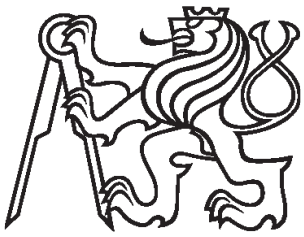
Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3 Fakulta elektrotechnická

Modernizace vodních elektráren

Jan Knobloch

Vedoucí práce: Mgr. Ing. Vít Klein, Ph.D.
2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Knobloch** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **491926**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**

Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**

Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Modernizace vodních elektráren

Název bakalářské práce anglicky:

Modernization of hydroelectric power plants

Pokyny pro vypracování:

1) Charakteristika vybraných vodních elektráren.
2) Prověření možnosti efektivnějšího využití stávajících elektráren.
3) Návrh technického řešení modernizace.
4) Vyhodnocení návrhu modernizace elektráren.

Seznam doporučené literatury:

1) MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
2) ČSN 75 0120. Vodní hospodářství: Terminologie hydrotechniky. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2009, 166 s.
3) HOLATA, Miroslav, Pavel GABRIEL, ed. Malé vodní elektrárny: projektování a provoz. Vyd. 1. Praha: Academia, 2002. ISBN 80-200-0828-4.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D. katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **08.02.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.	doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.	prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 16.5. 2022

Jan Knobloch

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Mgr. Ing. Vítu Kleinovi, Ph.D., za je ho vstřícnost, rady, připomínky a konzultace při vedení této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Josefu Blahovi z ČEZ a. s., organizační jednotky Vodní elektrárny, za poskytnutí údajů pro vypracování této bakalářské práce. Nakonec bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům, kteří mě během vypracování této práce podporovali.

Abstrakt

Bakalářská práce řeší modernizaci akumulačních vodních elektráren. Popisuje tzv. Vltavskou kaskádu včetně historie její výstavby, hlouběji popisuje 3 největší akumulačních přehrady, včetně jejich vyrovnávacích nádrží.

Dále se práce zabývá teoretickým využitím těchto nádrží pro potřeby akumulace elektrické energie. Další kapitola se věnuje popisu technického řešení modernizace, která zahrnuje volbu strojového uspořádání, výběr turbíny, výpočtu otáček, rozběhu soustrojí do čerpadlového chodu. Předposlední kapitola se věnuje vlastnímu návrhu modernizace elektrárny Orlík na přečerpávací. V závěru je vyhodnocení variant vlastního návrhu modernizace.

Klíčová slova

Elektrárna, soustrojí, kapacita, Orlík a modernizace.

Abstract

The bachelor thesis deals with the modernization of water storage power plants. It describes the so called Vltava Cascade including the history of its construction, describes in depth the 3 largest storage dams including their balancing reservoirs.

Furthermore, the theoretical use of these reservoirs for the needs of electricity storage is discussed. The next chapter is devoted to the description of the technical design of the modernization, which includes the choice of the machine layout, the selection of the turbine, the calculation of the speed, the start-up of the machine to pump operation. The penultimate chapter is devoted to the actual design of the modernization of the Orlik power plant to pumped storage. The chapter concludes with an evaluation of the variants of the modernization design.

Keywords

Power plant, machinery, capacity, Orlik and modernization.

Obsah

1. ÚVOD 1

2. CHARAKTERISTIKA VYBRANÝCH VODNÍCH ELEKTRÁREN 2

2.1. Akumulační vodní elektrárny 2

2.2. Vltavská kaskáda 2

2.3. Historie Vltavské kaskády 2

2.4. Vodní dílo Lipno I a II 4

2.5. Vodní dílo Orlík a Kamýk 5

2.6. Vodní dílo Slapy a Štěchovice 5

3. PROVĚŘENÍ MOŽNOSTI EFEKTIVNĚJŠÍHO VYUŽITÍ STÁVAJÍCÍCH VODNÍCH ELEKTRÁREN 7

3.1. Význam vodních a přečerpávacích vodních elektráren pro energetiku 7

3.2. Přestavba akumulačních elektráren na přečerpávací 8

3.2.1. Vodní dílo Lipno I – II 8

3.2.2. Vodní dílo Orlík – Kamýk 9

3.2.3. Vodní dílo Slapy – Štěchovice 10

3.3. Výpočet teoretických kapacit přečerpávacích vodních elektráren na Vltavě. 10

4. POPIS TECHNICKÉHO ŘEŠENÍ MODERNIZACE AKUMULAČNÍ VODNÍ ELEKTRÁRNY NA PŘEČERPÁVACÍ 14

4.1. Volba strojového uspořádaní přečerpávací vodní elektrárny 14

4.2. Výběr turbíny 15

4.3. Otáčky soustrojí 16

4.4. Rozběh do čerpadlového chodu 19

4.4.1. Asynchronní rozběh 19

4.4.2. Rozběh externím asynchronním motorem 20

4.4.2.1. Kapalinový spouštěč 22

4.4.2.2. Dimenzování rozběhového motoru 22

4.4.3. Frekvenční rozběh 26

5. NÁVRH TECHNICKÉHO ŘEŠENÍ MODERNIZACE AKUMULAČNÍ ELEKTRÁRNY NA PŘEČERPÁVACÍ 28
5.1. Současná podoba elektrárny 28
5.2. Výchozí parametry 31
5.3. Umístění nového soustrojí do stávající elektrárny 32
5.4. Výběr turbíny a otáček 33
5.5. Účinnost soustrojí a průtok během čerpání 34
5.5.1. Varianta 1 34
5.5.2. Varianta 2 35
5.6. Rozběh soustrojí přečerpávací vodní elektrárny Orlík 36
5.7. Doba čerpání a roční výroba 37
6. VYHODNOCENÍ NÁVRHU MODERNIZACE ELEKTRÁREN 39
6.1. Potenciál vodních děl Vltavské kaskády 39
6.2. Investice do vodního díla Orlík 39
6.2.1. Lodní výtah 39
6.2.2. Nový bezpečnostní přeliv 40
6.3. Přečerpávací vodní elektrárna Orlík 41
7. ZÁVĚR 42
8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 46

Seznam zkratek

ČR	Česká republika
ES	Elektrizační soustava
JETE	Jaderná elektrárna Temelín
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PVE	Přečerpávací vodní elektrárna
VD	Vodní dílo

1. ÚVOD

Vývoj lidstva je neodmyslitelně spjat s využíváním vody a vodní energie. Již ve 2. století př. n. l. se v západní části Balkánského poloostrova konstruují vodní kola pro pohon mlýnských kamenů. Různé typy vodních kol (se svrchním, středním, spodním nátokem apod.) se konstruovala k pohonu mlýnů, čerpadel (trkačů), hamrů a pil. Vodní kola dosahovala na svou dobu úctyhodné účinnosti až 85 % [1].

Nevýhodou vodních kol jsou pomalé otáčky na hřídeli. Snaha zvýšit provozní otáčky a zlepšit účinnost vedla v 18. století ke vzniku prvních turbín. Postupným vývojem se zrodily 3 nejpoužívanější turbíny – Francisova, Kaplanova a Peltonova. S vynálezem dynama a rozvojem elektrické energie dostala vodní energie nový účel – výrobu elektrické energie.
Vodní zdroje mají nezastupitelnou roli v regulaci ES. Vodní elektrárny pracují ve všech částech denního zatížení. V základním pásmu zatížení pracují průtočné vodní elektrárny, které využívají přirozeného průtoku. V pološpičkovém až špičkovém zatížení pracují elektrárny akumulační. Speciálním typem elektráren jsou elektrárny přečerpávací, které v dlouhodobém měřítku žádnou energii nevyrábějí, pouze dovolují její uskladnění. Vznik velkých přečerpávacích vodních elektráren (PVE) byl důsledkem budování jaderných elektráren, u kterých je regulace výkonu neekonomická. Vodní elektrárny mají v tomto ohledu nesmírnou výhodu. Od pokynu ke spuštění jsou schopny dodávat plný výkon do několika desítek sekund.

S nárůstem podílu OZE (obnovitelných zdrojů energie) v energetickém mixu (převážně zásluhou fotovoltaických a větrných elektráren) nastává problém s jejím ukládáním na dobu, kdy bude potřeba. Elektřinu jako takovou neumíme uschovávat, dokážeme ji ale v době přebytku přeměňovat na jiné druhy energie (potenciální, chemická, energie rotujících hmot) a v době nedostatku ji znovu přeměnit na energii elektrickou.

Náplní této práce je prověření možností výstavby nových přečerpávacích vodních elektráren, které by vznikly přestavbou stávajících vodních děl.

[1] Bednář J.: *Malé vodní elektrárny 2,* Praha 1989

2. CHARAKTERISTIKA VYBRANÝCH VODNÍCH ELEKTRÁREN

2.1. Akumulační vodní elektrárny

Akumulační vodní elektrárny využívají rezervoár, obvykle přehradu, k akumulaci vody. Elektrárny pracují v režimu pološpičkového nebo špičkového zatížení, tedy v průměru pouze několik hodin denně.

Součástí soustavy s akumulační vodní elektrárnou bývá také vyrovnávací nádrž s malou vodní elektrárnou, která se stará o vyrovnaný průtok v řečišti řeky. V době provozu akumulační elektrárny slouží vyrovnávací nádrž k zadržení velkého odtoku z této elektrárny, který by mohl dosáhnout hodnot povodňové aktivity. Naopak v době, kdy akumulační elektrárna nepracuje, se vyrovnávací nádrž stará o stálý průtok v řečišti pod oběma elektrárnami. Vzdutí hladiny vyrovnávacích nádrží často dosahuje paty hráze akumulační.

2.2. Vltavská kaskáda

Vltavský kaskáda je soubor 9 vodních děl na řece Vltavě. Kaskáda je tvořena třemi velkými přehradami (Lipno I, Orlík, Slapy) a šesti menšími (Lipno II, Hněvkovice, Kořensko, Kamýk, Štěchovice, Vrané). Celkový instalovaný výkon elektráren Vltavské kaskády je téměř 720 MW, z toho 628 MW je instalováno na akumulačních přehradách Lipno I, Orlík a Slapy[2].

2.3. Historie Vltavské kaskády

Úvahy na splavnění Vltavy sahají až do dob středověku za vlády Karla IV. Využití Vltavy bylo zaměřeno převoz surovin, jako byla sůl, kámen nebo dřevo. Významná byla také voroplavba. Na přelomu 19. a 20. století vznikaly studie a projekty zabývající se nejen splavněním ale také energetickým využitím řeky. Spory mezi zastánci jednotlivých projektů zapříčinily, že stavba prvního většího díla (VD Vrané) až v roce 1930. Pokračující spory a boje o vltavské přehrady pozdrželi výstavbu i dalšího stupně

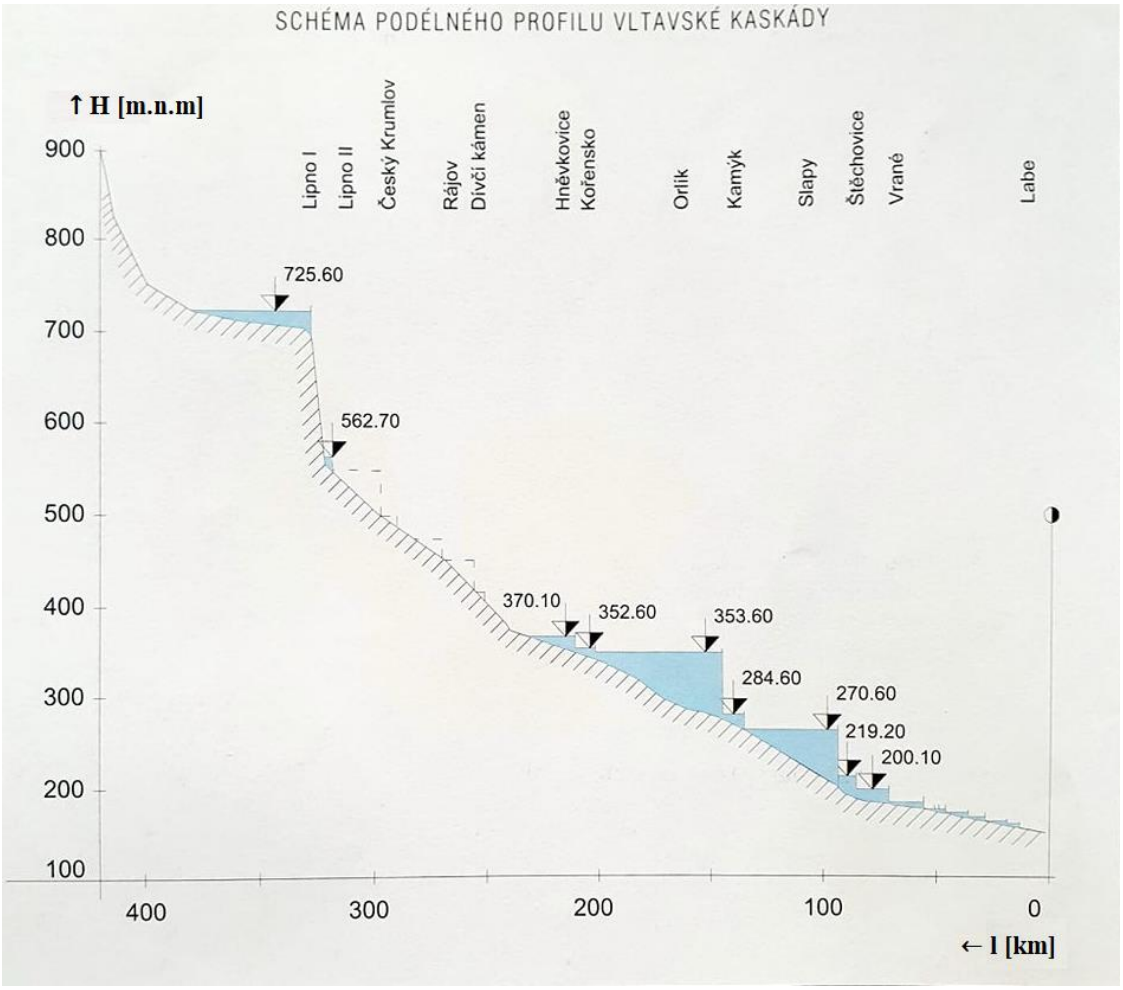
[2] BROŽA, Vojtěch. *Přehrady Čech, Moravy a Slezska*. Liberec: Knihy 555, 2005. ISBN 80-86660-11-7.

