

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Ekonomická fakulta
Katedra aplikované matematiky a informatiky

Teze diplomové práce

Optimalizace fotovoltaické elektrárny pro rodinný dům

Vypracoval: Bc. Martin Bernáth
Vedoucí práce: RNDr. Tomáš Roskovec, Ph.D.
České Budějovice 2023

Klíčová slova:

Energetická účinnost, Optimalizace fotovoltaické energie, Fotovoltaické panely, Sklon a orientace panelů, Simulační aplikace

Anotace:

Práce se zaměřuje na optimalizaci využití fotovoltaických elektráren v domácnostech. Byly navrženy tři metody pro optimalizaci umístění panelů v závislosti na sklonu a orientaci, včetně metody využívající cenový model. Dále byl vytvořen algoritmus pro optimalizaci spotřeby pomocí využití přebytečného výkonu fotovoltaického pole, který umožňuje naplnit volnou výkonovou kapacitu spotřebiči. Kromě toho byla vyvinuta uživatelská aplikace, která umožňuje simulovat a vizualizovat různé aspekty spojené s fotovoltaickými elektrárnami a poskytuje uživatelům nástroje pro optimalizaci využití vlastního zdroje elektřiny. Výsledky práce představují přínos pro domácnosti, které zvažují investici do fotovoltaických elektráren a usnadňují rozhodování o nejlepším způsobu zapojení jednotlivých spotřebičů v závislosti na parametrech umístění a výkonu elektrárny.

Úvod a cíl práce

Efektivita využití vlastního zdroje elektřiny je v současné době stále více diskutovaným tématem. Fotovoltaické elektrárny jsou jednou z možností, jak produkovat vlastní elektřinu, ale jejich efektivita závisí na mnoha faktorech. Cílem této práce je zkoumat, jaký vliv mají různé parametry, jako je pozice domu, úhel panelů vůči zemi a vůči světovým stranám, na výkon fotovoltaické elektrárny a navrhnout efektivní parametry fotovoltaického pole vzhledem ke spotřebě domácnosti. Práce také představí metodiku pro řešení tohoto problému a ukáže její přínos v praxi.

Fotovoltaické elektrárny se stávají stále populárnější volbou pro produkci vlastní elektřiny, ale jejich efektivita závisí na mnoha faktorech. Je důležité zvážit všechny tyto faktory a navrhnout řešení, které bude co nejefektivnější a bude splňovat potřeby uživatele. Tato práce se zabývá tedy tématem, které má význam pro širokou veřejnost a může být užitečné pro všechny, kteří hledají způsoby, jak snížit své náklady na elektřinu a zároveň přispět k životnímu prostředí. V dnešní době je totiž důležité zaměřit se na efektivní využití energie a hledat cesty, jak ji produkovat a využívat co nejlépe. Tato práce by měla přinést nové poznatky a návrhy pro efektivní využití fotovoltaických elektráren v domácnostech a pomoci tak ke snížení nákladů a k lepšímu životnímu prostředí.

Model výkonu FVE

Pro účely diplomové práce byl vytvořen model výkonu fotovoltaické elektrárny pomocí programovacího jazyka python a knihovny pvlib.

