odstavení bloku, ať už naplánovaného nebo vzniklého poruchou, který dodával energii do sítě, je tato ztráta vyrobené energie doregulována ostatními bloky soustavy. Bloky se tedy mohou navzájem doplňovat.

4.1 Podpůrné služby (PpS)

Jako provozovatel přenosové soustavy je společnost ČEPS, a. s. povinna zajistit spolehlivost a kvalitu dodávky elektřiny v přenosové soustavě. To znamená, že napětí a kmitočet musí být v přenosové soustavě udržovány v rozmezí hodnot definovaných Kodexem přenosové soustavy a zároveň je provozovatel povinen garantovat nepřetržitou dodávku v místech odběru. Aby byl provozovatel přenosové soustavy schopen dodržet výše uvedené podmínky, je nezbytné udržet rovnováhu mezi výrobou a spotřebou elektrické energie. Pokud je tedy přebytek výroby nad spotřebou, musí provozovatel zajistit buď spotřebu, nebo snížení výroby. Pokud naopak převládá spotřeba, tak musí zajistit chybějící výkon. Z tohoto důvodu musí mít provozovatel přenosové soustavy k dispozici určitý pohotovostní regulační výkon, který má nasmlouvaný u poskytovatelů, resp. výrobců elektrické energie. Tento výkon má rezervovaný u společností zprostředkovávajících výrobu elektrické energie z jednoho důvodu, a to proto, protože poskytovatel přenosové soustavy ze zákona nesmí vlastnit zdroje elektrické energie. Výrobcí, kteří mají smlouvu s poskytovatelem přenosové soustavy o PpS, jsou povinni v případě pohotovosti nebo potřeby poskytnout nasmlouvaný výkon, který vyhovuje kvalitativním požadavkům poskytovatele přenosové soustavy. Kontrolovat nerovnoměrnost v soustavě, jinak řečeno systémovou odchylku, mají za úkol dispečeri společnosti ČEPS. Rezervy lze dělit na dvě hlavní skupiny, a to na rezervy na točivých zdrojích, což znamená, že na zdrojích, které jsou v provozu je ještě volný regulační rozsah, a na tzv. studené zálohy, což jsou zdroje které stojí a až na pokyn dispečera se připojují k soustavě. Mezi studené zálohy můžeme řadit hlavně akumulační a přečerpávací vodní elektrárny (PVE). U PVE je pak zajímavé hlavně to, že při nedostatku výroby elektrické energie dodává elektřinu v tzv. turbínovém režimu elektřinu do sítě, a naopak při nadbytku výroby, což je například v noci, když není taková spotřeba, pracuje v čerpadlovém režimu, kdy přečerpává vodu z dolní do horní nádrže, a tak zvyšuje spotřebu. Největší PVE u nás je přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně, která má instalovaný výkon 2 · 325 MW. Na Obr. 4.2 můžeme vidět dispečink odkud se řídí přenosová soustava.



Obr. 4.2: Dispečink společností ČEPS, a. s. [18]

Všechny PpS musí splňovat tyto požadavky:

- „měřitelnost - se stanovenými kvantitativními parametry a způsobem měření

- garantovaná dostupnost služby během denního, týdenního a ročního cyklu s možností vyžádat si inspekci
- certifikovatelnost - stanovený způsob prokazování schopnosti poskytnout služby pomocí periodických testů
- možnost průběžné kontroly poskytování“ [12]

4.1.1 Primární regulace frekvence bloku (PR)

Primární regulace frekvence spočívá v přesně definované změně výkonu bloku v závislosti na odchýlení frekvence. Jedná se o místní automatickou funkci zajišťovanou obvody primární regulace. Vyžadovaná změna výkonu je dána v závislosti na odchýlení frekvence vztahem

$$\Delta P = -\frac{100}{\delta} \cdot \frac{P_n}{f_n} \cdot \Delta f \quad (4.1)$$

kde

ΔP ... požadovaná změna výkonu bloku [MW]

P_n ... nominální výkon bloku [MW]

Δf ... odchylka od frekvence [Hz]

δ ... statika primární regulace [%]

f_n ... zadaná frekvence [Hz]

Společnost poskytující PpS primární regulace frekvence musí uvolnit požadovanou regulační zálohu od vzniku odchylky frekvence nejpozději do 30 sekund.

4.1.2 Sekundární regulace výkonu bloku (SR)

Tento druh podpůrné služby je proces, který zajišťuje změnu hodnoty výkonu regulovaného bloku na základě požadavku sekundárního regulátoru frekvence a salda předávaných výkonů. Jedná se tedy o tzv. regulační zálohu SR (RZSR), což je obecné označení pro točivé výkonové zálohy, které jsou vyčleněny na blocích, které poskytují SR.