Vltavské kaskády, a to předposlední stupeň ve Štěchovicích, který se začal stavět v roce 1938, těsně před druhou světovou válkou. Navzdory probíhající válce stavba VD Štěchovice pokračovala. Stavba byla dokončena v roce 1945.

Po válce se strategie výstavby VD děl změnila. Úkolem nových vodních děl byla akumulace vody pro hospodářské účely a pro nadlepšování průtoků ve Vltavě a na dolním toku Labe. Proto bylo rozhodnuto o výstavbě VD Lipno na Šumavě (1952–60), VD Orlík na středním toku (1954–63) a VD Slapy (1949–57).

Slapská přehrada byla vybudována ve Svatojánských proudech s ohledem na vzdutí Štěchovického stupně. Na vzdutí slapské přehrady měl navazovat další stupeň – VD Orlík. Z geologických důvodů se však začalo stavět až o 11 km výše. Proto bylo rozhodnuto o výstavbě menšího vodního díla Kamýk (1957–63). Na Kromě těchto elektráren byla v plánu stavba dalších stupňů nad Českými Budějovicemi zahrnující VD Český Krumlov I a II, Dívčí Kámen a Rájov. Stavba těchto VD se neuskutečnila z důvodu vysokých požadavků na elektrickou energii po roce 1960, kterou by tato VD díla nedokázala uspokojit.

Nejmladší VD patřící do Vltavské kaskády se nacházejí v blízkosti Týna nad Vltavou. Rozhodnutí o výstavbě nebylo primárně určeno energetickým využitím řeky, ale zajištěním technologické vody pro chlazení Jaderné elektrárny Temelín (JETE). Provoz vodního díla je podřízen požadavkům JETE. Pro vyrovnání průtoků pod VD Hněvkovice a pro rozmělnění odpadních vod z JETE a jejich energetické využití bylo vybudováno VD Kořensko. Obě vodní díla byla budována společně, mezi lety 1986 a 1991. Schéma níže ukazuje podélný profil Vltavské kaskády včetně nerealizovaných stupňů mezi VD Lipno II a Hněvkovice.



Obr. 2.1: Podélný profil Vltavské kaskády[3]

2.4. Vodní dílo Lipno I a II

Vodní dílo Lipno I spolu s vyrovnávací nádrží Lipno II ve Vyšším brodě tvoří 1. stupeň tzv. Vltavské kaskády. Hráz přehrady je ze dvou třetin tvořená sypanou zemní hrází s návodním těsněním. Zbylá třetina je betonová gravitační, její výška nad terénem je v nejvyšším místě 42 metrů. V této části jsou situovány dvě pole bezpečnostních přelivů hrazených klapkami, dále dvě spodní výpusti a malá vodní elektrárna využívající sanační průtok 1,5 m^3s^{-1} vypuštěný do původního koryta řeky. Objem nádrže Lipno I je 310 mil. m^3. Elektrárna má při hrubém spádu 160 m a hltnosti 2 × 46 m^3s^{-1} instalovaný výkon 2 × 60 MW. Elektrárna samotná je situována podzemí. Voda je k turbínám přiváděna dvěma svislými přivaděči o průměru 4,5 m. Od turbín je voda odváděna 3,5 km dlouhým odpadním tunelem nad Vyšší Brod do vyrovnávací nádrže Lipno II.

[3]BROŽA, Vojtěch. *Přehrady Čech, Moravy a Slezska*. Liberec: Knihy 555, 2005. ISBN 80-86660-11-7.

Přehradní nádrž Lipno II je tvořena podobně jako Lipno I gravitační zemní hrází a tížnou betonovou částí, ve které jsou umístěny dvě přelivné pole o šířce 10 metrů hrazené klapkami. Průtočná elektrárna je osazena kaplanovou turbínou s hltností 20 m^3 s^{-1} a spádem 4–10 metrů v závislosti hladiny v nádrži. Délka hráze v koruně je 224 metrů, výška nad základy je 19,5 metrů. Objem nádrže Lipno II je 1,66 mil m^3.

2.5. Vodní dílo Orlík a Kamýk

Vodní dílo Orlík je nejvýkonnější a největší přehrada v České republice. Přehradní hráz je vysoká 90,5 metru, délka hráze v koruně činí 450 metrů. Přehrada je betonová tížného typu. Pro převod povodňových průtoků slouží 3 korunové přelivy o šířce 15 metrů hrazené segmentovými uzávěry. Pod hranou korunového přelivu se nacházejí spodní výpusti o průměru 4000 mm zakončené uzávěry typu Johnson. Vzdutí orlické nádrže dosahuje délky 68 kilometrů. Objem nádrže činí 720 mil. m^3. Akumulační elektrárna je osazena čtyřmi Kaplanovými turbínami, každá o výkonu 91 MW (celkem 364 MW) při navrhovaném spádu od 44 m do 70,5 m a hltností 150 m^3 s^{-1}.

Vodní dílo Kamýk tvoří tížná betonová hráz o výšce 24,5 metrů. Délka hráze v koruně je 158 metrů. Zadržovaný objem činí 12,9 mil. m^3. Pro převod povodňových průtoků slouží 4 korunové přelivy o šířce 18 metrů. Korunové přelivy jsou hrazeny segmentovými uzávěry. Délka vzdutí přehrady Kamýk činí 10,2 km a dosahuje až k přehradě Orlík. Elektrárna je osazena čtyřmi Kaplanovými turbínami o celkovém výkonu 40 MW a hltností 4 × 90 m^3 s^{-1} s navrhovaným spádem 11,5 - 16 metrů.

2.6. Vodní dílo Slapy a Štěchovice

Vodní dílo Slapy je po Orlíku druhé nejvýkonnější na našem území. Slapská přehrada je přímá, betonová, tížného typu. Výška hráze nad terénem je 67,5 metrů, délka hráze v koruně je 260 metrů. Bezpečnostní korunový přeliv je tvořen čtyřmi poli o šířce 15 metrů hrazené segmentovými uzávěry. Spodní výpusti jsou tvořeny dvěma potrubími o průměru 4000 mm zakončenými uzávěry typu Johnson. Délka vzdutí slapského jezera je 44 km, objem činí 270 mil. m^3. Jeho špičková elektrárna je osazena třemi Kaplanovými turbínami s hltností 108 m^3 s^{-1} a výkonem 48 MW. Hrubý spád je 56 m. Elektrárna samotná spolu s rozvodnou 22 kV a 110 kV je situována do tělesa hráze.

Střechu těchto prostorů tak tvoří skluz bezpečnostních přelivů. Toto řešení bylo vybráno s ohledem na stísněnost místa, ve kterém byla přehrada postavena.

Vodní dílo Štěchovice je předposlední nádrž Vltavské kaskády. Tvoří ji betonová tížná hráz o výšce 22 metrů. Objem nádrže činí 10,4 mil. m^3. Na koruně hráze se nacházejí tři přelivná pole hrazená stavidly. U pravého břehu se nachází plavební zařízení, které se skládá ze dvou plavebních komor za sebou. Na levém břehu se nachází průtoková pološpičková vodní elektrárna. Je osazena dvěma kaplanovými turbínami každá o výkonu 11,25 MW a hltností 80 $m^3 s^{-1}$.

Součástí vodního díla je kromě špičkové vodní elektrárny Štěchovice I také přečerpávací vodní elektrárna Štěchovice II o výkonu 50 MW. Jako spodní nádrž slouží VD Vrané, které svým vzdutím dosahuje až ke štěchovické elektrárně. Horní nádrž o objemu 0,5 mil. m^3 je vybudována na vrchu Homole.

3. PROVĚŘENÍ MOŽNOSTI EFEKTIVNĚJŠÍHO VYUŽITÍ STÁVAJÍCÍCH VODNÍCH ELEKTRÁREN

3.1. Význam vodních a přečerpávacích vodních elektráren pro energetiku

Nutnost stavby velkých PVE si vyžádalo budování jaderných elektráren. Pokud se podíváme na technologii jaderných elektráren zjistíme, že rychlé regulování výkonu je neekonomické a zkracuje životnost komponentů jednotlivých okruhů. Na rozdíl od jaderných elektráren jsou PVE schopny rychlého najetí na libovolný výkon. V případě, že klesne poptávka po elektrické energii a bylo by nutné snižovat výkon jaderných elektráren, přejde PVE do motorového chodu a přebytek elektrické energie v síti využije k přečerpání vody.

Z tohoto důvodu je jejich potřeba nutná ke správné bilanci výkonu v síti a také jsou velice důležité pro bezpečnost samotných jaderných elektráren. Za předpokladu, že dojde k výpadu dodávek elektrické energie řídícím a pomocným systémům jaderné elektrárny, mohou tyto přečerpávací elektrárny poskytnout zálohu, dokud nedojde k obnovení vlastního zdroje napájení.
V případě blízkosti vodní elektrárny může vlastní nádrž sloužit jako zdroj technologické vody, která mimo jiné slouží k chlazení. Z tohoto důvodu jsou nedílnou součástí kritické infastruktury a jejich význam je takřka nenahraditelný a neměl by být podceňován.

Díky ustupování od fosilních paliv a přechodu k obnovitelným zdrojům energie, u kterých se výroba nedá řídit podle potřeby uživatelů, nastává otázka ukládání vyrobené elektrické energie na dobu, kdy je poptávka vyšší a obnovitelné zdroje by nedokázali pokrýt spotřebu. Jednou z možností je využití současných PVE, které mají ovšem limitovanou kapacitu. Některé PVE navíc pracují v režimu dispečerské zálohy, nemohu být tedy využívány v plné kapacitě.

Řešením je stavba nových PVE, které by pokryly potřebu akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Zásadním problémem PVE je jejich výstavba, která je časově a

finančně náročná. Vhodné lokality se často nachází v chráněných krajinných oblastech, které by PVE mohla nenávratně poškodit. Kvůli minimalizaci zásahu do krajiny se proto většina provozu buduje v podzemí, což do velké míry omezí zásah do krajiny, na druhou stranu ražba tunelů a kaveren je časově náročná a zvyšuje již tak velké náklady na stavbu elektrárny.

Řešením dlouhé a finančně náročné stavby je využití již existujících vodních děl, která by se využila k vytvoření PVE s minimálním dopadem na životní prostředí.

3.2. Přestavba akumulačních elektráren na přečerpávací

3.2.1. Vodní dílo Lipno I – II

Variant na další energetické využití lipenského jezera je hned několik. První počítá s přestavbou stávající akumulační elektrárny na přečerpávací. Samotná realizace toho projektu ovšem naráží na několik problémů. Prvním z nich je vyspádování odpadního tunelu směrem od podzemní kaverny elektrárny do vyrovnávací nádrže. Bez úpravy odpadního kanálu (současný sklon činí 1,4 ‰ po celé délce) by nebylo možné využívat celkový objem nádrže Lipno II. Dalším problémem je malý objem nádrže Lipno II, který dosahuje pouhých 1,66 mil m^3.V praxi je ovšem nutné započítat minimální odtok v Lipna II, který činí 6 m^3 s^{-1}.

Druhá varianta počítá s výstavbou PVE Lipno III o výkonu 4 × 110 MW mezi nádržemi Lipno I a novou nádrží Kapličky o objemu 6,92 mil. m^3. Výkon z podzemní elektrárny by se po transformaci na 400 kV vedl 61 km dlouhým vzdušným vedením do rozvodny Dasný u Českých Budějovic. Nevýhodou tohoto projektu je citelný zásah do chráněné krajinné oblasti v místě budoucí horní nádrže. Na základě posouzení úřadu životního prostředí v Českém Krumlově byl tento projekt zastaven z důvodu citelného zásahu do chráněné oblasti[4].

