



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

PŘIPOJENÍ ELEKTROKOTLE PRO POSKYTOVÁNÍ PODPŮRNÝCH SLUŽEB V TEPLÁRNÁCH

ELECTRIC BOILER CONNECTION IN HEAT PLANT FOR PROVIDING ANCILLARY SERVICES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Ditrych

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vojtěch Wasserbauer

BRNO 2017

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**
Ústav elektroenergetiky

Student: Marek Ditrych

Ročník: 3

NÁZEV TÉMATU:

ID: 174276

Akademický rok: 2016/17

Připojení elektrokotle pro poskytování podpůrných služeb v teplárnách

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Úvod - instalace elektrokotle pro poskytování podpůrných služeb (z důvodu využití obnovitelných zdrojů)
2. Princip elektrokotle
3. Princip využití elektrokotle pro poskytování podpůrných služeb
4. Způsob připojení elektrokotle v Elektrárnách Opatovice (3 druhy připojení, z toho jedno praktické)
5. Zhodnocení využití (využití podpůrných služeb)

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 5.6.2017

Vedoucí práce: Ing. Vojtěch Wasserbauer

Konzultant:

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:

DITRYCH, M. *Připojení elektrokotle pro poskytování podpůrných služeb v teplárnách*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 65 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vojtěch Wasserbauer.

Jako autor uvedené diplomové (bakalářské) práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové (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.

.....

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá využitím elektrokotle pro rozšíření nabízených podpůrných služeb v teplárnách. V práci jsou popsány jednotlivé systémové a podpůrné služby, díky kterým se regulují výkonové výkyvy sítě. Za těmito výkyvy v poslední době stojí mimo jiné i vyšší výroba z obnovitelných zdrojů energie. Práce popisuje různé druhy elektrokotlů a jejich funkčnost.

V práci je názorně ukázáno možné řešení využití elektrokotle v elektrárně Opatovice. Je navrženo kabelové vedení k elektrokotli. Z tohoto důvodu je vypočítán ekvivalentní oteplovací zkratový proud v místě elektrokotle.

KLÍČOVÁ SLOVA: systémové služby, podpůrné služby, sekundární regulace, terciární regulace, obnovitelný zdroj energie, elektrokotel, teplárna, kabelové vedení, ekvivalentní oteplovací zkratový proud

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with using the electric boiler for extension ancillary services in heating plant. The system and support services are described in the thesis, because the ancillary services regulate an energy deflection. The system and ancillary services are described in the thesis. Thanks to these services an energy deflection is regulated. The thesis describes different types of electric boilers and there functions.

In the thesis is shown the possible solution of using an electric boiler in heating plant Opatovice. The cable conduction is designed for a power of electric boiler. For this reason, there is calculated the equivalent warming short-circuit current close to the electric boiler.

KEY WORDS: system services, ancillary services, secondary regulation, tertiary regulation, renewable energy, electric boiler, heating plant, cable conduction, equivalent warming short-circuit current

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
1 ÚVOD.....	11
2 VLIV OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ ENERGIE NA REGULACI ENERGIE.....	12
2.1 OBNOVITELNÉ ZDROJE ENERGIE	12
2.1.1 PODPORA VÝROBY ELEKTRINY Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ ELEKTRINY	14
2.2 SYSTÉMOVÉ SLUŽBY	14
2.2.1 UDRŽOVÁNÍ KVALITY ELEKTRINY	15
2.2.2 UDRŽOVÁNÍ ROVNOVÁHY V REÁLNÉM ČASE	17
2.2.3 OBNOVENÍ PROVOZU	17
2.2.4 DISPEČERSKÉ ŘÍZENÍ.....	17
2.3 PODPŮRNÉ SLUŽBY	17
2.3.1 NÁKUP NA VOLNÉM TRHU	18
2.3.2 NÁKUP PROSTŘEDNICTVÍM PŘÍMĚ SMLOUVY S POSKYTOVATELEM	19
2.3.3 VÝPOMOC ZE SYNCHRONNĚ PRACUJÍCÍCH SOUSTAV	19
2.4 TEPLÁRNY	20
2.4.1 PODPŮRNÉ SLUŽBY V TEPLÁRNÁCH.....	22
3 PRINCIP ELEKTROKOTLE	23
3.1 VYUŽITÍ ELEKTROKOTLE.....	23
3.2 DRUHY ELEKTROKOTLŮ.....	23
3.2.1 ELEKTROKOTEL NA VÝROBU PÁRY.....	24
3.2.2 ELEKTROKOTEL NA VÝROBU HORKÉ VODY	27
4 PRINCIP VYUŽITÍ ELEKTROKOTLE PRO POSKYTOVÁNÍ PODPŮRNÝCH SLUŽEB	30
4.1 VYUŽITÍ ELEKTROKOTLE VE FIKTIVNÍM BLOKU PRO POSKYTOVÁNÍ SR±.....	30
4.2 VYUŽITÍ ELEKTROKOTLE VE FIKTIVNÍM BLOKU PRO POSKYTOVÁNÍ MZ±.....	31
4.3 NAPOJENÍ ELEKTROKOTLE DO TEPLÁRENSKÉHO OKRUHU	32
4.3.1 SÉRIOVÉ ZAPOJENÍ ELEKTROKOTLE PŘED OHŘÍVÁKEM VODY	32
4.3.2 PARALELNÍ ZAPOJENÍ ELEKTROKOTLE S OHŘÍVÁKEM VODY	33
5 ZPŮSOB PŘIPOJENÍ ELEKTROKOTLE V ELEKTRÁRNÁCH OPATOVICE	35
5.1 ELEKTRÁRNA OPATOVICE A.S.	35
5.1.1 PARAMETRY TURBÍN.....	36
5.1.2 VYVEDENÍ ELEKTRICKÉHO VÝKONU ELEKTRÁRNY	37
5.1.3 VYVEDENÍ TEPELNÉHO VÝKONU ELEKTRÁRNY	37
5.2 PŘIPOJENÍ ELEKTROKOTLE K ELEKTRÁRNĚ OPATOVICE	38
5.2.1 VÝBĚR ELEKTROKOTLE	38
5.2.2 UMÍSTĚNÍ ELEKTROKOTLE V ELEKTRÁRNĚ OPATOVICE.....	39

5.2.3 PŘIVEZENÍ VÝKONU K ELEKTROKOTLI	40
5.2.3.1 Vyvedení výkonu od generátoru z hladiny 10,5 kV	40
5.2.3.2 Vyvedení výkonu z rozvodny vlastní spotřeby z hladiny 6,3 kV	41
5.2.3.3 Vyvedení výkonu z venkovní rozvodny 110 kV	42
5.2.4 OCHRANY ELEKTROKOTLE	43
5.2.5 NÁVRH KABELOVÉHO VEDENÍ K ELEKTROKOTLI.....	46
5.2.5.1 Výběr kabelu	46
5.2.5.2 Dimenzování vodiče podle tepelných účinků zkratového proudu.....	49
5.2.6 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	59
5.2.6.1 Příklad využití elektrokotle v Elektrárně Opatovice	60
6 ZÁVĚR.....	63
POUŽITÁ LITERATURA	64

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Vývoj výroby elektřiny z OZE v ČR [2]</i>	13
<i>Obr. 2-2 Rozpoložení distributorů v ČR [9]</i>	15
<i>Obr. 2-3 Struktura regulace Q a U v PS [10]</i>	16
<i>Obr. 2-4 Příklad regulační energie [14]</i>	20
<i>Obr. 2-5 Protitlaká turbína</i>	21
<i>Obr. 2-6 Odběrová turbína</i>	21
<i>Obr. 3-1 Průřez ELK pro výrobu páry [16]</i>	24
<i>Obr. 3-2 ELK pro výrobu páry [17]</i>	26
<i>Obr. 3-3 Částečný Jet-type ELK [18]</i>	27
<i>Obr. 3-4 ELK pro výrobu horké vody [17]</i>	28
<i>Obr. 3-5 Ukázka elektrod bez stínění se zemnicí elektrodou [19]</i>	29
<i>Obr. 4-1 Rozšíření regulace SR± bloku s ELK</i>	31
<i>Obr. 4-2 Využívání ELK pro poskytování MZ</i>	32
<i>Obr. 4-3 Sériové zapojení elektrokotle s ohřívákem vody</i>	33
<i>Obr. 4-4 Paralelní zapojení elektrokotle s ohřívákem vody</i>	34
<i>Obr. 5-1 Elektrárna Opatovice a.s. [20]</i>	35
<i>Obr. 5-2 Částečné schéma páry v Elektrárně Opatovice</i>	37
<i>Obr. 5-3 Schéma oběhové vody Elektrárny Opatovice</i>	38
<i>Obr. 5-4 Místo pro ELK</i>	39
<i>Obr. 5-5 ELK zapojený do teplotního okruhu</i>	40
<i>Obr. 5-6 Částečné schéma EOP 1</i>	41
<i>Obr. 5-7 Částečné schéma EOP 2</i>	42
<i>Obr. 5-8 Částečné schéma EOP 3</i>	43
<i>Obr. 5-9 Ochrany elektrokotle</i>	45
<i>Obr. 5-10 Počáteční schéma pro výpočet rázového zkratového proudu</i>	51
<i>Obr. 5-11 Postup výpočtu nárazového zkratového proudu</i>	53
<i>Obr. 5-12 Schéma konečné fáze výpočtu nárazového zkratového proudu</i>	54
<i>Obr. 5-13 Graf pro určení součinitele m [23]</i>	55
<i>Obr. 5-14 Graf pro určení součinitele n [23]</i>	56
<i>Obr. 5-15 Rozložení PpS v EOP</i>	60

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 5-1 Přepočítávací součinitelé pro okolní teploty vzduchu odlišné od referenční teploty 30°C [22].....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 5-2 Přepočítávací součinitelé proudové zatížitelnosti při seskupení několika více žilových kabelů v jedné vrstvě na vzduchu [22]</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 5-3 parametrů kabelu 22-AXEKVCEY.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 5-4 parametrů kabelu 22-CXEKVCEY.....</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 5-5 Materiálové konstanty [22]</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 5-6 Část tabulky dovolených provozních a maximálních teplot vodičů pro různé druhy izolace [22].....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 5-7 Ceny za jednotlivé PpS pro rok 2018.....</i>	<i>61</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Název veličiny	Jednotka
OZE	Obnovitelný zdroj energie	-
ČR	Česká republika	-
ČEPS	Česká energetická přenosová soustava	-
PpS	Podpůrné služby	-
SyS	Systémové služby	-
PS	Přenosová soustava	-
ES	Elektrizační soustava	-
f	Frekvence	[Hz]
P	Elektrický výkon	[W]
PR±	Primární regulace	-
SR±	Sekundární regulace	-
TR±	Terciární regulace	-
MZ5±	Minutová záloha 5minutová	-
MZ15±	Minutová záloha 15minutová	-
U	Napětí	[V]
Q	Jalový výkon	[VAr]
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla	-
ELK	Elektrokotel	-
VVN	Velmi vysoké napětí	-
EOP	Elektrárny Opatovice a.s.	-
TG	Turbogenerátor	-
SZT	Systém zásobování teplem	-
PDG	Provozní bod diagramu výkonu	[W]

1 ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá možným připojení elektrokotle (ELK), který realizuje část podpůrných služeb (PpS) v teplárnách. Elektrokotel by měl pomoci zvýšit regulační rozsah poskytovaných podpůrných služeb, které jsou lépe placenou komoditou než tzv. silová elektřina. Práce dále informuje o růstu využívání obnovitelných zdrojů energie (OZE) a o jeho následcích, které vedou k vyšší míře využívání podpůrných služeb. Podpůrné služby jsou zkráceně vysvětleny společně se systémovými službami (SyS) v následující kapitole. Tyto služby pomáhají udržet parametry sítě, které jsou jasně předepsané. Dodržování parametrů přenosové soustavy (PS) zajišťuje společnost ČEPS.

V práci se popisují principy a druhy elektrokotlů velkých výkonů pro teplárenské využití. Tato problematika je popsána v samostatné kapitole. Z těchto elektrokotlů se vybírá druh a výkon. Výrobci se nenacházejí na území České republiky, proto se musí brát v úvahu místo výroby a způsoby dopravy vybraného elektrokotle.

V práci se teoreticky řeší možnosti využití elektrokotle pro rozšiřování podpůrných služeb. Je pojednáváno jaké služby může elektrokotel poskytnout a jaké může rozšířit. Nutností instalace ELK je potřeba vyžít vyrobenou tepelnou energii. Tuto tepelnou energii lze jednoduše využít v teplárnách, kde může sloužit k ohřevu části oběhové vody v systému zásobování teplem (SZT). Důležité z tohoto hlediska je, kam instalovat výměník, který bude dodávat energii vyrobenou elektrokotlem. Respektive je nutno zvážit jaké jsou nejlepší možnosti zařazení elektrokotle do oběhu tepla.

Proto, aby byla dokázána nejlepší možnost zapojení ELK do teplárenského okruhu a také určit místo napájení, je nutné znát aktuální uspořádání technologie Elektrárny Opatovice (EOP). Bude tedy vybráno místo, kde bude ELK fyzicky postaven a napojen do teplárenského oběhu. V práci je dále popsáno a vybráno jedno ze tří teoreticky možných řešení jak přivést výkon k ELK. Nutností pro ověření zda vedení odolá rázovému zkratovému proudu, je tento proud spočítán a přepočítán na ekvivalentní oteplovací proud. V závěru vypracování práce je uvedeno finanční zhodnocení instalace ELK pro účely rozšíření nabízených PpS.

2 VLIV OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ ENERGIE NA REGULACI ENERGIE

Obecně platí, že spotřeba energie ve všech jejích uživatelských formách roste a poroste i nadále. Avšak je nepopíratelnou skutečností, že zásoby fosilních paliv jsou omezené, a že je nutné hledat i jiné zdroje, které by nahradily nejpoužívanější fosilní paliva.

Do skupiny fosilních paliv patří především uhlí, a to jak černé, které je kvalitněji prouhelněné, tak i hnědé uhlí, které je méně kvalitní, má vyšší obsah vody a síry a má přibližně poloviční výhřevnost. Těžba uhlí začala ve větším měřítku už v 17. století a odhaduje se, že světové zásoby uhlí by měly vydržet ještě asi 600 let. Podíl uhlí v české energetice je cca 49 %. Uhlí spalujeme v elektrárnách či teplárnách, poté mluvíme o kombinované výrobě elektrické energie a tepla. Další fosilní palivo je zemní plyn, který se nachází nad ložisky ropy. Zemní plyn se využívá ve velké míře v domácnostech, především k vytápění. Podíl zemního plynu v české energetice je cca 10 %. Jaderné palivo je palivo, z něhož se energie uvolňuje prostřednictvím jaderných reakcí, a to buď rozpadem (štěpením) nebo fúzí. V současné době se prakticky používá štěpení jaderného paliva v podobě oxidu uraničitého. Tato látka je uzavřena do hermeticky uzavřených tablet, které jsou skládány do prutů. Podíl jaderné energie v České republice je cca 20 %. [1] [2]

2.1 Obnovitelné zdroje energie

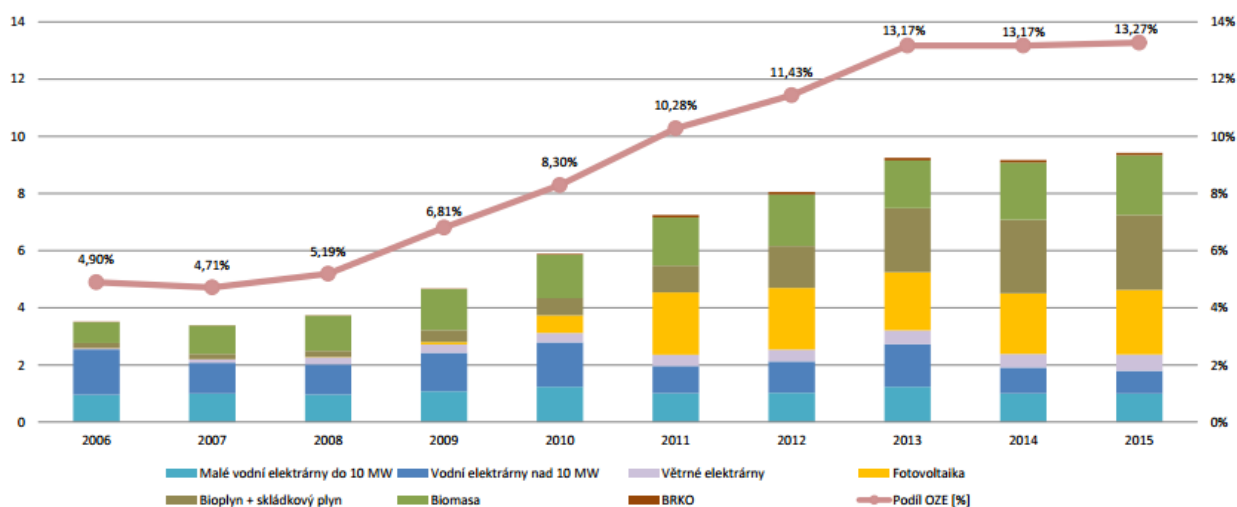
Obnovitelný zdroj energie (OZE) je označení některých vybraných, na Zemi přístupných forem energie, získané primárně především z jaderných přeměn v nitru Slunce. Dalšími zdroji jsou teplo zemského nitra a setrvačnost soustavy Země-Měsíc. Lidstvo je čerpá ve formách slunečního záření, větrné energie, vodní energie, energie přílivu, geotermální energie, biomasy a dalších. V celosvětovém měřítku představují OZE značný, ekologicky čistý potenciál, který by bylo teoreticky možné využít pro pokrytí současné celosvětové spotřeby energie. Celkový instalovaný výkon OZE k roku 2015 je 1849 GW, z toho 1064 GW je instalováno ve vodních elektrárnách, 227 GW ve fotovoltaických elektrárnách, 433 GW ve větrných elektrárnách, 106 GW je instalováno v elektrárnách které spalují biomasu a na zbytku se podílí geotermální energie. A celková spotřeba elektrické energie ve světě v roce 2015 činila 10269,5 TWh. Z toho vyplývá, že by roční spotřeba OZE zvládly, ale s plným využitím během dne i roku. Reálná výroba z obnovitelných zdrojů dosáhla v roce 2015 2208 TWh, což činí 21,5 %. Z čeho vyplývá, že pokrytí světové spotřeby jen OZE je nereálné. Je nutno brát v úvahu, že OZE mají omezené výkonové rozsahy jak během dne, tak i během roku. Samotné využití obnovitelných zdrojů je limitováno několika faktory, jako jsou velké investiční náklady a proměnlivá intenzita výroby v průběhu dne i roku, která má zásadní vliv na vyrobenou elektrickou energii z OZE. [3] [4]

Vodní energetika v České republice (ČR) nemá přírodní poměry pro budování nových vodních energetických děl. Určitý potenciál skýtají možnosti výstavby malých vodních elektráren a rekonstrukce stávajících, již nevyhovujících děl, čímž dosáhneme lepší účinnosti přeměny energie vody na elektrickou energii. Pro využití vodní energetiky jsou na našem území z hlediska průměrných průtoků, energeticky nejprůzračnější řeky Labe, Vltava a Morava. Ostatní toky umožňují výstavby děl s menší energetickou kapacitou. Nejvíce je využita řeka Vltava, na které je vybudována kaskáda vodních elektráren o celkovém výkonu 750 MW. Větrná energetika na našem území nemá příznivé podmínky na to, aby se využívala podobně jako například v Německu. Využívá se především v horských oblastech a vrchovinách, kde se vyskytuje průměrná rychlost větru nad hranicí 5 m/s, která je dostatečná k energetickému využití větru. Výroba elektrické

energie využitím přímé přeměny slunečního záření je známá již z 19. století. Samotný rozvoj fotovoltaických aplikací je závislý na technické úrovni a znalostech v oblasti fyziky polovodičů. V České republice je nejvhodnější oblast pro tuto přeměnu energie na Jižní Moravě a v jižních Čechách, kde je intenzita slunečního záření největší. Přeměna energie v aktivních systémech pomocí fotovoltaických panelů se v posledních letech výrazně rozvíjí. V roce 2010 jsme byli třetím největším provozovatelem slunečních elektráren na světě, celkový výkon činil 1,9 GWp. O velký rozvoj sluneční energetiky v ČR se postaralo mimo jiné výrazné snížení nákladů na výrobu solárních panelů, kdy v pěti letech do roku 2010 se náklady na fotovoltaický systém snížily v průměru o 48 % a náklady na modul o 41 %. Odvětví na základě růstu podněcovaného současnými vládními politikami podpor, reforem a odstraňování překážek na trhu očekává, že náklady budou dále klesat. Větší mírou za to může fakt, že Česká republika má závazky vůči Evropské unii. [1]

Základem pro intenzivnější využívání obnovitelných zdrojů energie byla směrnice Evropského parlamentu a Rady Evropy 2001/77/ES, resp. Směrnice Evropského parlamentu a rady Evropy 2009/28/ES, která tuto směrnici doplňuje a nahrazuje. Uvedené směrnice stanovují takzvané indikativní cíle. Ty jsou základním měřítkem při hodnocení využívání OZE. Dle textu směrnice 2009/28/ES má každý členský stát zajistit, aby se v roce 2020 vypočítaný podíl energie z obnovitelných zdrojů na hrubé konečné spotřebě energie, rovnal alespoň jeho celkovému národnímu cíli pro podíl energie z obnovitelných zdrojů v daném roce. Tyto závazné národní cíle jsou v souladu s cílem nejméně 20 % podílu energie z obnovitelných zdrojů na hrubé konečné spotřebě energie ve Společenství v roce 2020. Přičemž Česká republika musí do roku 2020 využívat 13 % energie z obnovitelných zdrojů. Dále navrhuje nový legislativní rámec propagace o využívání OZE v Evropské unii. Tím poskytne podnikatelské komunitě stabilitu, kterou potřebuje pro rozhodování o investicích do OZE, aby nasměrovala Evropu k čistší budoucnosti. [5]

V roce 2015 stoupl podíl obnovitelných zdrojů v Evropské unii na 16 %. Přičemž Česká republika splnila svůj limit, který měla splňovat do roku 2020 a dosáhla 13 % vyrobené energie z obnovitelných zdrojů už v roce 2013. Může za to velký vzestup fotovoltaické energie v roce 2010, který můžeme vidět na Obr. 2-1. Limit pro rok 2020 splnilo dalších 8 států (Bulharsko, ČR, Estonsko, Chorvatsko, Itálie, Rumunsko, Slovinsko, Finsko a Švédsko). Za tento vzestup vděčí mimo jiné také podpoře výroby elektřiny z OZE. [6]



Obr. 2-1 Vývoj výroby elektřiny z OZE v ČR [2]

2.1.1 Podpora výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů elektřiny

Výroba elektrické energie z OZE je v České republice podporována formou výkupních cen a zelených bonusů pro výrobní elektřiny z podpory pro podporované zdroje energie. Jednotlivé podpory jsou detailněji popsány v Energetickém věštníku vydaném českým energetickým úřadem [7]. Obchodníci s elektřinou jsou povinni vykupovat tuto elektřinu.

Některé typy OZE jsou závislé na počasí a nejsou stabilními zdroji energie. Do těchto zdrojů můžeme zahrnout fotovoltaické a větrné elektrárny. Při náhlé velké změně dodávané energie z těchto zdrojů, může dojít k přebytku či nedostatku elektrické energie v elektrizační soustavě (ES). Tato změna ovlivňuje parametry sítě, které má na starosti společnost ČEPS. Pokud dojde ke kolísání energie, využije dostupné prostředky v rámci PpS k udržení parametrů sítě zdroji, které poskytují regulační energii. Tyto prostředky se nazývají podpůrnými službami (PpS), které slouží k zajištění systémových služeb (SyS).

2.2 Systémové služby

Systémové služby (SyS) jsou činnosti ČEPS, kterými zajišťuje kvalitu a spolehlivost dodávky elektřiny na úrovni přenosové soustavy (PS) a plnění mezinárodních závazků a podmínek propojení elektrizační soustavy (ES). Kvalita je udávána zejména velikostí frekvence a napětí, která je definovaná kodexem PS. Spolehlivostí dodávky se rozumí nepřerušenosť dodávky v odběrných místech PS definovaná průměrným počtem a trvání dílčích výpadků dodávky v jednotlivých předacích místech. Systémové služby (SyS) jsou placeny jako součást ceny za elektřinu zákazníky. Peníze za SyS jsou placeny ČEPS prostřednictvím provozovatelů regionálních distribučních soustav, jako jsou ČEZ Distribuce a.s. v severních Čechách a na severní Moravě, E.ON Česká republika s.r.o. v jižních Čechách a na jižní Moravě a PREdistribuce a.s. na území hlavního města Prahy. Podrobnější rozložení území distributorů v ČR vidíme na Obr. 2-2. Výše ceny za SyS jsou každoročně stanovována Energetickým úřadem vydáním Cenového rozhodnutí pro následující kalendářní rok. [8]



Obr. 2-2 Rozpoložení distributorů v ČR [9]

Systémové služby jsou:

- Udržování kvality elektřiny.
- Udržování výkonové rovnováhy v reálném čase.
- Obnovení provozu.
- Dispečerské řízení.

2.2.1 Udržování kvality elektřiny

Do této služby patří **udržení souhrnné výkonové zálohy pro primární regulaci frekvence**. Účelem primární regulace frekvence je zvyšovat (snižovat) výkon vyráběné elektrické energie a tím zastavit pokles (růst) odchylky frekvence v časovém intervalu několika sekund. Tyto odchylky vznikají narušením výkonové rovnováhy mezi zatížením a výkonem zdrojů. Například, neočekávané odstávky bloku, či odpojení velkého odběru výkonu.