4.1.3 Minutová záloha (MZ_t) (t = 5, 15, 30 minut)

Jedná se o takové bloky, které jsou v případě pokynu od dispečinku ČEPS schopny najet a poskytovat regulační zálohu do požadovaného času. Pokud se jedná o regulační zálohu MZ_t kladnou (RZMZ_t⁺), znamená to, že je v převládá spotřeba nad výrobou. Musí se tak například zvýšit výkon bloku nebo odpojit čerpání u PVE, které znamená spotřebu. Na druhou stranu, pokud se jedná o regulační minutovou zálohu zápornou (RZMZ_t⁻), znamená to, že v síti převládá výroba nad spotřebou, tudíž je potřeba tuto disproporci vyregulovat. RZMZ_t⁻ je realizována např.: snížením výkonu elektrárenského bloku nebo zapojením vyššího zatížení k ES České republiky, což může být provedeno například pomocí čerpadlového režimu u PVE.

Minimální velikost RZMZ₁₅ a RZMZ₃₀ jednoho bloku je 10 MW. Maximální výkon je 70 MW. U RZMZ₅ je minimální velikost regulační zálohy bloku 30 MW, kdežto maximální určuje provozovatel přenosové soustavy. Poskytovatel PpS je povinen garantovat RZMZ₅ minimálně po dobu 4 hodin. PpS v podobě MZ_t se využívá k vyrovnání výkonové nerovnováhy v přenosové soustavě, vzniklé poruchami, výpadkem bloku anebo velkým nárůstem zatížení. Služba bývá

aktivována jednou až čtyřikrát měsíčně. Celková doba, kterou byla služba aktivovaná, nepřesahuje 20 hodin ročně.

4.1.4 Snížení výkonu (SV_{30})

Bloky, u nichž je nasmlouvaný tento druh PpS, musí být schopny do 30 minut snížit svůj výkon na předem sjednanou hodnotu zálohy ($RZSV_{30}$), ale také musí být schopny úplného odstavení. Tato služba se využívá v případě, kdy je odchylka v soustavě výrazně záporná, při velké převaze vyrobené energie nad spotřebovanou, a nelze již využít regulace pomocí SR nebo MZ_t . Minimální velikost zálohy SV_{30} od určitého poskytovatele je 30 MW. A tuto hodnotu musí poskytovatel této PpS garantovat nejméně 24 hodin od aktivace dispečinkem ČEPS.

4.1.5 Sekundární regulace U/Q (SRUQ)

„Sekundární regulace U/Q je automatická funkce využívající celý certifikovaný (smluvně dohodnutý) regulační rozsah jalového výkonu bloků pro udržení zadané velikosti napětí v pilotních uzlech ES a zároveň rozděluje vyráběný jalový výkon na jednotlivé stroje. Regulační proces má být aperiodický nebo maximálně s jedním překmitem a ukončený do 2 minut.“ [12]

4.1.6 Schopnost ostrovního provozu (OP)

Tato služba PpS funguje tak, že elektrárenský blok má schopnost provozu do vydělené části vnější sítě. Při tzv. ostrovním provozu bloku dochází k výrazným změnám frekvence a napětí, což je ovlivněno faktem, že blok pracuje do vydělené části soustavy. K přechodu do ostrovního režimu dochází automaticky v případě, když frekvence buď klesne pod 49,8 Hz, nebo vzroste nad 52,2 Hz. U ostrovního provozu se setkáváme s velkými nároky na regulaci činného výkonu bloku. Blok musí být schopen, vzhledem ke změnám napětí a frekvence způsobené proměnným zatížením, řešit svou autonomní regulaci.

4.1.7 Schopnost startu ze tmy (BS)

Startem ze tmy se rozumí najetí elektrárenského bloku bez zásahu vnějšího zdroje napětí na jmenovité otáčky, poté na jmenovité napětí a nakonec připojení k síti a napájení v ostrovním režimu. Tento druh PpS je využíván hlavně v těch případech, kdy je za potřebí obnovit dodávku elektrické energie, např. po úplném rozpadu sítě (tzv. blackout) nebo částečném rozpadu sítě. Důležité tedy je aby součástí elektrárenského bloku byl záložní zdroj, který je schopen dodat potřebnou energii na rozběh soustrojí bloku. Bloky, které jsou schopny startu ze tmy, vybírá ČEPS, stejně tak jako má právo po poskytovateli PpS požadovat inspekci připravenosti k plnění služby BS.

