

7. Vodní elektrárny

Vodní energii využívá lidstvo již cca 2000 let. Využívání transformace kinetické energie vody k získání mechanické práce byl první úspěšný pokus lidstva využít přírodních energetických zdrojů ke svému prospěchu.

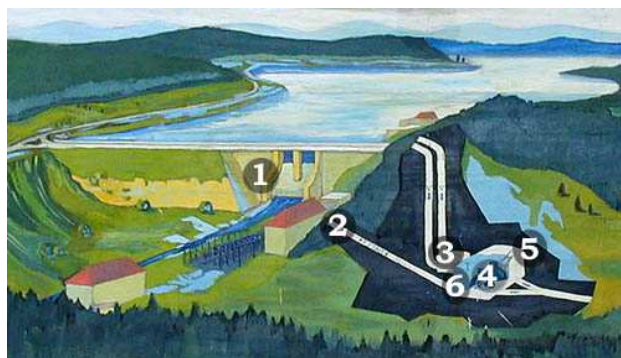
Rozvoj prvních civilizací byl spojen s využíváním vodní energie. Stagnující vývoj vodních strojů výrazně urychlila první průmyslová revoluce. V 19. století se začala prosazovat Francisova turbína s radiálním oběžným kolem a dostředivým průtokem s natáčivými rozváděcími lopatkami, Peltonova rovnotlaká axiální turbína pro velké spády a na počátku 20. století Kaplanova přetlaková axiální turbína. Ve 20. století byla postavena velká vodní díla, osazená turbínami se značně velkým jednotkovým výkonem, často v řádu několika set MW. Vzhledem k tomu, že většina typů vodních turbín i velmi velkých výkonů je schopna během velmi krátké doby najet na plný výkon, má vodní energetika každého státu poměrně značný stabilizující význam jak z technického, tak i ekonomického hlediska.

7.1 Princip fungování vodních elektráren

Voda přitékající přírodním kanálem roztáčí turbínu, která je na společné hřídeli s generátorem elektrické energie. Dohromady tvoří tzv. turbogenerátor. Mechanická energie proudící vody se tak mění na základě elektromagnetické indukce (v otáčející se smyčce elektrického vodiče v magnetickém poli se indukují střídavé elektrické napětí) na energii elektrickou. Ta se transformuje a odvádí do míst spotřeby.

7.1.1 Vodní energetika - historie a základní informace

Zatímco jaderná energetika je relativně mladým oborem, energie vodních toků patří k nejstarším energetickým zdrojům, které se lidstvo ve své historii naučilo využívat. Vodní kola - zprvu horizontální a později vertikální - se pro nejrůznější účely používala již přes tisíciletí.



obr.7.1 Dobový náčrt vodní elektrárny

Jednu z prvních vodních elektráren postavil T. A. Edison roku 1882 v Appletonu a krátce nato pod Niagarskými vodopády. Ještě před koncem 19. století provozovali "hydroelektrárnu" v podskalském mlýně u Písku, kde vodní kolo pohánělo tři dynamy. Také v Praze existovaly na počátku 20. století dvě vodní elektrárny - na Těšnově a na Štvanici. Těšnovská byla roku 1929 zrušena, Štvanická existuje dodnes.



obr. 7.2 Příklad využití vodní energie prostřednictvím vodního kola

Zatímco energie získávaná prostřednictvím vodního kola byla využívána pro velmi pestrou paletu nejrůznějších lidských činností, moderní vodní turbíny nacházejí uplatnění takřka výhradně při výrobě elektrického proudu. Vodní síla dokáže vyrobit elektrický proud prakticky téměř zadarmo (za podmínky, že náklady na výstavbu elektrárny a především souvisejícího vodního díla zaručujícího dostatečný a soustavný přívod vody nejsou příliš vysoké). Proto se energie vodních toků pro výrobu elektřiny využívá především v oblastech prudkých toků s velkými spády.

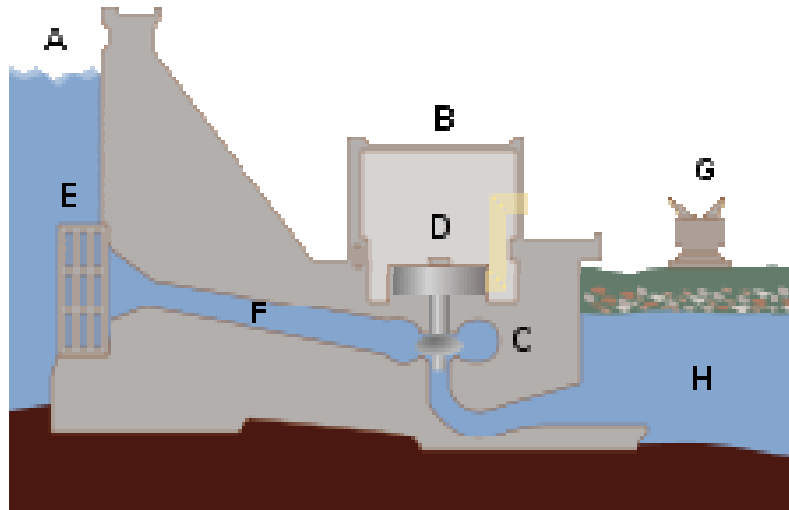


obr.7.3 Vodní elektrárna Tři soutěsky -Čína

Vodní energetika je přitom velmi široký pojem. Lze si pod ním představit třeba největší elektrárnu světa postavenou v rámci projektu Tři soutěsky na řece Jang-c'-ťiang, jejíž instalovaný výkon přes 18 000 MW překračuje výkon všech v Česku provozovaných elektráren (nikoliv jen vodních!) dohromady. Tento megalomanský projekt bývá pokládán za ekologický a sociální zločin realizovatelný snad jen v komunistické Číně. Napuštění 650 km dlouhého jezera zásobujícího elektrárnu vodou si vyžádalo přestěhování několika miliónů lidí a pohřbilo stovky měst a vesnic, včetně řady archeologických památek. Dále si můžeme představit velké vodní elektrárny – u nás jsou všechny velké vodní elektrárny ČEZ, a .s. (s

výjimkou Dalešic, Mohelna a Dlouhých Strání) situovány na toku Vltavy, kde tvoří kaskádový systém - Vltavskou kaskádu. V rámci Skupiny ČEZ se vodní elektrárny soustřeďují převážně i na tocích Labe, Dyje a Moravy. Dále můžeme mluvit o malých vodních elektrárnách s instalovaným výkonem do 10 MW. Těch je u nás v republice kolem 536, ale i tak vyrobí jen nepatrný zlomek vyrobené elektřiny.

7.1.2 Jak funguje vodní elektrárna



obr.7.4 Řez vodní přehradou s vodní elektrárnou

Průřez vodní elektrárnou

Hráz přehrady bývá většinou tvořena litým betonem, v praxi se vyskytují i menší hráze sypané. Uvnitř hráze se nachází revizní, větrací a drenážní chodby (pro odvod prosakující vody). Ocelovým potrubím je voda vedena k vodním turbínám. Vstup vody do potrubí je opatřen čistícím zařízením zvaným česle a rychlouzávěrem, který při poruše uzavře přívod vody.

Elektrárna se obvykle nachází pod přehradní hrází; někdy je do ní rovnou vestavěna.

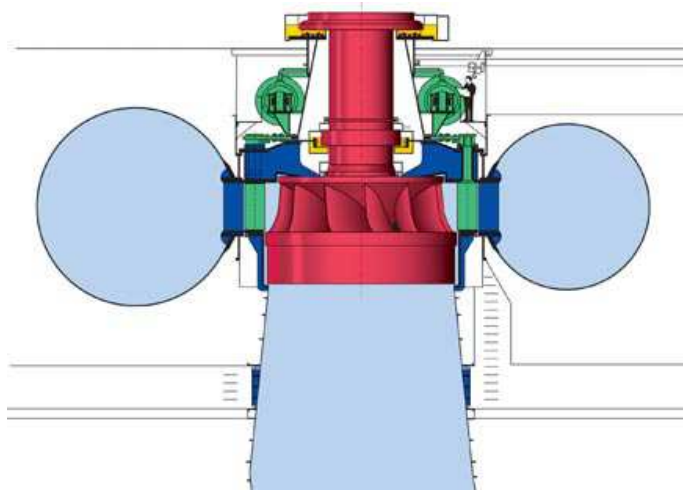
Popis obrázku

- A - hladina přehradní nádrže
- B - budova elektrárny
- C - turbína, kolem ní rozváděcí kolo a pod ní odtokový kanál
- D - generátor na společné ose s turbínou
- E - česle a uzávěr
- F - přívodní kanál
- G - transformátor, napojující elektrárnu do rozvodné sítě
- H - odtok

Ve vodních elektrárnách voda roztáčí turbínu; ta je na společné hřídeli s elektrickým generátorem (dohromady tvoří tzv. turbogenerátor). Mechanická energie proudící vody se tak mění na energii elektrickou, která se transformuje a odvádí do míst spotřeby. Obdobný princip využívá i uhelná nebo jaderná elektrárna.

Výběr turbíny závisí na účelu a podmínkách celého vodního díla. Nejčastěji se osazují turbíny reakčního typu (Francisova nebo Kaplanova turbína), a to v řadě modifikací.

7.1.2.1 Francisova turbína



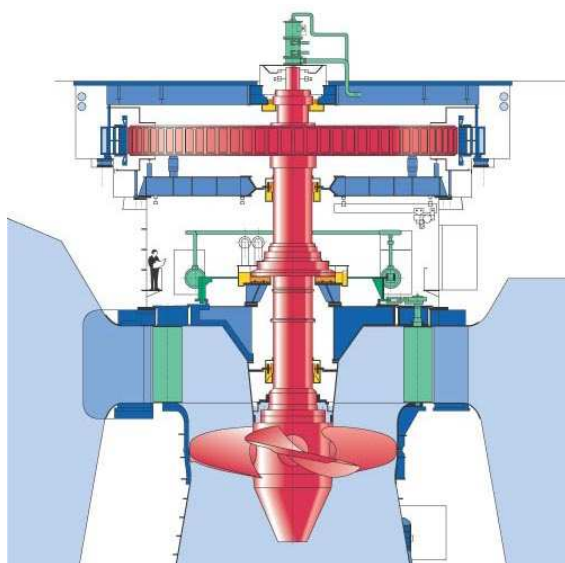
obr.7.5 Francisova turbína

Francisova turbína je přetlaková turbína, což znamená, že pracovní kapalina během své cesty strojem mění tlak a přitom odevzdává svou energii. Oběžné kolo (rotor) turbíny se nachází mezi vysokotlakým přívodem a nízkotlakou sávkou většinou v patě přehrady.

Vstupní potrubí má tvar spirály. Voda je pomocí věnce rozváděcího kola (tangenciálně) směřována na oběžné kolo. Lopatky rozváděcího kola jsou někdy konstruovány jako stavitelné, aby se turbína mohla (do určité míry) přizpůsobit různému vodnímu průtoku. Z oběžného kola vystupuje voda ve směru osy otáčení (axiálně).

Jak voda prochází oběžným kolem, její rotační rychlost se zmenšuje a zároveň odevzdává energii oběžnému kolu. Tento efekt (spolu s působením samotného vysokého tlaku vody) přispívá k efektivitě turbíny.

7.1.2.2 Kaplanova turbína



obr.7.6 Kaplanova turbína

Má vyšší účinnost než Francisova turbína, ale je výrazně složitější a dražší. Používá se pro spády od 1 do 70,5 m (což je spád na vodní elektrárně na Orlíku) a průtoky 0,15 až několik desítek m^3/s . Největší hltnost na světě mají Kaplanovy turbíny na vodní elektrárně Gabčíkovo na Dunaji a to až $636 \text{ m}^3/\text{s}$, při spádu 12,88–24,20 m. Obecně se dá říct, že se používá především na malých spádech při velkých průtocích, které nejsou konstantní. V závislosti na rozdílu hladin může být instalována buď se svislou nebo s vodorovnou osou otáčení.



obr. 7.7 Kaplanova turbína, výrobek ČKD Blansko



obr.7.8 Horní kryt Kaplanovy turbíny

Kaplan jako první vzal při teoretickém návrhu turbíny v úvahu vazkost [7.8] vody. V letech 1910-1912 proto navrhl na základě svých úvah nový tvar oběžného kola. První prototyp Kaplanovy turbíny byl vyroben brněnskou firmou Ignác Storek v roce 1919. Po

zkouškách se ukázalo, že turbína dosahuje vynikající mechanické účinnosti až 86 %. Další prototyp byl úspěšně vyzkoušen v poděbradské elektrárně.

Později, když se Kaplanovým žákům podařilo vyřešit i problémy s kavitací [7.8], se tato turbína stala nejvýznamnějším typem turbíny užívaným ve velkých vodních elektrárnách po celém světě. Začátkem jejího úspěchu byla úspěšná montáž tehdy největší turbíny světa ve švédském Jila Edet v roce 1925. Kaplanovy turbíny byly velice úspěšným vývozním artiklem československého strojírenství.

7.1.2.3 Peltonova turbína

Peltonova turbína je rovnotlaká turbína s parciálním tangenciálním ostřikem. Účinnost u malé turbíny je 80 až 85%, u velké 85 až 95%. Peltonova turbína byla vynalezena Lesterem Allanem Peltonem (1829–1908) v roce 1880.

Voda proudí tečně na obvod rotoru pomocí trysek. Rozvaděčem je dýza na přívodním potrubí, z níž voda vystupuje kruhovým paprskem a dopadá na lopatky lžičkovitého tvaru. Každá z lopatek se postaví proti směru toku vody a tak otočí její směr. Výsledkem vzniklých sil je pohyb rotoru turbíny. Peltonova turbína je neefektivnější v případě vysokého tlaku přívodní vody.

