

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Způsoby regulace vodních elektráren

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: David ČADEK

Ošobní číslo: E14B0348P

Studijní program: B2644 Aplikovaná elektrotechnika

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: Způsoby regulace vodních elektráren

Zadávací katedra: Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište základní principy a vlastnosti vodních elektráren.
2. Popište současný stav vodních elektráren ve světě.
3. Popište možné způsoby regulace stávajících druhů vodních elektráren.
4. Proveďte zhodnocení daných způsobů z hlediska energetického a ekonomického.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**


Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

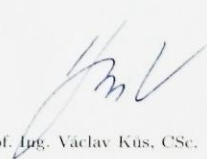
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Mužík**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


Doc. Ing. Jiri Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kus, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Tato bakalářská práce seznamuje v první části s hlavním principem vodních elektráren. Dále jsou zde popsány druhy vodních elektráren a stav vodních elektráren ve světě a v ČR. V druhé části jsou vypsány základní typy turbín a způsob jejich regulace. Druhá část také obsahuje možnosti zvětšení výnosu a účinnosti vodní elektrárny mezi které patří zavedením nových technologií, kombinace provozu s větrnými elektrárnami a možnost trhu s elektřinou. Závěrem jsou vodní elektrárny zhodnoceny z hlediska ekonomického i energetického.

Klíčová slova

Regulace, vodní turbína, vodní elektrárna, generátor, provozní stav

Abstract

In the first part this thesis introduces with the main principle of hydroelectric power plants. There are also described the types of hydroelectric power plants and situation hydroelectric power plants in the world and Czech Republic. Thesis describes the basic types of turbines and way of its regulation in the second section. The second part also includes options to enlarge the yield and the efficiency of hydroelectric power plants, which are the introduction of new technologies, the combination of the service with wind power plants and the possibility of electricity market. At the end the hydroelectric power stations are evaluated in terms of both economic and energetic.

Key words

Regulation, water turbine, hydroelektric power, generator, operating state

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že jsem při jejím zpracování neporušil autorská práva třetích osob.

.....

podpis

V Plzni dne 8.6.2017

David Čadek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Václavu Mužíkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 PRINCIP VODNÍCH ELEKTRÁREN	12
1.1 PARAMETRY VODNÍ ELEKTRÁRNY.....	13
1.1.1 Průtok.....	14
1.1.2 Spád.....	14
1.1.3 Účinnost a výkon.....	14
1.2 DENNÍ DIAGRAM ZATÍŽENÍ.....	15
2 ROZDĚLENÍ	15
2.1 ROVNOTLAKÉ.....	15
2.2 PŘETLAKOVÉ.....	16
3 TYPY VODNÍCH ELEKTRÁREN	17
3.1 AKUMULAČNÍ.....	17
3.2 PRŮTOČNÉ.....	17
3.3 PŘEČERPÁVACÍ.....	17
4 STAV ELEKTRÁREN VE SVĚTĚ	18
4.1 VODNÍ ENERGIE V AMERICE.....	19
4.2 VODNÍ ENERGIE V EVROPĚ.....	20
4.3 VODNÍ ENERGIE V ASIÍ.....	20
4.4 NEJVĚTŠÍ VODNÍ ELEKTRÁRNY NA SVĚTĚ.....	21
4.4.1 <i>Tři soutěsky</i>	21
4.4.2 <i>Itaipu</i>	22
4.4.3 <i>Guri</i>	22
4.4.4 <i>Xiluodu</i>	22
5 ELEKTRÁRNY V ČECHÁCH	23
5.1.1 <i>Velké a přečerpávací vodní elektrárny</i>	23
5.1.2 <i>Malé vodní elektrárny</i>	24
5.1.3 <i>Výroba elektrické energie z vodních elektráren v ČR</i>	25
6 REGULACE VODNÍCH ELEKTRÁREN	26
6.1 REGULACE VODNÍCH ELEKTRÁREN DLE KONSTRUKCE.....	26
6.1.1 <i>Francisova turbína</i>	26
6.1.2 <i>Kaplanova turbína</i>	27
6.1.3 <i>Peltonova turbína</i>	27
6.1.4 <i>Bánkiho turbína</i>	28
6.2 REGULACE VODNÍCH ELEKTRÁREN NA GENERÁTORU.....	29
6.3 PROVOZNÍ STAVY VODNÍCH ELEKTRÁREN.....	29
6.3.1 <i>Ostrovni provoz</i>	29
6.3.2 <i>Obnova provozu soustavy</i>	30
6.3.3 <i>Provoz do elektrické soustavy</i>	31
7 ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI A CELKOVÉHO VÝNOSU	32
7.1 PROVOZNÍ ZDOKONALENÍ.....	32
7.2 NOVÉ TECHNOLOGIE.....	33
7.3 MOŽNOSTI TRHU S ELEKTRICKOU ENERGIÍ.....	33

7.4	KOMBINACE PROVOZU VODNÍCH A VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN	34
8	ZHODNOCENÍ Z HLEDISKA EKONOMICKÉHO A ENERGETICKÉHO	35
8.1	POUŽITÍ VODNÍCH TURBÍN	35
8.2	VÝSTAVBA MVE	35
	ZÁVĚR.....	38
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	1

Seznam symbolů a zkratek

P - Činný výkon [W]

δ - Hustota vody [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

g - Gravitační zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

Q - Průtok [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]

H - Užitený spád [m]

A - Elektrická práce [Wh]

H_b - Hrubý spád [m]

η_c - Celková účinnost [%]

t - Čas [h]

PID - Proporcionální, integrační, derivační regulátor

ES - Elektrizací soustava

PVE - Přecherpávací vodní elektrárna

MVE - Malá vodní elektrárna

OP - Ostrovní provoz

VE - Vodní elektrárna

m - Hmotnost vody [kg]

E - Energie [J]

h - Výškový rozdíl [m]

v - Rychlost vody [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

I - Investiční výdaj

CF - Průměrný peněžní tok

JE - Jaderná elektrárna

Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na regulaci vodních elektráren dle konstrukce a na regulaci na generátoru. Jsou zde rozebrány parametry, princip vodních elektráren a také rozdělení podle způsobu přenosu energie. Je zde také popsán současný stav vodních elektráren jak ve světě tak i v ČR.

Vodní elektrárny jsou velice čistým a stabilním zdrojem pro výrobu elektrické energie a to z důvodu ekonomického dopadu na životní prostředí. Elektrárny se také dobře využívají k regulaci toku řek a ochraně před povodněmi. Výstavba nových elektráren je ale velice drahá záležitost a proto je výhodnější zdokonalit provoz či technologii. Celková světová výroba z vodních elektráren je asi 16% z celkové výroby elektřiny. V současné době spoléhá 25 zemí světa z 90% na výrobu elektřiny z vodní energie a 12 zemí je na ní závislé. Největšími výrobci vodní energie jsou Čína, Kanada, USA, které mají největší instalovaný výkon vodních elektráren.

Na závěr se bakalářská práce zaměřuje na možnosti zvýšení výnosu a zvětšení účinnosti vodních elektráren. Dále jsou vodní elektrárny zhodnoceny z hlediska ekonomického a energetického, výroby a výstavby.

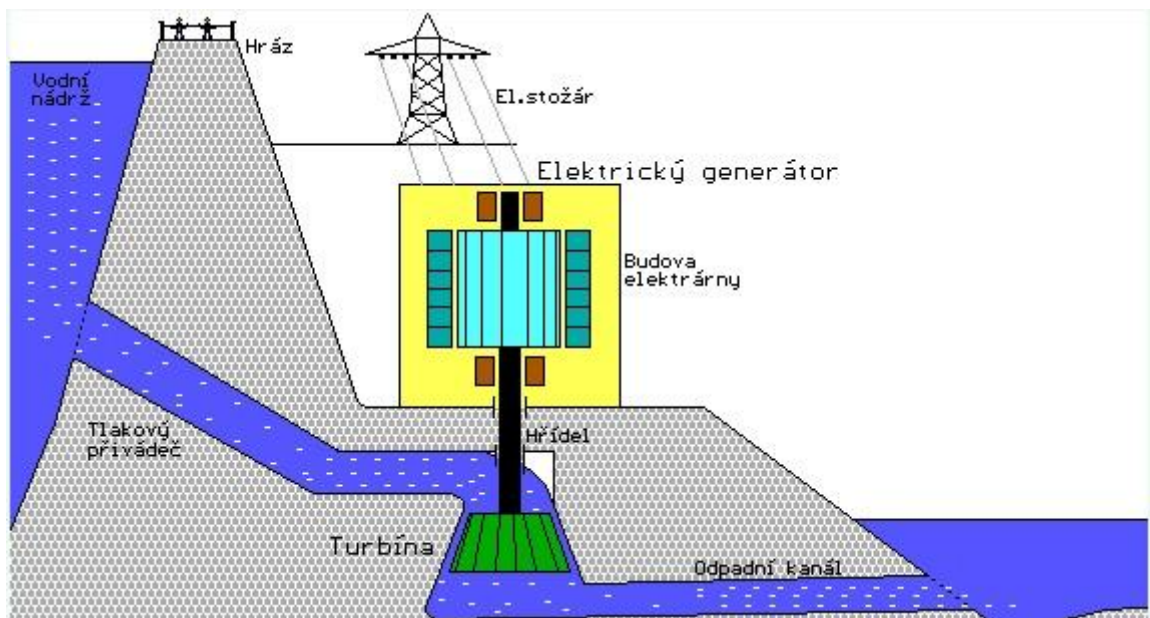
Členění práce

Práce je rozdělena do osmi kapitol. V první kapitole je uveden princip vodních elektráren, druhá kapitola se zaměřuje na rozdělení, třetí kapitola rozděluje typy vodních elektráren, čtvrtá a pátá seznamuje se stavem elektráren ve světě a ČR. Regulace vodních elektráren je sepsána v šesté kapitole. Sedmá kapitola obsahuje zvýšení účinnosti a celkového výnosu. V poslední kapitole je zhodnocení z hlediska ekonomického a energetického.

1 Princip vodních elektráren

Vodní elektrárna využívá gravitační síly vody pro pohánění turbíny a to tak, že turbína je spojená s generátorem, který vyrábí elektrickou energii. Ta je získávána z mechanické energie vody, poté se transformuje a přivádí k místům spotřeby. Získaná energie závisí na rychlosti proudění, resp. na vodním spádu. Energie spádu je součin dvou veličin, využitelného spádu a průtoku. Průtok je veličina závislá na počasí, tzv. proměnlivá, spád je určený tvarem terénu.

