

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

Význam přečerpávacích vodních elektráren pro energetiku ČR

Luděk Zborník

Vedoucí: Ing. Stanislav Bouček

Obor: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní program: Aplikovaná elektrotechnika

Leden 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zborník** Jméno: **Luděk** Osobní číslo: **456147**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Význam přečerpávacích elektráren pro energetiku ČR

Název bakalářské práce anglicky:

The importance of pumped-storage hydroelectricity for power generation Czech Republic

Pokyny pro vypracování:

1. Historie přečerpávací vodní elektrárny
2. Princip přečerpávací vodní elektrárny
3. Energetická bilance přečerpávací vodní elektrárny
4. Využití přečerpávací vodní elektrárny při udržení stability elektrické sítě

Seznam doporučené literatury:

- 1) Prof. Ing. J. Hušek.: Přečerpávací vodní elektrárny SNTL a SVTL, Praha 1963, DT 621.311.21
- 2) Ing. Miroslav Holata; Malé vodní elektrárny, Academia 2002, ISBN 80-200-0828-4
- 3) Prof. Ing. Dr. Š. Matěna, DrSc a kol.: Výroba a rozvod elektrické energie I, SNTL, ALFA n.p. Bratislava, Praha 1971, DT 621.311.21/22

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Stanislav Bouček, katedra elektroenergetiky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **20.12.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **08.01.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Stanislav Bouček
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
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

Poděkování

Děkuji Ing. Stanislavu Boučkovi za cenné rady a vedení mé bakalářské práce. Dále chci poděkovat Ing. Radku Ovesnému, Petru Spurnému, DiS a Ing. Petr Gric, Ph.D., MBA za poskytnuté rady a informace.

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, 1. ledna 2019

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je přiblížit využití přečerpávacích vodních elektráren pro elektrickou soustavu České republiky. Nejprve jsem se zabýval jejich vývojem, jak světovým, tak českým a událostmi, které tento vývoj ovlivnily. Důležitý pro rozbor této problematiky je také princip těchto elektráren, kterým jsem se zabýval v kapitole č. 3. Podrobně jsem rozebral jednotlivé části elektrárny a popsal princip jejich činnosti. Parametrem pro posuzování elektráren je jejich energetická bilance. Tento parametr jsem graficky zpracoval pro přečerpávací vodní elektrárny za posledních 35 let. Blíže jsem se zabýval posledními 8 lety. Vliv přečerpávacích vodních elektráren na stabilitu elektrické sítě popisuje poslední kapitola pomocí skutečných situací v elektrické soustavě.

Klíčová slova: přečerpávací vodní elektrárna, elektrická soustava, vodní akumulace, elektrická energie

Vedoucí: Ing. Stanislav Bouček

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to outline the use of pumping hydroelectric power plants for the electrical system of the Czech Republic. I first dealt with their world and Czech development and with the events that have influenced it. What is important for the analysis of this issue is the principle of these power plants, which I dealt with in Chapter 3. I have analysed in detail the individual parts of a power plant and described the principle of its operation. The parameter for assessing power plants is their energy balance. This parameter has been graphically processed for pumping hydroelectric power plants in the last 35 years. I have dealt more closely with the last 8 years. The effect of pumping hydroelectric power plants on the stability of the power grid is described in the last chapter using real situations in the electrical system.

Keywords: pumped-storage hydropower, electrical system, water accumulation, electrical energy

Title translation: — The importance of pumped-storage hydroelectricity for power generation of the Czech Republic

Obsah

1 Úvod	1	3.3.3 Budící obvody hydroalternátorů	21
2 Vývoj přečerpávacích vodních elektráren	3	3.4 Transformátory	22
2.1 Přečerpávací vodní elektrárna ...	3	4 Energetická bilance přečerpávací vodní elektrárny	25
2.2 Vývoj PVE ve světě	4	4.1 Energetická bilance PVE v ČR .	28
2.3 Vývoj PVE v České republice ...	6	4.1.1 Rok 2018	31
2.3.1 PVE Černé jezero	6	4.1.2 Rok 2014	31
2.3.2 PVE Štěchovice II	7	5 Využití přečerpávací vodní elektrárny při udržení stability elektrické sítě	33
2.3.3 PVE Dalešice	8	5.1 Řízení stability elektrické soustavy	33
2.3.4 PVE Dlouhé Stráně	9	5.1.1 Systémové služby	34
3 Princip přečerpávací vodní elektrárny	11	5.1.2 Podpůrné služby	34
3.1 Vodní nádrže PVE	13	5.2 Využití přečerpávacích vodních elektráren v denním zatížení	37
3.2 Tlakový přivaděč	14	5.3 Využití přečerpávacích vodních elektráren při nestandardních situacích v ES	39
3.3 Strojní uspořádání	16	5.3.1 Výpadek bloku ETE a TE Chvaletice	39
3.3.1 Vodní turbína	17	5.3.2 Vichřice Herwart	40
3.3.2 Synchronní stroje	19		

6 Závěr	43
A Seznam zkratk	45
B Literatura	47
C Technické parametry PVE na našem území	51
D Energetická bilance	52

Obrázky

2.1 Vývoj instalovaného výkonu PVE ve světě.[11]	5	4.2 Sloupcový graf energetická bilance PVE od roku 1983 do roku 2018.[34]	29
2.2 Strojní uspořádání PVE Černé jezero.[12].	6	4.3 Sloupcový graf energetické bilance PVE od roku 2010 do roku 2018.[35]	30
2.3 Namodelovaný vzhled PVE Štěchovice I a II[16].	7	4.4 Sloupcový graf energetické bilance PVE za rok 2018.[35]	31
2.4 Pohled na PVE Dalešice	8	4.5 Sloupcový graf energetické bilance PVE za rok 2014.[35]	32
2.5 Schéma PVE Dlouhé Stráně. Zdroj: ČEPS	10	5.1 Diagram denní regulace ES [35].	33
3.1 Horní nádrž PVE Dlouhé Stráně [7].	14	5.2 Přehled podílu poskytovatelů PpS v roce 2018 [35].	36
3.2 Kulový uzávěr v PVE Dlouhé Stráně	16	5.3 Diagram denního zatížení[33] . . .	37
3.3 Francisova turbína.[25]	18	5.4 Graf týdenního zatížení ES v prvním lednovém týdnu roku 2018[35]	38
3.4 Kaplanova turbína.[26]	18	5.5 Graf čerpání PpS z 10. a 11. 9. 2015 .[35]	39
3.5 Peltonova turbína.[27]	19	5.6 Graf zatížení ES s výrobou a spotřebou elektrické energie PVE 10. a 11. 9. 2015.[35].	40
3.6 Rotor s vyniklými póly v PVE Dalešice.[29]	21	5.7 Graf čerpání PpS z 29. 10. 2017 .[35].	41
3.7 Blokové transformátory v PVE Dalešice. zdroj: interní archiv ČEPS	24	5.8 Graf zatížení ES s výrobou a spotřebou elektrické energie PVE (10 a 11. 10. 2017).[35]	41
4.1 Teoretická účinnost PVE.	27		

Tabulky

3.1 Přehled parametrů turbín [28] ..	19
4.1 Přehled účinností přečerpávacího procesu [2]	26
C.1 Přehled technických parametrů PVE v ČR	51
D.1 Přehled hodnot energetické bilance od roku 2010 do roku 2018 [35][34]	52

Kapitola 1

Úvod

Elektrizační soustava (ES) České republiky je složená z výroby elektrické energie, přenosu elektrické energie a distribuce elektrické energie. K výrobě elektrické energie slouží elektrárny. Na našem území máme široké zastoupení různých typů elektráren. V současné době se nejčastěji rozdělují podle zdrojů, ze kterých získávají elektrickou energii na ty, jež využívají obnovitelné zdroje energie a na ty, již využívají neobnovitelné zdroje energie. Obnovitelné zdroje energie se přirozeně obnovují. Patří sem např. slunce, vítr, voda a biopaliva. Neobnovitelné zdroje elektrické energie jsou zdroje, u kterých v bližší budoucnosti nedojde k obnově. Ropa, uhlí, uran, plyn, všechny tyto zdroje se získávají těžebním a jejich množství je omezené.

Přenos elektrické energie u nás zajišťuje přenosová soustava (PS). Skládá se ze dvou částí: rozvoden a vedení. Vedení jsou provozována na třech napěťových hladinách: 110 kV, 220 kV, 400 kV. Pro představu: vedení ČR jsou 400 kV vedení o délce 3 510 km, 220 kV o délce 1909 km a 110 kV o délce 84 km. V ČR máme 42 rozvoden s 75 transformátory. Provozovatelem PS je skupina ČEPS, a.s.(PPS). Ta pomocí tzv. systémových služeb(SyS) udržuje parametry vedení v předepsaných mezích. Tyto parametry jsou měřítkem kvality předávané energie. SyS zajišťuje pomocí tzv. podpůrných služeb(PpS). Jelikož PPS nesmí ze zákona vlastnit žádné zdroje elektrické energie, musí si PpS nakoupit od jednotlivých poskytovatelů (výrobců elektrické energie).

Poslední částí je distribuce. Zajišťuje rozvod elektrické energie ke koncovým uživatelům. O distribuci v ČR se starají tři společnosti - ČEZ Distribuce, a.s., E.ON Distribuce, a.s. a PREdistribuce, a.s.

Během posledních deseti let došlo ke změně strategie ohledně složení zdrojů výroby elektrické energie v celém světě. Ať už z důvodů globálního oteplování, vyčerpávání neobnovitelných zdrojů elektrické energie nebo lidského svědomí, dochází k masivní instalaci OZE. Jelikož vodní potenciál je do velké míry ve vyspělých zemích vyčerpán, instalují se zde fotovoltaické (FTE) a větrné elektrárny (VTE). Tyto elektrárny vyrábějí elektrickou energii pouze za určitých klimatických podmínek, které člověk nemůže ovlivnit. Proto mají FTE a VTE za následek řadu problémů v ES. V první řadě množství vyrobené elektrické energie nemůžeme přesně predikovat. Ze zákona má PPS povinnost tuto "zelenou elektřinu" přijmout. Tím pádem PPS musí vynaložit větší výkon na odstranění odchylky parametrů vedení. Pro odstranění těchto odchylek se využívají PpS. Jedním z poskytovatelů těchto služeb je společnost ČEZ, a.s.. Tyto služby poskytuje mimo jiné svými vodními elektrárnami, které jsou díky své schopnosti rychlého najetí na plný výkon i jeho snížení, ideálním zdrojem pro vykrývání odchylek. V mé bakalářské práci se budu zabývat jedním z typů vodních elektráren - vodními elektrárnami přečerpávacími (PVE). Cílem bakalářské práce je přiblížit vývoj PVE ve světě a na našem území. Vysvětlit princip jejich činnosti. Blíže se seznámit s využitím PVE pro stabilitu ES.

Kapitola 2

Vývoj přečerpávacích vodních elektráren

2.1 Přečerpávací vodní elektrárna

V roce 1800 došlo k objevení prvního použitelného zdroje stálého elektrického proudu - galvanického článku.[8] Nikdo v té době určitě netušil, že elektrická energie se rozšíří až do dnešní podoby. Život bez ní si nedokážeme představit. Stala se součástí našich životů.

Umíme využívat její transformaci na jiné formy energií, dokážeme ji přepravovat na velké vzdálenosti a vyrábět ve velkém množství. Ale její hlavní nevýhodou je skutečnost, že vyrobená elektrická energie se musí v každém okamžiku rovnat energii spotřebované, nelze ji ve velké míře akumulovat. PVE je typ vodní elektrárny, která dokáže elektrickou energii krátkodobě i dlouhodobě uložit v podobě naakumulovaného hydroenergetického potenciálu vody. V současné době neumíme žádným jiným způsobem uložit takové množství elektrické energie. Jen pro představu, největší PVE elektrárrou na světě je Bath County Pumped Storage Station o instalovaném výkonu 3030 MW a celkové kapacitě 24 000 MWh.[9] Této kapacity nejsme schopni dosáhnout pomocí žádného jiného typu akumulátoru. Například na konci minulého roku bylo uvedeno do provozu největší lithium-iontové úložiště na světě s kapacitou 129 MWh.[10]

Jelikož se jedná o zdroj elektrické energie, který k výrobě 1 MW potřebuje cirká 1,2 MW, můžeme si položit prostou otázku: Jak provozovatelé prosperují, když větší množství elektrické energie spotřebují, než vyrobí?

Odpověď je vcelku jednoduchá. V průběhu dne dochází díky změnám v poptávce po elektrické energii k dvěma možným scénářům. V ES dochází k přebytku, nebo nedostatku elektrické energie. V době přebytku převyšuje nabídka elektrické energie poptávku a cena klesá (nejčastěji v noci). V té chvíli je pro PVE výhodné tuto energii naakumulovat. Protože v době, kdy poptávka po elektrické energii převyší nabídku, cena roste. PVE začne za tuto cenu elektrickou energii vyrábět a rozdíl ceny v době přebytku a nedostatku je zisk. I přes průměrnou účinnost procesu 70 - 80 % jsou PVE výhodné.

