

# Obnovitelné zdroje elektrické energie

## Slapové elektrárny

kurz 4.



## Obsah

4.	Slapové elektrárny .....	3
4.1.	Úvod .....	3
4.1.1	Historie .....	3
4.2.	Princip slapového jevu.....	4
4.2.1	Fyzikální princip využití slapového efektu.....	7
4.2.2	Projevy na Zemi.....	8
4.3.	Slapové elektrárny – otázky a odpovědi.....	9
4.3.1	Současný stav, vývoj do budoucna.....	9
4.3.2	Dopad na životní prostředí.....	9
4.3.3	Ekonomická efektivita slapových elektráren.....	9
4.3.4	Technologie.....	10
4.3.5	Otázky a úkoly.....	10
4.4.	Literatura.....	11

## 4. Slapové elektrárny

### 4.1. Úvod

Slapová energie je energie, kterou lze získat díky měnící se hladině moří a oceánů. Jinými slovy, energie přílivu a odlivu je přímým důsledkem přesunu vyšší vodní hladiny k hladině nižší a vyrovnání těchto dvou rozdílných hladin.

Přílivová energie je považována za obnovitelný zdroj energie, protože využívá pouze energii z přílivu. Nedochází ke spalování ani jiným přeměnám na jiné formy energií. Slapová energie je také považována za nevyčerpatelnou, protože hladina moří a oceánů stále stoupá a klesá v důsledku působení gravitačních sil.

Slapová energie, tedy energie přílivu a odlivu, je považována za velmi spolehlivý zdroj energie, a to vzhledem k její předvídatelnosti. Ve srovnání s jinými zdroji energie, jako je větrná či solární energie, slapovou energii a její změny lze poměrně spolehlivě předvídat. Slapová energie se také vyskytuje pravidelně. Na rozdíl od sluneční a větrné energie, energie přílivu není závislá na ročním období nebo počasí. Přílivová energie závisí čistě na rotační kinetické energii, slunce působí na Zemi, která obíhá kolem něj. To stejné platí v rámci orbitálního systému Země – Měsíc. Jak Měsíc obíhá kolem Země, obě tělesa na sebe působí gravitačními silami. Všechny síly, které působí v rámci těchto orbitálních systémů, vytvářejí nerovnováhu zemské vodní hladiny. Tak některá místa mají vysokou hladinu vody, zatímco jiná hladinu vody nízkou [1].

#### 4.1.1 Historie

Lidé sledují příliv a odliv nepochybně již od dob, kdy začali osidlovat pobřežní oblasti kontinentu. Nejstarší písemné záznamy o tomto jevu pochází od Herodota, který svá pozorování konal ve Středomoří v roce 450 před naším letopočtem. I dávní mořeplavci věděli o existenci nějakého vztahu mezi přílivem a odlivem a cyklem Měsíce, neboť oba jevy se opakují podobným cyklickým způsobem. Správné vysvětlení těchto jevů však podal až Isaac Newton (1642-1727), když formuloval obecný gravitační zákon [3].

Přílivová energie je jednou z nejstarších forem člověkem využívané energie. Používání přílivových mlýnů na španělském, francouzském a britském pobřeží, se datuje do roku 787 n.l. Přílivové mlýny se sestávaly ze záchytného rybníka nebo menší nádrže, stavidla a přepadu přes splav. Vyrovnávání hladin probíhalo přes vodní kolo. Příliv a odliv točil vodním kolem, vyráběl mechanickou energii a mlýn mlel obilí. Jeden takový funkční mlýn byl také v New Yorku, kde pracoval až do 20. století.