Dále sem patří **sekundární regulace f a P** , která je zajišťována automaticky sekundárním regulátorem frekvence a předávaných výkonů, který je umístěn na dispečinku ČEPS. Na tento regulátor jsou dálkově připojeny výkonové regulátory bloků poskytujících podpůrné služby sekundární regulace výkonu bloku. Při obnovení výkonové rovnováhy navazuje sekundární regulace f a P na primární regulaci frekvence tak, aby postupně nahradila výkon, který byl poskytnut na principu solidarity v propojené soustavě. To znamená, že při výkonové rovnováze mezi zatížením a výkonem zdrojů se zapojují do vyrovnávání výkonu zdroje v propojených soustavách, které jsou zapojeny do primární regulace.

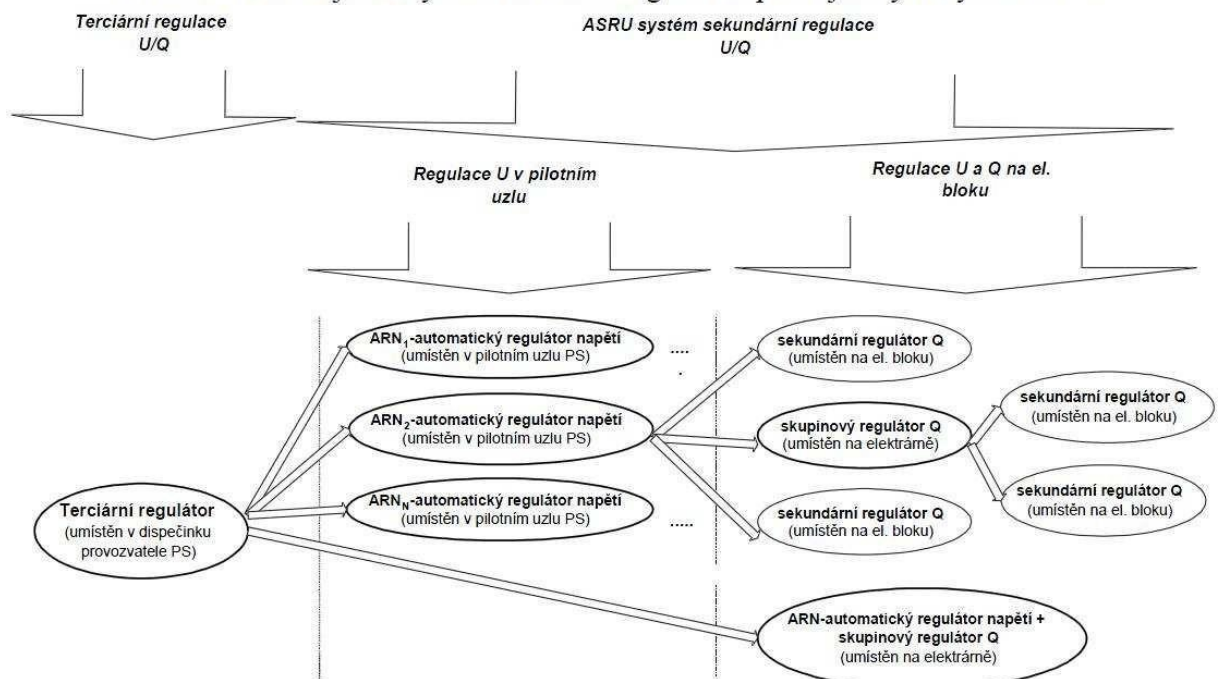
V udržení kvality nesmí chybět **sekundární regulace napětí**, která automaticky udržuje zadané napětí v pilotních uzlech přenosové soustavy a minimalizuje přetoky jalového výkonu. Systém regulace je realizován pomocí automatického regulátoru napětí. Ten sleduje odchylku

skutečného napětí od napětí zadaného v pilotním uzlu, na kterou reaguje potřebným jalovým výkonem pro její doregulování. Do systému jsou zařazeny kompenzační tlumivky, které jsou využívány při vyčerpání příslušných regulačních rezerv alternátorů. Kompenzovat tlumivkami by se mělo dříve, než jsou vyčerpány zálohy na alternátorech. Na těch by měla být stálá rezerva jalového výkonu pro havarijní situace.

Je tu také **terciární regulace výkonu realizovaná pomocí MZ5 a MZ15**, která nahrazuje sekundární regulační zálohy, tedy výkon, který byl požit v rámci činnosti sekundární regulace f a P . Pro terciární zálohu je možné využívat točivou zálohu, nebo najíždět bloky podle potřeby rychle startující zálohy.

V neposlední řadě je zde **terciární regulace napětí**, která koordinuje zadaná napětí v pilotních uzlech pro bezpečný a ekonomický provoz ES jako celku. Samotná regulace je představována optimalizačním programem pracujícím na dispečinku ČEPS. Z obrázku je vidět že, terciární regulace tvoří vrchol v hierarchii řízení napětí a jalových výkonů v ES. [10]

Obrázek znázorňuje vazby v hierarchické regulaci napětí a jalových výkonů v ES.



Obr. 2-3 Struktura regulace Q a U v PS [10]

V neposlední řadě se **zajistí kvalita napěťové sinusovky**, protože s rozvojem polovodičových technologií roste počet zařízení založených na této bázi a to vede k rozšiřování použití i na vyšší napěťové vrstvy např. u fotovoltaických elektráren, kde se transformuje na vysoké napětí namodulované sinusové napětí. To může vést ke zkreslení průběhu napětí (výskyt vyšších harmonických), které zpětně negativně ovlivňuje jiné uživatele. Proto má ČEPS právo monitorovat a upravovat sinusový průběh, pomocí filtrů.

Nakonec se **zajistí stabilita přenosu**, která kontroluje a koordinuje činnost spočívající v zajištění stability přenosu činných výkonů a tlumení výkonových výkyvů v soustavě. Tuto kontrolu provádí ČEPS sledováním a vyhodnocováním měřených dějů v reálném čase a kontrolovanými výpočty stability. Díky této kontrole se navrhuje opatření pro nastavení hlídačů meze podbuzení, zesílení regulátorů, buzení a nastavování konstant systémových stabilizátorů v regulátorech buzení jednotlivých generátorů.

2.2.2 Udržování rovnováhy v reálném čase

Tato služba využívá technickoorganizační prostředky, jako jsou sekundární regulace f a P , nebo MZ5, MZ15. Obě tyto systémové služby jsou popsány v kapitole 2.2.1.

2.2.3 Obnovení provozu

Jako hlavní prostředek se využívá plán obnovy spolu s podpůrnými službami, ostrovní provoz a start ze tmy. Ostrovní provoz je schopnost elektrárenského bloku pracovat do vydělené části vnější sítě, tzv. ostrova. Tento provoz je náročný na regulační schopnosti bloku. Tato schopnost je nezbytná pro předcházení a řešení stavu nouze. Ten se vyznačuje velkými změnami frekvence a napětí s tím, že generátor pracuje do izolované soustavy. Start ze tmy je schopnost najetí bloku elektrárny bez podpory vnějšího zdroje napětí, schopnost dosažení napětí, možnost připojení k síti a jejího napájení v ostrovním režimu.

2.2.4 Dispečerské řízení

Dispečerské řízení zahrnuje jak výše uvedené služby, tak zahrnuje zajišťování bezpečnosti provozu prostřednictvím plánu obrany a provozních instrukcí. Zajišťuje také řízení toků činných výkonů pomocí zapojení sítě, redispečinku, protiobchodu. Informace pro podkapitulu 2.2 byly čerpány ze zdrojů [8] [5] [11].

2.3 Podpůrné služby

Zákon č. 458/2000 Sb. Tzv. nový energetický zákon vymezuje podmínky podnikání, výkon státní správy včetně regulace v energetických odvětvích a práva a povinnosti fyzických a právnických osob. Vymezuje jednotlivé subjekty s cílem dosažení spolehlivé a kvalitní dodávky energie za přijatelné ceny pro všechny konečné spotřebitele a také vytvořit podmínky k ochraně životního prostředí. V elektroenergetice je uplatňován volný postoj k regulovanému přístupu k sítím. To znamená, že každý kdo splňuje předpisy stanovené zákonem, má právo na přístup k sítím a realizaci nasmlouvaných obchodů s elektřinou. Díky zákonu jsou udělovány licence, které jsou uděleny na 25 let. Podmínkou udělení licence je také prokázání finančních a technických předpokladů o výkonu podnikatelských činností. Jednotlivá kritéria jsou definována v zákoně a o míře naplnění rozhoduje energetický regulační úřad (ERÚ).

Výroba elektřiny včetně jejího prodeje ostatním účastníkům trhu je plně liberalizovaná jak v oblasti silové elektřiny, tak i v oblasti podpůrných služeb. Výjimkou je výkup elektřiny z OZE, druhotných energetických zdrojů a kombinované výroby elektřiny a tepla, kde ERÚ podporuje ceny elektřiny. Každý výrobce elektrické energie může dodávat elektřinu jakémukoli zákazníkovi. Výrobce elektřiny je povinen poslouchat příkazy příslušného technického dispečinku a u nově budovaných výroben o výkonu vyšším jak 30 MW instalovat a provozovat zařízení pro poskytování PpS tak, aby byla zajištěna plynulá dodávka elektrické energie o stanovených parametrech.

Výrobce elektřiny může na trhu prodávat silovou elektřinu, nebo může poskytovat PpS. Podpůrné služby se uplatňují na vyrovnávacím trhu s regulační energií, který je uskutečňován po uzavírce dvoustranného obchodování a po uzavírce organizovaného krátkodobého trhu s elektřinou. Na tomto trhu se obchoduje jak s kladnou, tak se zápornou regulační energií v minimálním množství 1 MWh. [12]

Způsob zajištění PpS v České republice je zhruba v 95 % procentech zajištěno dlouhodobými kontrakty, které jsou uzavírány ve výběrovém řízení na jednotlivé kategorie. Používají se nabídkové ceny, tj. poskytovateli konkrétní kategorie PpS je tato služba hrazena ve výši, která je uvedena v uzavřeném kontraktu. Zbývající část PpS je nakupována prostřednictvím denních trhů. Poskyvatelé PpS, kteří chtějí nabízet služby prostřednictvím denních trhů, musejí přistoupit na pravidla informačního systému Damas Energy, který slouží k automatizaci obchodních a technických procesů v energetice. Dále musejí být způsobilí k poskytování jednotlivých PpS na základě předložené certifikace. ČEPS a.s. zajišťuje podpůrné služby třemi základními způsoby:

- Nákupem na volném trhu, nakupované prostřednictvím výběrových řízení nebo denního trhu.
- Nakupované prostřednictvím přímé smlouvy s poskytovatelem.
- Výpomocí se synchronně pracujících soustav.

2.3.1 Nákup na volném trhu

Sem patří **primární regulace frekvence bloku (PR±)**, která reguluje výkon elektrárenského bloku při dané změně frekvence. Velikost požadované změny výkonu bloku v závislosti na odchylce frekvence sítě je určena statikou primární regulace frekvence. Pro tuto regulaci musí být vyčleněna primární regulační záloha. Na velikosti zálohy záleží technologické možnosti elektrárenského bloku. Provozovatel bloku musí, zajisti primární regulaci do 30 sekund od okamžiku vzniku výkonové rovnováhy.

Sekundární regulace výkonu bloku (SR±) zajišťuje změny hodnot výkonu regulovatelného elektrárenského bloku dle požadavku sekundárního regulátora frekvence. Kvalita této podpůrné služby je posuzována podle velikosti nabízeného rozsahu regulovaného výkonu bloku. Pro tuto regulaci musí být v rámci výkonu bloku vyčleněn výkon, který závisí na velikosti výkonu bloku. Celou velikost sekundární regulační zálohy musí být blok schopen realizovat do 10 minut od požadavku.

Terciární regulace výkonu bloku (TR±) je řízena na základě požadavků provozovatele přenosové soustavy. Jsou dva druhy terciární regulace, kladná (TR+) a záporná (TR-). Kladná spočívá ve zvyšování výkonu bloku. Záporná spočívá ve snižování výkonu bloku. Rozsahy těchto regulací musí mít spojitý charakter. Kvalita této podpůrné služby je posuzována podle velikosti nabízeného rozsahu a rychlosti zatěžování.

Mezi TR patří **minutová záloha 5minutová (MZ5±)**, která je používána u elektrárenských bloků, které jsou do 5 minut od příkazu Dispečinku ČEPS schopny poskytnout sjednanou regulační zálohu. Táto záloha, může být jak kladná, tak záporná. Kladná záloha může být realizována například zvýšením výkonu, odpojením čerpání u přečerpávacích zařízení, nenajetí nahlášeného čerpání, nebo odpojením odpovídajícího zařízení od elektrizační soustavy. Minimální velikost minutové regulační zálohy je 30 MW. Tento výkon musí být dodavatel schopný poskytnout po dobu minimálně 4 hodin, a to i když služba najede na koci intervalu sjednané rezervace.

Další terciární regulací je **minutová záloha 15minutová kladná (MZ15+)**, která se používá u elektrárenských bloků, které mají nabízený výkon realizovat od příkazu Dispečinku ČEPS do 15 minut s kladným rozdílem výkonu bloku. Tato kladná záloha může být realizována například zvýšením výkonu bloku, odpojením odčerpávání přečerpávací vodní elektrárny, nenajetím

plánovaného přečerpávání, nebo odpojením zatížení od elektrizační soustavy. Minimální velikost této zálohy je 10 MW a maximální výkon je 70 MW. Doba aktivace této služby není omezena.

Další terciární regulací je **minutová záloha 15minutová záporná (MZ15-)**, která je na stejném principu jako 15minutová záloha kladná, ale s tím že vede k celkovému snížení výkonu bloku. Tato služba může být realizována například snížením výkonu bloku, nebo připojením odpovídající zátěže k elektrizační soustavě. Minimální velikost této zálohy je 10 MW a maximální velikost této zálohy je 70 MW. Doba aktivace této služby je jako u 15minutové zálohy kladné bez omezení.

Snížení výkonu je poskytováno na blocích, které jsou do 30 minut od povelu dispečera schopny snížení výkonu o předem sjednanou hodnotu nebo schopny plného odstavení. Služba je využívána pro snížení dodávky do elektrizační soustavy a vyregulování významné kladné odchylky v soustavě vzniklé nedodržením sjednaných diagramů v rozsahu přesahujícím možnost standardně určených velikostí sekundární regulace a minutových záloh. Minimální velikost zálohy od jednoho poskytovatele je 30 MW. Minimální doba, po kterou musí být dodavatel schopen poskytovat tuto službu, je 24 hodin.

2.3.2 Nákup prostřednictvím přímě smlouvy s poskytovatelem

Sekundární regulace U/Q je automatická funkce využívající celý smluvně dohodnutý regulovaný rozsah jalového výkonu bloků pro udržení zadané velikosti napětí v pilotních uzlech elektrizační soustavy, která také rozděljuje vyráběný jalový výkon na jednotlivé stroje. Tato regulace musí mít schopnost spolupracovat s prostředky terciární regulace napětí a jalových výkonů.

Schopnost ostrovního provozu je schopnost elektrárenského bloku pracovat do vydělené části vnější sítě, tzv. ostrova. Ostrovní provoz se vyznačuje velkými nároky na regulační schopnosti bloku. Tato služba je nezbytná pro předcházení a řešení stavu nouze. Ostrovní provoz se vyznačuje značnými změnami frekvence a napětí. Elektrárenský blok přechází automaticky do regulačního režimu ostrovního provozu při poklesu frekvence pod 49,8 Hz a při vzrůstu frekvence nad 50,2 Hz. Požadavky na schopnosti bloku jsou přechod do ostrovního provozu, ostrovní provoz, opětovné připojení ostrova k soustavě a dostupnost služby.

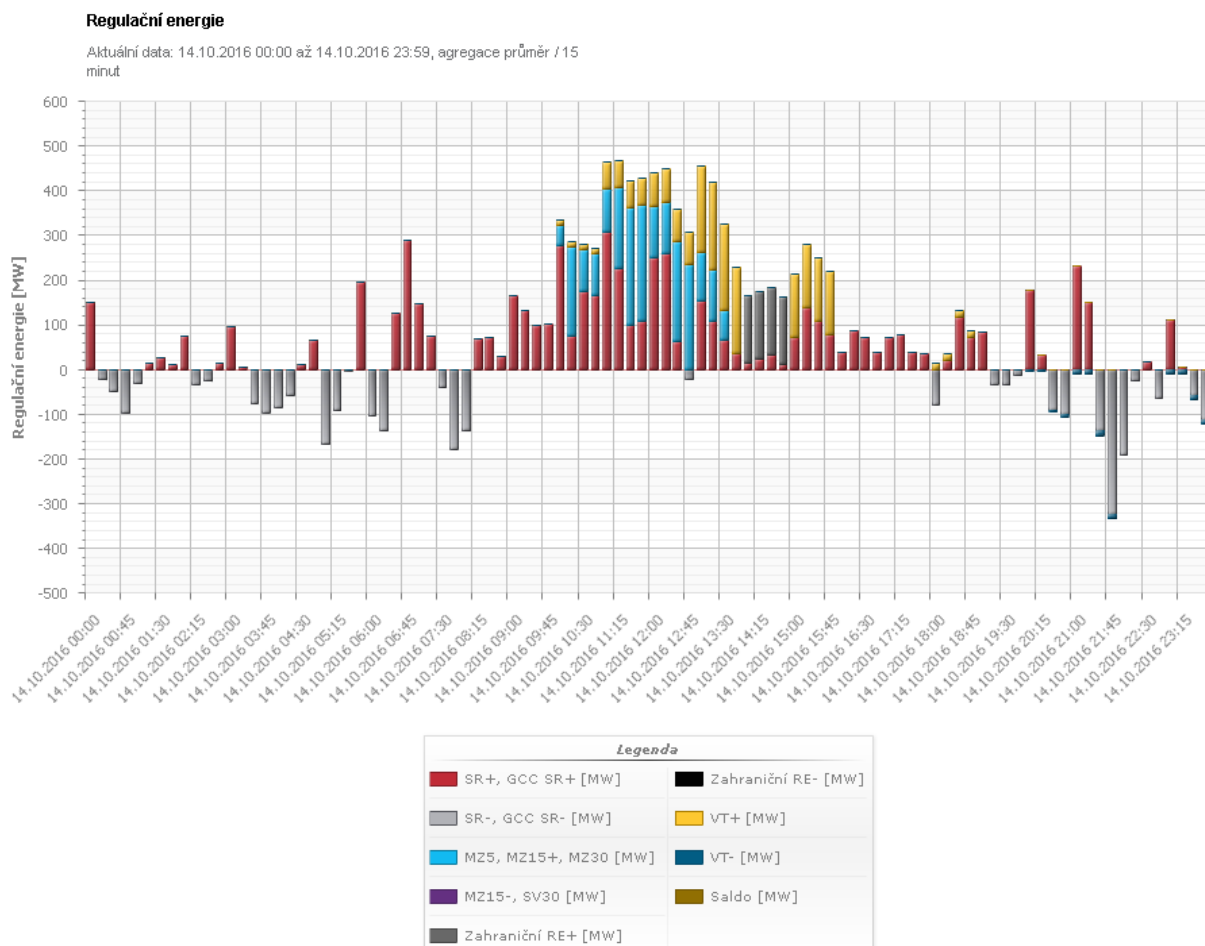
Start ze tmy je schopnost najetí bloku elektrárny bez podpory vnějšího zdroje napětí, schopnost dosažení daného napětí, možnost připojení k síti a jejího napájení v ostrovním režimu. Tato PpS umožňuje obnovení dodávky po úplném nebo částečném rozpadu soustavy. Základním cílem je uvést postiženou oblast do normálního provozního stavu v co nejkratším čase a bezpečným způsobem. Poskytovatelé této služby musí splňovat podmínky Kodexu PS včetně požadavků certifikace.

2.3.3 Výpomoc ze synchronně pracujících soustav

Havarijními smlouvami je realizována výpomoc do cca 15 minut. ČEPS má se sousedními provozovateli přenosových soustav uzavřeny havarijní smlouvy o vzájemné výpomoci a spolupráci pro řešení mimořádných stavů v přenosové soustavě.

Havarijní výpomoc ze zahraničí je výjimečná a slouží pouze ke krátkodobě regulaci v řádu hodin. Pro podkapitolu 2.3 byly čerpány informace ze zdrojů [8] [13] [12].

Na níže uvedeném Obr. 2-4 vidíme regulační energii ze dne 14. 10. 2016. Červenou barvou je znázorněná SR+, šedivou barvou je znázorněná SR-, pod modrou barvou můžeme vidět MZ5, MZ15+, MZ30, žlutou barvou je znázorněna kladná regulační energie obstaraná pomocí trhu s vyrovnávací energií (VT+).



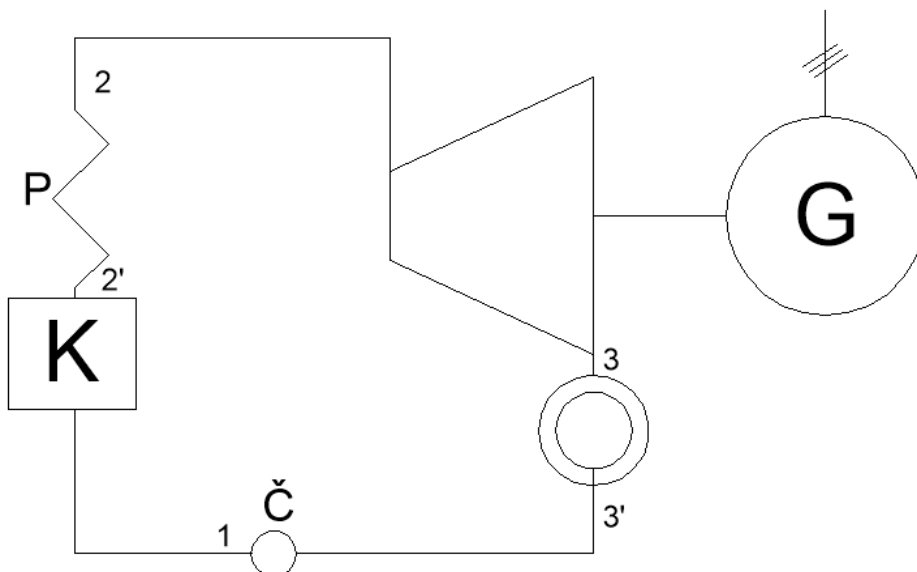
Obr. 2-4 Příklad regulační energie [14]

2.4 Teplárny

Teplárny jsou zařízení, které část vyrobeného tepla přeměňují na elektrickou energii a zbytek tepla je použita v systému centrálního zásobování teplem. Jedná se o tzv. kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla (KVET). KVET je z hlediska úspory energie nejefektivnější. Účinnost teplárenského bloku je přibližně 45 % a může se lišit dle topného výkonu. Na rozdíl od elektrárny, ve které se energie přemění na elektrickou energii o nízké účinnosti. Účinnost elektrárenského čistě kondenzačního bloku je přibližně 30 %.

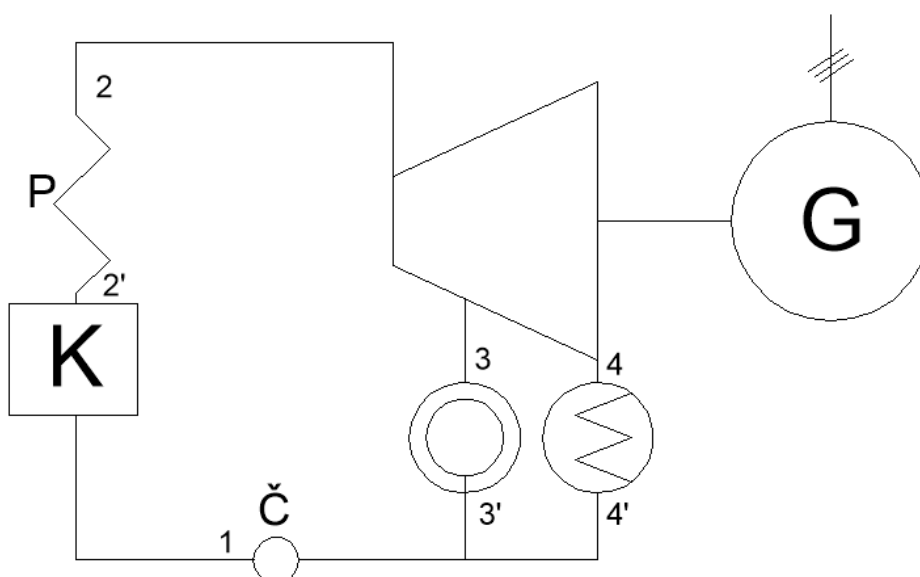
Jednoduchý princip výroby KVET si můžeme popsat na obrázcích 2-5 a 2-6. Na obrázku najdeme blokové schéma teplárny s protitlakou turbínou. Teplo je vytvářeno v kotli spalováním energetického uhlí. V něm se voda mění na páru (2'), která proudí dále do přehříváku, kde se ohřívá a vzniká přehřátá pára neboli admisní pára (2). V turbíně předá svoji energii lopatkám rotoru, který roztáčí turbogenerátor a vytváří elektrickou energii. Zá výstupem z turbíny (3) má pára ještě dostatečnou energii, kterou předává do technologie topné vody ve výměníku včetně tepla

skupenské přeměny. Za výměníkem (3') je voda dopravena přes regeneraci a napájecí nádrž čerpadly zpátky do kotle (1). Tento proces se opakuje.



Obr. 2-5 Protitlaká turbína

Na obrázku 2-6 můžeme vidět KVET s odběrovou turbínou. Celý cyklus je stejný jako s protitlakou turbínou až na děj v turbíně a za ní. V turbíně po částečném předání energie, odebereme část páry na ohřátí technologie topné vody ve výměníku s využitím tepla skupenské přeměny (3). Zbytek páry předává svou energii dále lopatkám turbíny, která roztáčí turbogenerátor a vyrábí elektrickou energii. Za výstupem z turbíny máme páru o určité teplotě (okolo 30 °C) a nízkém tlaku (4). Tuto energii, již nelze z ekonomického hlediska dále využít a je nejvýhodnější jí schladit a nechat zkondenzovat v kondenzátoru. Za kondenzátorem se setkávají kondenzáty, které předaly svojí energii ve výměníku (3') a v kondenzátoru (4'). Celková voda je dále dopravována čerpadly do kotle (1). Tento cyklus se dále opakuje.