Poslední varianta počítá s megalomanským projektem PVE Lipno I – Aschach. Jednalo by se o PVE mezi dvěma státy. Horní nádrž by tvořilo na české straně Lipno I, dolní nádrž na německé straně přehrada Aschach. Vlastní elektrárna o výkonu 4 × 250 MW s

[4] Hommer J.: *Vznik, provoz a další perspektiva využití vodního díla Lipno*, České Budějovice 2012, Diplomová práce

hrubým spádem 450 metrů by se nacházela v podzemí na české straně. Od podzemní elektrárny by vedl tunel dlouhý 27 km zajišťující spojení s nádrží Aschach. Tento velkolepý projekt by kromě stabilizace elektrické sítě nadlepšoval průtoky ve Vltavě, potažmo v Labi. V opačném případě by elektrárna sloužila pro převod povodňových průtoků do Dunaje.[5]

Obr. 3.1: Projekt PVE Lipno I – Aschach[6]

3.2.2. Vodní dílo Orlík – Kamýk

V této lokalitě se nabízí úprava špičkové vodní elektrárny na elektrárnu přečerpávací. Jako dolní nádrž by sloužilo VD dílo Kamýk. Využitelný objem zde není ovlivněn hygienickým odtokem do původního koryta, protože pod VD Kamýk se nachází vzdutí Slapské přehrady.

[5] *PVE LIPNO – ASCHACH* [online]. Praha: Lipno – Aschach, 2012 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://lipno-aschach.webnode.cz/cz/o-projektu/
[6] BROŽA, Vojtěch. *Přehrady Čech, Moravy a Slezska*. Liberec: Knihy 555, 2005. ISBN 80-86660-11-7.

3.2.3. Vodní dílo Slapy – Štěchovice

Podobně jako v případě vodního díla Orlík se nabízí úprava špičkové vodní elektrárny Slapy na elektrárnu přečerpávací s využitím Štěchovického vodního díla jako spodní nádrže. Využitelný objem je zde na rozdíl od nádrže Kamýk ovlivněn nutností zajistit hygienické minimum pod Vltavskou kaskádou, které činí 40 m^3s^{-1}. I když se o tento odtok stará až VD Vrané, tak již Štěchovická přehrada se svým pološpičkovým provozem zasazuje o vyrovnávání tohoto odtoku.

3.3. Výpočet teoretických kapacit přečerpávacích vodních elektráren na Vltavě

Teoretická kapacita možné budoucí PVE mezi nádrží špičkové elektrárny a nádrží vyrovnávacího díla závisí na využitelném objemu nádrží. Vyrovnávací nádrže bývají výrazně menší jak špičkové, čerpatelný objem vody je tedy primárně dán zásobním prostorem vyrovnávacích nádrží. Zásobní prostor je menší jak celkový objem nádrže. Zásobní prostor je definován rozdílem mezi maximální retenční hladiny (hladina, která by se neměla za žádných okolností překročit) a hladinou stálého nadržení (hladina, na kterou lze nádrž vypustit přes základové výpustě). Tabulka níže shrnuje retenční hladiny (H_{max}) a hladiny stálého nadržení (H_{min}).

	Lipno II	Štěchovice	Kamýk
H_{min} (m.n.m.)	557,6	215,8	282,1
H_{max} (m.n.m.)	563,35	219,4	284,6

Tab. 3.1: Shrnutí retenčních hladin a hladin stálého nadržení[7]

Kromě rozdílu hladin je zásobní objem definován plochou hladiny nádrže, která ale nemusí být pro všechny výšky hladin stejná. Výpočet zásobního objemu je definován následujícím vztahem:

$$V = \int_{H_{min}}^{H_{max}} A(H)dH \quad [m^3] \tag{3.1}$$

[7] *Povodí Vltavy* [online]. Praha: Povodí Vltavy, státní podnik, 2022 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://www.pvl.cz/portal/Nadrze/pc/cz/?data=1

kde:

V … zásobní objem nádrže [m^3]

H_{max} … výška retenční hladiny [m. n. m.]

H_{min} … výška hladiny stálého nadržení [m. n. m.]

A(H) … plocha nádrže v závislosti na výšce hladiny [m^2]

dH … element výšky hladiny [m]

Pro zjednodušení výpočtu se uvažuje plocha nádrže za konstantní. Výpočet zásobního objemu je poté definován jako:

$$V = A \cdot \int_{H_{min}}^{H_{max}} dH = (H_{max} - H_{min}) \cdot A \quad [m^3] \qquad (3.2)$$

V případě VD Lipno II se tento výpočet ukazuje jako nevhodný, protože vypočítaná hodnota převyšuje udávaný celkový objem nádrže. Proto se bude uvažovat, že zásobní prostor tvoří 80 % celkového objemu nádrže (1,66 mil. m^3).

	Lipno II	Štěchovice	Kamýk
A (ha)	45	96	195
A (m^2)	450000	960000	1950000
V (mil. m^3)	1,3192	3,312	4,875

Tab. 3.2: Shrnutí plochy nádrží a jejich zásobního objemu[8]

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.2 (Přestavba akumulačních elektráren na PVE) je do využitelného objemu nutné započítat minimum odtoku (Q_{min}) z vyrovnávacích nádrží. V úvahu bude brán fakt, že v nádrži je nutné zachovat takový objem vody, které postačí pro udržení minimálního odtoku. V případě VD Štěchovice se uvažuje zadržení objemu vody, které po přepuštění do VD Vrané zajistí odtok tohoto minima (pro případ že by VD Vrané nemělo dostatečnou, nebo dokonce nulovou, zásobní kapacitu pro udržení odtoku). V případě VD Kamýk není nutné počítat s minimálním odtokem z nádrže. Množství vody V_{min}, které je potřeba pro udržení hygienického minima je definováno vztahem:

$$V_{min} = \int_0^t Q(t)dt \quad [m^3] \qquad (3.3)$$

kde:

V_{min} … množství vody, které je potřeba pro udržení hygienického minima [m^3]

Q(t) … průtok v závislosti na čase t [$m^3 \cdot s^{-1}$]

[8] BROŽA, Vojtěch. *Přehrady Čech, Moravy a Slezska*. Liberec: Knihy 555, 2005. ISBN 80-86660-11-7.

Vyrovnávací nádrž by měla být schopna udržovat minimální odtok alespoň po dobu, než dojde ve špičkové elektrárně nad nádrží k turbínovému chodu. Toto množství by mělo vystačit alespoň na dobu t = 24 hodin (24 hodin = 3600 sekund). Během této doby musí následně dojít k turbínovému chodu, které toto množství opět doplní. Hygienické minimum Q_{min} jednotlivých VD, které musí zajistit je v tabulce níže. Průtok Q_{min} se uvažuje konstantní. Vztah pro výpočet minimálního objemu pro udržení konstantního hygienického minima po dobu 24 hodin je definován níže:

$$V_{min} = Q_{min} \cdot 3600 \quad [m^3] \tag{3.4}$$

V_{min} … množství vody, které je potřeba pro udržení hygienického minima [m^3]

Q_{min} … minimální možný průtok pod nádrží [m^3s^{-1}]

	Lipno II	Štěchovice	Kamýk
Q_{min} (m^3s^{-1})	10	40	-
V_{min} (mil. m^3)	0,036	0,144	-

Tab. 3.3: Shrnutí minimálního odtoku a potřebného minimálního objemu

Konečný výpočet určující teoretickou kapacitu případné PVE zahrnuje rozdíl zásobního objemu a objemu určeného pro minimální odtok, dále hltnost soustrojí a jmenovitý výkon soustrojí[9]. Teoretická kapacita PVE je definována vztahem níže:

$$C = \frac{(V - V_{min}) \cdot P}{Q \cdot 3600} \quad [Wh] \tag{3.5}$$

C … teoretická kapacita PVE [Wh]

V … zásobní objem vyrovnávací nádrže [m^3]

V_{min} … minimální zásobní objem [m^3]

P … jmenovitý výkon soustrojí [W]

Q … hltnost turbíny [m^3s^{-1}]

	Lipno II	Štěchovice	Kamýk
P (MW)	60	48	91
Q (m^3s^{-1})	46	108	150
C (MWh)	468	391	822

Tab. 3.4: Shrnutí potenciálních kapacit PVE

[9] Hltnost a jmenovitý výkon soustrojí jsou uvažovány stejné, jako jsou v současné době instalovány na akumulačních elektrárnách.

Z tabulky 3.4 vyplývá, že nejvhodnější lokalita pro realizaci PVE je mezi vodními díly Orlík a Kamýk. Jeho teoretická kapacita je oproti ostatním variantám prakticky dvojnásobná. Navíc nevyžaduje rozsáhlejší stavební úpravy, které by byly nutné v případě lokality Lipna I a II. Následující kapitoly se tedy budou zabývat úpravou špičkové vodní elektrárny Orlík na přečerpávací.

4. POPIS TECHNICKÉHO ŘEŠENÍ MODERNIZACE AKUMULAČNÍ VODNÍ ELEKTRÁRNY NA PŘEČERPÁVACÍ

4.1. Volba strojového uspořádaní přečerpávací vodní elektrárny

V první fázi je nutné vyřešit strojní uspořádání elektrárny. Existují 3 druhy uspořádání přečerpávacích vodních elektráren, které se liší v počtu použitých strojů.

Prvním je tzv. čtyřstrojové uspořádání, které se skládá z turbíny, generátoru, motoru a čerpadla. Jedná se o dvě samostatné soustrojí, která pracují nezávisle na sobě. V generátorovém režimu turbína spolu s generátorem na společné hřídeli vyrábí elektřinu, kterou dodává do sítě. V čerpadlovém režimu spotřebovává motor energii ze sítě. Motor je na společné hřídeli s čerpadlem, které čerpá vodu do horní nádrže. Výhodou tohoto uspořádání je vysoká účinnost celého cyklu. Každý stroj je navržený pouze pro jeden účel, proto je dosaženo vysoké účinnosti. Další výhodou je možné rozdělení čerpadlového provozu od turbínového. Nevýhodou tohoto uspořádání jsou velké pořizovací náklady na soustrojí a nutnost externího rozběhu motoru čerpadla.

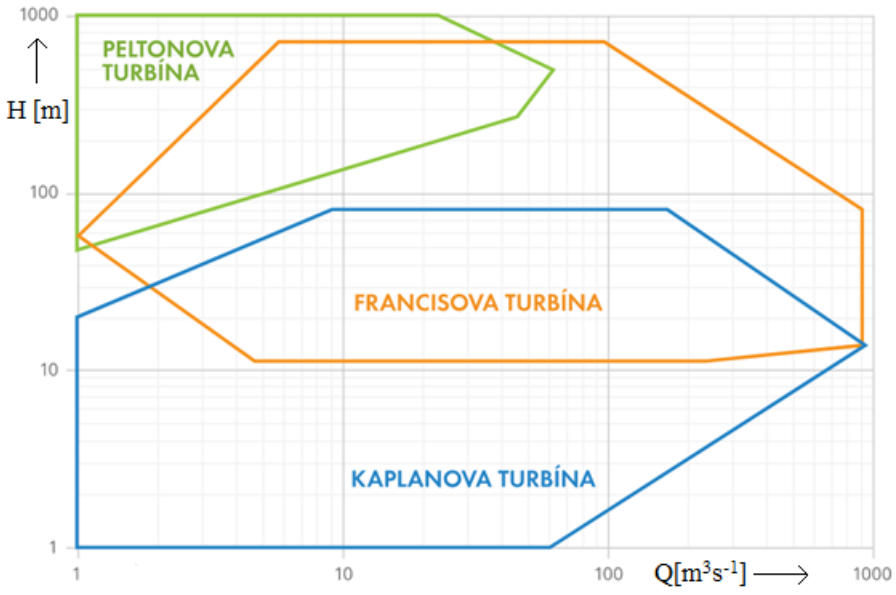
Druhou možností je použití tzv. třístrojového uspořádání, které na rozdíl od předchozí varianty využívá pouze jeden synchronní stroj, který pracuje jako motor nebo generátor v závislosti na daném chodu. Na společné hřídeli s motorgenerátorem se nachází turbína a čerpadlo, které jsou spojené spojkou. V turbínovém režimu je spojka rozpojená, voda z horní nádrže roztáčí turbínu, která roztáčí motorgenerátor. Ten vyrábí elektřinu, kterou dodává do sítě. V čerpadlovém režimu že čerpadlo připojené spojkou na hřídel motorgenerátoru. Soustrojí je pomocí turbíny roztočeno na provozní otáčky a připojeno na síť. Přívod vody na turbínu je uzavřen. Následně dojde k zavzdušnění turbíny tlakovým vzduchem, které omezí ztráty turbíny při chodu naprázdno. Po vyrovnání tlaku na uzávěru čerpadla dojde k jeho otevření a probíhá čerpání vody do horní nádrže. Toto uspořádání se častěji používá v oblastech, kde je z důvodu vysokého spádu účinnější použití Peltonovy turbíny.

Hlavními výhodami třístrojového uspořádání je vysoká účinnost cyklu a fakt, že k rozběhu stroje do čerpadlového chodu není potřeba externího motoru, soustrojí je uvedeno do pohybu podobně jako při turbínovém režimu. Soustrojí se tedy otáčí v obou chodech jedním směrem, díky čemu není potřeba provádět prohození fází na statoru motorgenerátoru. Nevýhodou jsou vyšší pořizovací náklady z důvodu samostatné turbíny a čerpadla a výška soustrojí, která je větší jak u zbylých variant.

