

Univerzita Jana Evangelisty Purkyně
v Ústí nad Labem

Přírodovědecká fakulta

UNIVERZITA J. E. PURKYNĚ V ÚSTÍ NAD LABEM

Přírodovědecká fakulta



Optimalizace investičních prostředků
z hlediska výnosu fotovoltaických elektráren

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Petr Kotlan

Vedoucí práce: Ing. Roman Vaibar, Ph.D., MBA

Studijní program: Matematika ve firmách a veřejné správě

Ústí nad Labem 2024

Podklad pro zadání BAKALÁŘSKÉ práce studenta

Jméno a příjmení: Petr KOTLAN
Osobní číslo: F21060

Téma práce: Optimalizace investičních prostředků z hlediska výnosu fotovoltaických elektráren
Téma práce anglicky: Optimization of investment funds in terms of photovoltaic power plants
Jazyk práce: Čeština

Vedoucí práce: Ing. Roman Vaibar, Ph.D., MBA
Katedra informatiky

Zásady pro vypracování:

Cílem bakalářské práce je vyvinout aplikaci, která pomocí lineárního programování optimalizuje rozdělení investičních prostředků pro instalaci fotovoltaických elektráren na daných objektech. Optimalizace bude provedena na základě následujících hledisek:

- typu střechy – rovná, sedlová, valbová atd.,
- spotřeby v daném místě,
- ceny energie definované odkupem dle spotových cen OTE, a.s.,
- optimalizace uložistě,
- výpočtu předpokládaného ročního výkonu dle osvitových hodin.

Osnova:

1. Úvod
2. Současné modely výnosů fotovoltaických elektráren v ČR
3. Teoretická část
 - Přehled ekonomických pojmů
 - Základní modely matematické optimalizace
4. Praktická část
 - Popis aplikace
 - Případové studie
5. Zhodnocení výsledků
6. Závěr

Seznam doporučené literatury:

- VALACH, Josef. *Investiční rozhodování a dlouhodobé financování*. 3., přeprac. a rozš. vyd. Praha: Ekopress, 2010. ISBN 978-80-86929-71-2.
- PLEVNÝ, Miroslav a Miroslav ŽIŽKA. *Modelování a optimalizace v manažerském rozhodování*. Vyd. 2. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. ISBN 978-80-7043-933-3.
- *Krátkodobé trhy*. Online. OTE. C2018. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/kratkodobe-trhy/elektrina/vnitrodenni-trh>. [cit. 2023-12-03].
- MITCHELL, Stuart; KEAN, Anita; MASON, Andrew; O'SULLIVAN, Michael a PHILLIPS, Antony et al. *Optimization with PuLP*. Online. COIN-OR Documentation Site. C2009. Dostupné z: <https://coin-or.github.io/pulp/>. [cit. 2023-12-03].

Podpis studenta:

Datum:

Podpis vedoucího práce:

Datum:

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v přiloženém seznamu literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., ve znění zákona č. 81/2005 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

V Ústí nad Labem dne 25. května 2024

Podpis:

OPTIMALIZACE INVESTIČNÍCH PROSTŘEDKŮ Z HLEDISKA VÝNOSU FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN

Abstrakt

Klíčová slova

fotovoltaika, lineární programování, optimalizace, investice

OPTIMIZATION OF INVESTMENT FUNDS IN TERMS OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS

Abstract

Keywords

photovoltaics, linear programming, optimization, investment

Obsah

Úvod	10
1 Přehled problematiky fotovoltaiky	12
1.1 Technický popis fotovoltaických elektráren	12
1.1.1 Veličiny	12
1.1.2 Komponenty fotovoltaické elektrárny	12
1.1.3 Druhy fotovoltaických systémů	13
1.2 Jak fotovoltaika šetří peníze	14
2 Teoretická část	15
2.1 Přehled ekonomických pojmů	15
2.1.1 Základní pojmy	15
2.1.2 Ukazatele výnosnosti investice	15
2.2 Matematická optimalizace	16
2.2.1 Formulace úlohy lineárního programování	17
2.2.2 Maticový zápis úlohy LP	17
2.2.3 Typy úloh lineárního programování	18
3 Praktická část	19
3.1 Popis aplikace	19
3.1.1 Data	19
3.2 Případové studie	19
4 Zhodnocení výsledků a závěr	20
Seznam zdrojů	20

Úvod

Přehled problematiky fotovoltaiky

Úvodní část si klade za cíl seznámit čtenáře s základními pojmy z oblasti fotovoltaiky.

