

Hustota energetického toku

23. březen 2018, 19:16

[Petr Vytlačil](#)

Moderní společnost vyžaduje od energetického sektoru nejenom spolehlivost, dostupnost a přívětivost pro konečné uživatele, ale ke konci 20. století se objevil další nárok ve spojitosti s globálním oteplováním. Zdroje energie mají v současné době za úkol splnit nejenom výše uvedené nároky, které jsou podstatné pro ekonomický růst a růst kvality života, ale také musí být environmentálně příznivé, nejlépe obnovitelné. Existují rozsáhlé diskuze o cenách, kvantitách, účinnostech, ropných zlomech a souvislostech mezi spotřebou energie a ekonomickým růstem. Je zde však jeden fakt, který se často přehlíží, a tím je hustota energetického toku.

Hustota energetického toku a energetická hustota

Energetická hustota je jednoduše množství energie uvolněné na jednotku hmotnosti anebo na jednotku objemu s energií vyjádřenou v Joulech, hmotností ve gramech a jejích násobcích a objem vyjádřený v litrech (dm^3) nebo kubických metrech. Energetická hustota jsou tedy J/g (J/cm^3), MJ/kg (MJ/dm^3) anebo GJ/t . Historicky jsme se ubírali od zdrojů s menší energetickou hustotou, ke zdrojům s hodnotou vyšší. Dřevo má energetickou hustotu za nejlepších podmínek [18-21 MJ/kg](#), uhlí mezi [20-30 MJ/kg](#) a ropné produkty okolo [42 MJ/kg](#).

Hustota energetického toku udává tok energie na jednotku horizontální plochy země nebo vody. Její jednotkou jsou v tomto případě watty na metr čtvereční (W/m^2) a její násobky. Jedna z obrovských výhod hustoty energetického toku je, že nám dovolí vyhodnotit a porovnat množství energetických toků z různých zdrojů. V současné době, za rozmachu obnovitelných zdrojů, je to jeden z hlavních faktorů, který dokáže přiblížit potenciální podíl těchto zdrojů v globální energetice. Historický vývoj hustoty energetického toku není tak přímočarý jako v případě energetické hustoty, a nepohybujeme se tedy bezpodmínečně k vyšším hodnotám.

V následujících řádcích jsou uvedeny různé technologie k výrobě elektrické energie a jejich hustota energetického toku. Nejprve je však třeba uvést dva údaje, které se objeví v průběhu článku.

Prvním je koeficient využití. Je to podíl skutečně vyrobené elektrické energie a maximální možné výroby elektrické energie. Vzorec pro výpočet koeficientu využití je:

$$\frac{\text{vyrobená elektrická energie}}{365 \text{ dní} \times 24 \text{ hodin} \times \text{instalovaný výkon}}$$

Pokud vezmeme v úvahu vodní elektrárnu s instalovaným výkonem 2069 MW, s roční výrobou 2 TWh elektrické energie, potom:

$$\frac{2\,000\,000\text{ MWh}}{365 \times 24 \times 2069\text{ MW}} = 11\%$$

V tomto případě je koeficient využití 11 %. Z hlediska hustoty energetického toku je to důležitý údaj, jelikož slunce a vítr nejsou stále k dispozici tak ani elektrárny nevyrábí elektrický proud bez přestání.

A druhým je jednotka watt. Jeden watt je výkon, při němž se vykoná práce 1 joule za 1 sekundu. Toto je potřeba vědět při zjišťování hustoty energetického toku tepelných elektráren, kde je závislost na energetické hustotě určitých látek.

Hustota energetického toku (dále HET)

Elektrárny jaderné, uhelné, vodní a geotermální

V současné době globálně vyrábí uhelné elektrárny [39,3 %](#) elektrické energie a jaderné přispívají [10,6 %](#). Vodní elektrárny v roce 2015 vyráběli globálně [16,0 %](#) elektrické energie a geotermální přispívaly méně než [1 %](#).