Tekoucí voda otáčí lopatky v turbíně, která pohání mechanickou energií rotor generátoru. Generátor poté přemění mechanickou energii na elektrickou energii.



Obr.1 Klasické vodní dílo s gravitační hrází [28]

Výhody vodních elektráren jsou částečná nebo úplná energetická nezávislost, vyšší výkon a stabilnější zdroj energie oproti slunečným a větrným elektrárnám. Životní prostředí zatěžuje téměř minimálně.

Nevýhody jsou ve složité výstavbě, instalaci a možnosti budování jen na místech s optimálním průtokem a spádem. Také náklady na vstupní výstavbu jsou vysoké.

[1][2][3][4]

Z nadmořských výšek hodnocené oblasti a příslušných průměrných průtoků vychází hrubý hydroenergetický potenciál. Je stanovený k hladině moře nebo ke kótě hladiny toků na státních hranicích, proto slouží pouze k evidenčním účelům. Hydroenergetický potenciál byl stanoven k hraniční kótě na hodnotu 18740 GWh/rok, pro Českou republiku. Počítá se podle vzorce $P = \delta \cdot g \cdot Q \cdot H$ neboli $P = 9,81 \cdot Q \cdot H$ [kW]. Mezi dvěma zvolenými profily řeky se dá vypočítat potencionální výkon podle vzorce:

1.1

$$P = 9,81 \cdot \frac{Q_1 - Q_2}{2} \cdot H_{1-2} \text{ [kW]}$$

Reálné využití vodního toku hydroenergetického potenciálu je menší. Energeticky využít vodní tok beze zbytku nelze, protože jsou poblíž města, komunikace, velké objekty a chráněná území. Musíme proto zavést součinitel účinnosti pro využití vodní energie ve formě elektrické energie, který je 0,75.

Přeměňování hydraulické energie na mechanickou v turbíně a mechanické energie na elektrickou v generátoru vzniknou ztráty. Používají se vzorce pro odhadnutí dosažitelného výkonu pro malé elektrárny (do 10 MW) $P = (5 \text{ až } 7) \cdot Q \cdot H$ [kW] a střední a velké elektrárny $P = 8 \cdot Q \cdot H$ [kW].

VE využívají dvě energie a to potenciální (tlakovou) a kinetickou energii. Potenciální energii využívají turbíny Kaplanova a Francisova. Energie vzniká výškovým rozdílem dvou hladin. Tímto rozdílem vzniká tlak, který se využívá v přetlakové turbíně. Tlaková energie se spočítá $E = m \cdot g \cdot h$ [J]. Kinetická energie závisí na proudu vody. Energie se využívá u turbín Bakiho a Peltonova. Velikost této energie zjistíme ze vzorce $E = 1/2 \cdot m \cdot v^2$. Tímto je limitována účinnost VE, pro ideální turbínu. [43]

1.1 Parametry vodní elektrárny

Pro vypočet výkonu a výroby elektrické energie z vodního zdroje jsou potřebné základní veličiny a to průtok, spád a účinnost soustrojí, tj. vodní turbína a elektrický generátor.

1.1.1 Průtok

Udává se v m^3/s a je to celkové protékající množství vody za jednu sekundu. Průtokem rozumíme potřebné množství vody pro turbínu, při ztrátách a daném zatížení. Hltnost turbíny je používaný pojem pro maximální průtok turbínou při daném spádu. Vodními motory hydroenergetického díla prochází největší průtok, který je nazýván průtoková kapacita. Průtoková kapacita závisí na řadě činitelů jako je vodnost toku a jeho kolísání, akumulární a regulační schopnost nádrže, potřeba výkonu a výroby elektrické energie, investiční a provozní náklady a spolupráce s jinými elektrárnami. Její určení je tedy velmi obtížné a závažné jak technicky, tak i ekonomicky. Pro představu průtok Vltavy je $149,9 \text{ m}^3/\text{s}$ a průtok Labe je $711 \text{ m}^3/\text{s}$.

1.1.2 Spád

Rozdělujeme ho na dva druhy: hrubý, celkový spád H_b a užitný, čistý spád H . V největší VE na světě je hrubý spád 110 m. Vodní elektrárna Orlický náhon využívá spád 70,5 m, což je o 40 m více než mají Tři soutěsky.

Hrubý spád je mezi dvěma profily úseku řeky a chceme ho energeticky využít. Určujeme ho jednoduše nivelací, protože je dán při nulovém průtoku vodní elektrárnou rozdílem hladin.

Užitný spád je rozdíl výšek před vodním motorem (turbínou) a za ním. Nejsou v něm zahrnuté hydraulické ztráty v přivaděči a odpadu. V účinnosti turbíny tyto ztráty zahrnuty nejsou. Lze ho určit za dynamického režimu za pomoci Bernoulliho rovnice pro vstupní a výstupní profil turbíny.

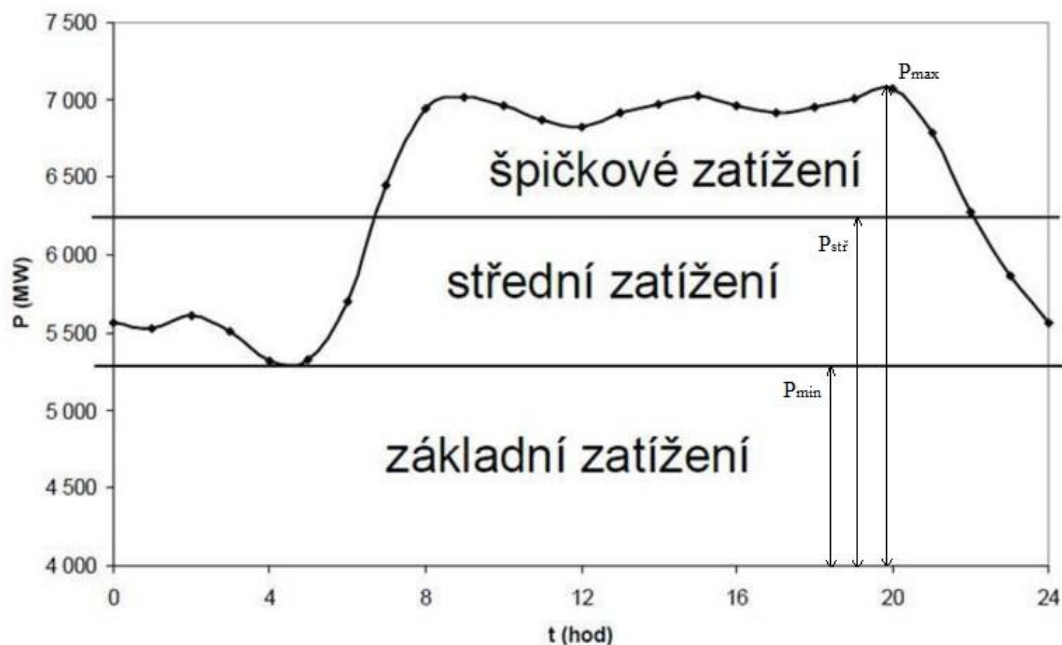
1.1.3 Účinnost a výkon

Účinnost turbíny je poměr mezi skutečným výkonem P (na hřídeli) a teoretickým výkonem P_0 . V celkové účinnosti jsou zahrnuté všechny ztráty, hydraulické, objemové i mechanické. Protékáním vody jednotlivými částmi turbíny vznikají hydraulické a objemové ztráty, mechanické ztráty jsou v ložiskách a ucpávkách soustrojí. Hodnota těchto ztrát se pohybuje v rozmezí 0,80 až 0,94. Další ztráty vznikají vlastní účinností generátoru, která bývá 0,85 až 0,97. Do celkové účinnosti musíme započítat také účinnost transformátoru při transformaci na vyšší napětí. Bývá v rozmezí 0,92 až 0,98.

Výkon na prahu vodní elektrárny je $P = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_c$ [kW], kde η_c je celková účinnost vodní turbíny a generátoru s transformátorem. Výroba elektrické energie za hodinu je při výkonu P a trvajícím času t : $A = P \cdot t$ [kWh;W;h]. [16]

1.2 Denní diagram zatížení

Je to graf, který ukazuje závislost výkonu elektrizační soustavy na čase. Používá se pro řízení provozu elektrizační soustavy. Je rozdělený na základní, střední a špičkové zatížení. V základním zatížení provozujeme průtočné vodní elektrárny. Pro střední a částečně špičkové zatížení využíváme akumulární vodní elektrárny. A při potřebě pokrytí špičkového zatížení spouštíme přečerpávací vodní elektrárny.



Obr.2 Denní diagram zatížení [32]

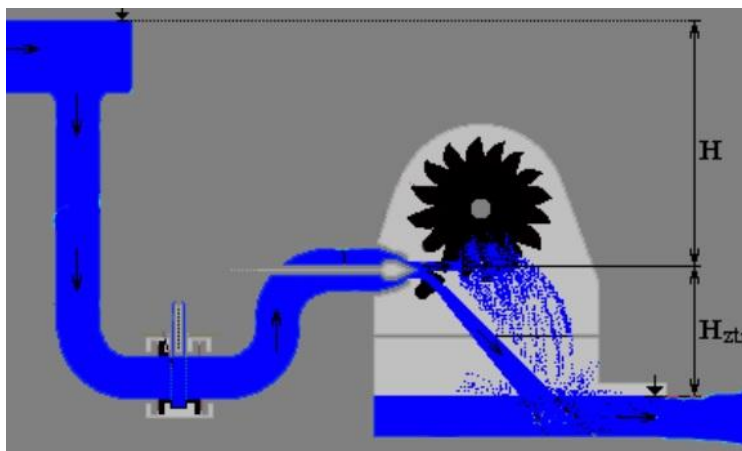
2 Rozdělení

Vodní elektrárny lze rozdělit podle způsobu přenosu energie na rovnotlaké a přetlakové.

