



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií



Řízení najíždění turbogenerátoru přečerpávací elektrárny

Diplomová práce

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 3902T005 – Automatické řízení a inženýrská informatika
Autor práce: **Bc. Milan Kolář**
Vedoucí práce: Ing. Lukáš Hubka, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC

Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies



Start-up Process of Pumped-storage Power Plant

Master thesis

Study programme: N2612 – Electrical Engineering and Informatics
Study branch: 3902T005 – Automatic Control and Applied Computer Science

Author: **Bc. Milan Kolář**
Supervisor: Ing. Lukáš Hubka, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Milan Kolář**
Osobní číslo: **M16000142**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Automatické řízení a inženýrská informatika**
Název tématu: **Řízení najíždění turbogenerátoru přečerpávací elektrárny**
Zadávající katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

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

1. Analyzujte a popište proces najíždění Francisovy vodní turbíny.
2. Specifikujte aktuální limity v rychlosti najíždění a výkonových změn z hlediska možných zlepšení v řízení.
3. Na základě rešerše dostupné literatury, analýzy fyzikálních pochodů a předpokládaných cílů naleznete vhodný model vodní turbíny i celého soustrojí.
4. Zamyslete se nad nutnými úpravami modelu při využití soustrojí v přečerpávacím (motorovém) režimu.
5. Navrhněte řízení vodní turbíny (soustrojí) v generátorovém režimu založené na principu prediktivního řízení.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace

Rozsah pracovní zprávy: 40–50 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- [1] KOLEKTIV AUTORŮ. Řízení a stabilita elektrizační soustavy. Praha: AEM, 2013. ISBN 978-80-260-44671-1.
- [2] PRUDEK, Stanislav. Modely silové částí vodní turbíny. Brno, 2009. Dostupné také z: http://autnt.fme.vutbr.cz/szz/2009/DP_Prudek.pdf. Diplomová práce. VUT v Brně.
- [3] ČEPS. Kodex přenosové soustavy. Praha: ČEPS, 2014.
- [4] ČEPS, a.s.: Systémové služby. ČEPS, a.s. [online]. 2015 [cit. 2015-10-07]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Systemove-sluzby/Stranky/Default.aspx>

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Lukáš Hubka, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2018**

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan



Milan Kolář
doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

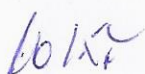
Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 14. 5. 2018

Podpis: 

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Ing. Pavlu Rydlovi Ph.D. za ochotu a podnětné rady v oblasti modelování a řízení synchronních strojů. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Lukáši Hubkovi Ph.D. za všestrannou pomoc, trpělivost a ochotu, které projevil při vedení této diplomové práce.

Abstrakt

Tato práce se zabývá řízením přečerpávací vodní elektrárny s reversní Francisovou vodní turbínou. Na začátku práce je zevrubný popis oblasti přečerpávacích vodních elektráren. Poté je probírána otázka najížděcích pochodů elektrárny a omezení, která se projevují v oblasti řízení turbogenerátoru. Dalším krokem je popis dynamického modelu turbogenerátoru v turbínovém režimu a jeho verifikace pomocí dostupných dat. Následuje úvaha o nutných změnách modelu pro simulaci čerpacího režimu elektrárny. Poslední bod představuje návrh struktury prediktivního řízení pro najíždění turbínového režimu.

Klíčová slova:

Přečerpávací vodní elektrárna, Francisova vodní turbína, najížděcí pochod, dynamický model turbogenerátoru, prediktivní řízení, explicitní prediktivní řízení

Abstract

This thesis describes control of the pumped storage with reverse Francis turbine. At the beginning of the thesis are explained the basic principles of pumped storages. Next part concentrates on analyses of the start-up processes of the plant and limitations of dynamics control of the turbogenerator. The next step is description of dynamic model of turbogenerator during turbine mode and verification by available data. The following text summarizes thoughts about required changes of the model to simulate pump mode processes. The last part of thesis is aimed to design the structure of model predictive control of start-up turbine mode of the system.

Key words

Pumped storage, Francis hydro turbine, start-up process, dynamic model of turbogenerator, predictive control, explicit predictive control

Obsah

Seznam grafů.....	10
Seznam obrázků	11
Seznam použitých fyzikálních veličin.....	12
Seznam použitých zkratk.....	13
1 Úvod.....	14
2 Přečerpávací elektrárna.....	15
2.1 Princip činnosti elektrárny.....	15
2.2 Vodní turbína.....	18
2.3 Synchronní motorgenerátor	21
3 Proces najíždění PVE	24
3.1 Najíždění turbínového režimu	24
3.2 Najíždění čerpacího režimu	25
3.3 Omezení rychlosti najetí.....	26
4 Model turbínového režimu	27
4.1 Model soustavy	27
4.2 Model servomotoru	28
4.3 Model turbíny.....	29
4.4 Model hydroalternátoru	34
4.5 Model hřídele	41
5 Úprava modelu na čerpadlový režim	42
6 Návrh řízení PVE.....	45
6.1 Prediktivní řízení založené na modelu.....	45
6.2 Návrh MPC.....	47
6.3 Ostatní metody řízení.....	49
7 Závěr	50
Použitá literatura	51
Přílohy	54

Seznam grafů

Graf 1: Verifikace data 1 turbína	31
Graf 2: Verifikace data 1 turbína detail	32
Graf 3: Verifikace data 2 turbína + detail.....	33
Graf 4: Verifikace modelu generátoru (step Rz).....	38
Graf 5: Verifikace modelu generátoru data1 (Rz var)	39
Graf 6: Verifikace modelu generátoru data2 (var Rz)	39

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma PVE [7]	15
Obrázek 2: Čtyřstrojové uspořádání [8]	16
Obrázek 3: Třístrojové uspořádání [8].....	16
Obrázek 4: Dvoustrojové uspořádání [8]	16
Obrázek 5: Francisova turbína, Kaplanova turbína, Peltonovo kolo [15]	19
Obrázek 6: Rozsah vodních turbín [16].....	20
Obrázek 7: Rotor s vyniklými póly, hladký rotor [19]	22
Obrázek 8: Princip alternátoru [20]	22
Obrázek 9: Momentová charakteristika synchronního motoru [19].....	23
Obrázek 10: Schéma modelu	27
Obrázek 11: Model servopohonu	28
Obrázek 12: Model turbíny dle IEEE	29
Obrázek 13: Upravený model turbíny	30
Obrázek 14: Parkova transformace [3].....	34
Obrázek 15: Schéma stroje[3].....	35
Obrázek 16: Vinutí po transformaci v dq systému [24]	35
Obrázek 17: Model synchronního stroje	37
Obrázek 19: Model hřídele.....	41
Obrázek 20: Model zavzdušnění.....	42
Obrázek 21: Rozběh asynchronním pohonem	43
Obrázek 22: Asynchronní rozběh	43
Obrázek 23: Rozběh frekvenčním měničem	44
Obrázek 24: Model čerpání	44
Obrázek 25: Princip klouzavého horizontu	46

Seznam použitých fyzikálních veličin

Značka	Název	Jednotka
G_{in}	Vstupní hodnota rozevření rozváděcích lopatek	p. u.
G_{out}	Výstupní hodnota rozevření rozváděcích lopatek	p. u.
T_v	Časová konstanta servopohonu	--
n	Otáčky soustrojí	p. u.
T_w	Časová konstanta turbíny	--
H	Působící vodní spád	p. u.
H_0	Celkový vodní spád	p. u.
f_p	Koeficient ztrát vířením v přivaděči	p. u.
Q	Průtok turbínou	p. u.
P_{mech}	Mechanický výkon turbíny	p. u.
Q_{nl}	Průtok turbínou naprázdno	p. u.
A_t	Proporcionální faktor turbíny	p. u.
β	Autoregulační koeficient turbíny	p. u.
U_{xy}	Napětí vinutí y v ose x	V
R_{xy}	Odpor vinutí y v ose x	Ω
i_{xy}	Elektrický proud vinutím y v ose x	A
Ψ_{xy}	Spřezaný magnetický tok vinutí y v ose x	Wb
ω	Úhlová rychlost rotoru	rad.s ⁻¹
L_{xy}	Indukčnost vinutí y v ose x	H
M_{xyz}	Vzájemná indukčnost vinutí y a z v ose x	H
P_{el}	Elektrický výkon generátoru	W
J	Moment setrvačnosti soustrojí	kg.m ²
ω	Úhlová rychlost soustrojí	rad.s ⁻¹
ω_0	Synchronní úhlová rychlost soustrojí	rad.s ⁻¹

Seznam použitých zkratk

PVE	Přečerpávací vodní elektrárna
SISO	System s jedním vstupem a jedním výstupem (single-input single-output)
MIMO	System s dvěma a více vstupy a výstupy (multiple-input multiple-output)
LUT	Vyhledávací tabulka (lookup table)
MPC	Prediktivní řízení založené na modelu (model predictive control)
IMC	Řízení s vnitřním modelem (internal model control)

1 Úvod

Oblast energetiky v současné době představuje zásadní otázku pro všechny vyspělé státy. Během posledního desetiletí je možné pozorovat trend odklonu od fosilních paliv jako hlavního zdroje elektrické energie a snaha o výraznější prosazení obnovitelných zdrojů [1][2]. Negativním dopadem pak zpravidla bývá horší stabilita elektrické sítě v důsledku vlivu přírodních činitelů na množství generované energie. Přečerpávací elektrárny představují v současné době jediné možné řešení pro udržení dlouhodobé rovnováhy v elektrizační soustavě.[3] Optimalizace jejich provozu a navýšování jejich kapacity tedy představuje zásadní otázku pro zajištění dlouhodobě stabilních dodávek elektřiny. Pro optimalizaci regulačních pochodů soustavy je vhodné sestrojít simulační model popisující chování systému a na základě jeho analýzy provádět syntézu pokročilých řídicích algoritmů.

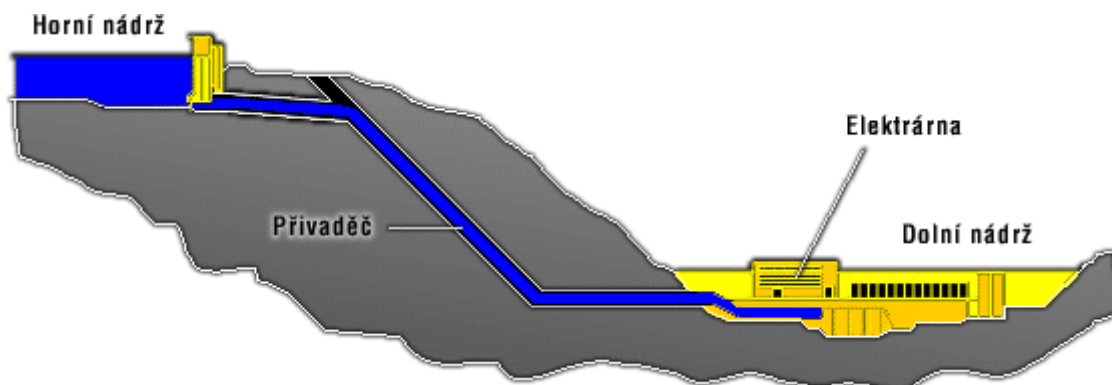
Cílem této práce je popsat princip činnosti přečerpávací vodní elektrárny. Dále je práce zaměřena na analýzu najíždění jednotlivých režimů provozu přečerpávací vodní elektrárny a jejich omezení z pohledu řízení. V dalších částech je práce zaměřena na modelování soustrojí přečerpávací elektrárny v turbínovém režimu, návrhu modelu čerpacího režimu elektrárny a návrh struktury řízení pomocí metod prediktivního řízení.

2 Přečerpávací elektrárna

2.1 Princip činnosti elektrárny

Přečerpávací vodní elektrárny (PVE) řadíme mezi vodní elektrárny. Spadají tedy do kategorie obnovitelných zdrojů energie stejně jako akumulární a průtočné vodní elektrárny. Oproti ostatním vodním elektrárnám však PVE mohou plnit i stabilizační funkci, kdy ukládají přebytečný výkon elektrické sítě ve formě potenciální energie a v případě potřeby ji znovu uvolňují do sítě.[4] V České republice se nachází 4 přečerpávací elektrárny provozované společností ČEZ.[5]

PVE je tvořena dvěma propojenými vodními nádržemi, které se nachází v rozdílné nadmořské výšce. Nádrže jsou spojené přetlakovým potrubím. Soustrojí se nachází mezi oběma nádržemi a pracuje v režimu podle aktuálních požadavků sítě. Obecně rozlišujeme režim čerpadlový a režim turbínový.[4] Čerpadlový režim je používán v případě nedostatečného odběru energie ze sítě, kdy je voda čerpána do horní nádrže. Při nedostatku energie PVE najíždí do turbínového režimu, aby tento nepoměr kompenzovala.[3] Účinnost akumulace se v současné době pohybuje mezi 70 % a 85 %.[6]



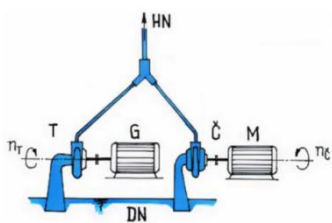
Obrázek 1: Schéma PVE [7]

Pro konstrukci soustrojí se zpravidla využívá kombinace synchronního stroje s vhodným typem turbíny. Synchronní stroj je upřednostňován pro jeho schopnost kompenzovat účinník induktivní zátěže.[3][10] Typ turbíny je nutné volit podle daných podmínek. Volba obvykle probíhá na základě předpokládaného průtoku a rozdílu hladin nádrží PVE. Pokud se jedná o PVE s dvoustrojovým uspořádáním, je třeba volit čerpadlovou, reversní, turbínu.[8][9]