4.2 Hospodářsky výhodné rozdělení výkonů paralelně pracujících bloků v ES

Pokud v ES pracují elektrárenské bloky tzv. paralelně (paralelní chod), jedná se, jak již bylo výše vysvětleno, o více elektrárenských bloků, které pracují společně do tvrdé sítě. Rozdělení výkonů na jednotlivých blocích bude při paralelním chodu řešeno takovým způsobem, aby se dosáhlo co nejmenších nákladů elektrárny na výrobu nebo aby se dosáhla co nejmenší celková spotřeba paliva. Pro výpočet takového rozdělení se využívají tzv. spotřební nebo nákladové charakteristiky určitých bloků. K tomu, abychom byli schopni určit spotřební charakteristiku bloku, je zapotřebí nejprve změřit spotřebu tepla při různých velikých hodnotách výkonu, a poté aproximovat vynesené naměřené hodnoty vhodnou křivkou. Nejčastěji bývá v České republice

vyskytována aproximace polynomem 2. stupně, neboť už ta postačí k velmi dobré přesnosti. Nejsou však výjimkou ani aproximace polynomem 3. stupně.

Spotřební charakteristika je dána rovnicí:

$$Q = a_0 + a_1 P + a_2 P^2 \quad (\text{GJ/h}) \quad (4.2)$$

kde a_0, a_1, a_2 jsou aproximační konstanty spotřební charakteristiky.

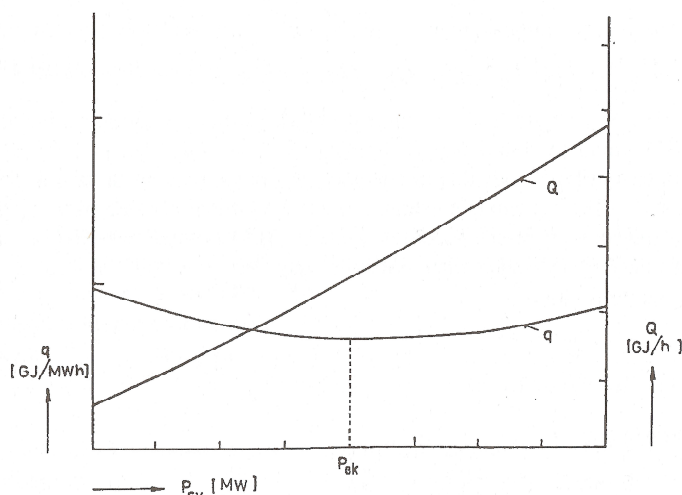
Měrná spotřeba tepla je

$$q = \frac{Q}{P} = \frac{a_0 + a_1 P + a_2 P^2}{P} \quad (\text{GJ/MWh}) \quad (4.3)$$

a minimální měrná spotřeba při ekonomickém výkonu poté bude:

$$P_{ek} = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}} \quad (\text{MW}) \quad (4.4)$$

Jak může vypadat taková spotřební charakteristika u elektrárenského bloku je možno vidět na Obr. 4.3: Spotřební charakteristika bloku [2] níže.



Obr. 4.3: Spotřební charakteristika bloku [2]

Nákladové charakteristiky vycházejí ze spotřebních, ale s tím rozdílem, že se zde uvažují náklady na výrobu elektrické energie. Především se jedná o náklady těchto hlavních typů: palivové náklady, emise páry, emise popílku, emise CO , emise NO_x , uložení tuhých zbytků po spalování, různé druhy oprav, spotřeba sorbetu, vody a mnoho dalších, jež jsou při výrobě vynaloženy.

Nákladová charakteristika je dána rovnicí:

$$N = (a_0 + a_1 P + a_2 P^2) \cdot \sum k_{pn} \quad (\text{Kč/h}) \quad (4.5)$$

kde $\sum k_{pn}$ představuje součet všech nákladových koeficientů jednotlivých složek proměnných provozních nákladů. Po roznásobení výše uvedené rovnice dostaneme rovnici tvaru:

$$N = (n_0 + n_1 P + n_2 P^2) \quad (\text{Kč/h}) \quad (4.6)$$

přičemž

$$n_0 = a_0 \cdot \sum k_{pn} \quad (4.7)$$

$$n_1 = a_1 \cdot \sum k_{pn} \quad (4.8)$$

$$n_2 = a_2 \cdot \sum k_{pn} \quad (4.9)$$

kde n_0 , n_1 a n_2 představují aproximační konstanty nákladových charakteristik.