Jelikož voda je jen obtížně stlačitelná, téměř všechna její energie je předána turbíně. Proto stačí pouze jediné oběžné kolo k převedení energie vody na energii rotoru.

Průtok vody – a tím i výkon turbíny se reguluje změnou výtokového průřezu dýzy zasouváním regulační jehly. K posuvu jehly se většinou používá servomotor. Rychlý zásah regulace – snížení výkonu – se provádí odkloněním vodního paprsku.

Peltonovy turbíny se používají pro vysoký spád vody a malý průtok. Jsou vyráběny ve všech možných velikostech. Pro použití v energetice se používá vertikální uložení a výkon až 200 MW. Nejmenší turbíny jsou veliké několik desítek centimetrů a používají se pro malé vodní elektrárny s velkým spádem. Rozsah použití je od 15 m až po 1800 m.



obr.7.9 Model Peltonovy turbíny –elektrárna Hučák Hradec Králové

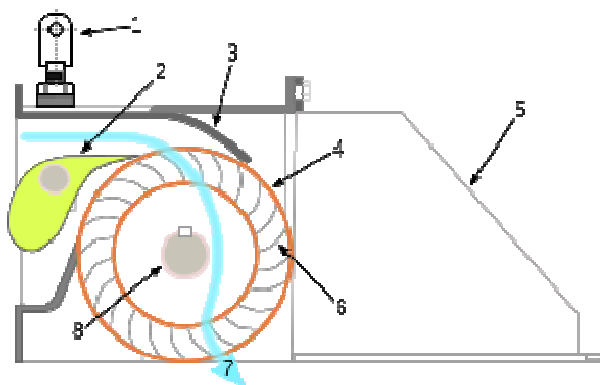


obr.7.10 Oběžné kolo Peltonovy turbíny

7.1.2.4 Bánkiho turbína

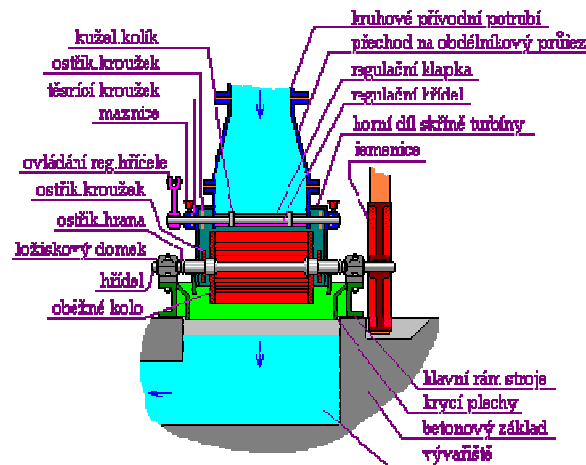
Bánkiho turbína je jednoduchá rovnotlaká vodní turbína. Zvláštností je, že lopatky oběžného kola jsou obtékány ve dvou směrech. Vynalezl ji Donát Bánki v roce 1917. Je užívána v malých vodních elektrárnách.

Oběžné kolo Bánkiho turbíny je tvořeno dvěma kruhovými deskami, mezi nimiž jsou jednoduché lopatky (připomíná mlýnské kolo). Kolo je uloženo ve skříni, z níž z jedné strany přitéká usměrněný proud vody. Voda přes lopatky vtéká dovnitř kola a odtud opět přes lopatky vytéká na druhé straně skříně ven. Při každém průtoku lopatkami odevzdá část své energie.



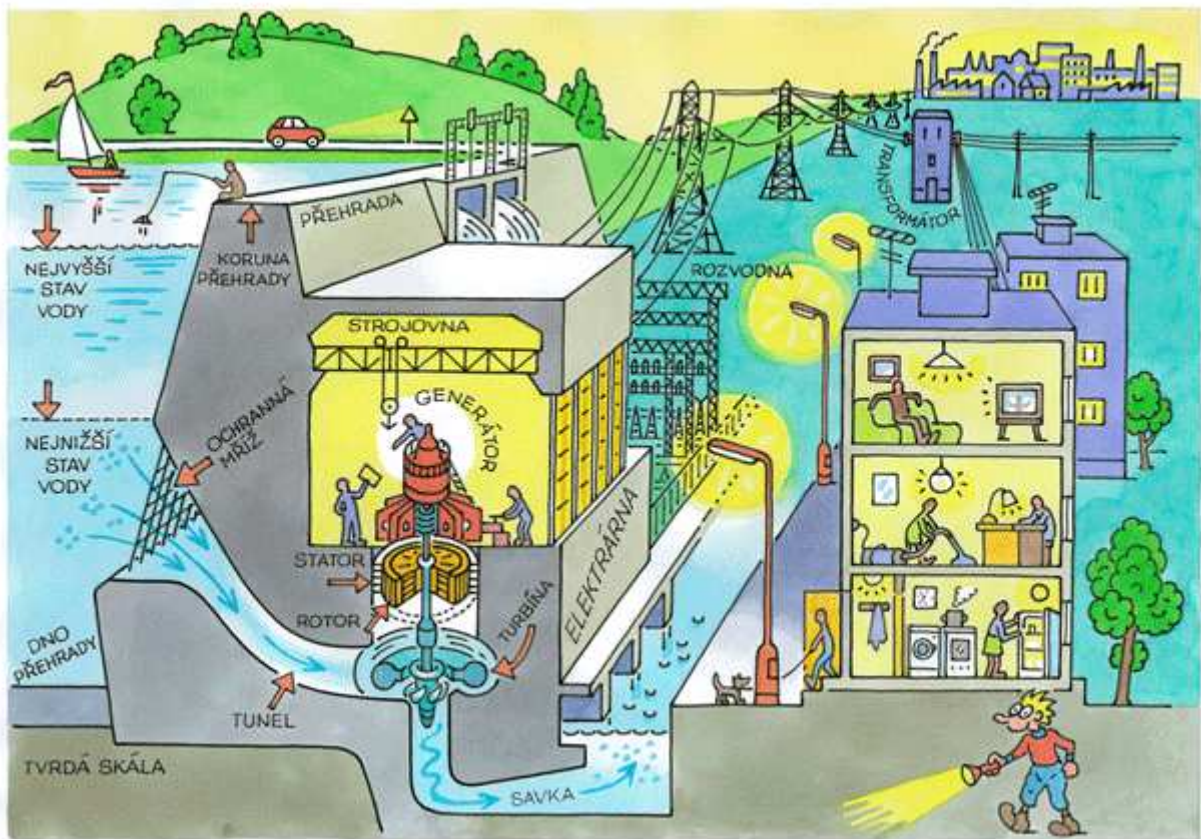
obr. 7.11 Schematické znázornění Bánkiho turbíny

Tento typ turbíny je pro svou konstrukční jednoduchost oblíben u malých vodních elektráren, kde by konstrukce dokonalejších (a tím i dražších) typů turbín nebyla ekonomická. Je to jediný typ turbíny, která je zhotovitelná i amatérsky a s ještě dobrou účinností. Energetická účinnost Bánkiho turbíny dosahuje 70-85 %.



Obr. 7.12 Bánkiho turbína o výkonu 3,5kW

Na obr. 7.12 je náčrt realizace Bánkiho turbíny. Jedná se o jednoduchou a robustní jednosekční Bánkiho turbínu plynule regulovatelnou pomocí jednozvrtné klapky. Samotné oběžné kolo uložené ve dvojici ložiskových domků osazených dvouřadými naklápěcími ložisky je zakryto masivní svařovanou skříní, která tvoří jednak kryt proti rozstříku a současně obsahuje vstupní dýzu s klapkou. V přední části je opatřena čistícím otvorem, který umožňuje rychlý a snadný přístup k lopatkám oběžného kola. Nad samotnou skříní je posazen přechodový potrubní mezikus, taktéž s čistícím otvorem, kterým je možné otevřít prostor nad klapkou v případě, že by se v tomto prostoru zachytila nějaká nečistota. Turbína má oboustranný vývod hřídele, ač se v praxi uvažovalo využití pouze jednoho vývodu. Průnik vody podél hřídele do ložisek je účinně zamezen párem ostříkových kotoučů a navíc ostříkovou hranou na samotném hřídeli. Použití tohoto způsobu bylo zvoleno především pro jednoduchost, bezobslužnost, snadnou demontáž oběžného kola a především proto, že nekladlo při otáčení odpor. Na vývodu hřídele je nasazena řemenice pro řemenový převod. Ovládání bylo ze začátku ruční, pomocí šroubu a matice, ale regulační sloupek byl upravený tak, aby mohl být popřípadě doplněn servomotorkem.



obr. 7.13 Model přehradní vodní elektrárny s Kaplanovou turbínou

7.1.3 Rozdělení vodních turbín s ohledem na praktické aplikace

Podle způsobu práce se moderní turbíny dělí na rovnotlaké a přetlakové. V rovnotlakých turbínách zůstává tlak vody stále stejný, to znamená, že voda vychází z turbíny pod stejným tlakem, pod jakým do ní vstupuje. U přetlakových turbín vstupuje voda do oběžného kola s určitým přetlakem, který při průtoku klesá. Při výstupu z turbíny má tedy voda nižší tlak než při vstupu do ní. Tak pracují např. Francisovy turbíny, vhodné pro střední spády. Pro malé výkony na malých spádech jsou vhodné horizontální turbíny, pro malé spády a velké výkony se stavějí turbíny vertikální. Vývoj Francisových turbín ještě není ukončen. Dosahují výkonů až 250 MW, jsou však schopny i 1000MW výkonu a výkonů vyšších

Vodní turbíny jsou technicky nejdokonalejší mechanické motory vůbec - dosahují 95% účinnosti. Umístění vlastní elektrárny může být různé podle tvaru terénu, výškových a spádových možností a na množství vody. Existují elektrárny zabudované přímo do tělesa hráze, jinde je elektrárna vystavěna hluboko v podzemí. Voda se k ní přivádí tlakovým potrubím a odvádí se podzemním kanálem.

Výběr turbíny závisí na účelu a podmínkách celého vodního díla (elektrárny včetně vodní nádrže, řečiště či jiného zařízení usměřujícího proud vody). Nejčastěji se osazují

turbíny reakčního typu (Francisova nebo Kaplanova turbína), a to v bohaté paletě modifikací. V podmínkách našich řek se nejčastěji používají Kaplanovy turbíny s nastavitelnými lopatkami. Kaplanova turbína je v podstatě reakční přetlakový stroj, který dosahuje několikanásobně vyšší rychlosti než je rychlost proudění vody. Je vhodná pro velká množství vody a pro menší spády.

Pro vysoké spády (někdy až 500 m) se používá akční Peltonova turbína. Je to rovnotlaký stroj, jehož obvodová rychlost otáčení je nižší než rychlost proudění. Voda vstupuje do turbíny pouze v některých částech jejího obvodu a nezahltí celý obvod – vodu na lopatky tvaru misek přivádějí trysky. V přečerpávacích vodních elektrárnách se používá reverzní Francisova turbína s přestavitelnými lopatkami, která při zpětném chodu funguje jako čerpadlo. V malých vodních elektrárnách se převážně zabydlela malá horizontální turbína Bánkiho spolu s upravenou jednoduchou turbínou Francisovou.



I když v ČR nejsou přírodní poměry pro budování velkých vodních energetických děl ideální, hrají v rámci obnovitelných zdrojů u nás vodní elektrárny prim. Podle metodiky EU se přečerpávací vodní elektrárny a malé vodní elektrárny s instalovaným výkonem nad 10 MW mezi zařízení vyrábějící elektřinu z obnovitelných zdrojů nepočítají, nicméně z hlediska jejich významu pro elektroenergetiku ČR a především pro svůj přínos k zachování životního prostředí jsou i ony důležité.

Největším výrobcem elektrické energie je v ČR Skupina ČEZ. Vznikem rozšířené Skupiny ČEZ se původní portfolio hydroenergetiky ČEZ, a. s., rozšířilo o 12 elektráren, z toho 11 malých vodních elektráren, o celkovém instalovaném výkonu přibližně 48 MW. Při započtení dalších osmi malých vodních elektráren, původně začleněných do samostatné dceřiné organizace HYDROČEZ, a. s., je od roku 2006 ve Skupině ČEZ, vyjma potenciálu vodních elektráren mateřské organizace v rozsahu téměř 1900 MW, k dispozici navíc přibližně 63 MW. **Koncem roku 2012 činil instalovaný výkon všech vodních elektráren Skupiny ČEZ v České republice 1 935,2 MW.**

Z hlediska všech obnovitelných zdrojů Skupiny ČEZ mají vodní elektrárny na výrobě elektrické energie největší podíl.

7.2 Využívání vodní energie v ČR

I když v ČR nejsou přírodní poměry pro budování velkých vodních energetických děl ideální, hrají v rámci obnovitelných zdrojů u nás vodní elektrárny prim. Naše toky nemají potřebný spád ani dostatečné množství vody. Proto je podíl výroby elektrické energie ve vodních elektrárnách na celkové výrobě v ČR poměrně nízký. Významným posláním vodních elektráren v ČR je však sloužit jako doplňkový zdroj výroby elektrické energie a využívat především své schopnosti rychlého najetí na velký výkon a tedy operativního vyrovnání okamžité energetické bilance v elektrizační soustavě ČR.



obr.7.14 Usazování turbíny malé vodní elektrárny Mělník

V českých zemích má využívání vodní energie dlouholetou tradici. Od přímého mechanického pohonu zařízení mlýnů, pil a hamrů až k přeměně na elektrickou energii. Nejstarším zařízením tohoto typu v Čechách byla vodní elektrárna v Písku, vybudovaná v roce 1888. Byla zřízena v návaznosti na velký úspěch propagačního osvětlení centra města Františkem Křížíkem 23. června 1887. (Písek se stal prvním městem v Čechách se stálým veřejným elektrickým osvětlením). Všechny velké vodní elektrárny, s výjimkou Dalešic, Mohelna a Dlouhých Strání, jsou situovány na toku Vltavy, kde tvoří kaskádový systém – vltavskou kaskádu. Jejich provoz je automatický a jsou řízeny z centrálního dispečinku ve Štěchovicích.