Obr. 2-6 Odběrová turbína

2.4.1 Podpůrné služby v teplárnách

Poslední dobou se výkupní cena silové elektřiny blíží nákladům na její výrobu a to nejen u elektrárenských bloků, ale také u teplárenských bloků, proto se těmto výrobcům vyplácí nabízet služby (komodity), za které jsou lépe placeny. Teplárenské bloky, které tržní také z prodeje tepla, mohou poskytovat provozovateli PS podpůrné služby. Tyto služby mají negativní dopad na technologické zařízení, např. turbíny, které díky rychlým změnám výkonu ztrácejí svojí životnost. I přes tuto skutečnost se provozovatelům bloků vyplatí PpS poskytovat.

Tyto služby jsou stanoveny na předem daný den a danou hodinu prostřednictvím systému DAMAS. Na každou hodinu je předem stanoven typ poskytované služby a jeho výkonové rozpětí, v kterém se poskytovatel PpS služby musí pohybovat. Standardně poskytovatel drží výkon pracovního bodu diagramu a výkon mění dle online požadavku regulátoru ČEPS. Jednotlivé požadavky jsou vyřizovány online pomocí terminálu elektrárny a regulátoru ČEPS. Za předem dohodnutou službu se platí za rezervovaný rozsah služby i přes to, že služba nebyla využita. Pokud však dojde požadavek na zvýšení či snížení výkonu a změna nebude provedena v požadovaném čase a kvalitě, nebude poskytovateli za danou hodinu zapláceno.

Pokud řídicí systém terminálu elektrárny dostane požadavek na zvýšení výkonu (SR_{\pm} , $MZ15/5_{\pm}$), předává požadavek do regulátorů příslušných bloků, které automaticky svůj výkon zvýší větším otevřením regulačních ventilů turbíny, tím vzroste točivý moment na turbíně, která je na společné hřídeli s turbogenerátorem, který zvýší vyráběný činný výkon. Díky zvýšenému výkonu turbíny se zvýší odběr páry z kotle, který automaticky zvýší přísun paliva a spalovacího vzduchu. Pokud přijde požadavek na snížení výkonu, proběhne shodný děj s opačnými trendy. Tento děj se odehrává řádově do několika minut v závislosti na jmenovitém výkonu bloku.

U minutové zálohy musí být brát zřetel na velikosti zálohy poskytnuté provozovateli přenosové soustav. Teplárenské bloky s kotli, které spalují uhlí, nemají tak rychlý nástup výkonu jako mají například elektrárny plynové, které mají možnost náběhu na nominální výkon v řádech desítek sekund. Podobnou možnost mají i přečerpávací vodní elektrárny, které mohou dosáhnout svých nominálních výkonů v řádu sekund. Avšak co se týče doby trvání, jsou závislé na objemu horní akumulární nádrže.

Každá společnost či firma se snaží o co nejvyšší zisky, a proto řada tepláren uvažuje, jak by mohla zvýšit podíl svých zisků. Mohou zvyšovat svůj prodaný výkon, či účinnost. Avšak zvyšování účinnosti je u stávajících bloků menších výkonů již finančně nemožné. Pokud však nemají prostředky pro vybudování nových bloků. Můžou zainvestovat do nových horkovodů, které by dopravovali teplo novým spotřebitelům (zákazníkům), ale i zde jsou určité výkonové bariéry, ve kterých se teplárna musí držet. Jinými slovy její tepelný výkon není nekonečný. Nebo mohou hledat alternativy v poskytování PpS ve větší šíři než doposud. Pro tuto možnost se nabízí volba instalace elektrokotle (ELK), který by pomáhal ohřevu topné vody v technologii SZT.

3 PRINCIP ELEKTROKOTLE

Veškerá moderní společnost je závislá na stabilním zdroji elektrické energie. Problém je, že elektrickou energii nelze skladovat a musíme nacházet způsoby, jak vyrábět elektrickou energii ve stejném množství jakou ji spotřebováváme nebo obráceně spotřebovávat to, co vyrábíme. Jedno z možných řešení řízení výroby elektrické energie je za použití ELK, které přeměňují přebytečnou elektrickou energii na teplo v podobě horké vody či páry.

3.1 Využití elektrokotle

Příkladné využití ELK můžeme pozorovat v severních státech Evropy, například Norsko, kde je elektrické energie dostatek. V Norsku mají velký podíl na výrobě elektrické energie vodní elektrárny, které představují levnou elektrickou energii. Díky poloze těchto států jsou jejich klimatické podmínky chladnější, a proto pokud se skloubí levná elektrická energie a nedostatek tepla, připadá v úvahu využití ELK pro vytápění různých objektů.

V zemích, kde je z ekonomického hlediska využitelnost elektrokotle moc drahá a vyplatí se vytápět objekty spíše fosilními palivy, se řeší vyrábění tepla pomocí ELK v levných tarifech (například v noci). Takto vyrobenou tepelnou energii lze naakumulovat a využít jí přes den, kdy je pro výrobu tepla v ELK drahý tarif elektřiny. Tento systém je využit například v Číně.

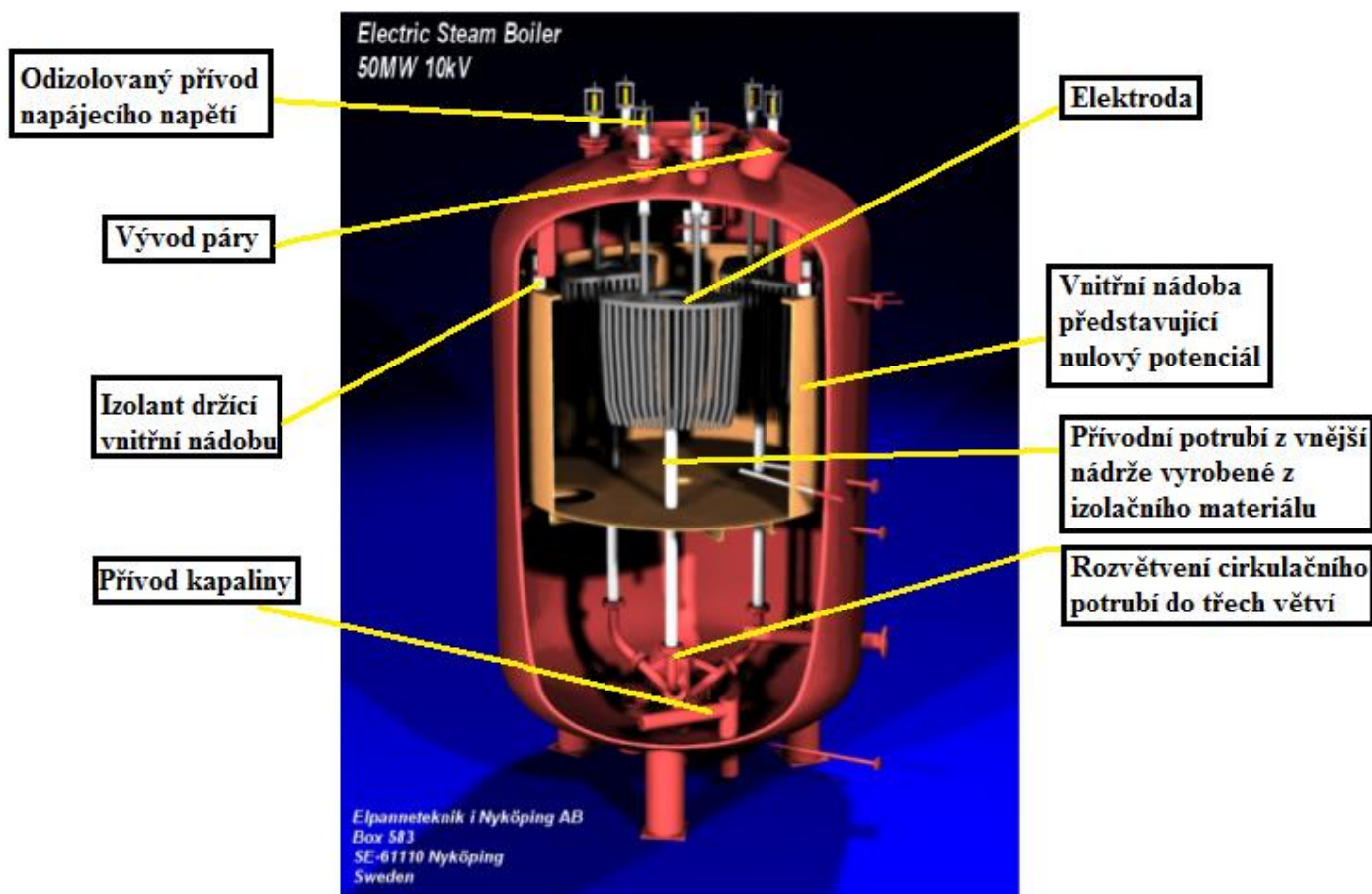
Využití ELK může mít své uplatnění také při regulaci výroby elektrické energie. Regulace je nutná pro zabezpečení kvality dodávané energie, která je ovlivňována výrobou elektrické energie z OZE. Může nastat situace, kdy fouká vítr a roztáčí generátory v gondolách větrných elektráren právě tehdy, kdy je svátek a mnoho velkých odběratelů (továrny, výrobní linky) stojí a neodebírají velký výkon. Vyrobenou energii, která nejde uskladnit, je možno zužítkovat například v ELK na výrobu tepla či teplé vody, kterou lze okamžitě vytápět nebo ji akumulovat.[15]

3.2 Druhy elektrokotlů

Elektrokotlů je více druhů, které navrhují, konstruují a instalují společnosti po celém světě. Jedním z největších výrobců elektrokotlů v Evropě jsou švédské firmy Zander & Ingestrom a Elpanne Teknik. Společnost Z&I je na trhu od roku 1898, ovšem první elektrokotle začala vyrábět od dvacátých let dvacátého století. Při prvních vyrobených kusech bylo jasné, že poptávka bude požadovat ELK s většími výkony, což znamená vyšší napájecí napětí. Od roku 1932 prodala firma Z&I tisíce ELK se jmenovitými výkony od jednotek kW až do 150 MW. Po dlouhých letech zkušeností firma nabízí ELK s vysokou spolehlivostí, efektivností, minimální údržbou a nehlučností. Společnost Elpanne Teknik je na trhu od roku 1993. Tato společnost, jako dříve zmíněná navrhuje a vyrábí ELK velkých výkonů. Nesmíme opominout ani americkou společnost Precision Boilers, která vyrábí širokou škálu kotlů, které spalují plyn či topný olej, nebo elektrokotle, které vyrábí pro normální spotřebitele (obytné domy), nebo pro industriální potřeby.

3.2.1 Elektrokotel na výrobu páry

Tento kotel využívá rezistivitu kapaliny pro výrobu tepla. Elektrická energie je přímo přetvářena na teplo díky proudu, který teče přes kapalinu o určité konduktivitě. ELK vyrábějící páru může pracovat na více principech, které si následně popíšeme. Na obrázku 3-1 můžeme vidět jeden z nich. Jedná se o 50MW ELK vyrábějící páru od společnosti Elpanne Teknik. Na obrázku vidíme popis jednotlivých částí.



Obr. 3-1 Průřez ELK pro výrobu páry [16]

Tento „ponorný“ ELK má tři elektrody pro tři fáze. Těmito elektrodami proudí střídavý proud. Elektrody se skládají z většího počtu elektrod se stejným potenciálem a představují jednu velkou elektrodu. Jako zemnicí elektroda slouží stěna vnitřní nádoby, která obklopuje elektrody. Samotný kotel se skládá z vnitřní cylindrické nádoby s elektrodami a vnější tlakové nádoby, ve které je uskladněna kapalina o dané konduktivitě. Tato kapalina je pomocí cirkulačního čerpadla čerpána do vnitřní nádrže, ve které se ohřívá procházejícím elektrickým proudem. Velikost elektrického proudu, respektive výkonu, závisí na hladině kapaliny ve vnitřní nádrži. Čím výše bude hladina, tím větší bude aktivní plocha elektrod ponořena do kapaliny a tím bude větší i procházející proud. Nesmíme opominout ani samotnou konduktivitu kapaliny, na které závisí velikost procházejícího proudu určujícího z Ohmova zákona, neboť konduktivita je převrácená hodnota rezistivity. A celkový odpor se vypočte vztahem (3.1). Z kterého je jasně patrné, že vzdálenost l se nemění, ta je jasně daná, protože při regulaci neměníme vzdálenost elektrod od stěny vnitřní nádoby, která představuje nulový potenciál. Velikost plochy ovlivňujeme již zmíněnou výškou hladiny ve vnitřní

nádrži. Pokud zvýšíme hladinu, tak zvýšíme plochu S a tím pádem se zmenší odpor R a vzroste velikost proudu, který ohřívá kapalinu. Písmeno σ představuje konduktivitu kapaliny.

$$R = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l}{S} \quad (\Omega; S \cdot m^{-1}, m, m^2) \quad (3.1)$$

Teplo vyvinuté při průchodu proudu kapalinou je dáno vztahem (3.2) ve kterém Q znázorňuje vyrobené teplo, R je odpor samotné kapaliny, a I je elektrický proud, který prochází za dobu t . Jak je dříve zmíněno, pokud vzroste plocha S , tím pádem se sníží odpor kapaliny a vzroste protékající proud. Celkový výkon vzroste díky kvadrátu protékajícího proudu.

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (J; \Omega, A, s) \quad (3.2)$$

Nemůže se stát, že by ELK jel na prázdko, protože pokud by nastala absence kapaliny ve vnitřní nádobě, proud nemůže protékat. Tento jev slouží jako bezpečnostní opatření a dále umožňuje využít plného rozsahu regulace ELK, a to 0-100 %.

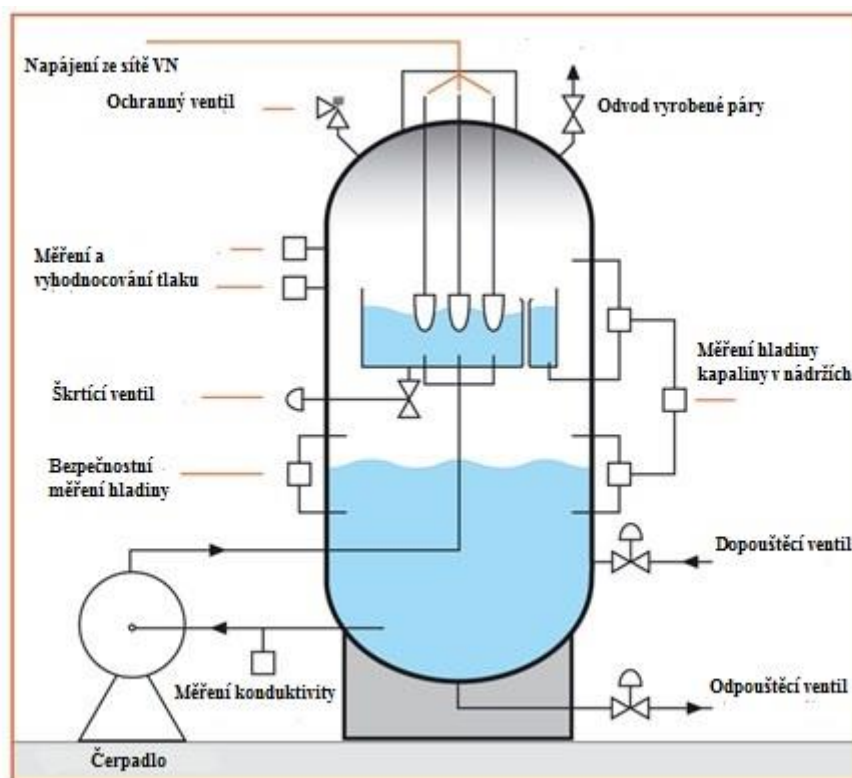
Proud procházející skrz kapalinu do uzemněné vnitřní nádoby je ovlivňován samozřejmě tím, zda je vnitřní nádoba uzemněna přímo, nebo je uzemněna přes impedanci určité velikosti.

Nádoby jsou vyrobeny z vylisovaného materiálu. Vnitřní nádoba je odizolována od vnější nádoby izolátorem určeným do vysokých teplot. Samotné upevnění elektrod ve vnější nádobě je obstaráno dostatečně velkou izolací pro bezpečný provoz ELK.

Cirkulační čerpadlo, které reguluje velikost hladiny ve vnitřní nádobě (reguluje požadovaný výkon ELK), je umístěno mimo kotel. Čerpadlo vede kapalinu potrubím do elektrokotle, kde se dále rozdělí na tři větve, které vedou do vnitřní nádoby. Každé jednotlivé potrubí je vyústěno pod jednou ze tří elektrod. Tak se dostává k elektrodě ochlazená kapalina v co nejkratším čase. Pokud je však nutné snížit výkon, otevře se ventil, který je uprostřed dna vnitřní nádoby a velikost hladiny se sníží na potřebnou velikost, nebo se úplně vypustí a ELK přestane vyrábět páru. Všechna použitá potrubí, které spojují vnitřní a vnější nádobu ELK, jsou vyrobena z izolačních materiálů. Izolační materiál, který je použit, musí odolat vysokým teplotám a tlaku. Celý kotel je izolován od okolí pomocí minerálních vln, které brání úniku tepla a zvyšují účinnosti samotného kotle.

Hlavní části celého ELK jsou elektrody, cirkulační čerpadla a řídicí systém. Pro veškeré řízení jsou použity programovatelné automaty PLC. Parametry tohoto typu ELK jsou:

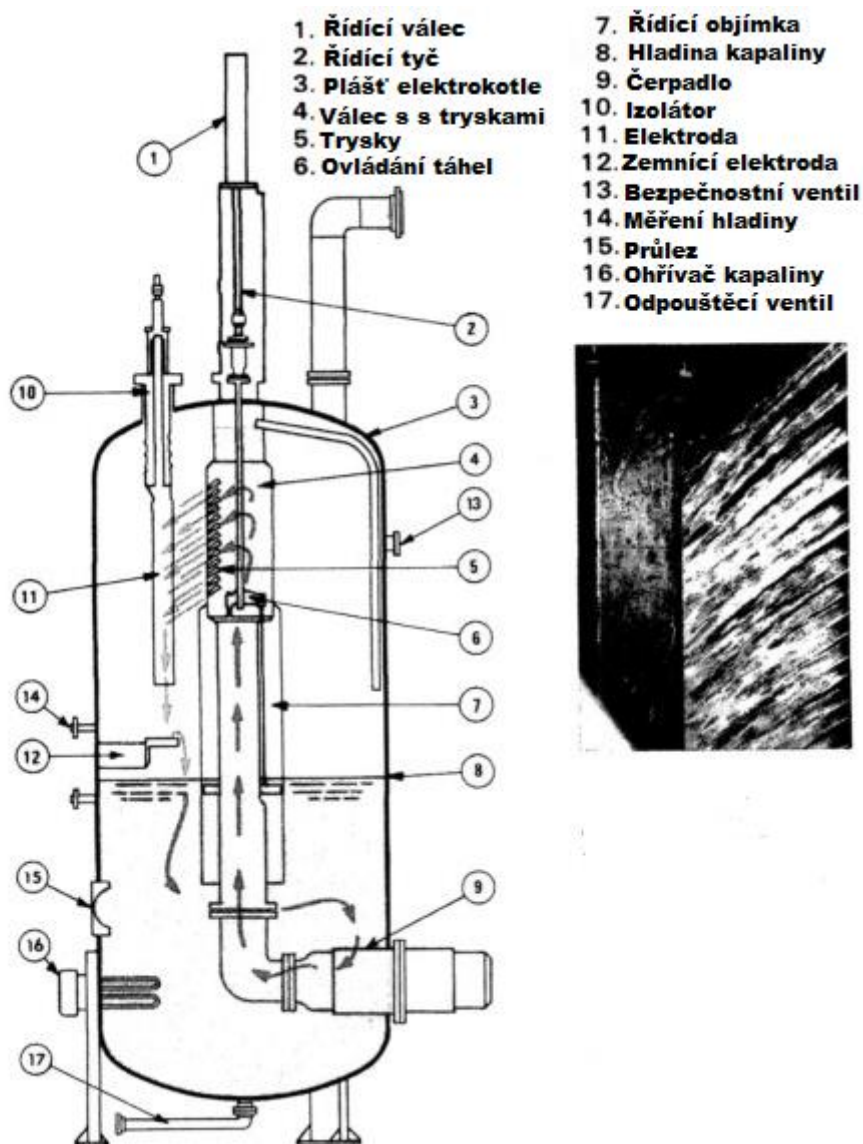
- Výkon: 0–60 MW
- Hmotnostní průtok: 0–90 t/h
- Napájecí napětí: 6–20 kV
- Regulace: 0–100 %
- Čas regulace na maximální výkon: 5 min
- Účinnost: 99 %
- Maximální konduktivita: 5 $\mu\text{s/cm}$
- Projektovaný tlak: 5 MPa



Obr. 3-2 ELK pro výrobu páry [17]

Na obrázku 3-2 vidíme samotné těleso ELK, které se skládá z vnitřní a vnější nádoby. Tyto nádoby jsou spojené skrz cirkulační čerpadlo, které se nachází mimo ELK a žene kapalinu do vnitřní nádoby. V této větvi, která se nachází mimo ELK, je měření konduktivity kapaliny, která je důležitá z hlediska velikosti protékaného proudu. Pro případné upravení konduktivity jsou připraveny nádrže s chemikáliemi. Toto měření je automatizované. [16] [15] [17]

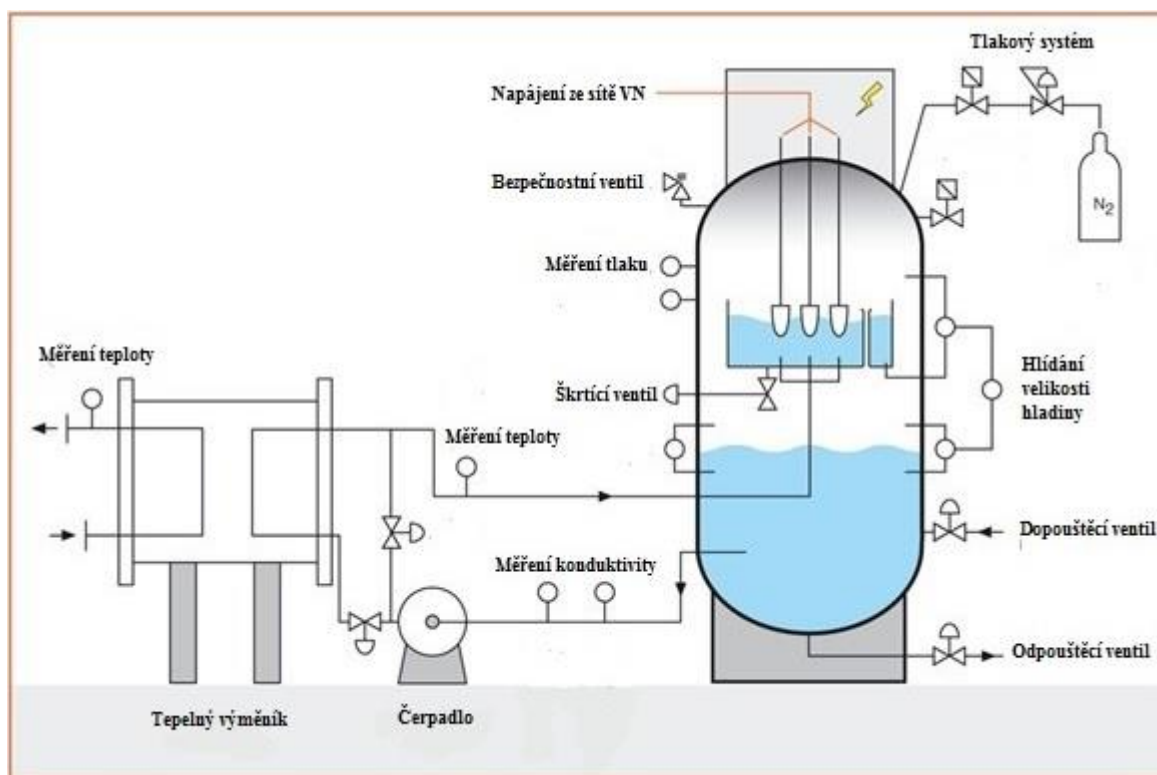
Další model je nazýván jako „tryskající“ ELK, který se skládá z tlakové nádoby, ve které je upevněna sloupcovitá nádoba. Tato nádoba obsahuje trysky, kterými tryská kapalina ven ze sloupcovité nádrže. Tryskající kapalina stříká na elektrody, po kterých stéká přes elektrodu, která představuje nulový potenciál, zpět do nádrže. Elektroda horizontálně obklopuje nádrž s tryskami. Regulace ELK je závislá na dokonalé velikosti hladiny ve vnitřní nádrži. Také záleží na počtu trysek v nádobě. Ty se dají regulovat stínícím materiálem, který zabraňuje vniknutí proudu kapaliny na elektrodu. Pokud bude hladina výše, či bude větší počet volných trysek v nádobě, bude protékat více kapaliny na elektrodu. Tím větší proud bude protékat kapalinou a tím větší bude výkon ELK. Pára se vytváří v horní části nádrže, zatímco zbylá voda se uchovává na dně a je pumpována zpět do sloupcovité nádrže s tryskami. Cirkulační čerpadlo, které udává stav hladiny v nádrži s tryskami, se nachází uvnitř tlakové nádoby. [18]



Obr. 3-3 Částečný Jet-type ELK [18]

3.2.2 Elektrokotel na výrobu horké vody

Pro výrobu horké vody můžeme využít dvou ELK, které se liší v regulaci jejich výkonů. Jeden pracuje na stejném principu jako „ponorný“ ELK na výrobu páry. Skládá se z vnější a vnitřní nádoby. Výkon ELK řídíme velikostí hladiny ve vnitřní nádobě, kde se nacházejí 3 elektrody, pro každou fázi jedna. Tyto elektrody jsou složeny z více elektrod a představují tak jednu velikou elektrodu. Elektrický proud teče přes kapalinu o určité konduktivitě do stěn vnitřní nádoby, která představuje nulový potenciál. Tato vnitřní nádoba je vhodným izolačním materiálem, který je určen do vysokých teplot, odizolována od vnější nádoby. Cirkulační čerpadlo, které se nachází mimo ELK, přečerpává horkou kapalinu z vnitřní nádrže přes tepelný výměník, kde odevzdává tepelnou energii a vrací se ochlazená zpět do vnější nádoby, kde je znovu dle potřeby přečerpána do vnitřní nádoby, kde se díky protékajícímu proudu skrz ni ohřeje.