2.2 Vývoj PVE ve světě

První demonstrace principu ukládání vodní energie byl v roce 1882 ve švýcarském Curychu. Strojní zařízení se skládalo ještě z pístových čerpadel poháněných vodními turbínami a sloužilo k akumulaci tlakové vody pro hydraulické pohony dílenského zařízení. [1]Vůbec první komerční zařízení tohoto typu využívané pro výrobu elektrické energie, bylo zprovozněno roku 1909 nedaleko Švýcarského Schaffhausenu. Elektrárna disponovala výkonem 1,5 MW. Měla oddělenou čerpací a generátorovou část, tzv. čtyřstrojové uspořádání.[6]

Další velký milník přinesl rok 1933, když v Německém Baldeneyi byla použita první reverzibilní turbína. Pomocí 1,330 kW motoru čerpala vodu do 8,5m výšky.[4] Prvního osazení v elektrárně se reverzibilní turbína dočkala v roce 1937 v Brazílské Pedreire o instalovaném výkonu 15 MW.[11]

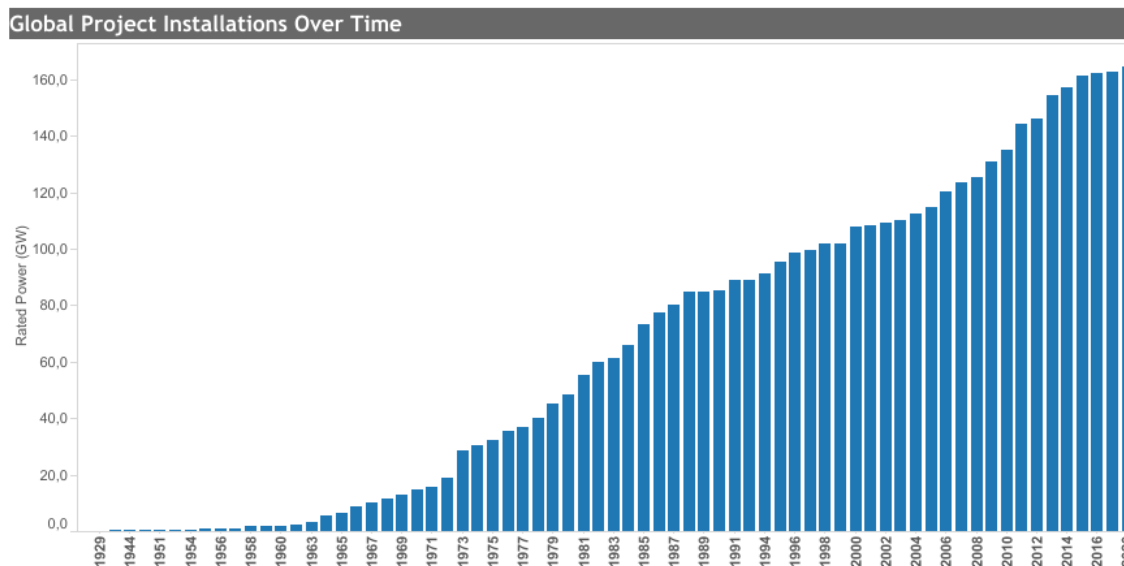
Do sedmdesátých let minulého století se využívalo strojní uspořádání odděleného motoru pro čerpadlový provoz a generátor pro výrobní provoz. Toto strojní uspořádání se používalo kvůli kompromisům v účinnosti, spouštěcím mechanismům a době přechodu z generátorového stavu do čerpadlového. Až v letech 1960 - 70 došlo k pokroku technologie a od té doby byla instalována převážně strojní uspořádání s Francisovou reverzibilní turbínou a synchronní motor zastával při výrobě funkci generátoru, při čerpání funkci motoru.

V rozmezí let 1970 - 1990 se začal masivně zvyšovat počet instalovaných jaderných elektráren (JE), jejich využití pro řízení kvality sítě JE je technologicky i ekonomicky neefektivní záležitost. Proto je důležitá spolupráce PVE a JE. Během přebytku elektrické energie PVE čerpají vodu ze spodní nádrže do horní a spotřebují přebytečnou elektrickou energii, čímž umožňují minimální potřebu regulace výroby JE. Dále mohou sloužit k napájení vlastní

spotřeby JE při blackoutu, jejich nádrže mohou sloužit jako zásobárna vody pro JE, jako je např. PVE Dalešice pro EDUK.

Po roce 2000 dochází ke změně směru výroby elektrické energie z důvodů problémů globálního oteplování a znečištěného ovzduší. Aby došlo k omezení emisí oxidu uhličitého, jednoho z důvodů globálního oteplování, se představitelé Evropské unie dohodli na zvýšení produkce elektrické energie z OZE. Každý členský stát má do roku 2020 vyrábět 20 % elektrické energie z OZE. Tím se dostáváme k dalšímu období rozšiřování PVE. Jelikož OZE vyrábí elektrickou energii za určitých klimatických podmínek, nelze ji regulovat. Spolupráce s PVE se jeví v současné době jako nejlepší možnost.

Z grafu níže můžeme vyčíst, že nárůst instalovaného výkonu PVE v 70. letech až 90. letech vzrostl z 20 GW na 83 GW. Další nárůst nastal v roce 2000 a pokračuje do současnosti. Jejich instalovaný výkon vzrostl ze 100 GW na 165 GW.

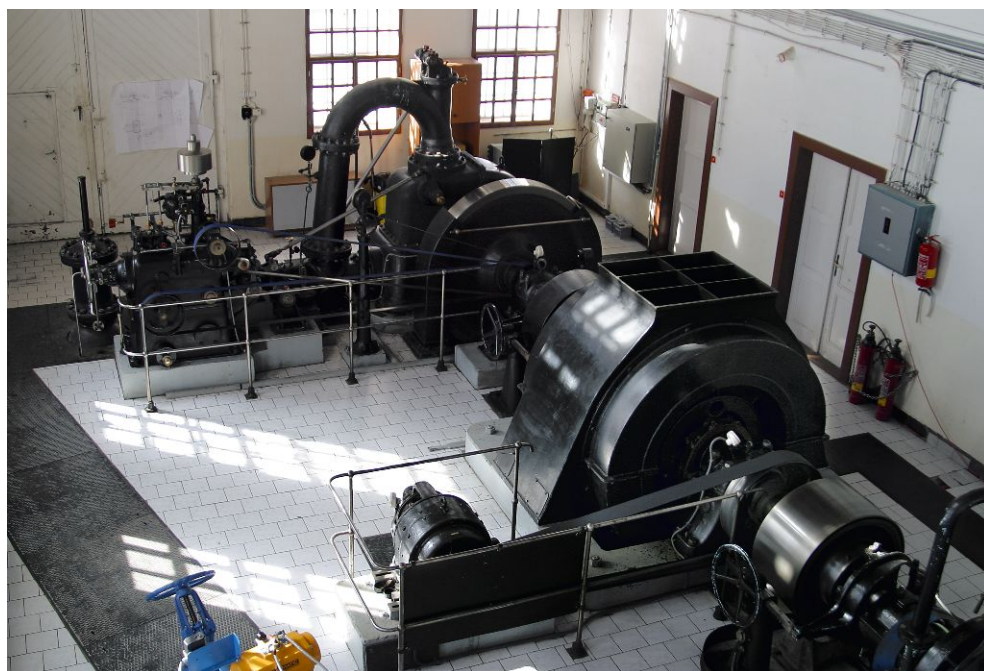


Obrázek 2.1: Vývoj instalovaného výkonu PVE ve světě.[11]

2.3 Vývoj PVE v České republice

2.3.1 PVE Černé jezero

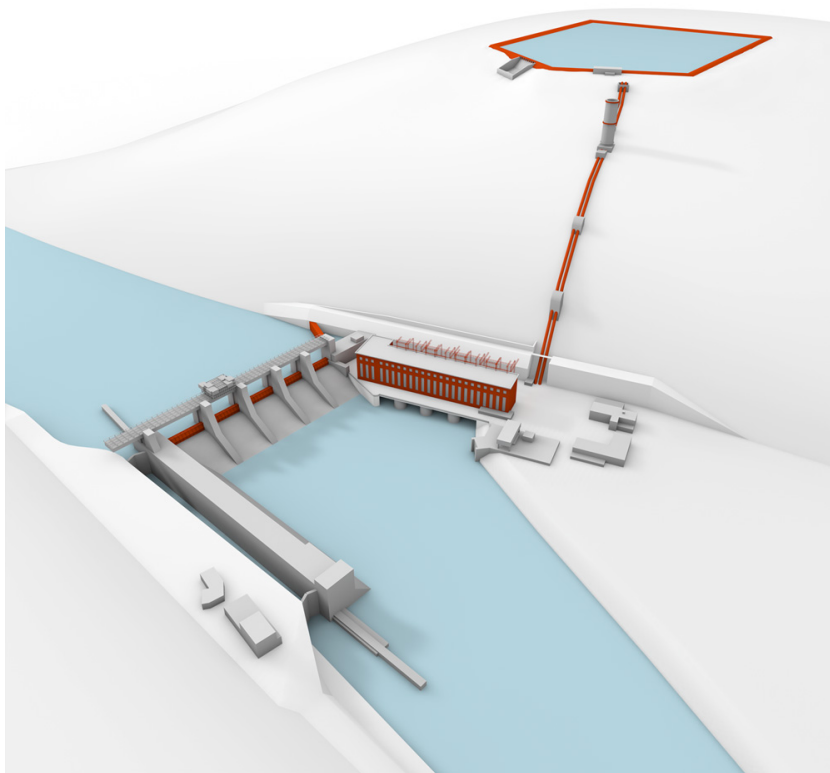
Československo nezůstávalo ve výstavbách PVE pozadu. V roce 1928 bylo rozhodnuto o výstavbě PVE Černé jezero na Šumavě. Hlavní propagátor PVE byl Ing. Karel Kostka. Vypracování projektové dokumentace měl na starosti Ing. František Alexej Pech a hlavním investorem byly Zápa- dočeské elektrárny. Stavba byla dokončena a uvedena do provozu v roce 1930.[12] Pro účely elektrárny bylo využito největší jezero v ČR - Černé jezero, které tvořilo horní nádrž. Spodní nádrž byla vytvořena na řece Úhlavě pomocí betonové hráze. Horní nádrž a elektrárna byly spojeny přívodním potrubím v délce 1266 m a tlačným potrubím v celkové délce 1007 m. Elek- trárna byla osazena Peltonovou turbínou o instalovaném výkonu 1,5 MW a čerpadlem s hlností až 400 l/s vody, které bylo ve své době nejvýkonnější svého druhu v Československé republice.[12] Funkci PVE zastávala až do roku 1960, kdy bylo rozhodnuto o ukončení čerpání z důvodů znečištění Černého jezera vodou z Úhlavy.[13] V současné době je využívána spodní nádrž pro MVE Černé jezero.



Obrázek 2.2: Strojní uspořádání PVE Černé jezero.[12]

■ 2.3.2 PVE Štěchovice II

Druhou elektrárnou tohoto typu byla vybudovaná PVE Štěchovice II. S VE Štěchovice je součástí vodního díla Štěchovice. Nachází se na řece Vltavě 30 km jižně od Prahy. Toto vodní dílo bylo postaveno v letech 1938 - 47. PVE byla ve své době plně automatizována. Odpadní teplo z chlazení sloužilo k vytápění nedalekého plaveckého bazénu. Do roku 1992 disponovala dvěma Francisovými turbínami o výkonu 21 MW s účinností 50%. Ve zmíněném roce došlo k velké rekonstrukci, která trvala do roku 1996. Dvě turbíny byly vyměněny za jednu turbínu typu Francis Reversní (FR 180). Výkon elektrárny se zvýšil na 48 MW a účinnost vzrostla na 75 %.[15] Při rekonstrukci došlo k posunutí celé strojovny o 29 m pod úroveň spodní vody. Došlo k vybudování vyrovnávací komory, sloužící k tlumení hydraulických rázů při změnách vodního sloupce. Horní nádrž PVE byla vytvořena na vrchu Homole pomocí betonové nádrže o rozloze 4,9 HA a o objemu 500 000 m³. Dolní nádrž je tvořena pomocí betonové přehrady s žulovým obkladem, je 22,5 m vysoká a 120 m dlouhá. Horní nádrž je spojena s turbínou pomocí ocelových tlakových potrubí o délce 590 m a spádu 220 m. [14]



Obrázek 2.3: Namodelovaný vzhled PVE Štěchovice I a II[16].

2.3.3 PVE Dalešice

Jak již bylo výše zmíněno, v osmdesátých letech došlo k rozvoji jaderné energetiky. V ČSSR se začátek jaderných elektráren datuje k roku 1970, kdy ČSSR podepsalo dohodu o stavbě dvou jaderných elektráren JE Dukovany (EDUK) a JE Jaslovské Bohunice.[17] Právě kvůli výstavbě EDUK bylo rozhodnuto o výstavbě vodního díla Dalešice, které slouží jako zásobárna technologické vody pro EDUK. Zajišťuje dostanek energie pro vlastní spotřebu EDUK, slouží jako zásobárna vody pro zemědělství (závlaha) a vyrovnává maximální a minimální průtoky. Vodní dílo Dalešice se nachází na řece Jihlavě, jihovýchodně od Třebíče, bylo postaveno v letech 1970 - 78. Skládá se z přehrady Dalešice, PVE Dalešice, vyrovnávací nádrže Mohelno a průtočné vodní elektrárny Mohelno. Přehrada je tvořená největší funkční sypanou hrází v Evropě. Od základové spáry má výšku 100 m, délka hráze přes údolí přesahuje 300 m a ve svých základech dosahuje šířka hráze rovněž 300 m. Hráz obsahuje 2 $mil.m^3$ sypané směsi a zadržuje 127 $mil.m^3$ vody.[18]. Během dne dochází ke kolísání vodní hladiny cca o 2 m. Během roku může dojít až k 19 m kolísání vodní hladiny. Vyrovnávací nádrž Mohelno tvoří spodní nádrž PVE. Je vytvořena pomocí betonové gravitační hráze o výšce 50 m, délce 185 m a zadržuje 17 $mil.m^3$ vody. Během dne dochází ke kolísání vodní hladiny až o 12,5 m [19]. Na turbíny je voda přivedena čtyřmi ocelovými potrubími. PVE Dalešice je osazena čtyřmi soustrojími s reverzními Francisovými turbínami pro spád 90 m. Výrobu a pohon v čerpadlovém stavu zajišťuje synchronní generátor s napětím 13,8 kV.