1.1 Technický popis fotovoltaických elektráren

1.1.1 Veličiny

Watt je jednotkou výkonu a rovná se vykonané práci za jednotku času. Značíme ji symbolem W .

Watt hodina je jednotkou energie a rovná se práci stroje o výkonu jednoho wattu, který pracuje po dobu jedné hodiny. Značíme ji symbolem $W \cdot h$. Při měření spotřeby elektřiny se nejčastěji se užívá v násobku kilowatt hodiny (kWh).

Kilowatt–peak je jednotkou špičkového výkonu fotovoltaické elektrárny. Tento výkon je při standardních testovacích podmínkách.

1.1.2 Komponenty fotovoltaické elektrárny

Fotovoltaická elektrárna se skládá z několika základních komponent.

Fotovoltaické panely jsou nezbytnou součástí každé fotovoltaické elektrárny. Jejich hlavním úkolem je absorbovat sluneční záření a přeměnit ho na elektrickou energii.

Baterie (nebo také akumulátory) slouží k ukládání přebytků energie, které nebyly spotřebovány. Dělíme je na virtuální uložistiště a fyzické uložistiště.

- **Virtuální uložistiště** – funguje na základě podepsání smlouvy s distributorem. Přebytky vyrobené energie se posílají do veřejné sítě, odkud se v případě potřeby mohou odčerpat. Ve virtuální baterii můžete uložit tolik energie, kolik vám smluvně umožňuje distributor. Mají několik nevýhod:

- je to komerční produkt, který nenabízí všichni distributoři a nikde se negarantují stálé podmínky,
 - platíte za využívání paušální poplatek,
 - v případě výpadku elektřiny nemáte záložní zdroj energie.
- **Fyzické bateriové uložení** – je zařízení, které je uloženo v domě. Vyrobená energie se do baterií ukládá a v případě potřeby se z nich odebírá. Nevýhodou fyzické baterie je její kapacita.

Invertor (nebo také měnič či střídač) je podobně jako fotovoltaické panely nezbytnou součástí každé fotovoltaické elektrárny. Invertor je zařízení, které mění stejnosměrný proud (DC) na střídavý proud (AC). Střídavý proud je nezbytný pro napájení elektrických spotřebičů.

1.1.3 Druhy fotovoltaických systémů

Rozdílem mezi jednotlivými druhy fotovoltaických systémů je jejich napojení do veřejné elektrické sítě a integrace akumulátorů. Podle těchto kritérií je lze rozdělit do tří základních kategorií:

- ostrovní
- standardní
- hybridní

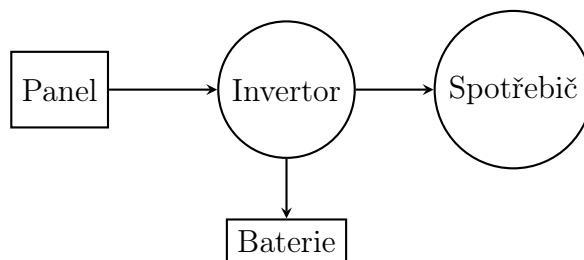
Ostrovní elektrárna (tzv. off-grid) je samostatný systém, který není připojen k elektrické síti. Klíčovou částí toho systému je baterie (akumulátor), která slouží k ukládání přebytků energie. Jsou užitečné v oblastech, kde připojení k elektrické síti není možné.

Výhody:

- nezávislost na dodavatelích elektřiny,
- pokud dojde k výpadku elektřiny, ostrovní elektrárna bude sloužit jako záložní zdroj,

Nevýhody:

- počáteční náklady mohou být vyšší, kvůli potřebě akumulátorů,
- baterie vyžadují pravidelnou údržbu.



Obrázek 1.1: Schéma off-grid fotovoltaické elektrárny

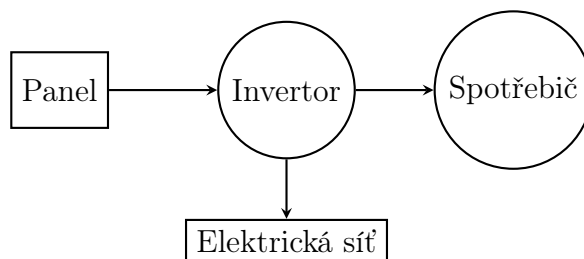
Standardní elektrárna Standardní (tzv. on-grid) fotovoltaická elektrárna je připojena k elektrické síti. Veškerou přebytečnou energii lze prodat dodavateli elektřiny.

Výhody:

- možnost prodeje přebytků elektřiny,
- dlouhá životnost, malá potřeba údržby.

Nevýhody:

- závislost na síti,
- závislost na slunečním záření.