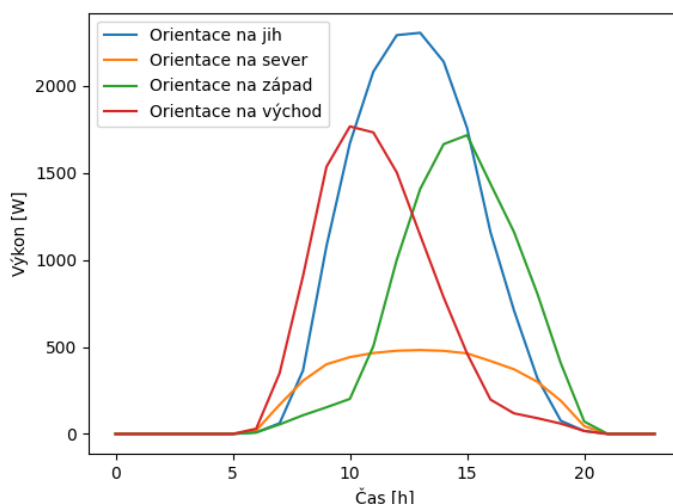
Vliv parametrů fotovoltaického pole

Fotovoltaická pole jsou často optimalizována pro maximální efektivitu a výkon. Klíčovými parametry, které mají významný vliv na výkon fotovoltaických panelů, jsou orientace a sklon panelů. Tato kapitola se zaměřuje na analýzu různých kombinací orientace a sklonu fotovoltaických panelů a jejich vliv na průběh výkonu.

Pro analýzu vlivu těchto parametrů jsou použity souřadnice (49,14), které odpovídají městu Písek v Jihočeském kraji. Dále je použito pole o velikosti 10x300Wp. Pro představení vlivu orientace jsou použity pole se sklonem 40 stupňů, jelikož je středem intervalu, který je považován za optimální volbu v podmínkách ČR. Typický sklon střech v ČR je 35–45 stupňů, čemuž tento sklon odpovídá. Pro představení vlivu sklonu, je zvolena orientace na jih.

Vliv orientace

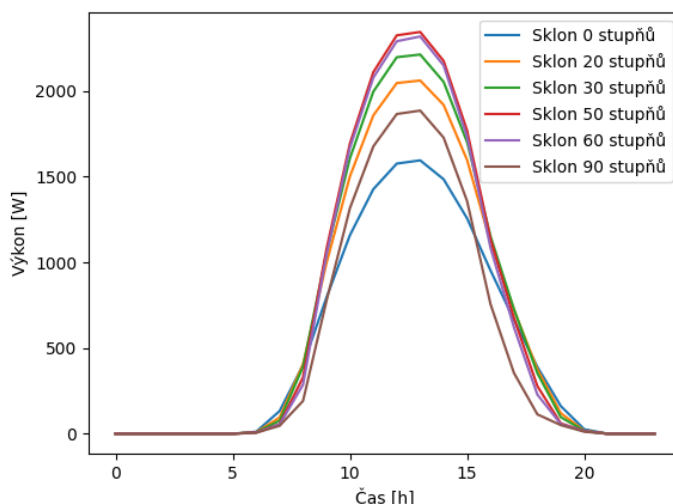
Níže můžeme vidět vliv všech zkoumaných orientací v jednom grafu. Z tohoto grafu je zřejmý časový interval, ve kterém jednotlivá pole vyrábějí. Změnou orientace a dále i sklonu je možné pokrýt spotřebu, kterou by nebylo možné pokrýt polem s orientací na jih, proto je tedy výhodné používat i pole s jinou orientací.



Obrázek 1 - Souhrn vlivu orientace

Vliv sklonu

Níže můžeme vidět vliv všech zkoumaných sklonů v jednom grafu. Z tohoto grafu je zřejmá výhodnost použití sklonu 30 až 50 stupňů, ačkoliv se zde jeví jako vhodný sklon také 60 stupňů. Tento sklon ale začíná vyrábět déle a končí s výrobou dříve.



Obrázek 2 - Souhrn vlivu sklonů

Optimalizace výroby

Nejprve budeme optimalizovat orientaci a sklon jednoho fotovoltaického pole, a následně rozšíříme naši analýzu na optimalizaci dvou polí. Cílem optimalizace je najít takové kombinace orientace a sklonu, které povedou k co nejvyššímu přínosu při zohlednění místní spotřeby. Optimalizace bude zahrnovat následující varianty:

1. Optimalizace v závislosti na průměrné spotřebě: V tomto kroku bude zkoumán vliv orientace a sklonu panelů na průměrnou spotřebu energie a jejich schopnost uspokojit energetické potřeby objektu. Tato optimalizace je založená na modelu výkonové rovnováhy a dvou možných přístupech.
 - a. Prvním případem je minimalizace výkonu, který se nakupuje z elektrické sítě, tento přístup bude dále nazýván jako Bmin (Buy min).
 - b. Druhým přístupem je minimalizace výkonu, který se nakupuje a zároveň dodává do elektrické sítě, tento přístup bude dále nazýván jako SminBmin (Sell min, Buy min)
2. Optimalizace pomocí cenového modelu: V tomto kroku bude zkoumán vliv orientace a sklonu panelů v závislosti na ceně elektrické energie a ceně za výkup přebytečné energie dodané do sítě.
3. Optimalizace pro dvojici fotovoltaických polí: V posledním kroku bude analýza rozšířena na optimalizaci dvou fotovoltaických polí. Budou zkoumány různé

kombinace orientace a sklonu obou polí, aby bylo dosaženo co nejlepšího výkonu a efektivity při zohlednění spotřeby energie.

Tyto modely byly implementovány v programovacím jazyce python, ve kterém bude provedena i následná optimalizace.

Model výkonové rovnováhy

Model výkonové rovnováhy lze matematicky popsat pomocí rovnice, která vyjadřuje rovnováhu mezi produkovanou a spotřebovanou energií:

$$P(t) = C(t) + G(t) - D(t)$$

kde $P(t)$, $C(t)$, $G(t)$ a $D(t)$ jsou kladná čísla a t je hodina ve dni:

$P(t)$ je výkon FVE v čase t

$C(t)$ je výkon energie, který se spotřebuje v čase t (spotřeba spotřebitelů)

$G(t)$ je výkon energie, který se ukládá do akumulátorů nebo dodává do elektrické sítě v čase t

$D(t)$ je výkon energie, který se nakupuje z elektrické sítě v čase t

Tento model použijeme pro dva odlišné přístupy. Jedním přístupem bude minimalizace součtu $D(t)$, což je energie, která se nakupuje z elektrické sítě za celý den (B_{min}). Minimalizací tohoto parametru zajistíme co nejvyšší vlastní pokrytí spotřeby.

Dalším přístupem bude minimalizace součtu $G(t)$ a $D(t)$, což je součet elektrické energie, která se nakupuje ze sítě a energie, která se do sítě dodává za celý den ($S_{min}B_{min}$). Tímto přístupem docílíme maximální rovnosti mezi spotřebou a výrobou.

Cenový model

Tento model je také založen na modelu výkonové rovnováhy, ale je upraven tak, aby počítal s cenou, za kterou elektrickou energii nakupujeme, a zároveň s cenou, za kterou přebytečnou energii prodáváme do sítě.

Cílem tohoto modelu je minimalizovat částku, kterou nás energie stojí v průměru za den. Pro potřeby optimalizace budeme uvažovat s maximální možnou velikostí elektrárny na úrovni roční spotřeby, kdy je zvolena taková velikost elektrárny v kWp jako je roční spotřeba elektriny v MWh.

V tomto modelu počítáme $G_p(t)$ jako částku, za kterou prodáme přebytečnou energii, kterou vyrobí fotovoltaická elektrárna a $D_p(t)$ jako částku za kterou nakupujeme energii, kterou nám nebyla elektrárna schopna v čase t dodat. Rozdílem součtů těchto hodnot získáme částku, kterou nás celkově stojí energie za den, vzhledem ke spotřebě. Zápornou hodnotou je v tomto případě zisk.

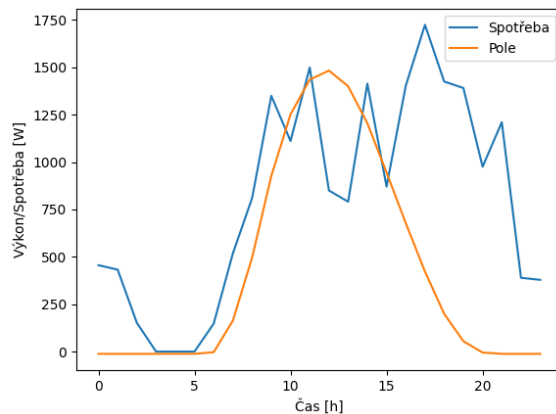
Výsledky metod pro 1 pole (domácnost E)

Domácnosti E je rodinný dům, který má 4 členy, 2 členové jsou ve středním věku a 2 jsou děti. Spotřeba byla v tomto případě sledována od 22. 3. 2023 do 25. 3. 2023.