2.1 Rovnotlaké

V rovnotlaké turbíně se přeměňuje tlaková energie na kinetickou energii tryskou (vodní paprsek), který zasahuje do lopatek oběžného kola. Paprsek vody nevyplní

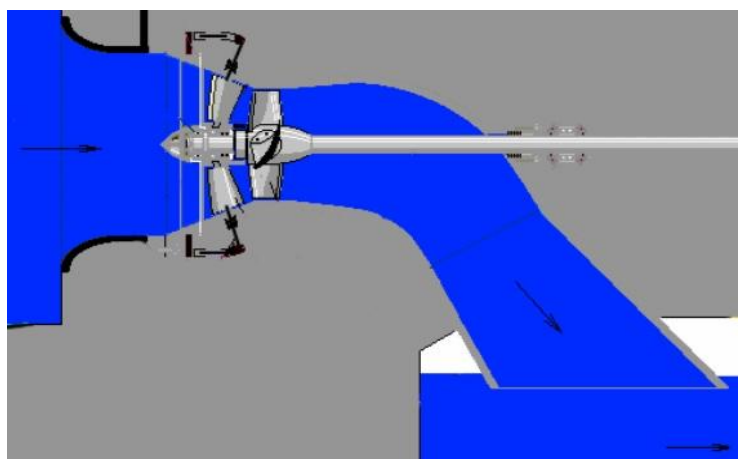
průtočné kanály oběžného kola, proto jsou zaplněné vzduchem. Tlak vody na vstupu i výstupu turbíny je stejný.



Obr.3 Rovnotlaká turbína (Peltonova) [29]

2.2 Přetlakové

V přetlakové turbíně je část tlakové energie přeměněna na kinetickou měrnou energii pro přívod k oběžnému kolu. Zbývající tlaková energie se přeměňuje v kinetickou energii, a to průchodem vody oběžným kolem. Průchodem tlaku a rychlosti vody oběžným kolem se snižuje tlak na výstupu. Tlak vody na výstupu je mnohem menší než na vstupu turbíny. [5]



Obr.4 Přetlaková turbína (Kaplanova) [29]

3 Typy vodních elektráren

3.1 Akumulační

Přehrazením řeky pomocí přehradní hráze je zajištěna akumulace vody a spád. Akumulační elektrárna bývá umístěna přímo pod hrází nebo je spojena s přehradou pomocí tlakového přivaděče. Z akumulací nádrže se řídí odběr vody a podle potřeby pokrývá pološpičkové nebo špičkové zatížení elektrizační soustavy. Výhodou je, že kromě výroby elektrické energie stabilizuje vodní toky a chrání před povodněmi. Nádrž může být zdrojem pitné vody nebo technologické. Využita může být i pro zemědělství nebo průmysl. [6]

3.2 Průtočné

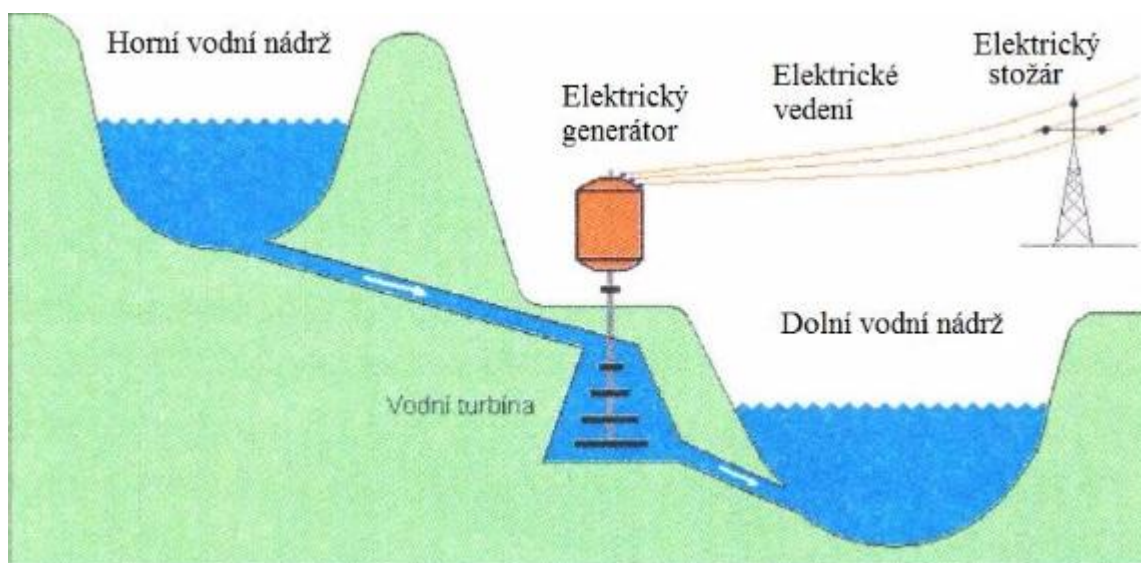
Tato elektrárna je umístěna přímo na průtoku řeky, který však nelze ovlivnit. To znamená, že pokud se překročí průtok vody, na který není vodní elektrárna dimenzovaná, přebytečné množství vody je bez využití. Tyto elektrárny mají malý spád ale stálý průtok, proto je používáme pro pokrytí základního zatížení.

Průtočné elektrárny se dělí na jezové a derivační. Jezová elektrárna používá ke zvednutí hladiny jez. Je to nízkotlaká vodní elektrárna s malým spádem. Derivační vodní elektrárna odebírá pomocí derivačního přivaděče vodu z koryta řeky, která poté roztáčí turbínu elektrárny. Po tomto procesu je odpadním kanálem voda vracena zpět do řeky. Derivační kanál tak zkracuje část řeky aby se zvýšil její spád. [7]

3.3 Přečerpávací

Tyto vodní elektrárny slouží k akumulaci energie. Využívají energie z jiných zdrojů a zajišťují špičkové zatížení. Elektrárny používají dvě vodní nádrže spojené tlakovým potrubím, avšak nádrže musí být různě výškově položené. Poté se energie shromažďuje v podobě potenciální energie vody. Do nádrže, která se nachází výše je čerpána voda využívající nadbytečné elektrické energie a to zejména v případě, kdy je vyšší výroba obnovitelných zdrojů. Naopak voda může proudit i přes turbínu. Potom generátor vyrábí energii pro pokrytí špičkového zatížení elektrizační soustavy. PVE obsahují turbíny i čerpadla nebo speciální čerpadlovou turbínu, která je schopna

čerpat vodu z dolní nádrže a také pohánět generátor. Účinnost v čerpadlovém režimu je cca 90% a v turbínovém režimu 95%. [7]



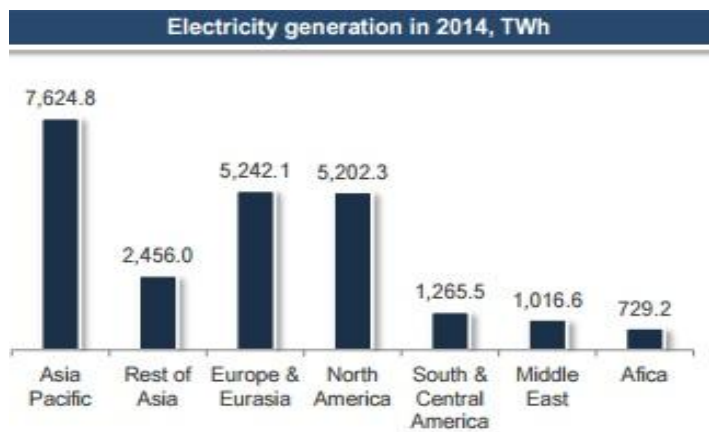
Obr. 5 Princip PVE [35]

4 Stav elektráren ve světě

Světovými velmocemi ve výrobě vodní energii jsou Čína, Brazílie, Kanada a USA. Společně tvoří 52% celkové instalované energie ve světě. V roce 2009/2010 bylo 11 000 vodních elektráren ve 150 zemích. Celková vyrobená energie dosáhla na 3 329 TWh, což představuje 16,5% celosvětové výroby elektrické energie. Odhadovaný instalovaný výkon byl v rozmezí 926 a 956 GW. Výjimkou jsou přečerpávací elektrárny o výkonu 120 až 150 GW. Ruské vodní elektrárny mají odhadovaný výkon mezi 50 až 55 GW. Naopak čínská vodní energie dosáhla 210 GW. [9]

Celosvětové zvýšení výroby vodní energie každý rok přepokládá vzrůst o 3,1% po dobu příštích 25 let. [38]

Asijská a tichomořská oblast má největší instalovaný výkon a dokáže vygenerovat ročně více než 7 600 TWh elektriny. Roční výroba elektriny v Evropě a Severní Americe se přesahuje 5 200 TWh.



Graf. 1 Poměr vyrobené elektrické energie za rok 2014 z VE [39]

4.1 Vodní energie v Americe

Vodní energie ve Spojených státech představuje asi 10% celkové vyrobené energie. Spojené státy mají potenciál k vytvoření 30 000 MW vodní energie využitím 5 677 nezastavených míst. Tento údaj je založen na omezení v oblastech chráněných životních prostředí, právních předpisů a institucí.

