České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Bakalářská práce

Optimalizace výkonu vodní elektrárny

Bronislav Robenek

Vedoucí práce: Ing. Radek Beňo

Studijní program: Kybernetika a robotika, Bakalářský

Obor: Systémy a řízení (bakalářský)

Květen 2013

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Radku Beňovi za jeho rady a čas, který mi věnoval při řešení zadaných úkolů. A také bych rád poděkoval svým rodičům za jejich vždy přítomnou podporu během mého studia.

Prohlášení

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

V Praze dne 23. 5. 2013

.....

Podpis

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Bronislav Robenek**

Studijní program: Kybernetika a robotika
Obor: Systémy a řízení

Název tématu: **Optimalizace výkonu vodní elektrárny**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s fyzikálním principem přeměny kinetické energie vody na elektrickou energii v soustrojí vodních elektráren a s dokumentací k VD Březová
2. Sestavte model Francisovy turbíny a generátoru
3. Na základě odvozeného modelu proveďte optimalizaci celkového výkonu vodní elektrárny bez omezení
4. Po podložených úvahách proveďte optimalizaci celkového výkonu vodní elektrárny s omezením

Seznam odborné literatury:

[1] T. Ryčl. Hladinová regulace na vodních tocích, Bakalářská práce, ČVUT v Praze, Praha 2012
[2] F.T. Brown. Engineering system dynamics: A Unified Graph-Centered Approach, Taylor & Francis Group, Boca Raton 2007
[3] W.S. Janna. Introduction to Fluid Mechanics, Taylor & Francis Group, Boca Raton 2010
[4] J. Melichar, J. Vojtek a J. Bláha. MALÉ VODNÍ TURBÍNY - Konstrukce a provoz, Vydavatelství ČVUT, Praha 1998

Vedoucí: Ing. Radek Beňo

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2013/2014

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta elektrotechnická
LS

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 2. 2013

Abstract

Hydroelectric power plants are typically equipped with several in parallel arranged turbines, which convert the potential energy of the water into a rotary movement of the shaft and then into electrical energy in generators. This work deals with optimization of the overall performance of hydroelectric power plant finding the distribution of the total flow into individual turbines. Another part of this work is derivation of appropriate models for Francis turbine and asynchronous generator.

Keywords: Hydroelectric power, Francis turbine, Optimization

Abstrakt

Vodní elektrárny mívají typicky několik paralelně řazených turbín, které přeměňují potenciální energii vody na rotační pohyb hřídele a následně na elektrickou energii v generátorech. Tato bakalářská práce se zabývá optimalizací celkového výkonu vodní elektrárny nalezením distribuce celkového průtoku elektrárnou mezi jednotlivé turbíny. Součástí práce je také nalezení vhodných modelů Francisovy turbíny a asynchronního generátoru.

Klíčová slova: Vodní elekrárna, Francisova turbína, Optimalizace

Obsah

1 Úvod **1**
1.1 Stavba vodní elektrárny 2
1.2 Turbíny a přeměna energie 3
1.2.1 Kaplanova turbína 5
1.2.2 Francisova turbína 5
1.2.3 Peltonova turbína 7
1.3 Řízení vodní elektrárny 7
1.4 Motivace optimalizace řízení 8

2 Model soustrojí vodní elektrárny **9**
2.1 Model Francisovy turbíny 11
2.1.1 Rozváděcí kolo 12
2.1.2 Oběžné kolo 13
2.1.3 Identifikace parametrů 14
2.2 Model generátoru 16
2.3 Výpočet účinností 18

3 Optimalizace řízení **21**
3.1 Optimalizace bez dalších omezení 22
3.2 Optimalizace s dalšími omezeními 23

4 Závěr **25**

A Seznam použitých zkratek **29**

B Obsah přiloženého DVD **31**

Seznam obrázků

1.1 Vodní elektrárna 3
1.2 Turbíny dle přeměny energie 4
1.3 Vhodná aplikace turbín 4
1.4 Nákres Kaplanovy turbíny 5
1.5 Fotografie Kaplanovy turbíny 5
1.6 Nákres Francisovy turbíny 6
1.7 Fotografie Francisovy turbíny 6
1.8 Nákres Peltonovy turbíny 7
1.9 Fotografie Peltonovy turbíny 7
1.10 Schéma řízení vodní elektrárny 8

2.1 Fotografie strojovny VD Březová 9
2.2 Blokové schéma vodní elektrárny 11
2.3 Schéma rozváděcího kola 12
2.4 Maximální průtok turbínami T1 a T2 15
2.5 Maximální průtok turbínou T3 15
2.6 Model generátoru 18
2.7 Graf účinnosti TG1 a TG2 19
2.8 Graf účinnosti TG3 19
2.9 Celkový model soustrojí 20

3.1 Optimální mapa řízení bez dalších omezení 23
3.2 Optimální mapa řízení s dalšími omezeními 24

B.1 Obsah přiloženého DVD 31

Seznam tabulek

2.1 Technické parametry VD Březová 11
2.2 Technické parametry modelovaných turbín (štítkové údaje). 14
2.3 Identifikované parametry modelu turbín 15
2.4 Technické parametry modelovaných generátorů (štítkové údaje). 17
2.5 Identifikované parametry modelu generátorů 17

Kapitola 1

Úvod

Vodní elektrárny jsou jedním z mála obnovitelných zdrojů elektrické energie. Jejich obnovitelnost je dána hydrologickým cyklem, neboli stálým oběhem povrchové a podzemní vody na Zemi. Dokud budou vodní elektrárny z tohoto systému odčerpávat malé množství energie budou pro tento přírodní systém znamenat pouze rušení, se kterým se systém vypořádá. Na druhou stranu vodní nádrže mají negativní dopad na životní prostředí [1].

Vůči ostatním obnovitelným zdrojů je další výhodou vodních elektráren nízká cena [2], to vede ke stále většímu využívání vodních toků ve světě. O globálním vývoji využívání vodních elektráren a aktuálním pohledu z globálního hlediska se lze více dočíst v [3], kde je mimo jiné uvedeno, že v rámci řízení vodních toků je řízeno 12% celkového světového vodního průtoku, a tento podíl již může mít i viditelný dopad na globální ekosystém. Další výhodou je možnost takzvaného „startu ze tmy“ , kdy jsou při úplném výpadku sítě právě pomocí vodních elekráren postupně startovány nuklerání a uhelné elekrárny. Samotné spuštění vodní elekrárny je typicky závislé jen na malém dieselovém generátoru.

V České republice v roce 2011 tvořila elektrická energie pocházející z vodních elektráren 3,2% hrubé domácí výroby a 27% domácí výroby z obnovitelných zdrojů [4], pro srovnání před masivním nárůstem instalací fotovoltaických elektráren byl tento podíl 61% (2007). Ve světovém srovnání byl podíl vodních elektráren v domácí výrobě 5.7% v ČR (2009), 22% v SR (2010), 21.8% v Číně (2012) a 7.7% v USA (2010) [5]. Pro velký rozdíl vůči ostatním zdrojům je třeba toto srovnání brát pouze informativně.

Většina hydropotenciálu ČR, který je ještě možno využít, je soustředěn v menších tocích a tedy v podmínkách vhodných pro instalací MVE. Od roku 2001 je tento potenciál využit z 50% - 70%. Zbylý potenciál má již výrazně horší hydrologické a tedy ekonomické podmínky. Další rozvoj hydroenergetiky v ČR se proto očekává zejména v rekonstrukci nebo modernizaci stávajících instalací [6].

Právě v rámci modernizace elektráren mohou být nasazeny nové řídicí systémy, které mohou provozovat elektrárny efektivněji a mohou tedy lépe využít hydropotenciálu dané oblasti.

1.1 Stavba vodní elektrárny

Vodní elektrárny potřebují přítomnost vody jakožto média s kterým pracují. Z toho vyplývá nutnost stavby vodního díla a zásahu do okolní krajiny. O výkonu dané vodní elektrárny rozhoduje rozdíl vstupního a výstupního tlaku (tedy rozdíl výšek hladin) a průtok vody.

Základními typy vodních elektráren jsou:

- **Konvenční vodní elektrárna** - Za pomocí přehrady nebo jezu dojde na řece k vytvoření umělého rozdílu vodních hladin, kterého se využije pro umístění vhodné turbíny.
- **Přečerpávací vodní elektrárna** - Slouží k uskladnění energie. Využijí se dvě nádrže umístěné v různých výškách. Následně je možné elektrickou energii transformovat do potenciální energie vody jejím přečerpáním do vyšší nádrže a obráceně energii zpátky získat.
- **Přílivové vodní elektrárna** - Využívá k roztočení turbín proudu okolní kapaliny, typicky periodickým přílivem a odlivem moře.

Tato práce se zabývá konvenčními vodními elektrárnami, které lze dále členit dle instalovaného výkonu na:

- **MVE** - Malé vodní elektrárny do 10 MW
- **SVE** - Střední vodní elektrárny do 200 MW
- **VVE** - Velké vodní elektrárny nad 200 MW

Principem vodní elektrárny je naplnění vodní nádrže, čímž vznikne požadovaný rozdíl hladin a následné přivedení vody do turbíny. Tam odevzdá svou kinetickou energii oběžnému kolu turbíny a pod nízkým tlakem opouští elektrárnu do odtoku. Jak můžeme vidět na obrázku 1.1, před samotnou turbínou je přívodní kanál, který ústí v nádrži, kde je instalován uzávěr a česle, které slouží k zamezení vniknutí ryb a velkých nečistot.

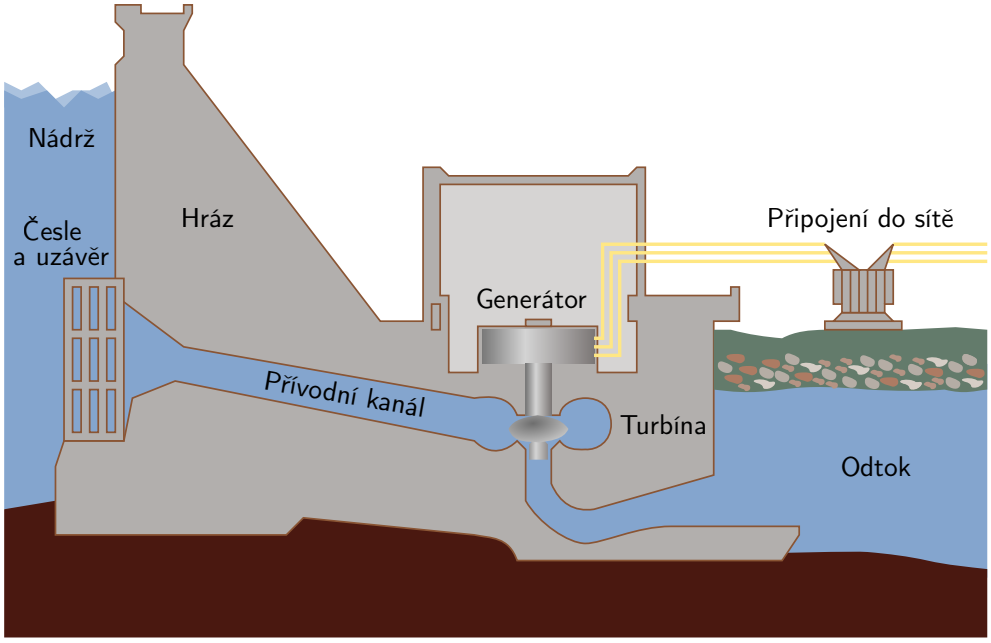
Vytěžitelný výkon pro konkrétní nádrž lze obecně určit podle rovnice

$$P_{max} = h\rho g Q, \tag{1.1}$$

kde h je rozdíl výšek hladin, ρ je hustota vody, g je gravitační zrychlení, Q je průtok turbínou a P_{max} je teoreticky využitelný výkon.