Poslední variantou je tzv. dvoustrojové uspořádání, které používá jeden synchronní stroj jako motor a generátor. Jako turbína a čerpadlo je použita Francisova reverzní turbína na společné hřídeli s motorgenerátorem, která se dle směru otáčení chová jako turbína nebo čerpadlo. Výhodou tohoto uspořádání je nejnižší pořizovací cena ze všech variant. Toto řešení je také úsporné, co se týče prostoru pro soustrojí. Nevýhodou je nižší účinnost oproti předchozím uspořádáním. Dále podobně jako v případě čtyřstrojového uspořádání je potřeba externího rozběhu soustrojí do čerpadlového chodu.

4.2. Výběr turbíny

Výběr turbíny závisí na strojovém uspořádání, spádu a průtoku. Graf níže popisuje nejpoužívanější typy turbín vzhledem k jejich spádu a průtoku.



Graf 4.1: Graf optimálních spádů a průtoků pro jedlotlivé typy turbín[10]

[10] Rozsah vyžití nejpoužívanějších turbín. In: *Svět Energie* [online]: Skupina ČEZ, 2020 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: https://www.svetenergie.cz/data/web/powerplant/vodni-elektrarna/kaplanova-turbina/photos/jakou_turbinu_pouzit.svg, upraveno

PVE obvykle pracují se spádem, který může dosahovat stovek metrů. Vyšší spád dovoluje použití turbíny s menší hltností vody. Menší hltnost dovoluje použití menší horní a dolní nádrže při udržení stejného hydroenergetického potenciálu. Menší hltnost také umožňuje použití potrubí s menším průměrem. Z grafu 4.1 vidíme, že pro spády v řádu stovek metrů se používá Francisova a Peltonova turbína.

Francisova turbína se používá pro spády od desítek metrů po horní stovky metrů. Na rozdíl od Peltonovy turbíny je schopna pracovat v širokém spektru spádů. Stejně jako Kaplanova turbína se řadí mezi tzv. přetlakové turbíny. Přetlakové turbíny přeměňují část tlakové energie na energii kinetickou v rozváděcím kole. Zbytek (zpravidla větší) se mění na kinetickou energii při průchodu turbínou. Na vstupu oběžného kola tedy dochází k přetlaku, na který je potřeba dimenzovat uložení soustrojí (váha rotujících částí soustrojí na orlické přehradě dosahuje 650 tun, kromě této váhy na ložisko při plném výkonu působí také hydrostatický tah vody, který dosahuje, podobně jako váha soustrojí, až 650 tun).
Hojně používaným typem na PVE je Francisova reverzní turbína, která je díky svému konstrukčnímu provedení, schopna čerpat vodu v opačném směru otáčení.
Peltonova turbíny se řadí mezi tzv. rovnotlaké turbíny. Rovnotlaké turbíny se vyznačují stejným tlakem na vstupu a výstupu oběžného kola. Voda je na oběžné kolo přiváděna pomocí trysek, ze kterých voda vystupuje kolmo na lopaty turbíny. Turbína se používá pro velké spády a malé průtoky. V případě PVE se používá v třístrojovém uspořádání se samostatným čerpadlem, protože není schopna reverzního (čerpadlového) chodu.

Kaplanova turbína se používá pro menší spády nebo pro spády s velkou amplitudou kolísání hladiny (konstrukce turbíny dovoluje natáčení lopat turbíny, díky čemu dosahuje vysoké účinnosti v širokém pásmu spádů a průtoků). Její využití pro PVE je vzhledem k použitelnosti na velkých spádech a absenci reverzního chodu nepravděpodobné.

4.3. Otáčky soustrojí

Určení otáček soustrojí je důležité při na navrhování synchronního motorgenerátoru a rozběhového motoru. Všechny součásti soustrojí (motorgenerátor, turbína, čerpadlo)

jsou na společné hřídeli a díky tomu jsou otáčky všech strojů stejné s otáčkami turbíny. Pro předběžné určení otáček soustrojí vyjdeme ze vztahu níže[11]:

$$n = \frac{1{,}166 \cdot n_s \cdot H \cdot \sqrt[4]{H}}{\sqrt{P_T}} \qquad [\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}] \tag{4.1}$$

kde:

n … předběžné otáčky soustrojí [ot·min^{-1}]

n_s … specifické otáčky [ot·min^{-1}]

H … spád vodního díla [m]

P_T … mechanický výkon na hřídeli turbíny [kW]

Ze vztahu vidíme, že otáčky jsou závislé na spádu (rozdílu hladiny v nádrži a hladiny pod elektrárnou) a výkonu, na který turbínu navrhujeme. Proměnná n_s značí specifické otáčky geometricky podobné turbíny, definované jako provozní otáčky turbíny s takovým průměrem oběžného kola, která při spádu H = 1 metr poskytuje výkon 0,736 kW [12]. V tabulce níže jsou specifické otáčky pro různé typy turbín.

Specifické otáčky turbín	
Typ turbíny	rozmezí n_s (ot·min^{-1})
Peltonova	4 – 32
Bánkiho	70 – 150
Francisova pomaluběžná	50 – 150
Francisova normální	150 – 250
Francisova rychloběžná	250 – 450
Kaplanova a vrtulová	300 – 1000

Tab. 4.1: Specifické otáčky turbín[13]

Mechanický výkon na hřídeli se určí ze vzorce níže pro hydroenergetický potenciál a započítáním účinnosti turbíny:

$$P = g \cdot \eta_{tur} \cdot \int_0^H Q(H)dH \quad [\text{W}] \tag{4.2}$$

[11] HOLATA, Miroslav a Pavel GABRIEL. *Malé vodní elektrárny: projektování a provoz*. Praha: Academia, 2002. ISBN 978-80-200-0828-2.

[12] Tamtéž

[13] Tamtéž

kde:

P … hydroenergetický potenciál [W]

g … tíhové zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]

η_{tur} … účinnost turbíny [–]

Q(H)… průtok turbínou v závislosti na spádu [$m^3 s^{-1}$]

dH … element spádu [m]

Pro přesné určení jmenovitých otáček soustrojí je do úvah potřeba zahrnout další stroj, který je součástí soustrojí, a to synchronní motorgenerátor. Otáčky synchronního stroje jsou přímo určené frekvencí síťového napětí a nepřímo počtem pólpárů (počtem pólových dvojic). Synchronní otáčky jsou dány následujícím vztahem:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p_p} \qquad [ot \cdot min^{-1}] \tag{4.3}$$

kde:

n … jmenovité otáčky soustrojí [$ot \cdot min^{-1}$]

p_p … počet pólpárů [-]

f … frekvence napájecího napětí statoru [Hz]

Následující tabulka ukazuje synchronní otáčky stroje v závislosti na počtu pólpárů (12 – 22) a síťové frekvenci 50 Hz používanou v ES ČR.

Počet pólpárů (-)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Ot. soustrojí($ot \cdot min^{-1}$)	250	230,8	214,3	200	187,5	176,5	166,7	157,9	150,0	142,9	136,4

Tab. 4.2: Synchronní otáčky v závislosti na počtu pólpárů

Posledním faktorem, který je potřeba uvažovat při výpočtu je vliv kavitace. Kavitací nazýváme složitý jev vzniku a zániku dutin vyplněných parami a plyny v proudící kapalině, který se obecně u hydraulických strojů projevuje zejména kavitačním napadením a rozrušováním konstrukčních prvků.[14] Kavitace samotná způsobuje, kromě hluku a snižování účinnosti, nevratné mechanické poškození turbíny a rozváděcích

[14] Bednář J.: *Malé vodní elektrárny 2,* Praha 1989

lopat. Pro omezení vlivu kavitace se doporučuje snížení provozních otáček. Doporučené otáčky vzhledem ke spádu elektrárny pro omezení kavitace shrnuje následující tabulka.

n (ot·min^{-1})	70	110	150	200	300	400	500	600	700	800
H_{max} (m)	260	181	111	75	41	26	17	13	10	8

Tab. 4.3: Mezní spády a otáčky pro omezení vlivu kavitace[15]

4.4. Rozběh do čerpadlového chodu

Samostatnou problematikou úpravy akumulační vodní elektrárny na PVE je rozběh soustrojí (synchronního stroje) do čerpadlového chodu. Synchronní motor není možné rozběhnout přímým připojením nabuzeného stroje na síť, tento rozběh je nutné provést jiným způsobem.

4.4.1. Asynchronní rozběh

Pro asynchronní rozběh se využívá rozběhové vinutí, tzv. amortizér, které je umístěno na pólech rotoru. Vinutí samotné je tvořeno tyčemi, které jsem na koncích spojené nakrátko. Budicí vinutí synchronního stroje musí být během asynchronního rozběhu zkratováno, nebo spojeno přes odpor. V opačném případě by se rotorové vinutí chovalo jako rozpojeno proudový zdroj. Do vinutí by se indukovalo vysoké napětí, které by mohlo způsobit poškození mezizávitové izolace a zničení rotoru.

Samotný rozběh začíná připojením statoru do sítě přes impedanci, která je většinou tvořena třífázovým reaktorem. Do tyčí rozběhového vinutí se indukuje napětí a proud. Tento proud vyvolává moment, který rozbíhá soustrojí na otáčky blízké synchronním. Synchronizace soustrojí po asynchronním rozběhu probíhá díky malému zátěžnému momentu pouze reluktančním momentem synchronního stroje, který vtáhne rotor do synchronismu. Po ukončení rozběhu je třífázový reaktor přemostěn, rotor je nabuzen a rozběh je ukončen. Na obrázku níže je třífázová tlumivka v PVE Štěchovice II sloužící k asynchronnímu rozběhu soustrojí.

[15] HOLATA, Miroslav a Pavel GABRIEL. *Malé vodní elektrárny: projektování a provoz*. Praha: Academia, 2002. ISBN 978-80-200-0828-2.

Obr. 4.1:Třífázová tlumivka (reaktor) v PVE Štěchovice II[16]

4.4.2. Rozběh externím asynchronním motorem

V případě velkých soustrojí, u kterých není možné využít asynchronní rozběh, se stroj na jmenovité otáčky rozeběhne pomocí externího asynchronního motoru s vinutou kotvou připojeného na společné hřídeli. Vinutí kotvy je vyvedeno přes sběrací kroužky na proměnný rezistor. Rovnice níže popisuje moment asynchronního motoru.

$$M = \frac{3 \cdot R_2 \cdot U_1{}^2 p_p}{\omega \cdot s} \cdot \frac{1}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2} \quad \text{[Nm]} \tag{4.4}$$

kde:

R_1 … odpor statoru [Ω]

R_2 … přepočítaný odpor kotvy [Ω]

X_1 … reaktance statoru [Ω]

X_2 … přepočítaná reakce kotvy [Ω]

U_1 … napájecí napětí statoru [V]

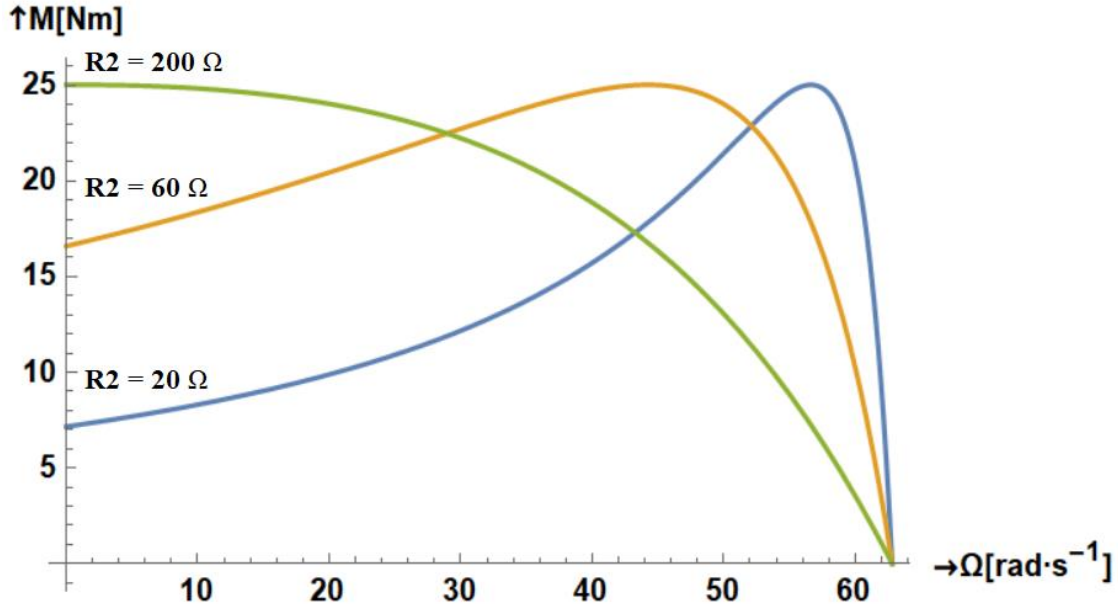
[16] Obrázek z archivu autora.

p_p … počet pólpárů statoru [-]

s … skluz rotoru [-]

ω … úhlová frekvence [s^{-1}]

Z grafu 4.2 mechanické charakteristiky asynchronního motoru (M=f(Ω)) vidíme, že změnou rotorového odporu dochází ke změnu skluzu zvratu, při kterém je moment maximální. Samotná velikost maximálního momentu se nijak nemění. Při vhodné volbě rotorového odporu je možné dosáhnout maxima momentu při nulových otáčkách, jak je naznačeno v grafu níže.