Poměrný nákladový přírůstek poté bude:

$$n = \frac{dN}{dP} = n_1 + 2n_2P \quad (\text{Kč/MWh}) \quad (4.10)$$

A měrné náklady budou:

$$n_m = \frac{N}{P} = \frac{n_0 + n_1P + n_2P^2}{P} \quad (\text{Kč/MWh}) \quad (4.11)$$

Hospodárné rozdělení výkonů mezi paralelně pracující bloky, a tak splnění požadavku v podobě minimálních provozních nákladů ES, spočívá v nalezení minima funkce nákladů v ES. Náklady ES pro jednotlivé hodnoty celkového činného a jalového zatížení budou tedy funkcí činných a jalových výkonů jednotlivých prvků, které se podílejí na pokrytí tohoto zatížení.

Celkové provozní náklady v ES tedy jsou

$$N = \sum_{i=1}^{n,m} N_i(P_i, Q_i) \quad (\text{Kč}) \quad (4.12)$$

kde n je počet zdrojů činného výkonu ES, m je počet zdrojů jalového výkonu v ES, N_i jsou variabilní náklady i -tého zdroje, P_i a Q_i jsou činný a jalový výkon i -tého zdroje.

Aby předchozí rovnice platila, musí být dodrženy bilanční podmínky:

$$\varphi = P_1 + P_2 + \dots P_n - P_s - P_z = 0 \quad (4.13)$$

$$\psi = Q_1 + Q_2 + \dots Q_m - Q_s - Q_z = 0 \quad (4.14)$$

a splněna veškerá provozní omezení, tedy

$$P_i^2 + Q_i^2 \leq S_{i \max}^2$$

a

$$P_{i \max} \geq P_i \geq P_{i \min}$$

a to pro všechny zdroje činných a jalových výkonů, stejně tak jako

$$Q_{i \max} \geq Q_i \geq Q_{i \min}$$

a

$$U_{i \max} \geq U_i \geq U_{i \min}$$

pro všechny uzly ES. Ve výše uvedených vztazích jsou:

P_s a Q_s celkové činné a jalové zatížení v ES

P_z a Q_z celkové ztráty činného a jalového výkonu v ES

P_i, Q_i a S_i celkový činný, jalový a zdánlivý výkon i -tého zdroje

U_i napětí v i -tém uzlu sítě

Nebudeme-li uvažovat provozní omezení, můžeme psát:

$$N = \sum_{i=1}^n N_i(P_i) \quad (\text{Kč}) \quad (4.15)$$

Tento vztah poté vyřešíme pomocí Lagrangeovy funkce, resp. Lagrangeovy metody neurčitých multiplikátorů, která se řeší nalezením extrému funkce za splnění vazebních podmínek, které jsou popsány výše. Abychom mohli rozdělit výkon v ES ideálně tak jak chceme, tedy aby celkové náklady byly minimální, musíme nalézt extrém funkce (4.15). Abychom získali kýžené řešení, musíme sestavit tzv. Lagrangeovu pomocnou funkci a nalézt minimum. Lagrangeova pomocná funkce má tvar:

$$L_{pom} = N + \lambda_1 \varphi \Rightarrow \min \quad (4.16)$$

kde λ je vektor Lagrangerových multiplikátorů.

Volný extrém funkce bude:

$$\frac{\partial L}{\partial P_1} = \frac{\partial N_1}{\partial P_1} + \lambda \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_1}\right) = 0 \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_n} = \frac{\partial N_n}{\partial P_n} + \lambda \left(1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_n}\right) = 0 \quad (4.18)$$

Vyřešením výše uvedeného vztahu získáme kritérium hospodárného rozdělení výkonů:

$$-\lambda = \frac{\frac{\partial N_1}{\partial P_1}}{1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_1}} = \frac{\frac{\partial N_2}{\partial P_2}}{1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_2}} = \dots = \frac{\frac{\partial N_n}{\partial P_n}}{1 - \frac{\partial \Delta P}{\partial P_n}} \quad (4.19)$$

Pokud bychom neuvažovali činné ztráty v sítích, poté by kritérium pro nejekonomičtější rozdělení výkonů bylo dáno vztahem:

$$-\lambda = \frac{\partial N_1}{\partial P_1} = \frac{\partial N_2}{\partial P_2} = \dots = \frac{\partial N_n}{\partial P_n} \quad (4.20)$$