V rámci vodohospodářství často vznikají vodní díla, jejichž primárním účelem je regulace toku, popřípadě protipovodňová ochrana, a až sekundárním účelem je výroba elektrické energie. V takovém případě je i řízení elektrárny podřízeno požadavkům vodohospodářů - typicky regulaci výšky vodní hladiny.

[1] `https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hydroelectric_dam.svg`



Obrázek 1.1: Konvenční vodní elektrárna[1].

1.2 Turbíny a přeměna energie

Turbína je stroj, který slouží k přeměně energie vody na mechanickou energii. Velké moderní vodní turbíny běžně dosahují účinnosti vyšší než 90%.

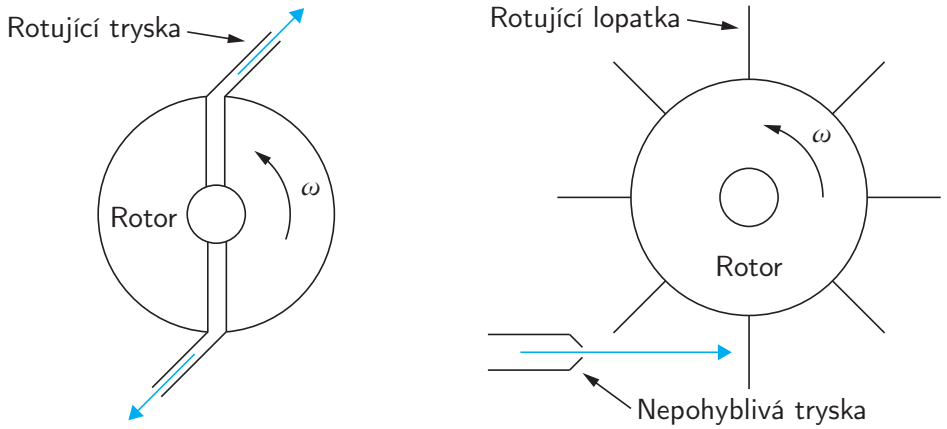
Dle odlišeného fyzikálního principu přeměny energie vody na mechanickou energii rozlišujeme dva základní typy:

- **Reakční turbína** - Funguje na principu 3. Newtonova zákona, kdy voda procházející turbínou mění svůj tlak a odevzdává svojí energii. Princip je načrtnut na obrázku 1.2(a). Jiným označením je *přetlaková turbína*, potenciální energie vody je přívodním potrubím pouze z části přeměněna na energii kinetickou a i po opuštění oběžného kola má voda větší než atmosférický tlak. Příkladem může být Kaplanova nebo Francisova turbína.

- **Impulzní turbína** - Funguje na principu 2. Newtonova zákona, kdy je lopatkou proudící kapalině vnucena změna rychlosti, konkrétně změna směru. Důsledkem je síla působící na lopatku. Princip je načrtnut na obrázku 1.2(b). Jiným označením je *rovnotlaká turbína*, veškerá potenciální energie vody je přeměněna v trysce na energii kinetickou. Příkladem může být Peltonova turbína.

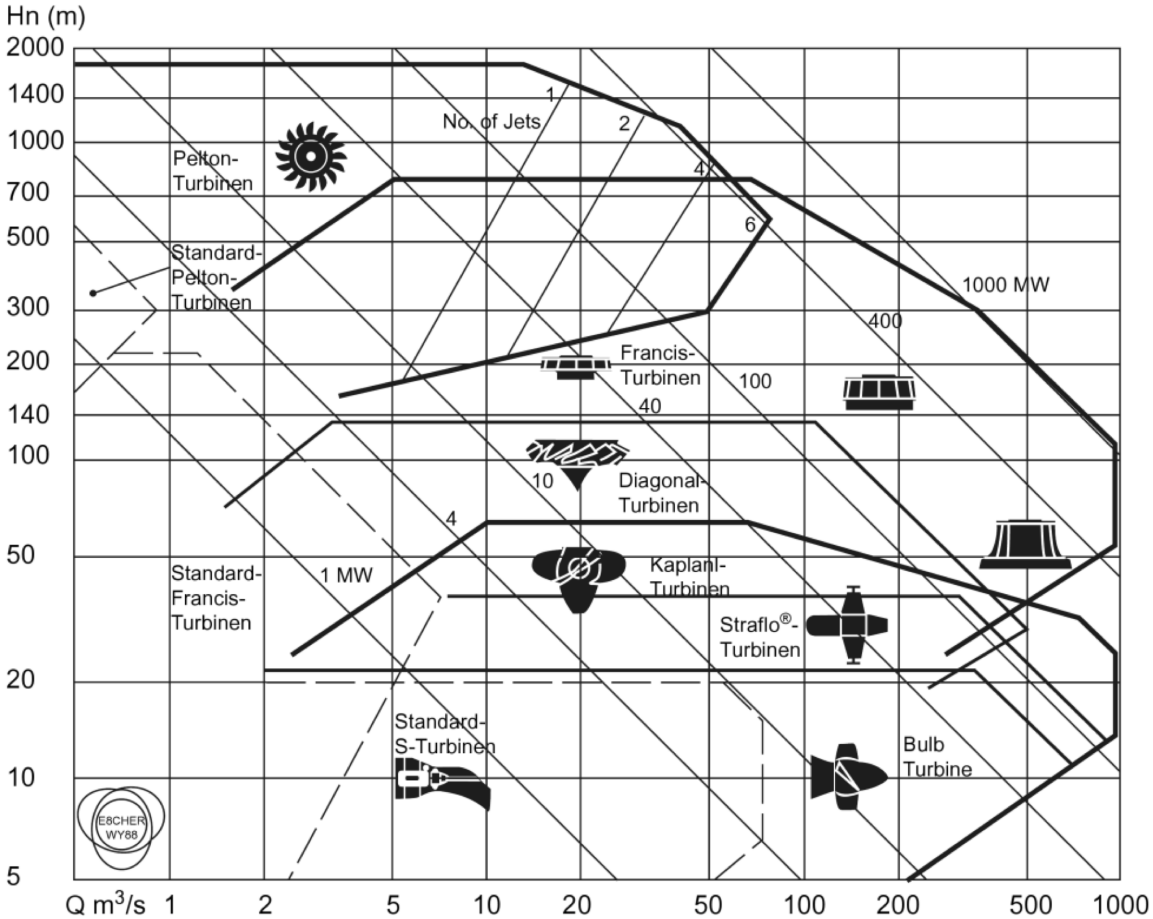
Dále je možné členit turbíny podle směru průtoku vody na *axial–flow*, *radial–flow*, *tangential–flow* a *cross–flow*.

Podmínky pro vhodnou aplikaci konkrétních typů turbín jsou vyobrazeny na obrázku 1.3, ve výkonovém pásmu MVE je tedy aplikovatelná většina klasických typů.



(a) Reakční (přetlaková) turbína (b) Impulzní (rovnotlaká) turbína

Obrázek 1.2: Zjednodušený nákres turbín dle způsobu přeměny energie.



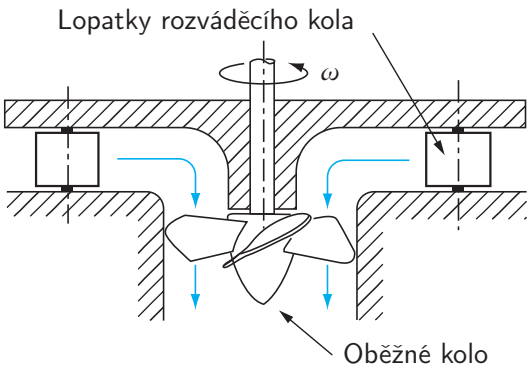
Obrázek 1.3: Aplikační rozsahy různých typů turbín jako graf průtoku a rozdílu výšek hladin, hranicí je účinnost 80% (Převzato z [7]).

1.2.1 Kaplanova turbína

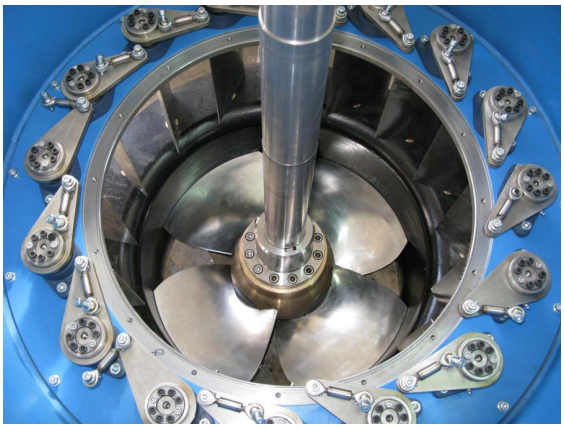
Kaplanova turbína je reakční (přetlaková) turbína kombinující axiální a radiální vtok vody. Skládá se z rozváděcího a oběžného kola. Lopatkami rozváděcího kola lze regulovat úhel a průtok vtoku vody. Oběžné kolo je ve tvaru vrtule a převádí energii vody na kroutící moment na hřídeli. Úhel lopatek oběžného kola je možné za provozu měnit a tedy přizpůsobit parametry turbíny požadovanému průtoku. Výsledkem je vysoká účinnost pro větší rozsah průtoků. Typická konstrukce je na obrázcích 1.4 a 1.5. Turbínu je možné instalovat jak horizontálně tak vertikálně.

Voda je radiálně přivedena do rozváděcího kola, které vytvoří vír. Následně voda protéká v tangenciálním směru kolem lopatek oběžného kola a vytéká v axiálním směru do savky. Takovýto průtok zajišťuje maximální přenesený výkon. Více o savce je uvedeno v části popisující Francisovu turbínu.

Při změně požadovaného průtoku obsluha změní polohu lopatek rozváděcího kola a současně také nastaví úhel lopatek oběžného kola tak, aby byla přeměna energie co nejúčinnější. Lopatky oběžného kola jsou typicky ovládány hydraulicky, a proto je kritickým bodem konstrukce Kaplanovy turbíny olejový okruh.



Obrázek 1.4: Nákres Kaplanovy turbíny (Převzato z [8] a upraveno).



Obrázek 1.5: Fotografie Kaplanovy turbíny (Převzato od SIAPRO d.o.o.[3]).

1.2.2 Francisova turbína

Francisova turbína je reakční (přetlaková) turbína s radiálním vtokem vody. Stejně jako Kaplanova turbína se skládá z rozváděcího a oběžného kola. Funkce rozváděcího kola je totožná s rozváděcím kolem Kaplanovy turbíny a lze jím tedy regulovat úhel a průtok vtoku vody. Na rozdíl od Kaplanovy turbíny voda vtéká do oběžného kola v radiálním směru, tedy z boku v případě vertikální instalace. Typická konstrukce je na obrázcích 1.6 a 1.7. Turbínu je možné instalovat jak horizontálně tak vertikálně.