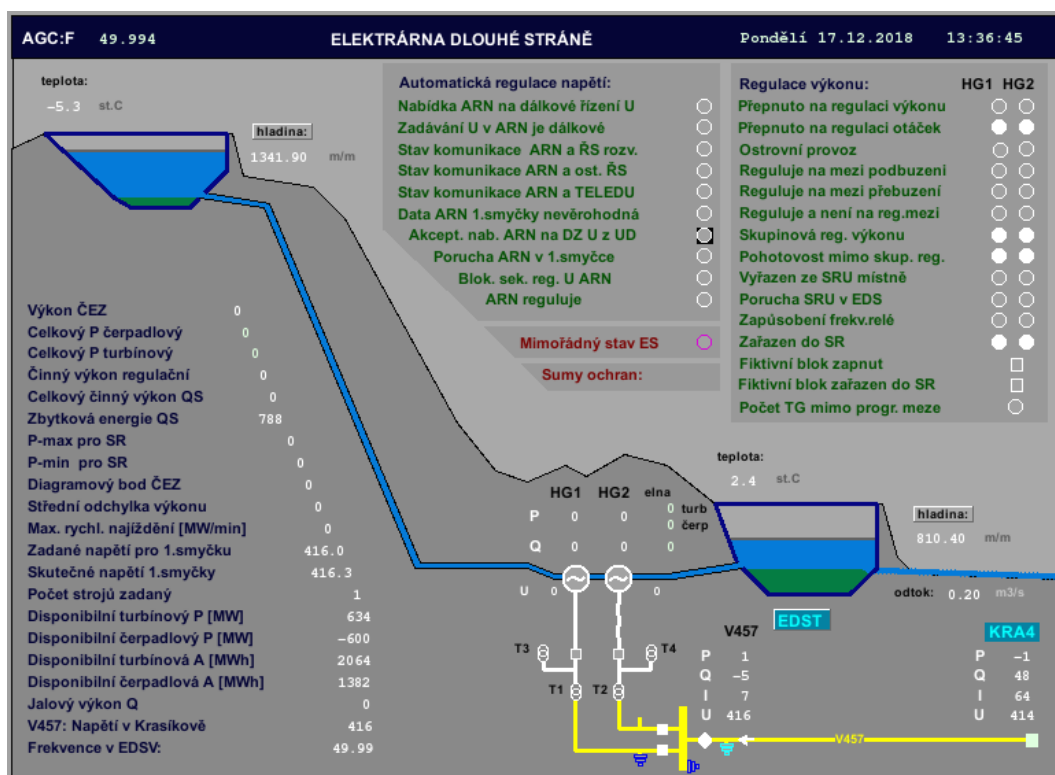


Obrázek 2.4: Pohled na PVE Dalešice

■ 2.3.4 PVE Dlouhé Stráně

Poslední PVE postavená na našem území je PVE Dlouhé Stráně. Nachází se u obce Loučné nad Desnou v okrese Šumperk v CHKO Jeseníky. Výstavba elektrárny započala v květnu 1978, počátkem osmdesátých let došlo k pozastavení stavby z důvodů nedostatku peněz a změn technologií. Došlo také ke změně koncepce projektu. Původně měla být PVE osazena čtyřmi turbínovými soustrojími o výkonu 150 MW, nakonec však vznikl projekt s dvěma turbínovými soustrojími o výkonu 325 MW. Stavba byla velice komplikovaná, jelikož projektanti celou elektrárnu navrhli jako podzemní dílo z důvodů umístění PVE do CHKO Jeseníky. V roce 1994 byla zprovozněna první turbína. Při zkouškách však došlo k havárii a spuštění elektrárny se zbrzdilo o další dva roky. [20] K zahájení provozu došlo až po 18 letech od začátku výstavby. Horní nádrž je umístěná v nadmořské výšce 1350 m.n.m na vrcholu hory Dlouhé Stráně, jedná se o umělou nádrž bez přírodního přítoku s celkovým objemem $2,72 \text{ mil.m}^3$. Při plném objemu může dodávat maximální energii nepřetržitě 6 hodin. Horní nádrž je spojena s turbínami dvěma pancéřovými přivaděči o průměru 3,6 m, tloušťce od 12 mm do 54 mm v závislosti na poloze a délce 1547 a 1499 m. Strojní zařízení elektrárny je umístěno 250 m pod zemí v kaverně o rozměrech 87,5 x 25,5 x 50 m. Obsahuje dvě reverzní Francisovy turbíny o výkonu 325 MW v generátorovém režimu a 312 MW v čerpadlovém režimu. Dále obsahuje dva motorgenerátory a dva rozběhové asynchronní motory (tzv. pony motory), které slouží k roztočení soustrojí na provozní otáčky, poté dochází k přifázování motorgenerátoru. Souběžně s kavernou turbín se v podzemí nachází komora transformátorů o rozměrech 115 x 16 x 21,7 m. V této komoře jsou dva blokové trojfázové transformátory a další zařízení. Voda od turbín je odvedena pomocí odpadních tunelů o průměru 5,2 m a délce 354 a 390 m až k dolní nádrži, která je vytvořená pomocí sypané hráze na řece Divoká Desná. Dolní nádrž se nachází v nadmořské výšce 820 m.n.m. Celkový objem nádrže je $3,4 \text{ mil.m}^3$, zásobní (provozní) objem činí $2,58 \text{ mil.m}^3$. [23]

2. Vývoj přečerpávacích vodních elektráren



Obrázek 2.5: Schéma PVE Dlouhá Stráně. Zdroj: ČEPS

Kapitola 3

Princip přečerpávací vodní elektrárny

Složení PVE můžeme rozdělit do čtyř částí: horní nádrž, přivaděč, elektrárna a dolní nádrž. Horní nádrž se nachází ve větší nadmořské výšce než dolní. Rozdíl nadmořských výšek vodních hladin v těchto nádržích označujeme jako spád. Spád je důležitým parametrem pro hydroenergetický potenciál. Horní nádrž je s turbínovou částí elektrárny spojena ocelovými přivaděči, které jsou v případech provedení dlouhých vzdáleností s malým sklonem, po případně s velkým sklonem doplněným o vyrovnávací komoru. Vyrovnávací komora má za úkol tlumit nežádoucí rychlé tlakové změny mezi vodou přitékající přivaděčem a vodou odebíranou turbínou a přispívá ke zvýšení stability regulace turbíny. V elektrárně jsou uloženy turbosoustrojí a všechna elektrická zařízení využívaná pro provoz. Spojení turbínové části elektrárny s dolní nádrží zajišťuje odpadní potrubí, někdy označováno také jako sací.

PVE pracuje ve třech režimech čerpadlovém, turbínovém a kompenzačním. Při turbínovém režimu dochází k vypouštění vody v horní nádrži pomocí vtokových objektů do tlakového potrubí. Voda proudí potrubím až k turbíně, kde přemění svou potenciální energii na rotační pohyb turbíny, která je na společné hřídeli s rotorem alternátoru. Rotor se začne otáčet. Při nabuzeném vinutí rotoru se v cívkách statorového vinutí začne indukovat třífázové napětí. Po dosažení synchronních otáček a splnění předpokladů pro synchronizaci je hydroalternátor připojen k síti a postupně zvyšuje elektrický výkon do ES.

V čerpadlovém režimu dochází ke spotřebě elektrické energie potřebné na čerpání vody z dolní nádrže do horní. Při čerpání nejdříve dochází k zavzdušnění oběžného kola. Poté dochází k roztočení čerpadla pomocí

rozběhového motoru nebo asynchronním rozběhem synchronního hydroalternátoru. V současné době je většina PVE osazena reverzní Francisovou turbínou, která zastává v PVE funkci turbíny i čerpadla.

Kompenzační provoz probíhá při zavzdušněném oběžném kole turbíny. Hydroalternátor běží při plném počtu otáček jako přebuzený synchronní motor naprázdno. Odebírá ze sítě proud s fázovým předstihem. Dodává jalový výkon do sítě a tím se zlepšuje účinník v síti.

Hydroenergetický potenciál lze stanovit ze vztahu:[22]

$$P = Q * \rho * g * H_u \quad (3.1)$$

kde:

- P - odevzdaný výkon [W]
- Q - průtokové množství [m^3/s]
- g - tíhové zrychlení [m/s^2]
- ρ - měrná hmotnost vody [kg/m^3]
- H_u - užitečný spád [m]

Užitečný elektrický výkon soustrojí lze stavit ze vztahu:

$$P_s = Q * g * H_u * \eta_T * \eta_P * \eta_G \quad (3.2)$$

kde:

- P_s - výkon na svorkách alternátoru [kW]
- η_T - účinnost turbíny [-]
- η_P - účinnost spojky (převodu momentu na hřídel generátoru) [-]
- η_G - účinnost generátoru [-]

Vyrobená energie se stanoví ze vztahu:

$$E_g = Q * g * H_u * \eta_T * \eta_P * \eta_G * t \quad (3.3)$$

kde:

- E_g - elektrická energie [kWh]
- t - čas [h]

3.1 Vodní nádrže PVE

PVE můžeme rozdělit z hlediska vodních režimu na:

- **PVE se sekundární umělou akumulací:** vyznačují se uzavřeným koloběhem vody ve svých nádržích. Horní nádrže jsou uměle vytvořené, nemají žádné přirozené vodní přítoky. U tohoto typu vodních nádrží musíme brát v potaz ztrátu objemů odparem a průsakem, proto by se měla dolní nádrž stavět na vodním toku pomocí hráze. Tím pádem se ztráty výparem a průsakem nahradí prodloužením čerpacího režimu. PVE se sekundární umělou akumulací využíváme u větších spádů. Typem tohoto vodního režimu jsou PVE Dlouhé stráně a PVE Štěchvice II. [2] Výpočet ztrát výparem lze stanovit ze vztahu: [5]

$$H_d = 13,5 * \frac{T}{w_r} \quad (3.4)$$

kde:

- H_d - denní výpar [mm/den]
- T - průměrná měsíční teplota vzduchu [$^{\circ}C$]
- w_r - průměrná měsíční relativní vlhkost vzduchu [%]

Horní nádrž určuje množství potenciální energie, kterou může PVE disponovat. Tuto energii můžeme spočítat následovně. Budeme uvažovat, že celý užitný objem horní nádrže V_u proteče fiktivní turbínou za jednu hodinu $t = 1 = 3600s$, celý užitný objem V_u bude hodinová hltlost turbíny.

$$Q = \frac{V_u}{t} = \frac{V_u}{3600} \quad (3.5)$$

Za tuto hodinu se vyrobí elektrická energie ekvivalentní potenciální energii v nádrži. Další krok je dosazení hltlosti fiktivní turbíny do rovnice 3.3. Tímto krokem získáme hodnotu akumulované elektrické energie v užitném objemu nádrže tzv. *energetický ekvivalent nádrže* E_n

$$E_n = \frac{V_u}{3600} * g * H_u * \eta_T * \eta_P * \eta_G * t \quad (3.6)$$

Při dosazení za čas $t = 1$ a úpravě dostáváme vztah

$$E_n = \frac{V_u}{367} * H_u * \eta_T * \eta_P * \eta_G \quad (3.7)$$

Pomocí tohoto vztahu můžeme spočítat objem vody potřebný na výrobu $1kW$ v případě, když za E_n dosadíme 1. Nebo naopak, jakou energii vyrobíme z $1m^3$ vody $V_u = 1$. [24]



Obrázek 3.1: Horní nádrž PVE Dlouhé Stráně [7].

- **PVE se smíšenou primární a sekundární akumulací:** v tomto vodním režimu je horní nádrž tvořena přehradní nádrží s přirozenou akumulací a dolní nádrž většinou bývá vyrovnávací nádrží s průtočnou vodní elektrárnou. Typem tohoto vodního režimu je PVE Dalešice.[2]

3.2 Tlakový přivaděč

Tlakový přivaděč se skládá z tlakového potrubí nebo štoly, z uzavěrů a vtokového objektu. Jak již bylo řečeno, dlouhý přivaděč s malým spádem by měl obsahovat vyrovnávací komoru. Rozlišujeme dvě koncepce řešení vtokových objektů, které umožňují oboustranné proudění:

- Vtokové objekty s vodorovným nebo šikmým odběrem v tělese hráze horní nádrže. Z konstrukčního hlediska se tyto vtokové objekty rozlišují podle toho, zda jsou umístěné v tělese betonové hráze nebo v tělese zemní sypané hráze.[2]
- Vtokové objekty se svislým odběrem ze dna horní nádrže, které jsou provedeny buď jako samostatný věžový objekt, nebo jako ponořený šachtový objekt. [2]

Před vtokovým objektem se nacházejí česle, které jsou vytahovatelné. Jejich využití je nutné pouze při turbínovém provozu. Slouží k zachycování větších nečistot.

Vtokový objekt musí mít dva uzávěry se vzájemně nezávislým ovládním. Jeden z uzávěrů je použit jako automatický rychlouzávěr, který je uveden v činnost při poškození potrubí. Druhý slouží pro regulaci průtoků v potrubí. Používají se uzávěry tabulové, klapkové, válcové, které uzavírají průtok při obou směrech proudění. Další uzávěry jsou v přivaděčích umístěny před a za turbínou, případně čerpadlem. Tyto uzávěry bývají kulové, prstencové a klapkové. Pro jeden tlakový přivaděč, na který je připojeno více turbín nebo čerpadel, jsou vhodné kulové uzávěry s oboustranným těsněním, což umožňuje revizi soustrojí bez vyprázdnění přivaděčů.[2] Funkce těchto uzávěrů je stěžejní z hlediska zajištění bezpečného a regulovatelného provozu elektrárny.

Proudění vody v přivaděčích není bezeztrátové. Na ztrátách se podílí ztráty třením, změna průtokového průřezu a ztráty ve vtokovém objektu. Ztráty třením tvoří jednu z rozhodujících podmínek při vyšetřování hospodárného průměru tlakových přivaděčů.

Pro stanovení těchto ztrát se vychází z Weissbachova vztahu:[1]

$$Z_t = \lambda \frac{L * v^2}{2g * D} \quad (3.8)$$

kde:

- λ - ztrátový součinitel [-]
- L - délka přivaděče [m]
- v - rychlost proudění [m/s]
- D - průměr kruhového přivaděče [m]



Obrázek 3.2: Kulový uzávěr v PVE Dlouhé Stráně

3.3 Strojní uspořádání

Kromě akumulčních nádrží a tlakových přivaděčů je ze stavebního hlediska třeba jmenovat základní stavební prvky elektrárny jako jsou strojovna a transformovna. Elektrárna bývá postavena při patě hráze, při úpatí hory nebo jako podzemní, kde jsou jednotlivé části elektrárny uloženy v kavernách, např. PVE Dlouhé Stráně. Toto řešení se využívá při budování elektráren v CHKO. Transformovna a strojovna bývají z bezpečnostních důvodů odděleny. [22]

Na zásadní koncepci strojovny PVE má vliv zvolené uspořádání instalovaných soustrojí. Ta mohou být horizontální nebo vertikální. Horizontálního řešení se využívá v případech menších spádů a je do jisté míry přehlednější. Oproti tomu vertikální řešení je vhodné pro větší spády a ze stavebních důvodů se volí také do podzemních kaveren. [22]

Rozlišujeme tyto tři druhy uspořádání:

- **Čtyřstrojové uspořádání** – obsahuje generátor, vodní turbínu, motor a čerpadlo. Využívá se u PVE, kde dochází k čerpání do vysokých výšek.
- **Třístrojové uspořádání** – vodní turbína, motorgenerátor, čerpadlo. Využívá se v případě velkých spádů s Peltonovou turbínou.