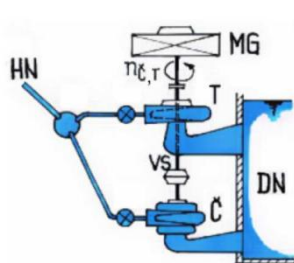
Jednotlivé PVE lze rozdělit podle uspořádání. Čtyřstrojové uspořádání lze pokládat spíše za názorný příklad, který ilustruje činnost PVE. Skládá se ze čtyř hlavních částí: turbíny spojené s generátorem a čerpadla spojeného s elektrickým motorem. Podle požadavků sítě je uváděn do chodu buď motor s čerpadlem, nebo turbína spojená s generátorem. Pro využití je toto uspořádání nepraktické, protože instalace dvou soustrojí značně zvyšuje pořizovací náklady i celkovou zastavěnou plochu.[7]

Třístrojové uspořádání představuje soustavu turbíny, čerpadla a motorgenerátoru, zpravidla synchronního stroje. Stroj je obvykle připojen přes rozpojitelnou spojku s turbínou i čerpadlem a podle požadavků sítě pracuje buď v motorickém, nebo generátorovém režimu. Přechod mezi jednotlivými režimy se provádí pomocí převodovky. Toto uspořádání se často uplatňuje v případě velkých spádů s využitím Peltonovi turbíny. Výhodou třístrojového uspořádání je využití obou režimů elektrického stroje. Nevýhodou naopak představuje využití spojky, která nikdy nepracuje se 100 % účinností.[8][9]

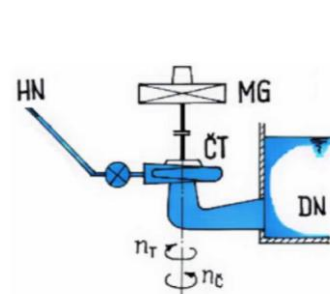
Dvoustrojové uspořádání je nejúspornější možnou konstrukcí PVE. Jejimi hlavními částmi jsou čerpadlová turbína a zpravidla synchronní stroj. Čerpadlová turbína, jak název napovídá, pracuje podle směru rotace buď jako turbína, nebo jako čerpadlo. Elektrárna tedy mezi jednotlivými režimy přechází pomocí změny směru rotace čerpadlové turbíny, což paradoxně zvyšuje dobu přechodu mezi jednotlivými režimy.[8][9] Důvodem je nezanedbatelný moment setrvačnosti soustrojí, které je při přechodu z jednoho režimu do druhého nutné zastavit a následně opět uvést do pohybu v opačném směru. Navíc se při najíždění z čerpadlového režimu musí prostor turbíny zavzdušnit, aby mohlo soustrojí dosáhnout synchronních otáček a zároveň nedošlo k poškození lopatek turbíny.[8][10]



Obrázek 2: Čtyřstrojové uspořádání [8]



Obrázek 3: Třístrojové uspořádání [8]



Obrázek 4: Dvoustrojové uspořádání [8]

Jak již bylo řečeno, hlavní výhodou PVE je schopnost akumulovat energii a následně ji uvolňovat do elektrické sítě.[4] Je nutné si uvědomit, že se spotřeba i výroba elektrické energie v čase vyvíjí. Majoritní zdroje elektrické energie představují v České republice uhelné a jaderné elektrárny, tedy zařízení pracující na principu přeměny tepelné energie v elektrickou energii.[5][3] Tepelné soustavy představují spolehlivý zdroj energie, který ovšem dokáže reagovat na změny požadavků pouze pomalými trendovými změnami, které jsou dány fyzikální podstatou tepelných dějů. Oproti tomu je vodní elektrárna schopná najet na plný výkon v řádu jednotek minut.[3] Navíc je PVE schopna ze sítě akumulovat přebytečnou energii a při odběrových špičkách ji naopak uvolňovat do najetí tepelných elektráren na požadovanou výkonovou hladinu.[3][10]

V České republice jsou v provozu celkem čtyři PVE. Všechny jsou provozovány skupinou ČEZ. Jedná se o PVE Dlouhé stráně, Černé jezero, Štěchovice II a Dalešice. Celkový instalovaný výkon tvoří 1,18 GW.[5]

Nejmenší a nejstarší na našem území je PVE Černé jezero. Nachází se na Šumavě u největšího jezera České republiky a byla uvedena do provozu v roce 1930. Ve strojovně jsou instalovány dva turbogenerátory s Peltonovými turbínami o celkovém výkonu 1 870 kW. Systém je navíc doplněn Francisovou turbínou o výkonu 40 kW využívající zbytkový spád. Od roku 1960 je čerpadlový provoz elektrárny omezen.[5]

PVE Štěchovice II, dokončena roku 1947, představuje součást Vltavské kaskády. Původní dvě soustrojí byla nahrazena během modernizace v letech 1992-1996 jedním soustrojím s reversní Francisovou turbínou a motorgenerátorem o výkonu 45 MW.[5]

Vodní dílo Dalešice bylo postaveno v letech 1970-1978. Původní motivací stavby bylo zajistit dostatek technologické vody pro nedalekou jadernou elektrárnu Dukovany. Nádrž Dalešice v kombinaci s vyrovnávací nádrží Mohelno vytváří spád vhodný pro PVE. Elektrárna je vybavena čtyřmi soustrojími s reversními Francisovými turbínami o celkovém výkonu 480 MW.[5]

Největší na území České republiky je PVE Dlouhé stráně. Nachází se na říčce Divoká Desná v oblasti Hrubého Jeseníku. Výstavba byla zahájena již roku 1978, ale během osmdesátých let došlo k pozastavení stavby, takže byla dokončena až v roce 1996. Elektrárna je vybavena dvěma soustrojími se synchronními motorgenerátory a reversními Francisovými turbínami. Obě soustrojí mají výkon 325 MW.[5]

Na světové scéně zaujala první místo v kapacitě PVE Čína, která během minulého roku předstihla Japonsko.[11] Čína v rámci současné pětiletky (2016 - 2020) plánuje snížit závislost na uhlí jako primárním zdroji energie a zvýšit podíl obnovitelných zdrojů energie na 15 %. V rámci této pětiletky je taktéž plánováno zvýšení celkové kapacity PVE na 40 GW s cílem zlepšení stability a spolehlivosti elektrické sítě.[2] Podobný vývoj lze sledovat i na evropském kontinentu, kde EU podle klimaticko-energetického balíčku 2020 z roku 2008 stanovuje cíl dosáhnout 20% podílu obnovitelných zdrojů na celkové spotřebě energie.[1] Protože značná část obnovitelných zdrojů energie je závislá na aktuálně panujících přírodních podmínkách (rychlost větru, intenzita slunečního záření), dochází ke kolísání výkonu dodávaného do sítě. Pro zajištění stability a spolehlivosti elektrické sítě bude v budoucnu potřeba zvýšit kapacitu PVE.[3] V současné době je na evropském kontinentu zemí s nejvyšší kapacitou PVE Itálie (7 555 MW). Druhé místo zaujímá Francie (6 985 MW) těsně následovaná Německem (6 806 MW). Jiný přístup ke stabilizaci elektrické sítě lze vyzorovat například v Rusku, USA nebo Kanadě, kde je v oblasti obnovitelných zdrojů energie kladen důraz na budování akumulčních vodních elektráren.[11]

2.2 Vodní turbína

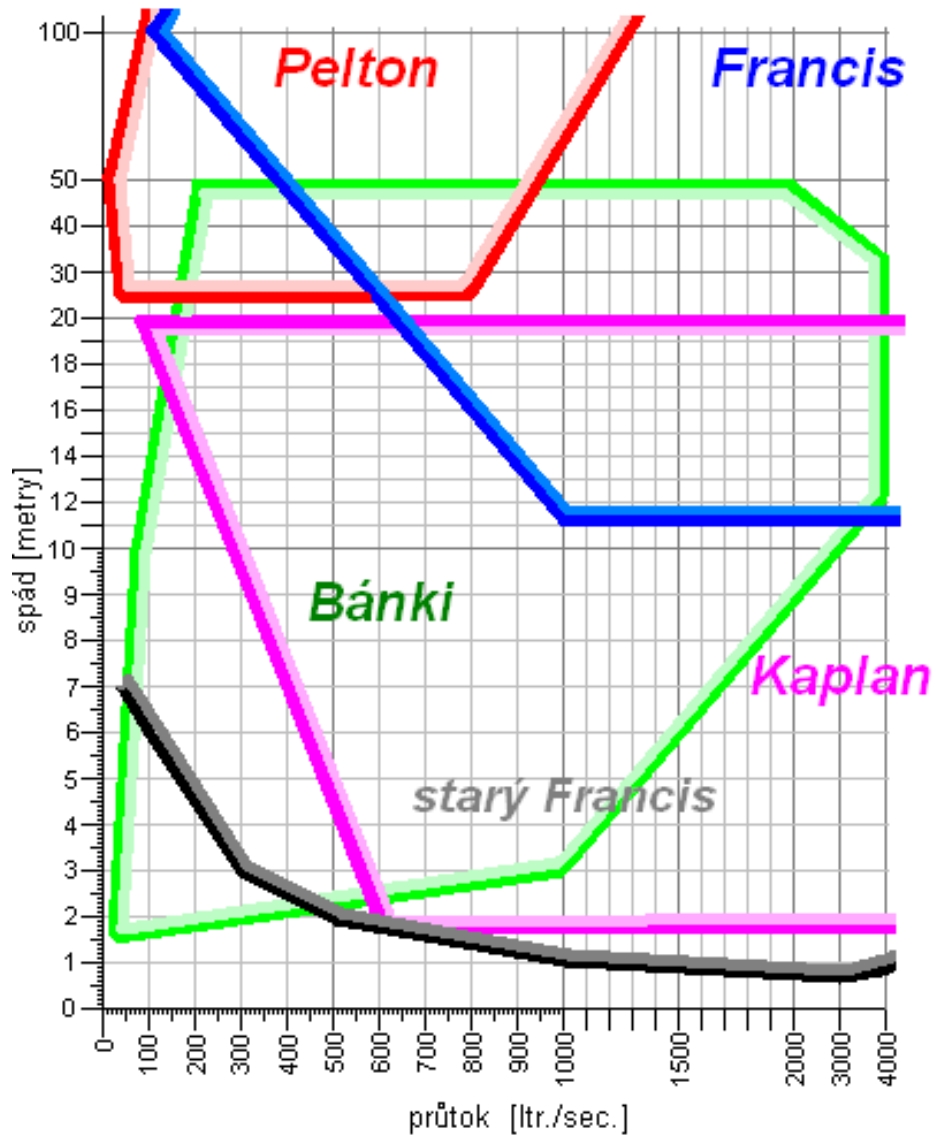
Nejstarším známým zařízením pro využití vodní energie je lopatkové vodní kolo. Zmínky o něm pocházejí již z 2. století př. n. l. Představuje tedy přímého předka vodní turbíny. Motivací pro vývoj nového vodního pohonu byla nízká účinnost vodního kola (20 - 30 %). K vývoji vodní turbíny bylo třeba dokončit analýzu chování ideální kapaliny zásluhou Leonarda Eulera a Daniela Bernoulliho působících v Petrohradské Ruské akademii věd v 18. století. První centrifugální vodní turbína byla zkonstruována roku 1835 Francouzem Benoitem Fourneyronem, který předložil revoluční myšlenku horizontálně uloženého kola obtékaného vodou, čímž bylo dosaženo účinnosti 80 %.[4] Další významný konstruktér vodních turbín je Američan James B. Francis, který v roce 1848 vylepšil konstrukci vodní turbíny, dosáhl účinnosti 90 %. Jeho konstrukce se dodnes používá. Jako další významné konstruktéry vodních turbín lze jmenovat L. A. Peltona, V. Kaplana nebo D. Bánkiho.[12]



Obrázek 5: Francisova turbína, Kaplanova turbína, Peltonovo kolo [15]

Konstrukce turbíny se skládá z oběžného kola a regulačního orgánu. Oběžné kolo je osazeno lopatkami, které jsou poháněny proudící kapalinou. Regulačním orgánem obvykle bývá rozváděcí kolo, nebo vodní tryska. Rozváděcí kolo je statické a rozevíráním svých lopatek reguluje průtok turbínou a úhel, pod kterým voda dopadá na lopatky oběžného kola. V případě Kaplanovi a Dériazovy turbíny se na regulaci turbíny podílí i samotné oběžné kolo, jehož lopatky lze natáčet. Tím je možné dosáhnout maximální účinnosti ve větším rozsahu průtoku. Pokud je regulačním orgánem vodní tryska, výkon bývá regulován pomocí jehly, která podle aktuální polohy omezuje průtok vody skrz trysku.[3][4][12]

Turbíny lze rozdělit podle principu činnosti na rovnotlaké a přetlakové. Rozdíl spočívá v principu využití energie vodního spádu. U rovnotlakých turbín je tlaková energie převáděna na kinetickou, voda dopadá na lopatky oběžného kola turbíny a uvádí je do pohybu. Voda má tedy na vstupu i výstupu turbíny stejný tlak.[4][10] Běžně využívané rovnotlaké turbíny jsou Bánkiho turbína, která je v současné době s oblibou využívána v malých vodních elektrárnách, a Peltonova turbína vhodná pro vodní díla s vysokým spádem a nízkým průtokem.[4][12] Přetlakové turbíny naopak využívají kinetickou i tlakovou energii vodního spádu. Voda na vstupu má vyšší tlakovou i kinetickou energii, kterou během průchodu turbínou postupně ztrácí.[4][10] Typickými představiteli přetlakových turbín jsou Kaplanova turbína, vhodná pro nízké spády a velké průtoky, a Francisova turbína, která je díky velkému rozsahu výkonů, průtoků i spádů momentálně nejvyužívanější vodní turbínou.[4][5][12]