[3] `http://en.siapro.eu/data/Turbine_mhe/06_IMG_6034_(Large).jpg`

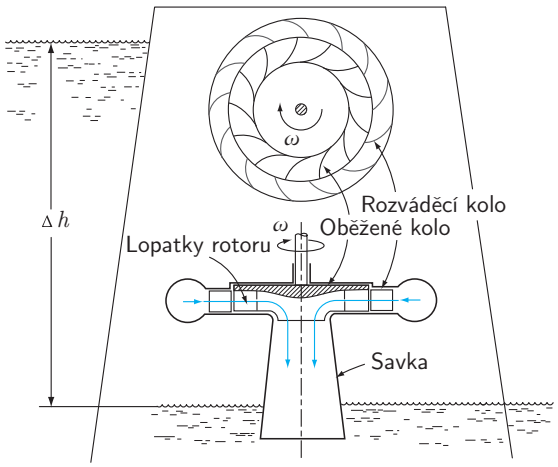
Voda je šnekovitým přívodním potrubím přivedena k rozváděcímu kolu, toto potrubí je navrženo tak, aby byl průtok směrem k rotoru konstantní po celém obvodu. Následně voda prochází lopatkami rozváděcího kola, které ji nasměrují na rotor pod vhodným úhlem - vzniká vír. Následně voda vtéká mezi lopatky oběžného kola a radiální rychlostí se přibližuje ke středu, tím se snižuje její moment hybnosti a práce je předávána hřídeli. Oběžné kolo opouští voda ideálně v axiálním směru (maximální výkon) a míří do savky.

Savka je integrální součástí turbíny. V prvé řadě umožňuje, aby rychlost vody ve výstupu z oběžného kola mírně vzrostla (to umožňuje kompaktnější konstrukci oběžného kola). Nenulová výstupní rychlost ale znamená pomyslnou ztrátu energie a nižší účinnost celé turbíny. Savka má ale mírně divergentní tvar a protékající voda je nucena zpomalit. Výsledkem je nižší tlak v místě ústí oběžného kola a tedy je zvýšen rozdíl výšek hladin. Správně navržená savka tedy zvyšuje účinnost. Druhým účelem je zajištění stálého zavodnění prostoru oběžného kola.

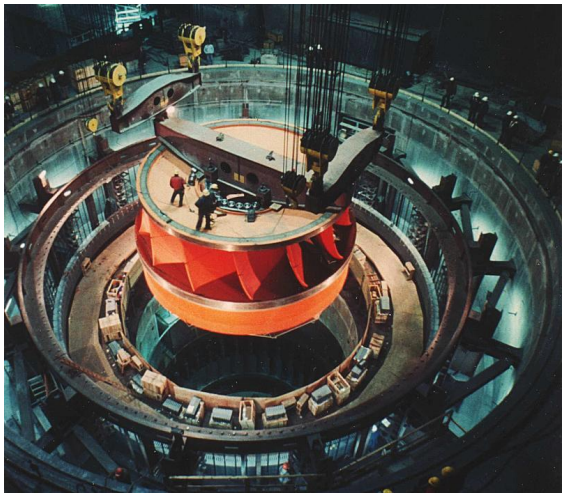
Regulace je možná změnou polohy, respektive uzavřením lopatek rozváděcího kola.

Výhodou Francisovy turbíny je možnost využit stejnou turbínu i jako čerpadlo, toho se využívá zejména v přečerpávacích vodních elektrárnách.

Konstrukční podobnost Francisovy a Kaplanovy turbíny není náhodná, dokonce lze obě tyto reakční turbíny popsat stejnými konstrukčními rovnicemi. Se zvětšující specifickou rychlostí postupně přechází Francisova turbína na Kaplanovu turbínu a radiální směr vtoku vody se postupně mění na axiální.



Obrázek 1.6: Nákres Francisovy turbíny (Převzato z [8] a upraveno).



Obrázek 1.7: Fotografie Francisovy turbíny (Převzato od U.S. Bureau of Reclamation[5]).

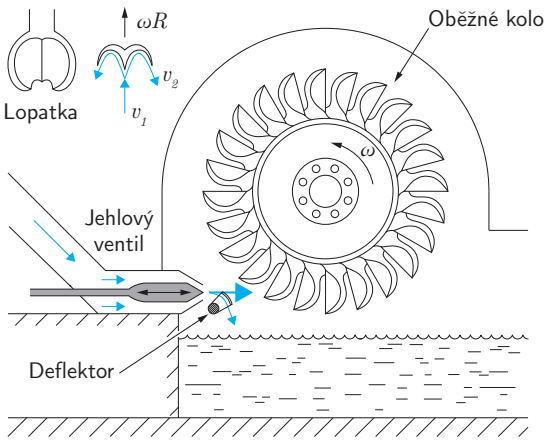
[5] http://www.usbr.gov/projects/ImageServer?imgName=TRBNGC.JPG

1.2.3 Peltonova turbína

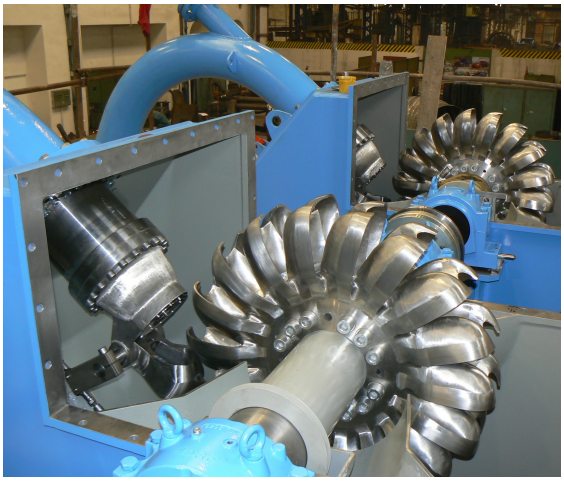
Peltonova turbína je impulzní (rovnotlaká) turbína s tangenciálním přívodem vody. Na rozdíl od vodního kola získává energii z rychlosti dopadající vody, nikoliv z její hmotnosti. Zjednodušená konstrukce je znázorněna na obrázku 1.8. Typická konstrukce na obrázku 1.9 zahrnuje dvě trysky. Turbínu je možné instalovat jak horizontálně tak vertikálně.

Nejinovativnějším prvkem konstrukce oproti zmíněnému vodnímu kolu je miskovitý tvar lopatek. Každá lopatka je tvořena z dvou misek spojených hranou, ta nejprve rozdělí dopadající proud o rychlosti v_1 na dva menší proudy a následně svým zakřivením změní směr proudu téměř o 180°a odebere kinetickou energii vody. Vytékající voda má následně rychlost v_2 viz detail lopatky na obrázku 1.8.

Regulace se provádí přívodním jehlovým ventilem nebo deflektorem. Regulační možnosti jsou ale značně omezené, protože účinnostní křivka je úzká. Turbína dosahuje účinnostního maxima pro $v_1 = 2\omega R$, kde ω je rychlost otáčení oběžného kola a R je jeho poloměr [7]. Z tohoto důvodu se Peltonovy turbíny umísťují tam, kde je malá změna výšky vodní hladiny, popřípadě požadovaného výkonu.



Obrázek 1.8: Nákres Peltonovy turbíny.



Obrázek 1.9: Fotografie Peltonovy turbíny (Převzato od Hydrolink, s.r.o.[7]).

1.3 Řízení vodní elektrárny

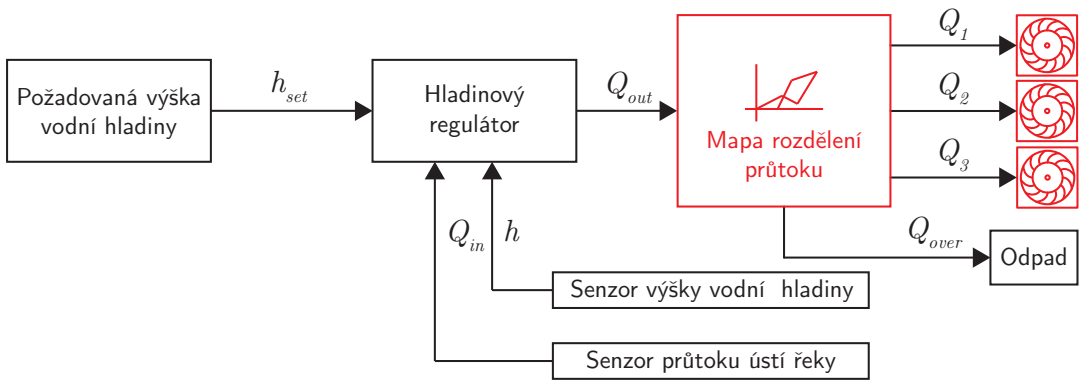
Pro účel této práce budeme uvažovat elektrárnu řízenou hladinovým regulátorem, jehož výstupem je požadovaný výtok z nádrže. Takový regulátor může být v praxi značně komplexní, zvlášť pokud se distribuovaně řídí několik nádrží v kaskádě na stejné řece. Vstupem do takového systému jsou data z lokálních senzorů a případně i data z předpovědi počasí. Výstupem je pak právě požadovaný průtok přehradou.

[7] `http://www.hydrolink.cz/prilohy/4/P1110732.JPG`

Schéma uvažovaného řídicího systému je na obrázku 1.10. Skládá se ze zákldních bloků:

- **Hladinový regulátor** - Na základě požadované výšky hladiny určuje požadovaný průtok přehradou.
- **Mapa rozdělení průtoku** - Pro požadovaný průtok přehradou stanovuje optimální rozdělení průtoku turbínami, případně odpadním kanálem.
- **Senzory** - Hladinový regulátor, nejspíše zpětnovazebního typu, bude určitě potřebovat informaci o výšce hladiny nádrže, případně informaci o přitékající vodě.
- **Akčních členy** - V případě vodní elektrárny budou akčními členy zpravidla ventily a kanálové uzávěry.

Typická realizace řídicího systému téměř vždy zahrnuje požadavky na rovnoměrné využívání turbín a požadovanou sekvenci spouštění nebo odstavování turbín. Zpravidla také nebývá absolutně dodržován výstup hladinového regulátoru. Nemá smysl spouštět turbíny v neefektivním režimu nebo vodu pouštět do odpadu. Výhodnější je v rámci regulační odchylky vodu z nádrže neodebrat a vyčkat, dokud nebude výstupem hladinového regulátoru takový průtok, který bude možné efektivně využít.



Obrázek 1.10: Schéma řízení vodní elektrárny - červeně jsou vyznačeny části, kterými se tato práce zabývá (h - aktuální výška hladiny, h_{set} - požadovaná výška hladiny, Q_{in} - přívod do nádrže, Q_{out} - výtok z přehrady, Q_i - průtok turbínou i a Q_{over} - průtok odpadním kanálem).

1.4 Motivace optimalizace řízení

Největší motivací je možná úspora energie provozováním turbín v účinnostním maximu. To sice může být mnohdy v rozporu se zadávací dokumentací, ale pokud budou dodrženy hlavní požadavky, tak je upravené řízení obhajitelné. Pokud se podaří programově nalézt optimální rozdělení požadovaného průtoku mezi jednotlivé turbíny, tak by bylo možné předpočítat toto rozdělení pro provozní rozsah elektrárny a sestavit tak statickou mapu řízení neboli návod, jak danou elektrárnu řídit optimálně.

Kapitola 2

Model soustrojí vodní elektrárny

Modelovaným soustrojím jsou zařízení instalovaná ve VD Brežová, které leží na řece Teplá v Povodí Ohře. Primárním účelem tohoto vodního díla je protipovodňová ochrana města Karlovy Vary a je tedy řízeno hladinovým regulátorem. Zdrojem informací o instalovaných zařízeních je veřejně dostupná dokumentace Povodí Ohře[9], informace od dodavatele řídicího systému získané vedoucím této práce a také informace uvedené v bakalářské práci T. Ryčla[10], ve které byl navržen hladinový regulátor.

(a) Souhrnný pohled

(b) Detail soustrojí TG1

Obrázek 2.1: Fotografie strojovny VD Březová[12].