Obr. 3-4 ELK pro výrobu horké vody [17]

Na obrázku 3-4 vidíme ELK na výrobu horké vody, který pomocí cirkulačním čerpadla žene ohřátou vodu do výměníku.

Druhý typ elektrokotle se liší od předchozího tím, že neuchovává kapalinu ve vnější nádobě. Kapalina neustále rotuje stále dokola. Cirkulační čerpadlo, které kapalinu žene v okruhu, se nachází mimo ELK. V aktivní nádobě, kde se nacházejí elektrody, se nepřetržitě vyskytuje kapalina. Elektrody jsou složeny z jedné, maximálně ze dvou velkých elektrod. Ty jsou oklopeny izolačním teplu odolným materiálem, které řídí výkon celého ELK. Pokud se obklopený izolátor vysune, dojde ke zvýšení aktivní plochy, přes kterou prochází proud a výkon se zvýší.

Nevýhodou tohoto ELK je nevyužitelnost regulace v plném rozsahu. I přes maximální vysunutý regulovatelných izolátorů pokrývajících elektrodu, není výkon naregulován na nulu. Konduktivita kapaliny není tak malá, aby bylo dosaženo nulového proudu. Regulační rozsah se pohybuje od 8-100 %. Jednotlivé fázové elektrody se zemnicí elektrodou lze pozorovat na obrátku 3-5.

Parametry:

Výkon:	0-40 MW
Napájecí napětí:	6-20 kV
Regulace:	8-100 %
Čas regulace na maximální výkon:	3 min.
Účinnost:	99 %
Maximální provozní teplota:	180 °C
Projektovaný tlak:	1,6 MPa

Provozní tlak:

0,3 MPa



Obr. 3-5 Ukázka elektrod bez stínění se zemnicí elektrodou [19]

4 PRINCIP VYUŽITÍ ELEKTROKOTLE PRO POSKYTOVÁNÍ PODPŮRNÝCH SLUŽEB

V předchozí kapitole byly popsány elektrokotle pro výrobu páry, nebo horké vody. V této kapitole je probráno připojení ELK do teplárenských technologií. Dále je popsáno samotné využití při poskytování PpS.

Pro použití ELK na využívání PpS je nutné si objasnit fungování bloku, který reguluje výkonové výchylky v ES. Blok může fungovat jako fiktivní, který se skládá z více bloků a má tudíž větší regulační rozsah, nebo může být blok samostatný. Pod slovem blok se skrývá kotel, motor či parogenerátor, který vyrábí tepelnou energii, která předává svou energii a roztáčí generátor, který vyrábí elektrickou energii. Samotný blok, ať už fiktivní či samostatný, pracuje na PDG. Tento bod představuje smluvený výkon bloku, který je ohraničen kladnou a zápornou výchylkou výkonu, ve které se blok může pohybovat a tím poskytovat PpS. Rozsah výchylek je omezen maximální velikostí výkonu bloku v kladné výchylce od PDG. Naopak při snižování výkonu bloku je omezována technologií turbíny. U každé turbíny je dán minimální možný provozuschopný výkon bez zvýšeného opotřebení samotné turbíny.

Samotný elektrokotel, který je zařazen do fiktivního bloku může být využíván pro více druhů PpS. V první řadě se jedná o sekundární regulaci. Následuje minutová záloha MZ5± a MZ15±, respektive z obou záloh ty záporné.

4.1 Využití elektrokotle ve fiktivním bloku pro poskytování SR±

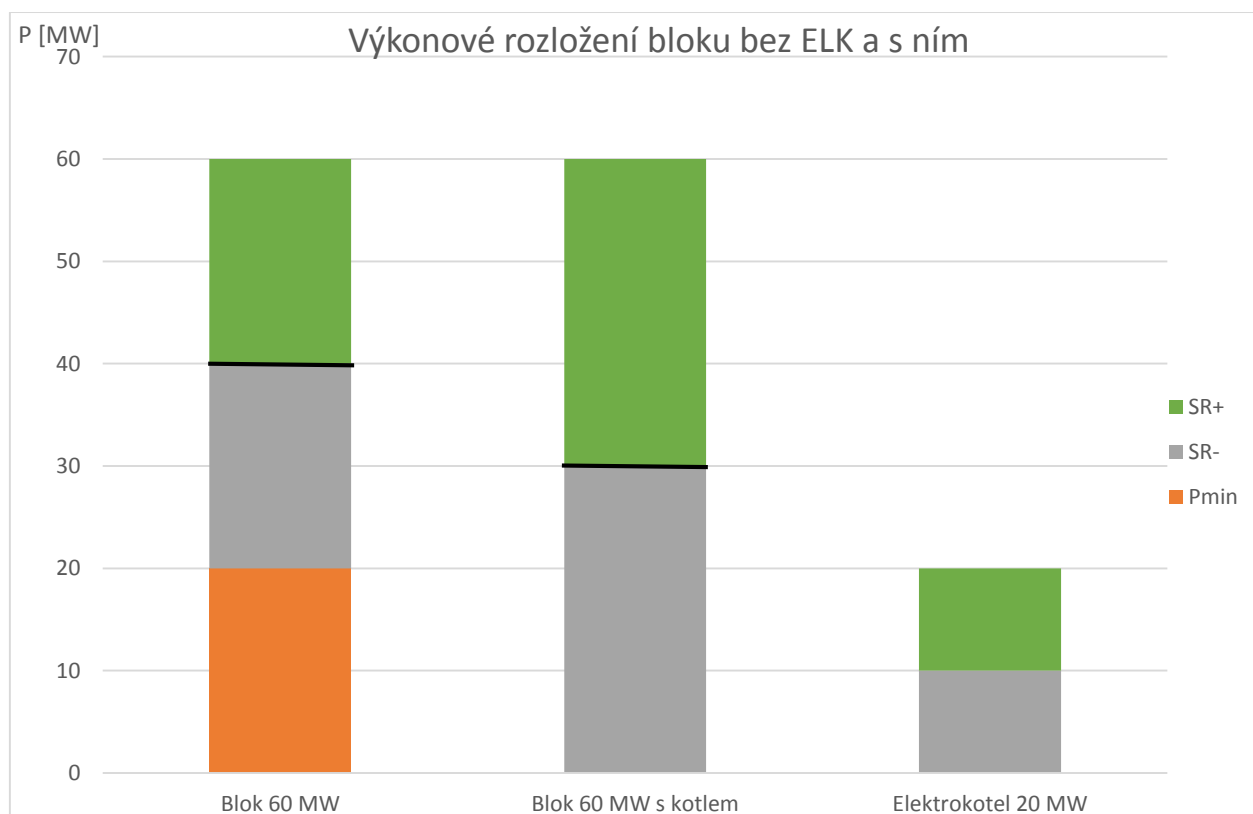
Při využití primární a sekundární regulace frekvence je ELK připojen např. do fiktivního bloku, přičemž výkon elektrokotle zvyšuje regulovatelnost bloku na celý rozsah bez toho, aby se rapidně snížila životnost turbíny.

Velikost poskytované SR± se odvíjí od rychlosti změny výkonu kotle, respektive povolené maximální rychlosti zatěžování turbíny. Požadovanou velikost SR na určitý den a hodinu si zadává ČEPS. Tento požadavek se provádí i u PR±. Samotná velikost primární regulace se odvíjí od certifikace bloku společností ČEPS. Jedná se o jednotky MW na blok, tvořící jednotný generátor. Ke změně PR± může nastat i několikrát do sekundy.

Pro představu je brán blok představující jedno turbosoustrojí o velikosti 60 MW. Toto soustrojí pohání pára, která se vyrábí v kotli, který spaluje energetické uhlí. Dle vlastností turbíny víme, že její minimální výkon, na kterém lze bez problémů turbínu provozovat je 20 MW. Od této skutečnosti je nutné odvíjet PpS, které budou poskytovány společností ČEPS. Vše lze jednoduše popsat na obrázku 4-1, na kterém lze pozorovat v prvním sloupci výkonové rozložení bloku bez použití ELK a v druhém sloupci výkonové rozložení bloku s ELK. Ve třetím sloupci můžeme pozorovat výkon použitého ELK.

Na bloku bez použití ELK lze pozorovat, že bazový bod, na kterém se drží nominální výkon, se nachází na hodnotě 40 MW. Nad ním je modrou barvou znázorněna rezerva pro PR+, která v tomto případě činí 5 MW. Níže od bazového bodu, je vyobrazena PR- o velikosti taktéž 5 MW, která je znázorněna žlutou barvou. Na obě tyto výkonové rezervy navazují rezervy pro SR+ a SR-. Kladná sekundární regulace je znázorněna zelenou barvou a má hodnotu 20MW. Záporná sekundární regulace o velikosti 20 MW je znázorněna šedivou barvou a končí na velikosti 20 MW, kde je hranice provozuschopnosti turbíny. Pokud však k bloku bude připojen ELK o výkonu

20 MW, bude vytvořen nový fiktivní blok, tvořený turbosoustrojím s uhelným kotlem a elektrokotlem, který nabídne větší rozpětí regulovaného výkonu. Lze takto využít celý rozsah výkonu bloku pro regulaci ES, díky pokrytí ELK minimálního výkonu turbíny. V druhém sloupci na obrázku 4-1 se posunul bazový bod na hodnotu výkonu 30 MW. Rychlost regulace ELK pro poskytování PR_{\pm} je nedostatečná, proto tuto službu nepoužívá. Kladná sekundární regulace se zvětšila na 30 MW, od velikosti 30 MW do nominálního výkonu bloku a to 60 MW. Při požadované nulové odchylce výkonu pro sekundární regulaci pracuje ELK s výkonem 10 MW. Zápornou sekundární regulaci lze využívat od 30 MW do 0 MW díky ELK. Pokud blok dostane povel na snížení výkonu pod 10 MW, výkon na turbíně se nesníží, ale ELK začne zvyšovat odebíraný výkon ze sítě od 10 MW až do 20 MW. Detailnější popis napájení ELK bude popsán v kapitole 5 Způsob připojení elektrokotle v Elektrárnách Opatovice.



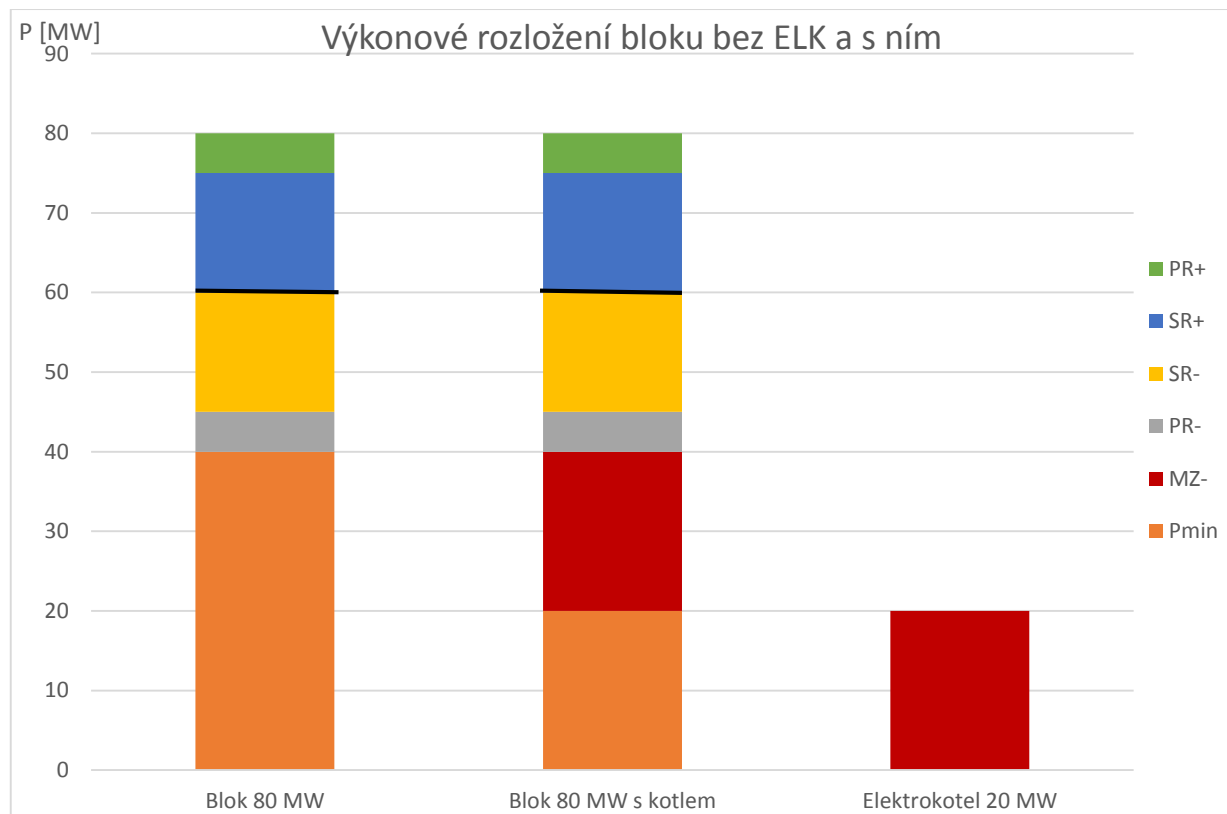
Obr. 4-1 Rozšíření regulace SR_{\pm} bloku s ELK

4.2 Využití elektrokotle ve fiktivním bloku pro poskytování MZ_{\pm}

Elektrokotel se dá využívat pouze pro poskytování minutových záloh záporných. Samotný blok samozřejmě může regulovat svůj výkon do hodnoty svého minima. Podporuje tak SR_{\pm} jako v předchozím případě, ale co se týče minutové zálohy, může využít výkonu kotle, aby snížil celkový výkon bloku na požadovanou hodnotu dispečinku. Na obrázku 4-2 je zobrazeno výkonové rozložení fiktivního bloku o výkonu 80 MW bez ELK na levé straně, a s ELK na pravé straně. Na obou obrázcích je stanoven PDG bloku na hodnotě 60 MW. Kolem tohoto bodu se nachází pod modrou barvou SR+ a pod žlutou barvou SR- o velikosti 15 MW. Na primární regulaci výkonu navazuje PR_{+} vyznačená zelenou barvou a PR_{-} značená barvou šedivou. Obě tyto poskytnuté regulační zálohy jsou o velikosti 5 MW.

Pokud dojde v síti k přebytku elektrické energie, je nutné tuto energii regulovat. Pokud se jedná o velkou nadbytečnou energii v síti a dispečer nemá dostatečnou rezervu ve službách SR-, a

je nutné obnovit tuto rezervu, rozhodne aktivovat MZ-, elektrokotel naběhne na přikázaný výkon dle požadovaného času. Tato minutová záloha se nabízí v časech 5 minut a 15 minut. Do tohoto času musí být záloha poskytnuta v plné výši. Při najetí ELK výkon bloku z obrázku 4-2 klesne na 20 MW. Tepelnou energii, vyrobenou v ELK dodavatel PpS využívá pro ohřev oběhové vody v SZT.



Obr. 4-2 Využívání ELK pro poskytování MZ-

4.3 Napojení elektrokotle do teplotního okruhu

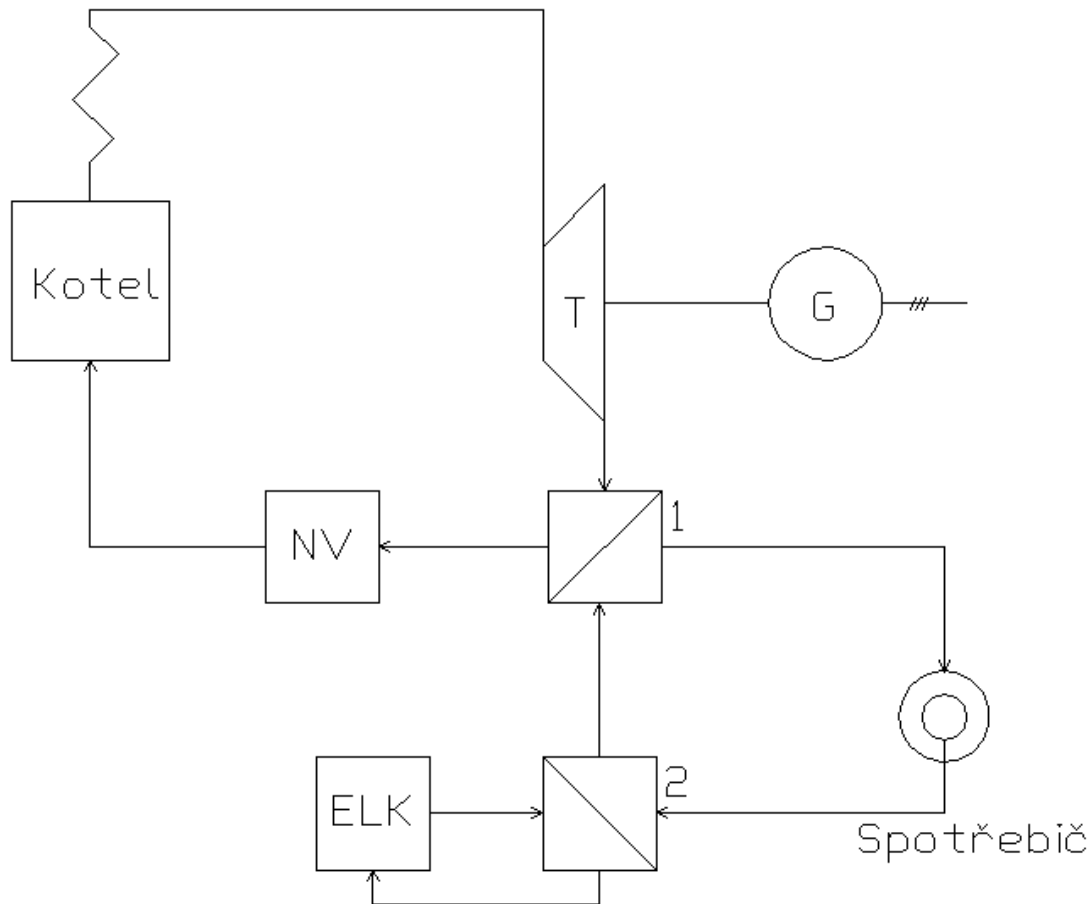
Pokud elektrokotel bude použit pro rozšíření regulačního pásma „fiktivního“ bloku, bude nutností vědět, jak naložit s vyrobeným teplem. Toto teplo se snadno využije v teplotním okruhu oběhové vody SZT. Samozřejmostí je použití výměníku mezi oběhovou vodou a kapalinou ELK, která má dané parametry pro vedení elektrického proudu. Dále budou uvedeny 2 možné zapojení ELK do oběhu horké vody. Jsou to:

- Sériové zapojení elektrokotle před ohřívákem vody.
- Paralelní zapojení elektrokotle s ohřívákem vody.

4.3.1 Sériové zapojení elektrokotle před ohřívákem vody

Tato možnost je zjednodušeně zakreslena na obrázku číslo 4-4, na kterém je znázorněn výměník pod číslem 1. Tento výměník představuje ve skutečnosti jednotlivé technologické zařízení na ohřev vody. Samozřejmostí jsou základní nebo špičkové ohříváky vody. Poté co je voda ohřáta na určité parametry (tlak a teplotu) je ji možné distribuovat ke spotřebitelům (do spotřebiče). Voda, která předala svoji energii v podobě tepla či teplé užitkové vody, je čerpána zpět o nižších parametrech. Tato voda nejdříve přijímá teplo vyrobené v elektrokotli. Samotné teplo musí být

předáno ve výměníku tepla číslo 2. Je nutné, aby se oběhová voda nesmíchala s kapalinou v primárním okruhu elektrokotle, ani s demineralizovanou vodou primárního okruhu elektrárny.

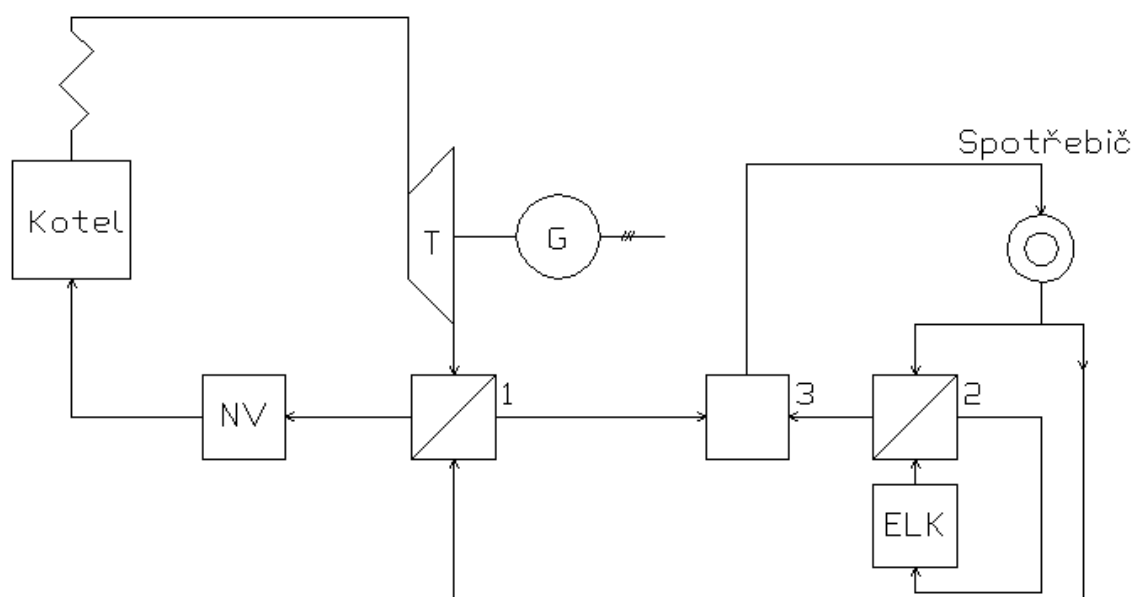


Obr. 4-3 Sériové zapojení elektrokotle s ohřívákem vody

4.3.2 Paralelní zapojení elektrokotle s ohřívákem vody

Další možností, jak zapojit ELK do teplárenského oběhu teplé vody, je paralelní zapojení ohříváků vody s elektrokotlem. Toto zapojení je znázorněno na obrázku číslo 4-5, na kterém je zobrazen zjednodušený náčrt oběhové vody. Jako v předchozím zapojení se pod výměníkem číslo 1 nacházejí základní ohříváky se špičkovými ohříváky a dalšími technologickými zařízení pro dopravu či regulaci oběhové vody.

Samotný princip tohoto zapojení je využití směšovače, ve kterém se smísí ohřátá voda z elektrárenského oběhu a ohřátá voda z elektrokotle, a tak vytvoří horkou vodu s danými parametry. Směšovač, ve kterém se ohřáté vody smísí, je označen číslem 3. Číslem 2 je znázorněn výměník tepla mezi primární stranou ELK a oběhu teplárenské vody. Po té co se voda ohřála z obou zdrojů, předává energii spotřebiči, představující například domácnosti, a od něho se vrací o nižších parametrech zpět do teplárny. Zde se regulovaným rozdělovačem voda rozdělí v potřebném poměru do výměníku tepla u ELK (2) a do výměníku tepla z elektrárenského oběhu (1).



Obr. 4-4 Paralelní zapojení elektrokotle s ohřívákem vody

5 ZPŮSOB PŘIPOJENÍ ELEKTROKOTLE V ELEKTRÁRNÁCH OPATOVICE

Pro možnost připojení samotného elektrokotle do zařízení v Elektrárnách Opatovice a.s. je nutné poznat aktuální technologie, kterými teplárna disponuje a které používá v provozu.

5.1 Elektrárna Opatovice a.s.

Elektrárna byla postavena u obce Opatovce nad Labem v blízkosti města Hradec králové a Pardubice z důvodu zvýšení spotřeby elektrické energie po II. Světové válce. Slavnostní zahájení výstavby proběhlo 5. 7. 1956, přičemž první blok byl uveden do provozu dne 13. 6. 1959, poslední 6. blok byl spuštěn do provozu o necelý rok déle a to 27. 5. 1960. Elektrárna disponovala 6 bloky s kondenzačními turbínami, které poháněli turbogenerátory o výkonu 55 MW. Celkový výkon tedy dosahoval 330 MW.



Obr. 5-1 Elektrárna Opatovice a.s. [20]

Současná elektrárna (Obr. 5-1) dosahuje výkonu 363 MW, přičemž tento výkon vyrábějí 3 kondenzační turbíny o velikosti 60 MW, 2 odběrové turbíny o výkonu 63 MW a 60 MW. Poslední turbínou je protitlaká turbína, která dosahuje výkonu 60 MW. Celkový tepelný výkon do SZT činí 698 MWt. Elektrárna disponuje 6 kotli, které spalují hnědé uhlí, které je předem drceno a foukáno do kotle z uhelných mlýnů. Tyto typy kotlů se nazývají práškovými. Bubnový kotel o výkonu 176 MWt vyrábí 250 t/h páry v bubnu. Celkové množství vyráběné páry dosahuje 1500 t/h. Pára z jednoho kotle může být použita na výrobu elektrické energie či výrobu tepla v jakékoli instalované turbíně. Za tímto účelem jsou v elektrárně instalované společné parovody s rozdělovači, které mohou přeposlat páru na jakoukoli turbínu. Tento společný parovod je užitečný v době odstávek jednotlivých technologií, ať už se jedná o odstavené turbíny či kotle. Hnědé uhlí, které elektrárna spaluje, se dováží po železniční trati do elektrárny na skládku.

