

Rôzne prístupy k modelovaniu hydraulického turbíny

Different approaches to modeling hydraulic turbine

Daniela Perduková

daniela.perdukova@tuke.sk

Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, Košice, Slovenská Republika

Abstrakt— Jadrom vodnej elektrárne je hydraulická turbína, ktorá predstavuje zložitý nelineárny systém s niektorými neznámymi, resp. ťažko identifikovateľnými parametrami. Predložený článok sa zaoberá rôznymi spôsobmi modelovania hydraulického turbíny s dôrazom na zohľadnenie jej účinnosti a získaním jej účinnostnej charakteristiky priamo z merania prevádzkových stavov bez potreby znalosti parametrov turbíny.

Kľúčové slová— model hydraulického turbíny, účinnosť turbíny, fuzzy systém

Abstract— The hydraulic turbine is considered as a heart or core of the hydropower plant, that in terms of modelling and system analysis represent a complex non-linear system defined by parameters, which process of identification is frequently very difficult to execute. This article is dedicated to the different approaches of modelling of the hydraulic turbine, while considering its efficiency and it explores the obtaining the efficiency characteristic directly from the measurement of the operating conditions without any need for knowledge of turbine's parameters.

Keywords— model of hydraulic turbine, hydraulic turbine efficiency, fuzzy system

I. ÚVOD

Výroba elektrickej energie pomocou vodných elektrární vyhovuje ekologickým kritériám, šetriacim naše životné prostredie. V prírode okolo nás je nahromadené množstvo obnoviteľnej energie, ktorá je nahromadená v okolitých vodných zdrojoch (jazerách, riekach, umelých vodných nádržiach a pod.). Túto vodnú energiu je možné najprv konvertovať na rotačnú mechanickú energiu použitím hydraulických turbín, potom pomocou synchronných a asynchronných elektrogenerátorov ju môžeme premieňať na elektrickú energiu a nakoniec môžeme riadiť celú túto premenu energií podľa požiadaviek koncového odberateľa elektriny.

V tomto procese premeny energií hrá zásadnú úlohu účinnosť hydraulického turbíny, a to jednak z hľadiska celkovej účinnosti tejto premeny, a jednak z hľadiska jej opotrebovania a prípadnej údržby alebo aj výmeny.

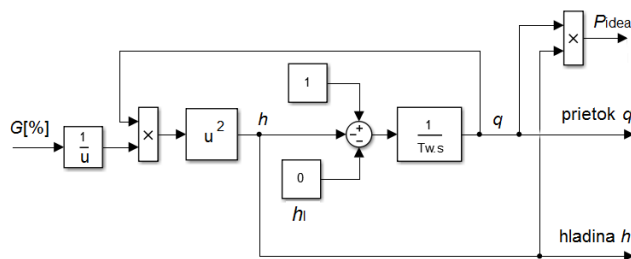
II. MODELOVANIE HYDRAULICKEJ TURBÍNY

Model hydraulického turbíny je pomerne zložitý nelineárny dynamický systém, ktorého niektoré parametre je ťažko vypočítavať. Jej správne a presné modelovanie je však kľúčové pre presnú diagnostiku a charakteristiku reakcie celej vodnej elektrárne na vonkajšie vplyvy a tiež pre správne vyladenie jej riadenia.

V literatúre existujú viaceré možnosti modelovania hydraulického turbíny, ktoré sa líšia. spôsobom zohľadnenia účinnosti turbíny, respektíve jej vplyvu na výstupný mechanický výkon turbíny P_m [1-2].

A. Model zohľadňujúci účinnosť turbíny prostredníctvom hodnoty toku vody q_{nl} pri nulovom zaťažení

Pri vytváraní blokovej schémy sa vychádza predovšetkým z teórie a matematického popisu, uvedeného v odborných publikáciách [1] a [1]. Na Obr. 1 je uvedená štruktúra hydraulického turbíny.



Obr. 1 Model hydraulického turbíny

Prívodové potrubie modelujeme za predpokladu, že tekutina je nestlačiteľná a potrubie je dostatočne pevné o dĺžke L a priemere A . Úbytok výšky vodného stĺpca následkom vplyvu prívodového potrubia je nateraz zanedbaný. Vychádzame tak z rovnice:

$$\frac{d\bar{q}}{dt} = (\bar{h}_0 - \bar{h} - \bar{h}_l)g \frac{A}{L} \quad (1)$$

kde:

\bar{q} = normovaný prietok turbínou	[m ³ /s]
A = prierezová plocha prívodového potrubia	[m ²]
L = dĺžka prívodového potrubia	[m]
g = gravitačné zrýchlenie	[m/s ²]
\bar{h}_0 = statická výška vodného stĺpca	[m]
\bar{h} = výška vodného stĺpca (Head) v mieste vstupu do turbíny	[m]
\bar{h}_l = úbytok výšky vodného stĺpca trením v penstocku	[m]