Optimalizace metodou SminBmin

Výsledky:

Sklon: 10 stupňů, orientace: 80 stupňů,
počet panelů: 10ks (3000Wp)

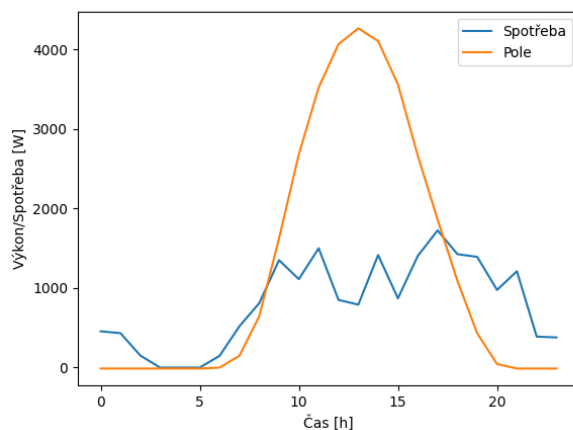


Obrázek 3- Spotř. E - SminBmin pro 1 pole

Optimalizace metodou Bmin

Výsledky:

Sklon: 10 stupňů, orientace: 220 stupňů,
počet panelů: 24ks (7200Wp)



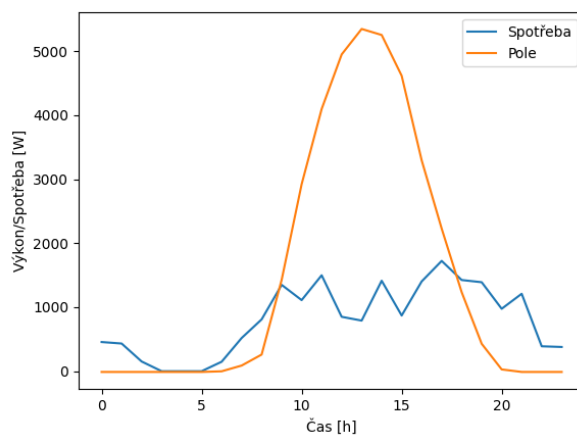
Obrázek 4- Spotř. E - Bmin pro 1 pole

Optimalizace pomocí cenového modelu

Cena elektřiny: 8Kč, cena výkupu: 1Kč

Výsledky:

Sklon: 40 stupňů, orientace: 205 stupňů,
počet panelů 24ks (7200Wp), hodnota
funkce: 27,7 Kč



Obrázek 5 - Spotř. E - Cenový model pro 1 pole

Výsledky metod pro 2 pole (domácnost E)

V porovnání výsledků jednotlivých metod můžeme u této domácnosti pozorovat zlepšení. Metoda SminBmin dosáhla v optimalizaci pomocí dvou polí minimální hodnoty funkce 7677,82 W, zatímco v optimalizaci pomocí jednoho pole byla minimální hodnota 11667,65 W. Metoda SminBmin pro 2 pole dosáhla o 34,2 % lepších výsledků než při optimalizaci pomocí jednoho pole. Na grafech níže můžeme vidět srovnání optimalizace pro 1 pole, pro 2 pole a průběh výkonu fotovoltaického systému s dvěma poli.