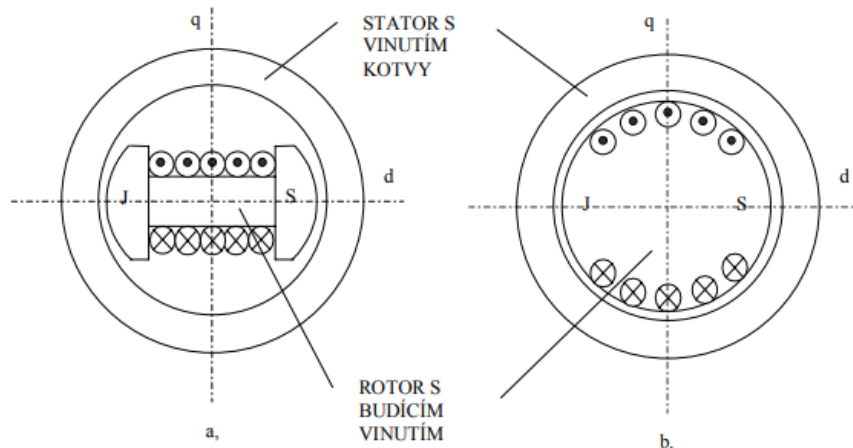
Obrázek 6: Rozsah vodních turbín [16]

K otázce přetlakových turbín je vhodné se zmínit o savkách, sacích troubách. Jedná se o zařízení, které umožňuje umístit přetlakovou turbínu nad hladinou spodní nádrže bez ztráty spádu. V principu se jedná o potrubí spojující turbínu s dolní nádrží spojitým sloupcem vody. Savky mohou mít válcový nebo kuželovitý průřez. Kuželovitý průřez napomáhá zvýšení účinnosti turbíny, neboť voda vlivem zvyšování průměru savky zpomaluje a dochází tak k využití zbytkové kinetické energie.[4][13]

2.3 Synchronní motorgenerátor

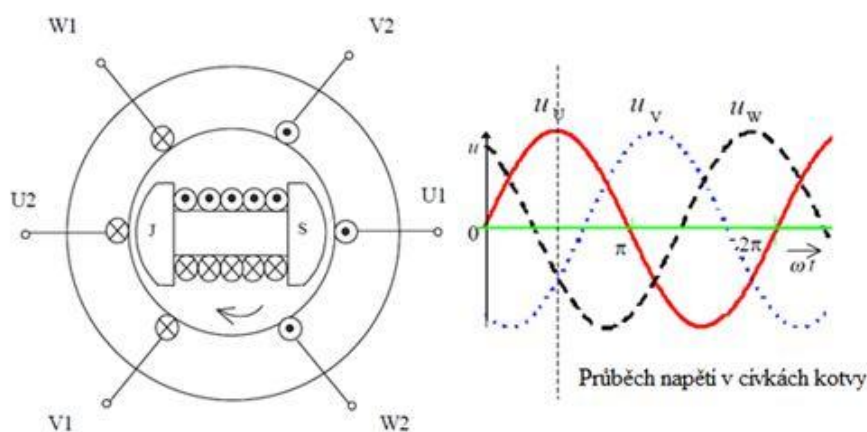
Synchronní stroje v současné době představují majoritní zdroj fázových napětí elektrické sítě.[10][14] Výjimku v tomto směru představují malé vodní elektrárny, kde se za určitých podmínek uplatňuje asynchronní stroj v generátorovém režimu z důvodu nižší pořizovací ceny a snadnější údržby. [14]

Konstrukce synchronního stroje se skládá z rotoru a statoru. Stator je nepohyblivá část stroje složená z elektrotechnických plechů, což napomáhá snížit ztráty v železe v důsledku působení vířivých proudů vznikajících působením rotujícího magnetického pole rotoru.[14][15] Stator v drážkách obsahuje vinutí jednotlivých fází. Vinutí fáze je rozděleno na minimálně dvě části, pólové páry, jejichž počet ovlivňuje synchronní otáčky stroje. Jednotlivá vinutí pak vůči sobě svírají úhel 120° v případě trojfázového stroje ($360^\circ/3 = 120^\circ$). Rotor synchronního stroje se liší podle využití. Rozlišujeme rotor s vyniklými póly, hladký rotor a rotor s permanentními magnety. Rotory s vyniklými póly mají cívky budícího vinutí nasazené na pólech zakončených pólovými nástavci. Stroje s vyniklými póly nazýváme také hydrostroje, podle jejich primárního využití v kombinaci s vodní turbínou. Hydrostroje obvykle obsahují vyšší počet pólových párů, aby byly kompenzovány nižší otáčky vodní turbíny. Hladký rotor obsahuje vinutí ve drážkách. Stroje s hladkým rotorem se označují jako turbostroje a používají se v kombinaci s parními turbínami. Rotory obsahující vinutí jsou napájeny stejnosměrným proudem, který při průchodu vinutím vyvolává magnetické pole rotoru.[10][17] Stroje s permanentními magnety mají na rotoru místo budícího vinutí permanentní magnety ze speciálních slitin. Synchronní stroje s permanentními magnety v současné době nahrazují krokové a stejnosměrné motory v oblastech trakce.[14]



Obrázek 7: Rotor s vyniklými póly, hladký rotor [19]

Budící vinutí synchronního stroje je zdrojem stejnosměrného magnetického pole. V případě generátorového režimu se magnetický obvod skrz vzduchovou mezeru uzavírá ve statoru a indukuje ve statorovém vinutí střídavé napětí.[17][19]

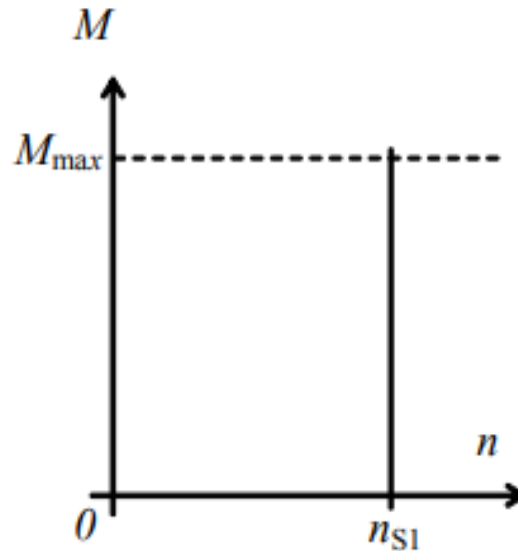


Obrázek 8: Princip alternátoru [20]

Pro fázování synchronního alternátoru do tvrdé elektrické sítě je nutné splnit několik základních pravidel:

- 1.. Stejný sled fází - fáze sítě i vinutí statoru musí mít stejnou posloupnost, v případě nesouhlasu je nutné zaměnit 2 svorky statoru
- 2.. Stejná frekvence - frekvence obou napětí musí být stejná, závisí na otáčkách rotoru
- 3.. Stejná napětí - amplitudy obou napětí musí být stejné, závisí na napětí rotoru stroje
- 4.. Stejný fázový posun - výstupní průběhy napětí se musí překrývat, je možné nastavit krátkodobou změnou otáček rotoru

V motorickém režimu pak motor zachovává synchronní otáčky. S růstem zátěžného momentu roste i zátěžný úhel, který reprezentuje úhel mezi pólem rotoru a točivým magnetickým polem statoru. Rotor se zastaví po překročení zátěžného úhlu $\beta > 90^\circ$. Tento stav se nazývá výpadek ze synchronismu.[19][10]



Obrázek 9: Momentová charakteristika synchronního motoru [19]

Z charakteru motoru vyplývají i nároky na speciální spouštění motoru, aby se motor dostal do synchronismu. K tomu se používají:

1. Asynchronní rozběh - rotor obsahuje kromě budícího vinutí i tlumící/rozběhové klecové vinutí. Rozběh probíhá jako u asynchronního motoru s klecí nakrátko. Po přiblížení synchronním otáčkám je rozběhové vinutí odpojeno a rotor se začne budit
2. Rozběh pomocným motorem - společná hřídel je osazena pomocným asynchronním motorem, který přiblíží rotor synchronním otáčkám. Toto řešení se používá pro rozběh motorů vysokých výkonů
3. Rozběh řízením kmitočtu - pomocí frekvenčního měniče jsou synchronní otáčky řízeny a plynule zvyšovány.[3][19]

3 Proces najíždění PVE

3.1 Najíždění turbínového režimu

Najíždění do turbínového režimu PVE představuje fázování synchronního hydroalternátoru obvykle do tvrdé sítě. Tvrdá síť se vyznačuje trojfázovým systémem, konstantním kmitočtem a napětím. Méně časté je pak najíždění do ostrovního provozu, kdy je hydroalternátor přímo připojen do izolované části vnější sítě, tzv. ostrova, bez tvrdé sítě, což zvyšuje nároky na regulační schopnosti bloku. Ostrovní provoz se uplatní v případě předcházení stavu nouze nebo stavu nouze. [3][18] Jak již bylo zmíněno, pro fázování synchronního stroje je nutné splnit podmínky stejné amplitudy, fáze, frekvence a stejného sledu fází. Na tomto základě je postavené tzv. fázování na tmu, kdy je sledován rozdíl napětí sítě a generátoru pomocí žárovek. Stroj se k síti připojí, když je napětí na žárovce minimální. Stroj je pak vtažen do synchronismu vlivem tvrdé sítě. V současné době je tato úloha řešena téměř výhradně pomocí automatických systémů.[3]

Z pohledu řízení představuje najíždění turbínového provozu řešení otázky přechodu nelineárního MIMO systému z klidového stavu na požadovanou výkonovou hladinu. Systém řízení musí během najíždění implementovat požadavky fázování a následně na dosažení požadované výkonové hladiny. Pro dosažení minimální doby najetí jsou na řídicí systém kladeny postupně různé požadavky. Prvotním požadavkem je dosažení synchronních otáček soustrojí. V té době nedochází k buzení turbogenerátoru, aby se minimalizoval mechanický odpor soustrojí. V této chvíli se uplatní pouze regulační orgán vodní turbíny. Po přiblížení se synchronním otáčkám následuje požadavek na dosažení výstupního napětí. Do hry vstupuje další vstup, budič synchronního stroje. Turbína tedy kromě působení pasivních odporů soustrojí musí překonávat i proměnný výkon alternátoru pro zachování synchronních otáček soustrojí. Po fázování stroje do tvrdé sítě začne regulační systém plnit funkci regulace výstupního výkonu systému.[3][10]

Rychlost najetí turbínového režimu PVE se liší podle soustrojí i vyspělosti řídicího systému. Společnost ČEPS provozující českou přenosovou soustavu definuje požadavek na najetí vodní elektrárny nebo PVE jako minutovou zálohu (schopnost najetí do 5 minut). [3]

3.2 Najíždění čerpacího režimu

Najíždění pochod pro čerpací provoz se liší podle konstrukce vodní elektrárny. Pokud se jedná o elektrárnu s trojstrojovým uspořádáním, představuje najíždění čerpadlového režimu pouze otázku přepnutí spojky a rozběhu synchronního motorogenerátoru.[8][9] Proto se v následujícím odstavci zaměříme pouze na otázky související s dvoustrojovým uspořádáním elektrárny s reversní Francisovou turbínou.

Ústrojí s čerpadlovou turbínou se obvykle nachází pod úrovní spodní nádrže. Při použití čerpadlové turbíny je nutné nejprve zavzdušnit prostor oběžného kola. Zavzdušnění pomůže snížit odpor prostředí při rozjezdu motorogenerátoru a zamezí poškození lopatek turbíny.[8][10]

Z pohledu řízení představuje najetí do čerpadlového provozu jednodušší úlohu, než najíždění turbínového režimu. Hlavní výhodou je plnění požadavků sériově a nikoli paralelně. Zavzdušnění turbíny představuje na soustrojí nezávislý děj prováděný čerpadlem a z pohledu řízení je sledována pouze binární informace, zda hladina vody již klesla na požadovanou úroveň. Rozjezd synchronního stroje představuje paradoxně nejsložitější část regulačního pochodu. Vzhledem k tomu, že turbína se zpravidla nachází pod úrovní hladiny spodní nádrže, probíhá opětovné zavodnění prostoru turbíny samovolně pomalým otevřením závěru do spodní nádrže.[8][9]

3.3 Omezení rychlosti najetí

Při návrhu řízení je nutné vzít v potaz omezující podmínky reálného systému. Omezení je možné nalézt na straně akčních orgánů i v samotných vlastnostech systému.