### 4.2. Princip slapového jevu

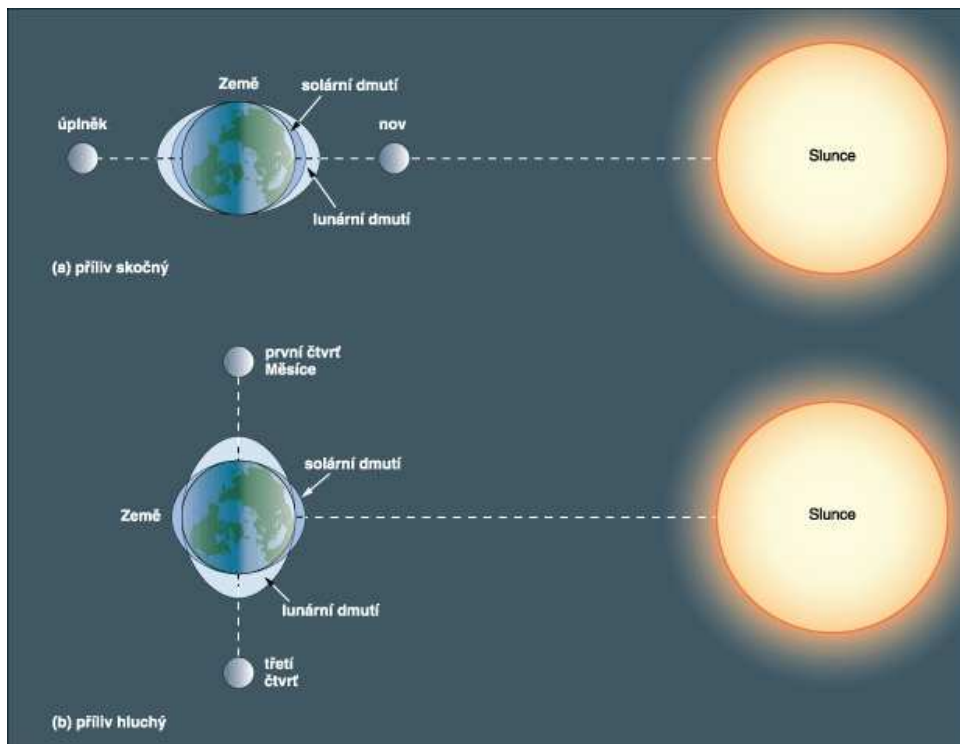
Gravitační síla, kterou Měsíc působí na Zemi, vytváří slapové změny hladiny oceánů, která stoupá a klesá podle pohybu Měsíce kolem Země. Bez Měsíce by se určitě jejich rozsah velmi snížil, ale nezmezil by úplně. Měsíc totiž tvoří pouze dvě třetiny slapového působení na naši planetu. Zbytek způsobuje Slunce a méně i planety, zvláště Jupiter.

Země spolu s Měsícem obíhají okolo společného těžiště. Protože hmotnost Měsíce dosahuje jen 1/81 hmotnosti Země, leží těžiště soustavy Země-Měsíc 4 800 km od středu Země, tedy ještě uvnitř zemského tělesa. Při oběhu Země kolem tohoto těžiště vzniká odstředivá síla. Jen ve středu Země je přitažlivá síla Měsíce stejně velká jako odstředivá síla, a každá působí opačným směrem – obě síly jsou tam tedy vyrovnány. Na straně Země obrácené k Měsíci je ale přitažlivá síla Měsíce o něco větší než odstředivá. Tam vzniká výdut' - příliv.

Stejně je to však i na straně Země odvrácené od Měsíce – tam je větší odstředivá síla, než přitažlivá síla od Měsíce. Proto i tam nastává příliv. Existují tedy dvě přílivové výdutě na protilehlých stranách Země. Mezi nimi je oblast odlivu. Můžeme tedy říci, že v každém přístavu nastává dvakrát denně příliv a odliv. Rozsah slapových vzdutí závisí na poloze Měsíce a Slunce vůči Zemi (viz obrázek 4.1).

Rozlišujeme dva extrémy:

- příliv skokový - největší příliv. Nastává pokud se Země, Slunce a Měsíc (v úplňku nebo novu) nacházejí na jedné přímce, zajištění dostatečného množství elektřiny v požadovaném čase
- příliv hluchý - nejmenší příliv. Nastává jestliže se zmíněná tělesa nacházejí v pravém úhlu (první a poslední čtvrt)



**Obr. 4.1: Souvislost uspořádání těles v soustavě Země – Slunce – Měsíc a slapových jevů [3]**

Slapové deformace jsou doprovázeny ztrátou energie systému Země – Měsíc vlivem vnitřního tření (slapového tření) a proto vzrůstá délka dne (asi o 1,5 milisekundy za století) a nepatrně se zvyšuje vzdálenost Země - Měsíc (Měsíc se dostává na vyšší oběžnou dráhu, o 3,8 cm za rok). Výrazněji působí slapové síly na hladiny světových moří a oceánů (příliv a odliv) a na zemskou atmosféru, kde je pozorováno periodické kolísání tlaku vzduchu [5].