Obrázek 1.2: Schéma on-grid fotovoltaické elektrárny

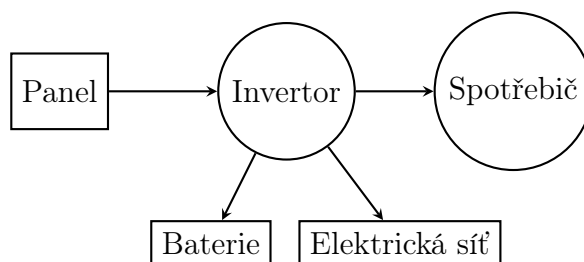
Hybridní elektrárna Hybridní fotovoltaické elektrárny kombinují výhody ostrovních a standardních systémů. Jsou připojeny k elektrické síti, ale zároveň mají akumulátory, které slouží jako záložní zdroj energie.

Výhody:

- uložení přebytků energie,
- větší energetická nezávislost.

Nevýhody:

- vysoké počáteční náklady,
- baterie vyžadují pravidelnou údržbu.



Obrázek 1.3: Schéma hybridní fotovoltaické elektrárny

1.2 Jak fotovoltaika šetří peníze

Teoretická část

Tato kapitola je rozdělena do dvou částí. První část se zabývá základními ekonomickými pojmy využívanými v investiční analýze. Druhá část se zabývá matematickou optimalizací metodou lineárního programování.

2.1 Přehled ekonomických pojmů

2.1.1 Základní pojmy

2.1.2 Ukazatele výnosnosti investice

Výnosnost investice (ROI – Return of Investment) vyjadřuje zisk nebo ztrátu z investice v procentech.

$$ROI = \frac{(P_1 + P_2 + \dots + P_t) - K}{K} \cdot 100, \quad (2.1)$$

kde

t – počet let,

P_1, P_2, \dots, P_t – peněžní příjmy z investice v jednotlivých letech,

K – kapitálový výdaj,

ROI – návratnost investice.

Diskontované cash-flow (DCF – Discounted Cash Flow) vyjadřuje současnou hodnotu budoucích peněžních toků.

$$DCF = \frac{P_1}{(1+i)} + \frac{P_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{P_t}{(1+i)^t}, \quad (2.2)$$

kde

t – počet let,

P_1, P_2, \dots, P_t – peněžní příjmy z investice v jednotlivých letech,

i – úroková míra (diskontní sazba),

DCF – diskontované cash-flow.

Čistá současná hodnota (NPV – Net Present Value) vyjadřuje současnou hodnotu budoucích peněžních toků po odečtení kapitálového výdaje.

$$NPV = \frac{P_1}{(1+i)} + \frac{P_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{P_t}{(1+i)^t} - K, \quad (2.3)$$

kde

t – počet let,

P_1, P_2, \dots, P_t – peněžní příjmy z investice v jednotlivých letech,

K – kapitálový výdaj,

i – úroková míra (diskontní sazba),

NPV – čistá současná hodnota.

Vnitřní výnosové procento (IRR – Internal Rate of Return) je úroková míra, při níž se současná hodnota peněžních příjmů z investice rovná kapitálovým výdajům. Investice se považuje za výhodnou, když IRR představuje vyšší úrok, než je požadovaná minimální výnosnost investice.

$$\frac{P_1}{(1+IRR)} + \frac{P_2}{(1+IRR)^2} + \dots + \frac{P_t}{(1+IRR)^t} = K, \quad (2.4)$$

kde

t – počet let,

P_1, P_2, \dots, P_t – peněžní příjmy z investice v jednotlivých letech,

K – kapitálový výdaj,

IRR – vnitřní výnosové procento.

2.2 Matematická optimalizace

Tato část vychází ze dvou učebních textů. Prvním je *Matematika pro ekonomy* od R. Stolína [8] a druhým je *Operační výzkum* od J. Demela [1].

V úvodu této kapitoly jsou popsány základní pojmy a formulace úlohy lineárního programování.

Lineární programování patří k metodám *operačního výzkumu*. Je zaměřeno na hledání optimálního řešení při kterém, jsou zároveň splněny omezující podmínky.

2.2.1 Formulace úlohy lineárního programování

Účelová funkce je lineární funkcí n proměnných ve tvaru

$$z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n, \quad (2.5)$$

kde c_1, c_2, \dots, c_n jsou konstanty, které nazýváme *cenové koeficienty* nebo *koeficienty účelové funkce* a x_1, x_2, \dots, x_n jsou *strukturní neznámé*.

