

Simulácia prečerpávacej vodnej elektrárne

Mikita Miroslav · Elektrotechnika

22.08.2016



Prečerpávacie vodné elektrárne sú veľmi vhodným spôsobom na zabránenie nepredvídateľných nerovnováh pri výrobe elektriny napriek tomu že ich stavba je veľmi drahá sú spoľahlivým a dlhodobým zdrojom. Princíp prečerpávacích vodných elektrární je podobný ako u dobíjacích batérií, ktoré môžu generovať elektrickú energiu v prípade, že je nedostatok vo výrobe elektrickej energie a tiež môžu spotrebovávať v prípade, že je naopak prebytok vo výrobe elektrickej energie. Regulácia medzi výrobou a spotrebou v sieti je veľmi dôležitá a práve preto sú prečerpávacie vodné elektrárne potrebnou súčasťou v energetickej sieti. Pri vytváraní nového projektu každej elektrárne je dôležitá predikcia výkonu a simulačné softvéry sú užitočným nástrojom pri plánovaní projektov elektrární. Pre dobrú predikciu sú tiež dôležité reálne údaje pre simuláciu a vedomosti o lokalite tohto projektu, pretože každý projekt je od iných podobných projektov odlišný. Pre dosiahnutie optimálnych podmienok používania prečerpávacích vodných elektrární je potrebné nájsť najlepší algoritmus fungovania takýchto zdrojov.

Úvod

V súčasnej dobe je elektrická energia neodmysliteľnou súčasťou každodenného života. Z dôvodu prudkého zvyšovania spotreby elektrickej energie je nevyhnutné stále hľadať nové zdroje elektrickej energie. Elektrizácia sústavy musí byť v rovnováhe medzi výrobou a spotrebou energie. Je to pri veľkej dynamike procesov veľmi náročné preto sú rôzne spôsoby ako akumulovať prebytok v sieti a v čase zvýšenej spotreby ho využiť na pokrytie špičky výkonu elektrizačnej sústavy. V súčasnosti je viacero alternatív takejto akumulácie. Jednou z alternatív je akumulácia elektrickej energie v potenciálnej energii vody, ktorá má z takýchto zdrojov zatiaľ najlepšiu využiteľnosť a účinnosť. Uskutočňuje sa v prečerpávacích vodných elektrárnach.

Prečerpávacia vodná elektráreň, skrátene PVE je typom vodnej elektrárne v ktorej je možné ukladať energiu v podobe potenciálnej energie naakumulovanej vody v hornej nádrži PVE. Umelá akumulácia vody v PVE prebieha v dobe keď je v sieti prebytok elektriny teda mimo elektrickú špičku denného diagramu zaťaženia. Táto energia sa potom môže použiť v čase špičkového zaťaženia na výrobu elektriny. PVE sú v súčasnosti jedným z mála efektívnych možností ukladania energie do zásoby. Stali sa technickým schodným riešením na využitie prebytočnej tzv. nočnej elektriny a na predchádzanie problémom s výkyvmi v elektrizačnej sústave. Prečerpávacie vodné elektrárne boli budované už pred stavbou prvých jadrových elektrární ale ich význam ešte vzrástol po ich vybudovaní hlavne z dôvodu nevhodnosti jadrových elektrární na

vykrývajúce okamžité výkyvy v elektrizačnej sústave. Medzi výhody a nevýhody PVE patria tieto:

- dokážu rýchlo reagovať na výkyvy v elektrizačnej sústave,
- sú jednoduché na obsluhu,
- majú dlhšiu životnosť ako ostatné zdroje akumulovania energie až okolo 100 rokov,
- nevýhodou je náročnosť stavby,
- ďalšia nevýhoda je možnosť stavby len v istých terénnych podmienkach.