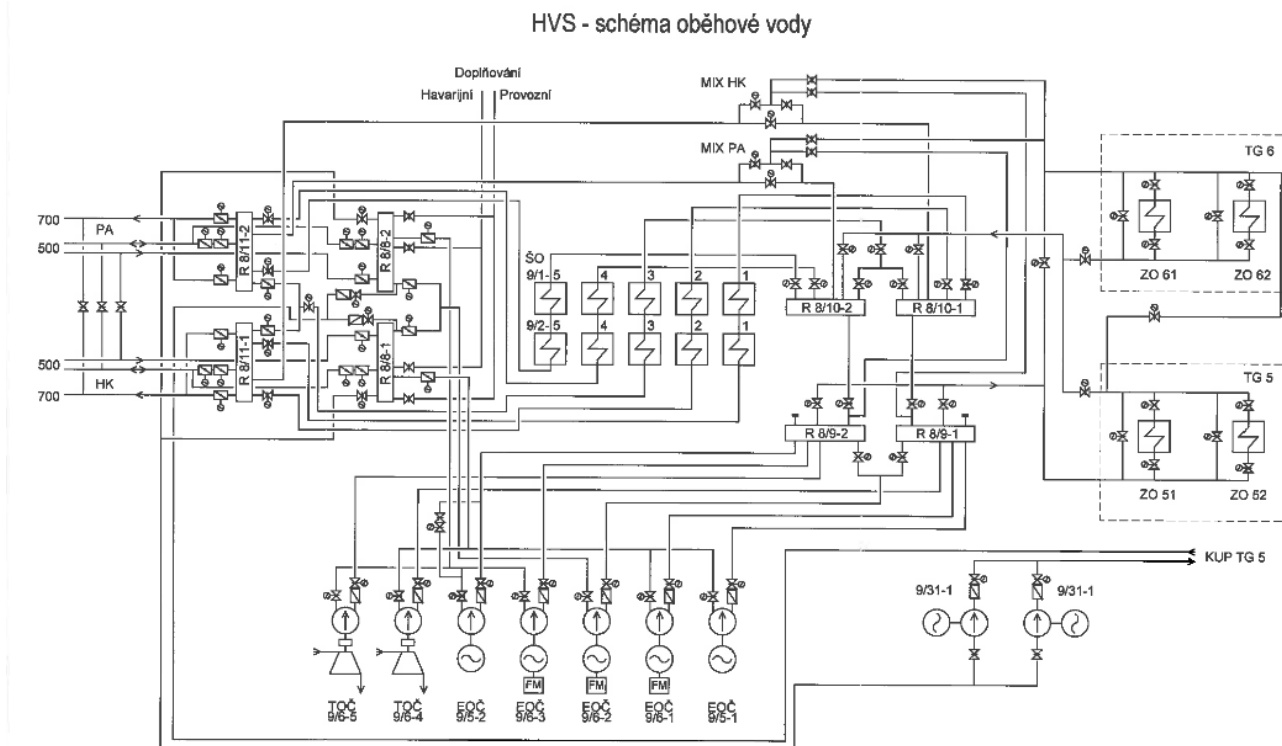
Chlazení „páry“, která již předala svou energii lopatkám turbín, je provedeno jako průtočné, které čerpá chladící vodu z řeky Labe. Oteplená voda je před vypuštěním do řeky okysliče na přepadech. V případě nedostatku chladící vody z Labe je využíváno cirkulační chlazení, které je schopno pokrýt 30% výkonu elektrárny.

Proto, aby elektrárna splňovala emisní normy, jsou za kotli odlučovači popílků, které zachytávají tuhé částice ve spalinách. V posledních letech jsou dříve instalované elektrostatické odlučovače popílků nahrazovány textilními odlučovači. Pro snižování oxidů síry ve spalinách jsou instalovány 2 absorbéry, pro každé 3 kotle jeden, které snižují obsah síry ve spalinách až o 96 %. Metoda použitá v těchto absorbérách se nazývá mokrá vápencová vypírka, která používá vápence, což je sorbent, který naváže s molekulami síry a přetvoří se na energosádrovec, který se usazuje v absorberu a je dále dopravován na dočasné uložení. Produkty vzniklé při spalování a při čištění spalin jsou uskladňovány a tříděny na území elektrárny v míchacím centru, která smíchává materiály na dané požadavky spotřebitelů, nebo je skladuje v 4 km vzdáleném uložení.

5.1.1 Parametry turbín

Již dříve zmíněné kotle vyrábí v kotli páru o parametrech 9,5 MPa a 525 °C, která předává energii lopatkám turbín. Samotné turbíny tvoří vysokotlaký a nízkotlaký díl turbíny, kromě protitlaké turbíny, kterou tvoří pouze vysokotlaká část. Za kondenzačními turbínami (TG1, TG2, TG4) je tlak „páry“ 4 kPa. Tento tlak najdeme i u odběrové turbíny TG3, která má maximální odběr páry do spotřebiče (regulovaný odběr) 245 t/h, při maximální hltnosti páry turbínou 330 t/h. Přičemž maximální hltnost nízkotlaké části turbíny je 185 t/h. Tlak v odběru dosahuje 0,45 MPa. Druhá odběrová turbína TG6 má při tlaku 0,3 MPa při maximální hostnosti regulovaný odběr 260 t/h, přičemž hltnost celé turbíny je 330 t/h. Protitlaká turbína TG5 má pouze vysokotlakou část turbíny, po které následuje kondenzace páry v základních ohřívacích oběhové vody. Hltnost této turbíny je 300 t/h. Částečné schéma parního oběhu je znázorněna na obrázku 5-2. Na něm můžeme vidět mimo jiné kotle, které se nacházejí v horní části obrázku, pod nimi se nachází společný parovod, pod kterým jsou znázorněna turbosoustrojí. Z odběrových turbín a z protitlaké turbíny vidíme odběr na ohříváky oběhové vody. Vidíme v levé části schématu vývod ze společného parovodu, který vede přes redukční stanici, která redukuje ostrou páru pro ohřívání oběhové vody, pro případ poruchy TG. Respektive nechává možnost ohřívání oběhové vody do vyřešení závady. Pára se využívá také pro pohon turbooběhových čerpadel oběhové vody, které ženou vodu do ohříváků. Tato čerpadla můžeme pozorovat v levé části schématu.

Pro zvýšení účinnosti jsou turbíny vybaveny regenerací a to vysokotlakou a nízkotlakou. Samozřejmostí parního oběhu je odplynovák. Pro regeneraci je z turbín neregulovatelným odběrem odebráno určité množství páry. Díky velikosti výkonu bloku není v této elektrárně zavedeno přehřívání páry mezi vysokotlakým a nízkotlakým dílem turbíny.



Obr. 5-3 Schéma oběhové vody Elektrárny Opatovice

Prvotní ohřev oběhové vody začíná v základních ohřívácích TG5, které vidíme na obrázku 5-3 pod označením ZO 51 a ZO 52. Tyto ohříváky jsou napojeny na vývod páry z protitlaké turbíny. Po zvýšení teploty v ZO 51 a ZO 52, pokračuje voda do základních ohříváků TG6 s označením ZO 61 a ZO 62, které jsou napojeny na vývod z regulovaného odběru turbíny TG6. Voda pokračuje přes rozdělovač R 8/10-2 a R 8/10-1, ve kterých je rozdělena na daný vývod tepla a to buď směrem do Hradce Králové (HK) či do Pardubic (PA). Dále pokračuje voda do špičkových ohříváků s označením ŠO 9/1-(1-5) a ŠO 9/2-(1-5). Tyto ohříváky jsou napojeny na regulovaný odběr z odběrové turbíny TG3. Po té je voda dopravována do výměňkových stanic dříve uvedených měst.

Jak vidíme z obrázku, k proudění napájecí vody jsou použita oběhová čerpadla, která jsme viděli na předchozím obrázku. Tato oběhová čerpadla se v posledních letech vyměňují za čerpadla řízená frekvenčním měničem.

5.2 Připojení elektrokotle k Elektrárně Opatovice

V této kapitole bude řešen výběr druhu elektrokotle pro daný druh podpůrné služby. U tohoto elektrokotle bude nutné vybrat místo, odkud se bude napájet ELK. V úvahu připadají tři možné varianty, které budou podrobněji popsány. Tento přivedený výkon, z důvodu nedostatku místa bude veden kabelem v zemi v ochranném potrubí. Nutností bude toto vedení nadimenzovat. V této podkapitole budou popsány ochrany k elektrokotli.

5.2.1 Výběr elektrokotle

Nutností pro výběr elektrokotle je druh podpůrné služby, která bude díky elektrokotli rozšířená či nově podporovaná. Dobré si je uvědomit, odkud výrobce pochází a myslet na případnou dopravu

elektrokotle. Většina výrobců pochází ze severských zemí Evropy, kromě výrobce tryskajícího elektrokotle, který sídlí ve spojených státech amerických.

U popisovaných elektrokotlů z kapitoly 3 je známo, který kotel má rychlejší regulaci výkonu. Ponorný elektrokotel najede na maximální výkon do 5 min., zatímco elektrokotel, který se reguluje pomocí izolátorů, najede na maximální výkon do 3 min.. Z praxe je patrné, že ponorný elektrokotel se používá pro podporování minutových záloh. Tento typ elektrokotle je využit v teplárně ŠKO-ENERGO v Mladé Boleslavi. Výrobce píše o plynulé regulovatelnosti výkonu, ale pokud dojde na změnu skupenství tekutiny ve vnitřní nádobě, při které dochází k nestálosti hladiny a tudíž i k nestálosti výkonu, je regulace nespojitá. Tento typ elektrokotle lze využít pouze pro nulový či maximální výkon, a proto je tento elektrokotel vhodný pro zápornou minutovou zálohu. Další jmenovaný druh elektrokotle je využíván pro rozšiřování rozsahu sekundární regulace. Příkladem je využití tohoto ELK v teplárně v Příbrami. Pomocí tohoto elektrokotle se zvyšuje rozsah poskytované sekundární regulace, jelikož je ELK horkovodní a nedochází k vývinu páry, tudíž nedochází k výkonovým výkyvům. K regulaci výkonu se používají izolátory obklopující elektrody. Samozřejmě, že i tento druh elektrokotle, může poskytovat zápornou minutovou zálohu.

Pro výběr elektrokotle je tedy nutné vědět, kterou z dříve popsaných PpS chceme rozšířit v Elektrárně Opatovice. Ze zdrojů ČEPS víme, že lépe placená služba je SR_{\pm} , a proto je z hlediska ekonomické vhodné rozšířit rozsah poskytované SR_{\pm} . Průměr cen za kalendářní týden je veřejně dostupný na následujícím odkazu. [21]

5.2.2 Umístění elektrokotle v Elektrárně Opatovice

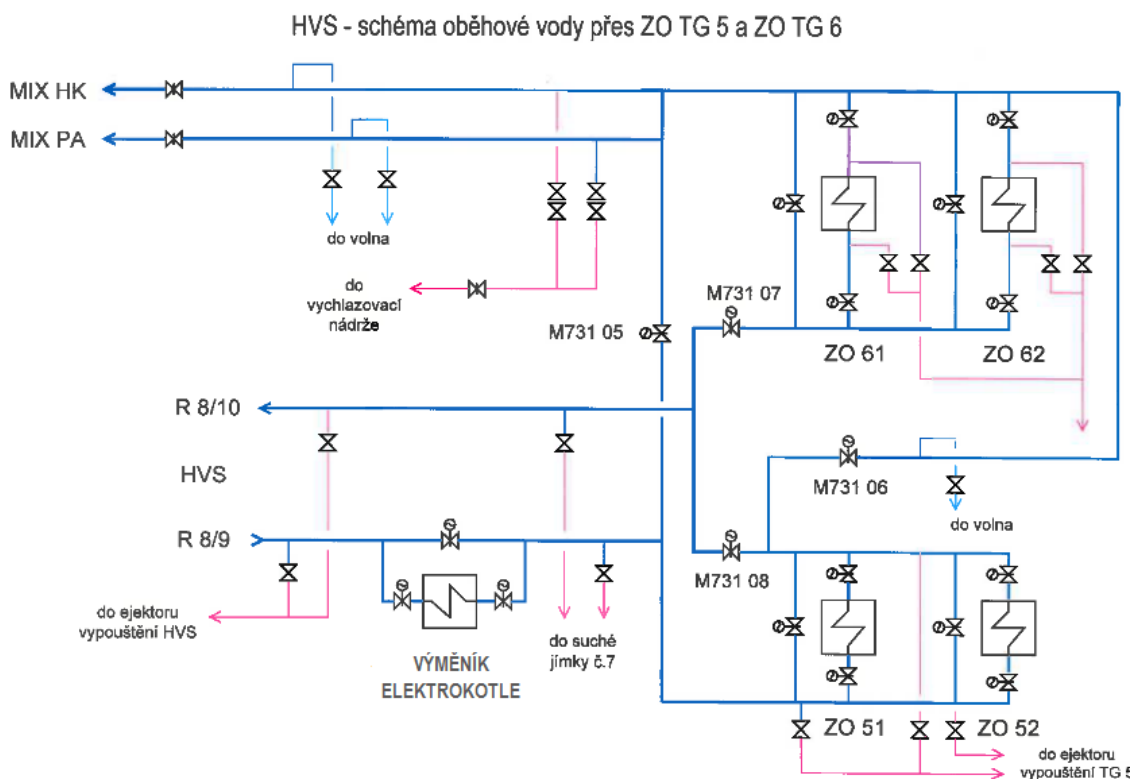
Pro elektrokotel je připraveno místo ve strojovně na podlaží 0 m, místo je za TG6, která je odběrová. Za plánovaným ELK se nacházejí čerpadla oběhové vody. Toto místo je vyobrazeno na obrázku 5-4. Nyní se zde nachází zařízení pro olejové hospodářství, které se snadno přepraví na jiné místo.



Obr. 5-4 Místo pro ELK

Místo je vybráno s ohledem na možnost volného místa a na jednoduchost připojení výměníku, který bude předávat teplo oběhové vodě.

Na vybraném místě v blízkosti elektrokotle se pod podlahou nachází přívod oběhové vody do ohříváku, který se nachází pod protitlakou turbínou. Bude tedy vybrán způsob využití tepla z ELK pro ohřívání oběhové vody, který předejde ohříváku před hlavním ohřívákem. Tento způsob využití tepla je již popsán v podkapitole 4.3.1. Na obrázku 5-5 vidíme částečné schéma oběhové vody v EOP. Vidíme, že ELK je umístěn před hlavní ohříváky ZO 51 a ZO 52. Samozřejmě je vybaven ventily pro řízení oběhové vody v případě využití ELK či nikoli.



Obr. 5-5 ELK zapojený do teplárenského okruhu

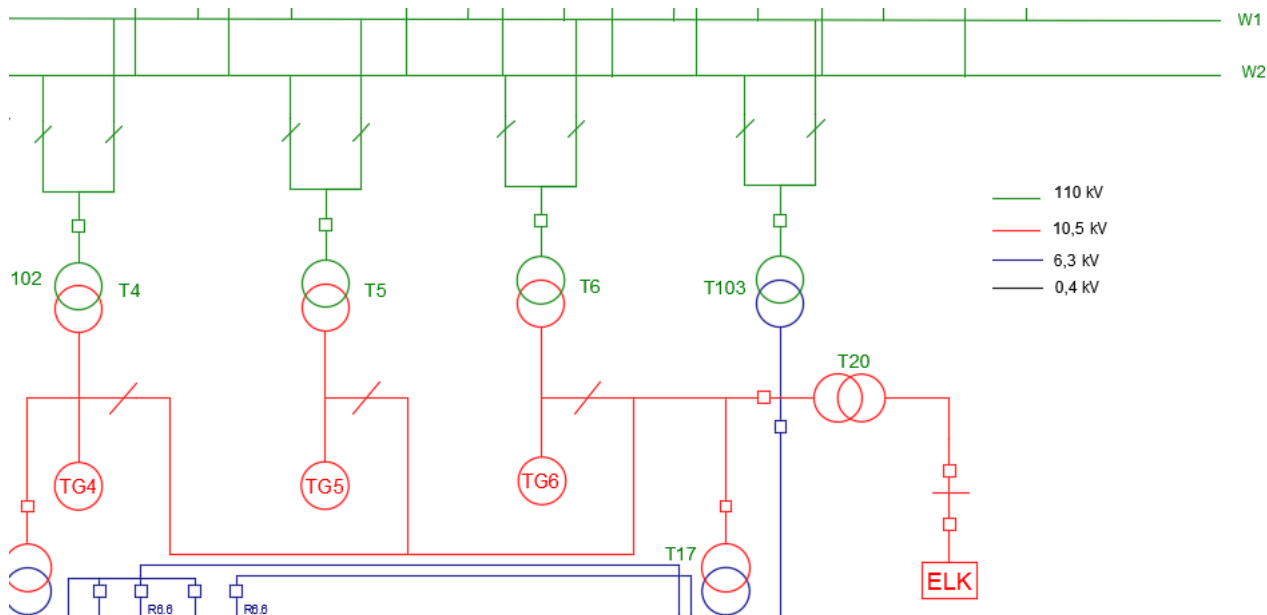
5.2.3 Přivedení výkonu k elektrokotli

Výkon ELK je uvažován s ohledem na možnosti rozšíření rozsahu. Pro EOP je rozhodnuto o velikosti rozšíření rozsahu nabízené PpS a to o velikosti 25 MW. Tento elektrokotel bude napájen napětím 10,5 kV s výjimkou uvažování odebrání výkonu z rozvodny vlastní spotřeby. Nutné je určit ekonomické a technické napojení výkonu. V EOP jsou známy tři možnosti vyvedení výkonu a to buď od generátorů z hladiny 10,5 kV, z rozvodny vlastní spotřeby 6,3 kV, nebo z venkovní rozvodny 110 kV.

5.2.3.1 Vyvedení výkonu od generátoru z hladiny 10,5 kV

Zdá se, že toto zapojení se může zdát jako nejvýhodnější z důvodu stejné hladiny napětí generátoru a ELK, ale opak je pravdou. Pro připojení ELK k této síti by bylo nutné pořídit oddělovací transformátor z důvodu bezpečnosti. To zas takový problém není, ale pokud se vezme v úvahu částečné schéma EOP, které je znázorněno na obrázku 5-6, ze kterého je patrné, že pro nepřetržité využití ELK není přizpůsobené. Respektive generátory nejsou propojené tak, aby mohly libovolně dodávat výkon z jakéhokoli generátoru do ELK. Podle schématu je patrné, že se dají odpojovačem připojit na transformátor vlastní spotřeby z jiného generátoru, to se děje pouze za

předpokladu odstávky generátorů. Z toho vyplývá, že pokud by byl využit ELK pro rozšiřování PpS, musel by generátor, na který je ELK připojen, být v provozu, respektive nesměl by být odstaven.

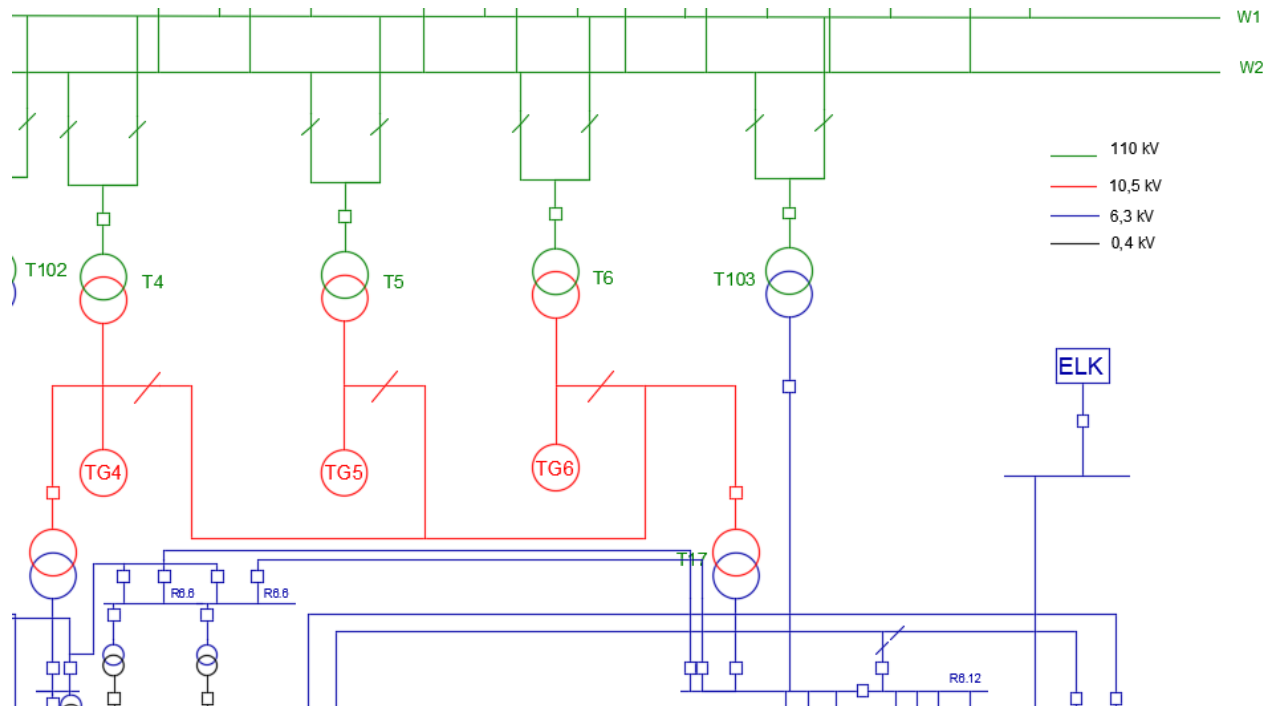


Obr. 5-6 Částečné schéma EOP 1

Na obrázku 5-6 je zobrazeno možné připojení ELK přes oddělovací transformátor. Náklady na transformátor 10,5/10,5 kV o výkonu 25 MVA by činily zhruba 14 mil. Kč dle informací od společnosti elpro-energo.

5.2.3.2 Vyvedení výkonu z rozvodny vlastní spotřeby z hladiny 6,3 kV

Další možnost jak přivést výkon k elektrokotli je z rozvodny vlastní spotřeby. Jednalo by se o napájení elektrokotle přímo z hladiny 6,3 kV. Na první pohled se zdá, že nebude nutné dokoupit transformátor pro nový odebíraný výkon, opak je pravdou. Z důvodu, že rozvodna napájí spotřebiče, které mají vliv na chod elektrárny a je tedy nutné je napájet bez omezení. Výkon stávajícího transformátoru 110/6,3 kV o výkonu 25 MVA je dostačující pro zatížení, které se vyskytuje při zatížení výkonem způsobeným provozem spotřebičů. Při připojení ELK k této rozvodně by došlo k přetížení transformátoru, z toho důvodu by byla nutná výměna transformátoru za větší výkon a to na 50 MVA. Nutné je při úvaze této varianty, brát v potaz změny odebíraného výkonu a s tím i změny napětí na transformátoru. Jelikož je nutné pro tyto spotřebiče stálá hladina napětí, mají tyto transformátory automatickou regulaci napětí. Díky této funkci by se už tak drahý transformátor prodražil. Uvažujeme transformátor 110/6,3 kV o výkonu 50 MVA s cenou okolo 21 mil. Kč.



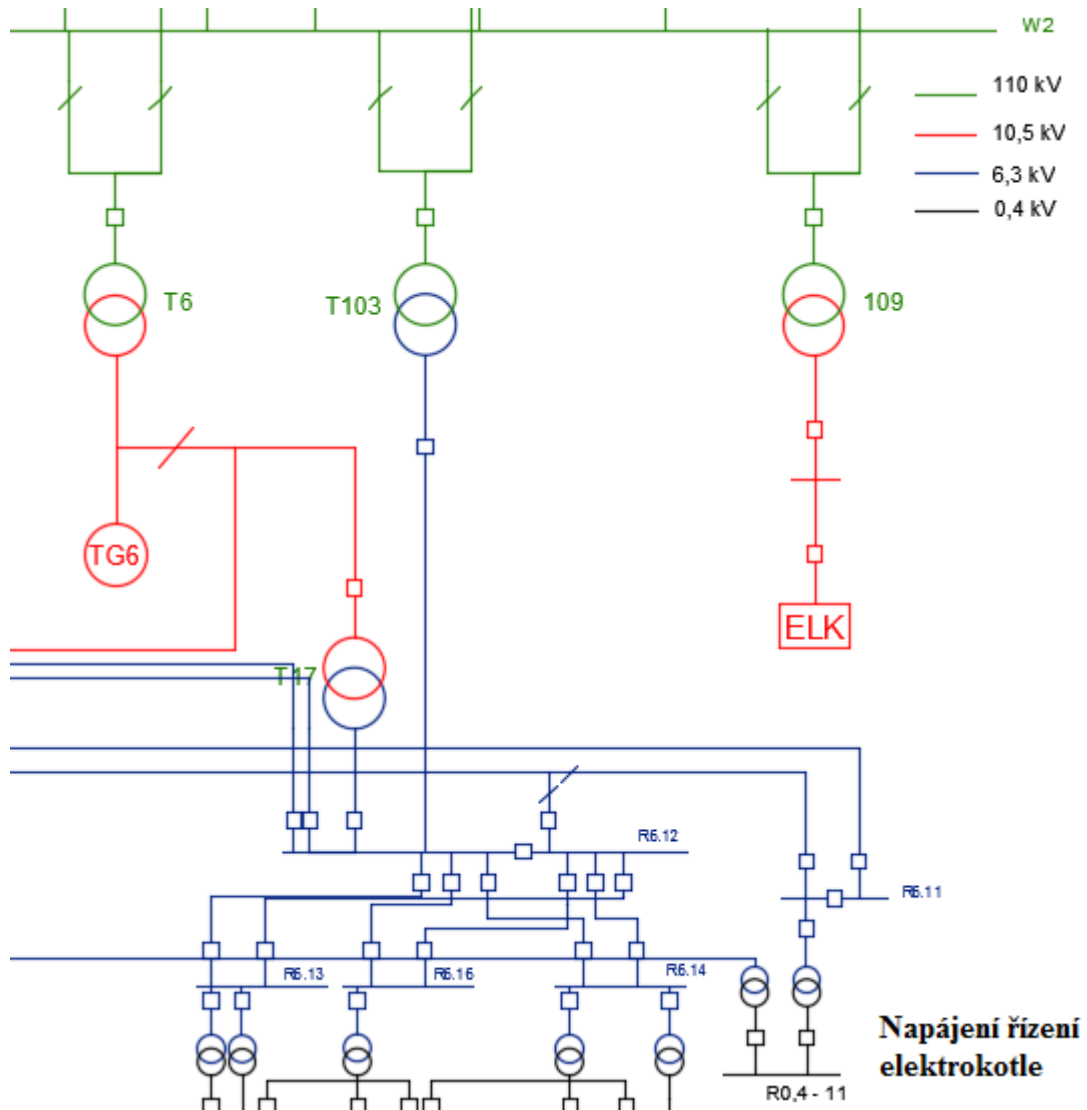
Obr. 5-7 Částečné schéma EOP 2

Na obrázku 5-7 vidíme připojení ELK z rozvodny vlastní spotřeby z napětové hladiny 6,3 kV. ELK je připojen k rozvodně přes výkonový vypínač.