#### 4.2.1 Fyzikální princip využití slapového efektu

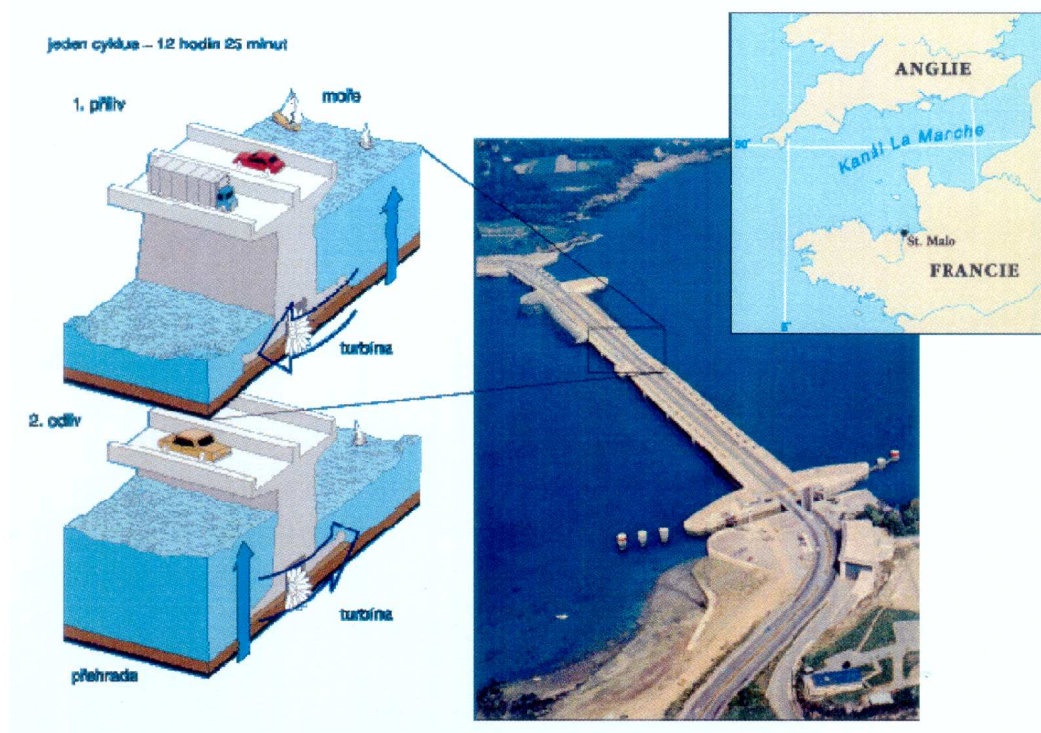
Energie přílivu může být využívána dvěma způsoby:

- ve speciálních vodních nádržích v mořských zátokách nebo v ústí řek s vysokým přílivovým rozsahem,

- při využití přílivových proudů na otevřeném moři (offshore tidal turbines) , *offshore znamená příbřežní, poblíž pobřeží*

## Přehradní elektrárny

Voda může být při přílivu zachycena v tzv. přílivové laguně, která je za tímto účelem obestavěna hrází s vpusťmi, ve kterých jsou umístěny turbíny s generátory. Laguna se naplní vodou, zatímco příliv stoupá. Rozdíl hladin mezi lagunou a volným mořem bude mít za následek vznik potenciální energie, která může být využita při vyrovnávání hladin, při kterém bude hydrostatický tlak působit na lopatky turbíny a bude konána práce.