7.2.1 Přehled vodních elektráren provozovaných Skupinou ČEZ

Elektrárna	Instalovaný výkon (MW)	Rok uvedení do provozu
Akumulační a průtočné vodní elektrárny		
Lipno I	120	1959
Orlík	364	1961–1962
Kamýk	40	1961, 2008
Slapy	144	1954–1955
Štěchovice I	22,5	1943–1944
Vrané	13,88	1936, 2007
Střekov	19,5	1936
Malé vodní elektrárny		
Lipno II	1,5	1957
Hněvkovice	9,6	1992
Kořensko I	3,8	1992
Kořensko II	0,98	2000
Želina	0,64	1994
Mohelno	1,2; 0,56	1977, 1999
Dlouhé Stráně II	0,16	1996
Přelouč	2,34	1927
Spálov	2,4	1926
Hradec Králové I	0,75	1926
Práčov	9,75	1953
Pastviny	3	1938
Obříství	3,36	1995
Les Království	2,12	1923
Předměřice nad Labem	2,1	1953
Pardubice	1,96	1978
Spytihněv	2,6	1951
Brno Kníničky	3,1	1941
Brno Komín	0,21	1923
Vydra	6,4	1939
Hracholusky	2,55	1964
Čeňkova Píla	0,1	1912
Černé jezero I	1,5	1930
Černé jezero II	0,04	2004
Černé jezero III	0,37	2005
Bukovec	0,63	2007
Mělník	0,59	2010

Přečerpávací elektrárny

Štěchovice II	45	1948, 1996
Dalešice	480	1978, 2008
Dlouhé Stráně I	650	1996

Největší podíl mezi obnovitelnými zdroji má v podmínkách ČR vodní energie. Zatímco energie vodního kola byla využívána pro velmi pestrou paletu nejrůznějších lidských činností, moderní vodní turbíny nacházejí své uplatnění takřka výhradně při výrobě elektřiny. Hydroenergetika je perspektivní především v oblastech prudkých toků s velkými spády. V ČR nejsou přírodní poměry pro budování vodních energetických děl ideální. Naše toky nemají potřebný spád ani dostatečné množství vody. Proto je podíl výroby elektrické energie ve vodních elektrárnách na celkové výrobě v ČR poměrně nízký, v roce 2012 činil pouhá 4 %. Významným posláním vodních elektráren v ČR je pracovat jako doplňkové zdroje hlavních zdrojů (uhelné elektrárny, JE Dukovany, JE Temelín). Využívá se přitom jejich schopnost rychlého najetí velkého výkonu a tedy operativního vyrovnání okamžité energetické bilance v elektrizační soustavě ČR.

7.2.2 Přednosti vodních elektráren

Vodní elektrárny neznečišťují ovzduší, nedevastují krajinu a povrchové či podzemní vody těžbou a dopravou paliv a surovin, jsou bezodpadové, nezávislé na dovozu surovin a vysoce bezpečné. Pružným pokrýváním spotřeby a schopností akumulace energie zvyšují efektivnost elektrizační soustavy. Vysokým stupněm automatizace přispívají k vyrovnávání změn na tocích a vytvářejí nové možnosti pro revitalizaci prostředí (prokysličování vodního toku).

7.2.3 K principu vodní elektrárny

Ve vodní elektrárně voda roztáčí turbínu; ta je na společné hřídeli s elektrickým generátorem (dohromady tvoří tzv. turbogenerátor). Mechanická energie proudící vody se tak mění na energii elektrickou, která se transformuje a odvádí do míst spotřeby.

Výběr turbíny závisí na účelu a podmínkách celého vodního díla. Nejčastěji se osazují turbíny reakčního typu (Francisova nebo Kaplanova turbína), a to v nepřeberné paletě modifikací. Pro vysoké spády (někdy až 500 m) se používá akční Peltonova turbína. V přečerpávacích vodních elektrárnách se používá turbín s reverzním chodem a s přestavitelnými lopatkami. V malých vodních elektrárnách se převážně zabydlela malá horizontální turbína Bánkiho spolu s upravenou jednoduchou turbínou Francisovou.

Vůbec nejvyšší účinnost pro velké spády vykazuje Dériazova turbína z roku 1951. Jde o diagonální verzi Kaplanovy turbíny. Podle způsobu práce se moderní turbíny dělí na rovnotlaké a přetlakové. V rovnotlakých turbínách zůstává tlak vody stále stejný, to znamená, že voda vychází z turbíny pod stejným tlakem, pod jakým do ní vstupuje. U přetlakových turbín vstupuje voda do oběžného kola s určitým přetlakem, který při průtoku klesá. Při výstupu z turbíny má tedy voda nižší tlak než při vstupu do ní. Tak pracují např. Francisovy turbíny, vhodné pro střední spády.

Pro malé výkony na malých spádech jsou vhodné horizontální turbíny, pro malé spády a velké výkony se stavějí turbíny vertikální. Vývoj Francisových turbín ještě není ukončen. Dosahují výkonů až 250 MW, jsou však schopny i 1000 MW výkonu a výkonů vyšších.

Vodní turbíny jsou technicky nejdokonalejší mechanické motory vůbec – dosahují 95% účinnosti. Umístění vlastní elektrárny může být různé podle tvaru terénu, výškových a spádových možností a na množství vody. Existují elektrárny zabudované přímo do tělesa hráze, jinde je elektrárna vystavěna hluboko v podzemí. Voda se k ní přivádí tlakovým potrubím a odvádí se podzemním kanálem.

Vedle průtokových vodních elektráren patří mezi nejznámější typy vodních elektráren elektrárny akumulční. Jsou součástí vodních děl - nádrží. Tato vodní díla kromě akumulace vody pro výrobu elektrické energie stabilizují průtoky říčním korytem, chrání před povodněmi a podporují plavební možnosti toku. Břehy nádrží mohou sloužit jako rekreační oblasti. Mnohdy jsou nádrže také zdrojem pitné vody pro vodárny, technologické vody pro průmysl a závlahové vody pro zemědělství.

Umístění vlastní elektrárny může být různé podle tvaru terénu, výškových a spádových možností a podle množství vody. Existují elektrárny zabudované přímo do tělesa hráze, jinde je elektrárna vystavěna hluboko v podzemí. Voda se k ní přivádí tlakovým potrubím a odvádí se podzemním kanálem.

7.2.3.1 Malé vodní elektrárny MVE

K využití potenciálu vodních toků v ČR slouží i kategorie tzv. malých vodních elektráren (zdroje elektrické energie s instalovaným výkonem do 10 MW). Většina malých vodních elektráren slouží jako sezónní zdroje. Průtoky toků, na kterých jsou zřizovány, jsou kolísavé a silně závislé na počasí a na ročním období.

7.2.3.2 Přečerpávací vodní elektrárny

Jde v principu o soustavu dvou nádrží. Voda vypouštěná spádem z horní vyrábí elektřinu v době její největší potřeby, mimo špičku se při využití tzv. levné elektřiny voda přečerpává z dolní nádrže zpět do horní. Velkou předností přečerpávacích vodních elektráren je schopnost přifázování do elektrifikační sítě s plným výkonem v několika minutách. Tato schopnost je ostatně vlastní všem vodním elektrárnám.

Elektrizační soustava státu musí v každém okamžiku vyrobit přesně tolik elektrické energie, kolik jí je potřeba. Spotřeba elektrické energie přitom jak během dne, tak i v delších obdobích kolísá. Elektrickou energii sice nelze v čistém stavu skladovat, situaci však účinně pomáhají řešit přečerpávací vodní elektrárny.

Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé Stráně

Leží na Moravě, v katastru obce Loučná nad Desnou, v okrese Šumperk. **Elektrárna má tři "nej"**:

- **největší reverzní vodní turbínu v Evropě** - 325 MW,
- **elektrárnu s největším spádem v České republice** - 510,7 m
- **a největší instalovaný výkon v ČR** - 2 x 325 MW.

Elektrárna plní v elektrizační soustavě několik významných funkcí - statickou, dynamickou a kompenzační. Statickou funkcí se rozumí přeměna nadbytečné energie v soustavě na energii špičkovou - v době přebytku elektrické energie v síti (především v noci) se voda čerpá z dolní nádrže do horní a ve špičkách, v době nedostatku elektřiny, se v turbínovém režimu vyrábí elektrický proud. Dynamickou funkcí přečerpávací vodní elektrárny se rozumí schopnost plnit funkci výkonové rezervy systému, vyrábět regulační výkon a energii a podílet se na řízení kmitočtu soustavy. Kompenzační provoz slouží k regulaci napětí v soustavě.



obr.7.15 Letecký snímek horní nádrže

Výstavba elektrárny byla zahájena v květnu 1978. Na počátku osmdesátých let však byla z rozhodnutí centrálních orgánů převedena do útlumového programu. V roce 1985 došlo k modernizaci projektu a po roce 1989 bylo rozhodnuto stavbu dokončit. **Do provozu byla elektrárna uvedena v roce 1996.**

Elektrárna je řešena jako podzemní dílo. Obě soustrojí jsou umístěna v podzemí, v kaverně o rozměrech 87,5 x 25,5 x 50 m. Souběžně s kavernou turbín se v podzemí nachází komora transformátorů, která má rozměry 115 x 16 x 21,7 m. V této komoře jsou dva blokové trojfázové transformátory, rozvodny 22 kV a další zařízení.

Horní nádrž je s podzemní elektrárnou spojena dvěma přivaděči, každým pro jedno soustrojí. Přivaděče mají délku 1 547 m a 1 499 m. Elektrárna je spojena s dolní nádrží dvěma odpadními tunely o průměru 5,2 m. Tunely jsou dlouhé 354 a 390 metrů. Dolní nádrž se nachází na říčce Divoká Desná. Nádrž má celkový objem 3,4 mil. kubických metrů, výšku

hráze 56 m, kolísání hladiny 22,2 m. Horní nádrž se nachází na hoře Dlouhé Stráně v nadmořské výšce 1350 m. Má celkový objem 2,72 mil. m³.



obr.7.16 Dolní nádrž

Při plném načerpání horní nádrže stoupne její hladina o 21,5 m a hladina dolní nádrže klesne o 22,2 m. Horní nádrž je izolována 18cm vrstvou přírodního asfaltu, který byl dovezen z Albánie – byl totiž potřeba materiál, který bez poškození vydrží rozsah teplot od –30 do +60 °C. Vedle horní nádrže stojí malá mohyla, která uchovává původní výšku vrcholu hory, která byla jinak seříznuta asi o tři metry.

Jelikož se areál elektrárny nachází uvnitř chráněné krajinné oblasti, je z ekologických důvodů celý provoz umístěn v podzemí. V kaverně o rozměrech 87,5 × 25,5 × 50 m jsou umístěny dvě 24 metrů vysoká turbosoustrojí s reverzními Francisovými turbínami, každá má výkon 325 MW (výkon v turbínovém režimu, v čerpadlovém režimu je maximum 312 MW; jedná se o největší reverzní vodní turbíny v Evropě). Při plném výkonu přitéká každým přivaděčem 68,5 m³ vody za sekundu; celý objem nádrže je možné načerpat za sedm hodin. Na turbínách jsou na duté hřídeli o průměru 1000 mm připevněny generátory, na nich pak rozběhové motory, které při spouštění čerpadlového režimu roztočí lopatky turbíny do protisměru (dále jsou pak lopatky poháněny přímo generátory ve funkci motorů). Na stropě turbínové kaverny jsou dva jeřáby, každý o nosnosti 250 tun, které jsou v případě potřeby společně schopny vyzvednout soustrojí na odkládací plochu, kde jsou přístupné opravě.^[3]

Kromě správní budovy s velínem se na povrchu nachází objekt vývodového pole se zapouzdřenou rozvodnou 400 kV, dílny a sklady, garáže, čistírna odpadních vod a úpravná vody.

Výrobní jednotka - Dlouhé Stráně

Instalovaný výkon	2 x 325 MW
Rok uvedení do provozu	1996
Typ turbíny	Francis

7.3. Význam vodních elektráren pro energetiku v ČR

Význam vodních elektráren v hydrologických podmínkách ČR nespočívá v objemu výroby elektrické energie, jaký poskytuje např. jaderná energetika, tj. JE Dukovany a JE Temelín, ale ve specifických vlastnostech jejich provozu. Vodní elektrárny dokáží velmi pohotově reagovat na okamžitou potřebu elektrické energie v energetické soustavě, nezatěžují životní prostředí odpady, jako je např. vyhořelé palivo, není třeba budovat úložiště odpadu apod. Vodní elektrárny představují levný zdroj elektrické energie, který se využívá zejména v období špičkové spotřeby.

Přečerpávací vodní elektrárny navíc umožňují i účelné využití elektřiny produkované méně flexibilními energetickými zdroji v období nízké spotřeby.