V Pensylvánii bychom mohli každoročně vyrobit 5 525 646 MWh elektrické energie. Nicméně toto by představovalo pouze 3% celkové výroby elektrické energie ve státech. Podle americké závěrečné zprávy o hodnocení vodních elektráren je celkem 104 projektů, které mají jmenovitý výkon 2 218 MW. [8]

V Brazílii existují 201 vodních elektráren s instalovaným výkonem větším než 30 MW. Celkový instalovaný výkon těchto elektráren je 84 703 MW. Další 476 VE s výkonem pohybující se mezi 1 až 30 MW vyrábějí celkově 80% z celkové výroby elektřiny. Největší elektrárna a druhá největší VE v světě je Itaipu s instalovaným výkonem 14 000 MW. Další velkou elektrárnou bude Belo Monte Dam, která je ve výstavbě. [37]

Kanada je známa pro své přírodní zdroje a proto je považována za ekologickou velmoc. Vodní energie tvoří 60% celkové vyrobené energie s celkovou instalovanou kapacitou 75 GW. Je očekáván přírůstek kapacity během dvou desetiletí o 14 500 MW ale má potenciál na dvojnásobný rozvoj kapacity. Kanada dosáhla odhadem 380 TWh výroby elektřiny za rok 2016 a předstihli ji jen Čína a Brazílie. [40]

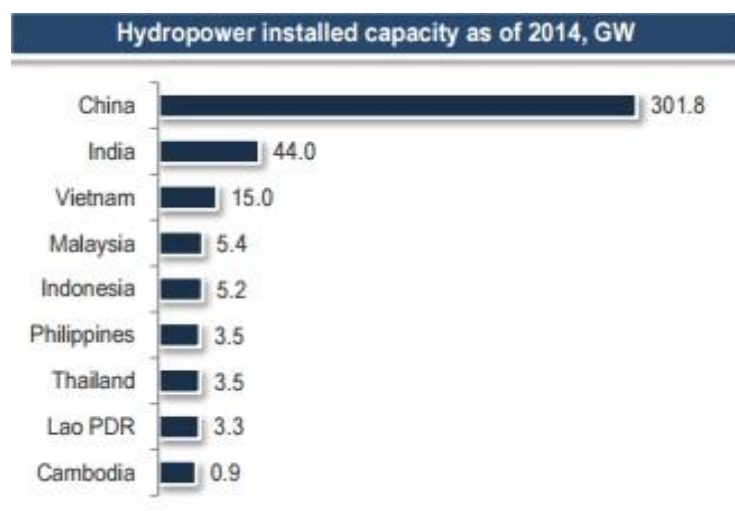
4.2 Vodní energie v Evropě

Na Islandu a v Anglii jsou dvě vodní elektrárny Irafoss a Dinorwig Power Station. Irafoss se nachází na Islandu, kde je jednou ze tří elektráren na řece Sog. Elektrárny jsou navrženy tak, aby poskytovaly elektrickou energii do hlavního města Reykjavík. Stanice Irafoss využívá spádu dvou vodních pádů, které se nacházejí na dolním toku řeky Sog. Kombinovaná hlava obou pádů je 38 metrů a využívá dvě turbíny o výkonech 15,5 MW. V roce 1963 došlo k rozšíření a byla přidána třetí turbína o výkonu 16,7 MW.

Dinorwig Power Station je elektrárna ve Walesu. Tato elektrárna je přečerpávací a může dosáhnout maximálního výkonu 1320 MW za méně než 16 sekund. [8]

V Norsku je výroba elektrické energie tvořena 99% v 237 vodních elektrárnách. Celkový instalovaný výkon je 13 570 MW z toho mezi ty největší vodní elektrárny patří Aurland (1128 MW), Kvilldal (1240) a Sima (500 + 620 MW). [36]

4.3 Vodní energie v Asii



Graf. 2 Instalovaná kapacita v Asii [39]

Nejvíce produktivním státem ve výrobě vodní elektrické energie je Čína. Instalovaný výkon VE představuje více než čtvrtinu celosvětového výkonu. V Asii se vyrobí 32% celosvětové vodní energie a celková kapacita v Číně převyšuje o 22% kteroukoliv jinou zemi. Nově realizovaná cílová hodnota má zvýšit instalovaný výkon až na 430 GW do roku 2020. [38]

V Indii se vyrobí z vodní energie 17,6%. Více než dvě třetiny instalované kapacity se nachází v severní oblasti a MVE mají instalovanou kapacitu 4 055 MW, což představuje 11,3% celkové kapacity. Nejdůležitějším zdrojem elektrické energie ve Vietnamu je právě z VE, které měli podíl 42% na celkové výrobě elektrické energie. Dalším státem v Asii který má instalovanou kapacitu 5,4 GW je Indonésie. V této zemi je rostoucí poptávka po elektrické energii až o 5,5% za pět let. Proto vybudováním nových VE se zvýší instalovaná kapacita na 6,9 GW. [39]

	Installed capacity (GW)		Hydropower's share of total generation (%)
China	210	Norway	99
Brazil	84	Brazil	84
USA	79	Venezuela	74
Canada	74	Canada	59
Russia	50	Sweden	49
India	38	Russia	19
Norway	30	India	18
Japan	28	China	16
France	21	Italy	14
Italy	20	France	8
Rest of world	302	Rest of world	14
World	936	World	16

Tab.1 Deset největších zemí v oblasti vodní energie a podíl na celkové výrobě [9]

4.4 Největší vodní elektrárny na světě

Mezi největší elektrárny na světě patří Tři soutěsky v Číně, Itaipu na hranici Brazílie a Paraguayí a venezuelská Guri.

4.4.1 Tři soutěsky

Tři soutěsky je vodní elektrárna v Yichang provincii Chu-pej, je to největší vodní elektrárna na světě s celkovým instalovaným výkonem 22 500 MW. Jedná se o akumulární elektrárnu na řece Jang-c-ťiang. Hráz je vysoká asi 181 metrů a 2 335 metrů dlouhá. Přehrada má vodní plochu asi 1 045 km² a vede směrem proti proudu asi 600 km. Elektrárna používá 32 soustrojí s jednotlivým výkonem 700 MW, dále využívá dva generátory o výkonech 50 MW, pro pokrytí vlastní spotřeby. Všechny vodní turbíny jsou typu Francis. Roční výroba se odhaduje na 85 TWh, ale v roce 2014 vyprodukovali 98,8 TWh elektrické energie. Vyráběná energie je dodávána do devíti provincií a dvou měst včetně Šanghaje.



Obr.6 Vodní elektrárna Tři soutěsky [33]

4.4.2 Itaipu

Itaipu je druhá největší elektrárna na světě. Instalovaný výkon této elektrárny je 14 000 MW. Nachází se na řece Parana mezi hranicemi Brazílie a Paraguayí. Skládá se z 20 soustrojí o výkonech 700 MW. Vodní elektrárna dodává asi 17,3% spotřeby elektrické energie v Brazílii a 72,5% spotřebované energie v Paraguayi. V roce 2012 bylo touto elektrárnou vyprodukováno 98,2 TWh.

4.4.3 Guri

S výkonem 10 200 MW je čtvrtou největší elektrárnou na světě. Nachází se na řece Caroni v jihovýchodní Venezuele. Elektrárna se skládá z 20 výrobních bloků různých výkonů v rozmezí 130 MW až 770 MW. V letech 2007 a 2009 došlo k rekonstrukci a dodáním pěti Francisových turbín a generátorů o výkonech 770 MW. Elektrárna dodává do Venezuely kolem 12 900 GW elektrické energie za hodinu. [14]

4.4.4 Xiluodu

Tato vodní elektrárna s celkovým výkonem 13 860 MW je třetí největší na světě. Leží na řece Jinsha Jiang v Číně a byla uvedena do provozu v červnu 2014. Xiluodu se skládá ze dvou podzemních elektráren, přičemž má každá 9 soustrojí o výkonech 770

MW. Turbíny jsou typu Francis. Elektrárna generuje zhruba 64 TWh energie ročně. [15]

5 Elektrárny v Čechách

V české republice je asi 1 614 malých vodních elektráren (instalovaný výkon do 10 MW) s celkovým instalovaným výkonem 348 MW. Velké vodní elektrárny mají celkový instalovaný výkon 753 MW. Tento výkon se zajišťuje v devíti elektrárnách. V provozu jsou také tři přečerpávací elektrárny Dlouhé Stráně, Dalešice a Štěchovice II s celkovým instalovaným výkonem 1 175 MW.

5.1.1 Velké a přečerpávací vodní elektrárny

Největší vodní elektrárna v České republice jsou Dlouhé Stráně. Tato elektrárna je přečerpávací a nachází se na Moravě v Hrubém Jeseníku. Kvůli poloze v chráněné oblasti je všechny provoz směřován v podzemí. Celkový výkon zajišťují dvě Francisovy turbíny o výkonu 325 MW. V čerpadlovém režimu mají výkon 312 MW. Jedná se o největší reverzní turbínu v Evropě. K pokrytí vlastní spotřeby používá malou vodní elektrárnu Dlouhé Stráně II s Francisovou turbínou s výkonem 163 kW. [17]

Název	Výkon [MW]	Typ elektrárny	Výroba [GWh]
Dlouhé Stráně	650	Přečerpávací	403
Dalešice	450	Přečerpávací	273
Orlík	364	Akumulační	300
Slapy	144	Akumulační	256
Lipno I	120	Akumulační	90
Štěchovice II	45	Přečerpávací	23
Kamýk	40	Akumulační	58
Štěchovice I	22,5	Akumulační	82
Střekov	19,5	Průtočná	96

Tab.2 Deset největších VE v ČR

Vodní elektrárna Orlík se nachází na řece Vltavě. Řeka je přehrazena hrázi o délce 450 metrů a dosahuje výšky 91 metrů. Vodní nádrž má plochu 26 km², přičemž zvednutí vody na Vltavě dosahuje až 70 km. Jsou zde čtyři soustrojí s Kaplanovými turbínami a celkový instalovaný výkon je 364 MW. Z generátoru jde napěťová hladina 15 kV, která je transformována a přivedena do přenosové soustavy 220 kV. Plného výkonu dokáže dosáhnout do 128 sekund. [18]



Obr.7 Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé Stráně [34]

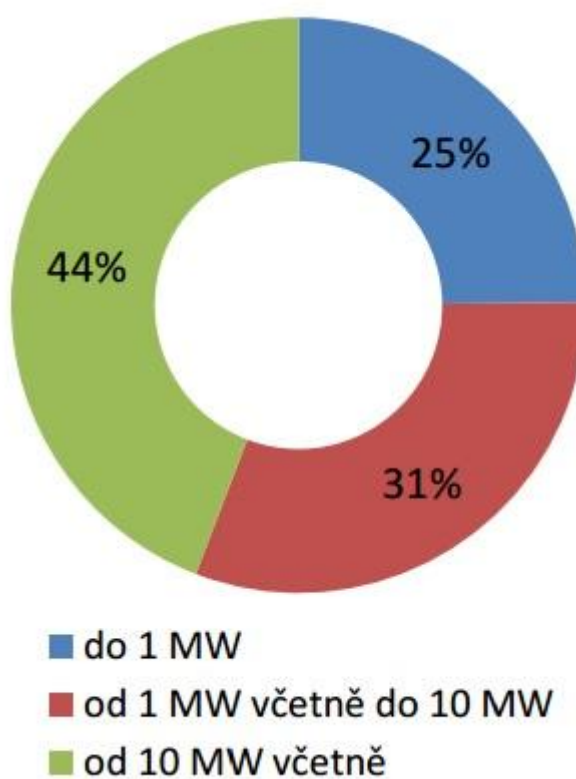
5.1.2 Malé vodní elektrárny

MVE (instalovaný výkon do 10 MW) se podílejí na výrobě elektrické energie asi 11 % z obnovitelných zdrojů a více jak 1% na celkové výrobě elektrické energie. Ročně dokážou společně vyrobit přes 1 TWh elektřiny. Výhodou malých vodních elektráren je podstatně delší životnost, než je doba návratnosti investice. Lze je provozovat desítky let při pravidelném servisu a postupné modernizaci. Další jejich výhodou je, že jsou plošně rozloženy po většině ČR a tak nedochází k ztrátám při přenosu na dlouhé vzdálenosti. Jejich elektrická energie je spotřebovávána blízko její výroby. [19]