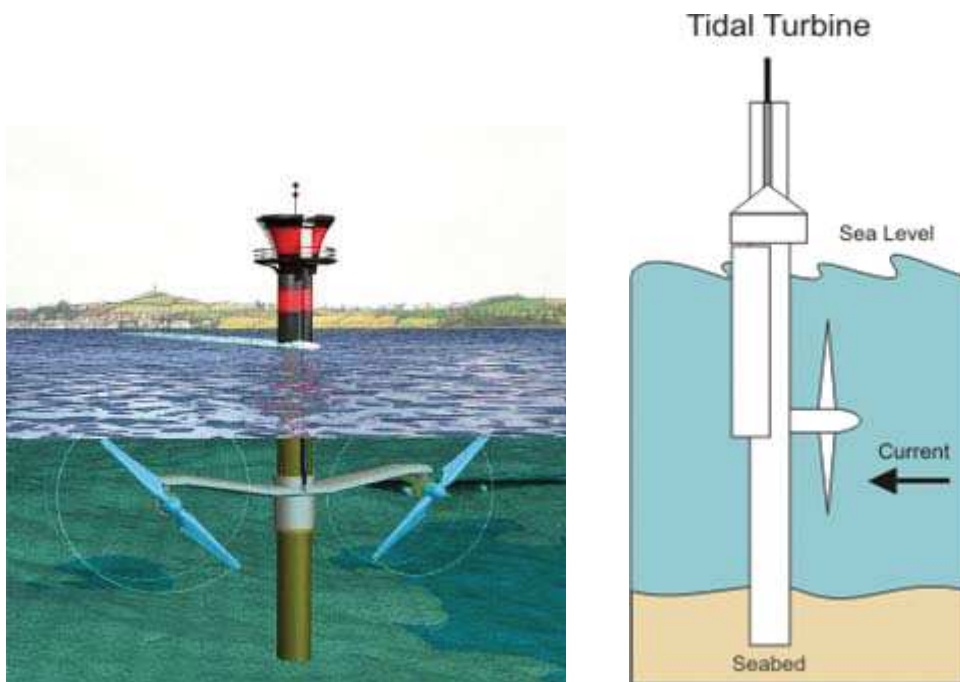


**Obr. 4.2 Přílivová elektrárna [3]**

Při odlivu naopak dojde k poklesu hladiny na volném moři, tzn., že síly a energie budou působit opačným směrem. Je zřejmé, že potenciální energie roste s rostoucím rozdílem hladin mezi nádrží a mořem, řekou či oceánem, a že nejvíce efektivní budou taková zařízení, kde dochází k významným projevům přílivů a odlivů.

## Elektrárny pracující s přílivovými proudy

Pracují podobně jako větrné elektrárny. Využívají podmořských proudů, které lze snadno vyhledat, předpovídat atd.



Obr. 4.3: Příklad přílivové elektrárny na volném moři tzv. příbřežní-offshore tidal turbines [2]

### *Výhody*

Hlavní výhodou je, že energie přílivu u jednou postavené elektrárny, je zdarma. Nevytváří žádné nebezpečné skleníkové plyny a jiné nebezpečné škodliviny a odpady. Funguje bez jakýchkoliv požadavků na palivo, pouze s přírodními energiemi. Je to konzistentní zdroj elektrické energie s velmi malými náklady na údržbu. Turbíny na volném moři a turbíny s vertikální osou jsou ekonomicky výhodné a nemají velký ekologický efekt.

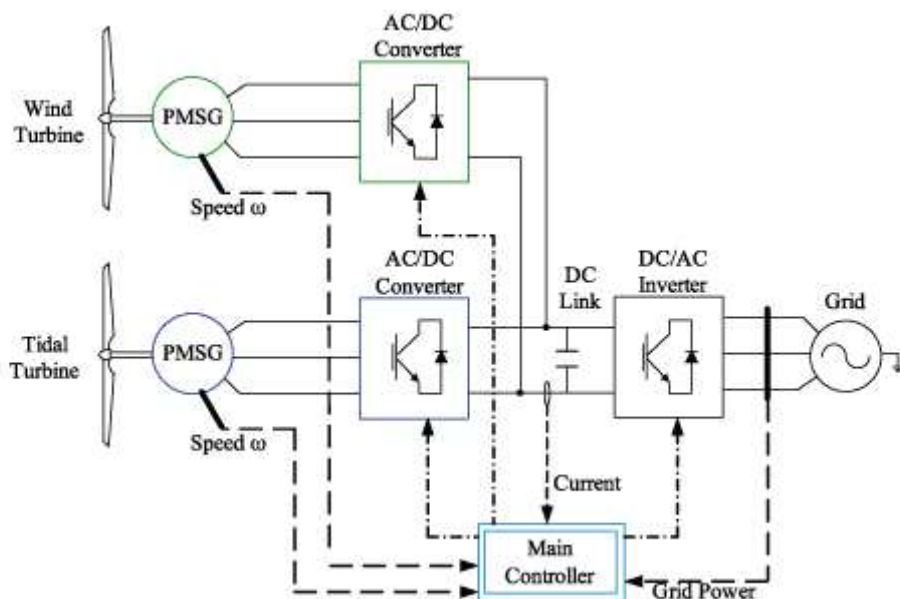
### *Omezení*

Slapová – přílivová energie může být využita pouze v místech s výraznými změnami hladiny vody. Přeměna potenciální energie přílivu a odlivu, který budeme zadržovat v přílivové nádrži je využita přibližně na 80%. To znamená, že 20% z celkové potenciální energie je obvykle ztraceno a pouze 80% se využívá pro výrobu elektřiny.