Z výše uvedeného tedy vyplývá, že nejhospodárnější rozdělení výkonů, pokud neuvažujeme činné ztráty, je při rovnosti poměrných přírůstků nákladů

$$b_1 = b_2 = \dots = b_i \quad (4.21)$$

přičemž b_i je poměrný přírůstek nákladů, který je vyjádřen vztahem

$$b_i = \frac{\partial N_i}{\partial P_i} \quad (4.22)$$

4.2.1 Příklad optimálního rozdělení výkonů mezi dva paralelně spolupracující bloky (výkony nevybočují z regulačních rozsahů bloků)

Zadání:

Mějme zadány nákladové charakteristiky dvou paralelně pracujících bloků:

$$N_1 = (789,45 + 7,45P_1 + 0,00115P_1^2) \quad [\text{Kč/h}]$$

$$N_2 = (1201,8 + 7,39P_2 + 0,00082P_2^2) \quad [\text{Kč/h}]$$

Regulační rozsah těchto bloků je:

$$100 \leq P_1 \leq 700 \quad [\text{MW}]$$

$$200 \leq P_2 \leq 900 \quad [\text{MW}]$$

Úkol:

Určit optimální rozdělení výkonů mezi dva paralelně spolupracující bloky. Požadované zatížení je $L = 800 \text{ MW}$.

Výpočet:

Z předchozí kapitoly víme, že pokud mají být výkony optimálně rozděleny, tak se vychází z rovnosti poměrných přírůstků nákladů. Provedeme tedy parciální derivaci nákladů podle příslušných výkonů.

$$b_1 = \frac{\partial N_1}{\partial P_1} = 7,45 + 0,00230P_1$$

$$b_2 = \frac{\partial N_2}{\partial P_2} = 7,39 + 0,00164P_2$$

Nyní sestavíme podmínku pro optimalizaci.

$$b_1 = b_2$$

$$7,45 + 0,00230P_1 = 7,39 + 0,00164P_2$$

Přičemž víme, že platí

$$L = P_1 + P_2$$

$$800 = P_1 + P_2$$

$$P_1 = 800 - P_2$$

Máme zde jednoduchou soustavu rovnic o dvou neznámých, kterou lehce vyřešíme

$$7,45 + 0,00230 \cdot (800 - P_2) = 7,39 + 0,00164P_2$$

$$P_2 = 482,23 \text{ MW}$$

$$P_1 = 800 - 482,23 = 317,77 \text{ MW}$$

Odpověď:

Optimální rozdělení mezi dva paralelně pracující bloky je při požadovaném zatížení 800 MW – $P_1 = 317,77 \text{ MW}$ a $P_2 = 482,23 \text{ MW}$.

4.2.2 Příklad optimálního rozdělení výkonů při dvou paralelně pracujících blocích (výkon některého z bloků je mimo regulační rozsah)

Zadání:

Mějme zadány nákladové charakteristiky dvou paralelně pracujících bloků:

$$N_1 = (7198,5 + 180,6P_1 + 0,81P_1^2) \quad [\text{Kč/h}]$$

$$N_2 = (13097,8 + 183,9P_2 + 0,34P_2^2) \quad [\text{Kč/h}]$$

Regulační rozsah těchto bloků je:

$$50 \leq P_1 \leq 120 \quad [\text{MW}]$$

$$130 \leq P_2 \leq 200 \quad [\text{MW}]$$

Úkol:

Určit optimální rozdělení výkonů mezi dva paralelně spolupracující bloky. Požadované zatížení je $L = 300 \text{ MW}$.

Výpočet:

Z předchozí kapitoly víme, že pokud mají být výkony optimálně rozděleny, tak se vychází z rovnosti poměrných přírůstků nákladů. Provedeme tedy parciální derivaci nákladů podle příslušných výkonů.

$$b_1 = \frac{\partial N_1}{\partial P_1} = 180,6 + 1,62P_1 \qquad b_2 = \frac{\partial N_2}{\partial P_2} = 183,9 + 0,68P_2$$

Nyní sestavíme podmínku pro optimalizaci.

$$\begin{aligned} b_1 &= b_2 \\ 180,6 + 1,62P_1 &= 183,9 + 0,68P_2 \end{aligned}$$

Přičemž víme, že platí

$$\begin{aligned} L &= P_1 + P_2 \\ 300 &= P_1 + P_2 \\ P_1 &= 300 - P_2 \end{aligned}$$