Mezi ty větší malé vodní elektrárny patří Vodní elektrárny Práčov nebo Malá vodní elektrárna Hněvkovice. Vodní elektrárna Práčov má instalovaný výkon z jedné Francisovy turbíny 9,75 MW. Vodní elektrárnu nalezneme v Železných horách u Práčova. U vodní nádrže Hněvkovice na řece Vltavě se nachází Malá vodní elektrárna Hněvkovice. Celkový instalovaný výkon zde vyrábí dvě soustrojí s Kaplanovými turbínami o výkonech 4,8 MW. [20][21]

5.1.3 Výroba elektrické energie z vodních elektráren v ČR

Celková výroba elektrické energie v České republice za rok je kolem 84 TWh. Z toho vodní elektrárny vyrobí 1,794 TWh a přečerpávací vodní elektrárny 1,276 TWh. Přečerpávací vodní elektrárny ale i spotřebovávají elektrickou energii při přebytku elektrické energie. Za rok spotřebují více než vyrobí a to o 369 GWh. Na grafu je znázorněn podíl vyrobené elektrické energie. Zelená část označuje vodní elektrárny nad 10 MW, červená část od 1 MW do 10 MW a modrá do 1 MW. Graf ukazuje, že jednu čtvrtinu pokrývají malé vodní elektrárny do 1 MW. [22]



Graf.3 Podíl vodních elektráren na výrobě elektrické energie v ČR [22]

6 Regulace vodních elektráren

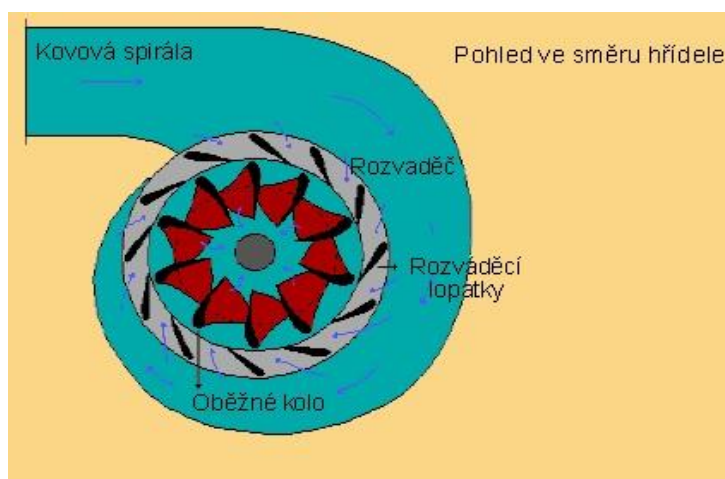
6.1 Regulace vodních elektráren dle konstrukce

6.1.1 Francisova turbína

Jedná se o radiálně-axiální turbínu, která má dvě možnosti umístění hřídele, horizontální a vertikální. Voda přitéká v radiálním směru do turbíny a opouští ji v axiálním směru. Tlak vody klesá, když prochází turbínou a vytváří moment přes lopatky turbíny. Je to tedy přetlaková turbína. Při horizontálním umístění se využívá pro nižší spády při průtoku 0,1-2 m³/s. Toto umístění má o něco horší účinnost než vertikální, ale snižuje stavební náklady, má snazší přístup pro montáž a údržbu a snižuje zatížení axiálního ložiska. Francisova turbína se skládá z kruhové desky upevněné na otočné hřídeli kolmo k jejímu povrchu. Tato kruhová deska se zakřivenými kanály se nazývá oběžné kolo. Oběžné kolo je obklopeno kruhem nepohyblivých kanálů, které nazýváme rozváděcí lopatky. Rozváděcí lopatky jsou umístěny ve spirálovém pouzdru. Výstup z turbíny je uprostřed oběžného kola. Tato turbína může fungovat i jako čerpadlo.

6.1.1.1 Regulace výkonu

Regulace je provedena natáčením rozváděcích lopatek, čímž se mění průtočný průřez i objemový průtok vody oběžným kolem. Změnou směru výstupní rychlosti proudění vody se snižuje účinnost, protože voda nepřichází v optimálním úhlu na lopatky oběžného kola. [10]



Obr.8 Francisova turbína [31]

6.1.2 Kaplanova turbína

Je to přetlaková axiální turbína. Používá se pro malé spády od 2 do 75 m. Pro generování dostatečného množství energie pomocí Kaplanovy turbíny je nutné mít k dispozici velké průtoky přes turbínu. Proto je navržena tak, aby dosahovala velkých průtoků. Voda je přivedena do turbíny pomocí rozváděcích lopatek, které jsou uspořádány tak, že v nich vzniká vířivý tok, který je vhodný pro roztočení rotoru turbíny. Průtok z rozváděcích lopatek prochází skrz zakřivený průchod, který přitlačuje radiální tok k axiálnímu směru s původním vířením přiváděným vstupními rozváděcími lopatkami, který je poté ve formě volného víru. Axiální tok s vířením vody působí na lopatky rotoru a vytváří točivý moment a rotaci v hřídeli. Turbína umí pracovat se stejnou účinností při proměnlivém průtoku pomocí natáčení lopatek.

6.1.2.1 Regulace výkonu

Regulace je umožněna natáčením lopatek rozváděcích, tak i lopatek u oběžného kola. Takto se dokáže plynule regulovat množství přiváděné vody, a tím i výkon při zachování účinnosti. Změnou natočení lopatek rozváděcího kola dosáhneme změnu celkového průtoku i průtoku oběžným kolem. Tím se změní směr vektoru proudu z rozváděcího kola, podle něhož nastavíme lopatky oběžného kola pro zachování účinnosti. [11]

6.1.3 Peltonova turbína

Používá se pro velké spády a průtoky 0,01-3 m³/s. V současnosti se používá převážně horizontální uložení, které má účinnost 85-90%, ale turbína může být umístěna i vertikálně. Peltonova turbína má kruhový disk, který je namontován na otočné hřídeli nebo rotoru. Disk neboli oběžné kolo má miskovitý tvar lopatek. Tyto lopatky nazývané lopaty jsou umístěné ve stejných vzdálenostech od sebe kolem obvodu oběžného kola. Trysky jsou uspořádány kolem kola tak, že vodní paprsek vystupující z trysky je tangenciálně k obvodu kola turbíny. Tlaková energie vody mění kinetickou energii paprsku, který je vstříkovan na lopatky turbíny a generuje točivý moment. Voda volně odtéká z oběžného kola mimo turbínu. Tato turbína má na vstupu i výstupu stejný tlak vody a je tedy rovnotlaká.

6.1.3.1 Regulace výkonu

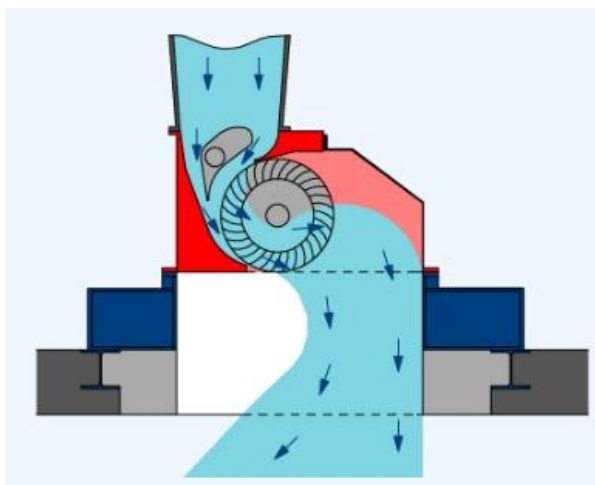
Změna průtoku vody je realizována osovým posuvem jehly ve výtokovém otvoru dýzy (trysky). Při rychlém posuvu jehly k uzavření dýzy vzniká extrémní zvýšení tlaku. K zamezení zvyšování tlaku v přívodním potrubí je proto použita dvojitá regulace. Kombinace pohybu jehly a deflektoru má za následek rychlé snížení výkonu. Deflektor dokáže odklonit vodní paprsek mimo lopatky. [11]

6.1.4 Bánkiho turbína

Jedná se o radiální turbínu, mírně přetlakovou s tangenciálním ostřikem lopatek oběžného kola. Patří mezi nízko-rychlostní turbíny. Průtok vody je přes vstupní potrubí, poté je průtok nasměrován vodíci lopatkami a nakonec vstupuje do oběžného kola. Po průchodu voda dopadá na lopatky oběžného kola na opačné straně a zvyšuje tak účinnost. Poté voda proudí z pláště, a to buď volně nebo savkou pod turbínu. Pokud je průtok vody proměnlivý, je navržena s dvojitou komorou. Užší komora zpracovává malý průtok vody a širší komora střední průtok. Obě dohromady zpracovávají plný průtok. Celková účinnost je u malých spádů 80-84% v celé oblasti průtoků. Maximální účinnost je až 87%.