Většina moderních konceptů přílivových elektráren pracuje na principu vodních „přehradových“ turbín. Nevýhodou energie přílivu je její nízký kapacitní faktor, tudíž není pokryta špičková poptávka. Důvodem je 12,5 hodinový cyklus přílivu a odlivu. Celkový potenciál slapové energie pro světové oceány byl odhadnut na 64.000 MWe. Slapové přehrady Passamaquoddy Bay (zátoka Fundy na hranici USA a Kanady) mají potenciál mezi 800 až 14.000 MWe.

Příklad přílivové elektrárny pracující v součinnosti elektrárny větrné lze vidět na následující obrázku (4.4).





Obr. 4.4: Hybridní systém pobřežní větrné a přílivové elektrárny [6]

### Srovnání přehradové a offshore turbíny

Dle následujícího vztahu (4.1) je teoretická využitelná kinetická energie u offshore turbín úměrná třetí mocnině rychlosti  $V$  a ploše rotoru podvodní turbíny  $A$ , která je kolmá na směr proudění.

$$P_{KE} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Q \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (4.1)$$

Totožný vztah prakticky platí pro větrné elektrárny. Podobně jako větrné elektrárny, přílivové turbíny mohou být použity pro získávání energie přílivu. Přílivové elektrárny a větrné turbíny jsou si do jisté míry podobné jak vzhledem, tak i strukturou. Přílivové turbíny mohou být umístěny v ústích řek a všude tam, kde je silný příliv. Protože voda má asi 800x vyšší hustotu než vzduch, musí být přílivové turbíny mnohem silnější a robustnější, než u větrných elektráren. Budou tak těžší a dražší, ale budou moci zachytit více energie při mnohem vyšších objemových tocích.

To znamená, že budeme-li pro zjednodušení uvažovat, že voda o hustotě  $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  proudí rychlostí  $V = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  určitou plochou  $A$ . Pak použitelný výkon je  $P/A = 500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

U přehradové slapové elektrárny je využíván stejný princip jako u vodních elektráren s malými spády, kde platí následující vztah (4.2) pro potenciální energii, kde energie je přímo úměrná rychlosti  $V$ , ploše  $A$ , gravitačnímu zrychlení  $g$  a velikosti spádu  $h$ .

$$P_{PE} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h = \rho \cdot g \cdot A \cdot V \cdot h \quad (4.2)$$

Provedeme podobnou úvahu jako v předešlém případě. Rychlost proudění je rovna  $1 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$ ,  $h = 5 \text{ m}$ . Pak energie na jednotku spádu a plochy je rovna  $P/A = 5 \times 10^4 \text{ W.m}^{-2}$ , což je o dva řády více než u offshore systémů a vysvětluje to, proč jsou slapové přehradové elektrárny používanější než elektrárny „offshorové“.

V oblastech kde rozdíl mezi přílivem a odlivem je okolo 8 metrů, jsou pak přehradové systémy jasně efektivním řešením. Nicméně v určitých oblastech, kde jsou mořské proudy profilem dna sevřeny do úzkých profilů, může rychlost proudění výrazně překročit  $1 \text{ m.s}^{-1}$  a pak je výhodnější použít turbíny typu offshore, protože kinetická energie roste s třetí mocninou rychlosti [4].

#### 4.2.2 Projevy na Zemi

Souhrn charakteristik slapových jevů na idealizované Zemi:

- Všude na Zemi (s výjimkou pólů) nastává příliv a odliv dvakrát za den.
- Přílivy ani odlivy nemají stejné výšky kvůli deklinaci Měsíce a Slunce (s výjimkou vzácných případů, kdy je Měsíc i Slunce přímo nad rovníkem).
- Roční a měsíční periody přílivového cyklu jsou spojeny se změnami vzdáleností Slunce a Měsíce od Země.
- Každý (lunární) týden nastává buď skočný nebo hluchý příliv. Za jeden lunární měsíc tedy dojde ke dvěma skočným a dvěma hluchým přílivům.
- Oblast, která je na pobřeží při odlivu odhalena, poskytuje velmi bohatou zónu obživy pro migrující ptactvo. Kdyby byl odliv o 70% menší, což by nastalo v nepřítomnosti Měsíce, přílivová oblast by byla mnohem menší a mnoho ptačích druhů by se muselo dělit o potravu v jiných oblastech.