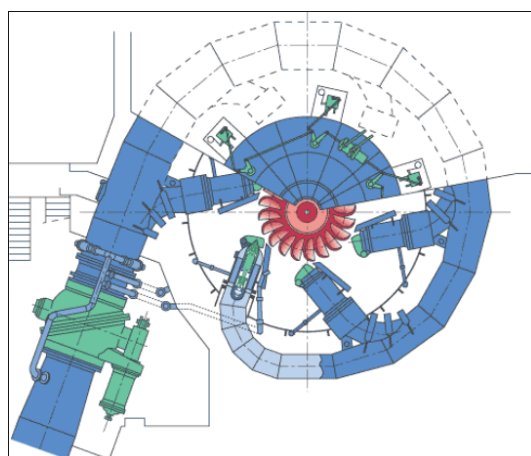
- **Dvoustrojové uspořádání** – reverzibilní turbína, motorgenerátor. Turbína pracuje v obou směrech, v jednu směru v turbínovém provozu a v druhém směru v čerpadlovém provozu. Dvoustrojové uspořádání je nejvyužívanější jak v ČR, tak ve světě.

■ 3.3.1 Vodní turbína

Vodní turbína je točivý mechanický stroj, který přeměňuje potenciální energii vody na mechanickou energii. Vodní turbíny rozdělujeme:

- Podle změny tlaků v pohybovou energii
 - **Rovnotlaké (akční)**– tlak vody se při průchodu přes oběžné kolo nemění. Oběžné kolo rovnotlaké turbíny musí být umístěno nad spodní hladinu. Tím vzniká určitá ztráta spádu, která je pro turbíny pracující s vysokým spádem zanedbatelná.
 - **Přetlakové (reakční)** – tlak vody před oběžným kolem je větší než za ním, v tomto případě je využita i tlaková energie vody [27]
- Podle směru působení vody na oběžné kolo:
 - **Axiální turbíny**
 - **Radiální turbíny**
 - **Radiaxiální turbíny**
 - **Tangenciální turbíny**
- Podle polohy hřídele:
 - **Horizontální**
 - **Šikmé**
 - **Vertikální**

Turbíny využívané ve VE:



Obrázek 3.5: Peltonova turbína.[27]

	Spád m	Výkon MW	Průměr oběžného kola [mm]
Francisova reverzibilní turbína	40 - 550	5 - 400	1000 - 7 500
Francisova turbína	10 - 700	0,2 - 500	400 - 7 500
Kaplanova turbína	1 - 85	0,2 - 200	500 - 10 000
Peltonova turbína	70 - 1200	3 - 350	500 - 4 000

Tabulka 3.1: Přehled parametrů turbín [28]

■ 3.3.2 Synchronní stroje

Synchronní stroj je elektrický stroj, který slouží k přeměně energií. V režimu motoru mění elektrickou energii na mechanickou. V režimu generátoru naopak přeměňuje mechanickou energii na elektrickou. Synchronní stroje jsou jediným typem elektrických strojů schopných regulace jalového výkonu, což je jejich hlavní výhoda.[3] U vodních elektráren se využívají synchronní stroje s vyniklými póly, jelikož jsou poháněny převážně pomaluběžnějšími vodními turbínami. Nazýváme je hydroalternátory. Synchronní hydroalternátor se skládá ze dvou částí:

- **Stator** je složen z dynamových plechů, které jsou vzájemně izolovány kvůli snížení ztrát. Na vnitřním obvodu obsahují drážky, ve kterých jsou uloženy cívky, složené z izolovaných vodičů. Tyto cívky jsou vně drážek spojeny do tří jednofázových vinutí rovnoměrně prostorově rozloženy. Začátky a konce fází jsou ze stroje vyvedeny na vývodovou svorkovnici stroje.
- **Rotor** synchronního hydroalternátoru je po obvodě osazen magnetickými póly, na nichž jsou pólové nástavce a budící cívky. Póly jsou magnetizovány (buzeny) stejnosměrným proudem, odebíraného ze zdroje stejnosměrného proudu tzv. budiče. V pólových nástavcích se nachází tlumící (klecové) vinutí tzv. amortizér. Úkolem tohoto vinutí je zabránit náhodným mechanickým kmitům rotoru. Dalším úkolem je zejména u PVE umožnění asynchronního rozběhu hydroalternátoru do funkce synchronního motoru při čerpadlovém režimu. V tomto případě tlumič vytváří klec, jakou mají asynchronní motory.[2]

Při nabuzení rotoru stejnosměrným proudem se vytvoří magnetické pole, které se uzavírá přes vzduchovou mezeru a stator. Při otáčení rotoru turbínou se zároveň otáčí i magnetické pole, jehož siločáry protínají vodiče ve statoru. Podle Faradayova zákona se ve vodičích statoru indukují střídavé napětí. Jelikož jsou ve statoru tři vinutí vzájemně posunuta o 120° , indukují se třífázově napětí vektorově posunutá o 120° . Frekvence indukovaného napětí je úměrná rychlosti rotoru a počtu pólů podle vztahu:

$$f = \frac{p * n}{60} \quad (3.9)$$

kde:

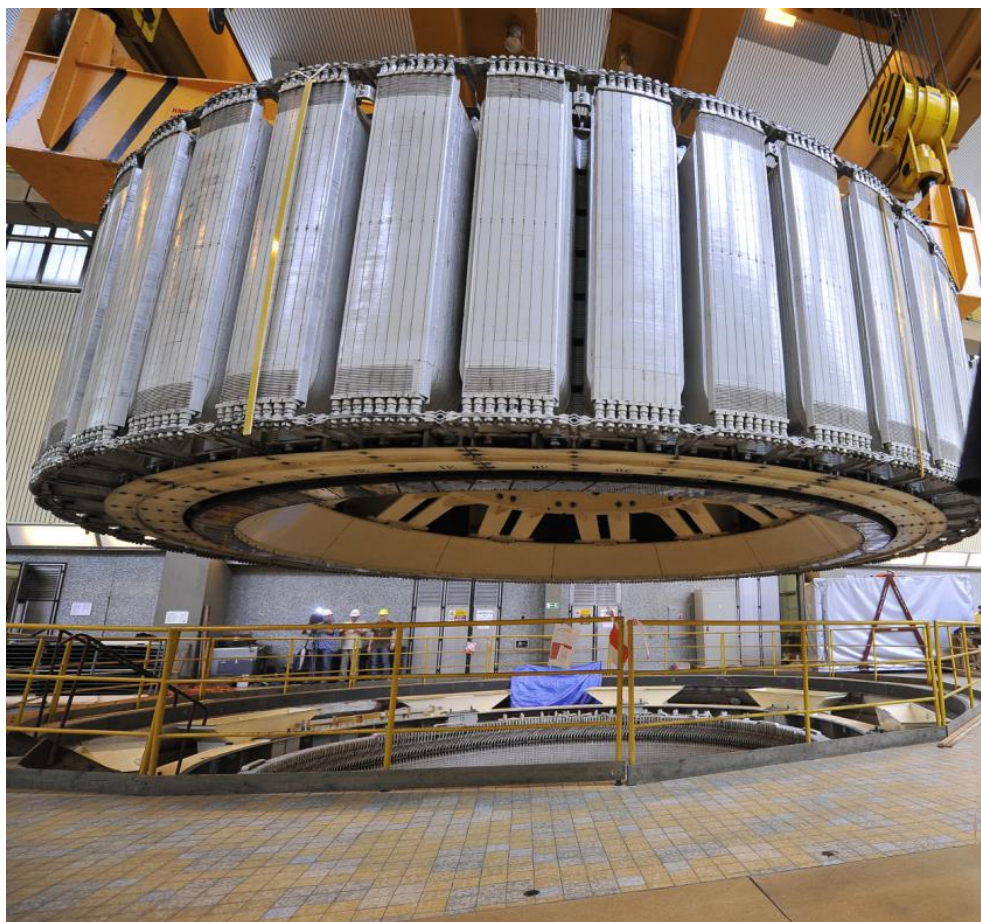
- f - frekvence indukovaného napětí [Hz]
- n - počet otáček rotoru za minutu
- p - počet pólových dvojic [-]

Při fázování alternátoru k síti je žádoucí, aby nedošlo k mechanickému a proudovému rázu. Pro jejich minimalizaci musí být splněny tyto podmínky:

- Stejný sled fází
- Stejná frekvence stroje a sítě

- Stejná velikost napětí
- Stejný fázový posun

Fázování k síti je ve většině VE prováděno automaticky z hlavního dispečinku ve Štěchovicích.



Obrázek 3.6: Rotor s vyniklými póly v PVE Dalešice.[29]

■ 3.3.3 Budící obvody hydroalternátorů

Aby synchronní stroj mohl pracovat jako alternátor či motor, musí být jeho rotorové budící vinutí připojeno na zdroj stejnosměrného napětí (tzv. budič). Tyto zdroje se dělí:

■ Stacionární

- Polovodičové měniče (většinou můstkové usměrňovače)

■ Rotační

- Dynama
 - Derivační
 - Cize buzená
- Umístěná na hřídeli generátorů
- S vlastním pohonem

Pomocí velikosti budícího proudu můžeme regulovat jalový výkon alternátoru (u přifázovaného stroje) nebo svorkové napětí alternátoru (u nepřifázovaného stroje). Činný výkon lze regulovat pomocí momentu na hřídeli stroje.

■ 3.4 Transformátory

Transformátor je elektrický netočivý stroj, který přeměňuje velikost některých elektrických veličin na jiné velikosti. Využívá se Maxwell-Faradayova zákona o elektromagnetické indukci:[3]

$$u_i = -\frac{d\Psi}{dt} = -N * \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.10)$$

kde:

- u_i - indukované napětí [V]
- Ψ - sprážený magnetický tok [Wb]
- Φ - magnetický indukční tok [Wb]
- N - počet závitů [-]

Transformátor se skládá z:

- **Uzavřeného magnetického obvodu (jádra)** složeného z navzájem izolovaných orientovaných elektrotechnických plechů. Ty jsou izolované kvůli omezení ztrát vířivými proudy.
- **Vinutí** rozdělujeme na primární, sekundární a terciární. Vinutí jsou namotaná na jádro transformátoru. Při průchodu střídavého proudu primárním vinutím vytvoří ve svém okolí magnetický indukční tok, který je magneticky spřažen se sekundárním a případně s dalšími vinutími. Časovou změnou spřaženého magnetického toku se ve vinutích indukuje napětí podle rovnice 3.10. Poměr počtu závitů obou vinutí nazýváme převodem a odpovídá přímému poměru napětí nebo převrácenému poměru proudů. Je dán vztahem:

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} [-] \quad (3.11)$$

kde:

- N_1 - počet závitů primárního vinutí [-]
 - N_2 - počet závitů sekundárního vinutí [-]
 - U_1 - napětí na primárním vinutí [V]
 - U_2 - napětí na sekundárním vinutí [V]
 - I_2 - proud tekoucí sekundárním vinutím [A]
 - I_1 - proud tekoucí primárním vinutím [A]
- **Nádoby** slouží k uložení jádra a vinutí. U transformátorů velkých výkonů musí docházet k chlazení vinutí. Využívá se chlazení pomocí oleje. Olej odvádí teplo vzniklé ze ztrát, ale také zvyšuje izolaci vinutí.

V elektrárnách se používají tři druhy transformátorů:

- **Blokové transformátory** slouží k transformaci napětí alternátoru na napětí sítě, např. PVE Dlouhé Stráně a PVE Dalešice na 400 kV a PVE Štěchovice II na 110 kV napětovou hladinu. Výkon transformátoru odpovídá výkonu alternátorů.
- **Transformátory vlastní spotřeby** slouží k napájení vlastní spotřeby a jsou konstruovány podle schématu vlastní spotřeby.[30]
- **Rezervní transformátory** slouží pro napájení vlastní spotřeby při výpadku pracovních zdrojů [30]



Obrázek 3.7: Blokové transformátory v PVE Dalešice. zdroj: interní archiv ČEPS

Kapitola 4

Energetická bilance přečerpávací vodní elektrárny

Energetická bilance je důležitým parametrem pro posuzování elektráren. Jelikož v současné době je většina technologií na výrobu elektrické energie objevena, soustředíme se na jejich vylepšení a tím zvýšení jejich energetické bilance. Výsledná účinnost elektráren je dána součinem dílčích účinností provozních zařízení elektráren. V současnosti se účinnost PVE udává v rozmezí 71 - 84 %. V některých literaturách se můžete dočíst až 85 %.

Při určování energetické bilance PVE budu uvažovat druh PVE se sekundární umělou akumulací (PVE Dlouhé Stráně, PVE Štěchovice II). U PVE můžeme rozlišovat dva druhy celkové účinnosti elektráren:

- **Velký cyklus**, kde celková účinnost tohoto cyklu je vztažena k vývodům základní elektrárny a na přívody elektřiny v místě spotřeby špičkové energie. Jedná se o cyklus, kdy bereme v úvahu skutečnost, že elektrickou energii pro akumulaci musí vyrobit jiná elektrárna, která disponuje určitou účinností.
- **Malý cyklus** udává samotnou účinnost PVE (tj. součin účinností dílčích zařízení pro čerpadlový a turbínový provoz) vztaženou na přívody a vývody PVE. Tímto cyklem se budu v této kapitole zabývat.