Cílem modelovací částí této práce je nalézt účinnostní křivky jednotlivých soustrojí a blíže se seznámit s jejich funkcí pro potřeby řízení. Účinnostní křivky budou následně využity v optimalizační části této práce.

[2] http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Strojovna_přehrady_Březová.jpg
[2] http://calla.ecn.cz/atlas/detail.php?&id=1693&kat=3&img_id=2706

Při sestavování modelu soustrojí vyjdeme z těchto úvah a předpokladů:

- Pro využití Eulerovy rovnice je je nutné uvažovat vodu jako ideální kapalinu (dokonale nestlačitelná, bez vnitřního tření).

- Proudění v potrubí budeme považovat za laminární a tedy bez ztrát způsobených turbulencemi a vnitřním třením. Toto značně vzdaluje model od reálného systému, ale pokud bychom měli tento faktor odpovědně zahrnout, bylo by potřeba využít CFD a to je mimo možnosti této práce.

- Pro sestavení základního modelu vodní elektrárny vyjdeme ze situace vyobrazené na obrázku 1.1. Tuto představu rozšíříme o možnost několika paralelně řazených turbín, kde každá turbína má svůj vlastní uzávěr. Toto schéma je zobrazeno na obrázku 2.2.

- Přívodní kanál bývá často vybaven vyrovnávací nádrží. Ta slouží pro zmírnění tlakových rázů, které vznikají prudkými změnami v regulaci. Toto opatření se ale týká zejména velkých vodních elektráren a pro účel této práce nemá žádný vliv, proto jej můžeme zanedbat.

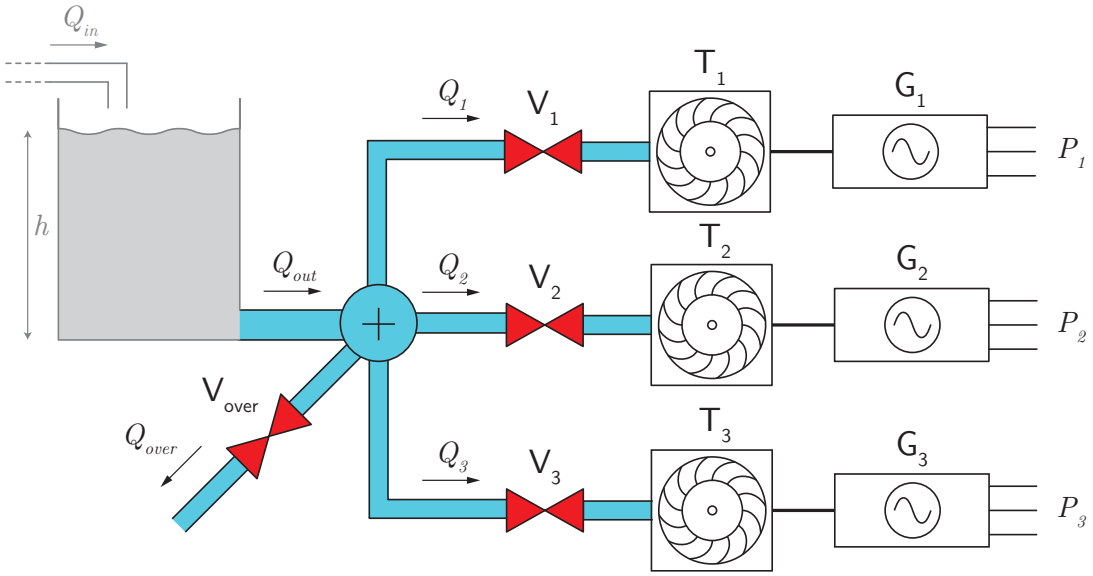
- Model bude použit pro hledání optimálního rozdělení průtoku Q_{out} mezi jednotlivé turbíny, a proto můžeme zanedbat i samotnou nádrž. Dále tedy budeme pracovat se zadaným Q_{out}, jakožto výstupem hladinového regulátoru.

- Průtok turbínou můžeme řídit na dvou místech. Uzávěrem a samotnými ovladatelnými prvky turbíny. Pro regulaci budeme uvažovat uzávěr plně otevřený a regulaci budeme provádět prvkem turbíny. Výstupem tedy budou dílčí toky Q_n a samotné řízení ventilů/turbín ponecháme na konkrétní implementaci.

- V případě, že zadaný průtok Q_{out} nebude technicky realizovatelný (větší než maximální průtok všech turbín) budeme tento průtok Q_{over} pouštět do odpadního kanálu. Jedná se o nevyužitou vodu, která nemusí být z nádrže odebrána (pakliže to dovoluje regulační odchylka hladinového regulátoru) nebo může být opravdu svedena nouzovým odpadem pod hráz - záleží na obsluze.

- Strojovna VD Březová obsahuje tři soustrojí - TG1, TG2 a TG3. První dvě soustrojí jsou Francisovy turbíny s instalovaným výkonem 130 kW a třetím soustrojím je čerpadlo pracující v režimu turbíny s instalovaným výkonem 30 kW. Toto čerpadlo je možné řídit pouze binárně, tedy může být buď plně otevřeno, nebo uzavřeno. Pro jednoduchost budeme i čerpadlo modelovat jako menší Francisovu turbínu.

- Během výpočtů budeme uvažovat gravitační zrychlení $g = 9.81\,\mathrm{m\,s^{-2}}$ a hustotu vody $\rho = 999.1026\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$ při 15 °C.



Obrázek 2.2: Blokové schéma vodní elektrárny (h - výška hladiny nádrže, Q_{in} - přítok do nadrže, Q_{out} - odtok z nádrže, Q_i - průtok turbínou i, Q_{over} - průtok odpadním kanálem, V_i - Ventil i, V_{over} - ventil odpadního kanálu, T_i - turbína i, G_i - generátor i, P_i - generovaný výkon i).

Parametr	Hodnota
Maximální rozdíl výšek hladin	19.15 m
Minimální rozdíl výšek hladin	11.7 m
Typický rozdíl výšek hladin[3]	$h = 13.5\,\mathrm{m}$
Minimální průtok pod hrází	$Q_{out,min} = 220\,\mathrm{l\,s^{-1}} = 0.220\,\mathrm{m^3\,s^{-1}}$

Tabulka 2.1: Vybrané technické parametry VD Březová.

2.1 Model Francisovy turbíny

Francisova turbína již byla popsána v kapitole 1.2.2, model sestavený v této části by měl sloužit pro výpočet kroutícího momentu předaného na hřídel v závislosti na vstupním rozdílu výšek hladin a požadovaného průtoku. Úvahy a postupy zde uvedené vychází z rozboru Francisovy turbíny v [8, 7] a také z dokumentace k VD Březová.

T1, T2 i T3 jsou uloženy horizontálně, ale vztahy převzaté z [8] jsou odvozeny pro vertikální uložení. I když by se mohlo zdát, že rozdílné uložení turbíny by mohlo mít značný vliv na výsledné vztahy, není tomu tak. Předpokladem je, že rozdíl tlaku po celém obvodu oběžného kola je stejný, a to je úkolem vhodné konstrukce přívodního

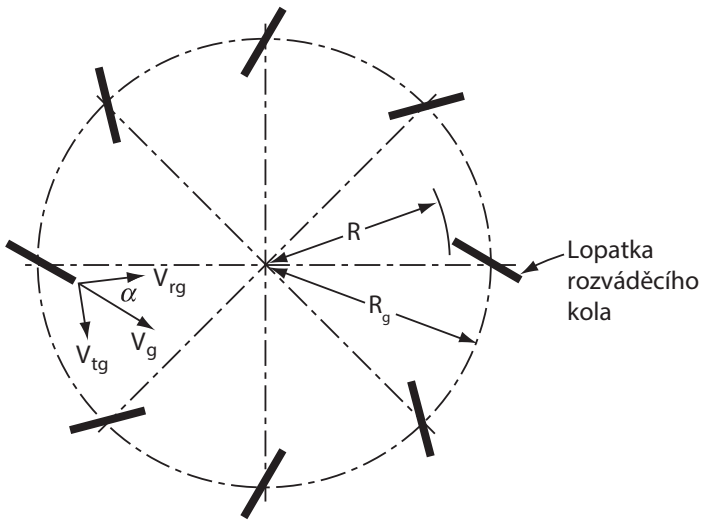
[3](Hladina zásobního prostoru) - (Hladina pod hrází), odpovídá dle dat převzaných z [9].

šnekovitého potrubí. Jevy v samotném oběžném kole také můžeme zanedbat, protože průměr oběžného kola je v porovnání se vstupním rozdílem výšek hladin malý.

2.1.1 Rozváděcí kolo

Cílem této podkapitoly je ukázat, jak spočítat průtok turbínou na základě vstupního rozdílu výšek hladin a nastavení lopatek.

Rozváděcí kolo vytváří vírové proudění v prostoru oběžného kola a určuje průtok turbínou. Zjednodušeně je rozváděcí kolo ventilem, který kromě průtoku definuje také směr proudění. Z pohledu mechaniky kapalin se jedná o proudění v uzavřeném prostoru. Rozváděcí kolo je obklopeno šnekovitým potrubím navrženým tak, aby byl stejný tlak po celém obvodu.



Obrázek 2.3: Schéma rozváděcího kola (Převzato z [8] a následně upraveno).

Pro určení průtoku turbínou vyjdeme z rovnice

$$Q = A_g v_g, \tag{2.1}$$

kde Q je objemový průtok, A_g je plocha kterou voda protéká a v_g je rychlost proudící vody.

Abychom určili průtok potřebujeme znát rychlost, kterou bude voda přes rozváděcí kolo protékat a výslednou plochu mezi lopatkami.

Rychlost proudění kapaliny můžeme určit z Bernoulliho rovnice pro dynamický tlak

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}\rho v^2 &= p = h\rho g, \\ v &= \sqrt{2gh}, \end{aligned} \tag{2.2}$$

kde h je rozdíl hladin, g je gravitační zrychlení, p je dynamický tlak a v je rychlost proudění.

Zbývá určit plochu mezi lopatkami. Rozváděcí kolo bez lopatek je válcem a plochu pláště lze spočítat jako $A = 2\pi R_g b$, kde R_g je střední poloměr rozváděcího kola a b je výška lopatek.

V případě, že by byly lopatky na přímce, je plocha průřezu úměrná $\cos\alpha$. V případě, že by bylo lopatek nekonečně mnoho a byly by nekonečně krátké, bude tato úměrnost platit i pro kružnici. Pro účel této práce nám stačí i pouhý odhad a proto plochu určíme jako

$$A = 2\pi R_g b(1-t)\cos\alpha, \tag{2.3}$$

kde t je poměr plochy, kterou zabírají lopatky při $\alpha = 0$.

Během simulací se ukázalo, že výsledkem vztahu 2.2 jsou příliš velké rychlosti a je tedy třeba vzít v úvahu ztrátu tlaku v rozváděcím kole (vlivem tření a turbulencí). Také se ukázalo, že je potřeba rozšířit vztah 2.3 o násobení konstantou. Dále tedy budeme používat vztahy

$$v_g = \sqrt{2g(h - h_{loss})}, \tag{2.4}$$

$$A_g = 2\pi R_g b(1-t)c_d\cos\alpha, \tag{2.5}$$

kde h_{loss} je ztráta rozdílu výšek hladin a c_d je korekční koeficient.

2.1.2 Oběžné kolo

Účelem této části modelu je pro zadaný průtok, rychlost a úhel vtoku vody spočítat kroutící moment přenesený na hřídel turbíny.