Máme zde jednoduchou soustavu rovnic o dvou neznámých, kterou lehce vyřešíme

$$180,6 + 1,62 \cdot (300 - P_2) = 183,9 + 0,68P_2$$

$$P_2 = 209,87 \text{ MW}$$

$$P_1 = 300 - 209,87 = 90,13 \text{ MW}$$

Můžeme vidět, že optimální výkon druhého bloku je mimo regulační rozsah bloku. Musíme proto udělat korekci. Tu provedeme tak, že výkon druhého bloku nastavíme do maxima povoleného regulačního rozsahu. Poté doregulujeme výkon prvního bloku.

$$P_2 = 200 \text{ MW} \qquad P_1 = 300 - 200 = 100 \text{ MW}$$

Odpověď:

Optimální rozdělení mezi dva paralelně pracující bloky je při požadovaném zatížení 300 MW – $P_1 = 100 \text{ MW}$ a $P_2 = 200 \text{ MW}$.

5 ENERGETICKO-EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ NAVRŽENÉHO TECHNICKÉHO ŘEŠENÍ

5.1 Matematický model

Součástí bakalářské práce je matematický model zhotoven v tabulkovém procesoru Excel od společnosti Microsoft. V tomto modelu, který je rozdělen na dva listy, je prakticky znázorněna veškerá problematika, kterou rozebírá tato bakalářská práce.

Obsah v první příloze modelu (pojmenována – PřílohaA_Spolupráce+optimalizace) by se dal rozdělit v podstatě na dvě výpočtové části. První část se zabývá problematikou optimálního rozdělení výkonů mezi paralelně pracujícími bloky, kdežto druhá část počítá účinnosti a měrné spotřeby jednotlivých bloků. Celý výpočet vychází z nákladových charakteristik jednotlivých uhelných bloků. Na základě vstupního požadavku, požadovaného zatížení, model provede výpočet optimalizace výkonů mezi třemi bloky a spočítá variabilní provozní náklady a měrné náklady. Algoritmus je naprogramovaný tak, aby optimalizoval výkony i při jejich vybočení z regulačních rozsahů. Model neumí reagovat na změnu aproximačních konstant nákladových charakteristik a regulačních rozsahů jednotlivých bloků, tyto hodnoty jsou pevně zadány. Algoritmus v druhé části počítá měrné náklady a účinnosti bloků. Schéma jednotlivých bloků se liší, aby bylo možno na základě rozdílného technologické konstrukce bloků porovnávat rozdíly ve výsledcích. Jako vstupní požadavek se bere již vypočítaný optimalizovaný výkon pro jednotlivý blok z první části. Pokud bychom vycházeli ze spotřebních charakteristik bloku, potom bychom po výpočtu optimálních výkonů mohli dosadit do vztahu pro spotřební charakteristiku a rovnou bychom měli spotřebu bloku za jednotku času. Jelikož se ale při výpočtu výkonové optimalizace vychází z nákladových charakteristik a ne ze spotřebních, je třeba pro výpočet měrných spotřeb ještě zadat parametry bloku.

Druhá příloha modelu (pojmenována – PřílohaB_Výpočet technologických schémat) se zabývá výpočty měrných spotřeb a účinností nezávazně na optimalizaci výkonů mezi třemi paralelně pracujícími bloky. Obsluha modelu tedy může zadat jakýkoliv požadovaný výkon. Posléze se zadají parametry bloku a algoritmus vypočítá množství teplotnosné látky, výkon kotle, příkon kotle, účinnost bloku a měrné spotřeby. Model obsahuje pět různých schémat výroby.

5.2 Vyhodnocení navrženého technického řešení

Model provádí v příloze A optimalizaci paralelně spolupracujících výkonů tak, aby byly proměnné provozní náklady na výrobu co nejnižší. Je zřejmé, že čím větší výkon je potřeba na bloku vygenerovat, tím větší náklady se musí vynaložit. V příloze B můžeme vidět, že nejvyšší účinnosti při stejných vstupních parametrech dosahuje blok, který má tři regenerační ohříváky, druhou nejvyšší účinnost má blok s dvojnásobným přehříváním páry, poté následuje blok pouze s jedním mezipřehříváním a nejnižší účinnost má podle očekávání blok, který nemá ve svém technologickém schématu žádnou komponentu ke zvyšování tepelné účinnosti. Rovněž je zde vyobrazeno a spočítáno schéma kogenerační jednotky. Ta má podle očekávání také vcelku vysokou účinnost. Navržený model může posloužit jako dobrá kontrolní pomůcka pro posluchače předmětu výroba elektrické energie. Posluchači tohoto předmětu tak mohou díky pěti různým variantám sestavení bloku vyzkoušet hodně možných variant z různými parametry, ale taká mohou díky modelu daleko rychleji počítat výsledné hodnoty. Jelikož je model přehlednější než počítání s kalkulačkou, pravděpodobnost udělení numerické chyby je velmi malá.