Uhelné elektrárny

Pokud bychom měli uhelnou elektrárnu o výkonu 1 GW s koeficientem využití 55 %, tak by elektrárna vyrobila 4,9 TWh elektrické energie. S účinností 42 % bude elektrárna vyžadovat 42 PJ energie v uhlí. Celková infrastruktura takové elektrárny by zabírala zhruba 600 000 m².

Při předpokladu, že elektrárna spotřebovává uhlí o energetické hustotě (výhřevnosti) 20 GJ/t (při objemové hustotě 1,4 t/m³), které je těženo z povrchového dolu o průměrné tloušťce uhelného švu 15 m a s účinností těžby 95 %, potom pod každým čtverečním metrem tohoto dolu se skrývá 20 t uhlí obsahující 400 GJ energie. K pokrytí roční spotřeby 42 PJ uhelné elektrárny je potřeba extrahovat uhlí z plochy o velikosti 105 000 m². Po sečtení obou ploch dostaneme HET 780 W/m².

V případě uhelných elektráren je HET závislá na několika proměnných. Na vzdálenosti elektrárny od uhelného dolu, kvalitě uhlí, typu a způsobu těžení uhlí (hlubinné, povrchové), koeficientu využití, skladování uhlí, atd. HET se v tomto případě může lišit od 100 W/m² až po 1000 W/m².

Jaderné elektrárny

Hustota energetického toku jaderných elektráren (JE) se může lišit tak jako v případě uhelných elektráren. Je v tomto případě závislá na celkové ploše, která je zabírána jak JE, tak i způsobem obohacování paliva a těžbou paliva pro JE. Pokud bychom počítali pouze zastavěnou plochu JE hustota energetického toku může dosahovat hodnot přes 1000 W/m².

V případě [jaderných elektráren v USA bylo spočítáno](#) při koeficientu využití 90%, že k roční výrobě 1 TWh je potřeba plocha o rozměru 1 km². To by v průměru odpovídalo hodnotě 7,8 km² plochy pro jadernou elektrárnu s celkovým výkonem 1 GW a průměrnou hustotou energetického toku 128 W/m². V tomto případě byla započítána pouze celková plocha elektrárny bez těžby jaderného paliva, obohacovacího procesu a skladování již použitého jaderného paliva.

Václav Smil (Power density, 2016) uvádí dva příklady. Prvním je JE o výkonu 1 GW, koeficient využití 90 %, která se rozléhá na ploše 0,5 km². Jaderné palivo pochází z dolu Saskatchewan, kde je potřeba pouze 40 m² k vytěžení tuny uranu. Ročně je vyžadováno 217 t uranu. Obohacovací proces a skladování již použitého paliva zabírají přibližně 0,1 km². Výsledná HET je v tomto případě více než 1600 W/m² (1 GW/0,6 km²).