Rychlost akčních členů soustavy stanovuje omezení na rychlost změn akčních veličin. V otázce omezení řízení na straně akčních členů zaujímá hlavní místo pohon rozvodného kola. Zpravidla se jedná o hydraulický servomotor, který ovládá pomocí táhel celý systém rozváděcích lopatek.[10][12] Tím je omezena rychlost změn průtoku skrz turbínu. V případě, že by byla využita turbína s možností natáčení lopatek oběžného kola (v případě PVE Dériazova turbína), budou spadat do kategorie omezení na akčních členech i servomotory oběžného kola. Omezení by se projevilo v případě, kdyby servomotory rozvodného kola dokázaly měnit průtok turbínou rychleji, než by se oběžné kolo dokázalo adaptovat. Důsledkem by byl dočasný pokles účinnosti turbíny. Jako méně významné lze vnímat omezení na akčních členech motorogenerátoru. V tomto ohledu se jedná hlavně o budič synchronního stroje, kdy oproti časovým konstantám akčních členů turbíny lze dynamiku budiče prakticky zanedbat.[17]

Oblast statických omezení soustrojí představuje omezení maximálních a minimálních hodnot akčních zásahů. Mezi parametry konstrukce lze považovat jmenovitě průtok turbínou, případně hodnotu průtoku při přehlcení turbíny. Na straně synchronního motorogenerátoru se jedná o budící proud a napětí rotoru. Podobně jako v případě turbíny je možné statická omezení na straně buzení motorogenerátoru považovat za tzv. měkká omezení, tedy během provozu je možné krátkodobě překročit maximální hodnoty na straně budiče pro urychlení přechodového děje.[3][10]

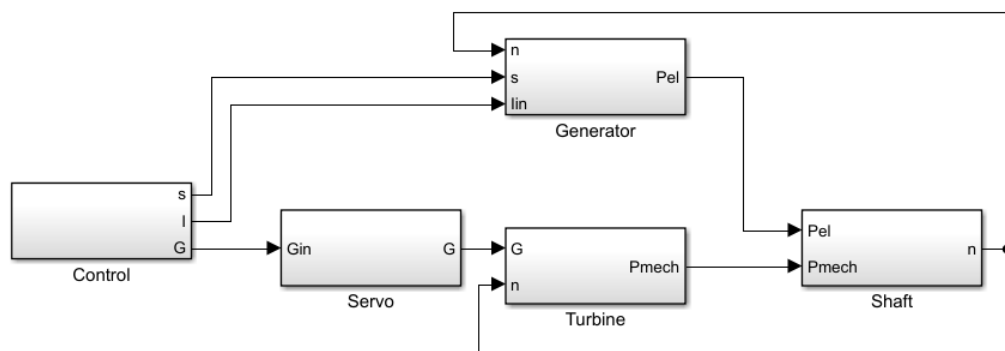
Mezi dalšími vlastnostmi ovlivňující řízení dynamické soustavy je třeba jmenovat celkový moment setrvačnosti soustrojí, který zásadním způsobem ovlivňuje dynamiku při najíždění do obou režimů. Je třeba také zmínit, že chování vodní turbíny vykazuje při rychlých změnách průtoku vlivem změny tlaku v turbíně vlastnosti systému s neminimální fází.[21] Systém tedy na změnu buzení reaguje se zpožděním a záklitem výstupního výkonu turbíny. Jako vlastnost způsobující nelinearitu lze jmenovat účinnost turbíny. Účinnost bývá obvykle vyjádřena jako konkávní funkce v závislosti na průtoku dosahující maxima pro normovaný průtok turbínou.[3]

Turbogenerátor představuje při najíždění z pohledu řízení komplexní MIMO systém se silným vlivem nelinearit a neminimální fází.

4 Model turbínového režimu

4.1 Model soustavy

Systém soustrojí elektrárny sestává z modelu servomotoru rozváděcího kola, modelu vodní turbíny, modelu synchronního generátoru a modelu hřídele spojující generátor s turbínou.

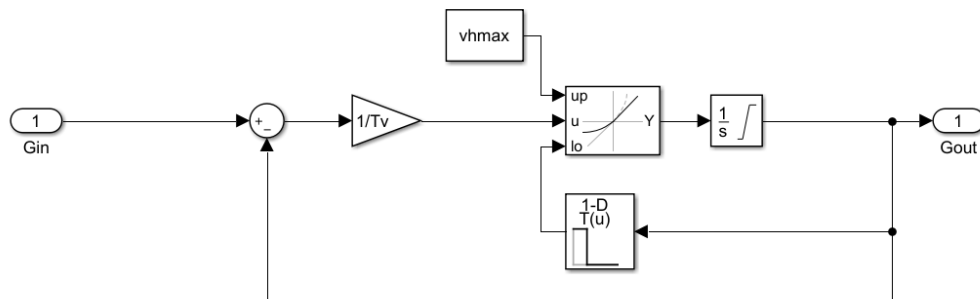


Obrázek 10: Schéma modelu

V následujícím textu bude popsán každý model části systému a také postup jeho verifikace pomocí dostupných dat.

4.2 Model servomotoru

Model servomotoru reprezentuje hydraulický servomechanismus ovládající rozváděcí lopatky turbíny. Model je představován zpětnovazební strukturou s omezeními na rozsahu a změnách výstupní veličiny. Model navíc respektuje tzv. buffering, tedy nižší rychlost zavírání lopatek při malých průtocích.[3] V modelu je buffering implementován pomocí bloku LUT. Jeho výstup je v modelu připojen k bloku rate limiter, který realizuje omezující podmínku rychlosti změny akční veličiny. Další omezující podmínka je implementována v integrátoru s omezením rozsahu výstupu.



Obrázek 11: Model servopohonu

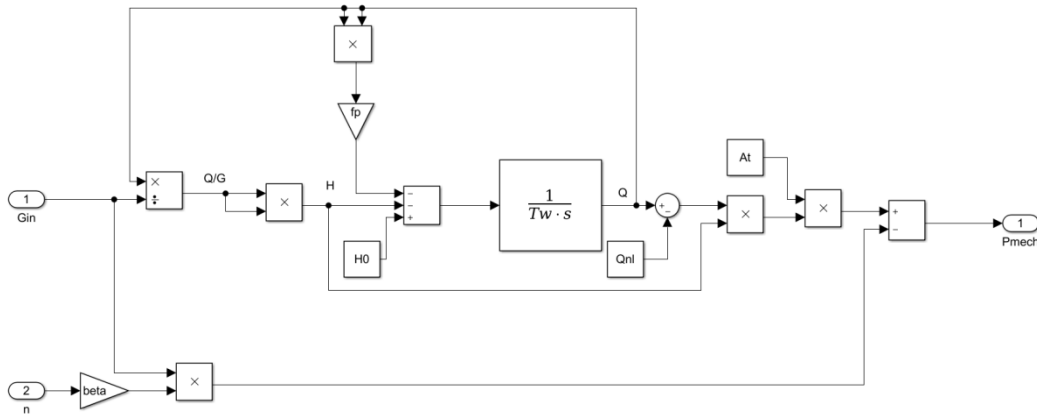
Dynamiku systému lze zapsat jako přenosovou funkci 1. řádu se statickým zesílením $k = 1$.

$$F_{servo}(s) = \frac{1}{T_v s + 1} \quad (1)$$

Vzhledem k omezenému rozsahu dostupných dat byly parametry servomotoru odhadnuty na základě průběhu akčního zásahu. Verifikace servomotoru bude rozvinuta v dalším odstavci ve spojení s vodní turbínou a vlivem na její dynamiku.

4.3 Model turbíny

Jak již bylo řečeno, dynamika vodní turbíny představuje značně nelineární systém s neminimální fází. Při hledání vhodného modelu bylo třeba hledat takový model, který by s dostatečnou přesností respektoval specifika vodní turbíny a zároveň jej bylo možné parametrizovat na základě dostupných dat. Jako příhodný se z tohoto hlediska jevil nelineární model podle IEEE.[22]



Obrázek 12: Model turbíny dle IEEE

Systém je reprezentován několika jednoduchými rovnicemi popisujícími dynamické chování vodní turbíny. V modelu není předpokládána elasticita vodního sloupce a vliv vodních rázů. Je předpokládána konstantní hodnota vodního spádu. Vstupy i výstupy modelu jsou normované. Vstupy představují otevření rozváděcích lopatek a otáčky soustrojí. Výstupem je mechanický výkon turbíny. Na vstupu je z aktuálního průtoku turbínou a polohy rozváděcích lopatek vypočtena hodnota působícího spádu z rovnice:

$$H = \left(\frac{Q}{G}\right)^2 \quad (2)$$

Následuje výpočet průtoku turbínou:

$$Q = \frac{H_0 - H - f_p Q^2}{T_w s} \quad (3)$$

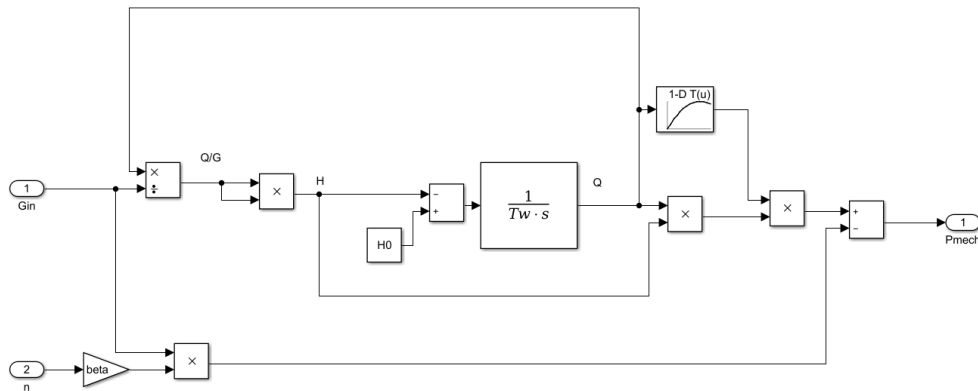
Vzorec vychází z představy konstantního vodního sloupce, tedy $H_0 = 1$. Model navíc respektuje vliv ztráty spádu v přivaděči závislé na kvadrátu průtoku turbínou a reprezentované koeficientem f_p . [3] T_w představuje časovou konstantu turbíny. [22]

Výsledný výkon je pak dán rovnicí:

$$P_{mech} = (Q - Q_{nl})HA_t - n\beta G \quad (4)$$

Mechanický výstup je dán součinem rozdílu aktuálního průtoku Q a průtoku naprázdno Q_{nl} , působícího vodního spádu H a proporcionalního faktoru turbíny A_t . Tato hodnota je před výstupem snížena o samoregulační faktor turbíny vycházející z jejích otáček, aktuální pozice rozváděcích lopatek a koeficientu β . [3]

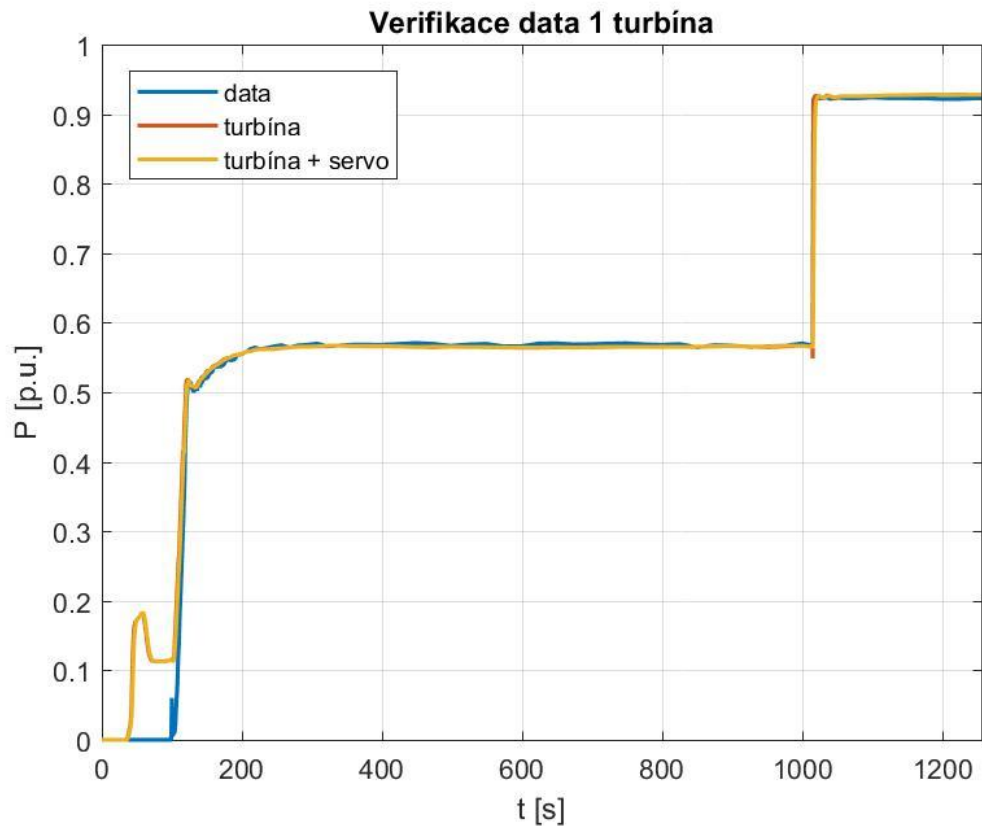
V rámci verifikace modelu došlo na základě výsledků k modifikaci struktury modelu. Vliv ztrát vlivem víření v přivaděči se ukázal jako zanedbatelný, proto byl zvolen $f_p = 0$ a bylo jej možné z modelu vynechat. Naopak aproximace účinnosti turbíny pomocí proporcionalního faktoru A_t se ukázala jako nedostačující. Účinnost turbíny byla aproximována polynomiální funkcí v závislosti na průtoku. Význam ztratil i koeficient Q_{nl} , jehož vliv je nyní zahrnut ve funkci účinnosti. Funkce účinnosti je v modelu implementována jako blok LUT.