Účelová funkce se buď maximalizuje

$$\max z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n, \quad (2.6)$$

nebo minimalizuje

$$\min z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n. \quad (2.7)$$

Omezující podmínky jsou lineární rovnice nebo nerovnice ve tvaru

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &\lesseqgtr b_1, \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\lesseqgtr b_2, \\ &\vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\lesseqgtr b_m, \end{aligned} \quad (2.8)$$

kde na místě označeném \lesseqgtr se může vyskytnout symbol \leq , \geq nebo $=$ ¹.

Prvky a_{ij} jsou konstanty, které nazýváme *strukturní koeficienty* nebo *koeficienty omezení*, b_1, b_2, \dots, b_m jsou konstanty (tzv. *požadavková čísla*) jsou konstanty, které nazýváme *strukturní koeficienty* nebo *koeficienty omezení*, b_i jsou konstanty (tzv. *požadavková čísla*) a x_1, x_2, \dots, x_n jsou *strukturní neznámé*.

Zároveň omezující podmínky vymezují pro každou proměnnou x_1, x_2, \dots, x_n množinu hodnot, kterých může nabývat. Nejčastěji se jedná o podmínky tvaru $x_i \geq 0$ (nezápornost). Jinými případy mohou být například podmínky tvaru $x_i \leq 0$ (nekladnost) nebo x_i může nabývat libovolné hodnoty („neomezeno“).

2.2.2 Maticový zápis úlohy LP

Celý problém lineárního programování můžeme pro přehlednost zapsat maticově. Účelovou funkci vyjádříme jako

$$z = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \rightarrow \max, \quad (2.9)$$

¹Tato formulace je doslovným přepisem z *Operační výzkum* J. Demel [1] str. 9.

nebo

$$z = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \rightarrow \min, \quad (2.10)$$

kde \mathbf{c} je sloupcový vektor cenových koeficientů a \mathbf{x} je sloupcový vektor *strukturních neznámých*.

Strukturní koeficienty můžeme vyjádřit jako matici

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

a za předpokladu, že jsou všechny omezující podmínky stejného typu (tzn. \leq , \geq nebo $=$), můžeme je vyjádřit jako

$$\mathbf{Ax} \leq \mathbf{b} \quad \text{nebo} \quad \mathbf{Ax} \geq \mathbf{b} \quad \text{nebo} \quad \mathbf{Ax} = \mathbf{b}, \quad (2.12)$$

kde \mathbf{b} je sloupcový vektor *požadavkových čísel*.

2.2.3 Typy úloh lineárního programování

V následující části jsou popsány některé typické úlohy lineárního programování ².

Úlohy výrobního plánování

Směšovací úlohy

Úlohy o dělení materiálu

²Podle *Matematika pro ekonomy* R. Stolín [8]

Praktická část

3.1 Popis aplikace

3.1.1 Data

Český hydrometeorologický ústav ČHMÚ

Podmínky užití dat

OTE, a.s. OTE (Otevřený trh s elektřinou)

3.2 Případové studie

Zhodnocení výsledků a závěr

Seznam zdrojů

- [1] DEMEL, Jiří. *Operační výzkum*. Dostupné z: <https://kix.fsv.cvut.cz/~demel/ped/ov/ov.pdf>.
- [2] *Komponenty FVE*. Online. Fotovia. 2023. Dostupné také z: <https://www.fotovia.cz/komponenty-fve>.
- [3] *Typy fotovoltaických elektráren*. Online. Fotovia. 2023. Dostupné také z: <https://www.fotovia.cz/blog/typy-fotovoltaickych-elektraren>.
- [4] *Co čistá současná hodnota?*. Online. MONETA Money Bank. Dostupné z: <https://www.moneta.cz/slovník-pojmu/detail/npv>.
- [5] *Co je ROI?*. Online. MONETA Money Bank. Dostupné z: <https://www.moneta.cz/slovník-pojmu/detail/roi>.
- [6] *Krátkodobé trhy*. Online. OTE. C2018. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/kratkodobe-trhy/elektrina/vnitrodenni-trh>.
- [7] *Stroj na peníze: Fotovoltaika při vysokých cenách elektřiny ušetří desetitisíce korun ročně*. Online. TZB-info - Portál pro stavebnictví, technická zařízení budov. 2001. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/24229-stroj-na-penize-fotovoltaika-pri-vysokych-cenach-elektřiny-usetri-desetiti>.
- [8] STOLÍN, Radek. *Matematika pro ekonomy*. 2., upr. vyd. Jihlava: Vysoká škola polytechnická Jihlava, 2011. ISBN ISBN978-80-87035-35-1.