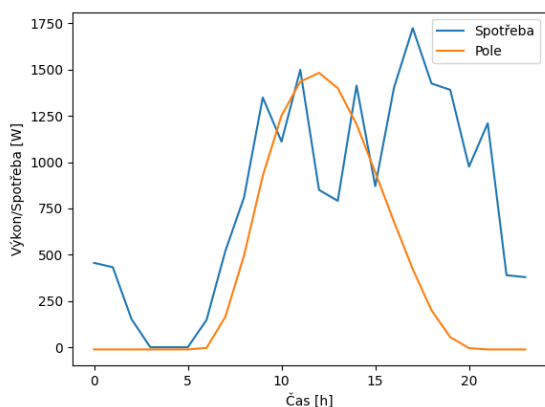
Výsledky pro 2 pole:

Metoda: SminBmin

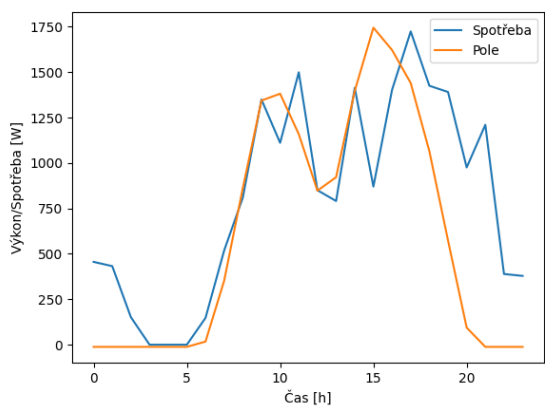
Sklon 1. pole: 70 stupňů, sklon 2. pole: 70 stupňů

Orientace 1. pole: 80 stupňů, orientace 2. pole: 280 stupňů

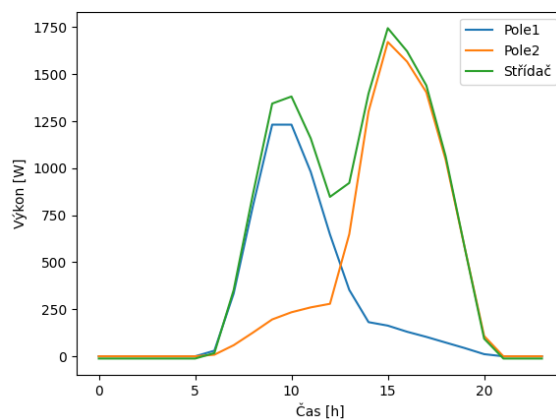
Velikost 1. pole: 8ks (2400Wp), velikost 2. pole: 12ks (3600Wp)



Obrázek 6 - Spotř. E – SminBmin pro 1 pole



Obrázek 8 - Spotř. E – SminBmin pro 2 pole



Obrázek 7 - Spotř. E – SminBmin - Výroba systému

Zhodnocení optimalizace výroby

Z výsledků metody SminBmin lze vypožorovat, že tato metoda se snaží průběh výkonu fotovoltaické elektrárny co nejvíce přiblížit průběhu spotřeby, tato metoda tedy navrhne elektrárnu, která umožňuje co nejvíce pokrýt vlastní spotřebu za zachování co nejmenší elektrárny. Tato metoda tedy může být vhodná v případě, že chceme co nejvíce ušetřit na vlastní spotřebě ale také na velikosti fotovoltaické elektrárny. Tato metoda je zároveň nejvíce ekologická a její využití může být vhodné hlavně v ostrovních systémech FVE.

Z výsledků metody Bmin lze vypožorovat, že tato metoda se snaží navrhnout takovou fotovoltaickou elektrárnu, která co nejvíce pokryje vlastní spotřebu, tato metoda zároveň optimalizuje sklon a orientaci tak, aby pokryla největší množství spotřebované energie, ale zároveň zvětšuje velikost elektrárny do největší možné velikosti, jelikož toto zvětšení vždy pokryje o další kousek spotřeby, buď na začátku, nebo ke konci výroby. Tato metoda je vhodná použít v případě, že známe velikost pole, které chceme instalovat a zároveň chceme pokrýt co největší část spotřeby.