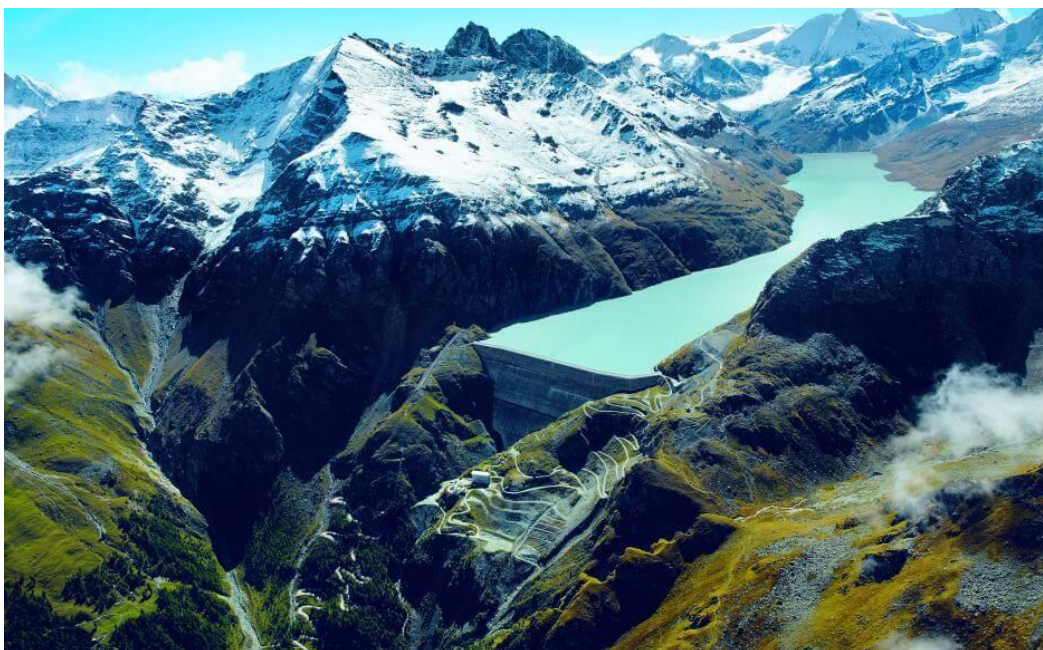
V případě druhé JE je rozloha 10 km² a její jaderné palivo je těženo ISL metodou (je potřeba 2000 m² k vytěžení 1 tuny Urania). Opět je vyžadováno 217 t uranu ročně. K obohacování je použita difuze a centrifugální separace, což vyžaduje plochu přibližně o rozloze 3,2 km² (skladování již použitého paliva je zde zohledněno). Výsledná HET je v tomto případě přibližně 70 W/m². Jak můžeme tedy vidět, hustota energetického toku JE se může lišit o několik řádů.

Vodní elektrárny

Vodní elektrárny se řadí mezi obnovitelné zdroje a jejich historie sahá až do 19. století. Rekordní vodní elektrárnou, co se rozlohy týče, je [přehradní nádrž Akosombo](#), která má rozlohu 8,502 km² což odpovídá více než 10 % rozlohy České republiky. Instalovaný výkon této elektrárny je 1020 MW a i bez znalosti koeficientu využití je HET pouze 0,12 W/m². Hooverova přehrada na řece Colorado má instalovaný výkon 2080 MW a vodní plocha je 640 km². Koeficientu využití 23 % odpovídá HET 0,75 W/m².

Vodní elektrárny vybudované na horní či střední části toku mají HET o řád vyšší. Čínská vodní elektrárna [Tři soutěsky](#) má v současnosti největší instalovaný výkon – 22,5 GW. Vodní plocha elektrárny je 1084 km² a s koeficientem využití 45 % odpovídá HET hodnotě 9,3 W/m². Itaipú se nachází na hranici mezi Brazílií a Paraguayí a se 14 GW má druhý největší instalovaný výkon. Má vodní plochu o rozloze 1350 km² a její koeficient využití v roce 2017 byl 78 % a tedy HET odpovídá hodnotě 8 W/m². Přehrada Grand Coulee na řece Columbia má hustotu energetického toku 7,5 W/m².

Pochopitelně vyšších hodnot dosahují vysokotlaké vodní elektrárny (spád nad 100 m). Ve Švýcarsku poblíž města Sion je přehrada Grande Dixence s instalovaným výkonem 2069 MW a rozlohou pouze 4 km², která má HET 517 W/m². Vyrábí však pouze 2 TWh ročně, což odpovídá koeficientu využití 11 %, ale stále vysoké hodnotě HET 56,9 W/m². Čínská Jinping-I s instalovaným výkonem 3600 MW, rozlohou 82,55 km² a koeficientem zatížení 57 % má HET 25 W/m².