Vodní elektrárny mají i vodohospodářský význam. Kromě průtokových vodních elektráren patří mezi nejznámější typy vodních elektráren elektrárny akumulární. Jsou součástí vodních děl - nádrží. Tato vodní díla kromě akumulace vody pro výrobu elektrické energie stabilizují průtoky říčním korytem, chrání před povodňovými vlnami a podporují ekonomicky výhodné plavební možnosti vodních toků. Břehy nádrží mohou sloužit jako rekreační oblasti. Mnohdy jsou nádrže také zdrojem pitné vody pro vodárny, zdrojem technologické vody pro průmysl a závlahové vody pro zemědělství. V neposlední řadě je třeba připomenout, že v Evropě má své významné a uznávané místo i architektura českých vodních elektráren.

Využití vodních elektráren a především vodních děl z hlediska vodohospodářského významu se projevilo v období katastrofických záplav v roce 2002. Těm se sice v povodí Vltavy nepodařilo zcela zabránit; jejich důsledky by však bez schopnosti operativně a plánovitě přivál vodní masy zadržet byly daleko ničivější.

Vodní elektrárny mají řadu specifických vlastností. Jednou z nich je schopnost tzv. přečerpávacích vodních elektráren operativně řešit zvýšenou potřebu elektrické energie v období energetických špiček.

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, elektrizační soustava státu musí v každém okamžiku vyrobit přesně tolik elektrické energie, kolik jí je právě třeba. Spotřeba elektrické energie přitom jak během dne, tak i v delších obdobích kolísá. Elektrickou energii sice nelze v čistém stavu skladovat, situaci však účinně pomáhají řešit přečerpávací vodní elektrárny.

Přečerpávací vodní elektrárna je v principu soustava dvou výškově rozdílně položených vodních nádrží spojených tlakovým potrubím, na němž je v jeho dolní části umístěna turbína s elektrickým generátorem. Ta vyrábí elektřinu pro elektrizační soustavu v době energetické špičky; v době útlumu se voda z dolní nádrže přečerpává "levnou elektřinou" do nádrže horní, kde její potenciální energie čeká na své optimální využití v "pravou chvíli". Na každou akumulovanou kWh, kterou z přečerpávací vodní elektrárny odebíráme, je nutné k načerpání vody do horní nádrže vynaložit asi 1,4 kWh.

Ke stabilizaci elektrizační sítě jsou však tyto elektrárny nezastupitelné - na potřebu elektrického výkonu v síti, popř. na eventuální výpadek výkonu některé z uhelných elektráren, dokáží reagovat okamžitě. Stejně jako u ostatních typů vodních elektráren přitom využívají své schopnosti rychlého najetí při velkém výkonu.

Technologie využívající principu přečerpávacích vodních elektráren je perspektivní především z hlediska možnosti akumulace elektrické energie. Posláním vodních elektráren v ČR je pracovat jako doplňkové zdroje primárních zdrojů (klasických elektráren, JE Dukovany, JE Temelín). Teorie jednotlivých technologií vodních elektráren budou podrobněji popsány v dalších částech této kapitoly.

7.4. Hydroenergetický potenciál

Měrná energie vody má podle Bernoulliho rovnice složky *potenciální energie* gH , *tlakové energie* p/ρ a *kinetické energie* $1/2 c^2$ vyjádřené vztahem, kde jednotlivé části rovnice (jednotlivé energie) jsou vztaženy na jednotkovou hmotnost kapaliny:

$$E_H = gH + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} c^2 \quad [J.kg^{-1}] \quad (7.1)$$

H výška nad srovnávací rovinou (m)

p tlak (N/m^2)

c rychlost (m/s)

ρ hustota vody (kg/m^3)

Bernoulliho rovnice vyjadřuje princip zachování mechanické energie u ideální kapaliny, rovnice tedy vyjadřuje skutečnost, že v ideální nestlačitelné kapalině je součet všech tří energií, ať už jde o energie kapaliny jednotkového objemu, nebo jednotkové hmotnosti pro libovolné vlákno, konstantní.

Možnosti vodního díla se hodnotí podle hydroenergetického potenciálu, jehož teoretická hodnota je určena jako integrál potenciálů jednotlivých úseků vodního toku určených ze středních ročních průtoků podle vztahu:

$$E_T = g \cdot \int_0^H Q(H) dH \quad [W] \quad (7.2)$$

$Q(H)$ střední objemový průtok elementárního úseku toku ($m^3.s^{-1}$)

H, dH geodetický spád mezi začátkem a koncem toku a jeho element (m)

Pro určení průtokového množství se provádějí dlouhodobá hydrologická měření a z nich se stanovují chronologické čáry průtoků a křivka trvání průtoků. Chronologická čára udává průměrné denní průtoky, ze kterých se statisticky vyhodnotí průměrné měsíční průtoky a z nich výslednou křivku trvání průtoků. Plocha pod čarou udává trvání výkonu celkového množství vody proteklé měřeným místem za rok.

Pro stanovení potenciální energie toku se využívají poměrné roční doby trvání průtoků T v hodnotách $T \in (0,25; 0,5; 0,95)$.

Z odhadu světového hydroenergetického potenciálu 3,75 TW připadá na jednotlivé světadíly:

<i>Světadíl</i>	<i>Podíl (%)</i>
<i>Austrálie</i>	<i>4,5</i>
<i>Afrika</i>	<i>18,7</i>
<i>Amerika</i>	<i>34,7</i>
<i>Asie</i>	<i>35,7</i>
<i>Evropa</i>	<i>6,4</i>

Tab. 7.1: Hydroenergetický potenciál

Technicky využitelný potenciál je menší než teoretický, využití celkového spádu je nereálné a proces přeměny na elektrickou energii je doprovázen ztrátami různého druhu. Technicky využitelný potenciál je v podmínkách České republiky asi 50% potenciálu teoretického a představuje asi 400 MW.

Stavba vodní elektrárny umožňuje:

- využití hydroenergetického potenciálu k přeměně na elektrickou energii,
- regulaci vodního toku a hospodaření s vodou,
- zajišťování splavnosti, ochrana při povodních, vznik rekreačních oblastí.

Pro hydroenergetický potenciál mezi dvěma body 1-2 vodní trajektorie platí vztah:

$$E_{1-2} = g(H_1 - H_2) + \frac{(p_1 - p_2)}{\gamma} + \frac{(c_1^2 - c_2^2)}{2} \quad [J.kg^{-1}] \quad (7.3)$$

Podstatnou složkou pro výpočet výkonu vodní turbíny je potenciální složka a proto můžeme přijmout zjednodušení:

$$E_{1-2} = g(H_1 - H_2) = gH \quad (7.4)$$

a výpočet výkonu je pak definován výrazem:

$$P_t = \rho \cdot Q \cdot E_{1-2} \cdot \eta_t \quad (7.5)$$

$\eta_t = \eta_v \eta_h \eta_m \dots$ celková účinnost vodní turbíny (0,8-0,9)

η_v objemová účinnost respektující ztrátu průtokového množství

η_h hydraulická účinnost respektující hydraulické ztráty

η_m mechanická účinnost respektující mechanické ztráty třením atp.

Základní parametry hydroenergetického díla jsou:

- průtok Q ($m^3 \cdot s^{-1}$)
- instalovaný výkon P_i (W)
- spád H (m)
- účinnost η
- roční výroba elektrické energie E_r
- doba využití instalovaného výkonu $\tau_v = E_r / P_i$

Podle doby využití instalovaného výkonu τ_v se elektrárny člení na:

τ_v (h)	typ elektrárny
4000-6500	průtočné
1500-3000	akumulační
1000-1500	přečerpávací

Tab. 7.2: Rozdělení podle doby využití instalovaného výkonu

Hlavní znaky hydroenergetického zdroje :

- spojitá obnovitelnost,
- proměnlivost průtoku vodních zdrojů,
- vysoké investiční náklady na stavbu vodních děl,
- nízké provozní náklady.

Stavba vodních elektráren přináší následující výhody:

- regulace vodního průtoku a hospodaření s vodou,
- zajišťování splavnosti toku,
- možnost využít vodu pro zavlažování,
- možnost vzniku rekreačních oblastí,
- možnost akumulace energie.

Jako nevýhody můžeme uvést následující vlastnosti:

- trvalý zásah do krajiny,
- ekologické ovlivnění okolí,
- ovlivňování spodních vod,
- tvoření úsadeb na dně.

Vodní elektrárny mají vedle vodohospodářského významu velký význam pro provoz energetické soustavy, neboť jsou provozně levným a rychlým zdrojem, který se používá pro pokrývání rychlých výkonových změn a přečerpávacích elektráren také pro vyrovnávání diagramů zatížení v oblasti nižších hodnot zatížení.

7.5. Základní typy a rozdělení vodních turbín z hlediska provozních vlastností

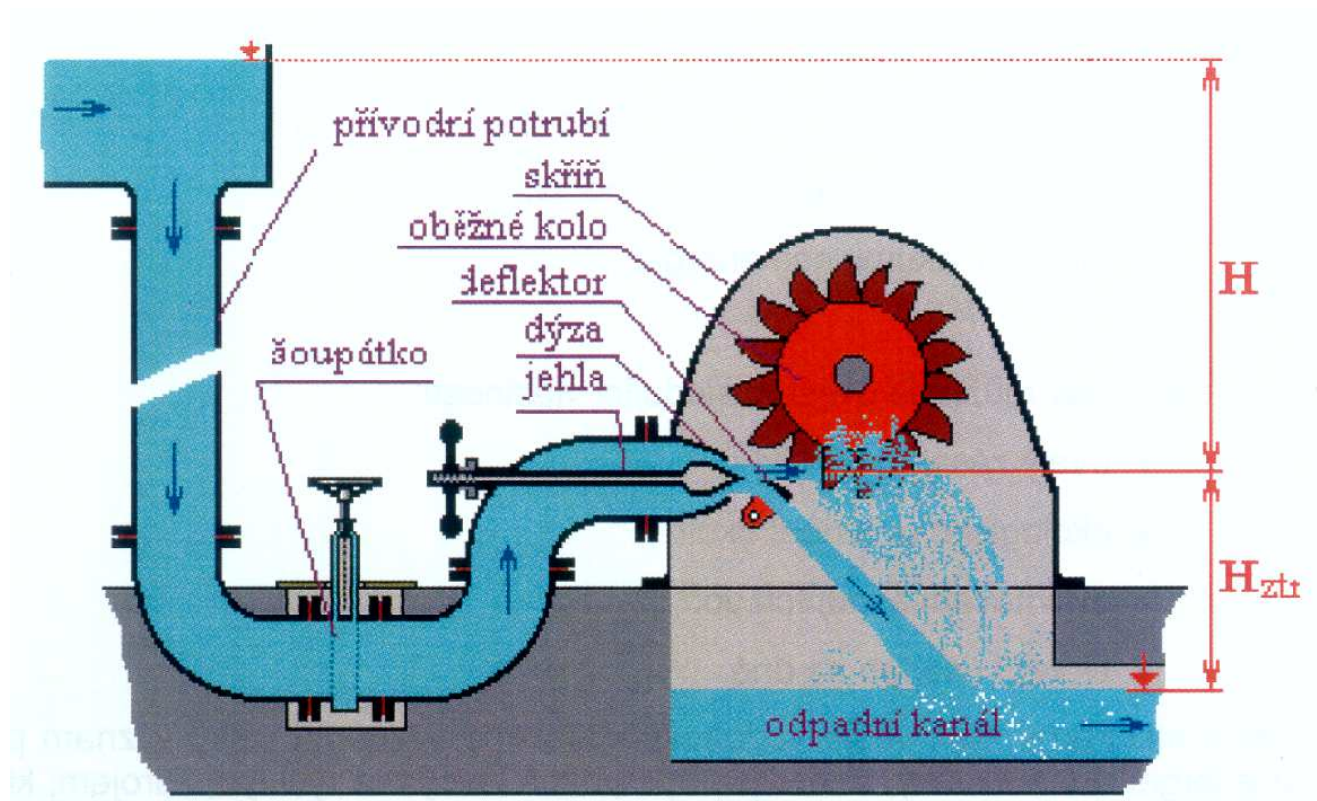
Voda do turbíny přitéká přívodním potrubím a ve stacionárním rozváděcím zařízení (*rozváděcích kanálů u Kaplanovy turbíny, rozváděcích lopatek u Francisovy a dýz u Peltonovy turbíny*) se buď celá (*rovnotlaké*) nebo jen část (*přetlakové*) energie mění na pohybovou. Z rozváděcích zařízení vtéká voda do obráceně zakřivených lopatek oběžných kanálů a tlakem na ně vytváří točivý moment.