6.1.4.1 Regulace výkonu

Regulace je provedena pomocí vodících lopatek. Lopatky rozdělují vodní paprsek, vyrovnávají a nechají ho vstoupit do oběžného kola. Lopatky jsou otočné a dokážou docílit plynulé regulace. Mohou sloužit i jako uzavírací zařízení turbíny. [12]



Obr.9 Bánkiho turbína [30]

6.2 Regulace vodních elektráren na generátoru

Regulace na elektrické části bývá ojedinělá. Pokud je generátor přifázovaný k síti s velkým výkonem, udržuje frekvenci generátoru síť. Soustrojí může pracovat i samostatně (autonomě) a frekvence se určuje podle rovnováhy mezi momentem zátěže na elektrické straně a momentem turbíny. Tento provoz dovoluje ponechat turbínu bez regulace a zapojovat na elektrické straně odpory pro rovnováhu momentů. Bohužel je tato regulace ztrátová, protože zatěžovací odpory spotřebovávají přebytečnou energii vyrobenou v turbíně, která by se dala využít. Tato regulace se používá jen vhodných případech, při menších výkonech do 500 kW v průtočných elektrárnách. [23]

6.3 Provozní stavy vodních elektráren

6.3.1 Ostrovní provoz

Při OP není elektrárna připojená k síti, tím se zvyšuje energetická nezávislost. Je to schopnost provozovat elektrárenský blok ve vydělené části vnější sítě tzn. ostrova. Tato schopnost je používána pro předcházení a řešení stavu nouze. V izolované části soustavy se pracuje se značnými změnami frekvence a napětím (systémové veličiny). Pokud klesne frekvence pod 49,8 Hz nebo vzroste nad 50,2 Hz automaticky přechází elektrárenský blok do regulačního režimu ostrovního provozu. Velké nároky se kladou při změnách zatížení ostrova na regulaci činného výkonu bloku. Blok musí být schopen regulovat autonomně vyvolané změny napětí a frekvence.

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

Tab. 3 Vymezení frekvence v Hz pro pásma provozu [24]

Schopnostní požadavky bloku

A: Přechod do ostrovního provozu se charakterizuje při změně frekvence nebo nerovnováhy jalového a činného výkonu. Pokud blok přejde do ostrovního provozu,

musí se změnit režim regulace na proporcionální regulaci otáček, odpojit dálková regulace výkonu a aperiodicky a stabilně přejít s otáčkami na novou hodnotu. Musí dojít k odpojení bloku od sítě a musí se uvést do provozu vlastní spotřeby a poté přepnout regulace bloku do režimu pro ostrovní provoz.

B: Ostrovní provoz musí blokově zajistit regulace a technologické zařízení bloku. V tomto provozu musí být stabilní spolupráce s ostatními bloky zapojenými v ostrovu. Musí být adekvátní odezva činného a jalového výkonu, pro změny napětí a frekvence, i při nenominálních parametrech frekvence a napětí. Ostrovní provoz musí být schopen plynule a jemně měnit otáčky (výkon) podle pokynů dispečera přenosové soustavy. Základní měnění otevírání ventilů, buď automaticky nebo ručně, se provádí na základě zadaných hodnot otáček. Změny provádí dispečink dálkově a bloky musí být na změny připraveny.

C: Nezbytným požadavkem je opětovné připojení ostrova k soustavě. V ostrovním režimu musí blok pracovat minimálně po dobu dvou hodin. Frekvence ostrova se dostatečně plynule a jemně reguluje tak, aby mohl být ostrov znovu přifázován k soustavě. Připojení k vnější síti musí být provedeno při daném kmitočtu a svorkovém napětí 92-108% U_n . Pokud je fázování v rozvodně musí se přivést napětí až do rozvodny přes blokové vedení.

6.3.2 Obnova provozu soustavy

Provoz soustavy poukazuje z praktického hlediska, že čas od času nastávají náhodné jevy, které po seskupení mohou vést k rozsáhlé poruše. Ve světě jsou případy poruch i tak velké, že může dojít k totální ztrátě napětí a výpadku soustavy, tzv. Black-out. Ztráta napětí nese za následek hospodářské ztráty u všech uživatelů soustavy. Velikost ztrát závisí na době trvání poruchy či době výpadku sítě. Zkrácení doby trvání výpadku můžeme dosáhnout pomocí Plánu obnovy. Pro obnovu soustavy je zapotřebí hlavní strategie, která je založena na napojených pět energetických společností (50Hertz Transmission, TenneT, PSE, APG, SEPS) ze sousedních zemí. Dále je důležitá existence vodních elektráren, které dovedou start ze tmy. Pro obnovu soustavy při poruše jsou dány priority spouštění napájení. První prioritou je napájení vlastní spotřeby jaderných elektráren např.: Vodní elektrárna Orlik, která je schopna startu ze tmy napájet vlastní spotřebu jaderné elektrárny Temelín. Po spuštění jaderných

elektráren jsou napájeny systémové klasické elektrárny. Jako první město v ČR je napájena Praha, dále velké městské aglomerace a nakonec ostatní spotřebitelé. [24]

6.3.3 Provoz do elektrické soustavy

Tento provoz vodních elektráren je nejběžnější a dochází při něm k výrobě elektrické energie, která je dodávána do sítě. Dále elektrárna může mít následující provozní stavy: speed control, power control, water level control, flow control, pump control.

Speed control je regulace na zadanou rychlost otáček turbíny. Používá se především v Africe, kde jsou lokální přenosové sítě. V Evropě se kvůli rozlehlým sítím v normálním provozu neuplatňuje, pouze v krizových stavech najde využití. Hlavní funkcí systému je ovládání síťové frekvence v izolované síti. Konstantní frekvence může být jen pokud je rychlost konstantní. Regulátor v hydraulickém systému mění průtok vody a přivádí konstantní hodnotu rychlosti otáček. Vzhledem k tomu, že rychlost proudění vody v malých vodách se zvyšuje či snižuje v závislosti na stavu řeky se používá se PID regulátor, kde D rychle reaguje na změnu vstupní hodnoty. Systém bývá zdokonalen derivačním módem. [25]

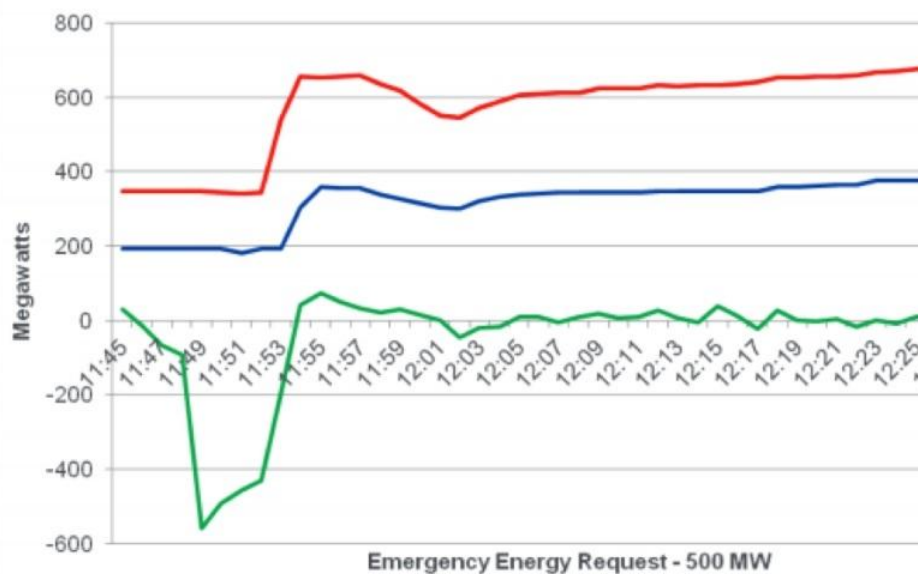
Power control je regulace na zadaný výkon. Hojně se využívá v tvrdých sítích, kde se podle otevření či přivření rozváděcích lopatek reguluje produkovaný činný výkon. Water level control podle otevření rozváděcích rotorových lopatek reguluje konstantní rozdíl hladin před a za elektrárnou. Flow control reguluje konstantní průtok vody. Režim Pump control se využívá v režimu pumpy, tedy u přečerpávacích elektráren.

7 Zvýšení účinnosti a celkového výnosu

Dosažení větší účinnosti z existující vodní elektrárny přináší a může vést k větší flexibilitě elektrizační soustavy. Flexibilita je tak nezbytně dána vzrůstajícím množstvím solární a větrné energie integrovaných do elektrického systému. Všeobecné povědomí veřejnosti je, že nové investice ve vodních elektrárnách jsou nepravděpodobné kvůli environmentálním obavám, regulačním překážkám a chudé ekonomice. Zatímco je tady možnost, že některé z těchto překážek mohou být překonány současnou legislativou, že by bylo mnohem snazší zvýšit účinnost v existujících vodních elektrárnách než budovat nové. Přidaná hodnota vodní elektrárny může být zajištěna třemi způsoby: provozním zdokonalením, novými technologiemi a příležitostmi trhu elektřiny.

7.1 Provozní zdokonalení

Existující zařízení má možnost několik operačních změn. Optimalizace zařízení může zvýšit výkonnost těchto zařízení a zvýšit celkový výnos pro provozovatele o 1-3%. Trh by mohl také být přizpůsobený a dovolit tak vodním elektrárnám konkurovat jako flexibilní rezerva v řízení variability a snížení cyklování tepelných elektráren. Je tady čistá hodnota přidaná ze zvyšování použití flexibilních rezerv, ačkoli nejasný měnový kompromis mezi poklesem opotřebováním tepelných elektráren a zvyšujícím se používáním vodních elektráren. Jiná operační změna by mohla být kompenzace vodních elektráren pro zajištění spolehlivosti a zabezpečení rozvodných sítí, které by mohlo zvýšit příjem z každé elektrárny cca o 40%. Na obr.6 je ukázáno využití dvou vodních přečerpávacích elektráren (červená a modrá linie), které kompenzují výpadek v elektrizační soustavě znázorněný chybou (zelená linie). Při výpadku se spouští dvě přečerpávací elektrárny, ty vyrovnávají úbytek výkonu v elektrizační soustavě. Tyto druhy služeb rozvodných sítí se stanou důležitější, protože jsou využívány jako více variabilní zdroj a prognózy se musí přizpůsobit novým technologiím.



Graf.4 Vyrovnání chyby dvěma přečerpávacími elektrárnami [13]

7.2 Nové technologie

Vytvoření mechanických a technologických změn v průmyslu vodních elektráren může také zvýšit zisk. Například, expanze operačního rozmezí zařízení může zvýšit příjem zařízení o 61%. Rozšíření operačního rozmezí znamená pozměnění technologie, slouží k nižším nákladům a vyšším hodnotám jako procento výkonnosti. Modernizovaná zařízení s možností změny nebo upravenou rychlostí hnacího mechanismu také mění schopnost těchto jednotek vyhovět různým druhům požadavků. Tato změna by mohla zvýšit zisk zařízení o 85%.