Vodní elektrárna Grand Dixence

Geotermální elektrárny

Za zmínku stojí i geotermální elektrárny, kterými Island pokrývá 25 % své spotřeby elektrické energie. V roce 2015 byl instalovaný výkon geotermálních elektráren 12,8 GW. [Na základě hodnot z roku 2010](#) – instalovaný výkon 10 715 MW, výroby elektrické energie 67,246 GWh, byl koeficient využití 71 %.

Podle americké agentury Energy Efficiency & Renewable Energy je u [geotermální energie na 1 MW potřeba plocha](#) o rozměru 0,004-0,032 km². To by odpovídalo hodnotě HET, s koeficientem využití 71 %, mezi 22,2 – 177,5 W/m². Dle GEA vyžaduje 30letý provoz geotermální [elektrárny 404m²/1GWh](#), což odpovídá hustotě energetického toku 287 W/m².

Solární parky

Solární energie je jednou z velkých nadějí na environmentálně příznivou výrobu elektrické energie. [V roce 2016 bylo nainstalováno](#) více než 75 GWp s největším přírůstkem v Číně (34,5 GWp) a USA (14,7 GWp). Celkový instalovaný výkon [vzrostl na 303 GWp](#), s meziročním nárůstem 29,6 %, a globálně dodává 1,3 % elektrické energie.

V pravé poledne s oblohou bez mraku dosahuje sluneční energie intenzitu ozáření 1000 W/m². Těchto 1000 W/m² je ale pouze za podmínky, že tato plocha je orientovaná kolmo ke slunci. Abychom zjistili, kolik skutečně máme k dispozici ze slunečního záření v průměru na m², [musíme udělat nejprve několik úprav](#). Nejdříve musíme vykompenzovat náklon mezi sluncem a zemí, což snižuje intenzitu slunečního záření značně od hodnoty, která je k dispozici na kolmé ploše. Další snížení hodnoty vznikne, protože poledne není pořád. Za další ztrátu může atmosféra a fakt, že část slunečního záření je odražena od mraků a povrchu. Výsledkem tedy je, že v průměru dopadá na zemský povrch okolo 170 W/m². Tato hodnota se liší od méně než 100 W/m² v severních končinách po více než 230 W/m² ve slunečných pouštích.

Účinnost fotovoltaik se pohybuje okolo 10 % až 20 %. HET je u fotovoltaických zařízení nízká, a to zejména pokud bereme celou zastavěnou plochu solární elektrárny.

Například Tengger Desert solární park má instalovaný výkon 1547 MWp na rozloze 43 km² s koeficientem využití 18 %. HET je tedy 6,5 W/m². Americký Topaz solární park má HET 5,6 W/m² a Německý Waldpolenz solární park má okolo 4 W/m². Jako další příklad lze uvést Lauingen Energy Park, který se nachází v Bavorsku. Ten má instalovaný výkon 25,7 MWp a zabírá plochu o velikosti 0,63 km². Koeficient využití je zde pouze 12 % a výsledná HET je 4,5 W/m².

Koncentrované solární elektrárny

Mezi koncentrované solární elektrárny se řadí například elektrárna Ivanpah, která má instalovaný výkon 392 MW na rozloze 14,2 km² a v roce 2016 měla koeficient využití 20,5 %. Hustota energetického toku je v tomto případě 5,5 W/m². Pokud bychom vzali v potaz pouze plochu zabranou heliostaty (173 500 x 15 m² = 2,6 km²) výsledná HET by byla 150 W/m². Pokud vezmeme evropskou první solární věž, Planta Solar 10 s instalovaným výkonem 11 MW a zahrneme pouze plochu zabranou heliostaty, HET vychází na 37 W/m² a 4 W/m² při započtení celé plochy objektu.