1. Energia vodných tokov

Hydroelektrický potenciál vodných tokov je daný v každom mieste toku dvoma veličinami:

- Prietokom, ktorý je určený množstvom vody pretekajúcej daným profilom za jednotku času. Jednotkou prietoku je $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Mení sa v závislosti od premenlivej intenzity, rozloženia a trvania zrážok.
- Spádom, ktorý je prezentovaný vertikálnou výškou spádu vody. Môže byť prirodzený v dôsledku sklonu terénu alebo môže byť umelo vytvorený napr. priehradou. Výška spádu sa na rozdiel od prietoku vody mení v oveľa menšom rozsahu ovplyvňuje ho napríklad klesanie hladiny v nádrži priehrady.

Potenciál vodnej elektrárne je tvorený:

a) Potenciálna energia

Potenciálna

$$E_k = m \cdot g \cdot H \quad [\text{J}; \text{kg}, \text{m} \cdot \text{s}^{-2}, \text{m}] \quad (1.1)$$

Tlaková

$$E_p = m \cdot \frac{p}{\rho} \quad [\text{J}; \text{kg}, \text{Pa}, \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (1.2)$$

b) Kinetická energia

$$E_x = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad [\text{J}; \text{kg}, \text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.3)$$

Kde, E - energia [J], m - hmotnosť [kg], g - gravitačné zrýchlenie [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$], H - spád [m], p - tlak [Pa], ρ - hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$], v - rýchlosť toku [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Hrubý výkon vodnej elektrárne je daný nasledovne:

$$P = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \quad [\text{W}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \text{m}] \quad (1.4)$$

Alebo

$$P = 9,81 \cdot H \cdot Q \quad [\text{kW}, \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \text{m}] \quad (1.5)$$

Kde, H - spád [m], Q - prietok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] g - gravitačné zrýchlenie [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$], ρ - hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] [1].

Prečerpávacia vodná elektráreň, skrátene PVE, predstavuje typ vodnej elektrárne, ktorá dokáže energiu v podobe naakumulovanej vody dokáza uložiť. Prečerpávacia vodná elektráreň je v princípe sústava dvoch výškovo rozdielne položených vodných nádrží spojených tlakovým potrubím, na ktorom je v jeho dolnej časti umiestnená turbína s elektrickým generátorom. Umelú akumuláciu vody robí v dobe, keď je elektrickej energie prebytok, teda v dobe mimo energetickú špičku (napr. v noci). Akumulovaná energia v podobe nazhromaždenej potenciálnej energie vody sa potom v dobe špičky využíva k výrobe elektrickej energie. Prečerpávacie vodné elektrárne sú zatiaľ jedným z mála nástrojov ako uchovať väčšie množstvo prebytočnej elektrickej energie na dlhšiu dobu. Stali sa technicky schodným prostriedkom, ako znížiť straty z nevyužitej nočnej energie a ako predísť problémom s výkyvmi v spotrebe elektrickej energie resp. v jej odbere z elektrizačnej sústavy.

Napriek tomu že tieto elektrárne boli stavané už pred stavbami jadrových elektrární, ich význam narástol po ich stavbách. A to z dôvodu, že jadrová elektráreň nie je vhodná na pokrývanie okamžitých výkyvov v dopyte po elektrickej energii. Z tohto dôvodu sa musí využívať práve už zmienená lacná „nevyužitá“ energia, ktorú prečerpávacie vodné elektrárne akumulujú v podobe potenciálnej energie vody do svojich horných nádrží na dobu energetickej špičky. Veľkou prednosťou prečerpávacích vodných elektrární je schopnosť prifázovania do elektrizačnej siete s plným výkonom v niekoľkých minútach, či dokonca do minúty. Táto schopnosť je vlastná všetkým vodným elektrárňam, preto pracujú v polo-špičkovej alebo špičkovej prevádzke [2], [3], [4]