Z hlediska průběhu tlaku vody při průtoku oběžným kolem se vodní turbíny tedy dělí na *rovnotlaké* a *přetlakové*. Nejvýznamnějším představitelem rovnotlakých turbín je *Peltonova turbína* (obr. 7.17), která se používá pro velké spády (maximální využívaný spád je 1771 m v hydrocentrále Reiseck – Kreuzek v Korutanech). Nejpoužívanějšími typy

přetlakových turbín jsou *Francisova* (obr. 7.18), *Kaplanova* (obr. 7.21) a *Deriazova* (*diagonální*) turbína (obr. 7.22). Pro rozlišování různých typů hydraulických turbín se vžilo odvozené kritérium tzv. hydraulické podobnosti – *měrné otáčky*. Popudem k zavedení kritéria měrných otáček byla snaha výrobců vodních turbín zobecnit poznatky a zkušenosti ze stavby na nové konstrukce. Mají-li dvě turbíny s rozdílnými provozními parametry (spád H , průtok Q , otáčky n) stejné měrné otáčky, jsou si tzv. hydraulicky podobné, mají např. přibližně stejnou účinnost a tvar rychlostních trojúhelníků. Pro měrné otáčky vodních turbín platí vztah:

$$n_q = \frac{333 \cdot n \cdot \sqrt{Q}}{\sqrt[4]{Y^3}} \quad (7.6)$$

n otáčky turbíny (s^{-1})
 Q objemový průtok vody ($m^3 \cdot s^{-1}$)
 Y měrná energie vody ($J \cdot kg^{-1}$)



Obr.7.17 Peltonova turbína

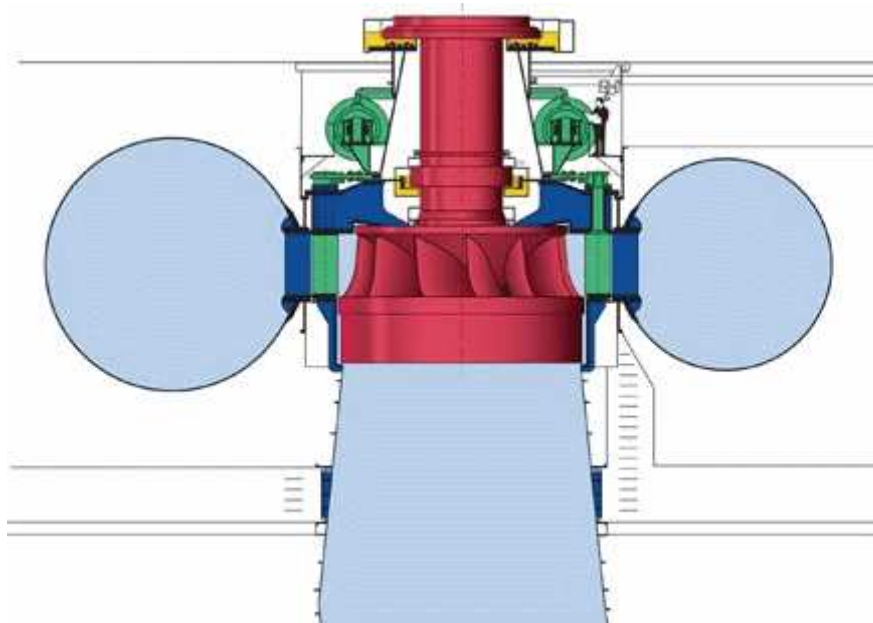
Oblasti použití základních typů turbín jsou znázorněny na obr. 7.20 dosahované účinnosti v závislosti na měrných otáčkách jsou uvedeny na obr. 7.19. Aby bylo možno beze ztráty spádu umístit vodní turbínu nad úroveň spodní hladiny vody, spojuje se výstup přetlakových turbín se spodní hladinou potrubím s rozšiřujícím se průřezem, které ústí pod spodní hladinou vody, (tzv. savka). Po zaplnění savky vodou vznikne na výstupu vody z oběžného kola podtlak, odpovídající výšce vodního sloupce ΔH_s mezi výstupem z oběžného kola turbíny a spodní hladinou vody v souladu s Bernoulliho rovnicí mezi těmito dvěma body.

Rozšiřující se průřez savky navíc umožňuje snížit ztrátu výstupní rychlostí vody. Maximální možná "sací výška" turbíny nad spodní hladinou vody $H_{sg \max}$ se určuje z rovnice:

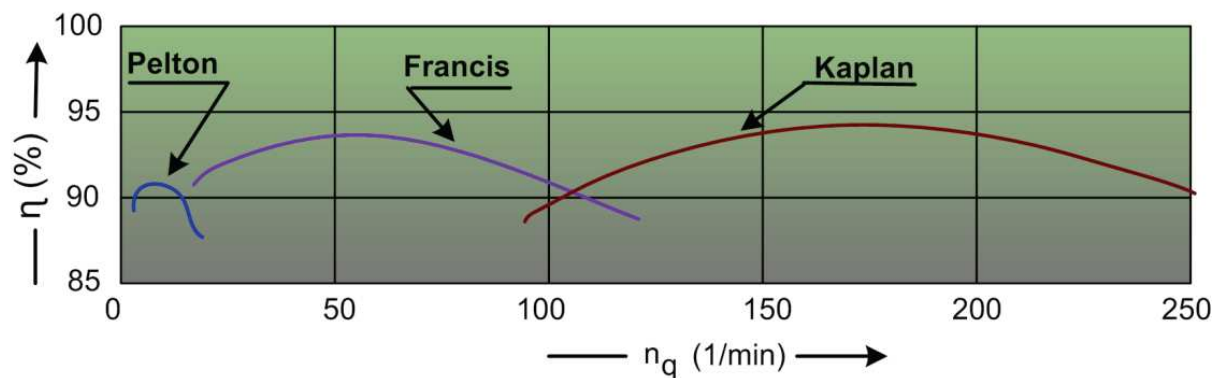
$$H_{sg \max} = \frac{p_b - p_w}{\rho \cdot g} - H \cdot \sigma_{kr} - \frac{\Delta Y_{zs}}{g} \quad (7.7)$$

kde

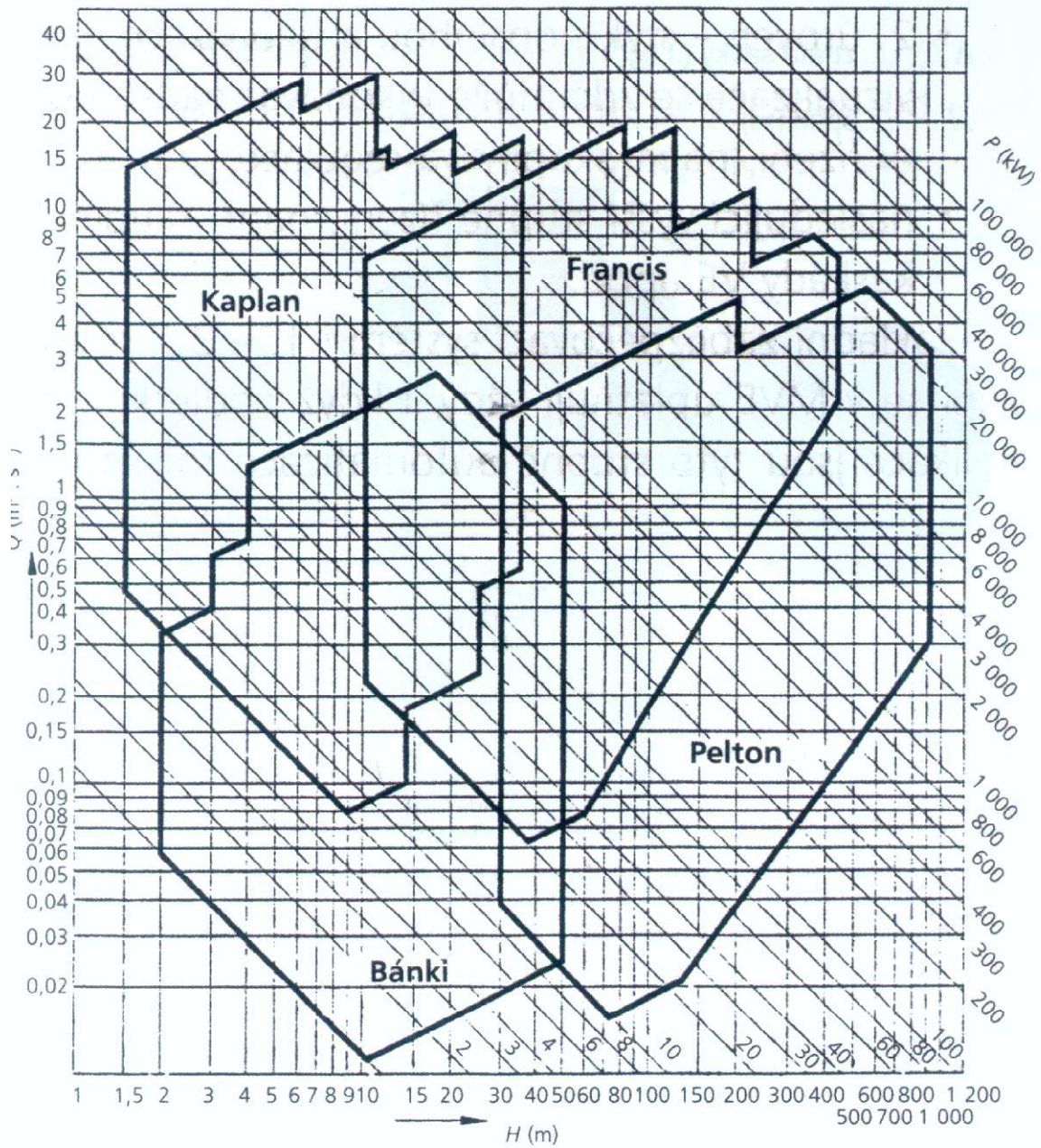
- p_b barometrický tlak (Pa)
- σ_{kr} Thomův kavitační součinitel (-)
- p_w tlak nasycených par (Pa)
- ΔY_{zs} ztráta savky ($J \cdot kg^{-1}$)
- H spád (m)



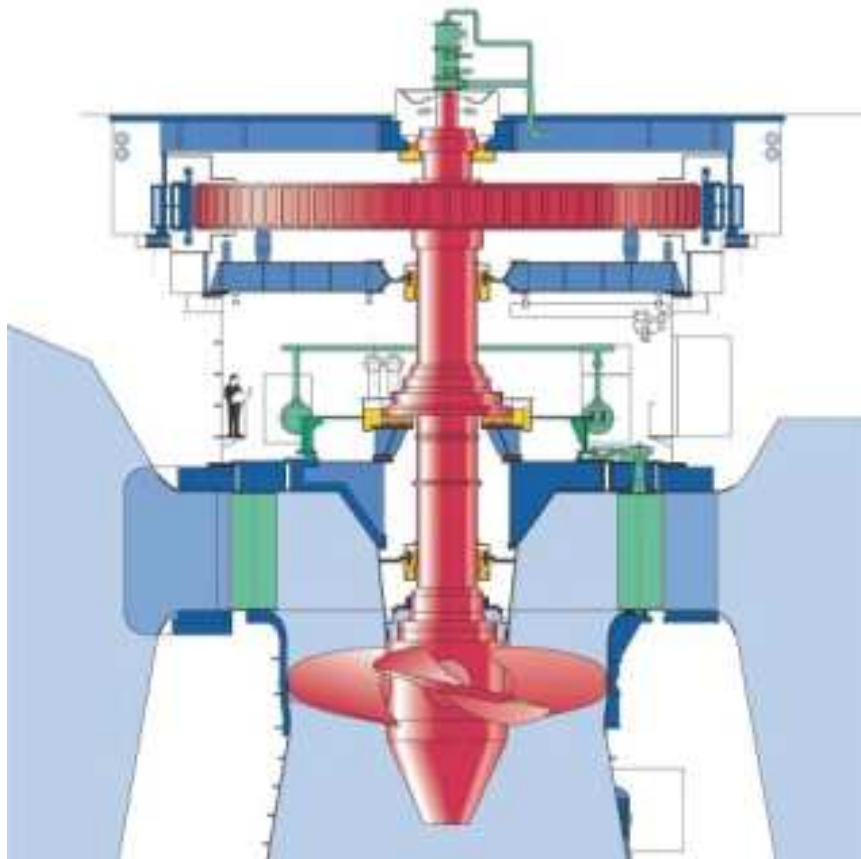
Obr. 7.18: Francisova turbína



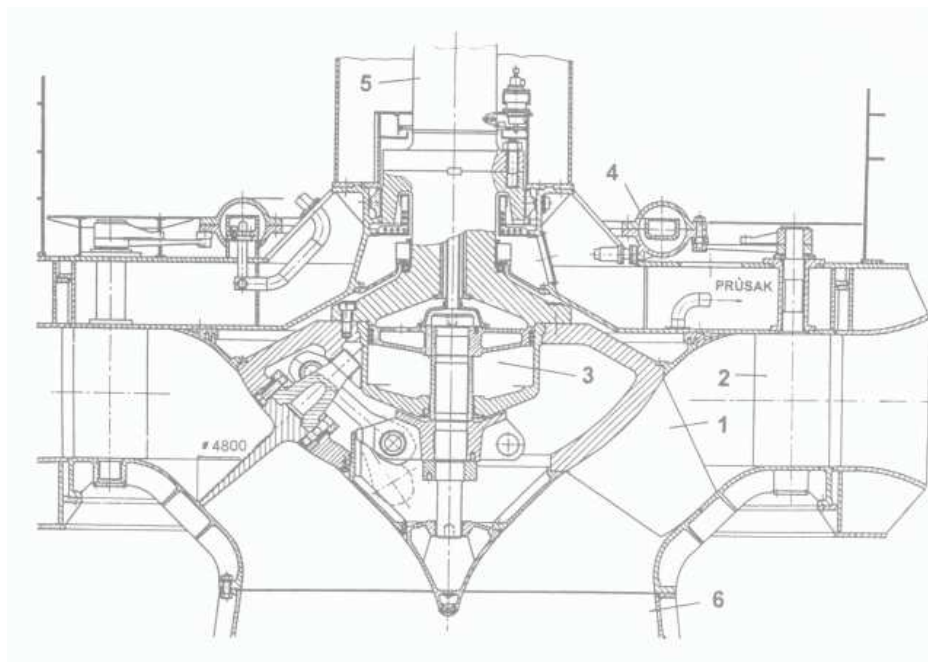
Obr. 7.19: Dosahované účinnosti základních typů turbín



Obr. 7.20: Oblasti použití základních typů turbín (osa y nalevo objemový průtok vody Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$))



Obr. 7.21: Kaplanova turbína



Obr. 7.22: Diagonální turbína (Deriazova)

7.6. Základní typy a provozní vlastnosti vodních elektráren

Vodní turbíny jsou většinou součástí hydrocentrál, kde transformují potenciální energii vody vyjádřenou měrnou energií Y ($J.kg^{-1}$) respektive spádem H (m) a objemovým průtokem Q ($m^3.s^{-1}$). Vzájemná vazba provozních parametrů Q a H je malý průtok a větší spád, na dolním toku je obvykle velký průtok a nízká koncentrace spádu. Těmto podmínkám je nutno přizpůsobit použitý typ turbíny. Vodní turbíny dodávají prostřednictvím synchronního vícepólového generátoru elektrickou energii do sítě s konstantní frekvencí. Během krátkého regulačního pochodu vyvolaného potřebou změny výkonu turbíny se nemění spád.