Větrné parky

Větrná energie je v současné době druhým nejvíce rostoucím zdrojem pro výrobu elektrické energie. Na konci roku 2017 byl globální [instalovaný výkon skoro 540 GW](#), a instalovaný výkon v EU byl 154 GW. Tak jako u sluneční energie [je zde omezení](#), že vítr musí mít určitou rychlost, aby větrná turbína mohla vyrábět elektrickou energii. Rychlost větru, za které větrná turbína začíná vyrábět elektrinu, je typicky 3-4 m/s. Při zvyšování rychlosti větru roste výkon. Při rychlostech větru mezi 12-17 m/s je dosažen limit na výrobu elektrické energie a při rychlostech nad 25 m/s je turbína za pomoci brzděného systému zastavena, aby nedošlo k poškození rotoru.

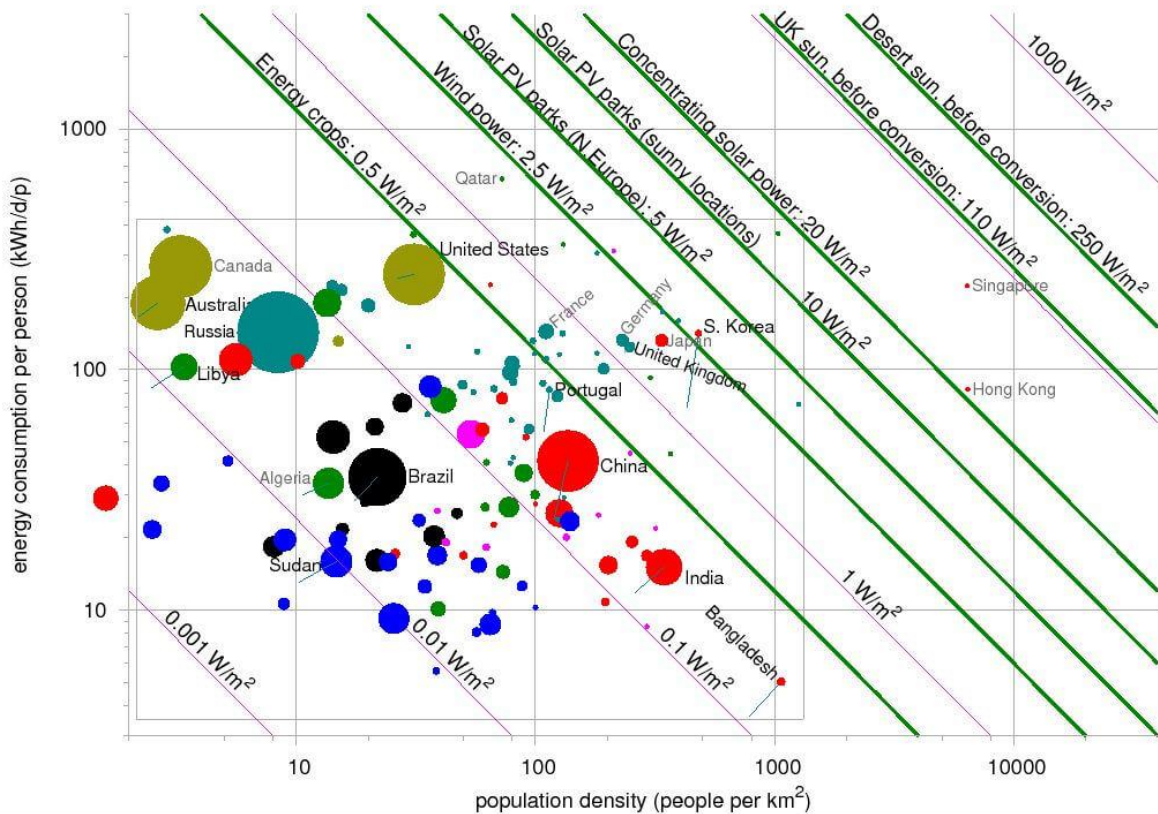
Pokud jde o vertikální plochu (oblast pokrytá lopatkami) hustota energetického toku běžně dosahuje hodnot i přes 400 W/m². Značně menší hodnoty dostaneme, pokud se bude jednat o horizontální plochu pokrytou větrnými turbínami. Dánské offshore větrné farmy Anholt 1, Horns Rev I a Horns Rev II HET mají HET 2,2 W/m², 3,4 W/m² a 3 W/m².