Graf 4.2: Graf mechanické charakteristiky asynchronního kroužkového motoru pro různé hodnoty rotorového odporu[17]

Samotný rozběh začíná připnutím pony motoru na napájecí síť. Velikost odporu je zvolena tak, aby byl maximální moment při nulových otáčkách (nulové úhlové rychlosti Ω, která je udávána v rad·s^{-1}). Rotor se začne pozvolně otáčet a moment motoru klesne. Pro opětovné zvýšení momentu při daných otáčkách se sníží odpor v rotorovém obvodu. Tím se soustrojí opět urychlí. Tento proces se opakuje až do doby, kdy je dosaženo synchronních otáček motorgenerátoru. Následně dojde k přifázování synchronního stroje a odpojení rozběhového motoru.

[17] Graf z archivu autora, zpracováno v programu Wolfram Mathematica.

4.4.2.1. Kapalinový spouštěč

Jako proměnný odpor se používá tzv. kapalinový spouštěč. Jedná se o dva kontakty ponořené v elektrolytu. Přibližováním nebo oddalováním kontaktů dochází ke změně odporu. Výhodou kapalinového spouštěče oproti klasickým pevným odporníkům je lepší schopnost chlazení vzhledem k velkým výkonovým ztrátám během rozběhu motoru a plynulá změna hodnoty odporu.

4.4.2.2. Dimenzování rozběhového motoru

Vzhledem k době provozu rozběhového pony motoru (desítky sekund) se dle normy ČSN EN 60034-1 – *Točivé elektrické stroje – Část 1: Jmenovité údaje a vlastnosti* jedná o krátkodobý chod (S2). Takový chod je definován časem t_z, po který je motor zatěžován konstantně. Během tohoto chodu motor nedosáhne svého ustáleného oteplení. Pohon je posléze vypnut, a to na minimálně takovou dobu, během které dojde k ustálení teploty motoru (nebo jeho chladiva) na teplotu okolí v rozmezí 2 °C.

V rozběhovém motoru během provozu dochází ke ztrátám, které se přeměňují na teplo. Teplo se synchronním strojem přenáší proti směru teplotního gradientu pomocí vedení, proudění a sálání. Spolu s tepelnou kapacitou motoru a koeficientem přestupu tepla tvoří složitý systém odvodu tepla. Tepelná kapacita motoru je přímo závislá na velikosti hmoty motoru a na měrné tepelné kapacitě této hmoty. Tepelná kapacita motoru je definována následujícím vztahem:

$$C = m \cdot c \qquad [\mathrm{J \cdot K^{-1}}] \tag{4.5}$$

kde:

C … tepelná kapacita motoru [$\mathrm{J \cdot K^{-1}}$]

m … hmotnost motoru [kg]

c … měrná tepelná kapacita motoru [$\mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}}$]

Koeficient přestupu tepla závisí na ploše, ze které je teplo odváděno, a na součiniteli přestupu tepla prouděním. Tento činitel zahrnuje proudění chladícího média (vzduchu, vody). Koeficient přestupu tepla je definován vztahem:

$$A = \alpha \cdot S \qquad [\mathrm{W \cdot K^{-1}}] \tag{4.6}$$

kde:

A … koeficient přestupu tepla [$W \cdot K^{-1}$]

α … součinitel přestupu tepla prouděním [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

S … plocha pláště motoru [m^2]

Pro zjednodušení se motor uvažuje jako homogenní těleso, čímž se schéma zjednoduší na přechodový děj 1. řádu, který je popsán následující rovnicí:

$$\Delta P dt = Cd(\Delta\vartheta) + A\Delta\vartheta dt \tag{4.7}$$

kde:

ΔP …ztráty v motoru [W]

C … tepelná kapacita motoru [$J \cdot K^{-1}$]

A … koeficient přestupu tepla [$W \cdot K^{-1}$]

Δϑ … oteplení motoru [K]

Řešením rovnice 4.7 je následující vztah pro průběh oteplení Δϑ = f(t):

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_0 + (\Delta\vartheta_\infty - \Delta\vartheta_0)(1 - e^{-\frac{\tau}{t}}) \qquad [K] \tag{4.8}$$

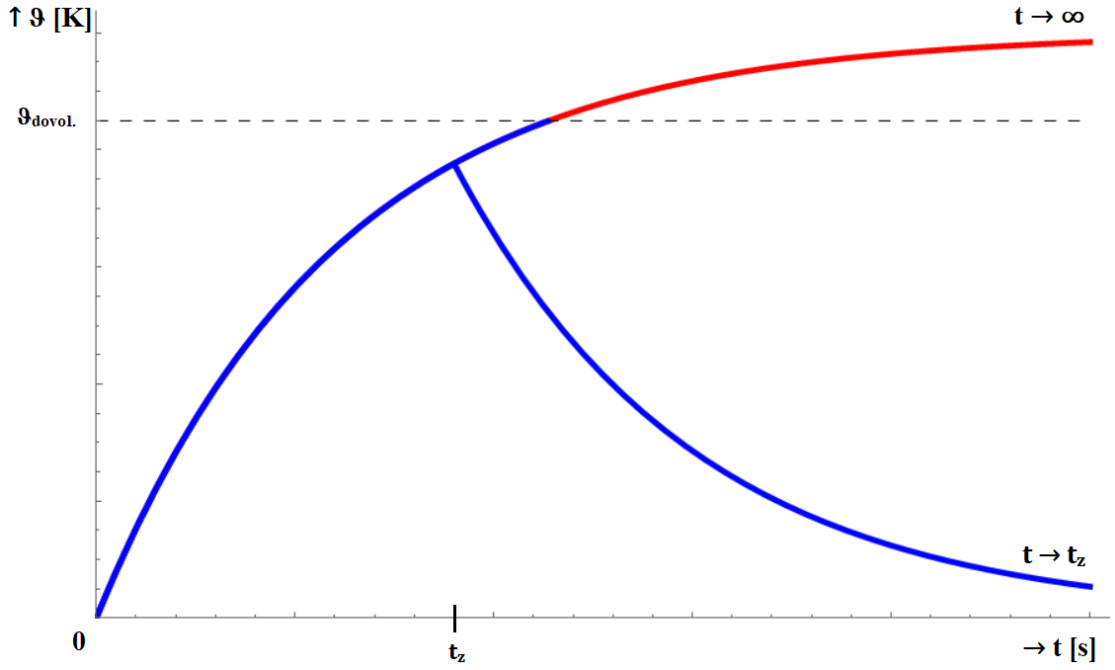
kde:

$\Delta\vartheta_0$ … počáteční oteplení [K]

$\Delta\vartheta_\infty$ … ustálené oteplení [K]

τ … tepelná časová konstanta motoru [s]

t … čas [s]



Graf 4.3: Graf oteplení motoru během krátkodobého chodu[18]

Správně navržený rozběhový motor za svou dobu provozu nedosáhne dovoleného oteplení $\vartheta_{dovol.}$ tak že je provozován pouze po dobu $t \rightarrow t_z$, jak je ukázáno v grafu 4.3. V opačném případě, kdy motor běží po dobu delší jak t_z, hrozí, že motorové vinutí přesáhne dovolené oteplení. V takovém případě dochází k degradaci izolace a časem k mezizávitovém zkratu a zničení motoru. Takový případ, kdy motor dosáhne ustáleného oteplení, ukazuje křivka $t \rightarrow \infty$.

Momentové dimenzování vychází z pohybové rovnice níže:

$$M - M_z = M_d \qquad [\text{Nm}] \tag{4.9}$$

kde:

M … hnací moment [Nm]

M_z … zátěžný moment [Nm]

M_d … dynamický moment [Nm]

Dynamický moment reprezentuje snahu rotujícího tělesa bránit ve změně své úhlové rychlosti. Tento je přímo závislý na velikosti změny úhlové rychlosti a momentu setrvačnosti rotoru. Při rychlých změnách je dynamický moment velký, při ustálené úhlové rychlosti je nulový. Dynamický moment je definován vztahem níže:

[18] Graf z archivu autora, zpracováno v programu Wolfram Mathematica.

$$M_d = J\frac{d\Omega}{dt}\ (Nm) \qquad [\text{Nm}] \tag{4.10}$$

kde:

J … moment setrvačnosti [kg·m^2]

Ω … úhlová rychlost [rad·s^{-1}]

Při rozběhu soustrojí PVE do čerpadlového chodu je turbína zavzdušněna, můžeme tedy uvažovat, že zátěžný moment je nulový (motor se rozbíhá naprázdno). Velikost hnacího momentu je dána pouze velikostí dynamického momentu.

Pro výpočet velikosti dynamického momentu je nutné znát moment setrvačnosti soustrojí a dobu, za jakou má soustrojí dosáhnout synchronních otáček.

Moment setrvačnosti závisí na rozložení hmoty rotujících částí. Moment setrvačnosti je dán následujícím vztahem:

$$J = \int_0^m r^2\, dm \qquad [\text{kg·m}^2] \tag{4.11}$$

kde:

r …vzdálenost od rotační osy [m]

dm … element hmoty [kg]

Pro předběžné určení momentu setrvačnosti se uvažuje zjednodušený model soustrojí, který se skládá z homogenních válcovitých těles. Element hmoty dm se vyjádří pomocí definice hustoty hmoty:

$$\rho dV = dm \qquad [\text{m}^3] \tag{4.12}$$

kde:

ρ … hustota [kg·m^{-3}]

Po dosazení objemu tělesa lze pro výpočet použít vzorec níže:

$$J = \int_{r_1}^{r_2} r^2 \rho dV = 2\rho\pi l \int_{r_1}^{r_2} r^3 \rho dr = \frac{\pi}{2}\rho l({r_2}^4 - {r_1}^4) \qquad [\text{kg·m}^2] \tag{4.13}$$

kde:

ρ … hustota [kg·m^{-3}]

l … délka [m]

r_1 … vnitřní poloměr tělesa [m]

r_2 … vnější poloměr tělesa [m]

Výkon motoru je dán vztahem níže:

$$P = M \cdot \Omega \qquad [\mathrm{W}] \tag{4.14}$$

kde:

P … výkon [W]

M … moment síly [Nm]

Ω … úhlová rychlost [rad·s^{-1}]

V praxi se rychlost soustrojí neudává v úhlové rychlosti, ale v otáčkách za minutu. Pro přepočet mezi úhlovou rychlostí a otáčkách za minutu slouží následující vzorec:

$$\Omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \qquad [rad \cdot s^{-1}] \tag{4.15}$$

kde:

Ω … úhlová rychlost [rad·s^{-1}]

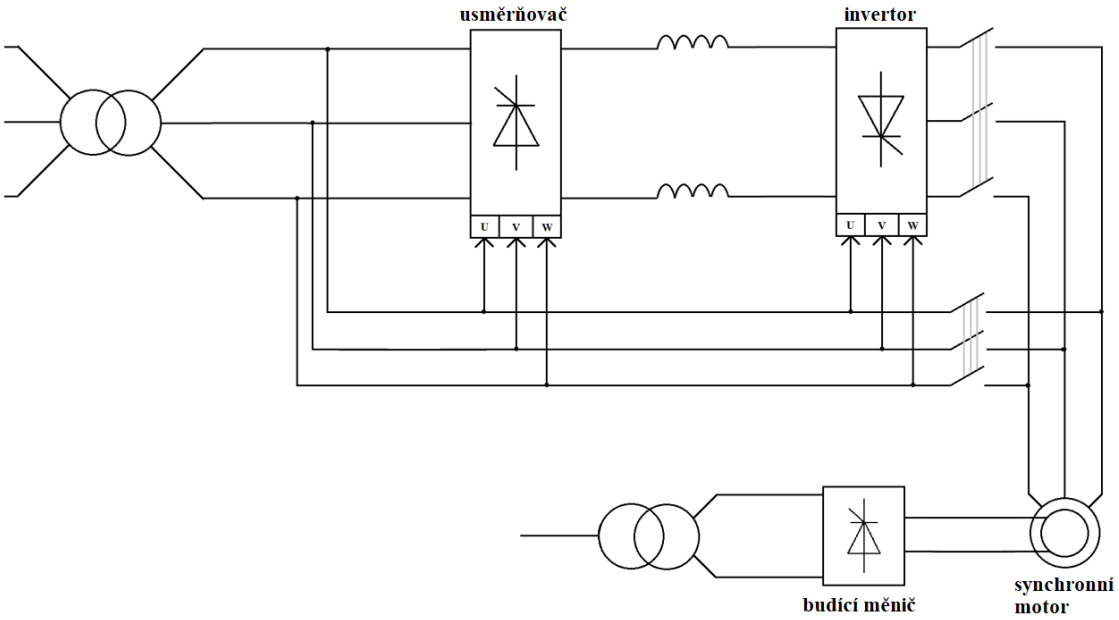
n … otáčky stroje [ot·min^{-1}]

4.4.3.Frekvenční rozběh

Dalším variantou je frekvenční rozběh, který lze zajistit dvěma způsoby. Jedním je použití synchronního stroje (generátoru) s proměnnými otáčkami, který napájí stator motorgenerátoru. Výstupní frekvence indukovaného napětí je dle vzorce (4.3) přímo úměrná otáčkám rotoru.