7.3 Možnosti trhu s elektrickou energií

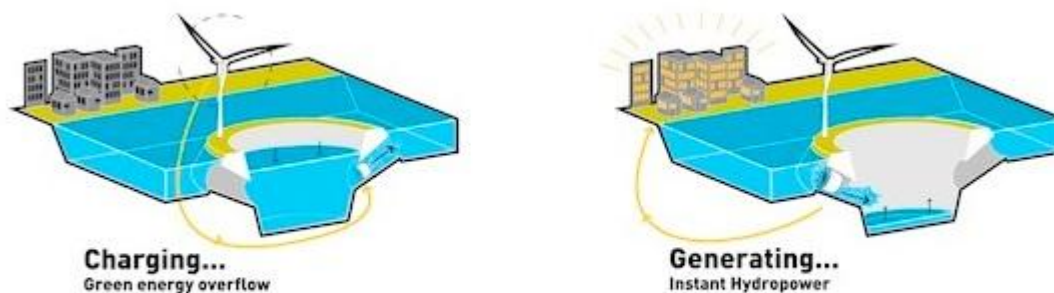
Změny v řízení trhu by mohly také vytvořit více příležitostí pro vodní elektrárny. Náhradní hodinové rozvržení vede k širší účasti a flexibilitě kompenzace. Vodní elektrárny mohou přijmout kompenzaci za rozvržení pokrokového trhu. Přinesení více požadavků odpovídá trhu, který by pomohl dovolit všem agregátům (včetně vodních elektráren) přijmout ceny konkurenční energie a doplňkových služeb. Kdyby byla rovnost mezi všemi, tyto změny by mohly snížit cenu elektřiny o 5%.

Nezávislý systém provozovatelů rozvrhující zdroje vodních elektráren přes několik hodin nebo dní by mohl také povolit optimalizaci vodních elektráren v kontextu dalších zdrojů. Tento přístup pevně stanoveného plánu by mohl zvýšit zisk zařízení o 63 až 77%. Tato situace ignoruje synergický potenciál vodních elektráren, částečně v

kontextu různorodých zdrojů. Propojení přečerpávacích vodních a větrných elektráren v noci by mohlo efektivně optimalizovat oboje. Trh by také mohl nakládat s vodní energií jako s novou zásobárnou přednostní třídy. Tedy od vodní elektrárny poskytující podporu, vytvářející energie a finanční kompenzaci by mohly být oceněny za tyto služby. Významnou předností vodních elektráren je flexibilita a schopnost odpovídat rychle na vzrůst spotřeby rozvodné sítě, když se jedná o regulační zdroj. [13]

7.4 Kombinace provozu vodních a větrných elektráren

Použitím větrné energie v době kdy je jí přebytek, pro použití pohonu vodních čerpadel přečerpávací elektrárny by se mohlo využít pro efektivnější proces a užitečné vyhlazení variability energie zachycené z větru. Minimalizuje se tak dopad na životní prostředí a přečerpávací elektrárna dosáhne většího využití. Princip fungování této kombinace spočívá v tom, že při poptávce energie ve špičce bude přečerpávací elektrárna pracovat v turbínovém režimu. Přečerpávací elektrárna bude zároveň vyrovnávat výkyvy ve výrobě elektrické energii z větrných turbín. Tedy tento přebytek energie z větrných turbín bude využíván na čerpání vody do horních nádrží přečerpávací elektrárny. Architektonické studio Gottlieb Paludan přichází s projektem Green Power Island, který spočívá v tom, že se vybudují rozsáhlé vodní nádrže u opuštěných ostrovů, které budou fungovat jako přečerpávací elektrárny. Ty se zkombinují s větrnými či solárními elektrárnami. V Green Power Island, bude přečerpávací elektrárna opačně, a to tak že přebytečná energie z větrné elektrárny bude využívána pro vyčerpávání vody z nádrže a při nedostatku energie se ponechá, aby do nádrže přitékala. [26][27]



Obr. 10 Opačně fungující přečerpávací vodní elektrárna [26]

8 Zhodnocení z hlediska ekonomického a energetického

Výstavba vodní elektrárny není levná záležitost, a proto se musí zvolit co nejúčinnější typ vodní elektrárny. Vodní elektrárnu také nelze vybudovat na kterémkoliv místě řeky z důvodu dopadu na životní prostředí (zaplavení velké části území) či nedostatečného průtoku řeky. Použitím vhodné turbíny pro malé, střední a velké spády zajistíme dostatečnou účinnost.

8.1 Použití vodních turbín

Pro malé spády do dvaceti metrů je výhodné zvolit správný typ turbíny. Turbínu volíme typu Bánkiho či Kaplanovu. Kaplanova turbína umí využít malé spády díky nastavitelným lopatkám a dosahuje vyšší rychlosti otáčení než je rychlost průtoku vody, proto má velkou účinnost. Tato turbína je konstrukčně náročná a proto se bude pohybovat cenově výše než je Bánkiho turbína. Použitím Bánkiho turbíny by se dalo více ušetřit a to i tím, že lze amatérsky vyrobit. Tato turbína najde především využití u malých vodních elektráren.

U středních spádů od dvaceti do sta metrů můžeme použít Kaplanovu turbínu, ale i moderní typ Francisovy turbíny. Francisova turbína může fungovat také jako čerpadlo, a proto se dobře uplatňuje u přečerpávacích vodních elektráren, kde se ušetří za nákup čerpadel.

U vysokých spádů, které bývají někdy až pětset metrů se uplatňuje Peltonova turbína. U této turbíny voda neprotéká celým obvodem, ale je vstříkována do lopatek turbíny. Tyto lopatky mají rychlost otáčení nižší než je průtok vody, ale za to při přeměně na elektrickou energii je velice efektivní.

8.2 Výstavba MVE

Vodní elektrárna může být postavena podle vodního toku. Takové typy vodních elektráren jsou průtočné, akumulární a přečerpávací. Finanční náklady na výstavbu jednotlivých elektráren budou rozdílné. Nejlevnější výstavba je u průtočné elektrárny, větší náklady investujeme do akumulární elektrárny a nejvíce finančně náročná je přečerpávací vodní elektrárna. Vše ale závisí na dané oblasti výstavby. V každé

elektrárně není možné využít kterýkoliv typ turbíny, to závisí na průtoku a spádu vodního díla.

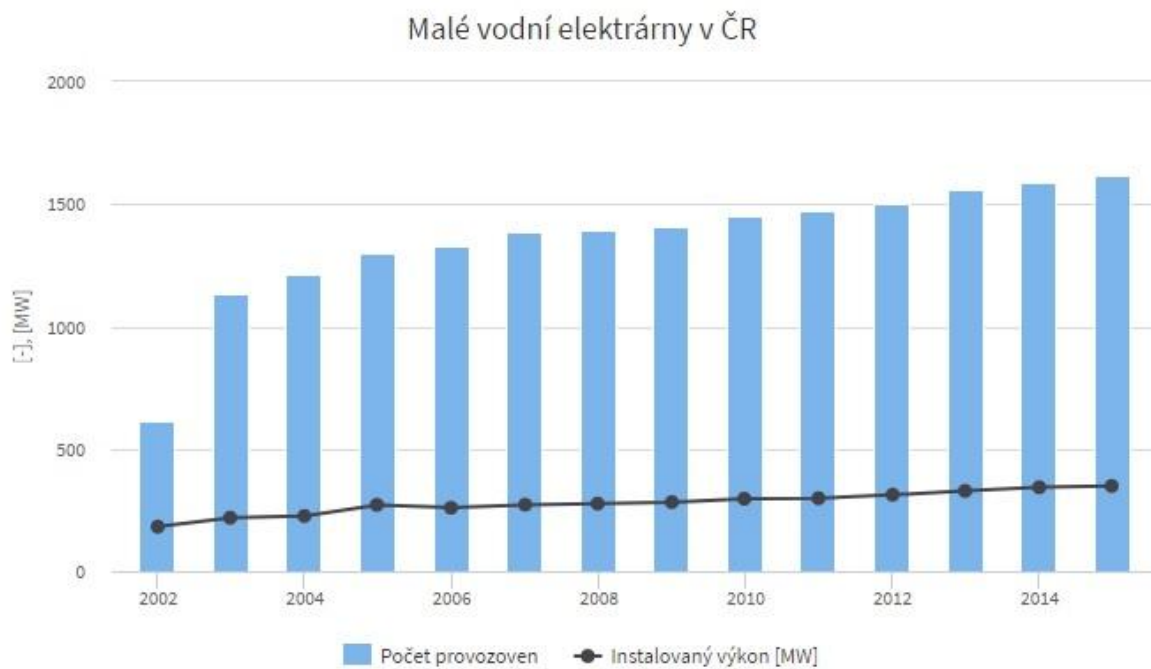
Rozvoj hydroenergetiky vhodné lokality pro velké VE je v ČR vyčerpán ale rozvoj MVE má slušný potenciál. Zajímavá investice může být do MVE, protože mají dlouhodobou životnost a nízké náklady na údržbu. Roční výroba MVE s instalovaným výkonem 25,2 kW dosahuje 126 MWh. Tato elektrárna by měla předpoklad 5 000 hodin provozní doby (57% času), pokryla by asi 23 čtyřčlenných domácností.

K vybudování nové MVE je zapotřebí stavební povolení, povolení k nakládání s povrchovými vodami a elektrárny nad 100 kW vyžadují Státní autorizaci na výstavbu vodní elektrárny. K připojení do ES je potřeba smlouva o připojení MVE. Lepším řešením je rekonstrukce stávající MVE. Toto řešení bývá méně nákladné, nežli je výstavba nové elektrárny. Velký potenciál je v obnově provozu odstavených starších MVE, protože náklady na výstavbu jsou velmi sníženy díky z původním pozůstatkům odstavené elektrárny. [41]

rok	příjem [Kč]	výdaj [Kč]	cash-flow [Kč]
2005	278 185	50 000	228 185
2006	303 482	50 000	253 482
2007	345 421	50 000	295 421
2008	419 184	50 000	369 184
2009	394 126	50 000	344 126
SUMA	1 740 398	1 440 000	-
Průměr	xxx	xxx	298 080

Tab. 4 Pětiletý přehled příjmů a výdajů MVE [42]

Investice dvou vodních elektráren podobné kapacity na technologii i stavební práce se liší v poměru 7:1, kdy větší investiční náklady vynaložíme na malý spád a velký průtok oproti elektrárně s vysokým spádem a malým průtokem. Peněžní návratnost MVE lze vypočítat tam, kde lze předvídat krátkou investiční dobu. Vzorec pro výpočet je $t = I/CF$, to znamená doba návratnosti (t) se rovná podílu investičního nákladu (I) a průměrnému peněžnímu toku (CF). Peněžní tok je rozdíl mezi příjmy a výdaji za dílčí období a tak se určí průměrný peněžní tok. [42]



Graf.5 Rozvoj MVE [6]

Na grafu č. 5 je znázorněn rozvoj malých vodních elektráren v ČR. Za posledních 15 let se počet MVE zvýšil o 1000. Malé vodní elektrárny by mohly pomoci zvýšit výrobu elektrické energie a tím i omezit produkování emisí z tepelných elektráren. Při vysokém počtu těchto MVE je dobré i zhodnotit použití nové technologie u stávajících vodních elektráren. [6]

Závěr

V bakalářské práci je popsán základní princip vodní elektrárny. Množství vyrobené energie závisí na velikosti spádu a průtoku. Větší množství vyrobené elektrické energie nemůžeme získat než ze vzorce $P = \delta \cdot g \cdot Q \cdot H$, protože produkce kinetické a tlakové energie nelze měnit. Mechanická, objemová a hydraulická účinnost není 100% a proto nelze využít vodní potenciál beze ztrát.