ZÁVĚR

Bakalářská práce se v první části zabývala základní problematikou rozvodu elektrické energie. Z výroby až ke spotřebiteli elektřina putuje přes přenosovou a distribuční soustavu. Přenosová, nadřazená, soustava vede elektřinu na velké vzdálenosti a to na napěťové hladině ZVN a VVN. Využití takto vysokého napětí má svoje opodstatnění, které spočívá v minimalizaci ztrát při vedení elektrické energie. Přenosová soustava vede elektrickou energii nejprve do rozvodu, kde se transformuje a distribuční soustava pak slouží jako přímý rozvod elektřiny ke spotřebitelům.

V druhé části se práce zabývá výrobou elektrické energie a problematikou zvyšování účinnosti kondenzačních tepelných elektráren. Za posledních pár let dochází v České republice, ale také v celé Evropě, k značnému nástupu tzv. ekologicky čistých zdrojů a obnovitelných zdrojů, kam můžeme řadit např. vodu, vítr, slunce, biomasu a geotermální energii. Kondenzační tepelná elektrárna slouží pouze na výrobu elektrické energie a využívá k tomu principu Rankin-Clausiova tepelného oběhu, a jak už z názvu elektrárny vyplývá, využívá k roztočení generátoru kondenzační parní turbínu. Existují čtyři hlavní způsoby jak se dá zvýšit účinnost tepelného oběhu, a tím pádem i celková účinnost bloku. Hovoříme tedy o zvyšování parametrů vstupní páry, mezipřihřívání páry, snížení kondenzačního tlaku a regeneračním ohřevu. V dnešní době už velká většina moderních elektráren využívá všechna tato technologická opatření pro zvyšování účinnosti. Účinnost kondenzačních tepelných elektráren se u starších bloků pohybuje kolem 30 % a u moderních nadkritických bloků se pohybuje do 40 %. Z pohledu efektivnosti musíme dodat, že v dnešní době je technologicky výhodnější provozovat elektrárny KVET, než oddělenou výrobu. Pokud budeme provozovat oddělenou výrobu elektrické energie a tepla, dochází zde dohromady ke ztrátám na palivu asi okolo 90 %, kdežto u elektráren kogeneračních jsou tyto ztráty okolo 25 %.