Z výsledků cenového modelu lze vypožorovat, že tato metoda se snaží pokrýt co největší část spotřeby tak, aby minimalizovala drahý nákup ze sítě, ale zároveň se oproti modelu Bmin nesnaží pokrýt kousky na kraji spotřeby ale místo toho sklon a orientaci optimalizuje více pro maximální výkon, jelikož uvažuje, že tento výkon pokryje spotřebu ziskem z prodeje energie. Tento model je možné použít, pokud lze prodávat výkon do sítě a lze tak maximalizovat zisk z provozu elektrárny.

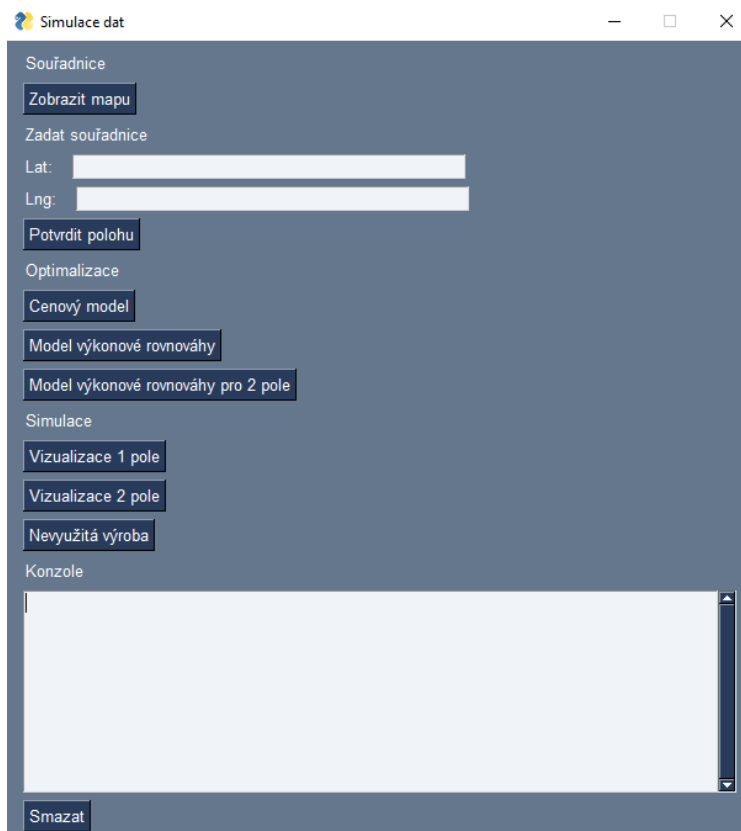
Z výsledků optimalizačních metod pro 2 pole lze usoudit, že ve většině případů je optimalizace pomocí dvou polí efektivnější. Metoda pro 2 pole je účinnější zejména pro spotřeby, které mají lokální maxima dále od sebe. V těchto případech je rozdíl v hodnotě optimalizační funkce větší. Pro spotřeby s jedním výraznějším maximem nebo pro spotřeby s lokálními maximy blízko sebe je rozdíl hodnot optimalizované funkce menší.

Optimalizace spotřeby

V průběhu práce byl vytvořen algoritmus, který umožňuje naplnit volnou výkonovou kapacitu spotřebiči, které si uživatel zvolí. Tento algoritmus umožňuje najít nejlepší kombinaci spotřebičů během dne tak, aby byl nevyužitý výkon fotovoltaického pole maximálně využit pomocí zvolených spotřebičů. Tento algoritmus umožňuje přidat spotřebiče s parametry (název, příkon, maximální počet použití během dne) a využít je pro vyplnění nevyužitého výkonu. Algoritmus je implementován v uživatelské aplikaci.

Uživatelská aplikace

V průběhu této práce byla vyvinuta uživatelská aplikace v jazyce python, která umožňuje vizualizaci a optimalizaci fotovoltaiických polí na základě zadaných parametrů. Aplikace je navržena tak, aby umožnila uživateli prozkoumat různé možnosti konfigurace fotovoltaiického pole nebo polí, které by poté mohly být implementovány v praxi.