Přínos práce

Ve výrobě vodní energie je velmocí Čína, která má největší instalovaný výkon (220 GW). Dalšími zeměmi s velkým instalovaným výkonem jsou Brazílie, USA a Kanada. V Norsku je ale výroba elektrické energie z 99% z vodních elektráren. Za Norskem s 80% výroby elektrické energie z vodních elektráren je Brazílie. Největší elektrárnou na světě jsou čínské Tři soutěsky, ale v roční výrobě se Třem soutěskám rovná vodní elektrárna Itaipu, která má o 8 000 MW menší instalovaný výkon. V ČR dosahuje roční výroba elektrické energie 1 TWh z vodních elektráren, ale z tohoto množství energie vyrobí 66% malé vodní elektrárny. Počet malých vodních elektráren v ČR se pohybuje okolo 1 614.

Regulace výkonu vodní elektrárny se liší podle typu turbíny. Většinou se mění průtok vody do turbíny za pomoci lopatek. Další možností je regulovat výkon na generátoru, kam se připojují ztrátové odpory. Tato metoda se ale používá jen u velmi malých vodních elektrárnách.

Možností zvýšení účinnosti vodních elektráren je kombinace s větrnými elektrárnami, kdy se přebytky větrné energie využívají k čerpání vody u přečerpávacích elektráren. Další možností je použití nových technologií k zvýšení účinnosti.

Velkou výhodou vodních elektráren je start ze tmy a různé provozní stavy. Vodní elektrárna má hlavní roli při obnově ES a vyrovnávání stability provozu a pokrytí špičkové spotřeby soustavy.

Budoucnost práce

Vodní elektrárny mají budoucnost a hlavně klíčový podíl ve výrobě elektrické energie. Jejich hlavní výhodou je ekonomický dopad na životní prostředí, proto jsou hlavním obnovitelným zdrojem pro výrobu elektrické energie. Vodní energie je nejvíce tvrdým a kompatibilním obnovitelným zdrojem energie. Jsou vhodné pro neočekávanou poptávku v důsledku nedostatku energie použitím PVE. Na světě je mnoho příležitostí rozvoje až 10 000 TWh ročně nevyužitá vodní energie. Takové množství energie by mohlo pokrýt roční spotřebu ČR až na 10 let.

Každým rokem spotřeba elektrické energie vzrůstá. Jen v Asii každá země zvýší spotřebu elektřiny o 4 až 8%. Tyto země musí rozšiřovat energetické rozvětvení a mohly by využít rozvoj a výstavbu vodní energie k pokrytí spotřeby. Další možností je předávat přebytky elektrické energie v období léta zvětšením propojení s oblastmi trpícími nedostatkem elektřiny.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Construction working and history of hydro power plant [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/hydro-power-plant-construction-working-and-history-of-hydro-power-plant/>
- [2] Princip fungování vodních elektráren [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/flash-model-jak-funguje-vodni-elektrarna.html>
- [3] Vodní elektrárny - mikro, malé i velké - druhy, principy, provedení [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2006121301>
- [4] Hydroelectric power [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <https://www.usbr.gov/power/edu/pamphlet.pdf>
- [5] Comparison between impulse turbine and reaction turbine [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <https://me-mechanicalengineering.com/comparison-between-impulse-turbine-and-reaction-turbine/>
- [6] Vodní elektrárny - princip, rozdělení, elektrárny v ČR [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/obnovitelne-zdroje-energie/vodni-elektrarny-princip-a-rozdeleni/>
- [7] Využití energie vodního spádu [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/05.html#menu>
- [8] A study of hydroelectric power: form a global perspective to a local application [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.ems.psu.edu/~elsworth/courses/cause2003/finalprojects/vikingpaper.pdf>
- [9] Hydropower [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: https://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis-hydropower.pdf
- [10] Hydraulic turbine: Francis turbine [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.brighthubengineering.com/fluid-mechanics-hydraulics/27407-hydraulic-turbines-francis-turbine/>
- [11] Vodní turbíny v elektrárnách [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://strojarna.webnode.cz/s4/sps/>
- [12] Crossflow turbine [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://cink-hydro-energy.com/en/2-cell-crossflow-turbine/>
- [13] Three ways to increase hydropower efficiency and revenues [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.renewableenergyworld.com/articles/2013/05/three-ways-to-increase-hydropower-efficiency-and-revenues.html>

- [14] The 10 biggest hydroelectric power plants in the world [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.power-technology.com/features/feature-the-10-biggest-hydroelectric-power-plants-in-the-world/>
- [15] Xiluodu hydroelectric power plant [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.power-technology.com/projects/xiluodu-hydroelectric-power-plant/>
- [16] BROŽA, Vojtěch a spol. *Využití vodní energie*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1993. 251 s. ISBN 80-01-00392-2
- [17] Přecherčpávací vodní elektrárny v České republice [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrarny-cr/precerpavaci-vodni-elektrarny-v-ceske-republice/>
- [18] Vodní elektrárny v ČR: Vltavská kaskáda - 1. část [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrarny-cr/vodni-elektrarny-v-cr-vltavska-kaskada-1-cast/>
- [19] Malé vodní elektrárny [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/clanek/vodenerg/99343/malych-vodnich-elektraren-pribyva-ale-pomalu>
- [20] Malá vodní elektrárna Hněvkovice [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Mal%C3%A1_vodn%C3%AD_elektr%C3%A1rna_Hn%C4%9Bvkovice
- [21] Vodní elektrárna Práčov [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vodn%C3%AD_elektr%C3%A1rna_Pr%C3%A1%C4%8Dov
- [22] Roční zpráva o provozu ES v ČR [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2015.pdf/3769f65b-3789-4e93-be00-f84416e1ca03
- [23] MELICHAR, Jan, VOJTEK, Jan, BLÁHA, Jaroslav. *Malé vodní turbíny, Konstrukce a provoz*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1998. 299 s. ISBN 80-01-01808-0
- [24] Kodex přenosové soustavy: 5. část [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: https://www.ceps.cz/CZE/Media/Tiskove-zpravy/Documents/%C4%8C%C3%A1stV_15_fin.pdf
- [25] Simulation for speed control of the small hydro power plant using PIN controllers [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: https://www.ijareeie.com/upload/2014/april/15_Simulation.pdf
- [26] Přecherčpávací elektrárny - ideální doplněk pro solární a větrné zdroje [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.ekobydleni.eu/energie/precerpavaci-elektrarny-idealni-doplnek-pro-solarni-a-vetrne-zdroje>

- [27] Projekt Gaildorf: přečerpávací elektrárna v kombinaci s větrnými turbínami [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/obnovitelne-zdroje/94.php>
- [28] Energie vody [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: http://ok1zed.sweb.cz/s/el_vodniel.htm
- [29] Vodní elektrárny [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/8131289-Kee-ven-vybrane-partie.html>
- [30] Dvoukomorová průtoková turbína [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://cink-hydro-energy.com/cs/dvoukomorova-prutokova-turbina/>
- [31] Francisova turbína [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: http://www.energyweb.cz/web/schemata/vodni/img/francis_schema.htm
- [32] Výroba a distribuce elektrické energie [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2018554/>
- [33] Vodní elektrárna Tři soutěsky [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://pages.vassar.edu/realarchaeology/files/2015/11/blog-photo-1.jpg>
- [34] Vodní elektrárna Dlouhé stráně [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.denik.cz/ekonomika/dlouhe-strane-jsou-nejvykonnejsi-vodni-elektrarnou-v-cr-20160617.html>
- [35] Elektrotechnika - přečerpávací vodní elektrárna [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/1108690-Elektrotechnika-kod-oboru-21-42-m-01-zamereni-hlubinne-dobyvani-lozisek-jan-kubica-jiri-wojnar.html>
- [36] List of power stations in Norway [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_power_stations_in_Norway
- [37] List of hydroelectric power stations in Brazil [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_hydroelectric_power_stations_in_Brazil
- [38] Hydro power in China [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://www.ecology.com/2013/03/28/hydro-power-in-china/>
- [39] Hydropower in Asia Pacific [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <https://www.emis.com/sites/default/files/EMIS%20Insight%20-%20Hydropower%20in%20Asia%20Pacific%20.pdf>
- [40] Canada statistic [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <https://www.hydropower.org/country-profiles/canada>
- [41] Investice do decentrálních zdrojů energie [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/ekonomicke-analyzy/investice-do-decentralnich-zdroju-energie-3-dil-mala-vodni-elektrarna/>

- [42] Výhodnost provozu MVE a mikrozdrojů [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&ved=0ahUKEwjslLPapazUAhUrOJoKHTT4BM4QFghcMAg&url=http%3A%2F%2Fis.mendelu.cz%2Fzp%2Fportal_zp.pl%3Fprehled%3Dvyhledavani%3Bpodrobnosti%3D31753%3Bdownload_prace%3D1&usg=AFQjCNGNY8Sa42CaN1OZsCV29rWwdUMHdQ&sig2=MN-apE-zhm2jrWThVjtXOQ
- [43] Výroba a užití elektrické energie [online].[cit. 2017-06-04]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/vuee/Vuee_ucebni_texty.pdf