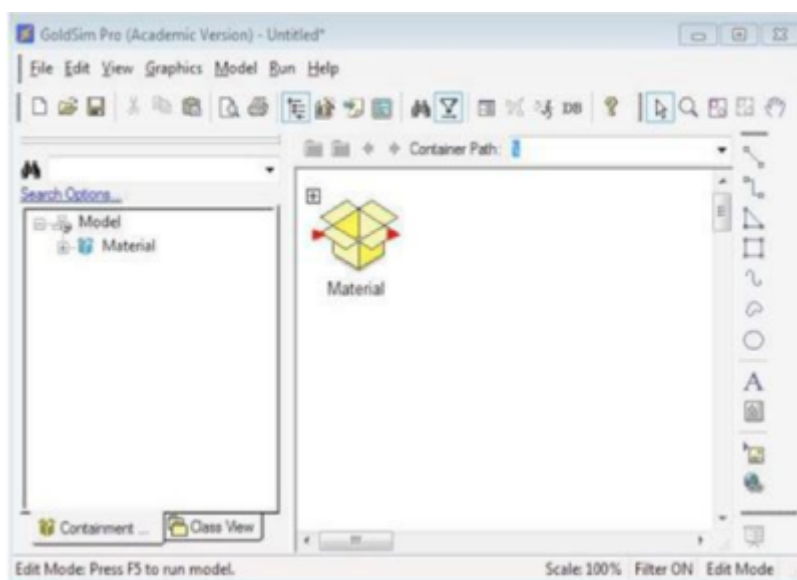
Obr. 1 Schéma prečerpávacej vodnej Elektrárne

2. Simulačný program GoldSim

GoldSim je popredný simulačný softvér pre dynamické modelovanie zložitých systémov v podnikaní, technike a vede. GoldSim podporuje rozhodnutie a analýzu rizík tým, že simuluje budúcu výkonnosť, zatiaľ čo kvantitatívne zobrazuje neistotu a riziká spojené so všetkými zložitými systémami. GoldSim je výkonná a flexibilná platforma pre

vizualizáciu a dynamickú simuláciu takmer akéhokoľvek druhu fyzického, finančného alebo organizačného systému. Je v ňom možné vytvoriť model vášho systému intuitívnym spôsobom. V istom zmysle, GoldSim je ako vývojový diagram, ktorý umožňuje veľmi jednoducho graficky vytvárať a manipulovať s dátami a rovnicami. GoldSim sa pracuje mimo tabuliek takže je oveľa jednoduchšie zhodnotiť, ako sa systémy vyvíjajú v čase, a predvídať ich budúce správanie.

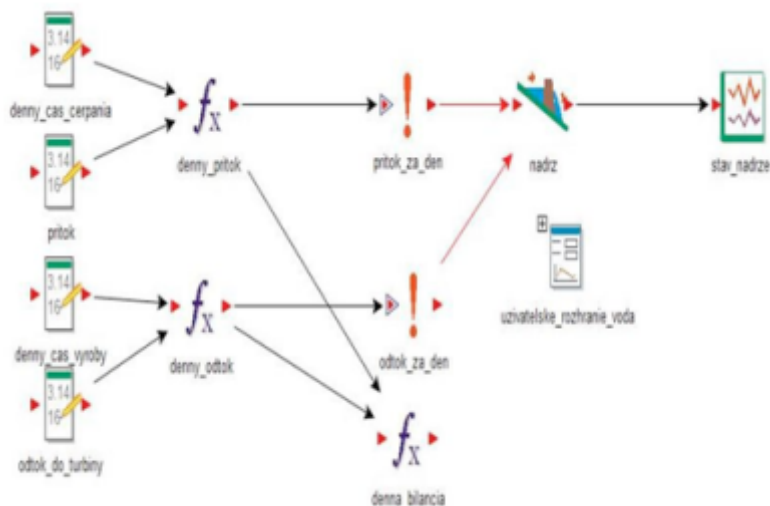
GoldSim je univerzálny simulátor, ktorý využíva hybrid niekoľkých simulačných prístupov, kombinujúci rozšírenie systému dynamiky s niektorými aspektmi diskretných udalostí simulácie a vkladania prvkov dynamickej simulácie systému do simulačného rámca Monte Carlo. GoldSim je užívateľsky nenáročný a vysoko grafický, je v ňom možné doslova kresliť obraz modelu alebo schému vplyvu systému intuitívnym spôsobom, bez toho aby bolo nutné sa učiť veľa symbolov, značení a funkcií. Niekoľko rozsiahlych príkladov toho, ako možno využiť simuláciu sú podobné zodpovedaniu otázky "čo keby?" s cieľom riešiť reálne problémy vo vede, technike a obchode [5], [6], [7].