Druhý způsob spočívá v použití tyristorového měniče frekvence s proudovým meziobvodem (nazývaný synchronní ventilový pohon). Měnič se skládá ze dvou částí – usměrňovače a invertoru. Rozběh lze rozdělit na 3 úseky. Prvním je taktování, při kterém dochází ke komutaci statorových proudů stažením proudů v proudovém meziobvodu na nulu. Druhým úsekem je rozběh s konstantním buzením a konstantním statorovým proudem. Poslední část tvoří úsek s konstantním statorovým napětím, kde

se zvyšování otáček docílí odbuzením rotoru. Při dosažení synchronních otáček se usměrňovač a invertor přemostí a motor je napájen přímo ze sítě. Schéma níže ukazuje ventilový pohon s vyjádřeným proudovým meziobvodem a tyristorovým budičem.



Obr. 4.2: Schéma ventilového pohonu[19]

[19] Schéma z archivu autora.

5. NÁVRH TECHNICKÉHO ŘEŠENÍ MODERNIZACE AKUMULAČNÍ ELEKTRÁRNY NA PŘEČERPÁVACÍ

5.1. Současná podoba elektrárny

V současné době jsou v elektrárně instalována 4 soustrojí o výkonu 91 MW. Soustrojí se skládá z Kaplanovi turbíny a synchronnímu generátoru na společné hřídeli spojené pevnou spojkou. Dále je na hřídeli nad generátorem umístěn rotační budič a rozváděcí hlava. Na spojce generátoru je umístěn servomotor, který ovládá natočení lopat turbíny. Celé soustrojí je na závěsném ložisku, které se nachází nad generátorem. Kromě závěsného ložiska se nad generátorem nachází také horní vodící ložisko, které je doplněno dolním vodícím ložiskem umístěným pod generátorem. Celková délka rotujících částí soustrojí dosahuje 27 metrů.

Rotační budiž se skládá ze stejnosměrného stroje umístěného na hřídeli soustrojí. Budící proud je z komutátorového ústrojí přiveden přes kroužky na rotor synchronního stroje.

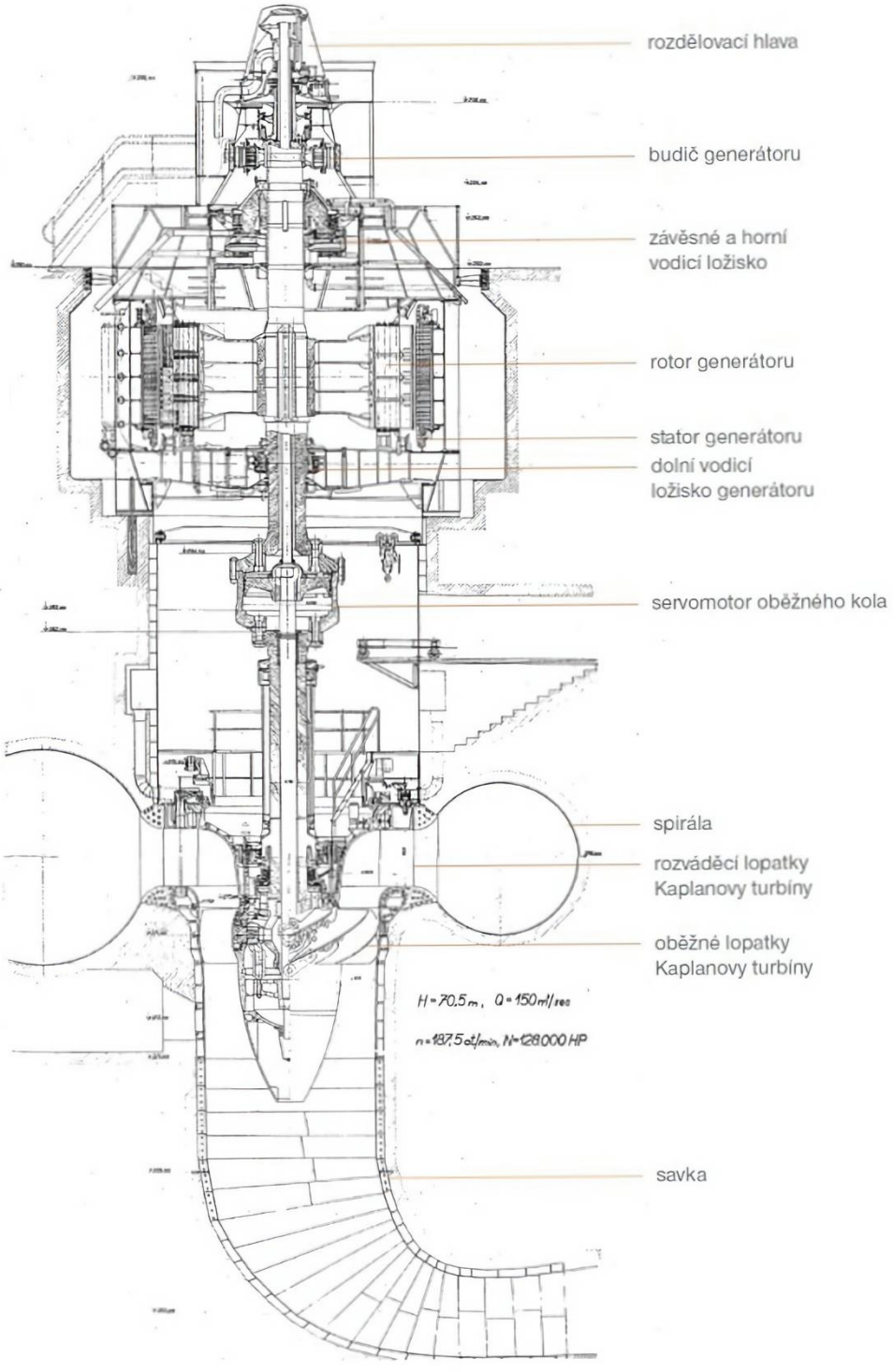
V horní části soustrojí se kromě budiče dále nachází rozváděcí hlava. Jejím úkolem je přivedení tlakového oleje do rotující hřídele. Ve spojce hřídele generátoru a turbíny je umístěn servomotor. Změnou tlaku oleje dochází k natáčení lopat. Natáčecí lopaty jsou specifické pro Kaplanovu turbínu. Regulace Kaplanovy turbíny tedy probíhá nejen pomocí natáčení lopat rozváděcího kola, ale také pomocí natáčení lopat vlastní turbíny. Toto řešení umožňuje dosažení vysoké účinnosti v širokém rozsahu spádů a průtoků.

Výkon je z generátoru vyveden do dvou trojic jednofázových blokových transformátorů, které napětí generátoru (15 kV) transformují na 220 kV. Z blokových transformátorů je výkon dodáván přes vypínače a odpojovače na dvojici linek, ústí do rozvodny Milín vzdálené zhruba 12 km od elektrárny.

V elektrárně se dále nachází čerpací agregáty tlakového oleje, které slouží pro regulaci soustrojí. Kromě čerpadel oleje se zde nachází vzduchové chladiče závěsného ložiska soustrojí. Pro zabránění samovolného rozběhu soustrojí (v důsledku netěsnosti mezi

uzavřenými rozváděcími lopatami) je soustrojí mechanicky brzděno. Brzda se skládá z brzdných bloků umístěných pod generátorem. Brzdné bloky dosedají na brzdnou plochu, která se nachází na spodní straně generátoru.

Pro zastavení stroje po ukončení provozu se nepoužívají mechanické brzdy, soustrojí je brzděno elektricky. Po uzavření přívodu vody na turbínu se odbudí rotor, následně se zkratuje výstup generátoru a rotor je opětovně přibuzován. Ve statoru generátoru se indukují proudy, které vyvolávají magnetické pole, které působí proti magnetickému poli rotoru. Interakcí těchto polí vzniká brzdný moment, která zastaví soustrojí. Důvodem tohoto brzdění je špatné mazání ložisek při nízkých otáčkách stroje.



Obr. 5.1: Schéma současného soustrojí na VD Orlík[20]

[20] Virtuální prohlídky – VD Orlík. *Virtuální prohlídky* [online]. Praha: Skupina ČEZ, 2022 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: http://virtualniprohlidky.cez.cz/cez-orlik/

5.2. Výchozí parametry

Pro návrh vlastního technického řešení modernizace akumulační elektrárny na přečerpávací je nutné znát parametry dané lokality (v tomto případě parametry stávající elektrárny Orlík), dále účinnosti jednotlivých částí soustrojí a v neposlední řadě také vlastnické poměry objektů, kterých by se modernizace dotknula. Hladina v nádrži Orlík se řídí manipulačním řádem Vltavské kaskády. Hladina stálého nadržení je minimální hladina, při které lze ještě provozovat zařízení VD díla (v případě VD Orlík jde o provoz špičkové elektrárny). Hladina zásobního objemu určuje maximální provozní hladinu. Retenční hladina určuje maximální možnou hladinu v nádrži. Prostor mezi zásobní hladinou a retenční hladinou je vyhrazen pro případné zachycování povodňových průtoků. Níže uvedená tabulka shrnuje kóty (bod s udanou nadmořskou výškou) jednotlivých hladin VD Orlík.

	Kóta hladiny [m.n.m.]
Hladina stálého nadržení	329,6
Zásobní objem	349,9
Retenční hladina	353,6

Tab. 5.1: Významné kóty VD Orlík[21]

Teoretický výkon při maximálním spádu a průtoku určíme ze vztahu níže, maximální spád (H_{max}) je definován jako rozdíl mezi hladinou zásobního objemu VD Orlík (H_{zo}= 349,9 m.n.m.) a střední hodnotou mezi zásobním prostorem VD Kamýk (H_{zk} = 284,6 m.n.m.) a hladinou stálého nadržení (H_{nk} = 282,1 m.n.m.). Maximální spád určíme ze vztahu:

$$H_{max} = H_{zo} - \frac{(H_{zk}+H_{nk})}{2} = 349{,}9 - \frac{(284{,}6+282{,}1)}{2} = 66{,}55\ m \qquad (5.1)$$

kde:

H_{max} …maximální spád [m]

H_{zo} … hladina zásobního objemu VD Orlík [m.n.m.]

H_{zk} … hladina zásobního objemu VD Kamýk [m.n.m.]

H_{nk} … hladina stálého nadržení VD Kamýk [m.n.m.]

[21] *Povodí Vltavy* [online]. Praha: Povodí Vltavy, státní podnik, 2022 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://www.pvl.cz/portal/Nadrze/pc/cz/?data=1

Maximální teoretický výkon bez započítání účinnosti je definován níže:

$$P_{teor} = H_{max} \cdot Q \cdot \rho \cdot g = 66{,}55 \cdot 150 \cdot 1000 \cdot 9{,}81 = 97{,}93\ MW \quad (5.2)$$

kde:

P_{teor} … maximální teoretický výkon bez započítání účinnosti [MW]

H_{max} … maximální spád mezi VD Orlík a VD Kamýk [m]

Q … hltnost [$m^3 \cdot s^{-1}$]

ρ … měrná hustota vody [$kg \cdot m^{-3}$]

g … tíhové zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]

Parametr	Hodnota
Rozmezí Spádů H (m)	66,55 - 44[22]
Hltnost Q ($m \cdot s^{-1}$)	150
P_{Teor} (MW)	103,7

Tab. 5.2: Výchozí parametry VD Orlík

5.3. Umístění nového soustrojí do stávající elektrárny

Vzhledem k již existujícím prostorům elektrárny jsou možnosti strojového výběru značně omezené. Je důležité zmínit, že provoz soustrojí a technologie (včetně navrhované modernizace) zajišťuje skupina ČEZ, a. s., zatímco přehrada samotná a další stavební části spadají pod státní podnik Povodí Vltavy. Velké stavební úpravy proto nejsou pravděpodobné.

Strojové uspořádání je do velké míry dáno současným uspořádáním elektrárny. Z důvodu stávajících prostorů elektrárny a výše uvedených majetkových vztahů nelze instalovat třístrojové uspořádání. Jeho instalace by znamenala značkou úpravu přivaděče (včetně instalace nových uzávěrů) na výstupní straně vody úpravu savky turbíny a přidání savky čerpadla.

Čtyřstrojové uspořádání by na elektrárně Orlík proveditelné bylo. Ze čtyř existujících soustrojí by se dvě přeměnila na čerpadla. Zbylá dvě soustrojí by se starala o turbínový

[22] Při naplnění retenčního prostoru dosahuje spád 70,5 metrů.

chod. Nevýhodou tohoto provedení je snížení instalovaného výkonu elektrárny o polovinu. Z tohoto důvodu není tato varianta vhodná.