5.2.3.3 Vyvedení výkonu z venkovní rozvodny 110 kV

Poslední zmiňovanou možností je vyvedení výkonu z rozvodny 110 kV. Tento způsob je zobrazen na obrázku 5-8. Výkon je vyveden z dvojitého systému přípojnic, tudíž může být spuštěn kdykoli bez závislosti na spuštění určitého generátoru. Znamená to, že v porovnání s připojením ELK z příkladu uvedeném v odstavci 5.2.3.1, může být výkon odebírán z jakéhokoli generátoru a to i z více najednou. Další výhodou v porovnání s příkladem uvedeném v odstavci 5.2.3.2 je pořízení transformátoru o výkonu 25 MVA. Cena tohoto transformátoru je přibližně 15 mil. Kč dle společnosti elepro-energo. Elektrokotel nepotřebuje regulaci napětí v závislosti na odebíraném výkonu, tudíž ani tento transformátor nemusí mít laditelné odbočky.

Je samozřejmé, že komponenty pro řízení a kontrolu ELK nebude možné napájet z hladiny 10,5 kV bez transformování na nižší napětí. Při vynechání instalace transformátoru tu je příležitost napájení těchto komponentů z rozvodny vlastní spotřeby R0,4-11 z napětové hladiny 400 V.



Obr. 5-8 Částečné schéma EOP 3

5.2.4 Ochrany elektrokotle

Základem každého eklektického zařízení je ochrana proti ohrožení zařízení a jeho okolí účinky elektrického proudu a napětí. I v tomto případě instalovaný ELK bude mít ochrany zmírňující účinky proudu při poruše a ochranu proti nebezpečnému dotyku osob. V této kapitole bude popsáno využití elektrických ochrany u elektrokotle. Pro elektrokotel se instalují ochrany:

- Nadproudová
- Rozdílová
- Distanční
- Ochrana zábranou
- Ochrana vnitřních zkratů transformátoru

Na obrázku 5-9 je zobrazeno připojení ELK k rozvodně přes transformátor 110/10,5 kV 25 MVA společně s elektronickými ochranami, které představují dostatečnou ochranu pro poruchy. Ochrany jsou vybrány od společnosti SIMENS a to s názvem Protect 4.

Rozdílová ochrana, v tomto případě se jedná o ochranu s označením 7UT612, chrání samotný transformátor proti vnitřním zkratům, ať už se jedná o mezifázové zkraty či zkraty s nádobou transformátoru (kostrou). Pokud rozdílová ochrana rozpozná poruchu, pošle povel pro vypnutí obou vypínačů nacházejících se před a za transformátorem. Pokud se popisuje ochrana samotného transformátoru, tak samozřejmě výbavy transformátoru je Buchholzovo relé, které zaznamená malé nadproudy či velké zkraty pomocí rozkládajícího oleje na plyny při teplených účincích těchto zkratů. Proti zkratu procházejícím kostrou transformátoru je instalována nádobová ochrana, která využívá sčítání proudů uzemněného vodiče kostry a všech přívodních kabelů pro fungování transformátoru. Pro využití této ochrany, je nutné odizolování transformátoru od země s výjimkou již zmiňovaného vodiče.

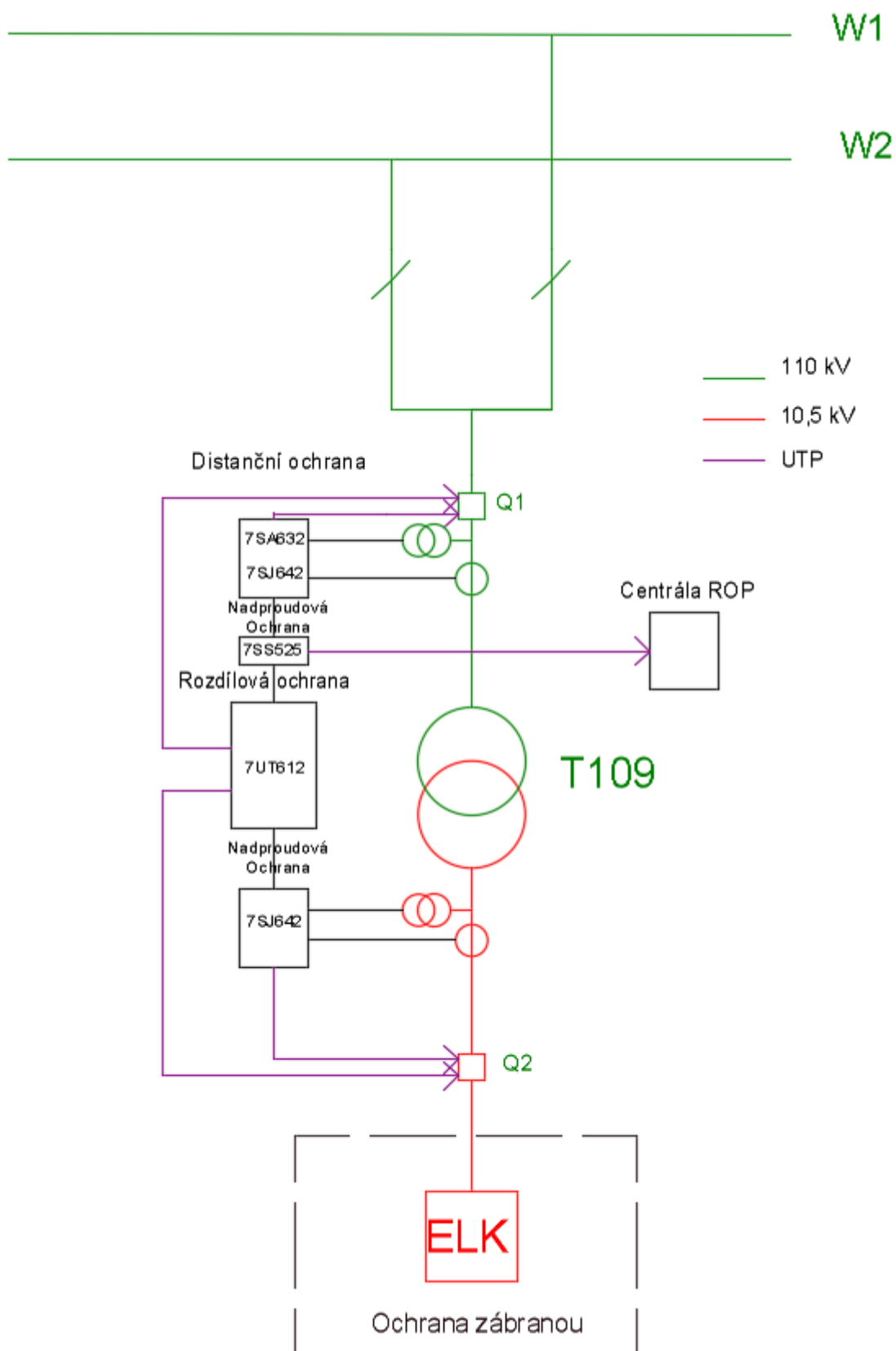
Nadproudová ochrana s označením 7SJ642 měří protékající proud do ELK přístrojovými transformátory proudu. Pokud se velikost proudu dostane do „zakázané oblasti“, která může být časově závislá či nezávislá, ochrana vydá rozkaz vypínači na jeho vybavení. Elektrokotel bude vybaven dvěma nadproudovými ochranami, jednou před transformátorem a druhou za transformátorem, přičemž selektivita obou dvou ochran bude nastavena tak, že dříve pošle povel na vybavení vypínače ochrana na straně nižšího napětí na Q2, pokud však tato ochrana nevybaví, tak po přibližně 0,2 s pošle ochrana na straně vyššího napětí povel na vybavení vypínače Q1. Takto nastavená selektivita je z důvodu protékajících větších proudů na straně nižšího napětí.

Distanční ochrana, jak je známo, měří délkovou impedanci vedení měřícími transformátory proudu a napětí. V tomto případě se bude jednat o ochranu s označením 7SA632. Ochrana zná impedanci vedení při normálním stavu (bez zkratu) a pokud se tato impedance změní za ohraničené pásmo, ochrana vybaví. Jelikož díky velikosti impedance známe místo zkratu, distanční ochrana pošle povel k vybavení do vypínače, který vypne pouze zasaženou oblast. V našem případě bude distanční ochrana směřována od přípojky ze 110 kV k elektrokotli a měřit pouze tuto oblast. Bude hlídat oblast jak před transformátorem, v transformátoru, tak i za transformátorem.

Ochrana zábranou bude instalována kolem samotného elektrokotle. Bude se jednat o pletivo s dvířky, které budou obsahovat čidlo otevření. Při otevření při chodu elektrokotle dojde k vybavení vypínače Q2.

Selektivita ochran je nastavena tak, že jako první vybaví ochrana rozdílová, která nemá časové zpoždění. Pokud nastane zkrat mimo vedení chráněné rozdílovou ochranou, vybaví ochrana nadproudová v pořadí, které bylo již dříve popsáno. Distanční ochrana bude zpožděná i za druhou zkratovou ochranou a bude vybavovat nejdéle. K okamžitému odpojení od sítě bude použita ochrana zábranou, před dotykem živých částí.

Rozdílová ochrana přípojnic je postupně zaváděna v elektrárně. Jedná se o ochranu, která měří a sleduje veškeré toky jednotlivých proudů, které tečou z, nebo do přípojnice. Pokud zaznamenají rozdíl toků proudu, okamžitě danou odbočku odpojí. V EOP není dokončená celková modernizace ochran z elektromechanických na elektronické, a proto tato ochrana nemůže pracovat. Pracovat bude, až bude mít veškeré informace ze všech odboček.



Obr. 5-9 Ochrany elektrokotle

5.2.5 Návrh kabelového vedení k elektrokotli

Jako nejvhodnější varianta pro vyvedení výkonu je z rozvodny 110 kV, která je popsána v podkapitole 5.2.3. Nebude zde muset být instalovaný transformátor o větším výkonu s možností automatickou regulací odboček, jako v druhé variantě. Chod elektrokotle nebude závislí na chodu dané turbíny jako u první varianty.

Výkon bude vyveden k transformátoru 110/10,5 kV o výkonu 25 MVA venkovním vedením z dvojitého systému přípojnic. Tento vývod bude tvořit odpojovače na každé ze dvou odboček a jeden společný výkonový vypínač. Za transformátorem bude veden výkon k elektrokotli kabelem a to díky úspoře místa. Kabel bude chráněn druhým vypínačem.

Za zamýšleným transformátorem vede podzemní šachta, ve které budou kabely vedeny na perforované lávce nad sebou. Pro každou fázi jedna lávka. Průřez tohoto kabelu bude navržen tak, aby odolal nárazovému zkratovému proudu. Budou provedeny dva výpočty pro dva různé kabely a to hliníkový 22-AXEKVCEY a měděný 22-CXEKVCEY.

5.2.5.1 Výběr kabelu

Pro určení průřezu kabelu bude nutné vypočítat jmenovitý proud, který poteče kabelem do ELK při jeho maximálním výkonu, přibližně 25 MW. U výpočtů je uvažována délka vedení 230 m, uložení v betonové šachtě na perforované lávce při teplotě 20 °C.

$$I = \frac{P}{3 \cdot U_F \cdot \cos \varphi} = \frac{25 \cdot 10^6}{3 \cdot \frac{10500}{\sqrt{3}} \cdot 1} = 1375 \quad (I; W, V, \%, -) \quad (5.1)$$

Ve výpočtu 5.1 je I proud tekoucí kabelem při maximálním zatížení, P je maximální výkon elektrokotle, $\cos \varphi$ je účinník elektrokotle. Jelikož se jedná o čistě ohmickou zátěž, je uvažován účinník $\cos \varphi = 1$.

Jelikož je kabel uložen na vzduchu v perforované lávce je nutné přepočítat jmenovitý proud dvěma koeficienty a to koeficient k_1 podle teploty vzduchu z tabulky 5-1 a koeficient k_2 podle uložení kabelů na perforované kabelové lávce v tabulce 5-2. Jelikož je znám jmenovitý proud do ELK, který je srovnán se jmenovitými proudy kabelů z tabulek 5-3 a 5-4, je patrné že bude nutné vést fázi pomocí dvěma kabely, protože jmenovitý proud kabelů o největším průřezu je menší, než jmenovitý proud elektrokotlem, proto koeficient k_2 bude 0,87, kdy uvažujeme dva kabely těsně seskupené vedle sebe s třemi lávkami nad sebou.

$$I_z = \frac{I}{k_1 \cdot k_2} = \frac{1375}{1,08 \cdot 0,87} = 1463 \quad (A; A, -, -) \quad (5.2)$$

Jak je vidět z předchozího výpočtu, zatěžovací proud se zvýšil, a proto se s ním musí počítat dále pro výběr vhodného kabelu.

Tab. 5-1 Přepočítávací součinitelé pro okolní teploty vzduchu odlišné od referenční teploty 30°C [22]

Nejvyšší dovolená provozní teplota jádra (°C)	Teplota prostředí (°C)									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
60	1,29	1,22	1,15	1,08	1,00	0,91	0,82	0,71	0,58	0,41
65	1,25	1,2	1,13	1,07	1,00	0,93	0,85	0,76	0,65	0,53
70	1,22	1,17	1,12	1,06	1,00	0,94	0,87	0,79	0,71	0,61
75	1,2	1,15	1,11	1,05	1,00	0,94	0,88	0,82	0,74	0,67
80	1,18	1,14	1,1	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77	0,71
85	1,17	1,13	1,09	1,04	1,00	0,95	0,9	0,85	0,8	0,74
90	1,15	1,12	1,08	1,04	1,00	0,96	0,91	0,87	0,82	0,76
95	1,11	1,08	1,06	1,03	1,00	0,97	0,94	0,91	0,88	0,85

Tab. 5-2 Přepočítávací součinitelé proudové zatížitelnosti při seskupení několika více žilových kabelů v jedné vrstvě na vzduchu [22]

Způsob uložení podle tabulky A.52.3		Počet lávek nebo žebříků	Počet kabelů								
			1	2	3	4	6	9			
Perforované kabelové lávky (poznámka 3)	31	Těsně seskupené		1	1,00	0,88	0,82	0,79	0,76	0,73	
				2	1,00	0,87	0,8	0,77	0,73	0,68	
				3	1,00	0,86	0,79	0,76	0,71	0,66	
				6	1,00	0,84	0,77	0,73	0,68	0,64	
		Volně seskupené		1	1,00	1,00	0,98	0,95	0,91	-	
				2	1,00	0,99	0,96	0,92	0,87	-	
				3	1,00	0,98	0,95	0,91	0,85	-	
Svislé perforované kabelové lávky (poznámka 4)	31	Těsně seskupené		1	1,00	0,88	0,82	0,78	0,73	0,72	
				2	1,00	0,88	0,81	0,76	0,71	0,70	
				1	1,00	0,91	0,89	0,88	0,87	-	
				2	1,00	0,91	0,88	0,87	0,85	-	
		Volně seskupené		1	1,00	0,91	0,89	0,88	0,87	-	
				2	1,00	0,91	0,88	0,87	0,85	-	
				1	1,00	0,91	0,89	0,88	0,87	-	
				2	1,00	0,91	0,88	0,87	0,85	-	
Neperforované kabelové lávky	31	Těsně seskupené		1	0,97	0,84	0,78	0,75	0,71	0,68	
				2	0,97	0,83	0,76	0,72	0,68	0,63	
				3	0,97	0,82	0,75	0,71	0,66	0,61	
				6	0,97	0,81	0,73	0,69	0,63	0,58	
Kabelové žebříky, rošty, háky apod. (poznámka 3)	32	Těsně seskupené		1	1,00	0,87	0,82	0,80	0,79	0,78	
				2	1,00	0,86	0,80	0,78	0,76	0,73	
				3	1,00	0,85	0,79	0,76	0,73	0,70	
	33			6	1,00	0,84	0,77	0,73	0,68	0,64	
		34	Volně seskupené		1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-
					2	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	-
			3	1,00	0,98	0,97	0,96	0,93	-		

Tab. 5-3 parametrů kabelu 22-AXEKVCEY

Počet a průřez žil (mm ²)	Tvar jádra	Průměr inf. (mm)	Hmotnost inf. (kg/km)	Poloměr ohybu (mm)	Činný odpor (Ω/km)	Ekvivalentní zkrat. proud (kA) • °
1x50/16	RMV	35	1 150	700	0,641	4,70 3,20
1x70/16	RMV	36	1 180	720	0,443	6,58 3,20
1x95/16	RMV	38	1 330	760	0,320	8,93 3,20
1x120/16	RMV	39	1 440	780	0,253	11,30 3,20
1x150/25	RMV	41	1 640	820	0,206	14,10 5,00
1x185/25	RMV	43	1 840	860	0,164	17,40 5,00
1x240/25	RMV	45	2 390	900	0,125	28,20 5,00
1x300/25	RMV	45	2 050	900	0,125	22,60 5,00
1x400/35	RMV	51	2 830	1020	0,078	37,60 7,00
1x500/35	RMV	53	3 220	1060	0,060	47,00 7,00

Počet a průřez žil (mm ²)	Časová teplovací konst. (sec) ∞ ∞∞	Zatížitelnost na vzduchu (A) ∞ ∞∞	Zatížitelnost v zemi (A) ∞ ∞∞	Kapacita (μF/km)	Indukčnost (mH/km) ∞ ∞∞ ∞∞∞	Obsah Cu/Al (kg/km)
1x50/16	303 215	181 215	165 187	0,170	0,480 0,640 0,730	157 / 150
1x70/16	382 271	226 268	202 228	0,190	0,450 0,610 0,700	157 / 210
1x95/16	478 340	274 325	241 271	0,210	0,430 0,590 0,670	157 / 285
1x120/16	570 405	317 376	274 306	0,230	0,420 0,580 0,650	157 / 360
1x150/25	694 500	359 423	306 338	0,250	0,400 0,560 0,620	245 / 450
1x185/25	802 581	412 484	347 380	0,270	0,390 0,550 0,610	245 / 555
1x240/25	1 150 847	558 650	452 490	0,320	0,360 0,520 0,560	245 / 900
1x300/25	970 708	486 569	400 437	0,300	0,370 0,530 0,580	245 / 720
1x400/35	1 520 1 168	647 738	514 541	0,360	0,350 0,500 0,540	343 / 1 200
1x500/35	1 763 1 379	751 849	585 609	0,400	0,330 0,490 0,520	343 / 1 500

Tab. 5-4 parametrů kabelu 22-CXEKVCEY

Počet a průřez žil (mm ²)	Tvar jádra	Průměr inf. (mm)	Hmotnost inf. (kg/km)	Poloměr ohybu (mm)	Činný odpor (Ω/km)	Ekvivalentní zkrat. proud (kA)
1x35/16	RMV	34	1 250	510	0,524	5,01 3,20
1x50/16	RMV	34	1 386	517	0,387	7,15 3,20
1x70/16	RMV	36	1 641	525	0,268	10,00 3,20
1x95/16	RMV	38	1 932	540	0,193	13,60 3,20
1x120/16	RMV	39	2 197	570	0,153	17,20 3,20
1x150/25	RMV	41	2 594	585	0,125	21,50 5,00
1x185/25	RMV	43	2 990	615	0,099	26,50 5,00
1x240/25	RMV	45	3 577	660	0,075	34,30 5,00
1x300/25	RMV	47	4 179	705	0,060	42,90 5,00
1x400/35	RMV	51	5 310	757	0,047	57,20 7,00
1x500/35	RMV	54	6 320	795	0,037	71,50 7,00

Počet a průřez žil (mm ²)	Časová oteplovací konst. (sec)	Zatížitelnost na vzduchu (A)	Zatížitelnost v zemi (A)	Kapacita (μF/km)	Indukčnost (mH/km)	Obsah Cu (kg/km)
1x35/16	278 202	200 235	189 213	0,160	0,500 0,660 0,760	500
1x50/16	415 298	234 276	213 240	0,170	0,480 0,640 0,730	647
1x70/16	526 376	291 344	260 291	0,190	0,450 0,610 0,700	843
1x95/16	655 472	354 417	310 346	0,210	0,430 0,590 0,670	1 088
1x120/16	786 566	408 481	352 391	0,230	0,420 0,580 0,650	1 333
1x150/25	962 707	461 538	393 427	0,250	0,400 0,560 0,620	1 715
1x185/25	1 120 831	527 612	443 478	0,270	0,390 0,550 0,610	2 058
1x240/25	1 358 1 021	621 716	511 545	0,300	0,370 0,530 0,580	2 597
1x300/25	1 623 1 238	710 813	575 608	0,320	0,360 0,520 0,560	3 185
1x400/35	2 206 1 776	812 905	644 658	0,360	0,350 0,500 0,540	4 263
1x500/35	2 605 2 167	934 1024	724 730	0,400	0,330 0,490 0,520	5 243

Pro uložení na vzduchu v šachtě na perforované lávce s dvěma kabely natěsno vedle sebe vybereme z tabulky 5-3 2 kabely 22-AXEKVCEY o průřezu 400 mm² pro jednu fázi. V případě výběru druhého uvažovaného kabelu 22-CXEKVCEY z tabulky 5-4 jsou vybrány dva kabely o průřezu 300 mm². Z důvodu paralelního spojení kabelů se jeho parametry změnil.

5.2.5.2 Dimenzování vodiče podle tepelných účinků zkratového proudu

Výpočet impedance pro kabel 22-AXEKVCEY:

$$R = R_l \cdot l = 0,078 \cdot 0,23 = 0,01794 \quad (\Omega; \Omega/m,m) \quad (5.3)$$

$$L = L_l \cdot l = 0,5 \cdot 0,23 = 115 \quad (\mu H; mH/m,m) \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned}\bar{Z} &= R + jX_L = R + j2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 0,01794 + j2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 115 \cdot 10^{-6} = 0,01794 + j0,03613 = \\ &= 0,04033 \angle 63,59^\circ \quad (\Omega; \Omega, \Omega) \quad (5.5)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\overline{Z}_{Kab,Al} &= \left(\frac{1}{\bar{Z}} + \frac{1}{\bar{Z}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,04033 \angle 63,59^\circ} + \frac{1}{0,04033 \angle 63,59^\circ} \right)^{-1} = \\ &= 8,969 \cdot 10^{-3} + 0,018 = 0,02016 \angle 63,59^\circ \quad (\Omega; \Omega) \quad (5.6)\end{aligned}$$

Výpočet rázového zkratového proudu pro kabel 22-AXEKVCEY:

V elektrárně je 6 generátorů, ale z důvodu nebezpečí zkratových proudů je výkon do jedné přípojnice omezen na 3 generátory, proto je budeme uvažovat. Zkratový výkon určíme dle normy 60909 [23].