Obr. 2 Používateľské prostredie v programe GoldSim

3. Simulácia vodných stavov v nádrži PVE

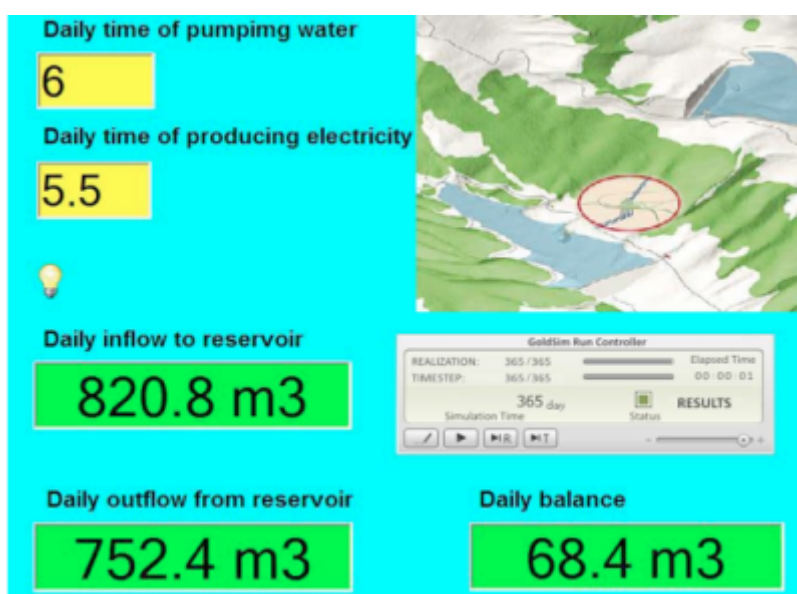
Simulácia vody sa zaoberá stavom vody v navrhovanej nádrži na hornom odkalisku, ktorú by pri realizácii PVE baňa Bankov bolo nutné vybudovať. V nádrži by potom rozdiel medzi prítokom z čerpania z bane a odtokom do turbíny každý deň sa čerpá z bane približne šesť hodín takže pri rýchlosti prítoku do nádrže $0,038\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, takže maximálny denný prítok pri takomto čase čerpania by bol $820,8\text{ m}^3$ pri čase čerpania 6 hodín a nulovom odtoku. Tieto stavy v nádrži boli simulované pri simulácii boli zohľadnené časy čerpania a časy výroby elektriny na turbíne z týchto údajov som dostal výslednú dennú bilanciu a objem v nádrži pri ročnom cykle takejto prevádzky. Vstupné údaje sa dajú jednoducho meniť v užívateľskom rozhraní.