Místa na Zemi s největšími přílivy:

- záliv Fundy (Kanada) 19,6 metrů,
- ústí řeky Gallegos (Argentína) 18 metrů,
- Frobisher Bay (Baffinův ostrov) 17,4 metrů,
- ústí řeky Severn (Anglie) 16,3 metrů,
- Granville (Francie) 14,7 metrů.



## 4.3. Slapové elektrárny – otázky a odpovědi

### 4.3.1 Současný stav, vývoj do budoucna

Vody v Pacific Northwest na západním pobřeží USA a Kanady jsou ideální pro využití slapové energie za použití nově vyvinutých podmořských turbín. Hladina oceánu při přílivu a odlivu výrazně kolísá, až 12 metrů za den. Dále mají výjimečný energetický potenciál některé oblasti pobřeží Aljašky, Britské Kolumbie a Washingtonu. Na pobřeží Atlantiku v Maine je také vynikající oblast vhodná pro slapové elektrárny.

V současné době, i když je technologie potřebná k využití energie přílivu na dobré technické úrovni, tak je drahá, a ve vyjmenovaných vhodných oblastech, je v provozu jen jedna přílivová elektrárna. Je to 240 MW velká elektrárna při ústí řeky Rance La na severním pobřeží Francie (velké uhelné či jaderné elektrárny vyrábí asi 1000 MW elektrické energie). Elektrárna La Rance je v provozu od roku 1966 a je velmi spolehlivým zdrojem elektrické energie pro Francii. La Rance měla být jedena z mnoha přílivových elektráren ve Francii, pak však začal být realizován francouzský jaderný program.

Dále je realizováno experimentální zařízení v Annapolis Royal v Nova Scotia o výkonu 20 MW, a 0,4 MW přílivové elektrárny v blízkosti Murmansk v Rusku. Velká Británie má několik návrhů na projekty atp.

Existují studie, které zkoumají potenciál přílivových lokalit po celém světě. Bylo odhadnuto, že přílivová hráz s turbínou přes řeku Severn v západní Anglii by mohla pokrýt až 10% spotřeby elektřiny v zemi (ze spotřeby 12 GW). Podobně, několik míst v zátocě Fundy, Cook Inlet na Aljašce, a Bílém moři v Rusku má potenciál generovat velké množství „slapové“ elektřiny.

### 4.3.2 Dopad na životní prostředí

Přílivová energie je obnovitelný zdroj elektrické energie, která nemá za následek emise plynů, které se podílejí na globálním oteplování, nebo způsobují kyselé deště spojené se spalováním fosilních paliv při výrobě elektřiny. Využití přílivové energie by také mohlo snížit potřebu jiných konvenčních elektráren a rizik plynoucích z jejich provozování. Změna přílivu přehrazením zálivu nebo ústí řeky, by však mohla mít za následek negativní dopady na vodní a pobřežní ekosystémy, včetně dopady na obyvatelstvo dané lokality.

Provedené studie dokazují, že dopady na životní prostředí u slapových elektráren závisí na každém konkrétním místě a realizaci dalších geografických a demografických podmínek.

### 4.3.3 Ekonomická efektivita slapových elektráren

Technologie pro využití energie přílivu a odlivu je poměrně levná, protože je to technologie, která je známá a využívána stovky let. Zařízení z oblasti vodních elektráren jsou dobře vyvinuté a technické poznání v této oblasti je daleko. Hlavní překážkou pro využití slapového jevu jsou stavební náklady na stavbu hrází a záchytných nádrží, lagun a přehrad. Zde jsou vysoké investiční náklady, u kterých se musí počítat s dlouholetým plánem výstavby. Potom je celý projekt a cena elektřiny citlivá na velikost diskontní sazby.