Výkon turbíny:

$$P = Q.H.\rho.\eta \quad (W) \quad (7.8)$$

Výkon lze tedy změnit pouze změnou objemového průtoku, který se obvykle řeší řízením přítoku vody, natáčením rozváděcích nebo oběžných lopatek, případně jejich kombinací.

Podle systému soustředění vodní energie (průtoku a spádu) se dělí hydrocentrály na:

Přehradní a jezové – využívají vzdouvacího zařízení (jez, přehrada). Přehradní hráze se dělí na:

- sypané,
- gravitační,
- klenbové.

Derivační – odvádí vodu z původního koryta přivaděčem a po průtoku turbínou jí opětně přivádí do koryta.

Přehradně derivační – vzdouvacím zařízením je přehrada, která soustřeďuje spád i průtok. Voda je zvláštním přivaděčem vedena k turbínám.

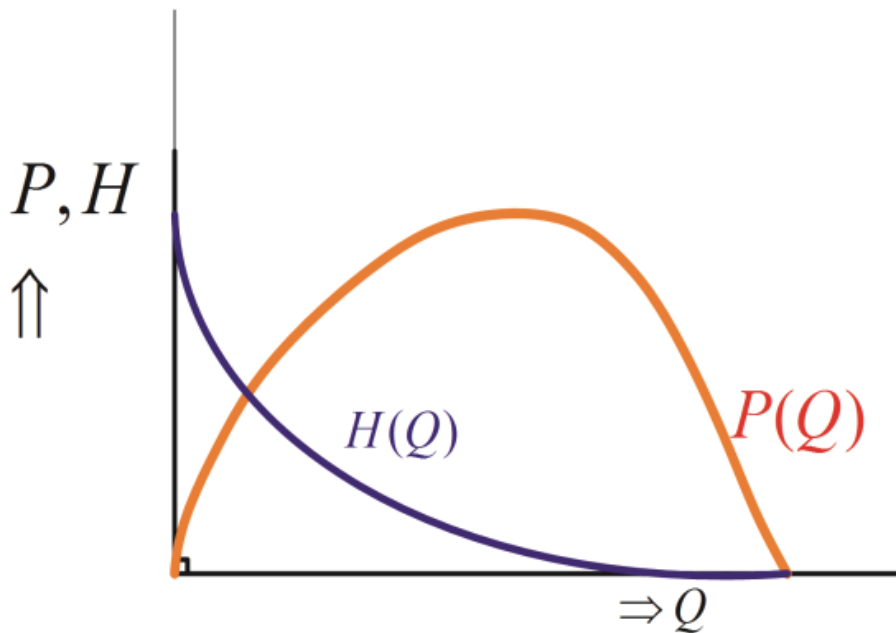
Přečerpávací – s horní a dolní nádrží.

Malé vodní elektrárny – k využití potenciálu vodních toků v ČR slouží i kategorie výkonem do 10 MW). Většina malých vodních elektráren slouží jako sezónní zdroje. Průtoky toků, na kterých jsou zřizovány, jsou kolísavé a silně závislé na počasí a na ročním období. Vzhledem ke svému nezanedbatelnému a v současnosti stále se zvyšujícímu počtu těchto malých vodních děl zvyšují využitelnost vodní energie v ČR, jejíž potenciál pro využití vodní energie ve velkých hydrocentrálách je prakticky vyčerpán.

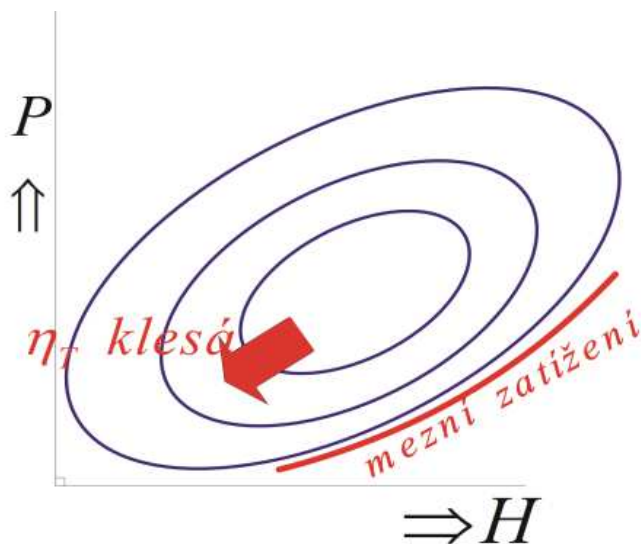
Dle způsobu provozu a zařazení do diagramu zatížení se můžeme vodní elektrárny rozdělit na *Průtočné* a *Regulační*.

7.6.1 Průtočné vodní elektrárny.

Pracovní pásmo průtočných elektráren je v základní oblasti trvalého zatížení diagramu zatížení protože ke generaci svého výkonu využívá právě aktuální hodnotu průtoku vody řečištěm a její výkon se proto nepřizpůsobuje požadavkům odběru v soustavě. U elektráren s malým spádem H se s průtokem mění i spád a dokonce při velkých hodnotách průtoku (povodně) může dojít k vyrovnání spodní a horní hladiny s nulovým spádem. Výkon P nejprve s rostoucím průtokem stoupá a po dosažení určitého maxima začne klesat až k nule.



Obr. 7.23: Závislost výkonu a spádu na průtoku



Obr. 7.24: Lasturový diagram

Závislost mezi výkonem a spádem prezentuje názorně lasturový diagram, jehož jednotlivé křivky jsou parametrizovány konstantní účinností. Diagram omezuje čára mezních

výkonů, kterých turbína dosahuje při plné hltnosti turbin. Základní křivky se získávají měřeními na hydraulických modelech a na reálné provedení se přepočítávají podle zákonů hydraulické podobnosti.

7.6.2 Regulační vodní elektrárny.

Pracovní pásma regulačních vodních elektráren jsou zpravidla ve špičkové nebo pološpičkové části diagramu zatížení. Ke své činnosti potřebují mít vhodný prostor umožňující akumulaci potenciální energie vody. Tento prostor může být podle přírodních podmínek realizován cestou přirozenou nebo umělou. Přirozené akumulční prostory tvoří jezera. Pro vytvoření umělých akumulací se užívá:

- prostor vzniklý zahrazením koryta řeky přehradou (údolní přehrada),
- prostor přirozené kotliny v okolí koryta řeky, který se pak spojuje s korytem řeky spojovacím (derivačním) kanálem.

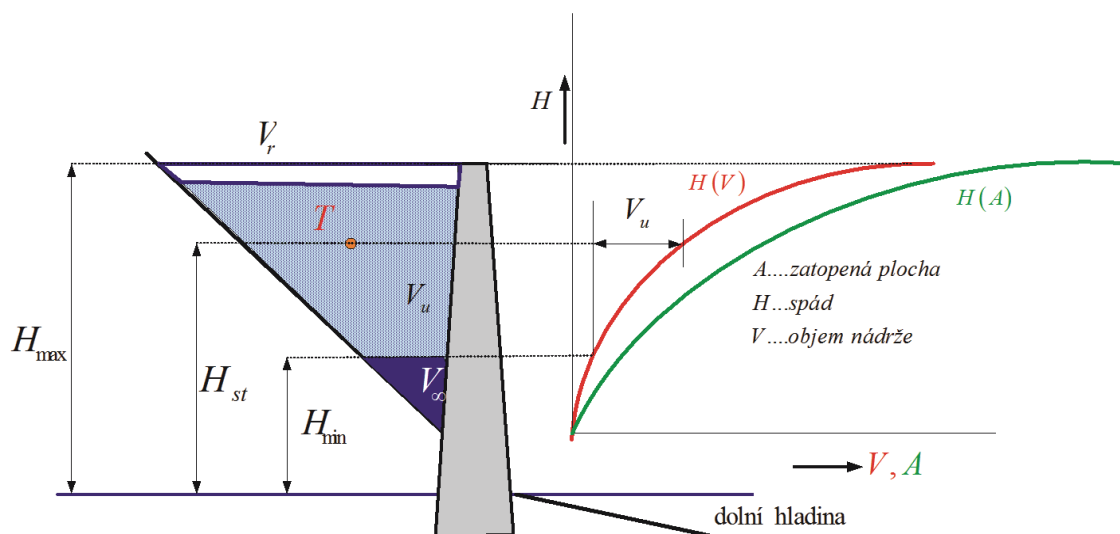
Podle vzájemného umístění nádrže a elektrárny rozeznáváme:

- horní nádrž, která je výše položena než elektrárna a je s ní spojena korytem nebo potrubím,
- vlastní nádrž, která je vytvořena přehradou elektrárny,
- dolní nádrž, která je umístěna pod regulační elektrárnou a má za úkol zajistit rovnoměrný průtok na jejím výstupu.

Objem akumulční nádrže musí zajistit akumulaci energie na dobu T , která může nabývat hodnoty den, týden, měsíc, rok nebo i více let.

Objem dále členíme na:

- V_{∞} objem stálého zadržení, který je určen objemem pod nejnižší hladinou, pod kterou se voda z nádrže již neodebírá,
- V_u užitečný objem, který je dán objemem mezi nejvyšší a nejnižší provozní hladinou,
- V_r ...ochranný (retenční) objem sloužící k eliminaci povodňových jevů a ochraně povodí pod akumulční nádrží.



Obr.7.25 Znárodnění objemů akumulční nádrže

7.6.3 Užitiný objem akumulační nádrže vodní elektrárny

Uvažme pro vysvětlení základů vlivu akumulace vody hydroenergetické dílo s dobou akumulace T , stálým přítokem do nádrže $Q_1(t)=Q_1$ a pokrývajícím proměnlivým diagramem zatížení $P(t)$. Vazba mezi generovaným výkonem a průtokem $Q_2(t)$ je dána vztahem:

$$P(t) = k_{PQ} \cdot Q_2(t) \quad (7.9)$$

Přijmeme-li pro zjednodušení předpoklad konstantního spádu H a účinnosti η bude průtok vody turbinami obrazem diagramu zatížení $P(t)$.

$P(t)$ diagram zatížení
 $Q_2(t)$ průběh odtoků
 $Q_1(t) = Q_1$..průběh konstantního přítoku
 $V_1(t)$ průběh přitékajícího objemu
 $V_2(t)$ průběh odtékajícího objemu

Střední hodnota výkonu P_s a průtoků Q_s :

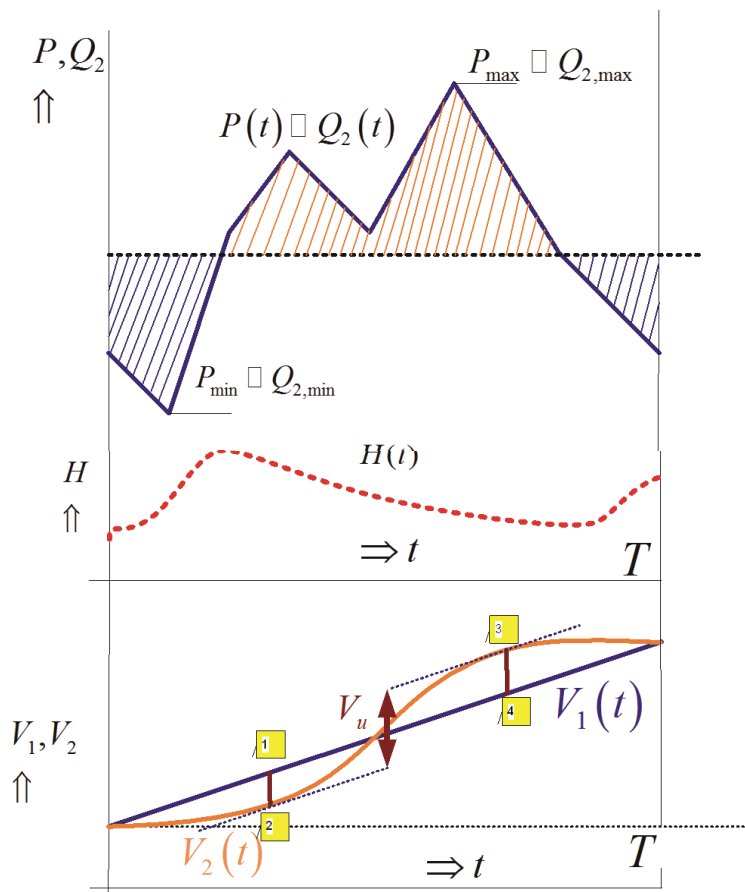
$$P_s = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt ; \quad Q_s = \frac{1}{T} \int_0^T Q(t) dt \quad (7.10)$$

$$\text{objem přítoků: } V_1(t) = Q_1 \cdot t \quad (7.11)$$

$$\text{objem odtoků } V_2(t) = \int_0^t Q_2(\tau) d\tau = \frac{1}{k_{PQ}} \int_0^t P(\tau) d\tau \quad (7.12)$$