Účinnost elektrického zařízení je dána vztahem:

$$\eta = \frac{P_v}{P_d} [-] \quad (4.1)$$

kde:

- η - účinnost elektrického zařízení [-]
- P_d - dodaný výkon (příkon) [W]
- P_v - vyrobený výkon [W]

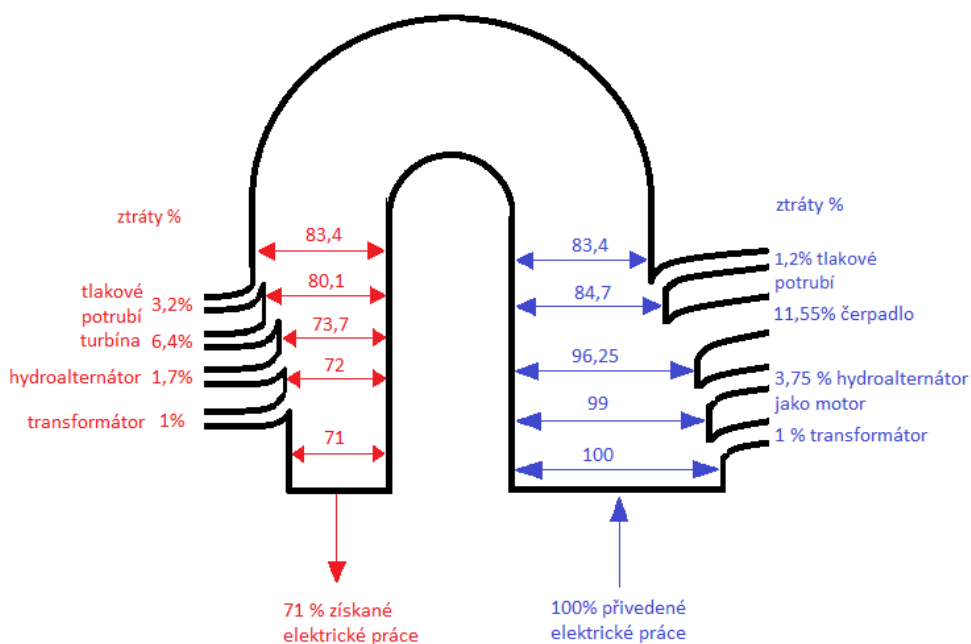
U PVE uvažujeme množství spotřebované energie na čerpání a množství vyrobené elektrické energie.

$$\eta_m = \frac{P_v * t_t}{P_d * t_{\check{c}}} = \frac{E_v}{E_s} [-] \quad (4.2)$$

Jednotlivé dílčí účinnosti v PVE jsou uvedeny v tabulce níže.

Provoz	Druh	účinnost[-]
Turbínový	Tlakové potrubí	0,961
	Turbíny	0,916
	Hydroalternátor	0,975
	Ložiskové ztráty soustrojí	0,99
	Pomocné pohony	0,99
	Transformace napětí	0,99
	Celková účinnost turbínového provozu	0,832
Čerpadlový	Tlakové potrubí	0,985
	Čerpadlo	0,875
	Hydroalternátor jako motor	0,98
	Ložiskové ztráty soustrojí	0,99
	Pomocné pohony	0,99
	Transformace napětí	0,99
	Celková účinnost čerpadlového provozu	0,8195

Tabulka 4.1: Přehled účinností přečerpávacího procesu [2]



Obrázek 4.1: Teoretická účinnost PVE.

Na obrázku 4.1 jsem vytvořil teoretickou účinnost PVE. V potaz nejsou brány ztráty výparem a průsakem, jelikož jsou oproti ostatním ztrátám zanedbatelné. Pro představu vypočtu měsíční ztráty výparem v horní nádrži PVE Dlouhé Stráně. Ztráty výparem budu počítat pro měsíce duben a červenec. Podle vztahu 3.4 budu k výpočtu potřebovat průměrnou měsíční teplotu a průměrnou relativní vlhkost vzduchu. Zdroj [31] uvádí na horní nádrži PVE Dlouhé Stráně průměrnou měsíční teplotu v dubnu 7 °C v červenci 14 °C. Průměrná relativní vlhkost vzduchu podle ČHMÚ činila v dubnu 73,9 % v červenci 79,5 %. Dále budu potřebovat velikost plochy horní nádrže, která je 15,4 HA.

$$H_d = 13,5 * \frac{T}{w_r} = 13,5 * \frac{7}{73,9} = 1,278 \text{ mm/d} \quad (4.3)$$

$$H_m = H_d * 30 = 38,36 \text{ mm/měsíc} \quad (4.4)$$

Denní výpar vztážený na jednotku plochy byl v dubnu 1,278 mm/d. Měsíční výpar vztážený na jednotku plochy činil v dubnu 38,36 mm/měsíc. Vynásobením měsíčního výparu plochou nádrže získám množství vypařené vody.

$$H_{nádrže} = H_m * S_{nádrže} = 38,36 * 10^{-3} * 15,4 * 10^4 = 5907 \text{ m}^3/\text{měsíc} \quad (4.5)$$

Měsíční výpar v horní nádrži PVE Dlouhé Stráně byl v dubnu $5907\text{m}^3/\text{měsíc}$. Dále spočtu energetické ztráty, které při výparu vznikly. Využiji rovnici 3.7. Z této rovnice vypočtu, jakou energii vyrobí PVE Dlouhé Stráně z 1 m^3 . Hodnoty H_u získám z tab.C.1, jednotlivé účinnosti z tab.4.1.

$$E_j = \frac{1}{367} * 532 * 0,916 * 0,99 * 0,975 = 1,28\text{kWh} \quad (4.6)$$

Z 1 m^3 vody PVE Dlouhé Stráně vyrobí 1,28 kWh elektrické energie. Abych vypočetl energetické ztráty, vynásobím tuto hodnotu odpařeným objemem vody.

$$E_z = 1,28 * 5907 = 7560\text{kWh} = 7,56\text{MWh} \quad (4.7)$$

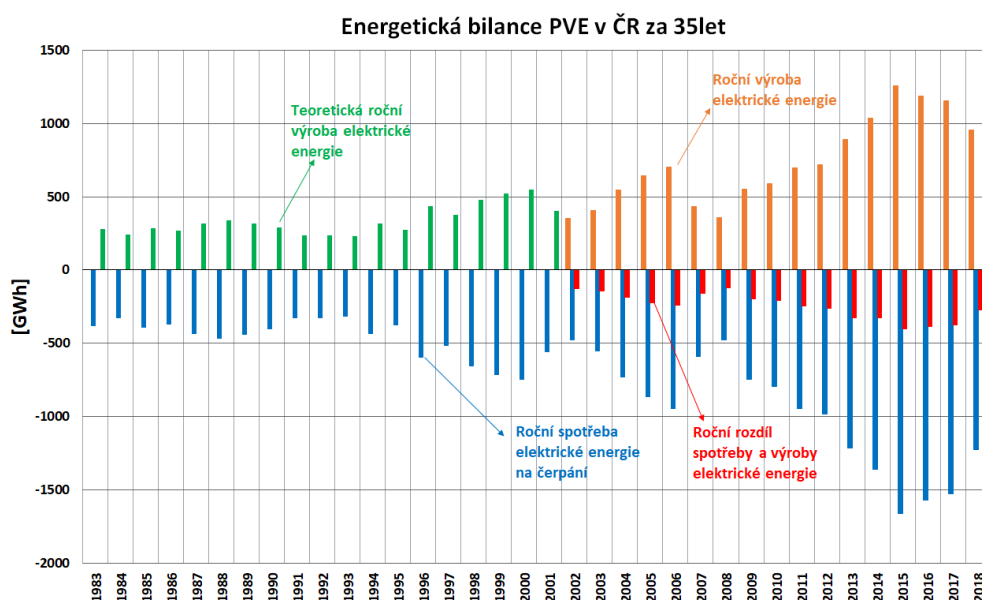
V dubnu došlo ke ztrátě potenciální energie výparem 7,56 MWh. Analogickým způsobem bych spočítal ztrátu elektrické energie v červenci. Uvedu pouze mezivýsledky. Měsíční výpar v červenci činil $73,7\text{ mm}/\text{měsíc}$. Měsíční výpar v horní nádrži PVE Dlouhé Stráně v červenci činil $8867\text{ m}^3/\text{měsíc}$. Celkové potenciální energetické ztráty výparem v červenci byly 11,4 MWh.

4.1 Energetická bilance PVE v ČR

Celkový instalovaný výkon našich PVE činí 1150 MW. Největší zastoupení mají PVE Dlouhé Stráně s instalovaným výkonem 650 MW. Tvoří 56 % z celkového instalovaného výkonu. Poté následují PVE Dalešice s instalovaným výkonem 452 MW. Třetí a zároveň nejmenší PVE elektrárnou u nás je PVE Štěchovice II s instalovaným výkonem 48 MW. Jelikož PVE vyrábějí a spotřebovávají elektrickou energii s ohledem na zatížení ES (blíže tuto problematiku rozeberu v kap. 5.2), je jejich výroba a spotřeba elektrické energie v každém roce odlišná oproti předchozím letům. V následující části znázorním, jak se energetická bilance v časovém horizontu změnila. Blíže rozeberu posledních osm let, ve kterých nastal velký rozvoj OZE. Z tohoto období jsem vybral dva roky, rok 2014 a 2018, pro vyznačení ročních průměrů výroby a spotřeby PVE na našem území.

Na následujícím obrázku 4.2 je sloupcový graf znázorňující vývoj výroby a spotřeby elektrické energie v našich PVE od roku 1983 až do současnosti. Protože v ERÚ nejsou k dispozici hodnoty vyrobené elektrické energie do roku 2002, využil jsem k určení teoretické výroby elektrické energie v chybějícím období hodnoty ztrát od roku 2002 do současnosti. Spočetl jsem procentuální zastoupení ztrát od roku 2002 do současnosti a určil jejich průměr. Hodnota tohoto průměru činila 27 %. Po odečtení procentuálních ztrát od základu jsem získal teoretickou účinnost PVE, která se rovná 73 %. Ve skutečnosti byla nejspíše účinnost PVE nižší, ale pro účely této energetické bilance je rozdíl zanedbatelný. Po vynásobení spotřebované energie teoretickou účinností v každém

chybějícím roce jsem získal teoretickou vyrobenou elektrickou energii v PVE v chybějícím období. V grafu je tato teoretická výroba znázorněná zelenými sloupci, skutečná výroba je vyznačena oranžovými a spotřeba na čerpání modrými sloupci. Můžeme pozorovat jak v průběhu těchto 35 let rostla energetická bilance. První větší nárůst vidíme po roce 1996, následkem spuštění PVE Dlouhé Stráně. Druhý nárůst pozorujeme v rozmezí let 2002 až 2007. Tento nárůst byl zapříčiněn povodněmi v roce 2002. Při nichž došlo k omezení výroby u většiny VE Vltavské kaskády a jejich nahrazení proběhlo pomocí PVE. V letech 2007, 2008 dochází k poklesu výroby a spotřeby elektrické energie z důvodu rekonstrukce PVE Dalešice. Následoval každoroční nárůst energetického využití PVE až do roku 2015, kdy došlo k největšímu energetickému využití. PVE vyrobily 1259 GWh a spotřebovaly 1660 GWh elektrické energie. [34] Hlavním důvodem tohoto nárůstu byla instalace OZE a omezená schopnost PPS řídit přetoky elektrické energie z německé PS. Tento problém byl PPS vyřešen o dva roky později pomocí PST transformátorů, které jsou schopny pomocí posunu fázového úhlu napětí aktivně řídit průtok činného výkonu.

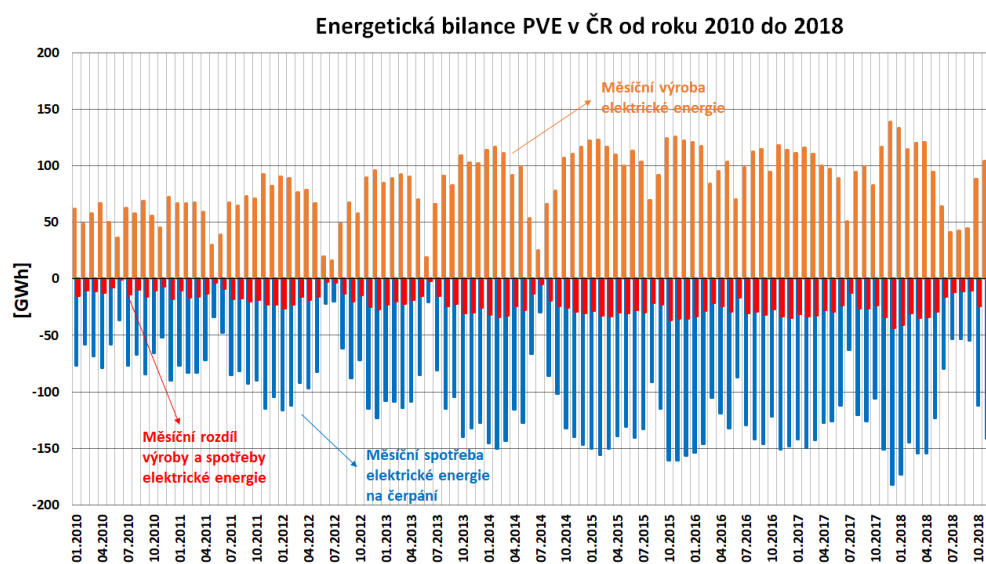


Obrázek 4.2: Sloupcový graf energetická bilance PVE od roku 1983 do roku 2018.[34]

Obrázek 4.3 vyznačuje sloupcový graf měsíční výroby a spotřeby elektrické energie PVE v ČR od roku 2010 do roku 2018. Z grafu je patrné, že jejich využití v ES stále roste. V průběhu zaznamenaného období můžeme vypořovovat, že vykazují v letních obdobích nižší využití, a to z důvodů nižší poptávky po elektrické energii. Tento fakt lze vysvětlit i tím, že skupina ČEZ plánuje většinu odstávek na letní měsíce. Ale během posledních tří let vykazují v letním období nárůst energetického využití. Největší měsíční energetická

4. Energetická bilance přečerpávací vodní elektrárny

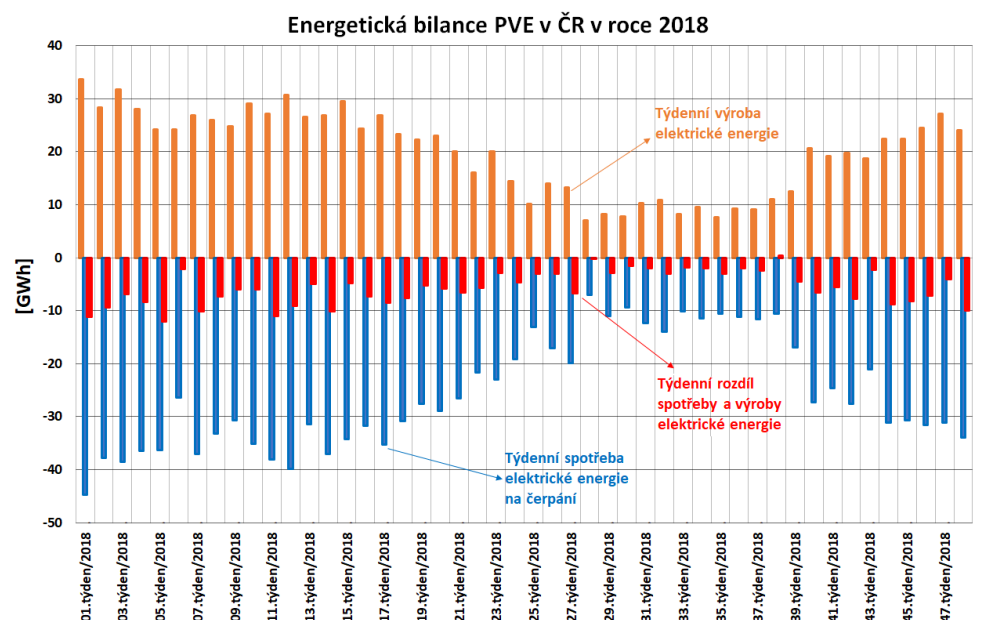
bilance byla zaznamenána na konci roku 2017, kdy výroba činila 136,3 GWh a spotřeba na čerpání 183 GWh.