Vyjdeme z turbínové rovnice pro ustálený tok (odvozené v [8] pod číslem 9.8)

$$T_s = \rho Q(R_2 v_{t2} - R_1 v_{t1}), \tag{2.6}$$

kde R_1, R_2 jsou poloměry na začátku a konci lopatek oběžného kola a v_{t1}, v_{t2} jsou odpovídající tečné rychlosti a T_s je kroutící moment předávaný na hřídel. Tato rovnice je také známa jako Eulerova turbínová rovnice.

Dále z rovnice kontinuity vyplývá $Q = A_1 v_{r1} = A_2 v_{r2}$, kde A_1 a A_2 jsou plochy na vstupu a výstupu rotoru a v_{r1} a v_{r2} jsou odpovídající radiální rychlosti. Zjednodušením dostaneme

$$R_1 v_{r1} = R_2 v_{r2}, \tag{2.7}$$

a z obrázku 2.3 plyne, že $\frac{v_t}{v_r} = \tan\alpha$ a kombinací výše uvedených získáme

$$T_s = \rho Q(R_2 v_{r2}\tan\alpha_2 - R_1 v_{r1}\tan\alpha_1). \tag{2.8}$$

Lopatky oběžného kola jsou navrženy tak, aby $\alpha_2 = 0$ a voda měla na výstupu pouze radiální rychlost. Předchozí vztah se zjednoduší na

$$T_s = -\rho Q R_1 v_{r1} \tan \alpha_1, \tag{2.9}$$

a protože $v_g \cos \alpha = v_{r1}$, $\alpha_1 = \alpha$ a $R_1 = R$ získáme finální vztah

$$T_s = -\rho Q R v_g \cos \alpha \tan \alpha = -\rho Q R v_g \sin \alpha. \tag{2.10}$$

2.1.3 Identifikace parametrů

VD Březová je vybaveno třemi soustrojími, jejichž konstrukční parametry jsou uvedeny v tabulce 2.2. Abychom mohli využít odvozené rovnice z předchozích kapitol, musíme především určit parametry c_d a h_{loss} rozváděcího kola.

Tabulka 2.2: Technické parametry modelovaných turbín (štítkové údaje).

Parametr	Symbol	T1, T2	T3
Výrobce	-	ČKD Blansko	Sigma
Typové označní	-	F30H	400-QVC-350
Minimální spád	h_{min}	10 m	$\approx$ 10 m
Maximální spád	h_{max}	20 m	20 m
Maximální hltnost	Q_{max}	1.34 $m^3 s^{-1}$	0.25 $m^3 s^{-1}$
Maximální výkon	-	216 kW	42 kW
Instalovaný výkon	-	130 kW	30 kW
Počet lopatek rozváděcího kola	-	24	$\approx$ 24
Poměrná šířka lopatek roz. kola	t	$\approx$ 0.05	$\approx$ 0.05
Výška lopatek rozváděcího kola	b	$\approx$ 0.08 m	$\approx$ 0.05 m
Poloměr oběžného kola	R	0.25 m	$\approx$ 0.12 m
Poloměr oběžného kola	R_g	$\approx$ 0.3 m	$\approx$ 0.17 m
Provozní otáčky	-	610RPM	960RPM
Řízení průtoku	-	Postupné	Binární (0.22 $m^3 s^{-1}$)

$^{\approx}$ Hodnoty parametrů uvozené symbolem „$\approx$“ nepatří ke konkrétnímu typu zařízení, ale byly odhadnuty podle výkonově a rozměrově obdobných zařízení.

Parametr h_{loss} určíme z minimálního spádu v tabulce a tedy

$$h_{loss} = h_{min}. \tag{2.11}$$

K určení parametru c_d budeme potřebovat alespoň jeden zadaný pracovní bod turbíny a následně jej dopočítáme. Pracovní bod máme v podobě maximální hltnosti při maximálním spádu. Dosadíme tedy do rovnice 2.1 a vyjádříme

$$c_d = \frac{Q_{max}}{2\pi R_g b(1-t)\sqrt{2g(h_{max}-h_{loss})}\cos\alpha}. \tag{2.12}$$

Abychom mohli c_d spočítat, chybí nám ještě hodnota úhlu α pro maximální průtok (pro ostatní průtoky se bude úhel zvětšovat až do 90°). Tento úhel by měl být součástí technických parametrů uvedených v tabulce 2.2, ale je uváděn velice zřídka.

Vzhledem k tomu, že je tento úhel shodný pro všechny turbíny stejné specifické rychlosti, můžeme jej odhadnout podle podobných turbín. Pro odhad tohoto úhlu existuje aproximační polynom, uvedený v [11]. Po úpravě nutné pro tuto práci získáme

$$\alpha_{min} = \frac{\pi}{180}(86 - 0.16 \cdot N_s \cdot (1 - \frac{N_s}{1000})), \tag{2.13}$$

kde N_s je specifická rychlost turbíny kalibrována v imperiálních jednotkách a α_{min} [rad] je minimální úhel.

Specifickou rychlost spočítáme pro maximální hodnoty jako

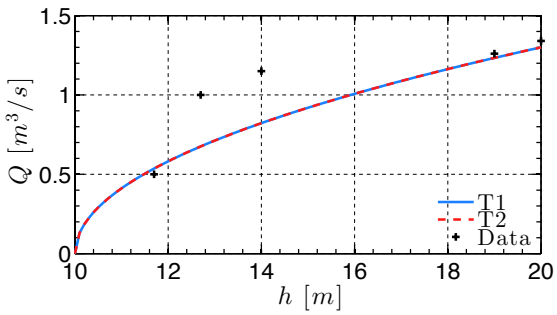
$$N_s = 0.2626 \cdot N \cdot \frac{\sqrt{P}}{h^{\frac{5}{4}}}, \tag{2.14}$$

kde N [RPM] jsou otáčky hřídele, P [kW] je výkon a h [m] je rozdíl výšek hladin.

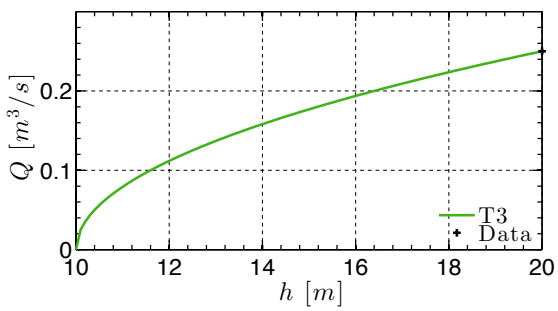
Nyní tedy dosazením do rovnice 2.12 dokážeme spočítat poslední požadovaný parametr. Výsledné parametry jsou uvedeny v tabulce 2.3.

Parametr	T1, T2	T3
N_s	55.6627	38.6281
α_{min}	1.3542 rad	1.3973 rad
h_{loss}	10 m	10 m
c_d	3.0145	2.0376

Tabulka 2.3: Identifikované parametry modelu turbín.



Obrázek 2.4: Maximální průtok T1 a T2.



Obrázek 2.5: Maximální průtok T3.

2.2 Model generátoru

Dle technické dokumentace jsou ve VD Březová instalovány asynchronní generátory s kotvou na krátko. Tyto generátory jsou konstrukčně indukčním (asynchronním) elektromotorem pracujícím v režimu generátoru.

Principiálně funguje asynchronní elektromotor tak, že střídavé napětí přivedené na póly statoru vytváří otáčivé magnetické pole. Toto pole se otáčí úměrně frekvenci přivedeného napětí, konkrétně synchronní rychlostí $n_s = \frac{120f}{p}$ [RPM], kde f je frekvence střídavého napětí a p je počet dvojpólů. Na rozdíl od synchronního motoru se rotor otáčí rychleji nebo pomaleji a to vyjadřuje skluz $s = \frac{n_s - n}{n_s}$, kde n [RPM] jsou aktuální otáčky rotoru. Více o konstrukci asynchronních elektromotorů se lze přehledně dočíst v [12].

Podle skluzu rozlišujeme tyto režimy asynchronního motoru:

- $s \in (-\infty, 0)$ - generátor (pole rotoru předbíhá pole statoru)
- $s \in (0, 1)$ - motor (pole statoru předbíhá pole rotoru)
- $s \in (1, \infty)$ - brzda (pole statoru má opačný směr otáčení než pole rotoru)

Asynchronní elektromotor je typicky charakterizován pro režim motoru jmenovitými parametry, tedy jmenovitým výkonem a skluzem (nebo otáčkami). V případě, že bude skluz opačného znaménka, elektromotor bude v režimu generátoru a jmenovitý výkon bude do sítě dodávat. Z této vlastnosti můžeme vyjít při určování parametrů našich generátorů. Štítkové údaje jsou uvedeny v tabulce 2.4.

Samotné modelování asynchronních elektromotorů je běžným inženýrským úkolem. Současně existují modely založené na numerických metodách hraničních nebo konečných prvků, ale nejvhodnější model pro účel této práce je náhradní obvod odvozený ze Steinmetzova náhradního obvodu pro ustálený stav [13].

Největší výhodou tohoto modelu je jeho hotová implementace v *SimPowerSystems*™ pod názvem `Asynchronous Machine`[4], která je snadno použitelná v prostředí *Simulink*®. Součástí dokumentace je i vysvětlení aplikace náhradního obvodu a odvozené diferenciální rovnice.

Parametry náhradního obvodu můžeme odhadnout ze štítkových údajů v tabulce 2.4 pomocí funkce `power_AsynchronousMachineParams`[5], která pomocí optimalizace najde parametry náhradního obvodu pro elektromotor s dvojitou klecí.

[4] `http://www.mathworks.com/help/physmod/powersys/ref/asynchronousmachine.html`

[5] `http://www.mathworks.com/help/physmod/powersys/ref/power_asynchronousmachineparams.html`

Tabulka 2.4: Technické parametry modelovaných generátorů (štítkové údaje).

Parametr	Symbol	G1, G2	G3
Výrobce	-	Siemens Drásov	Siemens Frenštát
Typové označení	-	AP355M-10 GE	1F225M-06
Frekvence	f	50 Hz	50 Hz
Počet pólů	p	10	6
Synchronní otáčky	n_s	600RPM	1000RPM
Jmenovité otáčky (motor)	n_n	$\approx$ 594RPM	$\approx$ 978RPM
Jmenovité otáčky (generátor)	n_n	606RPM	$\approx$ 1022RPM
Jmenovitý výkon	P_n	130 kW	$\approx$ 30 kW
Jmenovité napětí	V_n	400 V, 3 fáze	400 V, 3 fáze
Jmenovitý proud	I_n	$\approx$ 290 A	$\approx$ 57 A
Jmenovitý kroutící moment	T_n	$\approx 2048\,\mathrm{N\,m^{-1}}$	$\approx 281\,\mathrm{N\,m^{-1}}$
Jmenovitý účiník	PF	$\approx$ 0.75	$\approx$ 0.83
Moment setrvačnosti	J	$\approx 0.547\,\mathrm{kg\,m^2}$	$\approx 0.490\,\mathrm{kg\,m^2}$
Poměr start. proudu	I_{st}/I_n	$\approx$ 6.5	$\approx$ 5.9
Poměr start. kr. momentu	T_{st}/T_n	$\approx$ 1.5	$\approx$ 2.7
Poměr kr. momentu utržení	T_{br}/T_n	$\approx$ 2	$\approx$ 2.5

Hodnoty parametrů uvozené symbolem „≈“ nepatří ke konkrétnímu typu zařízení, ale byly odhadnuty podle výkonově a rozměrově obdobných zařízení.