Znamé parametry sítě:

- Rázový zkratový proud sítě 13,94 kA
- Napětí sítě 110 kV

Znamé parametry transformátoru T4:

- Výkon 63 MVA
- Ztrátový výkon naprázdno ΔP_{Cu} 125 kW
- Napětí nakrátko u_k 10,5 %

Znamé parametry transformátoru T5:

- Výkon 72 MVA
- Ztrátový výkon naprázdno ΔP_{Cu} 144 kW
- Napětí nakrátko u_k 10,4 %

Znamé parametry transformátoru T6:

- Výkon 72 MVA
- Ztrátový výkon naprázdno ΔP_{Cu} 145 kW
- Napětí nakrátko u_k 10,32 %

Znamé parametry transformátoru T109:

- Výkon 25 MVA
- Zkratový výkon naprázdno ΔP_{Cu} 102 kW
- Napětí nakrátko u_k 10,4 %

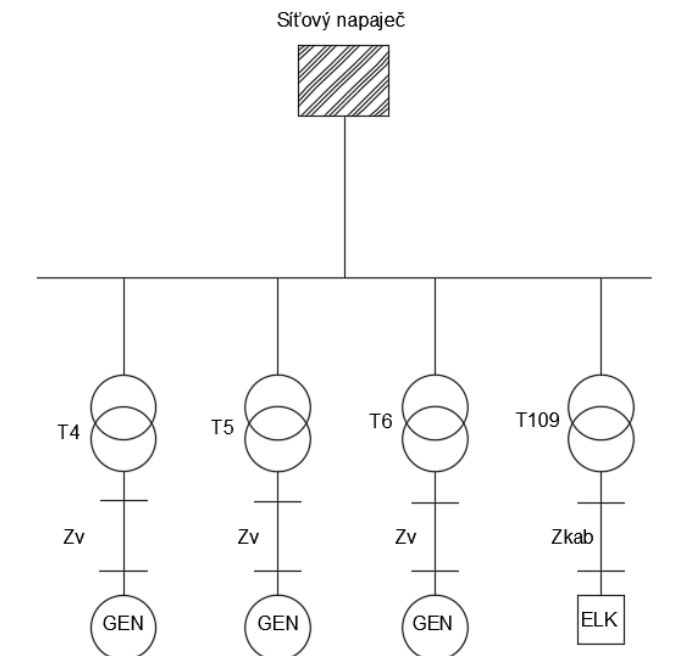
Znamé parametry Generátorů 4,5,6:

- Výkon 71,25 MVA

- Subtranzitní reaktance generátoru x_d 16,5 %

Vedení od generátorů:

- 2x holý Al vodič o průřezu 100x16 mm²
- Délka vodiče 100 m



Obr. 5-10 Počáteční schéma pro výpočet rázového zkratového proudu

Výpočet náhradních reaktancí transformátorů:

T4:

$$Z_{T4} = u_k \cdot \frac{U_{T4}^2}{S_{T4}} \cdot \frac{U_V^2}{U_{T4}^2} = 0,105 \cdot \frac{110 \cdot 10^{3^2}}{63 \cdot 10^6} \cdot \frac{10,5 \cdot 10^{3^2}}{110 \cdot 10^{3^2}} = 0,1837 \quad (\Omega; \%, V, VA, V, V) \quad (5.7)$$

$$R_{T4} = \frac{\Delta P_{Cu} \cdot U_{T4}^2}{S_{T4}^2} \cdot \frac{U_V^2}{U_{T4}^2} = \frac{125 \cdot 10^3 \cdot 110 \cdot 10^{3^2}}{63 \cdot 10^{6^2}} \cdot \frac{10,5 \cdot 10^{3^2}}{110 \cdot 10^{3^2}} = 3,4722 \cdot 10^{-3} \quad (\Omega; W, V, VA, V, V) \quad (5.8)$$

$$X_{T4} = \sqrt{Z_{T4}^2 - R_{T4}^2} = \sqrt{0,1837^2 - 3,4722 \cdot 10^{-3^2}} = 0,1836 \quad (\Omega; \Omega, \Omega) \quad (5.9)$$

T5:

$$Z_{T5} = u_k \cdot \frac{U_{T5}^2}{S_{T5}} \cdot \frac{U_V^2}{U_{T5}^2} = 0,104 \cdot \frac{110 \cdot 10^{3^2}}{72 \cdot 10^6} \cdot \frac{10,5 \cdot 10^{3^2}}{110 \cdot 10^{3^2}} = 0,1593 \quad (\Omega; \%, V, VA, V, V) \quad (5.10)$$

$$R_{T5} = \frac{\Delta P_{Cu} \cdot U_{T5}^2}{S_{T5}^2} \cdot \frac{U_V^2}{U_{T5}^2} =$$

$$= \frac{144 \cdot 10^3 \cdot 110 \cdot 10^{3^2}}{72 \cdot 10^{6^2}} \cdot \frac{10,5 \cdot 10^{3^2}}{110 \cdot 10^{3^2}} = 3,0625 \cdot 10^{-3} \quad (\Omega; W, V, VA, V, V) \quad (5.11)$$

$$X_{T5} = \sqrt{Z_{T5}^2 - R_{T5}^2} = \sqrt{0,1593^2 - 3,0625 \cdot 10^{-3^2}} = 0,1593 \quad (\Omega; \Omega, \Omega) \quad (5.12)$$

T6:

$$Z_{T6} = u_k \cdot \frac{U_{T6}^2}{S_{T6}} \cdot \frac{U_V^2}{U_{T6}^2} = 0,1032 \cdot \frac{110 \cdot 10^{3^2}}{72 \cdot 10^6} \cdot \frac{10,5 \cdot 10^{3^2}}{110 \cdot 10^{3^2}} = 0,158 \quad (\Omega; \%, V, VA, V, V) \quad (5.13)$$

$$R_{T6} = \frac{\Delta P_{Cu} \cdot U_{T6}^2}{S_{T6}^2} \cdot \frac{U_V^2}{U_{T6}^2} =$$

$$= \frac{145 \cdot 10^3 \cdot 110 \cdot 10^{3^2}}{72 \cdot 10^{6^2}} \cdot \frac{10,5 \cdot 10^{3^2}}{110 \cdot 10^{3^2}} = 3,0838 \cdot 10^{-3} \quad (\Omega; W, V, VA, V, V) \quad (5.14)$$

$$X_{T6} = \sqrt{Z_{T6}^2 - R_{T6}^2} = \sqrt{0,158^2 - 3,0838 \cdot 10^{-3^2}} = 0,1579 \quad (\Omega; \Omega, \Omega) \quad (5.15)$$

Kde Z_T představuje náhradní impedanci transformátoru, R_T představuje náhradní rezistanci transformátoru a X_T představuje náhradní reaktanci transformátoru. U_T představuje napětí na transformátoru a U_V představuje napětí, kde se nachází zkrat. V našem případě jde o hladinu 10,5 kV, na které se nachází chráněný kabel.

Výpočet **impedance vedení** od generátorů:

$$R_{ved} = \rho \cdot \frac{l}{2 \cdot S} = 0,02941 \cdot \frac{100}{2 \cdot 16 \cdot 100} = 9,1906 \cdot 10^{-4} \quad (\Omega; \Omega mm^2/m, m, mm^2) \quad (5.16)$$

Výpočet reaktance **generátorů 4,5,6:**

$$Z_G = x_d \cdot \frac{U_G^2}{S_G} \cdot \frac{U_V^2}{U_G^2} = 0,165 \cdot \frac{10500^2}{71,25 \cdot 10^6} \cdot \frac{10500^2}{10500^2} = 0,2553 \quad (\Omega; \%, V, VA, V, V) \quad (5.17)$$

$$X_G = Z_G = 0,2553 \quad (\Omega; \Omega) \quad (5.18)$$

Výpočet reaktance transformátoru **T109:**

$$Z_{T109} = u_k \cdot \frac{U_{T109}^2}{S_{T109}} \cdot \frac{U_V^2}{U_{T109}^2} = 0,104 \cdot \frac{110 \cdot 10^{3^2}}{25 \cdot 10^6} \cdot \frac{10,5 \cdot 10^{3^2}}{110 \cdot 10^{3^2}} = 0,4586 \quad (\Omega; \%, V, VA, V, V) \quad (5.19)$$

$$R_{T109} = \frac{\Delta P_{Cu} \cdot U_{T109}^2}{S_{T109}^2} \cdot \frac{U_V^2}{U_{T109}^2} =$$

$$= \frac{93,8 \cdot 10^3 \cdot 110 \cdot 10^{3^2}}{25 \cdot 10^{6^2}} \cdot \frac{10,5 \cdot 10^{3^2}}{110 \cdot 10^{3^2}} = 16,55 \cdot 10^{-3} \quad (\Omega; W, V, VA, V, V) \quad (5.20)$$

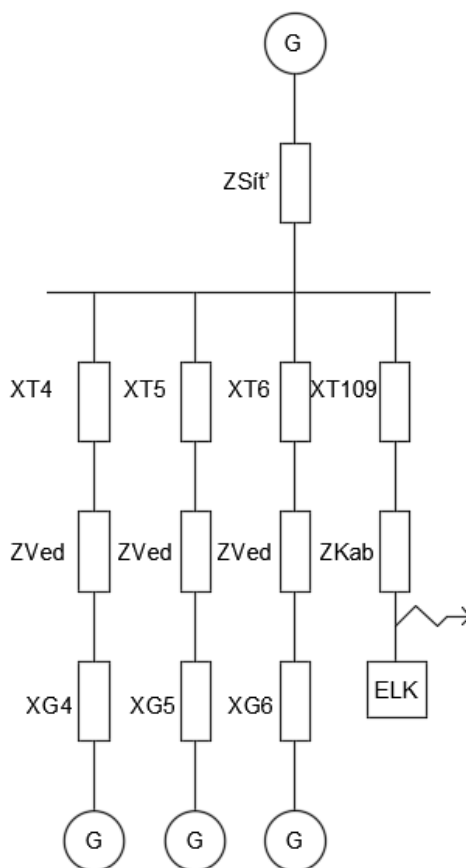
$$X_{T109} = \sqrt{Z_{T109}^2 - R_{T109}^2} = \sqrt{0,4586^2 - 16,55 \cdot 10^{-3^2}} = 0,4583 \quad (\Omega; \Omega, \Omega) \quad (5.21)$$

Výpočet ekvivalentní impedance sítě $Z_{S\dot{t}'}$:

$$Z_{S\dot{t}'} = \frac{c \cdot U_{S\dot{t}'}}{\sqrt{3} \cdot I_k''} \cdot \frac{U_V^2}{U_{S\dot{t}'}^2} = \frac{1,1 \cdot 110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 13,94 \cdot 10^3} \cdot \frac{10500^2}{110 \cdot 10^3^2} = 0,0457 \quad (\Omega; \Omega, \Omega) \quad (5.22)$$

Impedance je vypočítána dle normy [23], ve které je c napěťový součinitel a jelikož se počítaný síťový napaječ nachází na napěťové hladině 110 kV ($U_{S\dot{t}'}$) je jeho hodnota 1,1. I_k'' představuje třífázový rázový zkratový proud a U_V je napětí na kterém se nachází zkrat. Z normy víme, že pokud jde o vyšší napětí, jak 35 kV jedná se zároveň o reaktanci.

$$Z_{S\dot{t}'} = X_{S\dot{t}'} = 0,0457 \quad (\Omega; \Omega) \quad (5.23)$$



Obr. 5-11 Postup výpočtu nárazového zkratového proudu

Nyní jsou známy všechny hodnoty pro výpočet třífázového nárazového zkratového proudu na kabelovém vedení. Podle obr. 5-11 se počítá dále.

Zjednoduší se a sečtou se impedance v sérii:

$$\begin{aligned} \overline{Z}_4 &= Z_{Ved} + X_{T4} + X_{G4} = 9,1906 \cdot 10^{-4} + j0,1836 + j0,2553 = (9,1906 \cdot 10^{-4} + j0,4389) = \\ &= 0,4389 \angle 89,88^\circ \quad (\Omega; \Omega, \Omega) \quad (5.24) \end{aligned}$$

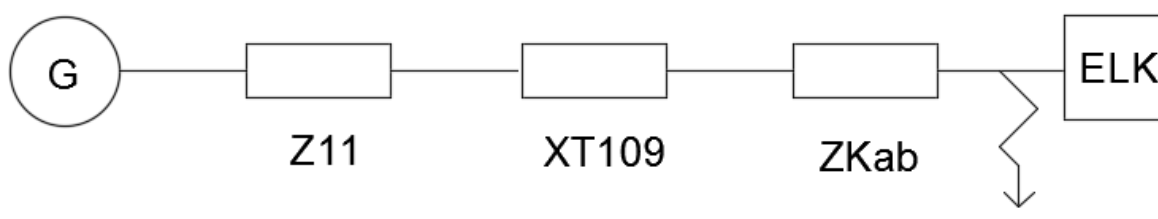
$$\begin{aligned} \overline{Z}_5 &= Z_{Ved} + X_{T5} + X_{G5} = 9,1906 \cdot 10^{-4} + j0,1593 + j0,2553 = (9,1906 \cdot 10^{-4} + j0,4146) = \\ &= 0,4146 \angle 89,87^\circ \quad (\Omega; \Omega, \Omega) \quad (5.25) \end{aligned}$$

$$\overline{Z}_6 = Z_{Ved} + X_{T6} + X_{G6} = 9,1906 \cdot 10^{-4} + j0,1579 + j0,2553 = (9,1906 \cdot 10^{-4} + j0,4132) =$$

$$= 0,4132 \angle 89,87^\circ \quad (\Omega; \Omega, \Omega) \quad (5.26)$$

Nyní se vzniklé impedance sečtou paralelně i s impedancí sítě.

$$\begin{aligned} \overline{Z}_{11} &= \left(\frac{1}{\overline{Z}_4} + \frac{1}{\overline{Z}_5} + \frac{1}{\overline{Z}_6} + \frac{1}{\overline{Z}_{S'it}} \right)^{-1} = \\ &= \left(\frac{1}{0,4389 \angle 89,88^\circ} + \frac{1}{0,4146 \angle 89,87^\circ} + \frac{1}{0,4132 \angle 89,87^\circ} + \frac{1}{0,0457 \angle 90^\circ} \right)^{-1} = \\ &= (1,872 \cdot 10^{-5} + j0,0345) = 0,0345 \angle 89,97^\circ \quad (\Omega; \Omega, \Omega, \Omega, \Omega) \quad (5.27) \end{aligned}$$



Obr. 5-12 Schéma konečné fáze výpočtu nárazového zkratového proudu

Nyní se vypočítá celková impedance a to pomocí sečtení sériových impedancí, které jsou zobrazeny na obrázku 5-12.

$$\begin{aligned} \overline{Z}_{Celk1} &= \overline{Z}_{11} + X_{T109} + \overline{Z}_{Kab,Al} = 0,0345 \angle 89,96^\circ + 0,4583 \angle 90^\circ + 0,02016 \angle 63,59^\circ = \\ \overline{Z}_{Celk1} &= (8,9911 \cdot 10^{-3} + j0,5108) = 0,5109 \angle 88,99^\circ \quad (\Omega; \Omega, \Omega, \Omega) \quad (5.28) \end{aligned}$$

Nyní následuje výpočet samotného rázového zkratového proudu podle normy [23]. Napěťový součinitel c má opět hodnotu 1,1, napětí U_V na kterém se nachází zkrat má hodnotu 10,5 kV. Celková impedance Z_{Celk1} s velikostí 0,5048 byla před chvílí vypočtena.

$$I_{k1}'' = \frac{c \cdot U_V}{\sqrt{3} \cdot |\overline{Z}_{Celk1}|} = \frac{1,1 \cdot 10500}{\sqrt{3} \cdot 0,5109} = 13052 \quad (\text{A}; -, \text{V}, \Omega) \quad (5.29)$$

Proto, aby došlo k ověření, zda kabel vyhoví zkratovému proudu, je nutné dopočítat ekvivalentní oteplovací proud I_{th} . Tento proud bude spočítán dle již dříve zmíněné normy [23]. Zapotřebí bude znát součinitel m pro tepelné účinky stejnosměrné složky zkratového proudu. Tento součinitel se určí dle obr. 5-13. Dále bude potřeba znát součinitel n pro tepelné účinky střídavé složky zkratového proudu. Tento součinitel se určí z obr. 5-14. Pro určení těchto součinitelů bude zapotřebí vypočítat součinitel κ , který se vypočítá následujícím vztahem, ve kterém je X a R použito z celkové impedance.

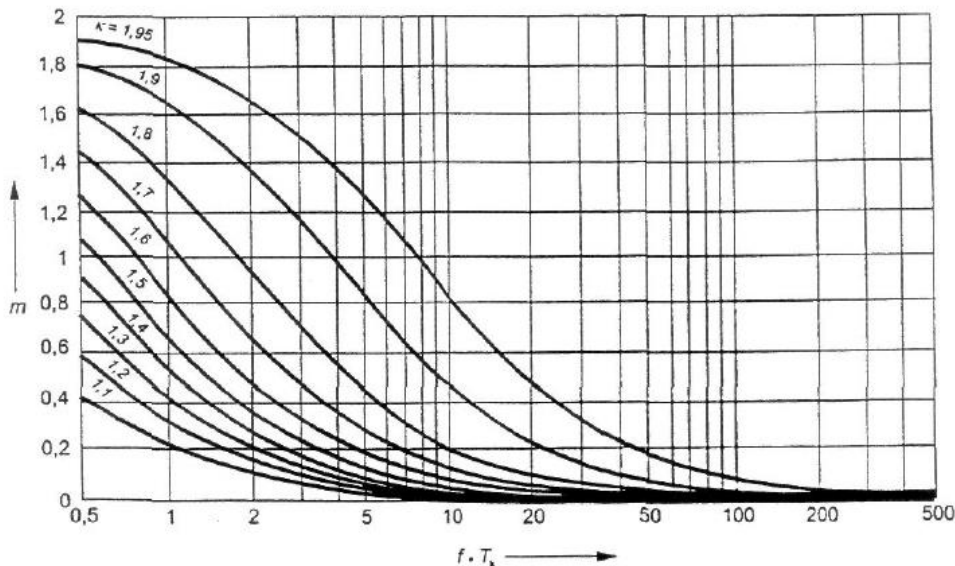
$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{8,9911 \cdot 10^{-3}}{0,5109}} = 1,95 \quad (-; \Omega, \Omega) \quad (5.30)$$

Při určení činitele m bude potřeba i součin $f \cdot T_K$, kde f představuje frekvenci sítě a T_K představuje součet doby trvání pro všechny zkratové proudy.

- Frekvence sítě f 50 Hz

- Doba vybavení ochrany t_k 0,5 s

Ze zadaných parametrů se určil součinitel $m = 0,4$, jelikož součin zadaných konstant vyjde 25 a při střetu s křivkou κ o hodnotě 1,95.

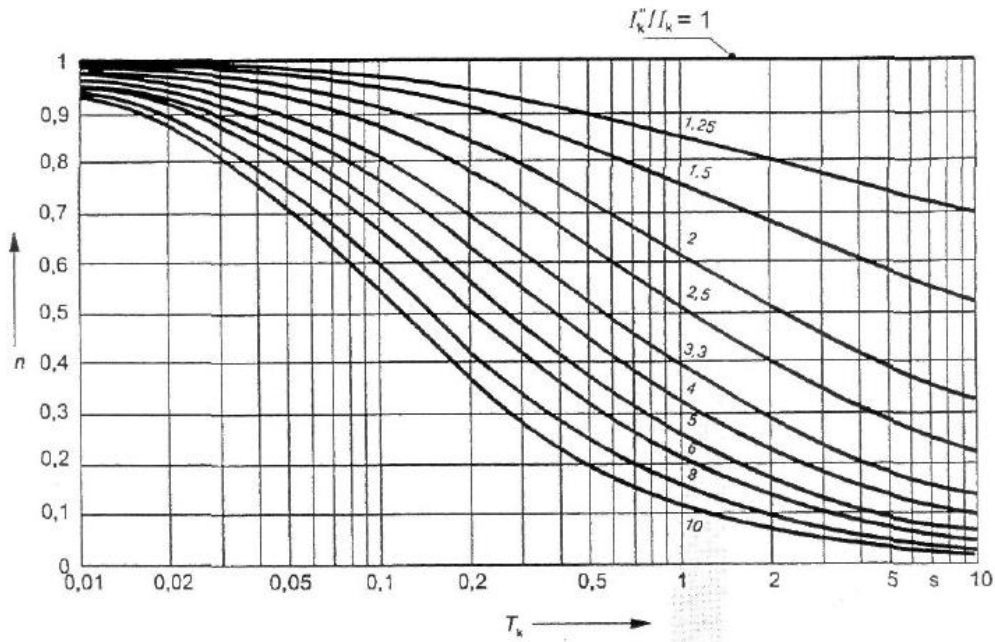


Obr. 5-13 Graf pro určení součinitele m [23]

Při určení součinitele n bude zapotřebí poměr $\frac{I_{K1}''}{I_K}$ kde I_K představuje ustálený zkratový proud. Pro naše účely se uvažuje $I_{K1}'' = I_K$, tudíž hodnotu součinitele $n = 1$ dostaneme při průtnutí křivky s $t_k = 0,5$ a poměrem $\frac{I_{K1}''}{I_K} = 1$.

Nyní již se může spočítat ekvivalentní oteplovací proud dle [23].

$$I_{th1} = I_{K1}'' \cdot \sqrt{m+n} = 13052 \cdot \sqrt{0,4+1} = 15443 \text{ A} \quad (\text{A; A, -, -}) \quad (5.31)$$

Obr. 5-14 Graf pro určení součinitele n [23]

Výpočet minimálního zkratového průřezu S_{\min} :

$$S_{\min, Al} = \frac{I_{th1} \cdot \sqrt{t_k}}{\sqrt{\frac{c_0 \cdot (20 + \vartheta_f)}{\rho_{20}} \cdot \ln\left(\frac{\vartheta_f + \vartheta_K}{\vartheta_f + \vartheta_Z}\right)}} =$$

$$= \frac{15443 \cdot \sqrt{0,5}}{\sqrt{\frac{2,417 \cdot (20 + 228)}{0,02941} \cdot \ln\left(\frac{228 + 250}{228 + 90}\right)}} = 119,81$$

$$(\text{mm}^2; \text{A}, \text{s}, \text{J}/\text{cm}^3/^\circ\text{C}, ^\circ\text{C}, \Omega\text{mm}^2/\text{m}, ^\circ\text{C}, ^\circ\text{C}, ^\circ\text{C}, ^\circ\text{C}) \quad (5.32)$$

Kde S_{\min} je minimální průřez vodiče, který obstojí daný oteplovací zkratový proud I_{th} . T_K je doba vybavení ochrany, respektive doba po kterou daný zkratový proud působí na vedení. c_0 je specifické teplo daného materiálu, v tomto příkladu pro hliník. ϑ_f představuje fiktivní teplotu daného materiálu, obě tyto konstanty jsou vybrány z tabulky 5-5. ϑ_K představuje nejvyšší dovolenou teplotu při zkratu. ϑ_Z představuje nejvyšší dovolenou provozní teplotu, obě tyto konstanty byly převzaty z tabulky 5-6.

Tab. 5-5 Materiálové konstanty [22]

Materiál	Cu	Al	Fe
ρ_{20} - specifický odpor při 20 °C [W · mm ² /m]	0,01786	0,02941	0,147
ϑ_f - fiktivní teplota [°C]	234,5	228	222
c je specifické teplo [J/cm ³ /°C]	3,5	2,417	3,77

Tab. 5-6 Část tabulky dovolených provozních a maximálních teplot vodičů pro různé druhy izolace [22]

Druh izolace vodiče	Zkratka názvu	Značka	Základní teplota okolního vzduchu	Nejvyšší dovolená provozní teplota	Nejvyšší dovolená teplota	
					při proudovém přetížení	při zkratu
Polyvinylchlorid měkčený	PVC	Y	30	70	120	140 - 160
Elastomery na bázi přírodního nebo syntetického kaučuku	guma pryž kaučuk	G	30	60-120	120 - 150	200 - 250
do 10 kV		G	30	60		150
Etylenpropylenová pryž	EPR		30	90	130	250
Polyetylén	PE	E	30	70		130-150
Zesítený polyetylén	XE	X	30	90	120	250
Polytetrafluoretylén	PTFE		90	200	300	300
Propylén	FEP		90	200	250	250

Jak je vidět z výsledku, námi vybraný svazek kabelů ob stojí zkratovému proudu, jelikož průřez S_{\min} není větší než vybraný průřez $2 \times 400 \text{ mm}^2$, tedy 800 mm^2 . Tudíž splnil podmínku $S_{\min, Cu} \leq S_{Cu} = 119,81 \leq 800$. $(\text{mm}^2; \text{mm}^2)$ (5.33)

Výpočet dovoleného úbytku napětí:

$$\Delta U = R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi = 8,969 \cdot 10^{-3} \cdot 1375 \cdot \cos(0) + 0,02016 \cdot 1375 \cdot \sin(0) = 12,32 \quad (\text{V}; \Omega, \text{A}, -, \Omega, \text{A}, -) \quad (5.34)$$

Kde ΔU je úbytek napětí na kabelovém vedení. R je odpor kabelu, který je ve svazku dvou kabelů, I je proud tekoucí do elektrokotle, $\cos \varphi$ je účinník elektrokotle. X je reaktance svazku kabelů.

$$\Delta U_{\%, Al} = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100 = \frac{12,32}{10500} \cdot 100 = 0,117 \quad (\%; \text{V}, \text{V}, -) \quad (5.35)$$

Ztrátový úbytek napětí na kabelovém vedení je zanedbatelný při úvaze, že je při této hladině napětí povolený úbytek 10 %. Další výpočet, který bude následovat je spočítán pro ztrátový výkon na kabelovém vedení:

$$\Delta P_{Al} = 3 \cdot R \cdot I^2 = 3 \cdot 8,969 \cdot 10^{-3} \cdot 1375^2 = 50871 \quad (\text{W}; \Omega, \text{A}) \quad (5.36)$$

Jako další možnost použití kabelového vedení se nabízí možnost kabel **22-CXEKVCEY** $2 \times 300 \text{ mm}^2$. Část výpočtů jako je výpočet impedancí a reaktancí sítě pro výpočet nárazového zkratového proudu bude převzato z dimenzování kabelu 22-AXEKVCEY a budou použity pro následující výpočty.