Obrázek 4.3: Sloupcový graf energetické bilance PVE od roku 2010 do roku 2018.[35]

4.1.1 Rok 2018

Na obrázku 4.4 je sloupcový graf znázorňující týdenní hodnoty výroby a spotřeby elektrické energie v PVE v ČR za rok 2018 do jeho 48. týdne. Rozdíl výroby a spotřeby elektrické energie tvoří týdenní elektrické ztráty, které v PVE vznikají. Jak si můžeme všimnout, od 27. týdne došlo k výraznému poklesu výroby i spotřeby elektrické energie. Tento pokles měla na svědomí, kromě letního období, také výměna oběžného kola v PVE Dlouhé Stráně. Díky této investici PVE Dlouhé Stráně zvýší svou roční produkci elektrické energie o 7 GWh. [32] Do 48. týdne roku 2018 PVE na našem území vyrobily 955 GWh elektrické energie, spotřeba elektrické energie čerpáním činila 1226 GWh. Dosavadní rozdíl výroby a spotřeby elektrické energie v roce 2018 činí 22 %.



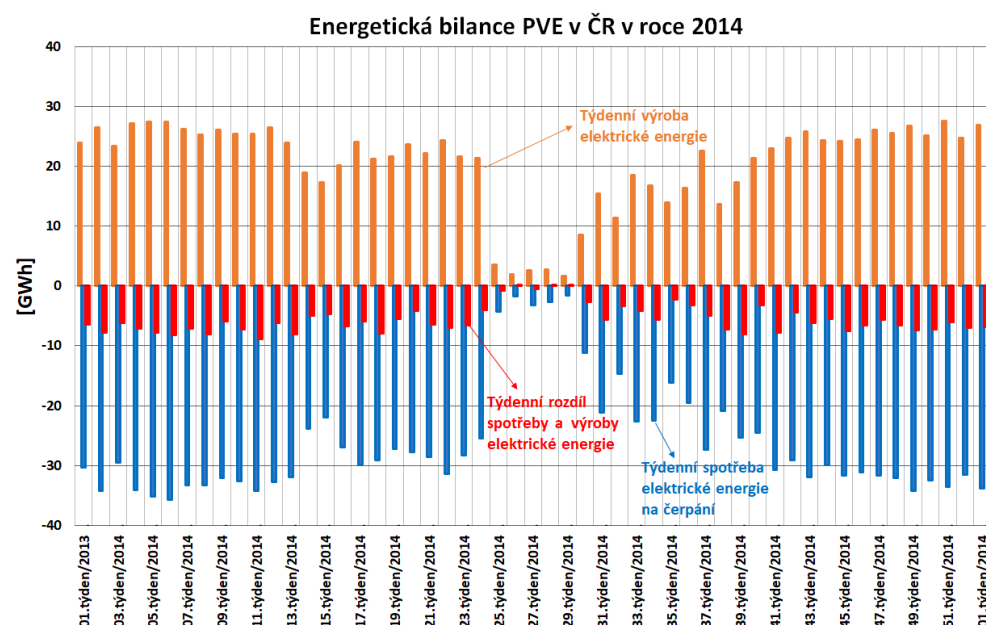
Obrázek 4.4: Sloupcový graf energetické bilance PVE za rok 2018.[35]

4.1.2 Rok 2014

V porovnání s rokem 2018 v roce 2014 došlo v letním období, z důvodů plánovaných odstávek, k větším poklesům výroby a spotřeby elektrické energie. Od 25. týdne byla v plánované odstávce obě turbosoustrojí v PVE Dlouhé Stráně kvůli opravám na horní nádrži. Souběžně běžela odstávka třetího turbosoustrojí v PVE Dalešice, kde od 23. týdne probíhala výměna chladičů. Celkově bylo odstaveno 763 MW výkonu našich PVE. V letním období můžete

4. Energetická bilance přechřpávací vodní elektrárny

spatřit kladné rozdíly spotřeby a výroby. Ty jsou způsobené PVE Dalešice, jelikož se jedná o typ PVE se smíšenou primární a sekundární akumulací, kdy má elektrárna schopnost vyrobit větší množství elektrické energie, než spotřebuje. Nejvíce elektrické energie PVE spotřebovaly na čerpání v 6. týdnu, a to 35,7 GWh. Naopak nejvíce elektrické energie vyrobily v 51. týdnu 27,5 GWh.



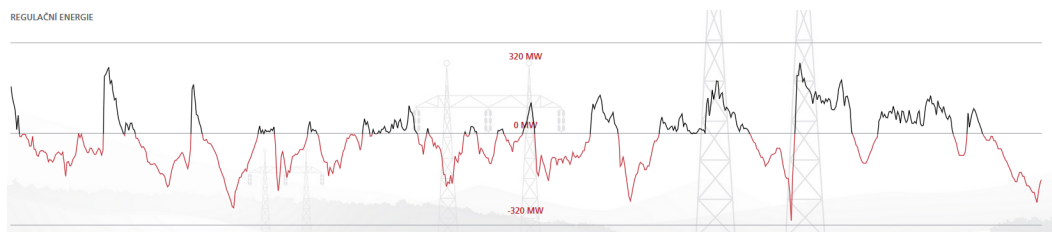
Obrázek 4.5: Sloupcový graf energetické bilance PVE za rok 2014.[35]

Kapitola 5

Využití přečerpávací vodní elektrárny při udržení stability elektrické sítě

5.1 Řízení stability elektrické soustavy

Jak již bylo zmíněno v úvodu PPS je skupina ČEPS, jež pomocí SyS zajišťuje stabilní, kvalitní a bezpečný provoz ES ČR. Udržuje parametry frekvence a napětí v předepsaných mezích. Pro plnění SyS využívá PpS poskytované jednotlivými uživateli PS (výrobci elektrické energie). Skupina ČEZ svými PVE poskytuje PpS, a tím se podílí na stabilitě ES. Následující podkapitoly vycházejí z Kodexu PS [36]



Obrázek 5.1: Diagram denní regulace ES [35]

■ Primární regulace f bloku(PR)

Je schopnost elektrárenského bloku automaticky měnit výkon v závislosti na odchylce frekvence od zadané hodnoty. Změna výkonu elektrárenského bloku v závislosti na odchylce frekvence je dána vztahem:

$$P_{\Delta} = -\frac{100 * P_n}{\delta * f_n} * \Delta f \quad (5.1)$$

kde:

- P_{Δ} - požadovaná změna výkonu bloku [MW]
- P_n - nominální výkon bloku [MW]
- Δf - odchylka frekvence od zadané hodnoty [Hz]
- δ - statika primární regulace [%]
- f_n - zadaná frekvence (obvykle jmenovitá 50 Hz)

Poskytovatel PR musí zajistit požadovaný výkon do 30 s od okamžiku vzniku odchylky frekvence.

■ Sekundární regulace P bloku(SR)

Je schopnost změny výkonu elektrárenského bloku na základě požadavku sekundárního regulátoru frekvence a salda předávaných výkonů. Využití této zálohy je dáno algoritmem sekundárního regulátoru Dispečinku ČEPS.

■ Minutová záloha(MZt)(t = 5, 15minut)

Jedná se o zařízení, nejčastěji elektrárenské bloky, která jsou do t minut od příkazu Dispečinku ČEPS schopna poskytnout sjednanou regulační zálohu. Minimální doba, po kterou musí být garantováno poskytování $RZMZ_5$ jsou 4 hodiny. $RZMZ$ Rozdělujeme na:

- Regulační minutovou zálohu kladnou $RZMZ_{t+}$ realizovanou např. zvýšením výkonu bloku, odpojením čerpání u PVE, odpojením odpovídajícího zatížení ES ČR.
- Regulační minutovou zálohu zápornou $RZMZ_{t-}$ realizovanou např. snížením výkonu bloku, připojením odpovídajícího zatížení k ES ČR.

■ Snížení výkonu(SV₃₀)

Schopnost elektrárenského bloku snížit výkon o předem sjednanou hodnotu, nebo provést plné odstavení. Tyto akce musí být do 30 min od pokynu Dispečinku provedeny. Minimální velikost zálohy zajišťované od jednoho poskytovatele je 30 MW

■ Sekundární regulace U/Q (SRUQ)

SRUQ je automatická funkce využívající celý smluvně dohodnutý regulační rozsah jalového výkonu bloků pro udržení zadané velikosti napětí

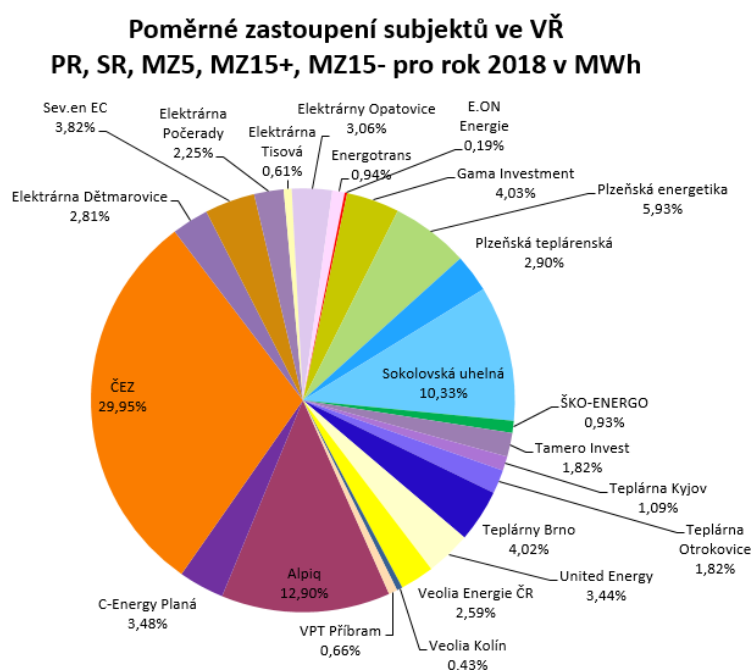
v pilotních uzlech ES a zároveň rozdělení vyráběného jalového výkonu na jednotlivé stroje

■ **Schopnost ostrovního provozu(OP)**

Schopnost elektrárenského bloku provozu do vydělané části vnější sítě tzv. ostrova. Provoz v tomto stavu klade velké nároky na regulační schopnost bloku.

■ **Schopnost startu ze tmy(BS)**

Schopnost bloku najet bez pomoci vnějšího zdroje napětí na jmenovité otáčky, dosáhnout jmenovitého napětí, připojení k síti a následného provozu v ostrovním režimu. Např. PVE Dalešice tuto PpS poskytuje. Pomocí průtočné vodní elektrárny Mohelno, která zajistí napájení vlastní spotřeby PVE Dalešice, je schopna rozběhu.



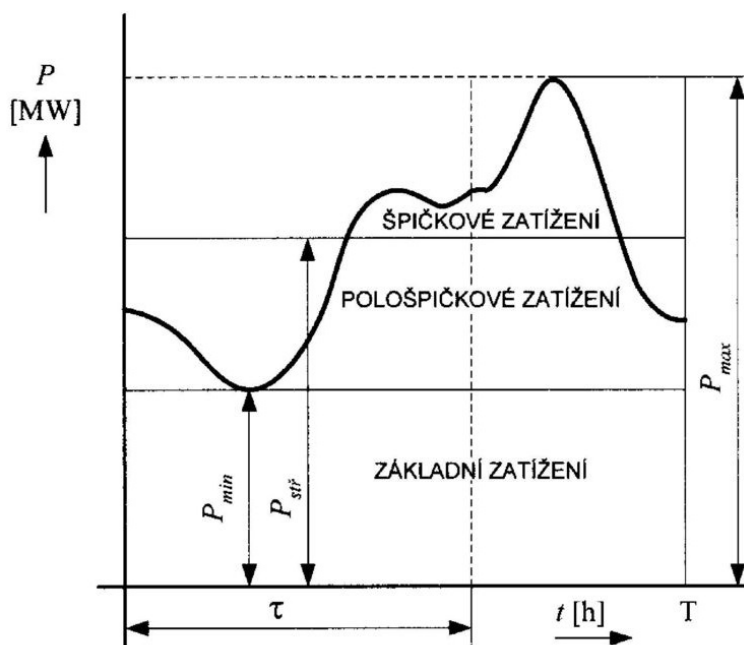
Obrázek 5.2: Přehled podílu poskytovatelů PpS v roce 2018 [35]

Na obrázku 5.2 je poměrné zastoupení poskytovatelů PsP pro rok 2018. Největší zastoupení má ČEZ skoro 30 %. Celkem tuto službu zaštituje 22 poskytovatelů.