Vyššie uvedenú rovnicu môžeme prepísať do normovaného tvaru:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{(1-h-h_l)}{T_w} \quad (2)$$

pričom za parameter h považujeme výšku vodného stĺpca v oblasti turbíny a parameter h_l zohľadňuje straty výšky vodného stĺpca, ktoré zanedbávame. Taktiež sa v rovnici nachádza doteraz nepoužitá časová konštanta T_w , v literatúre nazývaná ako časová konštanta vody alebo štartovací čas vody. Jej hodnotu dostaneme použitím vzťahu (podľa [1])

$$T_w = \left(\frac{L}{A}\right) \frac{q_{base}}{h_{base}g} \quad (3)$$

kde q_{base} je prietok pri maximálnom otvorení prívodového ventilu ($G=1$) a h_{base} je hodnota celkovej dostupnej statickej výšky vodného stĺpca.

Zavedením hodnôt h_{base} a q_{base} vieme vyjadriť pomocou charakteristiky turbíny hodnotu prietoku vody pri $G=1$ ako

$$q = G\sqrt{h}, \text{ a teda } q_{base} = 1\sqrt{h_{base}} \quad (4)$$

Tok vody q turbínou je teda funkciou polohy serva G (polohy prívodného ventilu) a výšky vodného stĺpca h .

Mechanický výkon turbíny by bol v ideálnom prípade charakterizovaný ako prietok vody turbínou prenasobený výškou vodného stĺpca.

B. Model zohľadňujúci STRATY v PORUBÍ

V reálnej prevádzke turbína nepracuje so 100% účinnosťou a z toho vychádza požiadavka na zohľadnenie tejto skutočnosti aj pri modelovaní hydraulického turbíny. Spôsobom, ako zakomponovať vplyv účinnosti turbíny do simulačného modelu je viacero [5].

Jedným z najjednoduchších spôsobov je použitie takzvaného prietoku pri nulovom zaťažení. Tento prietok označovaný ako q_{nl} je konštantou, charakterizujúcou hodnotu stálych výkonových strát turbíny, pričom vo vzorci je táto konštanta odčítaná od aktuálneho prietoku turbínou, a až táto výsledná hodnota prietoku je prenasobená výškou vodného stĺpca h podľa

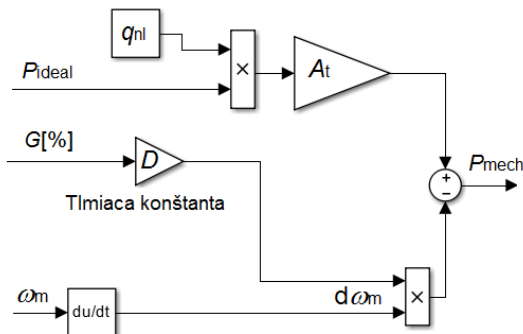
$$P_m = A_t h(q - q_{nl}) - DG\Delta\omega \quad (5)$$

Rovnako sa počas prevádzky elektrárne uplatňuje aj tlmiaci efekt turbíny, ktorý je funkciou rozdielu rýchlostí, polohy serva a polohy ventilu prívodu vody. Veličina $\Delta\omega$ reprezentuje zmenu mechanickej rýchlosti hriadeľa D je veľkosť priemeru prívodového potrubia (tiež ako tlmiaci koeficient turbíny) a G je poloha serva v percentách.

Parameter A_t je považovaný za zosilnenie hydraulického turbíny. V rôznych vedeckých publikáciách sa jeho vyčíslenie líši, napr. podľa literatúry [1] ho môžeme vypočítať nasledovne

$$A_t = \frac{\text{Výkon Turbíny [MW]}}{(\text{Výkon Generátora [MVA]} \cdot h_r(q_r - q_{nl}))} \quad (6)$$

pričom veličiny s dolným indexom r môžeme považovať za nominálne (Rated). To znamená, že q_r je prietok vody turbínou pri jej nominálnom zaťažení a h_r je výška vodného stĺpca potrebná na dosiahnutie spomínaného nominálneho prietoku q_r . Zvyčajne sú tieto hodnoty súčasťou technickej dokumentácie jednotlivých systémov vodných elektrární. Model výpočtu strát hydraulického turbíny je zobrazený na Obr.2.