Obrázek 13: Upravený model turbíny

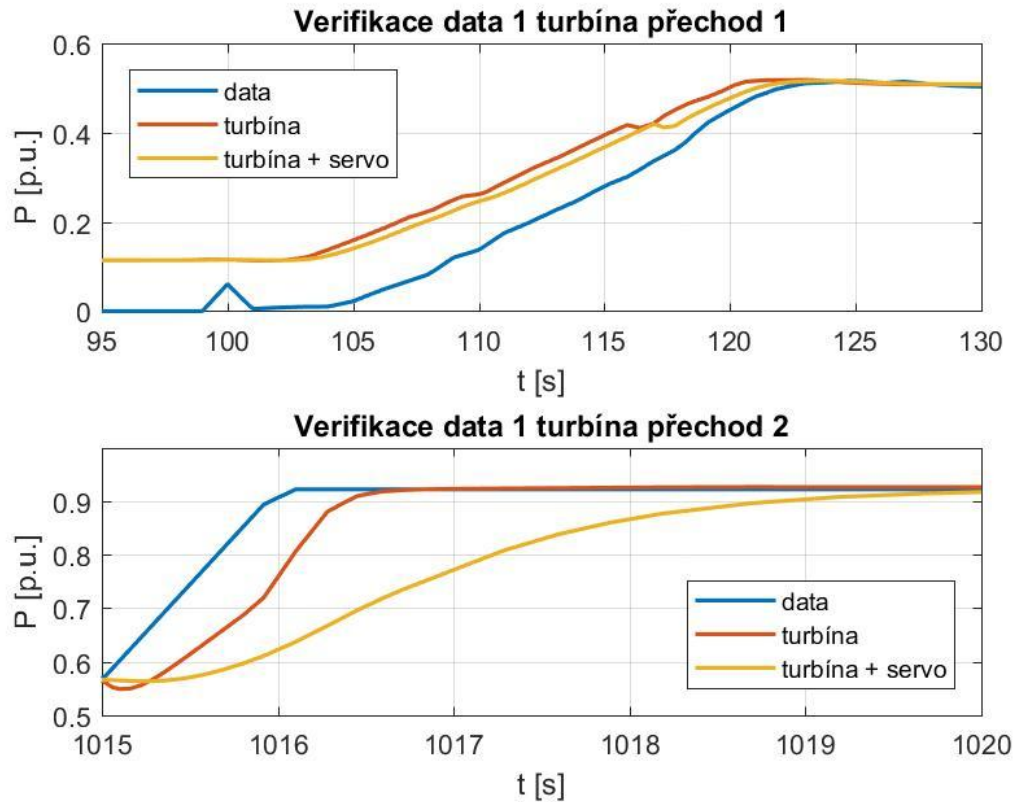
Verifikace modelu probíhala na základě dostupných dat z reálného provozu. Pro verifikaci byly použity dvě sady dat. První představuje celý proces najíždění, druhá popisuje najetí na požadovanou výkonovou hladinu při již dosažených synchronních otáčkách. Proces verifikace byl ztížen z důvodu absence dat o průtoku skrz turbínu a dat

skutečného mechanického výkonu turbíny. Výstup bylo tedy možné porovnávat pouze s elektrickým výkonem generátoru.



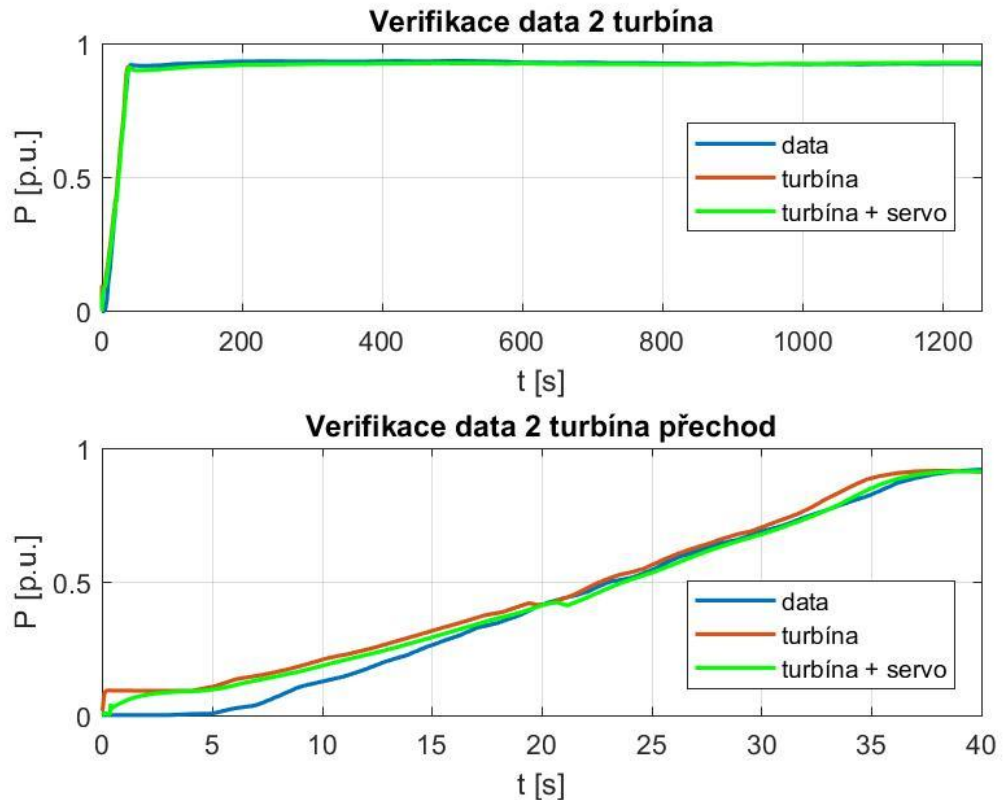
Graf 1: Verifikace data 1 turbína

Jak již bylo řečeno, výstup modelu je porovnáván s dostupnými daty výstupního výkonu turbogenerátoru. Z principu najíždění je tedy možné vysvětlit počáteční neshodu modelu s daty. Výkon turbíny musí být v počátku procesu vyšší, aby bylo dosaženo synchronních otáček, a následně je výkon redukován na úroveň kompenzace pasivních odporů soustrojí. Z grafu je patrné, že se statické vlastnosti modelu shodují se sadou dat. Pro důkladnější prozkoumání dynamických vlastností modelu použijeme grafy s detailem na přechody výkonových hladin.



Graf 2: Verifikace data 1 turbína detail

Vliv modelu servomotoru se projevuje pouze v dynamické oblasti. Z grafu druhého přechodu vyplývá jeho negativní vliv na dobu ustálení žádané hodnoty. Z pohledu řízení systém servomotoru minimalizuje vliv nenulové fáze systému turbíny během přechodu. I během prvního přechodu je vidět vliv modelu servomotoru na dynamiku, kdy se oproti samostatnému modelu turbíny přechod opoždí, více se tím pádem přibližuje ke křivce naměřených dat. Rozdíl dynamiky vychází pravděpodobně z reálného systému řízení PVE, které je schopné provádět rychlejší trendové změny vzájemnou vazbou motorgenerátoru a turbíny.



Graf 3: Verifikace data 2 turbína + detail

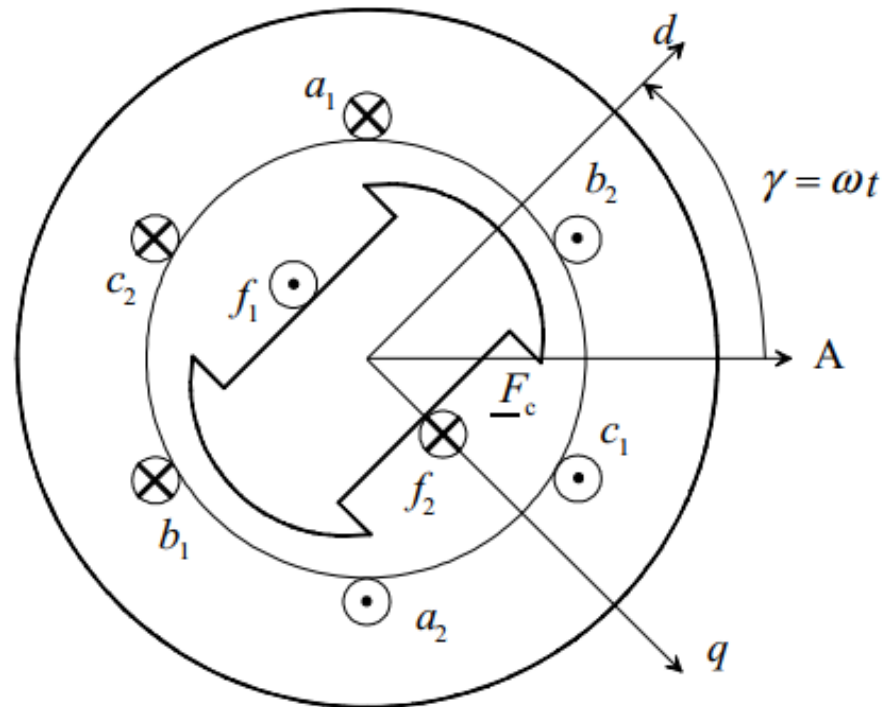
Druhá verifikační sada dat sestává z najezení do žádaného výkonu s již dosaženými synchronními otáčkami soustrojí. Proto není na začátku procesu patrný rozdíl v hodnotách výkonu turbíny a generátoru. Z prvního grafu vyplývá shoda statických vlastností modelu a naměřených dat.

Na grafu přechodu je vidět v prvních 5 sekundách ustálení obou systémů na výkonovou hladinu překonávající pasivní odpory. Zde je patrná dynamika servomotoru a jeho omezující podmínky, které se projeví při nájězdu na tuto výkonovou hladinu. Během přechodu na požadovanou výkonovou hladinu dynamika servomotoru způsobí přimykání výstupu ke křivce dostupných dat.

Z verifikací vyplývá, že model simuluje dostatečně přesně dynamiku reálného systému v celém pracovním rozsahu systému. Model bude možné použít pro simulaci chování vodní turbíny. Model servomotoru bude do systému taktéž zahrnut, protože realizuje omezující podmínky soustrojí.

4.4 Model hydroalternátoru

Pro simulaci dynamiky synchronního generátoru byl zvolen dq model z důvodu jednodušší parametrizace systému. DQ modely vycházejí z tzv. Parkovy transformace. Parkova transformace umožňuje transformovat trojfázový souřadnicový systém a, b, c stroje do souřadnicového systému d, q pevně spjatého s rotorem stroje. Bližší informace o Parkově transformaci lze nalézt v [23].



Obrázek 14: Parkova transformace [3]

Pro simulaci předpokládáme, že je stroj vybaven tlumícím vinutím (amortizérem), které je v případě hydroalternátoru umístěno v drážkách rotoru v pólových nástavcích.[3] Pro syntézu diferenciálních rovnic použijeme zjednodušené schéma obvodů synchronního stroje. Model reprezentuje generátor pracující v ostrovním provozu, tedy není zahrnut vliv tvrdé sítě.

Pro jednotlivá vinutí je možné sestavit napěťové rovnice v systému dq, kde je výstupní napětí funkcí proudu, odporu vinutí, úhlové rychlosti soustrojí a sprážených magnetických toků.

Vinutí v ose d:

$$U_{d1} = R_{d1}i_{d1} + \frac{d\psi_{d1}}{dt} - \omega\psi_{q1} \quad (5)$$

Vinutí v ose q:

$$U_{q1} = R_{q1}i_{q1} + \frac{d\psi_{q1}}{dt} + \omega\psi_{d1} \quad (6)$$

Budící vinutí v ose d:

$$U_{d2} = R_{d2}i_{d2} + \frac{d\psi_{d2}}{dt} \quad (7)$$

Tlumící vinutí s ose d:

$$0 = R_{d3}i_{d3} + \frac{d\psi_{d3}}{dt} \quad (8)$$

Tlumící vinutí v ose q:

$$0 = R_{dq3}i_{q3} + \frac{d\psi_{q3}}{dt} \quad (9)$$

Po dosazení za sprážené magnetické toky a úpravě rovnic získáme soustavu diferenciálních rovnic popisující dynamické chování synchronního generátoru s tlumícím vinutím:

$$\frac{di_{d1}}{dt} = \frac{1}{-L_{d1}} \left(u_{d1} + R_{d1}i_{d1} - M_{d12} \frac{di_{d2}}{dt} - M_{d13} \frac{di_{d3}}{dt} - \omega L_{q1}i_{q1} - \omega M_{q13}i_{q3} \right) \quad (10)$$

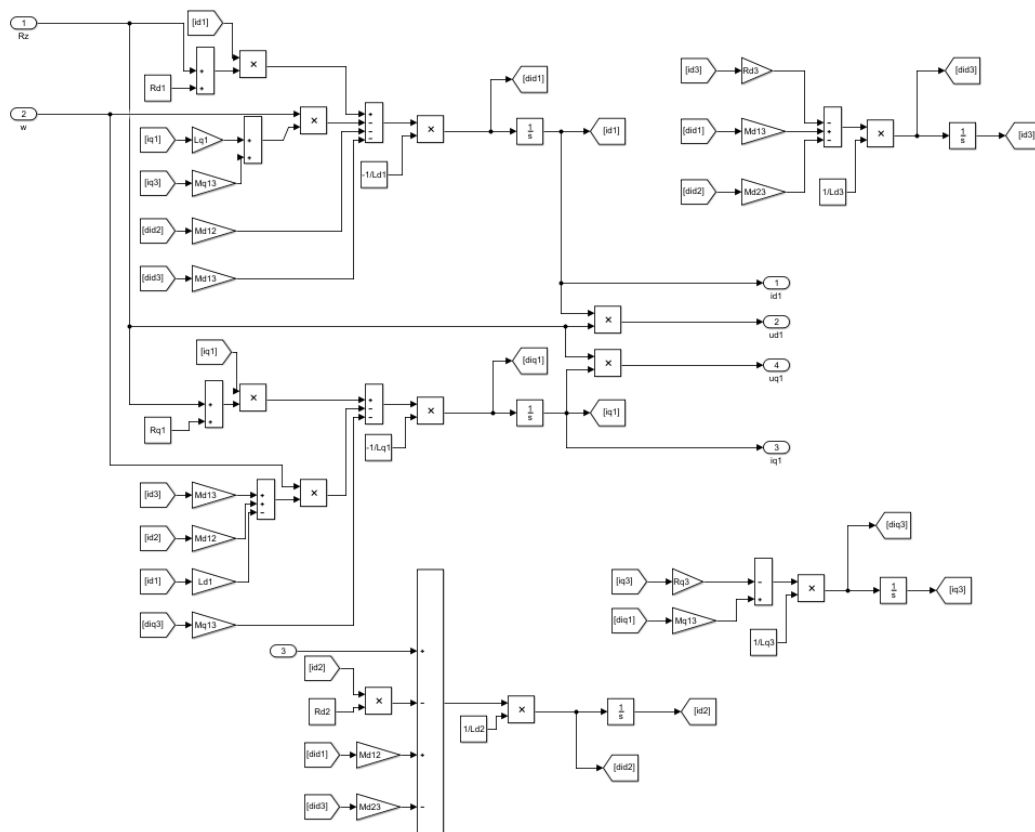
$$\frac{di_{q1}}{dt} = \frac{1}{-L_{q1}} \left(u_{q1} + R_{q1}i_{q1} - M_{d13} \frac{di_{q3}}{dt} + \omega L_{d1}i_{d1} - \omega M_{d12}i_{d2} - \omega M_{d13}i_{d3} \right) \quad (11)$$

$$\frac{di_{d2}}{dt} = \frac{1}{L_{d2}} \left(u_{d2} - R_{d2}i_{d2} + M_{d12} \frac{di_{d1}}{dt} - M_{d23} \frac{di_{d3}}{dt} \right) \quad (12)$$

$$\frac{di_{d3}}{dt} = \frac{1}{L_{d3}} \left(u_{d3} - R_{d3}i_{d3} + M_{d13} \frac{di_{d1}}{dt} - M_{d23} \frac{di_{d2}}{dt} \right) \quad (13)$$

$$\frac{di_{q3}}{dt} = \frac{1}{L_{q3}} \left(u_{q3} - R_{q3}i_{q3} + M_{q13} \frac{di_{d1}}{dt} - M_{d23} \frac{di_{d2}}{dt} \right) \quad (14)$$

Detailní odvození dynamického modelu lze nalézt v [23] a [25].