5.2 Využití přečerpávacích vodních elektráren v denním zatížení

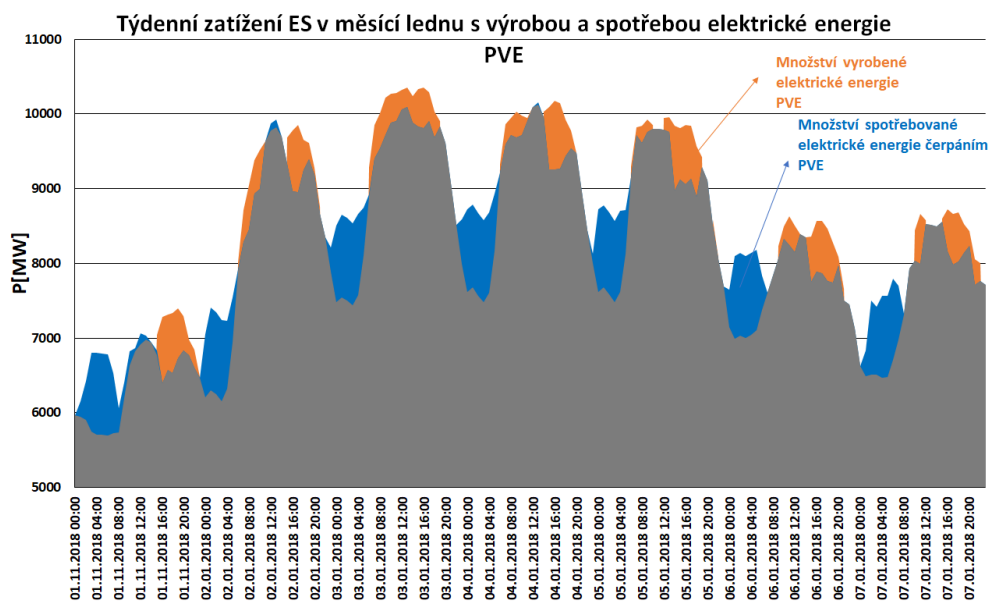
Hlavními výhodami VE vůči ostatním zdrojům, je jejich schopnost rychlého najetí na plný výkon a jeho regulace. Proto se využívají na vykrývání denních "špiček", tj. nárůstu spotřeby elektrické energie na maximální hodnotu po určitou dobu. V průběhu dne dochází ke dvěma špičkám. Jak můžeme vidět na obrázku 5.3. K první špičce dochází v ranních hodinách. Druhá v odpoledních hodinách. Denní diagram zatížení rozdělujeme do tří skupin:

- **Základní zatížení:** Oblast vymezená nulovým výkonem a P_{min} . Je to takové zatížení, jehož hodnota se během dne nemění. Na tuto oblast zatížení jsou určeny JE, vodní průtočné a některé uhelné elektrárny. U JE a uhelných elektráren není regulace z hlediska technologického a ekonomického důvodů výhodná.
- **Pološpičkové zatížení:** Oblast ohraničená spodní hranicí P_{min} a horní hranicí $P_{stř}$. V této oblasti se využívají plynové a paroplynové elektrárny (PPE), parní (PE) elektrárny a VE.
- **Špičkové zatížení:** Oblast nad pološpičkovým zatížením omezená maximálním výkonem. V této oblasti elektřinu vyrábějí PVE a akumulační VE.



Obrázek 5.3: Diagram denního zatížení[33]

Na obrázku 5.4 můžeme vidět graf týdenního zatížení v prvním týdnu v lednu letošního roku. Pozorujeme podstatné rozdíly spotřeby v jednotlivých dnech, nárůst spotřeby 2. ledna oproti 1. lednu činil 34 %. To z důvodů, že 1. ledna je státní svátek a většina větších spotřebitelů (firmy, obchody) mají zavřeno. V průběhu pracovního týdne se spotřeba liší jen minimálně, pokles zaznamenáváme o víkendech. Modrá plocha vyznačuje elektrickou energii spotřebovanou pro čerpání PVE a oranžová její výrobu. Pomocí čerpání provozovatel PVE skupina ČEZ rozšiřuje základní zatížení a tím pádem JE a PE nemusí omezovat svůj výkon, zvýší se využití výrobní kapacity, což má kladný ekonomický vliv. Naakumulovanou elektrickou energii využijí pro výrobu při špičkovém zatížení, cena takového elektrické energie je větší než výroba v základním zatížení. Z grafu dále vyplývá, že pomocí PVE dochází k vykrývání většiny denních špiček.

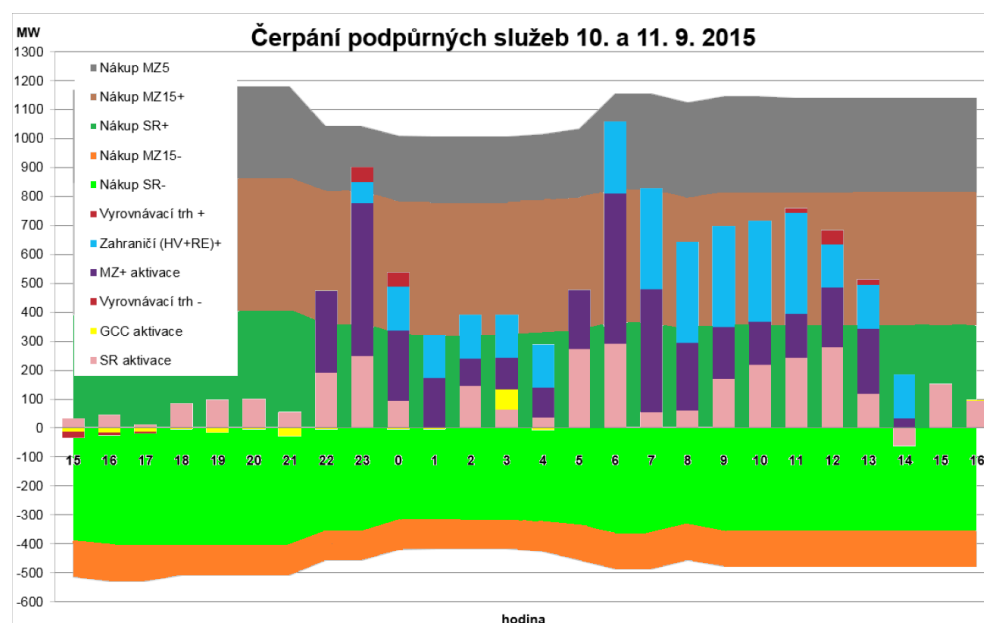


Obrázek 5.4: Graf týdenního zatížení ES v prvním lednovém týdnu roku 2018[35]

5.3 Využití přečerpávacích vodních elektráren při nestandardních situacích v ES

5.3.1 Výpadek bloku ETE a TE Chvaletice

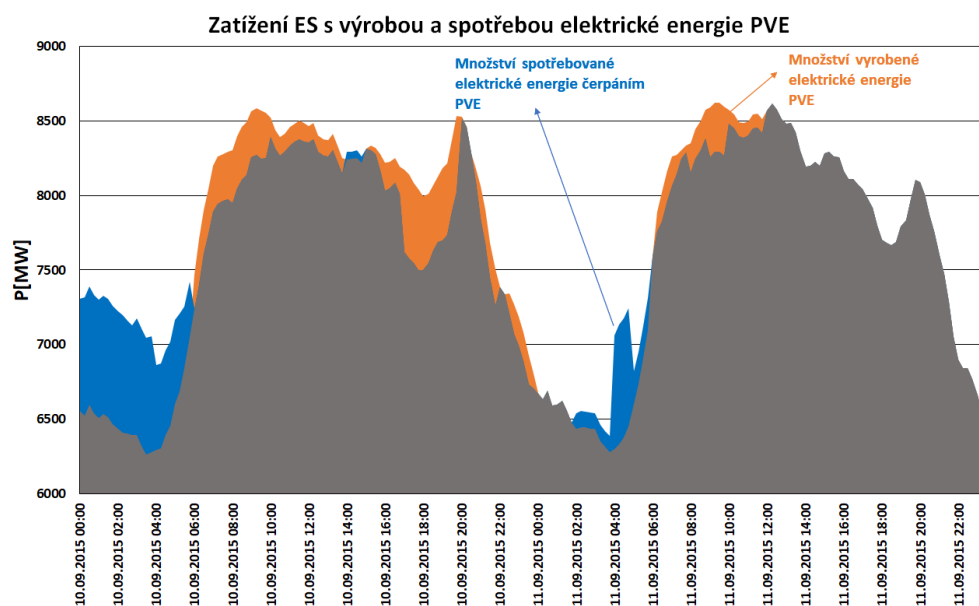
Jak uvádí Zpráva o kvalitě elektrické energie z roku 2015, dne 10. 9. 2015 došlo ve večerních hodinách ke kumulovanému výpadku bloků elektráren: Temelín (blok 2) a Chvaletice (blok 3). K pokrytí výpadku byly PPS aktivovány všechny dostupné $MZ5+$ a $MZ15+$. Došlo i k výpomoci ze zahraničí. Slovenský provozovatel ES vypomohl 10. 9. od 23:30 do 11. 9. 05:00 150 MW a 11. 9. od 06:00 do 15:00 150 MW. Provozovatel TenneT pomohl 11. 9. od 06:30 do 12:00 200 MW. Na obrázku 5.5 vidíme čerpání jednotlivých služeb PpS PPS.



Obrázek 5.5: Graf čerpání PpS z 10. a 11. 9. 2015 .[35]

Na obrázku 5.6 lze pozorovat graf zatížení ES, spotřebu a výrobu elektrické energie PVE ve dnech výpadku. K výpadku ETE došlo ve 21:00, PPS došlo k aktivaci $MZ5+$. Velkou část chybějícího výkonu ČEZ nahradil pomocí PPE Počeradý o výkonu 840 MW. Jelikož se jednalo o mimořádnou situaci, PPS nemohl mít k dispozici plnou kapacitu PVE. V předchozích hodinách totiž došlo ke klasické výrobě ve špičkovém zatížení. V prvních hodinách se tedy podílely pouze výkonem 200 MW. Průběh spotřeby elektrické energie na čerpání musel být přizpůsoben výpadku. Jen pro představu, počet hodin spotřeby elektrické energie na čerpání byl v těchto dvou dnech 11,5 h a výroby

elektrické energie 22 h. V průběhu výpadku nedodal ČEZ do sítě energie o hodnotě 3 647 MWh, pokuta se pohybovala v řádech desítek milionů.



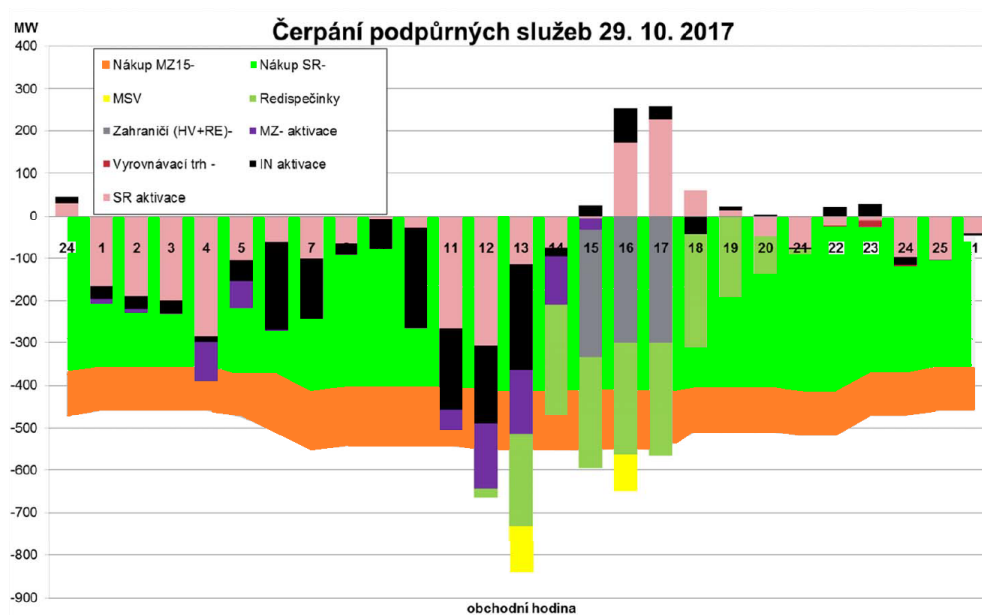
Obrázek 5.6: Graf zatížení ES s výrobou a spotřebou elektrické energie PVE 10. a 11. 9. 2015.[35]

5.3.2 Vichřice Herwart

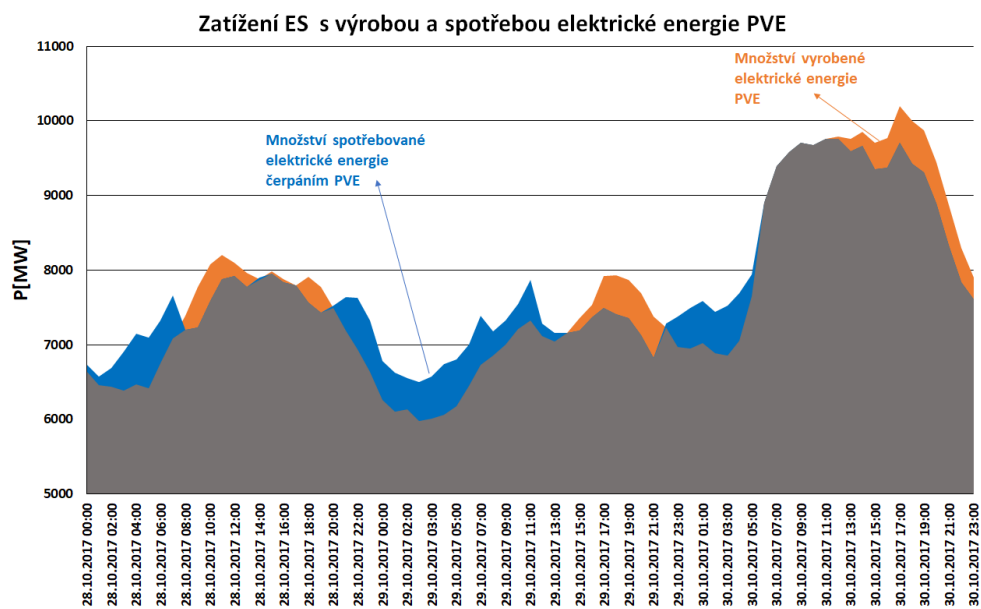
Další nestandardní situace může nastat vlivem přírodních živlů. Uvádím vichřici Herwart, která se přes území ČR přehnala 29. 10. 2017 a během níž došlo k neočekávanému omezení spotřeby ve výši 850 MW v distribučních soustavách. Došlo k vyčerpání všech záporných rezerv PpS, byly nutné redistribuční a vývoz RE do zahraničí. Na obrázku 5.7 můžeme pozorovat čerpání záporných rezerv PpS v průběhu vichřice.