Výpočet impedance pro kabel **22-CXEKVCEY**:

$$R = R_l \cdot l = 0,06 \cdot 0,23 = 13,8 \quad (\text{m}\Omega; \Omega/\text{m}, \text{m}) \quad (5.37)$$

$$L = L_l \cdot l = 0,52 \cdot 0,23 = 119,6 \quad (\mu\text{H}; \text{mH}/\text{m}, \text{m}) \quad (5.38)$$

$$\begin{aligned}\bar{Z} &= R + jX_L = R + j2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 13,8 \cdot 10^{-3} + j2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 119,6 \cdot 10^{-6} = 13,8 \cdot 10^{-3} + j0,0376 = \\ &= 0,04 \angle 69,85^\circ \quad (\Omega; \Omega, \Omega) \quad (5.39)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\overline{Z_{Kab,Cu}} &= \left(\frac{1}{\bar{Z}} + \frac{1}{\bar{Z}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,04 \angle 69,85^\circ} + \frac{1}{0,04 \angle 69,85^\circ} \right)^{-1} = 6,9 \cdot 10^{-3} + j0,0188 = \\ &= 0,02 \angle 69,85^\circ \quad (\Omega; \Omega) \quad (5.40)\end{aligned}$$

Při výpočtu nárazového zkratového proudu pro tento kabel budeme pokračovat ze schématu z obr. 5-12, kde zůstávají stejné velikosti impedancí až na impedanci kabelu. A proto celková impedance bude:

$$\begin{aligned}\overline{Z_{Celk2}} &= \overline{Z_{11}} + X_{T109} + \overline{Z_{Kab,Cu}} = 0,0457 \angle 89,98^\circ + 0,4583 \angle 90^\circ + 0,02 \angle 69,85^\circ = \\ Z_{Celk2} &= (6,9 \cdot 10^{-3} + j0,5227) = 0,5228 \angle 89,24 \quad (\Omega; \Omega, \Omega, \Omega) \quad (5.41)\end{aligned}$$

Nyní je možno spočítat rázový zkratový proud a jako u příkladu pro hliníkový kabel bude napěťový součinitel c roven 1,1 a napětí U_V je hodnota napětí kabelu a to 10,5 kV. Z_{Celk2} byla pro měděný kabel nově vypočítaná.

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U_V}{\sqrt{3} \cdot |Z_{Celk2}|} = \frac{1,1 \cdot 10500}{\sqrt{3} \cdot 0,5228} = 12755 \quad (\text{A}; -, \text{V}, \Omega) \quad (5.42)$$

Pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu bude opět potřeba vypočítat součinitele m a n , které získáme z obrázků 5-13 a 5-14. Stejným způsobem podle stejné normy [23], jako u hliníkového kabelu.

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{R}{X}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot \frac{6,9 \cdot 10^{-3}}{0,5228}} = 1,96 \quad (-; \Omega, \Omega, \Omega) \quad (5.43)$$

Frekvence sítě a doba vybavení ochrany je stále stejná. Také je uvažováno pro tento kabel $I_{K1}'' = I_K$. Poměr rázového zkratového proudu k ustálenému zkratovému proudu.

- Frekvence sítě f 50 Hz
- Doba vybavení ochrany t_k 0,5 s

Součin zadaných parametrů je 25. Při střetu této křivky s křivkou κ o hodnotě 1,95 je odečten součinitel $m = 0,4$.

Jelikož je uvažován stav $I_{K1}'' = I_K$ tudíž poměr těchto proudů $\frac{I_{K1}''}{I_K} = 1$. Při protnutí této křivky s křivkou $T_K = 0,5$ je odečítán součinitel $n = 1$.

Při znalosti těchto konstant se snadno dopočítá ekvivalentní oteplovací zkratový proud, dle normy [23], který budou použit pro výpočet minimálního zkratového průřezu S_{\min} .

$$I_{th2} = I_{K1}'' \cdot \sqrt{m+n} = 12755 \cdot \sqrt{0,4+1} = 15092 \quad (\text{A}; \text{A}, -, -) \quad (5.44)$$

Výpočet minimálního zkratového průřezu S_{\min} :

$$S_{\min,Cu} = \frac{I_{th2} \cdot \sqrt{t_k}}{\sqrt{\frac{c_0 \cdot (20 + \vartheta_f)}{\rho_{20}} \cdot \ln\left(\frac{\vartheta_f + \vartheta_K}{\vartheta_f + \vartheta_Z}\right)}} =$$

$$= \frac{15092 \cdot \sqrt{0,5}}{\sqrt{\frac{3,5 \cdot (20 + 234,5)}{0,01786} \cdot \ln\left(\frac{234,5 + 250}{234,5 + 90}\right)}} = 75,48$$

$$(\text{mm}^2; \text{A}, \text{s}, \text{J}/\text{cm}^3/^\circ\text{C}, ^\circ\text{C}, \Omega\text{mm}^2/\text{m}, ^\circ\text{C}, ^\circ\text{C}, ^\circ\text{C}, ^\circ\text{C}) \quad (5.45)$$

Kde jako u hliníkového kabelu S_{\min} představuje minimální průřez vodiče, který obstojí daný oteplovací zkratový proud I_{th} . Doba vybavení ochrany je pod konstantou T_K . c_0 je specifické teplo daného materiálu, který je pro tento příklad měděný. ϑ_f představuje fiktivní teploty materiálu vodiče, v tomto případě měděného. Obě tyto hodnoty jsou opsány z tabulky 5-5. ϑ_K představuje nejvyšší dovolenou teplotu při zkratu pro zastíněný polyetylén. ϑ_Z představuje nejvyšší dovolenou provozní teplotu pro zastíněný polyetylén, obě tyto konstanty byly převzaty z tabulky 5-6.

Jak je vidět svazek dvou kabelů 22-CXEKVCEY 2x300 o celkovém průřezu 600 mm^2 obstojí rázovému zkratovému proudu v místě použití kabelu. Jelikož splnil podmínku $S_{\min,Cu} \leq S_{Cu} = 75,48 \leq 600$. $(\text{mm}^2; \text{mm}^2)$ (5.46)

Výpočet dovoleného úbytku napětí:

$$\Delta U = R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi = 6,9 \cdot 10^{-3} \cdot 1375 \cdot \cos(0) + 0,0188 \cdot 1375 \cdot \sin(0) =$$

$$= 9,48 \quad (\text{V}; \Omega, \text{A}, -, \Omega, \text{A}, -) \quad (5.47)$$

Kde ΔU je úbytek napětí na kabelovém vedení. R je odpor kabelu, který je ve svazku dvou kabelů, I je proud tekoucí do elektrokotle, $\cos \varphi$ je účinník elektrokotle. X je reaktance svazku kabelu.

$$\Delta U_{\%,Cu} = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100 = \frac{9,48}{10500} \cdot 100 = 0,09 \quad (\%; \text{V}, \text{V}, -) \quad (5.48)$$

Ztrátový úbytek napětí na kabelovém vedení je zanedbatelný. Uvažován je povolený 10% úbytek napětí při hladině napětí 10,5 kV. Další výpočet, který bude následovat je spočítán pro ztrátový výkon na kabelovém vedení:

$$\Delta P_{Cu} = 3 \cdot R \cdot I^2 = 3 \cdot 6,9 \cdot 10^{-3} \cdot 1375^2 = 39136 \quad (\text{W}; \Omega, \text{A}) \quad (5.49)$$

5.2.6 Ekonomické zhodnocení

Samozřejmostí celého projektu jsou vstupní náklady a ekonomická návratnost.

Jelikož bylo vybráno v podkapitole 5.2.1 druh elektrokotle, který rozšíří sekundární regulaci fiktivního bloku, je nutné uvažovat s finančním ohodnocením pro tuto službu. Veškeré ceny PpS, které vyplácí ČEPS jsou dostupné na jejich internetových stránkách [21]. Pro rok 2018 jsou brány ceny za tuto službu v průměru 718 Kč/MW·h.

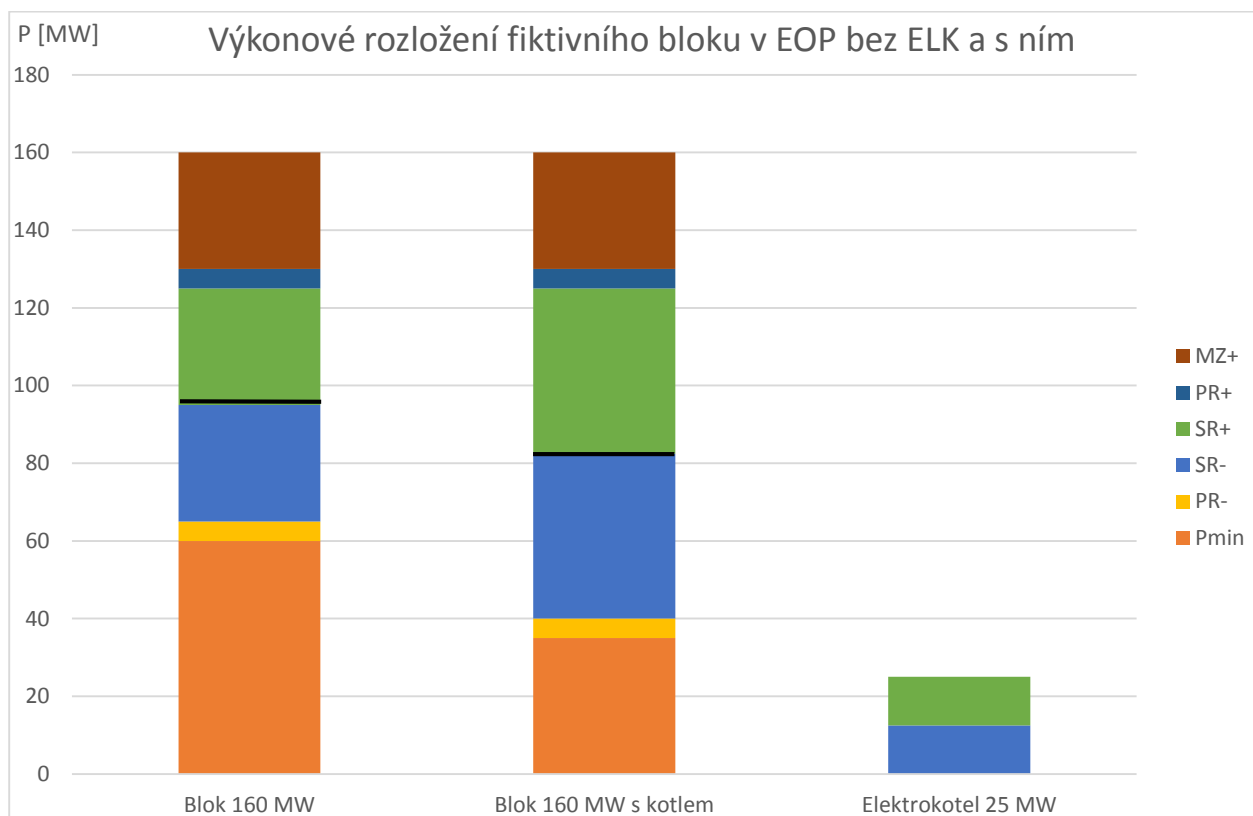
Dále bude zohlednění přivedení výkonu k elektrokotli. Jak už bylo popsáno v kapitole 5.2.3, kde se zohledňovaly mimo jiné ceny transformátorů, nebo v kapitole 5.2.5, kde je výpočet

kabelového vedení. Toto vedení je propočítáno pro dva kabely 22-CXEKVCEY a 22-AXEKVCEY, ze kterých v této kapitole bude vybráno podle finanční stránky.

5.2.6.1 Příklad využití elektrokotle v Elektrárně Opatovice

Jak bylo dříve uvedené, díky ELK bude rozšířený rozsah PpS a to o 12,5 MW SR± v případě, že ELK bude zapojen do fiktivního bloku s více turbosoustrojími. V příkladu je uvažováno využití tří turbín ve fiktivním bloku s použitím ELK. Je tedy uvažován výkon 3 · 60 MW s tím, že částečný výkon vyrobený v turbosoustrojí napájí vlastní spotřebu elektrárny a je nutné s tím počítat. Je známo, že EOP má spotřebu elektrické energie 11 % z vyrobené elektrické energie. Z toho vyplývá, že dodávaný výkon na prahu elektrárny, který reguluje výkon v ES, je přibližně 160 MW.

Graf rozložení jednotlivých PpS bez využití ELK a s ním v následujícím obrázku 5-15. Je uvažováno, že velikost PR bude v porovnání s celkovými poskytovateli této PpS 4 % v našem případě se jedná o velikost 10 MW. Při stejném porovnání bude SR 9,09 %, což odpovídá velikosti 30 MW. Poslední plánovaná poskytovaná PpS je MZ+ v porovnání s celkovými poskytovateli této PpS se jedná 10 %, v našem případě 30 MW. Rozložení PpS uvažujeme dle plánování společnosti ČEPS na následující rok 2018 ze zdroje [21].



Obr. 5-15 Rozložení PpS v EOP

Jestliže bude využito ELK pro rozšíření PpS, rozšíří se SR± o 12,5 MW a tím poskytne provozovateli PS větší rozsah SR±. Za tento rozsah dostane více zapláceno. Ceny jednotlivých služeb jsou v následující tabulce 5-7. Tyto uvedené ceny jsou za rezervaci výkonu u poskytovatelů. K těmto cenám patří i částka za dodání výkonu, která je u každého poskytovatele pevná a řídí se ERU [24]. Tato částka je 2350 Kč/MWh za dodaný výkon SR+ a 1 Kč/MW/h za odebraný výkon SR-.

Tab. 5-7 Ceny za jednotlivé PpS pro rok 2018

Kategorie PpS	Průměrná cena Kč/MW·h
PR	684
SR	718
MZ5	506
MZ15-	215
MZ15+	201

Jelikož kotel rozšiřuje SR±, za kterou je více placen, je nutné spočítat průměrné roční zisky z těchto služeb.

Výpočet ceny za poskytnutí ELK pro rozšíření SR±:

$$C_{SR} = R \cdot SR_{Rez.} \cdot k_a + R \cdot SR_{Dod.} \cdot k_a =$$

$$C_{SR} = 12,5 \cdot 718 \cdot 0,8 + 12,5 \cdot 2350 \cdot 0,8 = 30618 \quad (\text{Kč/h;MW,Kč/MW,Kč})(5.50)$$

Kde C_{SR} je cena kterou poskytovatel dostane za rozšíření SR±- Rozsah této služby představuje K . Částka za rezervaci výkonu je pod $SR_{Rez.}$. Konstanta k_a představuje využití uvedeného rozsahu EOP a to 80 %, protože je známo, že průměrná hodnota SR± je 24 MW. $SR_{Dod.}$ prezentuje částku, kterou poskytovatel dostane za dodání kladné regulační energie.

Jelikož nevíme, zda se tento výsledný výkon „prodá“ v celém svém rozsahu je nutné uvažovat koeficient, který reprezentuje průměrné využití kladné nabízeného regulačního pásma poskytovaného ELK v MW/h.

$$C_{SR_Real.} = 30618 \cdot 0,2 = 6136 \quad (\text{Kč/h;Kč/MW}) \quad (5.51)$$

Následovný příklad ukazuje celkový zisk za celý rok, kde $C_{SR_Real.}$ představuje průměrný teoretický výdělek za jednu hodinu a t představuje časovou hodnotu za jeden rok v hodinách.

$$CF = C_{SR_Real.} \cdot t = 6136 \cdot 8760 = 13192400 \quad (\text{Kč/rok;Kč/h,h}) \quad (5.52)$$

Nyní, když je známá teoretická částka vydělaná za 1 rok, lze vypočítat efektivnosrt projektu a to právě dvěma metodami. První metoda pro určení efektivnosti projektu je statická metoda doba návratnosti (Payback period). V této metodě se vypočítá hodnota, která představuje časový údaj, ve kterém se vyrovná tok z příjmů s investičními náklady. Pro tuto metodu je nutné znát vstupní investiční náklady, které činí:

- Transformátor 15000000 Kč
- Kabelové vedení hliník 465000 Kč
- Kabelové vedení měď 792000 Kč
- Elektrokotel 30000000 Kč

Dále pro druhou metodu, která představí vnitřní výnosové procento projektu, je nutné znát:

- Doba životnosti projektu 15 let

Pokud se rozhoduje mezi kabelovým vedením vyrobených z mědi či hliníku, vybere se kabel měděný z důvodu výkonu ztraceným na tomto vedením. Pokud vezmeme v úvahu, že rozdíl ztrátového výkonu mezi mědí a hliníkem je 11,7 kW, dle příkladu 5.53. Jelikož není jasné, kdy ELK bude v provozu, tak není přesně daný ztrátový výkon na kabelovém vedení, ale je patrné, že ušetřený výkon při použití měděného vodiče bude z finančního hlediska větší než jeho náklady.

$$\Delta P = \Delta P_{Al} - \Delta P_{Cu} = 50871 - 39136 = 11735 \quad (\text{W}; \text{W}, \text{W}) \quad (5.53)$$

Celkové investiční náklady tedy budou 45792000. Výpočet doby návratnosti PB jsou celkové náklady K_i poděleným ziskem za rok CF .

$$PB = \frac{K_i}{CF} = \frac{45792000}{13192400} = 3,47 \quad (\text{rok}; \text{Kč}, \text{Kč}/\text{rok}) \quad (5.54)$$

Druhá metoda určení efektivnosti projektu vypočítá vnitřní výnosové procento projektu následujícím vztahem.

$$NPV = \left(\sum_{i=1}^t \frac{CF}{(1 + IRR)^i} \right) - K_i = 0 \quad (\text{Kč}; \text{Kč}, \%, \text{Kč}) \quad (5.55)$$

Kde IRR je hledané vnitřní výnosové procento, CF je výnos při použití ELK. K_i jsou počáteční náklady projektu, t je životnost celého projektu, respektive životnost ELK, v našem případě 15 let. NPV je čistá současná hodnota projektu. Pomocí nástroje EXCEL je dopočítáno vnitřní výnosové procento s hodnotou 28,1 %.

6 ZÁVĚR

V práci je seznámeno s příčinami výkonových rozdílů v síti, za kterými v poslední době značnou měrou stojí zvyšující výroba elektrické energie z OZE. Vliv na to mají evropská ustanovení, která příkazují státům unie rozšířit svoji produkci elektrické energie z OZE. Česká republika splnila nařízení evropské unie již v roce 2013, kdy se výroba z OZE dostala nad 13 % celkové produkce elektrické energie.

Tyto výkonové výkyvy je nutno regulovat pro zabezpečení kvality dodávky elektrické energie, proto ČEPS zabezpečuje tyto výkyvy systémovými a podpůrnými službami, které nakupuje od poskytovatelů těchto služeb. Poskytovateli těchto služeb jsou tepelné, plynové či paroplynové elektrárny a v neposlední řadě vodní elektrárny, jak přečerpací tak akumulární.

Pro poskytovatele je tento produkt lukrativní, díky finančnímu ohodnocení v porovnání s cenami silové elektřiny, které se v poslední době vyrovnávají nákladům na její vyrobení. Díky tomuto faktu je výhodné rozšiřovat rozsah těchto služeb. V teplárnách, jak je řešeno v této práci, je možné využít elektrokotel. A to pro rozšíření SR±, nebo zavedení záporné MZ-.

V zadání této práce bylo požadováno rozšíření rozsahu sekundární regulace v Elektrárnách Opatovice a.s., a proto byl vybrán elektrokotel s regulací výkonu pomocí izolantů pohybujících se okolo jednotlivých elektrod elektrokotle. Bylo zadáno, že rozsah sekundární regulace bude rozšířen o velikost 25 MW elektrokotlem, který bude napájen z napětí 10,5 kV. Dle důvodů, které jsou popsány v podkapitole 5.2.3, je vybráno řešení vyvedení výkonu z venkovní rozvodny 110 kV. Tento způsob napájení zohledňuje odstávky jednotlivých turbín i vstupní investice.

Při instalaci ELK bude nutná instalace nového transformátoru 110/10,5 kV o výkonu 25 MVA, z kterého bude ELK napájen. Dále bude nutné přivést výkon do transformátoru z rozvodny pomocí přípojníc. Výkon z transformátoru do ELK bude veden kabelovým vedením v betonové šachtě pod zemí. Toto vedení je v práci navrženo a ověřeno zda obstojí ekvivalentnímu oteplovacímu zkratovému proudu, který je v práci počítán dle normy ČSN-EN 60909. Díky velkému výkonu, který je veden kabelem, je s ohledem na nabídku uvažováno paralelní spojení 2 kabelů 300 mm² 22-CXEKVCEY a paralelní spojení 2 kabelů 400 mm² 22-AXEKVCEY. I přes to, že pořizovací cena hliníkového kabelu je nižší než u měděného kabelu, je vybrán kabel měděný a to díky výpočtům z příkladů 5.36 a 5.49, ve kterých je vypočítán ztrátový výkon na kabelovém vedení. Rozdíl těchto výkonů dle příkladu 5.53 je 11735 W a při uvážení využití ELK na 15 let se investiční částka za dražší kabel v mědi vrátí.

Při výpočtu návratnosti projektu jsou uvažovány ceny elektrokotle 30 mil. Kč, cena transformátoru 15 mil. Kč a cena vedení cca 1 mil. Kč. Tato investice, která je na 15 let má vnitřní výnosové procento 28,1 % a dle příkladu 5.54 se investice vrátí do 3,5 let. Tento časový údaj z předpokládaných parametrů PpS, neboť není známý nasmlouvaný rozsah SR± z ELK.

Teoretická návratnost tohoto projektu je finančně výnosná, ale pokud se vezme v potaz, že vyrobené teplo v ELK je vyrobeno přibližně s třikrát menší účinností, než je teplo vyrobené klasickým postupem v kogeneraci, v důsledku účinnosti přeměny tepelné energie na elektrickou, je tento způsob regulace energie v PS méně výhodný. Jinými slovy je to plýtvání energií a je nutné hledat způsoby jak energetické výkyvy v síti regulovat efektivněji. Například uschovat nadbytečnou energii v síti na interval, kdy v síti bude naopak energie nedostatek a tuto nashromážděnou energii vrátit zpět do sítě. Pro přímé uložení elektrické energie jsou známy velké akumulární baterie.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. 2011. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 9788001049372.
- [2] Roční zpráva o provozu ES ČR. In: *Energetický regulační úřad* [online]. Praha: Energetický regulační úřad, 2015 [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2015.pdf/3769f65b-3789-4e93-be00-f84416e1ca03
- [3] *RENEWABLES 2016 GLOBAL STATUS REPORT* [online]. 1. Paris: REN21 Secretariat, 2016 [cit. 2016-11-20]. ISBN 978-3-9818107-0-7. Dostupné z: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/10/REN21_GSR2016_FullReport_en_11.pdf
- [4] Energetika ve světě. In: *ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, 2016 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/cisla-a-statistiky/energetika-ve-svete.html>
- [5] CHEMIŠINEC, Igor. *Obchod s elektřinou*. 1. vyd. Praha: Conte, 2010. ISBN 9788025466957.
- [6] *EU v roce 2015 zvýšila podíl obnovitelných zdrojů, v ČR přibylo jen několik projektů* [online]. Praha: Aliance pro energetickou soběstačnost, 2016 [cit. 2016-10-10]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/13817-eu-v-roce-2015-zvysila-podil-obnovitelnych-zdroju-v-cr-pribylo-jen-nekolik-projektu>
- [7] Energetický regulační věstník. In: *Energetický regulační úřad* [online]. Praha: Energetický regulační úřad, 2016 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/2571575/160926_CR5_2016.pdf/3398c523-a981-43c0-ab0a-494a61d7b323
- [8] BEZDĚK, Jakub. *Optimalizace provozu teplárenských a elektrárenských bloků v ES* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011 [cit. 2016-10-04]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/7749>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Petr Mastný.
- [9] *Tzbinfo* [online]. Praha: Topinfo, 2011 [cit. 2016-11-13]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/>
- [10] ŘÍZENÍ FREKVENCE A VÝKONOVÉ BILANCE V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ. In: *ČEZ* [online]. Praha: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, b.r. [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/12-srom.pdf>
- [11] *Kodex přenosové soustavy část III*. Praha, 2016.
- [12] KUBIK, Martin. *Paroplynová elektrárna s spalovacími motory* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012 [cit. 2016-10-04]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/5388>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Vedoucí práce Jan Fiedler.

- [13] *Kodex přenosové soustavy část II*. Praha, 2016.
- [14] Podpůrné služby. *ČEPS, a.s.* [online]. Praha, 2016 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Podpurne-sluzby/Stranky/default.aspx>
- [15] *Zander & Ingeström* [online]. Täby: Comigo - Planned communication, 2016 [cit. 2016-11-07]. Dostupné z: <http://zeta.se/boilers/en/>
- [16] *Elpanne Teknik* [online]. Nyköping: Elpanne Teknik, 2013 [cit. 2016-11-07]. Dostupné z: <https://www.elpanneteknik.com/>
- [17] High Voltage Electrode boiler for Steam and Hot water. In: *PARAT Halvorsen AS* [online]. Flekkefjord: PARAT Halvorsen AS, 2016 [cit. 2016-11-07]. Dostupné z: <http://parat.no/en/products/industry/parat-ieh-high-voltage-electrode-boiler/>
- [18] Electrode Boilers. In: *Water Technology Report* [online]. Crystal Lake: Harfst and Associates, 2016 [cit. 2016-11-07]. Dostupné z: <https://watertechnologyreport.wordpress.com/tag/electrode-boiler/>
- [19] ELECTRIC BOILERS. *EKOL* [online]. Brno: Business Factory, s.r.o., b.r. [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://www.ekolbrno.com/electric-boilers.html>
- [20] V boji o radnici jsou ve hře i statisíce z opatovické elektrárny Zdroj: http://pardubice.idnes.cz/odmeny-opatovice-primator-d0i-/pardubice-zpravy.aspx?c=A141007_2105712_pardubice-zpravy_mt. In: *IDNES* [online]. Praha: iDNES, 2014 [cit. 2016-12-01]. Dostupné z: http://pardubice.idnes.cz/odmeny-opatovice-primator-d0i-/pardubice-zpravy.aspx?c=A141007_2105712_pardubice-zpravy_mt
- [21] Jak se obstarávají PpS. *ČEPS, a.s.* [online]. Praha: ČEPS, a.s., 2017 [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Data/Jak-seobstaravaji-PpS/Stranky/default.aspx>
- [22] ORSÁGLOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení*. Brno, 2015.
- [23] *Zkratové proudy v třífázových zkratových soustavách: Část 0: Výpočet proudů*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [24] *Energetický regulační věstník: Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 7/2016 ze dne 25. listopadu 2016, kterým se stanovují ceny za související službu v elektroenergetice a další regulované ceny*. Jihlava, 2016.