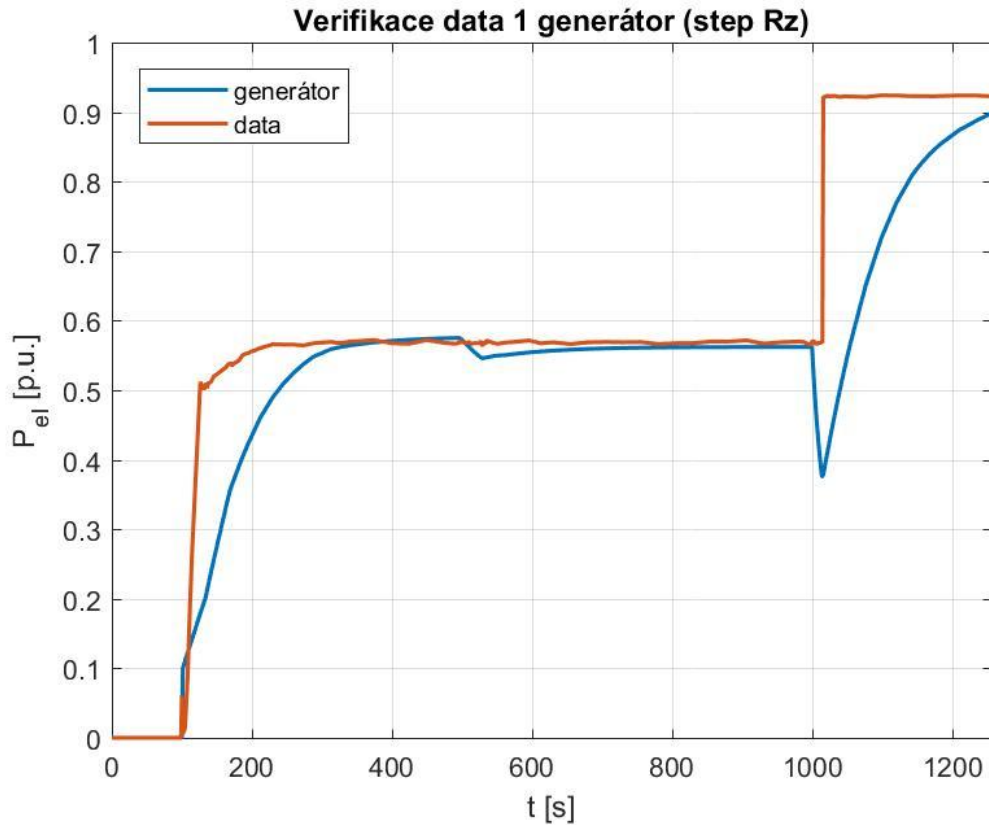
Obrázek 17: Model synchronního generátoru

Výstupní výkon modelu je dán součinem vektorových součtů výstupních napětí a proudů vinutí statoru v systému dq:

$$P_{el} = \sqrt{i_{d1}^2 + i_{q1}^2} \cdot \sqrt{u_{d1}^2 + u_{q1}^2} \quad (15)$$

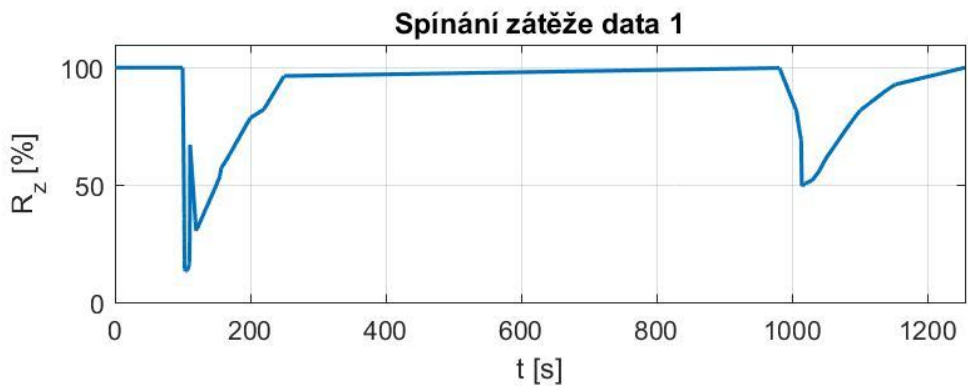
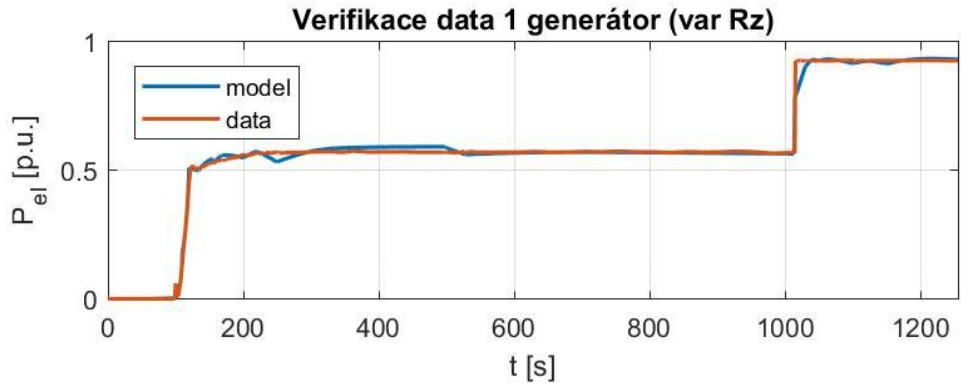
Pro odstranění algebraických smyček systému a rozšíření regionu konvergence řešení byly využity přenosové funkce 1. řádu s řádově nižší časovou konstantou oproti dynamice modelu. Rozdíl výstupů při porovnávání výstupů modelu s algebraickými smyčkami a bez algebraických smyček představoval méně než 2 %.

Model byl parametrizován na základě dostupných dat. K verifikaci modelu byly využity stejné sady dostupných dat o výstupním výkonu synchronního generátoru, jako tomu bylo v případě modelu vodní turbíny.

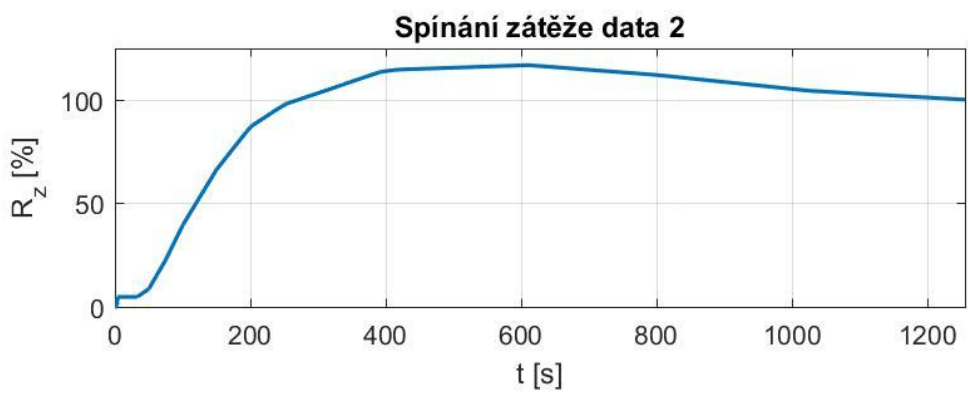
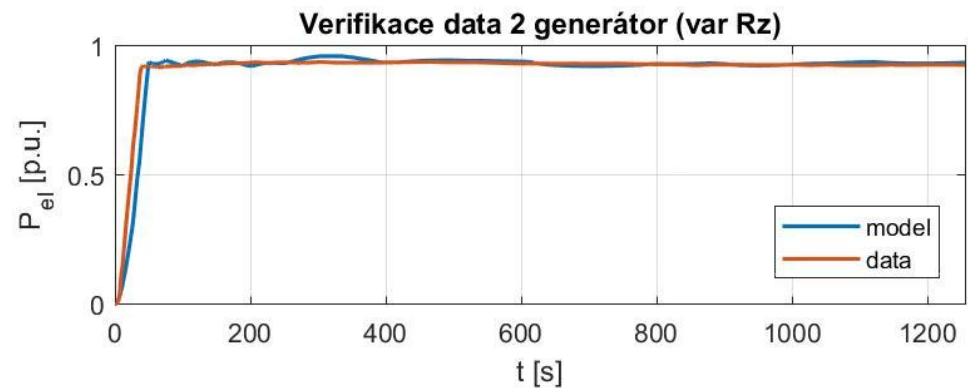


Graf 4: Verifikace modelu generátoru (step Rz)

Graf představuje verifikaci při skokových změnách zátěžového odporu R_z . Z grafu vyplývá, že model v prvním přechodu aproximuje přirozenou dynamiku generátoru, nicméně značná část přechodu je ovlivněna pravděpodobně regulačním zásahem. Z hlediska charakteru modelu je možné si zavést pomocný vstup, který bude představovat spínání zátěže generátoru během přechodů mezi výkonovými hladinami.



Graf 5: Verifikace modelu generátoru data1 (R_z var)



Graf 6: Verifikace modelu generátoru data2 (R_z var)

Z grafu verifikace modelu při využití spínání zátěže vyplývá, že bylo dosaženo většího přiblížení naměřeným průběhům. V obou případech se projevuje zvlnění výstupu modelu oproti naměřeným datům, což lze přisoudit pravděpodobně kombinaci chyb odhadu průběhu spínání zátěže v kombinaci se šumem na vstupních datech z reálného provozu. Další nepřesnost do modelu zanáší konstantní hodnoty parametrů stroje, které jsou ve skutečnosti funkcemi elektrického proudu a teploty.

4.5 Model hřídele

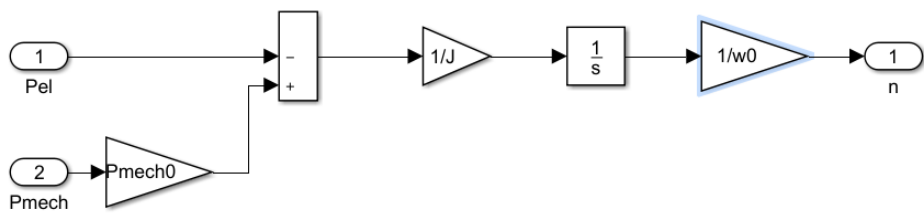
Model hřídele představuje jednoduchý systém vycházející z požadavku rovnováhy výkonů turbíny a synchronního generátoru.

$$P_{mech} - P_{el} = 0 \quad (16)$$

Vztah platí pro hřídel bez zahrnutí deformací a při zanedbání pasivních odporů. Při nerovnováze výkonů dochází ke změně otáček soustrojí.

$$\omega = \frac{1}{J} \int (P_{mech} - P_{el}) dt \quad (17)$$

Rovnici je pak možné interpretovat v diagramu.



Obrázek 18: Model hřídele

Na diagramu je na vstupu mechanického výkonu turbíny zesilovač, který převádí normovaný tvar výstupu turbíny na jednotky SI. Na výstupu je pak hodnota úhlové rychlosti hřídele opět normována. Pro normovanou hodnotu úhlové rychlosti a otáček platí vztah:

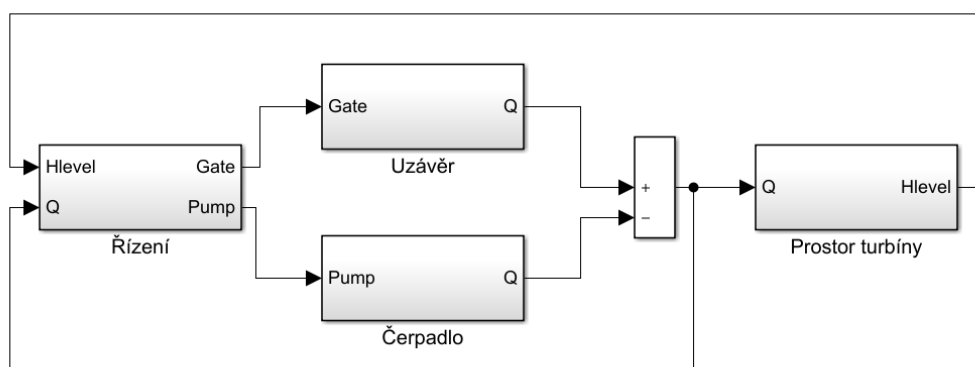
$$\frac{\omega}{\omega_0} = n \quad (18)$$

Proto je možné výstup použít ve zpětné vazbě k modelu turbíny. U zpětné vazby do modelu generátoru je nutné zahrnout zpětný převod na jednotky SI.

5 Úprava modelu na čerpadlový režim

Úprava modelu pro čerpadlový režim představuje zásadní zásah do jeho struktury. Jak již bylo řečeno, najetí čerpadlového režimu představuje otázku tří sérově řazených úkolů. Do schématu bude zapotřebí tedy zahrnout i logické proměnné signalizující aktuální stav procesu.