Problematika paralelní spolupráce elektrárenských bloků je rozebrána jako další část bakalářské práce. V dnešní době převládá většina bloků dodává elektrickou energii do sítě právě tímto způsobem. Aby bylo možno provozovat bloky paralelně, musí splňovat určité kvalitativní požadavky, které si elektrizační soustava žádá. Především se jedná o jasně stanovenou frekvenci a napětí. Můžeme tvrdit, že paralelní spolupráce elektrárenských bloků představuje velmi důležitou roli pro chod elektrizační soustavy, a to hlavně při poruchách, systémové odchylce nebo při potřebě regulace. Česká přenosová soustava je řízena a kontrolována dispečinkem společnosti ČEPS, a. s., jehož jednání a následný dopad na elektrizační soustavu je při nastání jedné z výše uvedených událostí, tedy např. poruchy, náhlého vyřazení bloku z chodu nebo nesymetrie soustavy, klíčový. Dispečink ČEPS tak díky podpůrným službám, které má nasmlouvané u výrobců elektrické energie, dokáže odvrátit vážné následky v provozu elektrizační soustavy a dopravě elektrické energie ke spotřebiteli, které mohou v mnohých situacích vyústit až blackoutem. V rámci této části byl rovněž sestav matematický model, který na základě nákladových charakteristik a požadovaného zatížení počítá optimální rozdělení výkonů mezi třemi paralelně pracujícími bloky. Model umí rovněž vypočítat měrné spotřeby a účinnosti bloků v závislosti na optimalizovaném výkonu pro daný blok. Výhodou navrženého modelu je možnost provádění výpočtů s libovolně zvoleným výkonem a parametry bloku. Model nabízí pět různých technologicky provedených bloků. Tím pádem je možno mezi různými výpočty dobře porovnávat. Model by určitě mohl být užitečný pro posluchače předmětu výroba elektrické energie.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] TOMAN, Petr. Provoz distribučních soustav. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [2] IBLER, Zdeněk. Technický průvodce energetika. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 615 s. ISBN 80-7300-026-1.
- [3] KADRNOŽKA, Jaroslav. Tepelné elektrárny a teplárny. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1984, 607 s.
- [4] DOLEŽAL, Jaroslav. Jaderné a klasické elektrárny. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 259 s. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [5] REISS, Ladislav, Karel MALÝ a Zdeněk PAVLÍČEK. Teoretická elektroenergetika I. 1. vyd. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1967, 337 s. Edícia elektrotechnickej literatúry (Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry).
- [6] MATOUŠEK, Antonín. Výroba elektrické energie. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Ústav elektroenergetiky, 2007, 139 s. ISBN 978-80-214-3317-5.
- [7] LUKÁČ, Petr, Blanka RŮŽIČKOVÁ, Robert ZELENKA a Nikita POLJAKOV (ed.). Energy Outlook 2013 [online]. 2013, : 87 S. [cit. 2015-11-09]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/energy-outlook-2013.html>
- [8] MOLEK, Tomáš. Uhlé kondenzační elektrárny. OENERGETICE.CZ [online]. 2015, 2015-07-12 [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/typy-elektren/uhelne-kondenzacni-elektreny/>
- [9] KOCMAN, Stanislav. Synchronní stroje [online]. 2004, : 6 s. [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_synchronni%20stroje_bc%20FS.pdf
- [10] BARBERSEK, Daniel. Engine Generator Paralleling Concepts [online]. 2012 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: http://ewh.ieee.org/r3/atlanta/ias/2012-2013_Presentations/IEEE%20Engine%20Generator%20Paralleling%20Concepts.pdf
- [11] Electric machines: Parallel operation [online]. Calgary [cit. 2015-12-11]. Dostupné z: http://people.ucalgary.ca/~aknigh/electrical_machines/synchronous/parallel/parallel_intro.html
- [12] KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY - část II.: Podpůrné služby (PpS). ČEPS, a. s. [online]. 2015, 2015-05-01 [cit. 2015-12-08]. Dostupné z: https://www.ceps.cz/CZE/Media/Tiskove-zpravy/Documents/ČástII_15_fin.pdf
- [13] VOBOŘIL, David. Podpůrné služby - přenos elektřiny. OENERGETICE.CZ [online]. 2015, 2015-06-22 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/eлектроenergetika/podpurne-sluzby-prenos-elektřiny/>
- [14] Amin, U., Ahmad, G., Zahoor, S. and Durrani, F. (2014) Implementation of Parallel Synchronization Method of Generators for Power & Cost Saving in University of Gujrat. Energy and Power Engineering, 6, 317-332. [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.4236/epe.2014.610027>
- [15] Rozdělení elektrizační soustavy v České republice, [obrázek]. V: Jak zjistím ke které distribuční soustavě elektřiny patřím a mohu si zvolit jinou? [cit. 2015-12-01] Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energii/211-jak-zjistim-ke-ktere-distribucni-soustave-elektřiny-patrim-a-mohu-si-zvolit-jinou>

- [16] MASTNÝ, Petr. Výroba elektrické energie – Energetické výrobní. [online prezentace]. Brno: Ústav elektroenergetiky, VUT, [cit. 2015-10-25]. Dostupný z: <https://moodle.vutbr.cz>
- [17] MATOUŠEK, A. Výroba elektrické energie. Brno: Nakladatelství Novotný, 2007, 139 stran. ISBN 978-80-214-3317-5
- [18] Dispečink ČEPS, a.s., [obrázek]. V: ČEPS v loni vydělal více než miliardu [cit. 2015-12-14] Dostupné z: <http://iuhli.cz/ceps-loni-vydelal-vice-nez-miliardu/>
- [19] MATĚNA, Štěpán, Milan TŮMA a Jiří BRAUNER. Výroba a rozvod elektrické energie. 2., upr. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1978, 600 s. Řada elektrotechnické literatury.
- [20] MATĚNA, Štěpán. Výroba a rozvod elektrické energie II. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1975, 664 s.
- [21] IBLER, Zdeněk. Technický průvodce energetikou. Praha: BEN - technická literatura, 2003, 384 s. ISBN 80-7300-097-0.
- [22] CHEMIŠINEC, Igor. Obchod s elektřinou. Praha: Conte, c2010, 201 s. ISBN 978-80-254-6695-7.
- [23] ONDRÁŠEK, Milan. Elektrárny II. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1988, 240 s.
- [24] ELLIOTT, Thomas C., Kao CHEN a Robert C. SWANEKAMP. Standard handbook of powerplant engineering. 2nd ed. New York: McGraw Hill, c1998. ISBN 0070194351.