Jak můžeme vidět na obrázku 5.8 PPS, k nahrazení odpojené spotřeby využil čerpání PVE. Došlo k prodloužení čerpacího režimu až do 13:00, obvykle čerpací režim končí v 6:00.

5.3. Využití přechřpávacích vodních elektráren při nestandardních situacích v ES



Obrázek 5.7: Graf čerpání PpS z 29. 10. 2017 .[35]



Obrázek 5.8: Graf zatížení ES s výrobou a spotřebou elektrické energie PVE (10 a 11. 10. 2017).[35]

Kapitola 6

Závěr

Ve své bakalářské práci jsem se věnoval využitím našich PVE pro energetiku ČR.

V první kapitole jsem se zabýval vývojem PVE ve světě a v ČR, událostmi, které tento vývoj ovlivnily, a přiblížil jsem historii našich PVE. V druhé kapitole jsem popsal jejich princip, složení a nejdůležitější části. Ve třetí kapitole je znázorněna energetická bilance PVE. V energetické bilanci PVE v ČR za posledních 35 let jsem neměl k dispozici data vyrobené energie do roku 2002, proto jsem chybějící výrobu dopočítal. Po dokončení bakalářské práce, mi ERÚ poskytlo data výroby od roku 1990. Tato data se od mnou vypočtených liší maximálně o 2%, konkrétně v roce 1998 skutečná výroba činila 488 GWh a vypočtená 479 GWh. Blíže jsem rozebral posledních osm let. V poslední kapitole jsou přiblíženy reálné situace využití PVE při nestandardních situacích v ES. Je zde rozebráno 10. a 11. září 2015, kdy došlo k výpadku jaderné elektrárny Temelín a uhelné elektrárny Chvaletice. Druhou nestandardní situaci reprezentuje vichřice Herwart.

PVE jsou specifickým typem vodních elektráren, jedná se o tzv. "baterii ES". V době přebytku elektrické energie dochází k akumulaci pomocí hydroenergetického potenciálu vody. V době nedostatku k výrobě elektrické energie. Princip vodní akumulace elektrické energie známe od konce 19. stol. V průběhu 20. stol došlo k jeho vylepšování až do dnešní podoby, kdy se účinnost PVE pohybuje od 71 do 84%. Největší ztráty vznikají na turbínách a čerpadlech, ve kterých dochází k přeměně energie. Pro představu jsem vypočítal měsíční ztráty výparem v PVE Dlouhé Stráně. Pro výpočet jsem si vybral měsíce duben a červenec. Ztráty výparem v dubnu činily 7,56 MWh, v červenci 11,4 MWh. Tyto ztráty jsou oproti ostatním zanedbatelné, pohybují se v setinách procent. Možnost dalšího zvyšování účinnosti je nepa-

trná, protože současná výstavba PVE dosáhla jak po stavebních, strojních, tak i elektrotechnických stránkách svého prozatímního technického maxima.

V ČR máme tři elektrárny tohoto typu, jejich vlastníkem a provozovatelem je skupina ČEZ. Využívá je pro zefektivnění výroby elektrické energie. Jedná se o rychle startující zdroj, který je schopný do dvou minut najet na plný výkon. Tato schopnost je důležitá, jelikož se v ES musí dodržovat sjednané vyrobené množství elektrické energie. Při případném nesplnění nasmlouvaného množství dochází k velkým pokutám. Pomocí PVE může provozovatel vykompenzovat přebývajících, nebo chybějících množství elektrické energie. Díky své schopnosti rychlého najetí na plný výkon se PVE využívají i pro výrobu elektrické energie v dobách špičkového zatížení. Energie vyrobená v této době má vyšší tržní hodnotu.

Na udržení stability ES se PVE podílejí poskytováním PpS. Nejdůležitější PpS, kterou umožňují, je minutová záloha (*RZMZ₅*). Tu dispečeri PPS využívají při řešení nestandardních situací. Jsou schopny startu ze tmy. Kdyby došlo k výpadku ES, byly by z prvních zdrojů, které by pomohly nastartovat ES.

Z energetické bilance PVE v ČR vyplývá, že jejich energetické využití v posledních letech roste, tento nárůst připisují rostoucí spotřebě elektrické energie v ČR a změně strategie složení zdrojů výroby elektrické energie v Evropě. V průběhu roku dochází k největšímu využití během zimního období z důvodu větší spotřeby. Naopak v letních obdobích je nižší spotřeba a tím pádem i využití, proto se většina odstávek a oprav plánuje na toto období. Další možné zvýšení spotřeby můžeme očekávat s nástupem elektromobility. Proto se přemýšlí o výstavbě nových PVE nebo přestavění stávajících akumulčních vodních elektráren na přečerpávací.

V bakalářské práci jsem se nezabýval všemi úskalími, se kterými se můžeme u PVE setkat, jako jsou vodní rázy, přechody z turbínového na čerpadlový provoz, kompenzační režim, ztráty průsakem, atd.. Přesáhl bych rámec mé bakalářské práce.

Příloha A

Seznam zkratek

Zkratka	Význam zkratky
ČEPS	ČEPS,a.s.
ČEZ	ČEZ,a.s.
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČR	Česká republika
ČSSR	Československá socialistická republika
EDUK	Jaderná elektrárna Dukovany.
ES	Elektrizační soustava
ERÚ	Energetický regulační úřad
ETE	Jaderná elektrárna Temelín.
FTE	Fotovoltaická elektrárna
CHKO	Chráněná krajinná oblast
JE	Jaderná elektrárna
MVE	Malá vodní elektrárna
$MZ5_+$	Minutová záloha poskytnutá do 5 minut
$MZ15_+$	Minutová záloha poskytnutá do 15 minut
OZE	Obnovitelný zdroj energie
PE	Parní elektrárny
PPE	Plynové a paroplynové elektrárny
PpS	Podpůrné služby
PPS	Provozovatel přenosové soustavy
PS	Přenosová soustava
PST transformátor	Phase Shifting Transformers
PVE	Přečerpávací vodní elektrárna
RE	Regulační záloha
$RZMZ_{t+}$	Regulační záloha kladná dosažitelná do t minut
$RZMZ_{t-}$	Regulační záloha záporná dosažitelná do t minut
$RZMZ_5$	Regulační záloha minutová kladná dosažitelná do 5 minut
SyS	Systémové služby
VE	Vodní elektrárna
VTE	Větrná elektrárna

Příloha B

Literatura

- [1] Prof. Ing. Josef Hušek Přečerpávací vodní elektrárny. 1. vydání. Praha: Statní nakladatelství technické literatury, 1963. . DT 621-311-21.
- [2] Č.Štoll, S.Kratochvil, M.Holata Využití vodní energie. Praha: Statní nakladatelství technické literatury, 1977. . DT 621.22.
- [3] P. Voženílek, V.Novotný, P.Mindl Elektromechanické měniče. Praha:České vysoké učení technické v Praze, 2015. . ISBN 978-80-01-04875-7.
- [4] Ardul Munoz - Hernandez, Sa'ad Petrous Mansoor, Dewi leuan Jones - Modelling and Controlling Hydropower Plants. . ISSN 2193-1577.
- [5] K.Vrána - Rybníky a účelové nádrže: příklady . ISBN 80-01-00656-5.
- [6] ASCE - Rocky river pumped storage hydraulic plant[online] - [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.asce.org/project/rocky-river-pumped-storage-hydraulic-plant/>
- [7] Deník - Jiří Kopáče OBRAZEM: Vypuštěné Dlouhé Stráně z výšky i zevnitř[online] - [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: <https://www.denik.cz/olomoucky-kraj/vypustene-dlouhe-strane-z-vysky-i-zevnitr-podivejte-se-20120628-3bx.html>
- [8] Converter - Alessandro Volta[online] - [cit. 2018-01-08]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/fyzici/volta.htm>
- [9] ThinkProgress - Ryan Koronowski: The Inside Story Of The World's Biggest 'Battery' And The Future Of Renewable Energy[online] - [cit. 2018-06-05] Dostupné z: <https://thinkprogress.org/the-inside-story-of-the-worlds-biggest-battery-and-the-future-of-renewable-energy-8984e81283c/>

- [23] Skupina Čez - Vodní elektrárny ČEZ v České republice[online] - [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny-cez/ceska-republika.html>
- [24] VUT v Brně - P. Mastný: Malé zdroje elektrické energie - Vodní energie[online] - [cit. 2018-10-26]. Dostupné z: <http://www.ueen.feec.vutbr.cz/mastny/vyuka/mmze/skripta/voda.pdf>
- [25] Wikipedie - Francisova turbína[online] - [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:M_vs_francis_schnitt_1_zoom.jpg
- [26] Wikipedie - Kaplanova turbína[online] - [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:S_vs_kaplan_schnitt_1_zoom.jpg
- [27] Vodní turbíny[online] - [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: http://hgf10.vsb.cz/546/VHZ3/vodni_turbiny.html
- [28] ČKD Blansko Holding[online] - [cit. 2018-09-08]. Dostupné z: <http://www.ckdlh.cz/>
- [29] ČT24 - Luboš Pavlíček: Rotor elektrárny váží 300 tun a spouštěli ho s přesností na 2 centimetry[online] - [cit. 2018-06-06]. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/regiony/1533086-rotor-elektrarny-vazi-300-tun-a-spousteli-ho-s-presnosti-na-2-centimetry>
- [30] PowerWiki - Elektrické části elektrárenských bloků[online] - [cit. 2018-10-08]. Dostupné z: <http://www.powerwiki.cz/attach/EN1Podklady/Elektroenergetika-1-Elektricke casti elektrarenskych bloku.pdf>
- [31] Meteoblue - Průměrná teplota na Dlouhých Stráních[online] - [cit. 2018-10-08]. Dostupné z: https://www.meteoblue.com/cs/pocasi/predpoved/modelclimate/horninadrz-dlouhe-strane_Cesko_7303323
- [32] ČTK - Peřina Luděk: Nové oběžné kolo zvýší produkci elektrárny Dlouhé Stráně[online] - [cit. 2018-10-10]. Dostupné z: <https://www.ceskenoviny.cz/zpravy/nove-obezne-kolo-zvysi-produkci-elektrarny-dlouhe-strane/1672216>
- [33] Elektroenergetika.(podklady ke státnicím)[online] - 2[cit. 2018-11-08]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/16582532-Elektroenergetika-podklady-ke-statnicim-komise-ele-01.html>
- [34] ERÚ - Zprávy o provozu elektrizační soustavy[online] - 2[cit. 2018-11-10]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/cs/zpravy-o-provozu-elektrizacni-soustavy>

- [35] ČEPS - Data[online] - [cit. 2018-11-10]. Dostupné z:
<https://www.ceps.cz/cs/data>
- [36] ČEPS - Kodex PS[online] - [cit. 2018-11-10]. Dostupné z:
<https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>

Příloha C

Technické parametry PVE na našem území

Elektrárna	Štěchovice II	Dalešice	Dlouhé Stráně
Uvedení do provozu	1947	1978	1996
Rekonstrukce	1992 - 1996	2007	2018
Instalovaný výkon [MW]	48	452	650
Objem horní nádrže [mil.m ³]	0,5	127	2,72
Výška hladin horní nádrže maximální minimální [m n.m]	- -	381 331	1348 1326
Objem dolní nádrže [mil.m ³]	11,2	17	3,4
Výška hladin dolní nádrže maximální minimální [m n.m]	- -	303 290	822 800
Délka přivaděčů [m]	590	-	1 547,1 499
Spád[m]	220	90	532
Počet soustrojí	1	4	2
Typ turbín	Francis reverzní FR 180	Francis reverzní	Francis reverzní FR100
Průtok turbínou [m ³ /s]			
Generátorový režim	24	150	68,6
Čerpadlový režim	21	137,5	54,5
Průměr oběžného kola [mm]	2 200	6 000	4 540
Provozní otáčky [ot./min]	600	136,4	428,6
Doba přechodu z nulového do plného výkonu [s]	120	60	100

Tabulka C.1: Přehled technických parametrů PVE v ČR

Příloha D

Energetická bilance

ROK	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Roční energetická bilance [GW/h]	Výroba	587,9	697,2	718	890,9	1 035	1 186	1 156	955
	Spotřeba	795	944	982	1217	1 363	1 570	1 530	1 226
Maximální měsíční energetická bilance [GW/h]	Výroba	72,4	83,4	90,1	101,8	111,6	122,1	117,9	136,3
	Spotřeba	90	115	123	138,9	147,4	161	156,6	183
Maximální týdenní energetická bilance [GW/h]	Výroba	20	22,27	22,34	25,2	27,5	30,1	29,3	33,6
	Spotřeba	23,4	27,4	29,1	33,8	35,7	38,7	37,1	43,4
Hodinové využití našich PVE [h]	Výroba	4 697	4 565	4 182	4 619	4 851	4 911	5 019	4 307
	Spotřeba	2 945	3 110	3 124	3 724	3 505	3 693	3 363	3 224

Tabulka D.1: Přehled hodnot energetické bilance od roku 2010 do roku 2018 [35][34]