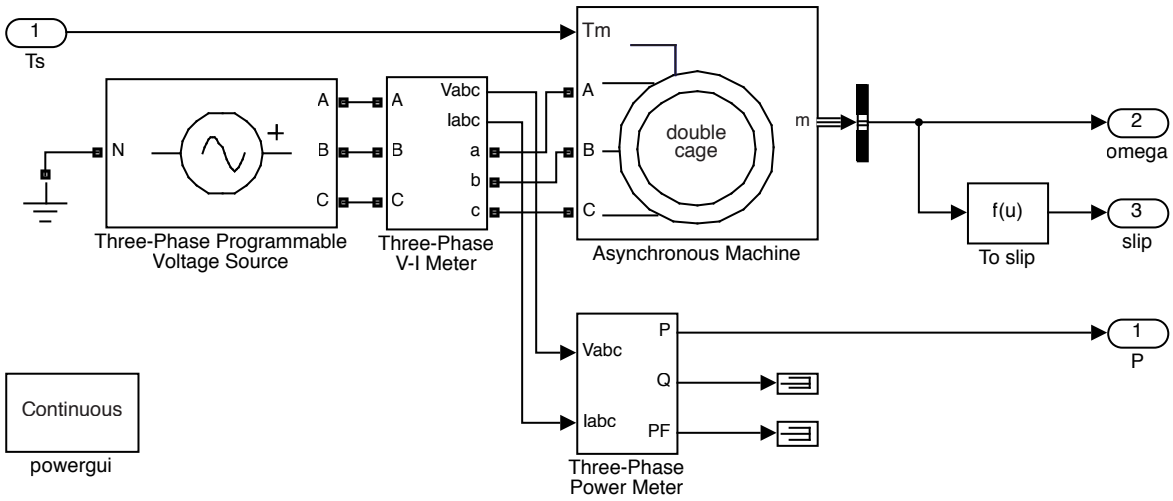
Parametr	Symbol	G1, G2	G3
Rezistence statoru	R_s	$0.0764\,\Omega$	$0.2185\,\Omega$
Indukčnost statoru	L_{ls}	1.7663×10^{-4} H	7.8116×10^{-4} H
Vzájemná indukčnost	L_m	0.0038 H	0.0259 H
Indukčnost rotoru (běhová klec)	L_{lr1}	6.2406×10^{-4} H	0.0024 H
Rezistence rotoru (běhová klec)	R_{r1}	$0.0122\,\Omega$	$0.1195\,\Omega$
Indukčnost rotoru (rozběhová klec)	L_{lr2}	1.7663×10^{-4} H	7.8116×10^{-4} H
Rezistence rotoru (rozběhová klec)	R_{r2}	$0.0437\,\Omega$	$0.5743\,\Omega$

Tabulka 2.5: Identifikované parametry modelu generátorů.

Dvojitá klec elektromotoru se používá typicky tehdy, když je potřeba zajistit stabilnější kroutící moment v celém rozsahu otáček a zároveň tedy snížit startovací proud. Horní neboli rozběhová klec je vyrobena z materiálu s větší rezistivitou a je umístěna co nejblíž okraji rotoru, naopak dolní neboli běhová klec je vyrobena s menší rezistivitou a je umístěna blíž k ose otáčení[12].

V případě VD Březová mají oba typy generátorů jednoduchou klec a tím, že je budeme modelovat elektromotorem s dvojitou klecí, nebudou odpovídat křivky závislosti kroutícího momentu na otáčkách. Pro jmenovité otáčky a jejich bezprostřední okolí ale bude kroutící moment shodný. Protože generátory provozujeme v úzkém okolí jmenovitých otáček, tedy s malým skluzem, můžeme si tuto modifikaci dovolit.

Pro následné připojení k turbíně, jakožto zdroji kroutícího momentu, je potřeba takové zapojení, kde vstupem bude kroutící moment T_s a výstupem bude výkon P. Pokud bude $P < 0$, elektromotor bude do sítě výkon dodávat, v opačném případě odebírat. Použité zapojení bloku `Asynchronous Machine` je na obrázku 2.6.



Obrázek 2.6: Zapojení modelu generátoru v *MATLAB® Simulink®*.

2.3 Výpočet účinností

V předchozích podkapitolách bylo ukázáno jak získat a identifikovat jednotlivé částí soustrojí a v této podkapitole budou tyto části spojeny a získány účinnostní křivky jednotlivých soustrojí.

Účinnost získáme jako podíl získaného a teoreticky získatelného výkonu. V následujícím vztahu dosadíme P_{max} z rovnice 1.1 a získáme finální vztah pro výpočet účinnosti

$$\eta = \frac{P}{P_{max}} = \frac{P}{h\rho g Q}, \tag{2.15}$$

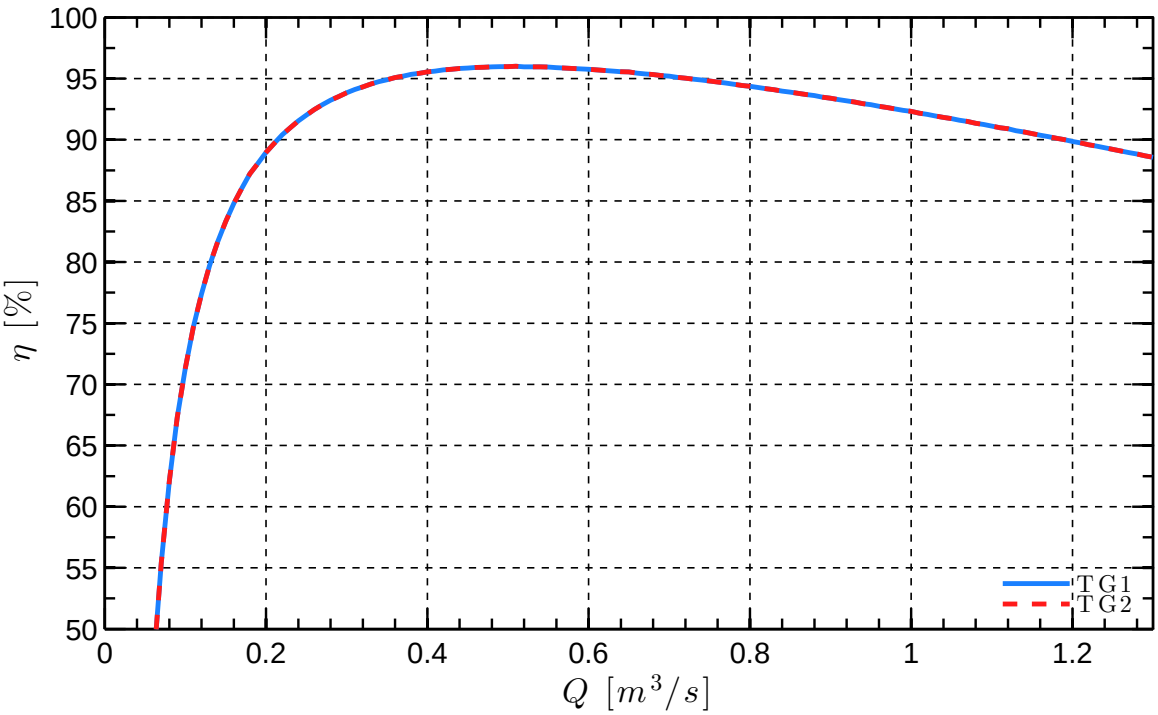
kde P je výkon dodávaný generátorem do sítě, h je aktuální rozdíl výšek hladin, Q je aktuální průtok a $\eta \in (0, 1)$ je účinnost.

Celkové zapojení v *MATLAB® Simulink®* je na obrázku 2.9. Detail bloku generátoru je na obrázku 2.6. Blok rozváděcího kola je pouze přepisem rovnic 2.1, 2.5 a 2.4. Blok oběžného kola je přepisem rovnice 2.10 a blok účinnosti je přepisem rovnice 2.15.

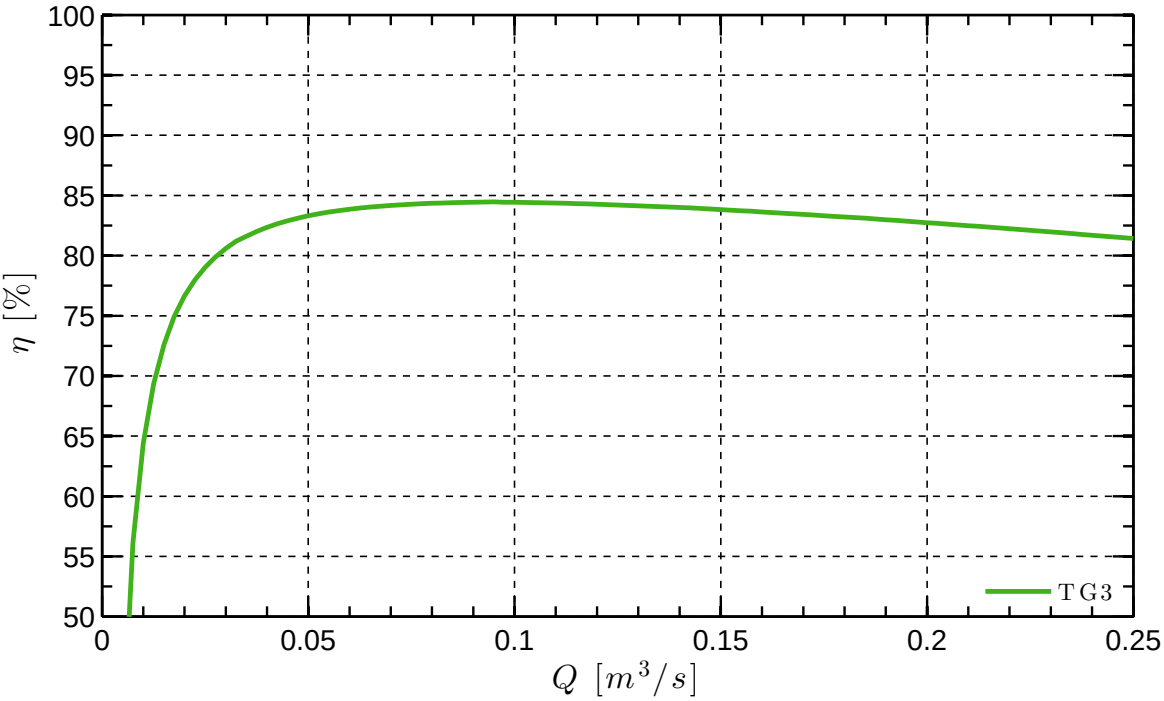
Účinnostní křivky získáme opakovaným spuštěním simulace pomocí příkazu `sim`[6], uložením výsledků a následným vytvořením grafů.