Obrázek 9 - Náhled aplikace

Závěr a zhodnocení

V průběhu této práce byl zkoumán vliv sklonu a orientace fotovoltaických panelů na efektivitu využití vlastního zdroje elektřiny pro domácnosti. Byly navrženy tři metody, pomocí kterých lze optimalizovat výrobu fotovoltaické elektrárny vzhledem ke spotřebě. Optimalizace poskytla základ pro návrh efektivního zapojování jednotlivých spotřebičů v závislosti na funkci výkonu elektrárny.

Jedním z hlavních výsledků práce je uživatelská aplikace, která umožňuje simulovat různé aspekty spojené s fotovoltaickými elektrárnami. Tato aplikace umožňuje uživatelům experimentovat s různými parametry, jako je poloha domu, úhel panelů vůči zemi a vůči světovým stranám, a přizpůsobit tak parametry jejich vlastní situaci. Aplikace dále umožňuje zobrazit průběh výkonu jednotlivých nastavení a poskytuje tak předběžný náhled na efektivitu elektrárny s danými parametry.

Díky tomu je možné dosáhnout vyšší efektivity využití elektřiny v době, kdy je výkon elektrárny maximální, což je klíčový faktor vzhledem k nízké efektivitě uskladnění energie při současné technologii.

Výsledky práce tak představují přínos pro domácnosti, které zvažují investici do fotovoltaických elektráren. Aplikace a metodiky poskytují nástroje pro optimalizaci využití vlastního zdroje elektřiny a usnadňují rozhodování o nejlepším způsobu zapojení jednotlivých spotřebičů v závislosti na parametrech umístění a výkonu elektrárny.

Seznam literatury

- Bechník, B. (2014). *strucna-historie-fotovoltaiky*. tzbinfo.cz. Retrieved 2023-03-24, from <https://oze.tzbinfo.cz/fotovoltaika/11652-strucna-historie-fotovoltaiky>
- Bernède, J. (2008). ORGANIC PHOTOVOLTAIC CELLS: HISTORY, PRINCIPLE AND TECHNIQUES. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 53(3). <https://doi.org/10.4067/S0717-97072008000300001>
- CEZ.cz. (2022). cez.cz. Retrieved 2023-03-27, from <https://www.cez.cz/cs/clanky/elektrina/jaka-je-prumerna-spotreba-elektriny-u-rodinneho-domu-174046>
- Čech, J. (2023). *Velký problém: Distributoři nechtějí připojovat fotovoltaiky*. Retrieved 2023-03-27, from <https://www.dumazahrada.cz/clanek/distributori-pripojeni-fotovoltaiky-fve-20230118.html>
- ČEZ.cz. *Solární (fotovoltaičné) články*. cez.cz. Retrieved 2023-03-24, from <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- Grossman, L. (ed.). (1999). 1999 ISES Solar World Congress.: Proceedings of the ISES Solar World Congress, Jerusalem, Israel, 4-9 July 1999. In J. Angles, L. Menard, O. Bauer, C. Rigollier & L. Wald, *A climatological database of the Linke turbidity factor*. (1., pp. 432-434). Elsevier.
- Hamalčíková, K. (2020). *Průvodce distribučními sazbami elektřiny*. Elektrina.cz. Retrieved 2023-03-27, from <https://www.elektrina.cz/distribucni-sazby-elektriny-2020>
- Hejhálek, J. (2018). *Fotovoltaičné elektrárny*. stavebnictvi3000.cz. Retrieved 2023-03-27, from <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/fotovoltaične-elektrarny>
- Hydroelectric Power Stations*. (2023). CEZ.cz. Retrieved 2023-04-03, from <https://www.cez.cz/en/energy-generation/hydroelectric-power-plants>
- Chester, M. (2023). *Solar leasing*. EcoWatch.com. Retrieved 2023-04-03, from <https://www.ecowatch.com/solar/solar-leasing>
- Knoflíčková, O. (2022). *Rok 2022: Dotace na fotovoltaiku nikdy nebyla výhodnější*. Retrieved 2023-03-24, from <https://www.woltair.cz/blog/dotace/fotovoltaika-v-roce-2022-jak-ziskat-dotaci>
- Lararevič, A. (2021). *Cena emisních povolenek trhá rekordy, bude dále růst*. Elektrina.cz. Retrieved 2023-03-27, from <https://www.elektrina.cz/cena-emisnich-povolenek-trha-rekordy-bude-dale-rust>
- Lázoková, E. (2022). *jak-funguje-fotovoltaična-elektrarna*. woltair.cz. Retrieved 2023-03-24, from
- Li, Y., Cai, W., & Wang, C. (2017). Economic Impacts of Wind and Solar Photovoltaic Power Development in China. *Energy Procedia*, 105, 3440-3448. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.787>
- Matajs, V. (2015). *Jak funguje ostrovní fotovoltaičný systém?*. solarniexperti.cz. Retrieved 2023-03-27, from <https://www.solarniexperti.cz/jak-funguje-ostrovní-off-grid-fotovoltaičný-system/>
- Merit order*. (2023). next-kraftwerke.com. Retrieved 2023-03-27, from <https://www.next-kraftwerke.com/knowledge/what-does-merit-order-mean>
- Nesvadbová, J. (2022). *Co si promyslet, než se rozhodneme pro fotovoltaiku*. Retrieved 2023-03-27, from <https://www.novinky.cz/clanek/bydleni-tipy-a-trendy-co-si-promyslet-nez-se-rozhodneme-pro-fotovoltaiku-40394327>
- Net metering*. (2022). swhgroup.eu. Retrieved 2023-04-03, from <https://www.swhgroup.eu/net-metering.html>
- Ondroušek, L. (2009). *PŘIPOJOVÁNÍ FOTOVOLTAICKÝCH ZDROJŮ K DISTRIBUČNÍ SÍTI* [diplomová práce, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ]. https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=13439
- ON-GRID VS. OFF-GRID SLUNEČNÍ SOUSTAVA*. (2021). Beny.com. Retrieved 2023-03-27, from <https://www.beny.com/cs/on-grid-vs-off-grid-solar-system-all-you-need-to-know/>

- Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., & Menicucci, D. (1987). A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy*, 39(3), 221-231. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(87\)80031-2](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(87)80031-2)
- pvlb User Guide*. (2021). pvlb-python.readthedocs.io. Retrieved 2023-03-29, from https://pvlb-python.readthedocs.io/en/stable/user_guide/index.html
- Snižovat emise CO₂: Cíle a opatření EU*. (2023). Europarl.europa.eu. Retrieved 2023-03-27, from <https://www.europarl.europa.eu/news/cs/headlines/priorities/climate-change/20180305STO99003/snizovat-emise-co2-cile-a-opatreni-eu>
- Sudová, K. (2023). *Cena elektřiny na burze 2023*. e15.cz. Retrieved 2023-03-27, from <https://www.e15.cz/cena-elektřiny-burza-graf-aktualne>
- This Month in Physics History. (2009). *APSNews*, 18(4). <https://www.aps.org/publications/apsnews/200904/physicshistory.cfm>
- Vobořil, D. (2016). *fotovoltaička-elektřina-princip-funkce-a-soucasti*. Retrieved 2023-03-24, from <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/fotovoltaička-elektřina-princip-funkce-a-soucasti>
- vsystem.cz. (2020). V-system.cz. Retrieved 2023-03-24, from <https://www.v-system.cz/blog/proc-si-poridit-malou-fotovoltaičkou-elektřinu/>
- Wimmerová, L., & Černý, M. (2018). Elektroodpad. *Odpadové fórum*, 19(102018), 20-21.
- Zamouřil, J., & Krčál, J. (2022). *Jak se na trhu stanovuje cena elektřiny?*. faktaoklimatu.cz. Retrieved 2023-03-27, from <https://faktaoklimatu.cz/explainery/cena-elektřiny-na-trhu>