Nejperspektivnější se ukazuje dvoustrojové uspořádání, které do velké míry kopíruje existující soustrojí elektrárny. Toto uspořádání dovoluje čerpadlový provoz při zachování stejného instalovaného výkonu.

5.4. Výběr turbíny a otáček

Spolu s dvoustrojovým uspořádáním je nutné vybrat turbínu, která umí jednak turbínový, ale také čerpadlový chod. Na většině elektráren se pro tento účel používá Francisova reverzní turbína, která se používá na všech PVE v ČR (Dlouhé Stráně, Dalešice, Štěchovice II). Spolu s vyhovujícím spádem a průtokem dle grafu 4.1 je vhodná pro lokalitu na VD Orlík. Ve všech následujících variantách modernizace bude základ tvořen dvoustrojovým uspořádáním s Francisovou reverzní turbínou.

Jmenovité otáčky turbíny se předběžně určí ze vzorce 4.1. Specifické otáčky Francisovy reverzní turbíny se volí $n_s = 250$ ot·min^{-1}. Porovnání provedeme se stávající Kaplanovou turbínou, která má specifické otáčky rovné n_s=300 ot·min^{-1}. Rozmezí spádů se uvažuje stávajících 66,5 metrů až 44 metrů. Účinnost obou turbín se uvažuje 95 %.

H (m)	Výkon na hřídeli (MW)	Kaplan	Francis
66,55	93	218	181,7
44	55,5	149,3	164,5
Průměr otáček		183,7	173,1

Tab. 5.3: Shrnutí předběžných otáček pro Kaplanovu a Francisovu turbínu

Rozdíl průměrných otáček obou turbín činí pouhých 10,6 ot·min^{-1}. Porovnání s tabulkou 4.2 ukazuje, že nejvhodnější synchronní otáčky činí 187,5 ot·min^{-1} pro Kaplanovu turbínu a 176,5 ot·min^{-1} pro Francisovu reverzibilní turbínu. Vzhledem ke konstrukci rotoru synchronního stroje je lepší volit menší počet pólpárů a tím synchronní vyšší otáčky, které činí (stejně jako u současných soustrojí) 187,5 ot·min^{-1}. Při těchto otáčkách by také, dle tabulky 4.3, nemělo docházet k nadměrnému mechanickému opotřebování turbíny díky kavitaci.

5.5. Účinnost soustrojí a průtok během čerpání

Pro určení výkonu soustrojí je třeba vyjít z účinností jednotlivých strojů, které se účastní přeměny energie. Ve dvoustrojovém uspořádání má největší podíl na celkové efektivitě soustrojí účinnost turbíny (čerpadla) a generátoru (motoru). Dále pak účinnost blokových transformátorů, účinnost (respektive ztráty) v ložiskách a v neposlední řadě také ztráty v přivaděči. Účinnost velkých transformátorů (v řádech stovek MVA) je vysoká, okolo 99 %, účinnost ložisek a přivaděče se uvažuje podobně, 99 %. Všechny výše zmíněné parametry (včetně celkových účinností obou cyklů) jsou shrnuty v tabulce níže.

	Provoz	
Účinnost [%]	Turbínový	Čerpadlový
Transformátor	99	99
Generátor (motor)	97,5	97,5
Turbína (čerpadlo)	95	90
Ložisko	99	99
Přivaděč	99	99
Celková účinnost	0,899	0,851

Tab. 5.4: Přehled účinností turbínového a čerpadlového chodu

5.5.1. Varianta 1

První varianta počítá s velikostí příkonu v čerpadlovém režimu, který je stejný jako výkon dodávaný do sítě při turbínovém provozu. Z výše uvedené účinnosti turbínového provozu vypočítáme činný výkon, které soustrojí dokáže dodat do sítě.

$$P_E = P_{teor} \cdot \eta_{tur} = 97{,}92 \cdot 0{,}899 = 88\ [MW] \tag{5.3}$$

Z tohoto čísla můžeme naopak určit přibližný čerpatelný výkon, při daném příkonu ze sítě.

$$P_{čer} = P_E \cdot \eta_{čer} = 88 \cdot 0{,}851 = 74{,}94\ [MW] \tag{5.4}$$

Objem čerpané vody se poté určí ze vzorce níže pro:

$$Q_{čer} = \frac{P_{čer}}{H \cdot \rho \cdot g}\ [m^3 \cdot s^{-1}] \tag{5.5}$$

kde:

$P_{čer}$ … čerpací výkon soustrojí [MW]

H … spád [m]

ρ… měrná hustota vody [$kg \cdot m^{-3}$]

g … tíhové zrychlení [$kg \cdot s^{-2}$]

1. Maximální spád (H_{max} = 66,55 metrů)

$$Q_{čer} = \frac{74{,}94 \cdot 10^6}{66{,}55 \cdot 1000 \cdot 9{,}81} = 114{,}78\ [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (5.6)$$

2. Minimální spád (H_{min} = 44 metrů)

$$Q_{čer} = \frac{74{,}94 \cdot 10^6}{44 \cdot 1000 \cdot 9{,}81} = 173{,}61\ [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (5.7)$$

V druhém případě vidíme, že při malém spádu dokáže čerpadlo přesáhnout průtok, na který je dimenzován přivaděč[23]. Pro dodržení maximálního průtoku 150 $m^3 \cdot s^{-1}$ je nutný minimální rozdíl hladin podle vzorce 5.6 alespoň 51 metrů.

$$H_{min} = \frac{P_{čer}}{Q_{max} \cdot \rho \cdot g} = \frac{74{,}94 \cdot 10^6}{150 \cdot 1000 \cdot 9{,}81} = 50{,}9\ [m] \quad (5.8)$$

5.5.2. Varianta 2

Druhá varianta počítá s vyšším příkonem v čerpadlovém režimu pro zkrácení doby čerpání. Nejprve se určí maximální kolísání hladiny, na kterou bude čerpáno navrženo. S ohledem na kolísání vody v nádrži v posledních 33 letech, hladina nikdy neklesla pod kótu 344 m.n.m.[24] kolísání hladin mezi touto kótou a kótou zásobní hladiny činí 5,9 metrů. Spád poté podle vzorce 5.1 činí 60,65 metrů. Podobně jako v první variantě

[23] Minimální spád 44 metrů je zvolen jako současná spodní hranice spádu pro provoz elektrárny.

[24] https://www.pvl.cz/files/download/vodohospodarske-informace/studie-CVUT/VltavKas_odb_final.pdf?fbclid=IwAR3z25PR7ijFPnKaUggWEjRxWMYDXkSzZuX4VTdwq1uOP6bEehl12jQp44I

určíme potřebný výkon podle vzorce 5.2 soustrojí pro minimální spád 60,65 metrů a průtok 150 $m^3 \cdot s^{-1}$.

$$P_{čer} = H \cdot Q \cdot \rho \cdot g = 60{,}65 \cdot 150 \cdot 1000 \cdot 9{,}81 = 89{,}25\ [MW] \quad (5.9)$$

Příkon soustrojí je definován jeho výkonem a účinností v čerpadlovém chodu. Vzorec pro výpočet příkonu je definován níže:

$$P_{příkon} = \frac{P_{čer}}{\eta_{čer}} = \frac{89{,}25 \cdot 10^6}{0{,}851} = 104{,}82\ [MW] \quad (5.10)$$

kde:

$P_{příkon}$ … příkon soustrojí v čerpadlovém chodu [MW]
$P_{čer}$ … čerpací výkon soustrojí [MW]
$\eta_{čer}$ … účinnost soustrojí v čerpadlovém chodu [MW]

Objem čerpané vody se podobně jako ve variantě 1 určí podle vzorce 5.3 pro:

1. Maximální spád (H_{max} = 66,55 metrů)

$$Q_{čer} = \frac{89{,}25 \cdot 10^6}{70{,}5 \cdot 1000 \cdot 9{,}81} = 136{,}7\ [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (5.11)$$

2. Minimální spád (H_{min} = 60,65 metrů)

$$Q_{čer} = \frac{89{,}25 \cdot 10^6}{60{,}5 \cdot 1000 \cdot 9{,}81} = 150\ [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (5.12)$$

5.6. Rozběh soustrojí přečerpávací vodní elektrárny Orlík

Způsobů rozběhu synchronního stroje, které jsou popsány v kapitole 4.4 je hned několik. Obecně se ale dají dělit podle rozběhu se zatížením a bez zatížení (rozběhu naprázdno).

Přivaděč na elektrárně Orlík nemá před vstupem vody do spirály kulový uzávěr, který se chová jako provozní uzávěr vody. Místo něj slouží jako provozní uzávěr rozváděcí lopaty, které jsou mimo chod elektrárny uzavřeny. Toto technické řešení ale nenabízí možnost zavzdušnění turbíny pro rozběh naprázdno do čerpadlového chodu. Vzduch, který by byl do prostoru turbíny vháněn pod tlakem, by unikl netěsnostmi mezi rozváděcími lopatami a nedovolil by rozběh naprázdno. Z toho důvodu nelze použít asynchronní rozběh, ani rozběh externím asynchronním motorem.

Pro těžký rozběh (kterým rozběh nezavzdušněného čerpadla je) je možné použít pouze frekvenční rozběh. Vzhledem k velkému výkonu soustrojí (okolo 90 MW) není možné použít tyristorový měnič, který by vzhledem ke svému dimenzování a ceně nedovolil realizaci. Poslední a nejperspektivnější variantou je rozběh pomocí jiného synchronního stroje v generátorovém chodu. V případě PVE Orlík by se o tento chod staralo jedno ze zbývajících soustrojí elektrárny. Z toho také vyplývá podmínka, že v čerpadlovém chodu by mohli pracovat pouze 3 ze 4 soustrojí (poslední soustrojí nemá další synchronní generátor, který by dodal napětí a proud s proměnou frekvencí).

5.7. Doba čerpání a roční výroba

Doba čerpání je závislá na čerpacím výkonu, který je teoreticky vypočítán v kapitole 5.4, a na počtu soustrojí schopných motorového chodu. Obě varianty doby čerpání vzhledem k počtu soustrojí a čerpacím příkonu shrnuje následující tabulka. V úvahu se bere pro 1. variantu maximální spád 66,55 metrů, minimální 44 metrů, čerpací výkon 74,94 MW. Pro druhou variantu maximální spád 66,55 metrů, minimální spád 60,65 metrů, čerpací výkon jednoho soustrojí 89,25 MW. Obě varianty počítají s kapacitou VD Kamýk 4,875 mil.m^3. Průměrná hodnota čerpaného objemu se určí jako aritmetický průměr při minimální hladině H_{min} a H_{max}.

	Doba čerpání (h)	
Počet soustrojí (-)	Varianta 1	Varianta 2
1	10,2	9,4
2	5,1	4,7
3	3,4	3,1

Tab. 5.5: Doba čerpání vodní nádrže Kamýk

Z tabulky vidíme, že nejvýhodnější variantou je výměna nejméně 2 soustrojí za přečerpávací v případě obou variant. V případě výměny pouze jednoho soustrojí by

doba čerpání byla příliš dlouhá. S vyšším počtem reverzibilních soustrojí roste také regulační výkon, který může PVE ze sítě odebírat. Rozdíl mezi dobou čerpání první a druhé varianty není nijak významný, čerpací výkon a s ním spojené dimenzování soustrojí se tedy bude odvíjet od návrhu chodu stroje v turbínovém režimu.

Roční výroba elektrárny Orlík za rok 2021 činila 330 GWh elektrické energie.[25] Pokud by čerpací cyklus a turbínový provoz proběhl každý den na 80 % maximální kapacity po dobu 345 dnů v roce (20 dní zahrnuje plánované odstávky a dny, kdy PVE nebude pracovat) činila by výroba čistě z provozu PVE dalších 226,9 GWh, což představuje nárůst o 68,8 %.

[25] Zmodernizované vodní elektrárny jedou na rekordní vlně. *Cez.cz* [online]. Skupina ČEZ, 2022, 22.3. 2022 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/zmodernizovane-vodni-elektrarny-cez-jedou-na-rekordni-vlne.-loni-zvedly-vyrobu-o-17-procent-a-pokryly-spotrebu-vice-nez-350-tisic-domacnosti-156608

6. VYHODNOCENÍ NÁVRHU MODERNIZACE ELEKTRÁREN

6.1. Potenciál vodních děl Vltavské kaskády

Vltavská kaskáda nabízí 3 lokality (Lipno I, Orlík, Slapy), kde by se s menšími či většími obtížemi, dokázala realizovat modernizace akumulačních vodních elektráren na elektrárny přečerpávací. Odhadovaná celková kapacita všech lokalit činí 1681 MWh, což ve srovnání s naší největší PVE Dlouhé straně (udávaná kapacita 3700 MWh)[26] činí pouhých 45,4 % její kapacity. Výhodou této modernizace je získání dalších kapacit pro ukládání energie nejen z OZE ale i z dalších zdrojů na dobu, kdy bude potřeba. Z ekonomického hlediska se zvýší provozní doba elektrárny a nešpičková (levnější) elektrická energie bude moci být uloženo a využita v době špičkového zatížení.