Obr. 3 Grafický znázornený program na bilanciú vodných stavov PVE v programe GoldSim

Popis a hodnoty jednotlivých objektov v programe je nasledovný:

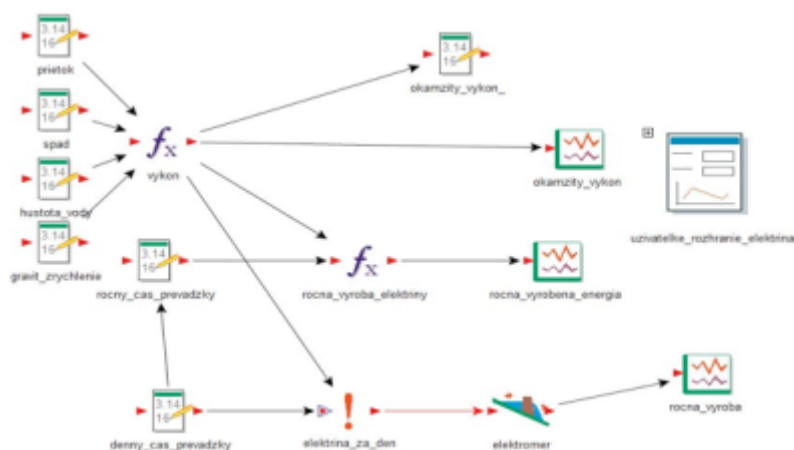
- Denný_čas_čerpania sa zadáva do užívateľského rozhrania v hodinách a program ho automaticky prepočítava na sekundy, ktoré sú jeho základnou jednotkou je to meniteľná veličina.
- Prítok a odtok_ do_ turbíny sú konštantné $0,038 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.
- Denný_čas_výroby sa podobne ako denný_čas_čerpania zadáva do užívateľského rozhrania v hodinách a je automaticky prepočítavaný na sekundy.
- Denný_prítok je súčinom denného_času_čerpania a prítoku.
- Denný_odtok je súčinom denného_času_výroby odtoku_ do_ turbíny.
- Denná_bilancia vyjadruje rozdiel medzi denným_prítokom odtokom.
- Prítok_za_deň nám vyjadruje množstvo vody, ktoré pritečie do nádrže PVE za jeden deň.
- Odtok_za_deň je vyjadrením množstva vody, ktoré sa využije na výrobu elektriny na turbíne.
- Nádrž nám zaznamenáva stav vody v nádrži v čase.
- Stav_nádrže je grafické vyjadrenie stavu nádrže v čase.



Obr. 4 Grafický užívateľský panel pre vodné stavy

4. Model výkonu PVE

Simulácia výkonu sa dá použiť aj pre iné vodné elektrárne alebo projekty vodných zdrojov. Počíta hrubý výkon vodného zdroja, ktorý závisí od spádu a prietoku, ktoré sú jediné premenné veličiny. Simulácia výkonu sa zaoberá veľkosťou výkonov pri rôznych prietokoch a spádoch a ich zmenách. Najprv bolo simulované s terajším stavom spádu pri jalovom priepuste vody pri čerpaní vody z bane Bankov. Spád je 170m a prietok $0,038\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Potom to bolo simulované pre navrhované parametre nádrže PVE, ktorá má spád menší o zhruba 20m.



Obr. 5 Graficky znázornený program na výpočet výkonu PVE pri rôznych prietokoch a spádoch v programe GoldSim

Popis a hodnoty jednotlivých objektov v programe je nasledovný:

- Prietok je v PVE konštantný a rovný $0,038\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, ale v programe je možné meniť pre použitie aj pre výpočty výkonov iných vodných elektrární.
- Spád na PVE je s nádržou 150m a bez nádrže 170m môžeme ho tiež ľubovoľne meniť.
- Hustota_vody je závislá od teploty pri teplote $3,98^\circ\text{C}$ má maximálnu hodnotu $\rho=1000\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, pri zvyšovaní aj znižovaní hustota vody pomaly klesá.
- Gravit_zrychlenie v našej zemepisnej šírke má hodnotu približne $9,81\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$.
- Výkon je súčinom prietoku, spádu, hustoty vody a gravitačného zrýchlenia. Je to iba hrubý výkon pretože do reálneho výkonu by bolo potrebné zohľadniť aj účinnosť turbíny a generátora.
- Okamžitý_vykon je to okamžitá hodnota výkonu v čase.
- Denný_cas_prevadzky zadáva sa v hodinách je to čas práce turbíny a generátora do siete.
- Ročný_cas_prevadzky je to 365-násobok denného času prevádzky.
- Elektrina_za_deň vyjadruje množstvo elektriny vyrobenej za deň a udáva sa v kWh.
- Ročná_vyroba_elektriny je súčinom ročného času prevádzky a výkonu.
- Ročná_vyroba_elektrina vyjadruje graficky množstvo elektriny vyrobenej za jeden rok v kWh.
- Elektromer nám slúži ako súčtový člen a sčíta nám každodenne vyrobenú elektrinu v priebehu roka.
- Ročná_vyroba číselne nám vyjadruje množstvo elektriny vyrobenej za jeden rok v kWh.