Podle EIA byl v roce 2017 průměrný koeficient využití větrných parků 36,7 %. Americká Shepherds Flat větrná farma, která má instalovaný výkon 845 MW a rozkládá se na rozloze 78 km², by při již výše uvedeném koeficientu využití měla HET 4 W/m². Německá DanTysk offshore farma má hustotu energetického toku 2,2 W/m² při odhadovaném koeficientu využití 51 %. Rumunská Fântânele-Cogealac větrná farma má HET 1,6 W/m² (600 MW/110 km² a koeficient využití je v tomto případě odhadován na 30 %).

Spotřeba energie společnosti

Jakou hustotu energetického toku má moderní společnost? Odhad TPES (total primary energy supply) podle IEA byl v roce 2013 okolo 156 214 TWh, což po vydělení 8760 hodin za rok představuje průměrný příkon zhruba 18 TW. Plocha povrchu země je 510 Tm², potom tedy HET naší civilizace byl 0,035 W/m². Jenže pokud vezmeme v úvahu, že v tomto výpočtu je

zahrnuta plocha, kde neprobíhá žádná spotřeba ani výroba energie, je toto značně zkreslující. Vyjme tedy tuto plochu, která není osídlená a ani nebude využívána po mnoho dalších generací k takovému či jinému účelu (pokud někdy), zahrneme do výpočtu pouze nezamrzlou souš a dostaneme rozlohu cca 133 Tm². Výsledná hustota energetického toku je potom 0,135 W/m². David McKay vizualizoval ve své mapě průměrnou spotřebu vybraných států ve W/m² a porovnal ji s průměrnou HET obnovitelných zdrojů.



Z grafu je patrné, že například Německo má spotřebu energie více jak 1 W/m². Jak bylo uvedeno výše, Lauingen Energy Park má hustotu energetického toku 4,5 W/m². Waldpolenz solární park má HET pouze 2,7 W/m². Pokud se tedy přikloníme k vyšší hodnotě 5 W/m² (jak uvádí David McKay ve svém přehledu) a vezmeme v úvahu technologický pokrok, který nás čeká v dohledné budoucnosti, znamenalo by to, že něco přes 20 % celkové rozlohy Německa by muselo být zastavěno solárními panely k pokrytí spotřeby energie.

V roce 2016 bylo lehce pod 48 % celkové rozlohy Německa zabráno zemědělstvím, a tedy výsledná zabraná plocha by byla okolo 70 % (samozřejmě se dá spekulovat o využití ploch střech, ale je třeba vzít v úvahu stále zvyšující se počet lidí žijících ve městech). V případě větrných elektráren je potřeba osadit o něco více jak 40 % celkové plochy a tedy skoro 90 % by bylo již obsazeno (zde by se dal zkombinovat rozestup větrných turbín a plochu využít k dalším účelům).

Spojené království má plochu zabranou zemědělstvím přes 70 %. Čína má 56 %, USA 44,6 % a Francie 52 %. Jak můžeme vidět, a budu se tím dále zabývat v následujících dílech, přechod na obnovitelné zdroje energie není komplikovaný jenom z pohledu uchování elektrické energie a snižování emisí, ale i z pohledu hustoty energetického toku. A jak uvedl již zesnulý fyzik:

„Nemám nic proti obnovitelným zdrojům, miluju obnovitelné zdroje, jsem ale zároveň pro-aritmetický,“ David McKay.

Zdroj úvodního obrázku: [Economic Times](#) Použité zdroje:

[Power density](#) a *Key to Understanding Energy Sources and Uses*, Václav Smil, 2016

[Sustainable Energy](#) – *without the hot air*, David McKay