Obr. 2 Model výpočtu strát hydraulického turbíny

C. Model zohľadňujúci účinnosť turbíny prostredníctvom výpočtu jej účinnosti

Tento variant tvorby simulačnej štruktúry hydraulického turbíny vychádza zo základného vzťahu popisujúceho výpočet jej výstupného mechanickeho výkonu P_m

$$P_m = \eta \rho q g h \quad (7)$$

kde η predstavuje hodnotu účinnosti hydraulického turbíny; ρ je hustota vody (zvyčajne sa používa hodnota 1000 kg/m^3); q je aktuálna hodnota toku vody turbínou; g je gravitačné zrýchlenie ($9,81 \text{ m/s}^2$); a h je aktuálna výška vodného stĺpca vodnej elektrárne. V modeli sú použité normované veličiny. V tomto prípade je na vyjadrenie účinnosti hydraulického turbíny použitý výpočet, ktorý je uvedený v literatúre [5]. Výpočet účinnosti tvorí samostatný simulačný blok, nakoľko definuje účinnosť η ako funkciu λ a toku vody turbínou q , t.j. $\eta=f(\lambda, q)$.

Výpočet účinnosti turbíny $\eta_t(\lambda, q)$

Ako už bolo spomenuté, spôsobom ako vyjadriť účinnosť hydraulického turbíny je viacero. V tomto prípade uvádzame výpočet uvedený v literatúre [5], pre ktorý je potrebné poznať parametre turbíny ako polomer lopatiek turbíny - R_{blades} [m] a veľkosť plochy, ktorú dané lopatky „obtiajú“ - A_{blades} [m²]. Taktiež sú pre vyčíslenie nevyhnutné aj aktuálne hodnoty toku vody turbínou q , ako aj jej mechanickej uhlovej rýchlosti ω_m

$$\eta_t(\lambda, q) = \left[\frac{1}{2} \left(\frac{90}{\lambda_i} + q + 0.78 \right) \exp \left(\frac{-50}{\lambda_i} \right) \right] (3,33q) \quad (8)$$

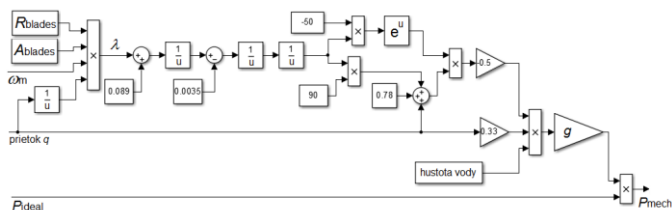
kde pre λ_i platí

$$\lambda_i = \left[\frac{1}{(\lambda + 0,089)} - 0,0035 \right]^{-1} \quad (9)$$

a λ je definovaná ako

$$\lambda = \frac{R_{blades} A_{blades} \omega_m}{q} \quad (10)$$

Vstupom do výpočtu účinnosti hydraulického turbíny by teda v tomto prípade bol aktuálny prietok vody turbínou q a tiež mechanickej uhlovej rýchlosti turbíny ω_m . Matematickému popisu zodpovedá bloková schéma na Obr.3 a Obr.4.



Obr.3 Model výpočtu účinnosti hydraulického turbíny

III. ZÁVER

Počítačové modely energetických systémov umožňujú podstatne zjednodušiť a urýchliť ich projektovanie, ako aj ušetriť náklady pri ich realizácii. Výpočet účinnosti hydroturbíny je analyticky náročný a závislý od parametrov, ktoré sú často získavané iba teoretickým odhadom. Znalosť „fuzzy obrazu účinnosti“ konkrétnej hydroturbíny je podstatná pre jej energeticky optimálne riadenie.

Predložený článok popisuje rôzne modely hydraulickej turbíny, ktorá predstavuje silne nelineárny systém. Z uvedeného dôvodu bol pre jej modelovanie použitý fuzzy model s uvažovaním jej účinnosti, ktorý je možné získať z nameraných údajov o prietoku turbínou a výške jej vodného stĺpca. Je tu ukázané, že takto získaný model sa prakticky zhoduje s analytickými modelmi, získanými analytickými metódami. Takýto model je v praxi použiteľný pre návrh energetickej optimálneho riadenia hydroturbíny, ako aj pre efektívne určovanie miery jej potrebovania.

POĎAKOVANIE:

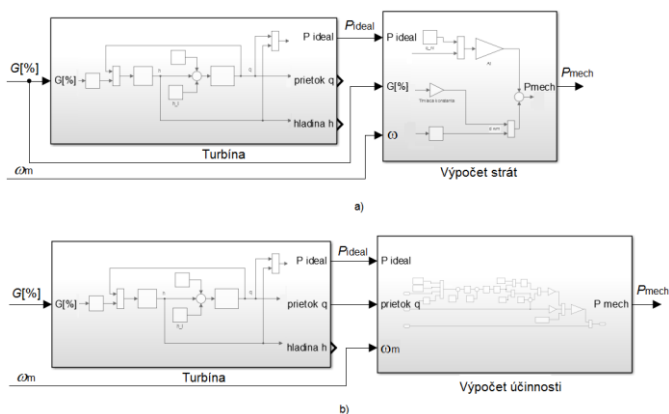
Článok bol publikovaný s podporou projektu APVV-16-0206.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] P.Fedor, D. Perduková, P. Radváni, „Modelovanie Malých Vodných Elektrární“, in: 13. ročník Konferencie odborníkov z univerzít, vysokých škôl a praxe-ARTEP 2019, Stará Lesná, 6. – 8.2. 2019, 40-1 – 40-7 (on CD). ISBN 978-80-553-3250-5.
- [2] P.Fedor, D. Perduková, „Power System Emulator Based on DCS“, *Innovations International Scientific Journal*, 2019, No.2, s. 77-79, ISSN 2603-3763.
- [3] M. SATTOUF, „Simulation Model of Hydro Power Plant Using Matlab/Simulink“, *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2014, 1, Zv. 4, s. 295-301, ISSN: 2248-9622.
- [4] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies. Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies, *IEEE Transactions on Power Systems*. 1992, 1, Zv. VII, s. 167-179, ISSN: 1558-0679.
- [5] A. Acakpovi, E.B. Hagan, F.X. Fifatin, „Review of Hydropower Plant Models“, *International Journal of Computer Applications*, December 2014, 18, Zv. 108, s. 33-38. ISSN 0975-8887.

D. Perduková získala titul inžiniera v odbore Technická kybernetika na Technickej univerzite v Košiciach v roku 1984. Vedeckú aspirantúru ukončila v roku 1995. V súčasnosti pracuje Od roku 2011 pracuje ako profesorka na Katedre elektrotechniky a mechatniky TU Košice.

Jej výskumná činnosť je zameraná na vývoj nových riadiacich štruktúr a aplikácie moderných metód riadenia v oblasti elektrických pohonov, na oblasť logického programovania a vizualizáciu technologických procesov.



Obr.4 Celkový model hydraulickej turbíny a) s uvažovaním strát b) s uvažovaním účinnosti

D. Fuzzy model účinnosti hydraulickej turbíny

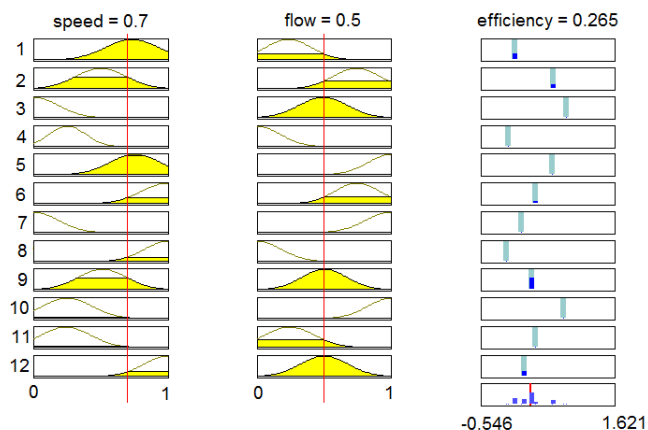
Ako je jasné z predchádzajúcich kapitol, exaktné určenie účinnosti konkrétnej turbíny je pomerne zložitá. Napr. podľa rovnice (10) závisí táto účinnosť od parametrov lopatiek konkrétnej turbíny, ktoré sa počas prevádzky môžu výrazne zmeniť. Táto závislosť je ďalej silne nelineárna (pozri rovnice (8-10) a závislá od viacerých približne určených parametrov.

Účinnosť fuzzy obraz turbíny je možné vytvoriť aj na základe merania prietoku q , rýchlosti ω_m a účinnosti turbíny v ustálených prevádzkových stavoch, napr. podľa Tab.1.

Tab.1 Namerané účinnosti turbíny v ustálených prevádzkových stavoch

NAMERANÉ ÚDAJE		ω_m				
		0,2	0,4	0,6	0,8	1
q	0,2	12,77%	30,36%	36,23%	37,83%	37,97%
	0,4	2,74%	26,40%	49,60%	64,41%	73,24%
	0,6	0,35%	13,64%	40,90%	66,92%	87,22%
	0,8	0,04%	5,68%	27,20%	56,26%	84,31%
	1	0,00%	2,11%	16,07%	42,03%	72,49%

Z uvedených údajov vieme štandardným spôsobom pomocou nástroja Anfisedit programu MATLAB zostaviť statický Sugeno fuzzy systém s 12 pravidlami, ktorý aproximuje účinnosť turbíny bez potreby znalosti jej konkrétnych parametrov, ako to ukazuje Obr.5.



Obr.5 Sugeno fuzzy systém pre určenie účinnosti turbíny