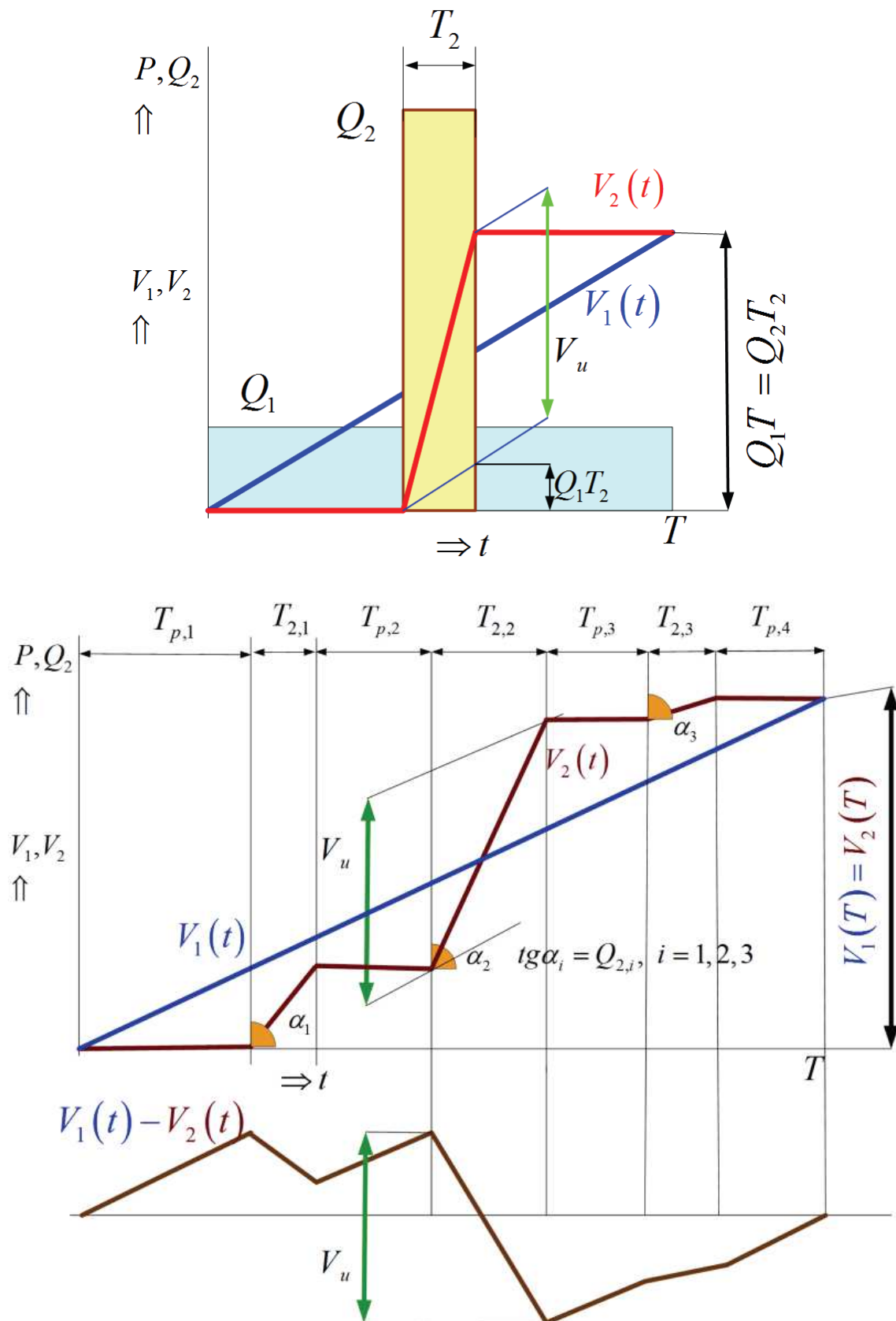
Užitný objem V_u je definován jako součet maximálních vzdáleností mezi $V_1(t)$ a $V_2(t)$ v kladných a záporných hodnotách.

$$V_u = \max[V_1(t) - V_2(t)] - \min[V_1(t) - V_2(t)] \quad (7.13)$$



Obr. 7.26: Diagram zatížení a průběhy objemů přítoků a odtoků

7.6.4 Provoz špičkové elektrárny



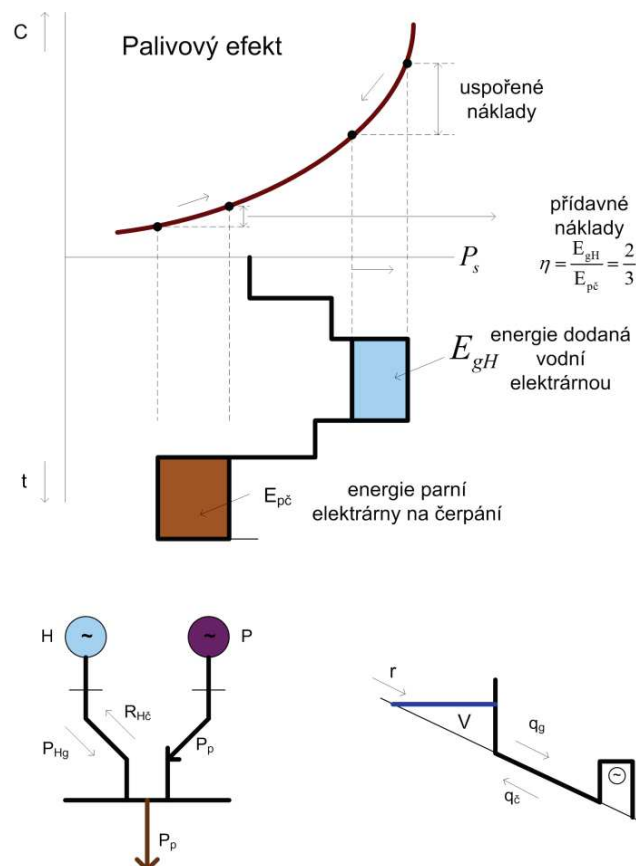
Obr. 7.27: Práce špičkové elektrárny

7.6.5 Přečerpávací vodní elektrárny

Přečerpávací vodní elektrárny (PVE) jsou příkladem regulačních elektráren, které mají nezastupitelnou roli při pokrývání špičkových zatížení a rychlých výkonových změn denního diagramu. Prakticky se využívají tato uspořádání:

- Třístrojové: sestava se skládá ze tří vertikálně uspořádaných strojů: turbína – alternátor (motor) – čerpadlo. Alternátor pracuje v čerpadlovém provozu jako motor.
- Dvoustrojové: toto vertikální uspořádání strojů obsahuje: reverzní turbínu (čerpadlo) – alternátor (motor). Turbinové oběžné kolo pracuje v čerpadlovém provozu jako čerpadlo a alternátor jako synchronní motor.

V současné době se využívá hlavně dvoustrojové uspořádání tvořené synchronním strojem a čerpadlovou turbínou. Čerpadlová Francisova či Deriazova turbína mění při změně mezi turbinovým a čerpadlovým provozem i smysl otáček. Čerpadlová Kaplanova turbína smysl otáčení zůstává zachovalý, ale natáčejí se oběžné lopatky. Přečerpávací elektrárna pracuje v soustavě dvou nádrží umístěných nad a pod elektrárnou a spojených s elektrárnou tlakovým potrubím. V době největší spotřeby se voda v horní nádrži využívá k výrobě a v době nízkého zatížení (a tím levnější energie z parních elektráren) se voda z dolní nádrže přečerpává do nádrže horní. Situaci znázorňuje obr. 7.27. Technologie přečerpávacích elektráren je pro provoz systému perspektivní, protože vyrovnává diagram zatížení a umožňuje určitou formu akumulace energie a navíc jsou rychle náfázovatelné a zatěžovatelné. Účinnost procesu je 60-75% a na každou akumulovanou 1 kWh je nutné vynaložit asi 1,4 kWh. Znázornění rozdílů nákladů (palivový efekt) prezentuje obr.7.28



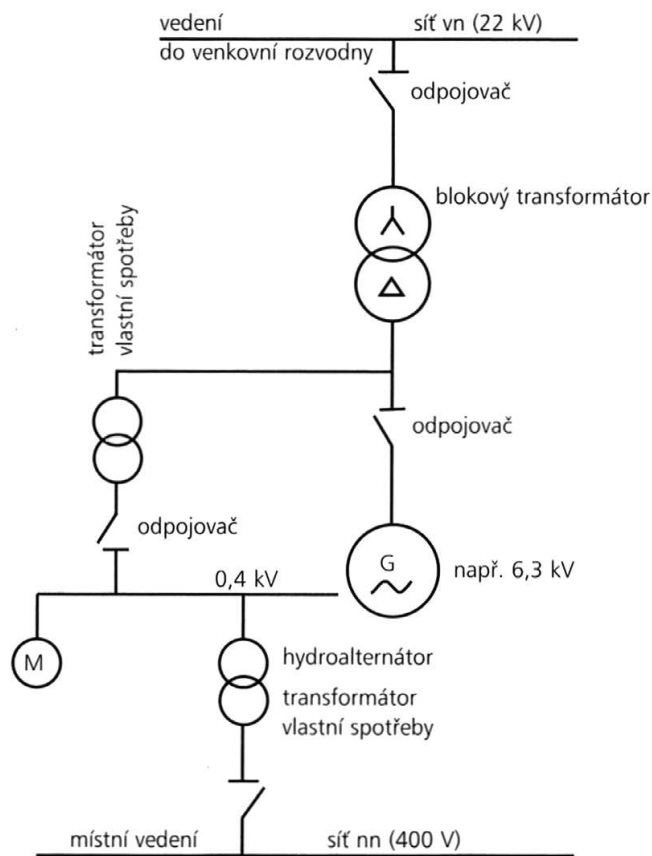
Obr. 7.28: Znázornění palivového efektu přečerpávání

7.7. Elektrotechnická zařízení vodních elektráren

Základní prvky elektrického systému MVE jsou:

- generátor,
- vývody z generátoru,
- rozvodna generátorových vývodů,
- blokový transformátor,
- vývody z transformátoru,
- venkovní rozvodna (může i nemusí být),
- transformátor vlastní spotřeby,
- elektrické motory různých zařízení (jeřáb, čerpadla),
- budiče generátorů a pomocná zařízení (odpojovače, vypínače, jističe...)

Možné hlavní elektrické schéma vodní elektrárny je vidět na obrázku 7.29.



Obr. 7.29: Schéma připojení MVE k síti

S ohledem na skutečnost, že hydroenergetický potenciál je v České republice již poměrně nízký, budeme se dále podrobněji zabývat technologiemi pro malé vodní elektrárny (MVE). Pro výstavbu elektráren malých výkonů lze s určitými omezeními, energetický potenciál vody na našem území ještě využít.

7.7.1 Začlenění MVE do energetického systému

Česká elektrizační soustava pracuje se střídavým elektrickým proudem s frekvencí 50 Hz. Napěťové úrovně se dělí následovně:

- vvn (110 až 400 kV) – dlouhá přenosová vedení,
- vn (10, 20 a 35 kV) – distribuční síť,
- nn (do 1000 V) – místní síť, domovní a průmyslové rozvody.

MVE pracují paralelně s elektrizační sítí. Nejmenší výkony jsou připojovány k síti nn v rámci objektu a vyrobená elektrická energie je určena pro vlastní spotřebu objektu. Případný přebytek výkonu se dodává do místní distribuční sítě. I MVE s vyššími výkony (od 300 do 1000 kW) lze připojit k distribuční síti nn. Vyšší výkony se zpravidla připojují k síti vn.

7.7.2 Elektrická zařízení MVE

Přeměnu elektrické mechanické energie zajišťuje elektrický generátor. Generátor je připojen prostřednictvím přenosového a transformačního zařízení k místu spotřeby. Vyrobenou elektrickou energii je třeba okamžitě spotřebovat (minimální možnosti akumulace).

Přenosovou cestu tvoří elektrický obvod se spínacími a jistícími přístroji, řídicími, měřicími a zabezpečovacími obvody. Samotné uspořádání MVE závisí na použitém hydrogenerátoru.

Pro většinu provozovaných MVE jsou vhodné generátory na střídavý proud. Využívají se jak synchronní tak asynchronní generátory. Volba mezi uvedenými typy generátorů je podmíněna požadavky provozovatele distribuční sítě, k níž je MVE připojena. Na vybraném typu závisí také skladby elektrického zařízení MVE.