[6] `http://www.mathworks.com/help/simulink/slref/sim.html`

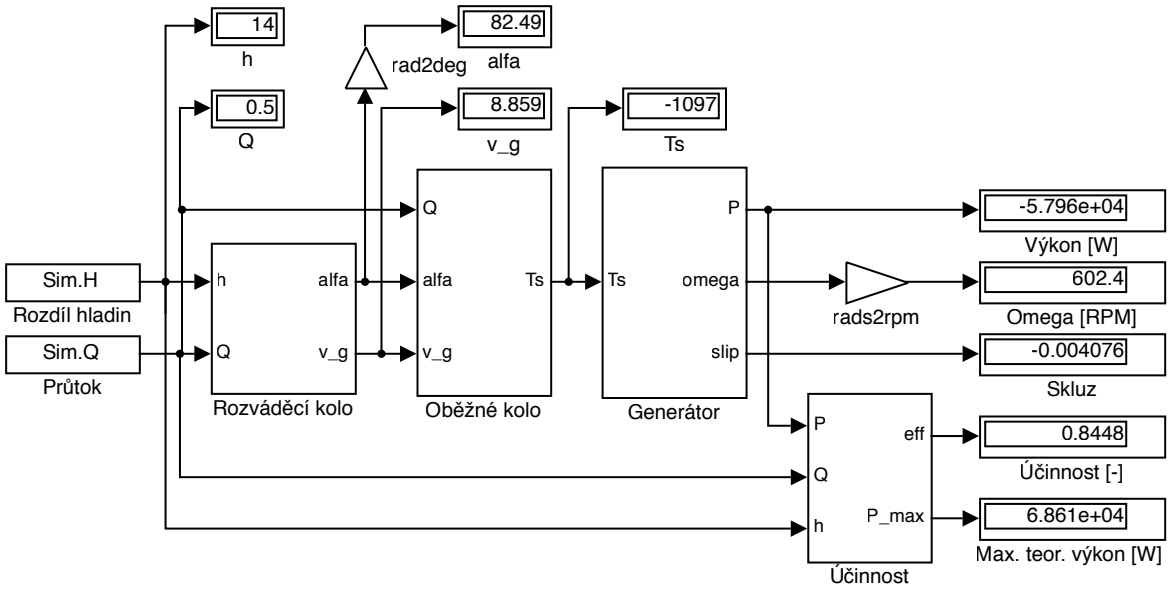
Simulaci provedeme pro $h = h_{max}$ a pro $Q \in \langle 0, Q_{max} \rangle$ s krokem $0.01\,\mathrm{m^3\,s^{-1}}$ pro TG1 a TG2, a $0.0025\,\mathrm{m^3\,s^{-1}}$ pro TG3. Výsledné křivky jsou na obrázcích 2.7 a 2.8.



Obrázek 2.7: Graf účinnosti TG1 a TG2.



Obrázek 2.8: Graf účinnosti TG3.



Obrázek 2.9: Zapojení celkového modelu soustrojí vodní elektrárny v *MATLAB® Simulink®*.

Kapitola 3

Optimalizace řízení

Tato kapitola se zabývá samotnou optimalizací řízení vodní elektrárny. Úloha již byla mírně popsána v podkapitole 1.4 a konkrétní situace je znázorněna na obrázku 2.2. Cílem je maximalizovat výkon dodaný do sítě pro zadaný výtok z nádrže Q_{out}.

Účinnost jednotlivých soustrojí závisí na průtoku, jak bylo ukázáno v podkapitole 2.3. Maximální výkon bude do sítě dodán tehdy, když bude součet přes součiny jednotlivých průtoku a příslušných účinností maximální. Úlohu pro naše tři soustrojí TG1, TG2 a TG3 můžeme formálně zapsat jako

$$\begin{aligned} \underset{Q_1,Q_2,Q_3}{\text{Max}} \quad & f(Q_1,Q_2,Q_3) = Q_1 \cdot \eta_{12}(Q_1) + Q_2 \cdot \eta_{12}(Q_2) + Q_3 \cdot \eta_3(Q_3), \\ \text{za podmínky} \quad & Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_{out}, \end{aligned}$$

kde $Q_i > 0$ jsou průtoky turbínami a $\eta_i \in \langle 0, 1)$ jsou funkce účinnosti jednotlivých soustrojí.

Takováto úloha je úlohou nelineárního programování a je řešitelná numerickými metodami. Pro řešení opět využijeme prostředí *MATLAB®*, konkrétně *Optimization Toolbox™* a funkci `fmincon`[1].

Ať už použijeme kterýkoliv algoritmus implementovaný funkcí `fmincon`, vždy budeme potřebovat interpolaci, případně extrapolaci funkce η_i pro $Q \in (0, Q_{out})$. Tuto funkci, ale známe pouze v diskrétních bodech (získaných v kapitole 2.3). Způsobů, jak tento problém vyřešit, je několik:

- Můžeme funkci interpolovat pomocí funkce `interp1`[2] a pro extrapolované hodnoty nastavit účinnost 0%.
- Můžeme funkci interpolovat křivkou, tedy pomocí funkce `spline`[3], a zajistit konstantní derivace pro extrapolaci pomocí funkce `fnxtr`[4] z *Curve Fitting Toolbox™*.
- Můžeme funkci aproximovat pomocí polynomu a funkce `polyfit`.

[1] `http://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html`
[2] `http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/interp1.html`
[3] `http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/spline.html`
[4] `http://www.mathworks.com/help/curvefit/fnxtr.html`

Vzhledem k tomu, že interpolace pomocí funkce `spline` a `fnxtr` udržuje derivaci i pro extrapolaci a její aplikace nevnáší žádné problémy, zvolíme toto řešení. Oproti `interp1` je výhodou i to, že si funkci můžeme připravit předem.

Extrapolaci musíme uvážit hlavně kvůli soustrojí TG3, jehož účinnostní křivku jsme simulovali pro podstatně menší rozsah průtoku než pro soustrojí TG1 a TG2. Je třeba zajistit, aby pro vyšší průtoky účinnost klesala tak, jak můžeme vidět na jejím grafu.

3.1 Optimalizace bez dalších omezení

Funkce `fmincon` dostupná v rámci *Optimization Toolbox*^{TM} řeší obecnou úlohu nalezení minima nelineární funkce s nelineárními omezeními zadanou jako

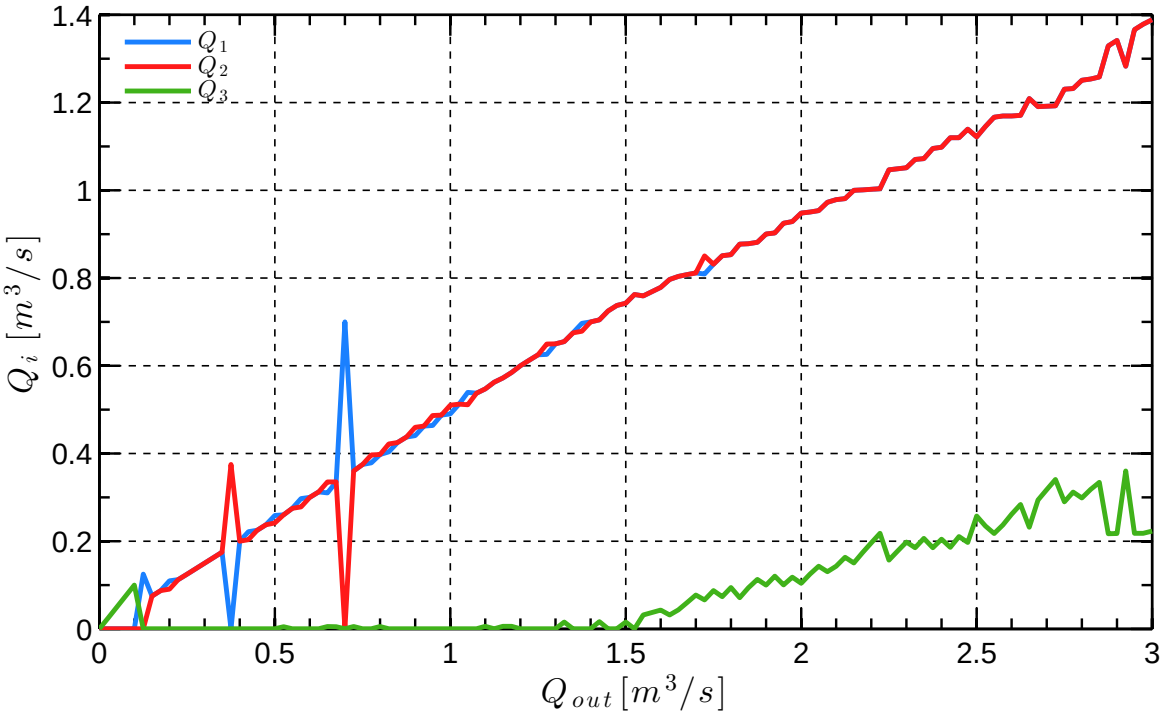
$$\begin{aligned}
&\min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}), \\
&\text{za podmínek} \quad c(\mathbf{x}) \leq 0, \quad c_{eq}(\mathbf{x}) = 0, \\
&\qquad \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}, \quad \mathbf{A_{eq}} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b_{eq}}, \\
&\qquad \mathbf{lb} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{ub},
\end{aligned}$$

kde $\mathbf{x}$, $\mathbf{b}$, $\mathbf{b_{eq}}$, $\mathbf{lb}$, $\mathbf{ub}$ jsou vektory, $\mathbf{A}$, $\mathbf{A_{eq}}$ jsou matice a c, c_{eq} jsou vektorové funkce.

Základní úlohu zadanou výše tedy přepíšeme do parametrů funkce `fmincon` jako

$$\begin{aligned}
\mathbf{x} &= (x_1, x_2, x_3) = (Q_1, Q_2, Q_3), \\
f(\mathbf{x}) &= -\mathbf{x} \cdot (\eta_{12}(x_1), \eta_{12}(x_2), \eta_3(x_3)), \\
\mathbf{A_{eq}} &= (1, 1, 1), \\
\mathbf{b_{eq}} &= (Q_{out}), \\
\mathbf{lb} &= (0, 0, 0).
\end{aligned}$$

Následně provedeme výpočet v cyklu pro $Q_{out} \in (0, 3)$ s krokem $0.025\,\mathrm{m^3\,s^{-1}}$. Výsledek můžeme vidět na obrázku 3.1, kde je v prvé řadě vidět, že pro nízký průtok je výhodnější využít menší turbínu T3 a následně přepnout na hlavní soustrojí TG1 a TG2. Pro vyšší průtoky je ale vlivem konečně malé přesnosti, velikosti kroku a shodnou účinností TG1 a TG2 výsledná mapa nezajímavá. Postup je tedy správný, ale pro užitečnější výsledky bychom potřebovali reálnější účinnostní křivky všech soustrojí a ideálně lišící se soustrojí podobných parametrů. Dvě stejné turbíny je prakticky možné řídit jako jednu větší.



Obrázek 3.1: Optimální mapa řízení bez dalších omezení.

3.2 Optimalizace s dalšími omezeními

V předchozí podkapitole jsme orientačně ověřili funkci `fmincon` a minimalizovanou funkci. Nyní stanovíme taková omezení, případně rozšíříme minimalizovanou funkci tak, abychom se co nejvíce přiblížili aplikovatelnému výsledku.