6.2. Investice do vodního díla Orlík

6.2.1. Lodní výtah

V roce 2019 došlo k modernizaci lodní výtahu na pravé straně přehrady. Vzhledem k velkému kolísání hladiny v letní sezóně nebylo možné zajistit provozuschopnost výtahu po celou sezónu. Modernizace spočívala v prodloužení kolejnice, která vede na návodní straně hráze o 10 metrů. Toto prodloužení dovoluje provoz výtahu i při hladině o 3,5 metru nižší než před modernizací. Tato modernizace dovolí, dle odhadu, odbavení více než 2000 lodí za sezónu (doposud se tento počet pohyboval okolo 1200)[27].

[26] Dlouhé stráně stabilizují soustavu. *Https://energie21.cz/* [online]. Praha 2: Profipress, 2022, 4.9 2021 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: https://energie21.cz/dlouhe-strane-udrzuji-stabilitu-site/

[27] FRYŠ, Josef. *Spoutaná řeka: zrození orlické přehrady*. Praha: Euromedia Group, 2020. ISBN 978-80-242-6916-0.

Obr. 6.1: Modernizovaný lodní výtah na návodní straně hráze VD Orlík[28]

6.2.2. Nový bezpečnostní přeliv

Po ničivých povodních v roce 2002, které způsobily zatopení elektrárny, se ukázalo, že maximální průtok hrází 3153 $m^3 \cdot s^{-1}$ je nedostatečný. Proto se v roce 2005 začal projektovat doplňkový bezpečnostní přeliv. Projekt počítá s novým přelivem na pravém břehu řeky, napravo od lodního výtahu, hrazený třemi segmenty (šířka 13 metrů, výška 7,5 metrů) a kapacitou 5300 $m^3 \cdot s^{-1}$.[29] Dokončení nového přelivu se plánuje na rok 2026.[30]

[28] Modernizace výtahu k přepravě sportovních a turistických lodí na Orlíku. [online]. Praha: TZB-info, 2022 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://vytahy.tzb-info.cz/20833-modernizace-vytahu-k-preprave-sportovnich-a-turistickych-lodi-na-orliku

[29] Fryš, Josef, Spoutaná řeka – Zrození Orlické přehrady, Praha: Euromedia Group a. s., 2020, ISBN 978-80-242-6916-0

[30] Harmonogram prací. *Zabezpečení vodního díla Orlík před účinky velkých vod* [online]. Praha: Metrostav, 2021 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: https://www.orlikppo.cz/harmonogram/

6.3. Přečerpávací vodní elektrárna Orlík

Téměř polovina (48,9 %) teoretické kapacity akumulačních vodních elektráren jako přečerpávacích je dostupná mezi VD Orlík a Kamýk. Realizace PVE Orlík je z technického hlediska proveditelná, nevyžaduje velké stavební úpravy a její realizace ani provoz se nijak nebudou lišit od stávajícího provozu elektrárny. Z návrhu technického řešení vyplynuly parametry, které jsou shrnuté v tabulce níže.

Strojové uspořádání (-)	Dvoustrojové
Typ turbíny (-)	Francisova reverzní
Počet strojů (-)	2
Otáčky (ot·min^{-1})	187,5
Turbínový výkon P_e (MW)	88
Čerpadlový výkon $P_{čer}$ (MW)	74,94
Maximální spád H_{max} (m)	70,5
Minimální spád H_{min} (m)	60,65
Maximální hltnost Q (m^3·s^{-1})	150
Kapacita C (MWh)	822
Odhad roční výroby (GWh)	226,9

Tab. 6.1: Shrnutí parametrů modernizované elektrárny Orlík

Obr. 6.2: Současný pohled na VD Orlík[31]

[31] Modernizace výtahu k přepravě sportovních a turistických lodí na Orlíku: Stavebnictví 05/2022. In: *Časopis Stavebnictví* [online]. Praha: INFORMAČNÍ CENTRUM ČKAIT, 2022 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://www.casopisstavebnictvi.cz/archiv-pdf-05-2022.html

7.ZÁVĚR

Tato práce se zabývá největšími akumulačními vodními elektrárnami Lipno I, Orlík a Slapy. Dále se zabývala jejich případnou modernizací na PVE za účelem zvýšení roční výroby. Po vyhodnocení zmíněných variant jsem se věnuje popisu strojového uspořádání, výběru turbíny a dalším problematikám návrhu. Samostatnou problematikou návrhu je rozběh synchronního stroje do čerpadlového chodu. V předposlední kapitole je popsán teoretický návrh vlastního soustrojí PVE. Poslední kapitola je věnována potenciálu akumulačních nádrží a samotné vyhodnocení návrhu PVE Orlík.

Vlastní přínos této práce spočívá v prověření možnosti efektivnějšího využití stávajících akumulačních elektráren a jejich úpravu na PVE. Druhá část se zabývá reálným návrhem modernizace akumulační vodní elektrárny Orlík na přečerpávací.

Práce splnila body zadání, kterými jsou Charakteristika vybraných vodních elektráren, Prověření možnosti efektivnějšího využití stávajících elektráren, Návrh technického řešení modernizace a Vyhodnocení návrhu modernizace elektráren. Přínos práce pro autora spočívá v rozšíření obzorů v problematice návrhu velkých vodních elektráren a používaných technických řešení.

Na základě výsledků této práce doporučuji modernizaci akumulační vodní elektrárny Orlík na přečerpávací. Dle výpočtů je nejvýhodnější vyměnit právě dvě soustrojí za soustrojí přečerpávací. Varianta s jedním soustrojím vykazovala problém s dlouhou dobou čerpání, varianta se třemi soustrojími nepřináší citelné zkrácení doby čerpání oproti variantě se dvěma soustrojími v porovnání s vyššími pořizovacími náklady. V případě výkonového dimenzování se jako výhodnější nabízí Varianta 1, která počítá s dimenzováním na základě výkonu v turbínovém chodu.

V případě vodního díla Lipno I naráží modernizace na problémy s přívodem vody zpátky do elektrárny, které by si vyžádalo úpravu odpadního tunelu, samotná nádrž VD Lipno II navíc nenabízí dostatečně velký zásobní prostor. U lokality VD Slapy naráží modernizace na problémy s vyrovnávací nádrží, která není dostatečně velká, navíc se částečně podílí na vyrovnání odtoku z Vltavské kaskády, důsledkem čehož by se nemohl využívat její celý zásobní objem. Navíc samotná lokalita vykazuje malou potenciální

kapacitu (v porovnání s lokalitou Orlík – Kamýk) v případě přestavby na přečerpávací vodní elektrárnu. Přínos práce tkví pro jeho vlastníka (skupina ČEZ, a.s.), který po případné modernizaci dosáhne zvýšení provozních hodin elektrárny a zvýšení zisku z dané lokality.

V práci je nadále možné pokračovat, samotný návrh soustrojí vyžaduje další práci, hlavně na vyvedení výkonu do sítě, jeho transformace na vyšší napětí, ochrany, dále pak dimenzování samotných elektrických a mechanických částí. Samostatnou kapitolou je ekonomické zhodnocení návrhu a návratnost případné investice.

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Podélný profil Vltavské kaskády 4
Obr. 3.1: Projekt PVE Lipno I – Aschach 9
Obr. 4.1:Třífázová tlumivka (reaktor) v PVE Štěchovice II 20
Obr. 4.2: Schéma ventilového pohonu 27
Obr. 5.1: Schéma současného soustrojí na VD Orlík 30
Obr. 6.1: Modernizovaný lodní výtah na návodní straně hráze VD Orlík 40
Obr. 6.2: Současný pohled na VD Orlík 41

Seznam grafů

Graf 4.1: Graf optimálních spádů a průtoků pro jedlotlivé typy turbín 15
Graf 4.2: Graf mechanické charakteristiky M = f(Ω) asynchronního motoru pro různé hodnoty rotorového odporu 21
Graf 4.3: Graf oteplení motoru během krátkodobého chodu 24

Seznam tabulek

Tab. 3.1: Shrnutí retenčních hladin a hladin stálého nadržení 10
Tab. 3.2: Shrnutí plochy nádrží a jejich zásobního objemu 11
Tab. 3.3: Shrnutí minimálního odtoku a potřebného minimálního objemu 12
Tab. 3.4: Shrnutí potenciálních kapacit PVE 12
Tab. 4.1: Specifické otáčky turbín 17
Tab. 4.2: Synchronní otáčky v závislosti na počtu pólpárů 18
Tab. 4.3: Mezní spády a otáčky pro omezení vlivu kavitace 19
Tab. 5.1: Výchozí parametry VD Orlík 32
Tab. 5.2: Shrnutí předběžných otáček pro Kaplanovu a Francisovu turbínu 33
Tab. 5.3: Přehled účinností turbínového a čerpadlového chodu 34
Tab. 5.4: Doba čerpání vodní nádrže Kamýk 37
Tab. 6.1: Shrnutí parametrů modernizované elektrárny Orlík 41

Seznam použitých technických norem

ČSN EN 60034-1 – Točivé elektrické stroje – Část 1: Jmenovité údaje a vlastnosti

8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] AUGUSTA, Pavel a spol. *Velká kniha o energii*. Praha: L.A. Consulting Agency, 2001. ISBN 80-238-6578-1.

[2] BEDNÁŘ, Josef. *Malé vodní elektrárny 2,* Praha 1989

[3] BROŽA, Vojtěch. *Přehrady Čech, Moravy a Slezska*. Liberec: Knihy 555, 2005. ISBN 80-86660-11-7.

[4] CINK, Miroslav. *Projekt Přečerpávací Vodní Elektrárna Lipno – Aschach* [online]. Praha: Lipno – Aschach, 2012 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://lipno-aschach.webnode.cz/

[5] ČVUT, Fakulta stavební, Katedra hydrotechniky. *Prověření strategického řízení Vltavské kaskády – parametry manipulačního řádu*. Povodí Vltavy, státní podnik [online]. Praha, 2014 [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: https://www.pvl.cz/files/download/vodohospodarske-informace/studie-CVUT/VltavKas_odb_final.pdf?fbclid=IwAR3z25PR7ijFPnKaUggWEjRxWMYDXkSzZuX4VTdwq1uOP6bEehl12jQp44I

[6] ČEZ, a.s. *Virtuální prohlídky – VD Orlík* [online]. Praha: Skupina ČEZ, 2022 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: http://virtualniprohlidky.cez.cz/cez-orlik/

[7] ČEZ, a.s. *Vodní elektrárny* [online]. Simopt, 2020 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/vodni-elektrarny

[8] ČSN EN 60034-1. *Točivé elektrické stroje – Část 1: Jmenovité údaje a vlastnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

[9] DUŠEK, Petr. Modernizace výtahu k přepravě sportovních a turistických lodí na Orlíku. [online]. Praha: TZB-info, 2022 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://vytahy.tzb-info.cz/20833-modernizace-vytahu-k-preprave-sportovnich-a-turistickych-lodi-na-orliku

[10] FRYŠ, Josef. *Spoutaná řeka: zrození orlické přehrady*. Praha: Euromedia Group, 2020. ISBN 978-80-242-6916-0.

[11] HOLATA, Miroslav a Pavel GABRIEL. *Malé vodní elektrárny: projektování a provoz*. Praha: Academia, 2002. ISBN 978-80-200-0828-2.

[12] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04938-9.

[13] KOBRLE, Pavel a Jiří PAVELKA. *Elektrické pohony a jejich řízení*. 3. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06007-0.

[14] Metrostav a. s., *Zabezpečení vodního díla Orlík před účinky velkých vod* [online]. Praha: Metrostav, 2021 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://www.orlikppo.cz/

[15] Metrostav a.s. *Modernizace výtahu k přepravě sportovních a turistických lodí na Orlíku*: Stavebnictví 05/2022. *Časopis Stavebnictví* [online]. Praha: INFORMAČNÍ CENTRUM ČKAIT, 2022 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://www.casopisstavebnictvi.cz/files/thumbs/2022_05/obr.-1-ts-orlik-04-22-3-preliv.3074311390.jpg

[16] Povodí Vltavy, státní podnik. [online]. Praha: 2022 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://www.pvl.cz

[17] SCHWEITZER, Karel. *Přečerpávací elektrárny: situace se změnila, v Česku je mnoho příležitostí.* Hybrid.cz [online]. Chamanne, 2021 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://www.hybrid.cz/precerpavaci-elektrarny-situace-se-zmenila-v-cesku-je-mnoho-prilezitost/

[18] TRNAVSKÝ, Jiří. *Dlouhé stráně stabilizují soustavu.* [online]. Praha 2: Profipress, 2022, 4.9 2021 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: https://energie21.cz/dlouhe-strane-udrzuji-stabilitu-site/

[19] VOBOŘIL, David. *Přečerpávací vodní elektrárny v České republice*. oenergetice.cz, [online]. Třebíč: 2017 [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/elektrarny-cr/precerpavaci-vodni-elektrarny-v-ceske-republice