7.7.3 Synchronní generátor

Synchronní generátor má stator se střídavým trojfázovým vinutím a rotor s jednosměrným budícím vinutím. Konstrukční provedení vychází z velikosti generátoru a počtu pólů. Počet pólů spolu s frekvencí určuje synchronní otáčky generátoru:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}, \text{ resp. } n = \frac{3000}{p} \quad (\text{ot}^{-1}) \quad (7.14)$$

kde

n synchronní otáčky generátoru

f frekvence sítě

p počet pólových dvojic

V generátorech na střídavý proud vzniká elektrické napětí stejně jako ve stejnosměrných strojích elektromagnetickou indukcí. Protože alternátory se konstruují na vysoké napětí, až několik tisíc voltů, je vinutí ve kterém se indukuje napětí uloženo ve

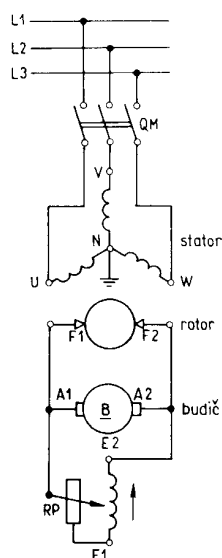
statoru, kdežto stejnosměrné elektromagnety jsou v rotoru. Při jedné otáčce rotoru dvoupólového stroje, vznikne ve vodiči každé fáze statoru jeden kmit střídavého proudu. Má-li alternátor vyrábět střídavý proud s kmitočtem 50 Hz, musí za každou vteřinu vykonat rotor $50 \times 60 = 3000$ otáček. Uvnitř statoru se otáčí rotor s vyniklými póly. Vzduchová mezera mezi rotorem a statorem je pouze několik mm, protože vzduch má velký magnetický odpor. Pólové nástavce mají takový tvar, aby ve vzduchové mezeře vzniklo magnetické pole sinusového průběhu. Budící cívky na jádrech magnetů rotoru jsou obvykle zapojeny do série, a to tak, aby vznikl střídavě severní a jižní pól. Stejnosměrný proud s k cívkám přivádí z budiče přes dva kroužky.

U alternátorů rozlišujeme dvě točivá magnetická pole. Jedno vzniká ve statoru, je-li alternátor zatížen, druhé točivé pole je vybuzeo stejnosměrným proudem na rotoru. Obě magnetická pole se otáčejí stejným počtem otáček tzn. otáčejí se synchronně.

Synchronní generátor má možnost regulovat napětí a frekvenci, kterou vyjadřuje vztah 7.14. Napětí je možno ovlivnit změnou budícího proudu kotvy. Uvedené způsoby regulace platí pro případ samostatného provozu synchronního generátoru do autonomní sítě. Provoz MVE v samostatném chodu je ale spíše výjimkou. Může být požadován v případech výpadku sítě jako náhradní zdroj nebo pro napájení objektů ve vzdálené oblasti. Častější jsou případy chodu synchronního generátoru paralelně s elektrizační sítí.

Síť je považována za výkonově silnou, tj. s pevným napětím a frekvencí, které se nedají malým výkonem uvažovaného generátoru ovlivnit. Generátor dodává do sítě jalový a činný výkon. Činný výkon je dán mechanickým výkonem vodního stroje a souvisí se zátěžovým úhlem generátoru. Jalový výkon je dán velikostí budícího proudu. K dodávce do sítě se používá regulace na konstantní jalový výkon nebo na konstantní účinník. Paralelní provoz se sítí při nízkém budícím proudu skrývá nebezpečí v podobě vypnutí generátoru ze synchronismu.

Připojení generátoru k síti (fázování) je jemné při synchronizaci napětí, frekvence a fáze nebo samosynchronizací, tj. připojením generátoru k síti v přibližně synchronních otáčkách v nenabuzeném stavu a následném nabuzení. Samosynchronizací vzniká proudový ráz 2,5 – 3krát větší, než jmenovitý proud.



Obr. 7.30 Schéma alternátoru

7.7.4 Asynchronní generátor

Používá se především v režimu výroby a dodávky elektrické energie MVE do pevné sítě. U samostatného provozu do autonomní sítě se asynchronní generátor nepoužívá.

Stator asynchronního generátoru má trojfázové střídavé vinutí, stejně jako synchronní stroje. Rotor může být vinutý s kroužky nebo se dá použít rotor s klecovým vinutím. Při přivedení trojfázového napětí na svorky statoru vznikne točivé magnetické pole, které v rotorovém vinutí indukuje proudy, jejichž silovými účinky se rotor otáčí ve směru točení magnetického pole a stroj se chová jako motor. Když rotor dosáhne synchronních otáček s magnetickým polem, nic se neindukuje. Proto se rotor v motorovém chodu otáčí s otáčkami o něco nižšími, než jsou otáčky synchronní – pracuje se skluzem. Skluz je definován:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad (\%) \quad \text{kde } n_s \text{ jsou synchronní otáčky}$$

a n jsou skluzové otáčky

Při zvýšení otáček rotoru nad otáčky magnetického pole bude rotor do sítě dodávat činný výkon. Ze sítě však bude odebírat jalový výkon pro svou magnetizaci. Odběr jalového výkonu ze sítě má za následek zvýšení proudu v síti. Pro potlačení tohoto jevu se využívá kompenzace pomocí kondenzátorů, ale to přináší nebezpečí vzniku přepětí na svorkách paralelní kombinace kondenzátor – generátor, samobuzením při výpadku sítě a následném zvýšení otáček hydrogenerátoru.

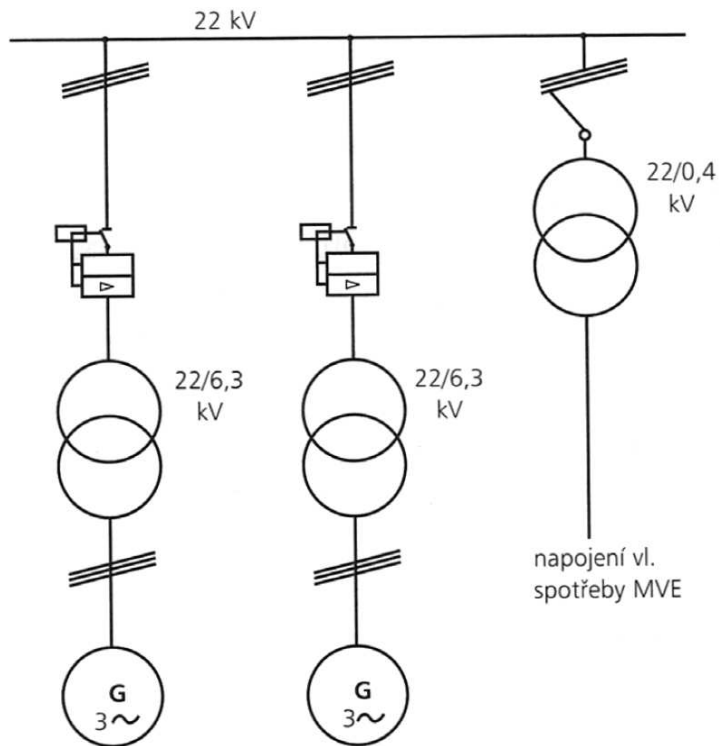
Fázování generátoru se provede jednoduchým připojením generátoru k síti při dosažení přibližně synchronních otáček. Použitím asynchronního generátoru se zjednoduší ostatní elektrická zařízení, zmenšuje se jejich hmotnost, a tím se snižuje i cena. Nevýhodou je odběr jalového výkonu, neschopnost samostatného chodu a nižší účinnost při částečném výkonovém zatížení.

Asynchronní stroje se zpravidla dimenzují výkonově co nejbližší k maximálnímu výkonu turbíny.

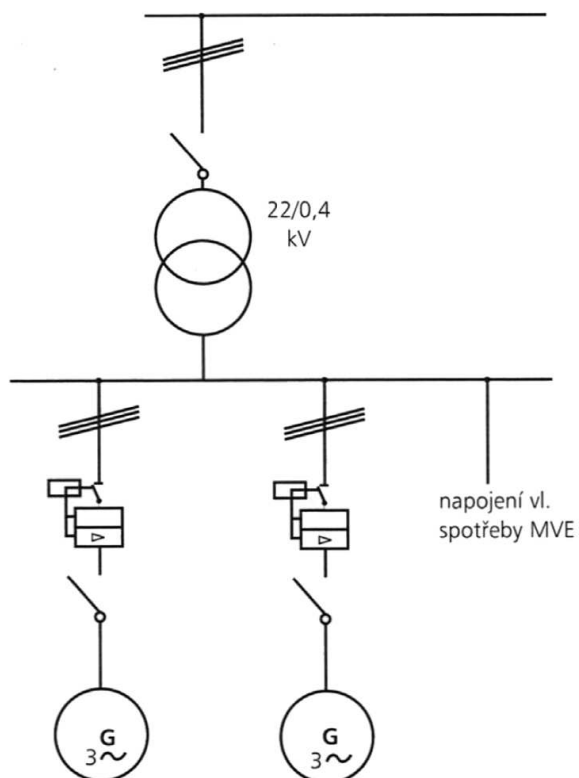
7.7.5 Silnoproudá zařízení MVE

Silnoproudá zařízení jsou určena k přenosu, transformaci, spínání a jištění vyrobené elektrické energie a také k zásobování pohonů a jiných elektrických spotřebičů zahrnutých do vlastní spotřeby MVE. K přenosu výkonu z objektu MVE je určena přípojka venkovním nebo kabelovým vedením, která je na úrovni nn (3 x 400 V) nebo při vyšších výkonech a větší vzdálenosti vn (22 a 35 kV).

Elektrická přípojka končí v hlavní skříní nebo v případě přípojky vn v rozvodně vysokého napětí. V případě, že se pro MVE použije více napěťových úrovní, musí se použít transformátor. Pro MVE se používají jednofázové nebo trojfázové transformátory. Generátory jsou k transformátoru připojeny blokově nebo je transformátor společný pro více generátorů. Uspořádání obou způsobů připojení je vidět na obrázku 7.31 a 7.32. Blokové zapojení se používá pro případ připojení vn generátorů 6,3 kV k síti 22 kV. Zapojení se společným transformátorem je vhodnější ke spolupráci generátorů nn s vn sítí.



Obr. 7.31: Příklad blokového zapojení



Obr. 7.32: Příklad zapojení se společným transformátorem

7.8 Vysvětlení dílčích pojmů [13]

Kavitace (z latinského *cavitas* – dutina) je vznik dutin v kapalině při lokálním poklesu tlaku, následovaný jejich implozí. Pokles tlaku může být důsledkem lokálního zvýšení rychlosti (hydrodynamická kavitace), případně průchodu intenzivní akustické vlny v periodách zředění (akustická kavitace). Kavitace je zpočátku vyplněna vakuem, později se vyplní párou okolní kapaliny nebo do ní mohou difundovat plyny z okolní kapaliny. Při vymizení podtlaku, který kavitaci vytvořil, její bublina kolabuje za vzniku rázové vlny s destruktivním účinkem na okolní materiál. Kavitace vzniká například na lopatkách lodních šroubů, turbín, na čerpadlech a dalších zařízeních, která se velkou rychlostí pohybují v kapalině.

Kavitace způsobuje hluk, snižuje účinnost strojů a může způsobit i jejich mechanické poškození.

Na vznik kavitace má vliv především velikost podtlaku, soudržnost (povrchové napětí) kapaliny a teplota: čím je nižší, tím menší je kavitace.



Kavitace na lopatkách lodního šroubu



Lodní šroub poškozený kavitací.

Viskozita (také **vazkost**) je fyzikální veličina, udávající poměr mezi tečným napětím a *změnou* rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při proudění skutečné kapaliny.

Viskozita je veličina charakterizující vnitřní tření a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Kapaliny s větší přitažlivou silou mají větší viskozitu, větší viskozita znamená větší *brzdění* pohybu kapaliny nebo těles v kapalině.

Pro ideální kapalinu má viskozita nulovou hodnotu. Kapaliny s nenulovou viskozitou se označují jako viskózní (vazké).

- Symbol dynamické viskozity: η

Jednotka SI: newton sekunda na metr čtvereční, značka jednotky: $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$, ekvivalentně též Pascal·sekunda, značka $\text{Pa}\cdot\text{s}$

- Symbol kinematické viskozity: ν

Jednotka SI: metr čtvereční za sekundu, značka jednotky: $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ (praktičtější je $\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$, příp. $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$).

Jinou jednotkou je stokes (zkratka St, podle fyzika George Gabriel Stokes).

$$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} = 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

7.9 Otázky a cvičení

1. Jak rozdělujeme vodní elektrárny
2. Co víte o průtočné vodní elektrárně?
3. Co víte o akumulární vodní elektrárně?
4. Co víte o přečerpávací vodní elektrárně?
5. Popište základní typy a rozdělení vodních turbín
6. Definujte pojem hydroenergetický potenciál
7. Popište funkci a oblast využití základních typů vodních turbín
8. Popište funkci alternátoru
9. Popište funkci a konstrukci synchronního generátoru
10. Popište funkci a konstrukci asynchronního generátoru

7.10. Literatura

- [1] Klaus Heuck Elektrische Energieversorgung © Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2010
- [2] Adolf J. Schwab Elektroenergiesysteme 2007
- [3] Victor L Streeter.: Fluid Mechanics.Mc-GrawHill 1971
- [4] Fabio Saccomano: Electric Power Systems.Wiley Interscience 2003
- [5] R.A.Zahoransky. Energietechnik. Wieweg+Teubner 2009
- [6] S. Kaplan. Power Plant Characteristics and Costs.Nova Science Publishers, Inc.2010
- [7] Juergen Schlabbach and Karl-Heinz Rofalski - Power System Engineering. 2008 John Wiley & Sons, Ltd.
- [8] P.Kundur. - Power System Analysis and Control.Mc.Graw Hill 1999.
- [9] Machowski.Power System Dynamics:Stability and Control. 2008 John Wiley & Sons, Ltd.
- [10] F. Saccomanno.Electric Power System: Analysis and Control.IEEE Press. 2003.
- [11] S.Bouček, A.Dočekal. Elektrárny II.Skripta ČVUT 1995
- [12] M.Cipra,J.Salaba,J. Šťastný .Energetická strojní zařízení. Skripta ČVUT 1981.
- [13] Wikipedia- vlastnosti kapalin