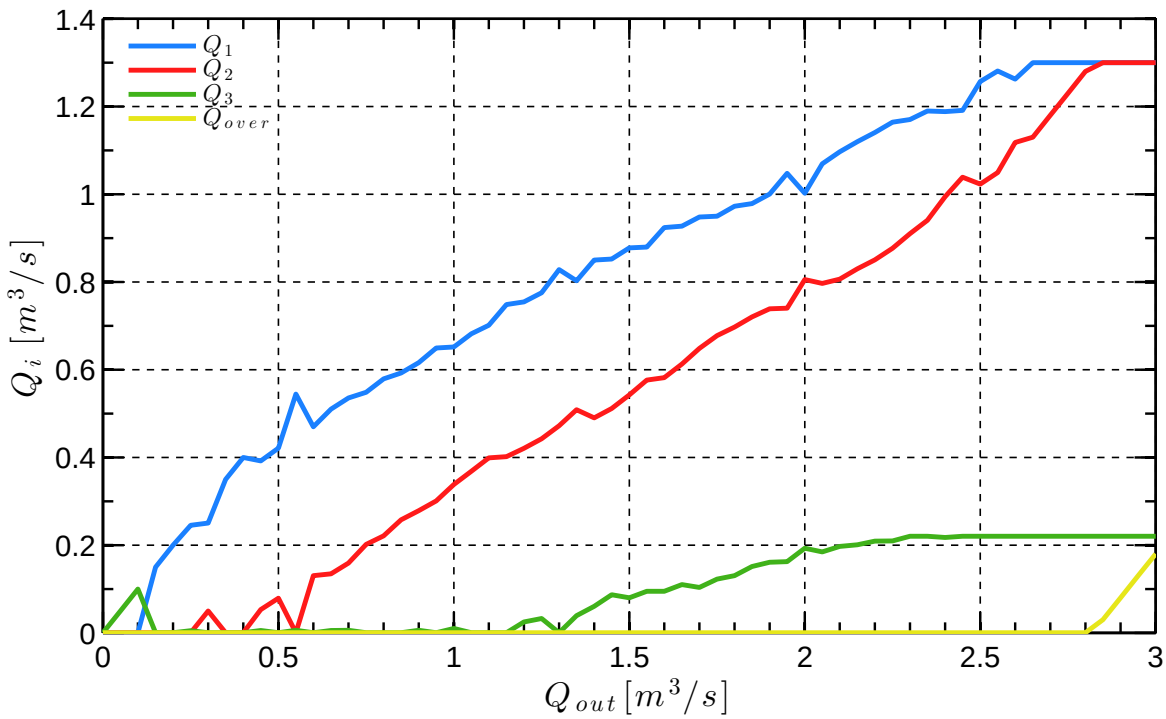
Původní úlohu tedy rozšíříme o tyto úpravy a omezení

- $Q_i \leq Q_{max}$ - omezení maximálního průtoku turbínami.
- Q_{over} - zavedeme odpadní tok pro nevyužitelnou vodu s účinností 0.01%, tak aby měla minimalizovaná funkce nenulovou derivaci podle Q_{over}. Význam tohoto odpadního toku byl vysvětlen v úvahách v kapitole 2.
- $Q_{out} \in \langle 0, 3 \rangle$ - výpočet mapy řízení rozšíříme tak, aby se projevilo omezení maximálního průtoku.
- $\eta_2 = 0.9 \cdot \eta_{12}$ - abychom odlišili soustrojí TG2, budeme předpokládat, že je opotřebené a to snížilo jeho účinnost.

Úlohu rozšířenou o výše uvedené úpravy přepíšeme do parametrů funkce `fmincon` jako

$$
\begin{aligned}
\mathbf{x} &= (x_1, x_2, x_3, x_4) = (Q_1, Q_2, Q_3, Q_{over}),\\
f(\mathbf{x}) &= -\mathbf{x} \cdot (\eta_{12}(x_1), 0.9 \cdot \eta_{12}(x_2), \eta_3(x_3), 0.0001),\\
\mathbf{A_{eq}} &= (1, 1, 1, 1),\\
\mathbf{b_{eq}} &= (Q_{out}),\\
\mathbf{lb} &= (0, 0, 0, 0),\\
\mathbf{ub} &= (1.3, 1.3, 0.22, 100).
\end{aligned}
$$

Výsledek můžeme vidět na obrázku 3.2. Dobře je patrné účinnostní maximum soustrojí TG1 okolo $Q_{out} = 0.5$ a soustrojí TG2 je kvůli nižší účinnost zatíženo až později. Dále je vidět, jak se projevilo omezení maximálního průtoku a jak je přebytečná voda pouštěna do odpadu.



Obrázek 3.2: Optimální mapa řízení s dalšími omezeními.

Binární ovládání TG3 ani minimální průtok turbínami nelze snadno formalizovat, protože se jedná o nelineární a dokonce nespojité podmínky. Například pro TG3 by podmínka měla tvar $Q_3 \in \{0, 0.22\}$ a takto specifikovaná funkce c_{eq} nevedla k požadovanému výsledku. Důležitým bodem této kapitoly bylo ukázat, že optimální mapu řízení programově najít lze a další omezení necháme pro možné pokračování práce.

Kapitola 4

Závěr

Optimalizace celkového výkonu vodní elektrárny pomocí rozdělení výtoku nádrže mezi jednotlivé turbíny je dle výsledků této práce řešitelným úkolem. V případě, že by nebyly kladeny žádné další omezení a byly by dostupné věrohodné účinnostní křivky jednotlivých soustrojí, je získání optimální mapy řízení přímočaré.

Za účelem získání účinnostních křivek byl sestaven model Francisovy turbíny a asynchronního generátoru. Ten byl identifikován z dostupných, případně odhadnutých parametrů.

Model turbíny je založen na rovnicích mechaniky tekutin a proudění v uzavřeném prostoru. Tento přístup není ničím inovativní, ale i přes množství prostudované literatury se nepodařilo nalézt vhodný postup, jak Francisovu turbínu modelovat. Největším problémem byl model rozváděcího kola a odhad celkového průtoku turbínou v závislosti na vstupních parametrech. Pokud bychom chtěli přesnější model, bylo by jednodušší využít CFD, než dále pokračovat ve fyzikální analýze zjednodušené turbíny. Potřebné závislosti by pak bylo možné simulovat a pro účely řízení interpolovat. Nákladnější možností je provést měření na skutečné, případně zmenšené turbíně.

Asynchronní generátor je dnes standardním zařízením a obecně doporučovaný model byl snadno aplikovatelný. Pro účel této práce nedávalo smysl vytvářet model vlastní. Zrychlení výpočtu simulace by bylo možné explicitním vyjádřením modelu v ustáleném stavu, ale protože se simulace provádí jednorázově, nebylo to potřeba.

Oproti optimalizaci bez dalších omezení byla také vyzkoušena řada možností, jak dále řízení omezit, ale i tak triviální omezení jako minimální požadovaný průtok turbínou si vyžaduje nespojité podmínky a ty se nepodařilo vhodně formulovat. Také se ukázalo, že největší význam má takto optimalizovat elektrárny s několika podobnými soustrojími, které se liší třeba jen v opotřebení.

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo navázat na práci T. Ryčla[10], který navrhl hladinový regulátor pro VD Březová. V této práci byl sestaven a identifikován model všech soustrojí a také byla nalezena optimální mapa řízení. Bohužel pro nedostatek dat nebylo možné tyto výsledky porovnat se skutečností.

Dalším možným pokračováním této práce by byla především CFD simulace Francisovy turbíny, například pomocí software *ANSYS®Fluent®*. Dále by také bylo zajímavé získat skutečná data a dokumentaci k vhodné vodní elektrárně, včetně obsluhou požadovaných omezení. Výsledná mapa řízení by pak měla reálný základ a bylo by možné vyhodnotit, zda ekonomicky optimální.

Bibliografie

[1] R. Kornijów. „Controversies around dam reservoirs: benefits, costs and future“. In: *Ecohydrology and Hydrobiology* (2009). ISSN: 1642-3593. DOI: 10.2478/v10104-010-0001-4. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1642359309700400.

[2] J.-M. Martin-Amouroux. „The economics of hydroelectricity“. In: *HYDRO 21* (2004). URL: http://www.hydro21.org/div_media/pdf/pdf_economie_en.pdf.

[3] R. Sternberg. „Hydropower's future, the environment, and global electricity systems“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2010). ISSN: 1364-0321. DOI: 10.1016/j.rser.2009.08.016. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002160.

[4] Oddělení statistik ERÚ. *Roční zpráva o provozu ES ČR 2011*. Tech. zpr. 2012. Praha: Energetický regulační úřad, 2012. URL: http://eru.cz/user_data/files/statistika_elektro/rocni_zprava/2011/Rocni_zprava_ES_CR_FINAL.pdf.

[5] Central Intelligence Agency. *The World Factbook 2013-14 Electricity from Hydroelectric Plants*. Washington, DC, 2013. URL: https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2238rank.html.

[6] J. Motlík et al. *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v ČR*. ČEZ, a. s. Duhová 2/1444, Praha, 2007. URL: http://www.cez.cz/edee/content/file/energie-a-zivotni-prostredi/oze-cr-all-17-01-obalka-in.pdf.

[7] S. Dixon a C. Hall. „Chapter 9 - Hydraulic Turbines“. In: *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*. Boston: Butterworth-Heinemann, 2010. ISBN: 978-1-85617-793-1. DOI: 10.1016/B978-1-85617-793-1.00009-2. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781856177931000092.

[8] W. S. Janna. *Introduction to Fluid Mechanics*. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2010. ISBN: 978-1420085242.

[9] Povodí Ohře, státní podni. *VD Březová*. 2013. URL: http://www.poh.cz/vd/brezova.htm.

[10] T. Ryčl. „Hladinová regulace na vodních tocích“. Bakalářská práce. Praha: ČVUT v Praze, 2012.

[11] NTNU Trondheim. *Guide vanes in Francis turbines*. URL: http://www.ivt.ntnu.no/ept/fag/tep4195/innhold/Forelesninger/forelesninger%202006/8%20-%20Guide%20Vanes%20in%20Francisturbines.pdf.

[12] S. Kocman. „Asynchronní stroje“. Katedra elektrotechniky FEI VŠB-TU Ostrava. 2002. URL: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_Asynchronni%20stroje_bc%20FS.pdf.

[13] A. Diaz et al. „Induction motor equivalent circuit for dynamic simulation“. In: *Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International*. 2009. DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075304.

Příloha A

Seznam použitých zkratek

MVE Malá vodní elektrárna

PVE Přečerpávací vodní elektrárna

VE Velká vodní elektrárna

VD Vodní dílo

CFD Computational fluid dynamics

Příloha B

Obsah přiloženého DVD

```
/
├── MATLAB ..... Soubory Matlab®R2013a
│   ├── data_TG12.mat ..... Uložené výsledky simulace TG1 a TG2
│   ├── data_TG3.mat ..... Uložené výsledky simulace TG3
│   ├── eff_interp.m ..... Třída pro interpolaci pomocí interp1
│   ├── eff_spline.m ..... Třída pro interpolaci pomocí spline a fnxtr
│   ├── fixPSlinestyle.license.txt ..... Licence k fixPSlinestyle
│   ├── fixPSlinestyle.m ..... Fix pro export do PostScript souborů
│   ├── flow_plot_t12.m ..... Skript pro generování grafu průtoku T12
│   ├── flow_plot_t3.m ..... Skript pro generování grafu průtoku T3
│   ├── Model.slx ..... Model turbíny a generátoru
│   ├── optimalizace_con.m ..... Skript optimalizace s dalšími omezeními
│   ├── optimalizace_uncon.m ..... Skript optimalizace bez dalších omezení
│   ├── params.m ..... Skript se základními parametry
│   ├── params_generator.m ..... Skript pro výpočet parametrů generátorů
│   ├── params_generator.mat ..... Uložené parametry generátorů
│   ├── params_turbine.m ..... Skript pro výpočet parametrů turbín
│   ├── params_turbine.mat ..... Uložené parametry turbín
│   ├── plotPub.license.txt ..... Licence k plotPub
│   ├── plotPub.m ..... Funkce pro pohodlné generování grafů
│   ├── simulace.m ..... Skript pro cyklickou simulaci modelu
│   └── simuluj.m ..... Funkce pro spuštění simulace modelu
└── text
    ├── robenek_bronislav.pdf ..... Text této bakalářské práce ve formátu PDF
    └── robenek_bronislav.ps .. Text této bakalářské práce ve formátu PostScript
```

Obrázek B.1: Obsah přiloženého DVD