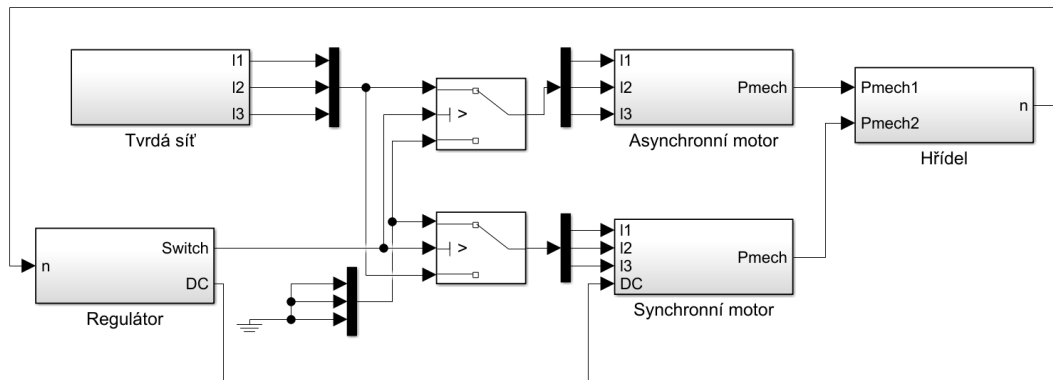
Během první fáze dojde k uzavření uzávěru spodní nádrže a odčerpání vody z prostoru oběžného kola turbíny. V modelu bude zahrnuta dynamika akčního členu uzávěru. Lze předpokládat podobnou strukturu jako v případě servomotoru rozváděcích lopatek turbíny. Jedná se tedy o SISO systém s astatismem prvního řádu ve zpětnovazební smyčce. Jeho výstupem by bylo procentuální omezení průtoku ze spodní nádrže. Oproti tomu by čerpadlo bylo představováno přenosovou funkcí, která aproximuje dynamiku náběhu čerpadla. Výstup bude představován objemovým průtokem odčerpávané vody. Prostor oběžného kola bude představován systémem s astatismem prvního řádu.



Obrázek 19: Model zavzdušnění

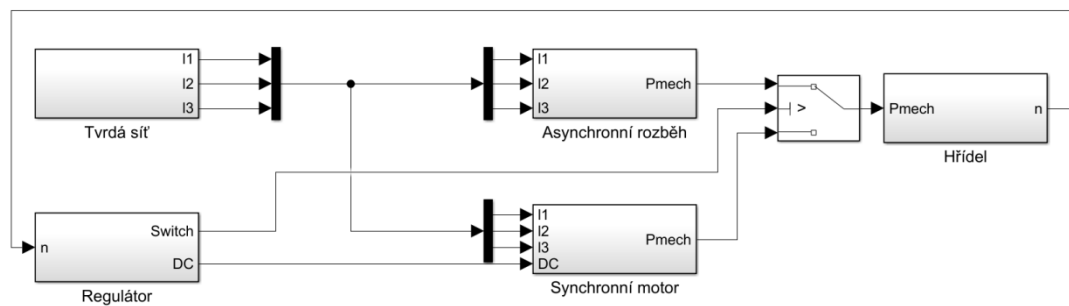
Po dosažení požadované hladiny vody v prostoru turbíny nastává fáze rozběhu synchronního motorgenerátoru. Rovnice synchronního stroje je třeba upravit na simulaci motorického režimu. Konkrétní podoba modelu se liší podle typu rozběhu, který bude vybrán. Pro asynchronní rozběh nebo rozběh pomocným asynchronním strojem je třeba do modelu zahrnout rovnice pro asynchronní motor. Rozběh synchronního stroje řízením frekvence vyžaduje zahrnout model frekvenčního měniče.

Pro stanovení otáček soustrojí je možné použít model hřídele z turbínového režimu při zanedbání pasivních odporů a odporu vzduchu v prostoru turbíny.



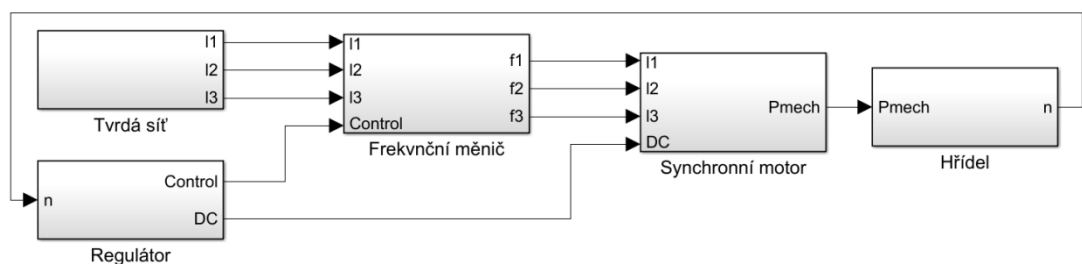
Obrázek 20: Rozběh asynchronním pohonem

V případě rozběhu asynchronním motorem dochází nejprve k přiblížení synchronním otáčkám a následně k připojení synchronního motoru na fáze tvrdé sítě. Nevýhodou je zvýšení momentu setrvačnosti soustrojí o moment setrvačnosti asynchronního motoru.



Obrázek 21: Asynchronní rozběh

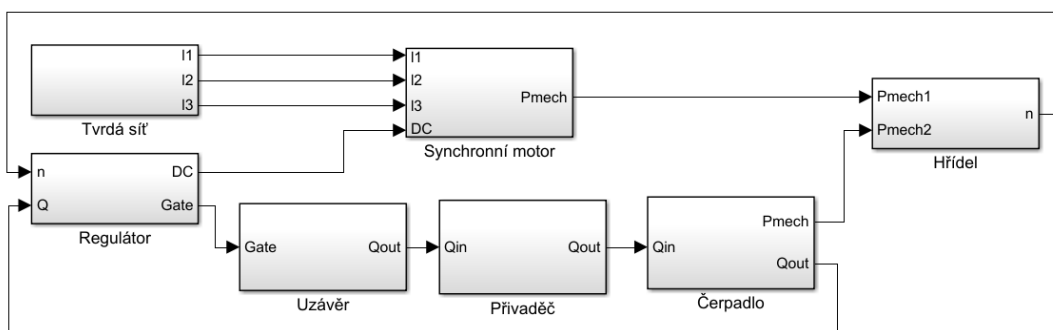
Při asynchronním rozběhu se uplatní speciální rozběhové vinutí rotoru, které se při přiblížení synchronním otáčkám odpojí a motor přechází do synchronního režimu.



Obrázek 22: Rozběh frekvenčním měničem

Použití frekvenčního měniče umožní přímé řízení synchronních otáček motoru. Motor pracuje v proměnných synchronních otáčkách po celou dobu rozběhu do dosažení požadovaných otáček soustrojí.

Poslední fází procesu najíždění představuje zahájení čerpání po opětovném zavodnění turbíny. Do modelu bude opět nutné zahrnout dynamiku uzávěru spodní nádrže, pomocí které proběhne opětovné zavodnění prostoru turbíny. Dále je třeba zahrnout do modelu dynamiku přivaděče ze spodní nádrže. Model turbíny bude nahrazen modelem čerpadla, které je přes hřídel spojeno se synchronním motorem.



Obrázek 23: Model čerpání

Pokud by model nesloužil pouze pro simulaci najížděcího pochodu, bylo by nutné zahrnout i dynamiku a vliv změny objemu horní nádrže.

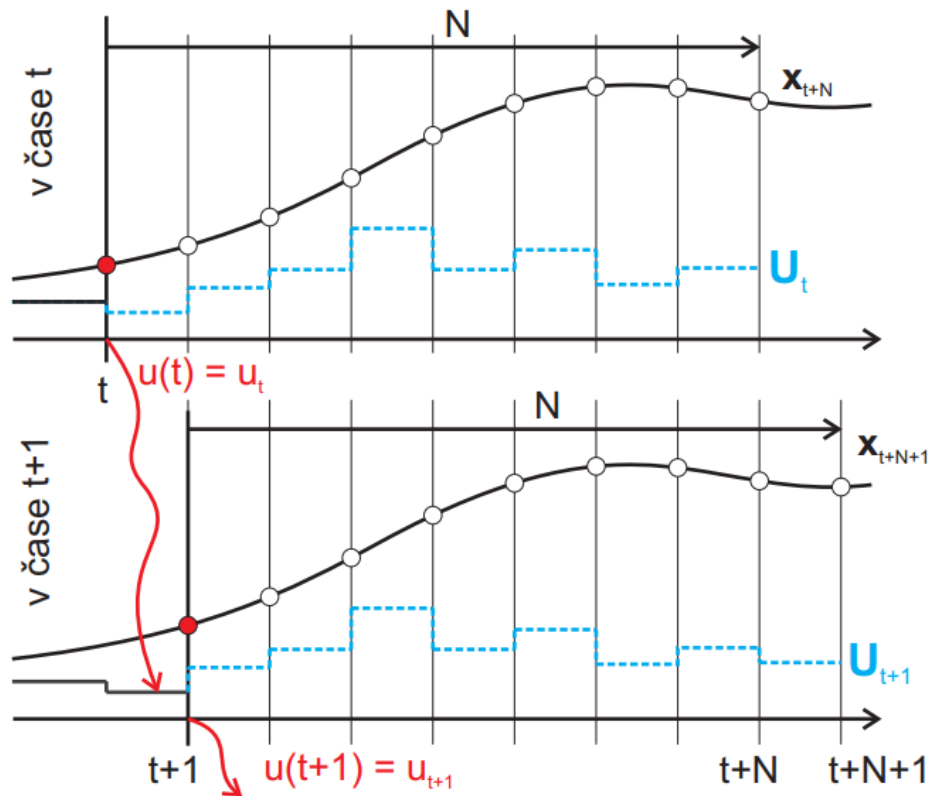
Konkrétní podoba simulačních schémat by se lišila od uvedených diagramů podle konkrétních použitých modelů.

6 Návrh řízení PVE

6.1 Prediktivní řízení založené na modelu

Prediktivní řízení založené na modelu (MPC) představuje pokročilou metodu řízení dynamického systému s rozsahem využití od jednoduchých SISO modelů po složité MIMO struktury. Vznik prediktivního řízení se datuje do 60. let 20. století, kdy byl během ropné krize kladen požadavek na zvýšení efektivity petrochemického průmyslu skrz optimalizaci regulačních pochodů. Využití MPC se dříve omezovalo na procesy s pomalou dynamikou kvůli vysokým nárokům na výpočetní výkon řídicí jednotky. Navíc, jak název napovídá, vyžaduje MPC vhodný dostatečně přesný dynamický model řízeného procesu.[26] V současné době jsou tyto nevýhody kompenzovány neustálým růstem výpočetního výkonu řídicích jednotek, které umožňují implementaci MPC.

MPC se liší od jiných regulačních metod zahrnutím omezujících podmínek. Řídicí algoritmus je tedy navržen mnohem optimálněji než v případě jiných řídicích postupů. Zásadním prvkem MPC je model řízené soustavy. Dynamický model soustavy může mít různou podobu (přenosová funkce, stavový popis, ...). Nevýhodou je požadavek na dostatečnou přesnost modelu v co největším rozsahu řízené soustavy při zachování linearity modelu. Nelineární prediktivní řízení v současné době představuje předmět výzkumu. Nevýhodou nelineárních modelů systémů je numerické řešení, jehož konvergence není vždy zaručena. MPC predikuje vývoj stavu systému v tzv. horizontu predikce a sekvenci akčních zásahů v tzv. horizontu řízení. Základem je vnitřní model, na jehož základě jsou odhadovány budoucí hodnoty výstupů systému. To se děje na základě minulých hodnot výstupů a vstupů a na základě budoucích akčních zásahů. Výpočet budoucích akčních zásahů probíhá v každém okamžiku vzorkování. Jedná se o minimalizaci určitého kritéria, obvykle kvadratického, s cílem nalézt takový průběh akční veličiny, který by minimalizoval dané kritérium. Výsledkem je optimalizovaná posloupnost akčních zásahů v rámci horizontu řízení. Po vypočtení se použije pouze první člen posloupnosti, zbylé hodnoty nejsou využity a výpočet probíhá v dalším kroku znovu. Proto se často hovoří o tzv. klouzavém, nebo ustupujícím horizontu.[26]



Obrázek 24: Princip klouzavého horizontu

Při řešení optimalizační úlohy je třeba zahrnout do výpočtu omezující podmínky vycházející z charakteru řízené soustavy a akčních členů. Omezení se nejčastěji týkají velikosti a rychlosti změn akčních zásahů a stavových veličin. Omezující podmínky lze rozdělit podle principu na měkké a tvrdé. Tvrdé omezující podmínky představují omezení, která není možné za žádných předpokladů překročit. Příkladem může být omezení vycházející z maximálního rozsahu a rychlosti změn polohy rozváděcích lopatek turbíny. Měkká omezující podmínka je taková, kterou je možné krátkodobě překročit. Příkladem z modelu může být napětí na budícím vinutí motorgenerátoru. Omezující podmínky mohou být konstantní, nebo v čase proměnné. Příkladem je vliv bufferingu na rozváděcí lopatky turbíny. Zavedením omezujících podmínek se obecně zvyšuje složitost výpočtu a může nastat případ, kdy optimalizační úloha nebude mít řešení.[26]

Realizace MPC tedy vyžaduje provádění optimalizační úlohy v každém okamžiku vzorkování a dokončení výpočtu do dalšího okamžiku vzorkování. Jedná se tedy o řešení optimalizační úlohy v on-line režimu. Implementace vyžaduje vysoké nároky

na výpočetní výkon řídicí jednotky, které narůstají se složitostí modelu systému, počtem omezujících podmínek a délkou horizontů řízení a predikce. Alternativu s nižšími nároky na výpočetní výkon představuje explicitní MPC. Explicitní MPC na rozdíl od běžného, implicitního, MPC hledá optimální řízení v off-line režimu pro všechny možné stavy systému. Při výpočtu se uplatní multiparametrické kvadratické programování, které hledá optimální řešení pro všechny možné stavy systému. Stavový prostor je následně rozdělen na tzv. kritické regiony, ve kterých jsou definovány spojité afinní funkce a příslušné akční zásahy. Výsledkem je tabulka afinních funkcí, ve které se podle aktuálního stavu vyhledává kritický region a k němu příslušný akční zásah. On-line se provádí pouze vyhledávání konkrétního regionu. Protože optimalizace není řešena on-line je možné aplikovat metody explicitního MPC i na procesy s rychlou dynamikou. Nevýhodou představuje počet kritických regionů, kdy s počtem regionů roste velikost tabulky, tedy požadavek na paměť řídicí jednotky, i náročnost na výpočetní výkon, protože roste složitost výběru příslušného regionu. [26][27]

6.2 Návrh MPC

Systém řízení turbogenerátoru představuje nelineární MIMO systém, který při najíždění turbínového režimu přechází mezi jednotlivými fázemi. Pro potřeby řízení by bylo vhodné tedy uvažovat o hierarchické uspořádání řízení systému. Vrchní vrstva bude na základě fáze procesu a stavových veličin určovat žádané hodnoty výstupů a dále odesílat do spodní vrstvy informaci, který z daných řídicích algoritmů má být aktuálně použit. V každé fázi procesu budou přiřazovány výstupním veličinám různé priority a navíc se v závislosti na stavu systému budou měnit i pracovní body, ve kterých bude systém pracovat. Druhá vrstva bude představována prediktivním řízením. Systém bude dále rozdělen na turbínu, druhou část bude představovat generátor. Rozdělení vychází z různých dynamických charakteristik systémů a požadavků na regulaci v jednotlivých krocích. Rozdělení na jednotlivé části umožní přidělit každé úloze jedno jádro procesoru a zjednoduší se tak analýza prostředků nutných pro realizaci řídicího algoritmu v reálném čase.