Obr. 6 Grafický užívateľský panel pre výpočet výkonov

3. Záver

Tento model môže byť použitý pre simulácie hrubého výkonu vodných elektrární. Výpočty sú plne automatické a je veľmi ľahké spočítať hrubý výkon pre rôzne podmienky vodných elektrární. Taktiež je možné simulovať a zaznamenávať vodné bilancie v nádrži hydroelektrárne. Tento model bol navrhnutý pre účely výpočtu a navrhovania projektu čerpanej hydroelektrárne v oblasti Bankov bane v Košiciach. Niektoré vypočítané výsledky s rôznymi parametrami spádu prúdenia a dennej produkcie sú uvedené v Tabuľke I.

Tab.1 Výsledky simulácie výkonov pre rôzne parametre PVE

Spád	Prietok	Denný čas produkcie	Okamžitý výkon	Ročná produkcia
[m]	[m ³ .s ⁻¹]	[h]	[kW]	[MWh]
170	0,38	6	63,34	138,82
150	0,38	6	55,89	122,49
170	0,5	6	833,52	182,66
170	0,38	24	63,34	555,30

Výsledky ako je možné vidieť z Tabuľky I. nám ukazujú okamžitý výkon vodného zdroja ako aj ročnú produkciu zdroja v závislosti na dennom čase produkcie, prietoku a spáde vodného zdroja. Prínosom štúdie je možnosť výpočtu hrubého výkonu rôznych typov vodných elektrární pri rozdielnych parametroch prietokov a spádov a tým možnosť kvantifikovať hydroenergetický potenciál rôznych možných lokalít pre výstavbu vodných elektrární.

Zoznam použitej literatúry

1. M. Kolcun, V., Chladný, M. Mešter, R. Cimbala, J. Tkáč, M. Hvizdoš, J. Rusnák. "Elektrárne" Košice : TU, 2006. 453 s. ISBN 80-8073-704-5
2. N. Armarolli and V. Balzani, "Vincenzo. Energy for a sustainable world," Wiley-VCH, Weinheim, 2011.

3. E. Castronuovo and J.Lopes, "Optimal operation and hydro storage sizing of a wind-hydro power plant," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2004, 26.10: 771-778.
4. S. Khennas and A. Barnett, "Best Practices for Sustainable Development of Micro-Hydro in Developing Countries," *ESMAP Technical Paper 006*, IBRD, World Bank, 2000.
5. CH. Yang and R. Jackson, "Opportunities and barriers to pumped-hydro energy storage in the United States," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15.1: 839-844.
6. R. Kossik, and I. Miller, "A propabilistic total system approach to the simulation of complex environmental system," *Simulation conference vol,2* pp. 1757-1761, 2004.
7. E.S.Gavanidou, A.G Bakirtzis and P.S. Dokopoulos, "A probabilistic method for the evaluation of the performance and reliability of wind-diesel energy systems," *IEEE Trans Energy Convers* 1993;8:197-206.

Spoluautormi článku sú Dr. h.c. prof. Ing. Michal Kolcun, PhD. a Ing. Michal ŠPES, Katedra elektroenergetiky, FEI TUKE, Slovenská republika