Hlavními faktory při určování efektivnosti nákladů při využití energie přílivu jsou rozměry (délka a výška) požadované hráze, a výškový rozdíl mezi přílivem a odlivem. Tyto faktory mohou být vyjádřeny v tzv. "Gibrat" poměru místa realizace. Poměr *Gibrat* je poměr délky přehrady v metrech na roční produkci energie v kWh. Čím menší je poměr *Gibrat*, tím více je to žádoucí místo. Příklady *Gibrat* poměrů La Rance má 0,36; 0,87 a Severn na Passamaquoddy v zátocce Fundy má 0,92.

Tři projekty (Swansea Bay 30 MW, Fifoots Point 30 MW a 432 MW North Wales) jsou ve vývoji ve Walesu, kde jsou vysoké přílivové rozsahy. Obnovitelný zdroj energie je silnou veřejnou a politickou prioritou a tudíž tato elektřina na trhu má konkurenční výhodu.

#### 4.3.4 Technologie

Technologie potřebná pro konverzi přílivové energie na elektrickou energii, je velmi podobná technologii používané v tradičních vodních elektrárnách. Prvním požadavkem je přehrada, nebo jez přes zátoku nebo přílivové ústí. Budování hrází je nákladný proces, proto je nejlepší využívání přílivových zátok a lagun, kde vtokovou část zátoky tvoří jen malý otvor, což snižuje délku přehrad, která je vyžadována. V určitých místech podél přehrad, jsou instalovány turbíny. Když je adekvátní rozdíl v nadmořské výšce vody na různých stranách hráze, otevřou se výpustě. Voda pak teče přes turbíny, které otáčejí elektrický generátor a ten vyrábí elektrickou energii.

Elektřinu lze vyrábět jak ve fázi když voda do hráze natéká (příliv), tak i když z hráze vytéká (odliv). Elektrárna pracuje tedy v režimu dva přílivy a dva odlivy za den a je potřeba s takovým chodem elektrárny počítat v odběrném diagramu zatížení. V určitých případech a při použití dalších technologií jako jsou čerpadla, by mohla slapová elektrárna pracovat i jako klasická přečerpávací vodní elektrárna.

#### 4.3.5 Otázky a úkoly

- 1). Co je to slapová energie, definujte její vlastnosti a výhody
- 2). Na čem závisí slapová energie
- 3). Vysvětlete princip slapového jevu
- 4). Vysvětlete princip přehradní přílivové elektrárny
- 5). Vysvětlete princip elektrárny s přílivovými proudy

#### 4.4. Literatura

- [1] Tidal Energy. [online] Tech-FAQ [cit. 2011-12-13] <<http://www.tech-faq.com/tidalenergy.html>>
- [2] Tidal Power. [online] Renewable Energy Office for Cornwall [cit. 2011-12-13] <<http://www.reoc.info/tidal-power>>
- [3] THURMAN, H.V., TRUJILLO A.P. Oceánografie - Tajemný svět moří a oceánů. Computer Press, Brno: 2005, 479 s. ISBN: 80-2510-353-6
- [4] BROOKS, D.A. The Tidal-stream energy resource in Passamaquoddy-Cobscook bays: A fresh look at an old story. [online] Department of Oceanography Texas A&M University, Texas: 2005, 22 s. [2005-01-24] [cit. 2011-12-14] <[http://cobscook.tamu.edu/review/TidalStream\\_RenEnergy.pdf](http://cobscook.tamu.edu/review/TidalStream_RenEnergy.pdf)>
- [5] VLACHOVÁ, M. Slapové jevy. [online] Matematicko-fyzikální web [cit. 2011-12-15] <<http://mfweb.wz.cz/astro/94.htm>>
- [6] KHALIGH, A. Ocean Tidal Energy Harvesting. [online] Energy Harvesting and Renewable Energies Laboratory, Maryland. [cit. 2011-12-15] <[http://www.ece.umd.edu/~akhaligh/researchprojects.php?project=ocean\\_tidal](http://www.ece.umd.edu/~akhaligh/researchprojects.php?project=ocean_tidal)>
- [7] Tidal Energy. [online] Ocean Energy Council, Inc., West Palm Beach [cit. 2011-12-16] <[http://www.oceanenergycouncil.com/index.php/Tidal-Energy/Tidal\\_Energy.html](http://www.oceanenergycouncil.com/index.php/Tidal-Energy/Tidal_Energy.html)>