Je třeba definovat vstupní a výstupní veličiny jednotlivých systémů a určit jejich význam v rámci řízení. Řízenou výstupní veličinou turbíny je mechanický výkon. Akční veličinou je požadavek na rozevření lopatek. Otáčky soustrojí nelze predikovat

na základě modelu turbíny, proto bude na otáčky nahlíženo jako na měřenou poruchovou veličinu. Vstupy generátoru jsou napětí na budícím vinutí, otáčky soustrojí, odpor zátěže a spínání zátěže. Akčními veličinami jsou napětí budícího vinutí a spínání zátěže. Odpor zátěže představuje měřenou poruchovou veličinu. V případě, že předpokládáme provoz generátoru pouze v oblasti blízké synchronním otáčkám, lze namísto otáček soustrojí zavést jako vstup měřenou poruchu, odchylku od synchronních otáček. Výstupem generátoru je elektrický výkon, výstupní napětí, frekvence výstupního napětí a fáze výstupního napětí oproti tvrdé elektrické síti.

Protože systém generátoru i turbíny představuje MIMO systém se silným vlivem nelinearit, je nutné řešit otázku dopadů nelinearity na výsledky optimalizačních úloh prováděných na lineárních modelech soustavy. Pro řešení otázky, v kolika pracovních bodech je nutné systém linearizovat, je možné využít tzv. gap metriku. Původní využití gap metriky byla analýza neurčitosti zpětnovazebního obvodu. V současné době je využívána i jako nástroj analýzy podobnosti chování zpětnovazebních lineárních systémů.[28] Nelinearity systému budou kompenzovány sadou lineárních modelů pro různé pracovní body systému. Pro stanovení počtu pracovních bodů, ve kterých bude systém linearizován, bude použito kritérium gap metriky.

Najíždění lze rozdělit na tři fáze. První fází je dosažení synchronních otáček soustrojí. Vrchní vrstva řízení zadá požadavek MPC turbíny na dosažení požadované sekvence výkonů, které uvedou soustrojí do pohybu. Výsledkem bude uvedení soustrojí do synchronních otáček a výkon turbíny překonávající pasivní odpory soustrojí. Druhou fází je dosažení požadované výkonové hladiny. Požadavkem na spodní vrstvu MPC je sledování žádané hodnoty výkonu tak, aby nedošlo k porušení rovnováhy na hřídeli a tím se soustrojí nevzdálilo synchronním otáčkám. Třetí fází představuje fázování generátoru do sítě. Požadavkem je dosažení žádané hodnoty výstupního napětí pomocí spínání, minimalizace fázového rozdílu mezi výstupním napětím generátoru a elektrické sítě krátkodobým porušením rovnováhy hřídele a následné opětovné dosažení synchronních otáček. Výsledkem procesu je synchronní generátor pracující do tvrdé sítě.

Z popisu jednotlivých fází procesu najetí turbínového režimu vyplývá, že nejproblematictější část procesu z pohledu působících nelinearit je představována druhou fází, kdy soustrojí přechází na požadovanou výkonovou hladinu. V druhé fázi se

nejvíce projeví nelineárnost obou řízených systémů a bude potřeba přecházet mezi jednotlivými pracovními body. Při přechodu mezi lineárními modely je třeba použít jemné přepínání. To zanáší další požadavek na hardware pracující s optimalizační úlohou MPC v reálném čase.

Doba potřebná k najetí turbínového režimu se v případě vodních elektráren obecně pohybuje v řádu jednotek minut. Proto lze odhadnout požadavek na periodu vzorkování systému v řádu maximálně jednotek sekund. Řešení optimalizačních úloh v tak krátkém čase by neslo příliš velké výpočetní nároky na řídicí jednotku. Proto implicitní MPC s lineárními modely soustavy momentálně nelze považovat za vhodný prostředek pro řízení turbogenerátoru PVE z důvodu příliš vysokých nároků na výpočetní výkon řídicího systému.

Vzhledem k požadavku na nízkou hodnotu periody vzorkování představuje možné řešení problému explicitní MPC. Jeho výhodou jsou nižší nároky na výpočetní výkon, ovšem na úkor požadavků na paměť řídicí jednotky. Aplikace explicitního MPC by byla podmíněna vytvořením databáze tabulek afinních funkcí pro všechny potenciální výkonové hladiny soustrojí.

6.3 Ostatní metody řízení

Mezi dalšími pokročilými metodami řízení, které je možné zmínit v souvislosti s řízením PVE, lze jmenovat algoritmy využívající fuzzy logiky. Fuzzy logika se zakládá na tzv. neostrých množinách, kdy příslušnost prvku k množině nevyjadřujeme jako binární hodnotu, ale stupeň příslušnosti.[29] S využitím fuzzy přístupu je možné se setkat v oblasti řízení vodních turbín v různých podobách. Například využití struktury IMC s fuzzy modelem.[30] Je možné se setkat s MPC se sadou fuzzy modelů řídicí obecně nelineární soustavu s přepínáním on-line.[31] Mezi dalšími algoritmy, které se staly předmětem výzkumu v oblasti regulace vodních turbín lze jmenovat například adaptivní řízení[32], pracující s on-line adaptací řídicího algoritmu, nebo algoritmy založené na principu neuronových sítí.[33]

7 Závěr

V teoretické části práce seznamuje čtenáře s tématem PVE. Vysvětlen je základní princip fungování a význam PVE v elektrické síti i přehled současného stavu a trendů v oblasti PVE ve světě. Dále jsou uvedeny základní informace o vodních turbínách a synchronních strojích.

Cílem práce bylo popsat najíždění PVE s Francisovou vodní turbínou a stanovit omezení, která se projeví při najížděcím pochodu a změnách výkonových hladin. Principy najíždění byly detailně popsány a omezení byla definována zvláště pro dvoustorjové uspořádání PVE. Dále jsou uvedeny jednotlivé části modelu PVE v turbínovém režimu, který se skládá z hydraulického servomechanismu ovládajícího rozváděcí lopatky turbíny, modelu vodní turbíny, modelu synchronního stroje v generátorovém režimu v ostrovním provozu a modelu hřídele spojující vodní turbínu a synchronní stroj. Modely byly sestaveny a následně verifikovány podle dostupných dat. Dalším cílem práce bylo popsat podobu modelu v případě úpravy na simulaci najetí čerpacího režimu PVE. Čerpací režim byl uvažován pro PVE s dvoustrojovým uspořádáním a proces jeho najetí byl rozčleněn na tři fáze. Pro každou fázi vznikl teoretický model na základě analýzy příslušné fáze procesu. Poslední část práce se zaměřuje na návrh možné implementace MPC do řízení najíždění turbínového režimu PVE. Z analýzy vyplývá, že zavedení MPC, ať v implicitní, nebo explicitní podobě, by bylo problematické z důvodu rychlé dynamiky systému v kombinaci se silným vlivem nelinearit během procesu najíždění PVE.

V oblasti modelu soustavy představuje další vhodný krok k analýze procesu model synchronního stroje pracující v generátorovém režimu v tvrdé síti. Další možnost pokračování práce se nabízí v oblasti modelu čerpacího režimu, kde by bylo možné sestavit a verifikovat konkrétní model najíždění čerpacího režimu a na jeho základě provést návrh řízení procesu. Vzhledem k důvodům stojícím proti aplikaci MPC by bylo vhodné další práci v oblasti řízení najíždění turbínového režimu PVE směřovat spíše k jiným pokročilým technikám řízení. V tomto ohledu se jeví jako vhodný kandidát metody řízení vycházející z fuzzy logiky.

Použitá literatura

- [1] Statistiky obnovitelných zdrojů energie. *Eurostat* [online]. 2016 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics/cs
- [2] China | International Hydropower Association. *International Hydropower Association* [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.hydropower.org/country-profiles/china>
- [3] KOLEKTIV AUTORŮ. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. Praha: AEM, 2013. ISBN 978-80-260-44671-1.
- [4] *Energie z obnovitelných zdrojů*. Praha: ČEZ, 2011.
- [5] *Skupina ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, 1999 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.cez.cz>
- [6] Pumped Hydroelectric Storage (PHS). *Energy Storage Sense* [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://energystoragesense.com/pumped-hydroelectric-storage-phas/>
- [7] *Energyweb.cz* [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://www.energyweb.cz/>
- [8] ŠIMEK, Petr. *Přečerpávací vodní elektrárna*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [9] Přečerpávací vodní elektrárna - princip a uspořádání. *Oenergetice.cz* [online]. 2015 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/precerpavaci-vodni-elektrarna-princip-usporadani-2/>
- [10] *The electric power engineering handbook*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2001. ISBN 0-8493-8578-4/01.
- [11] *2017 Hydropower Status Report*. International Hydropower Association, 2017.
- [12] MACHÁT, Pavel. *Vodní turbíny a jejich využití*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [13] HAVLÁT, Pavel. *Úloha sací trouby pro práci vodní turbíny*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.

- [14] HORNÍK, Vincenc. *Regulace buzení synchronního generátoru*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [15] Energie vody. *Jzed-el-Vodni* [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: http://ok1zed.sweb.cz/s/el_vodniel.htm
- [16] *Abeceda malých vodních pohonů* [online]. 2013 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz>
- [17] MIKESKA, Jan. *Budící systémy synchronních alternátorů*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [18] VÁCLAVÍK, Martin. *Ostrovní režim synchronních strojů*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská universita v Plzni.
- [19] KOCMAN, Stanislav a Václav VRÁNA. *Provedení synchronních strojů* [online]. 2005 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab_synchronni_stroje_bc.pdf
- [20] Princip činnosti alternátoru. *DAWE.CZ* [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/83/Princip_Synchronn%C3%ADho_gener%C3%A1toru.JPG.
- [21] ŠPETLÍK, Jan. *Přednáška č. 10 Vodní elektrárny*. Praha: ČVUT, 2017. Dostupné také z: https://www.powerwiki.cz/attach/ENY/B1M15ENY_PR10_2017.pdf
- [22] IEEE WORKING GROUP. Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies. *Transactions on Power Systems*. 1992, (7), 167 - 179.
- [23] HORA, Oldřich a kol. *Regulační a budící systémy synchronních strojů*. Praha: SNTL, 1985.
- [24] JECHEL, Roman. *Synchronní generátor pracující do samostatné zátěže*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [25] CHROBÁK, Petr. *Dynamický model a odbuzování bezkartáčového synchronního generátoru*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

- [26] TATJEWSKI, Piotr. *Advanced Control of Industrial Processes*. Londýn: Springer, 2007.
- [27] KVASNICA, Michal. *Implicit vs Explicit MPC - Similarities, differences, and a path toward a unified method*. Aalborg, 2016.
- [28] HORÁLEK, Radek. *Multilineární prediktivní řízení palivových článků s pevným oxidickým elektrolytem*. Liberec, 2015. Autoreferát disertační práce. TUL.
- [29] MODRLÁK, Osvald. *Fuzzy řízení a regulace*. Liberec: TUL, 2002.
- [30] NAGODE, Klemen a Igor ŠKRJANC. *Modeling and internal fuzzy model power control of a Francis water turbine*. 2014.
- [31] ICHTEV, Alexander a Teofana PULEVA. *Multiple-model adaptive control of hydro turbine generator with fuzzy TS models*. Sofie, 2008.
- [32] RUZHEKOV, G., Ts. SLAVOV a T PULEVA. *Modeling and implementation of hydro turbine power adaptive control based on gain scheduling technique*. Hersonissos, 2011.
- [33] The Application of Wavelet Neural Network in Adaptive Inverse Control of Hydro-turbine Governing System. *2009 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*. IEEE, 2009, 2009, , 163-166. DOI: 10.1109/AICI.2009.178. ISBN 978-1-4244-3835-8.

Přílohy

Obsah přiloženého CD

text diplomové práce

- diplomova_prace_2018_Milan_Kolar.pdf