



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Ostrovní provoz kombinace fotovoltaické a větrné elektrárny

Off-grid operation of photovoltaic and wind power plant

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Ekonomika a řízení energetiky

Vedoucí práce: Ing. Michal König

Bc. Marek Vaniš

Praha 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: Vaniš Marek

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Ekonomika a řízení energetiky

Název tématu: Ostrovní provoz fotovoltaické a větrné elektrárny

Pokyny pro vypracování:

- charakteristika odběru ve vybraném objektu
- zpracování modelů fotovoltaické a větrné elektrárny a porovnání s naměřenými údaji
- sestavení variant a stanovení investičních a provozních nákladů
- analyzujte nebezpečí zásahu blesku a ekonomiku výměny FV panelů po zásahu

Seznam odborné literatury:

Pivrnec J.: Finanční management. Grada Praha 1995, ISBN 80-85623-92-7

Vítek M. Ekonomika dopravních energetických systémů. Skriptum FEL ČVUT, Praha 2008, ISBN 978-80-01-04181-9.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Michal König – OSVČ – projekce, revize a elektro poradenství

Platnost zadání: do konce letního semestru akademického roku 2016/2017

L.S.

Prof. Ing. Jaroslav Knápek, CSc.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 12.4.2016

Prohlášení:

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem č. 1/2009 o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

V Praze dne 25. 5. 2016

.....

Marek Vaniš

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Michalu Königovi za cenný čas, potřebné rady a doporučení, které mi poskytl při tvorbě této diplomové práce. Dále chci poděkovat Ing. Miroslavu Vítkovi, na kterého jsem se obracel a který se mnou celou problematiku konzultoval.

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou ostrovního provozu kombinace fotovoltaické a větrné elektrárny na příkladu vybraného objektu. Teoretická část se věnuje ostrovnímu systému a jeho komponentům, popisuje jejich princip práce a funkci v systému. Praktická část se věnuje charakteristice zatížení, vytvoření modelů fotovoltaické a větrné elektrárny a jejich porovnání se skutečnými naměřenými podmínkami. V poslední části jsou sestaveny tři varianty způsobu využití domu, pro které je zpracován návrh ostrovního systému, jenž je následně ekonomicky posouzen.

Klíčová slova:

Ostrovní systém, off-grid, hybridní systém, fotovoltaická elektrárna, větrná elektrárna

Abstract

The thesis deals with issues of an off-grid operation of photovoltaic and wind power plant integrated within a chosen building. The theoretical part is dedicated to off-grid system and its components, which are described within its function in the system and basic principles of how they work. The practical part is dedicated to load characteristics, photovoltaics and wind energy conversion system model creation and its comparison to measured values. In the last part there are created three variants of load characteristics, for which have been designed an off-grid system with later economical evaluation.

Key words:

Island system, off-grid system, hybrid system, photovoltaics, wind turbine

Obsah

Obsah	7
Úvod.....	10
1 Ostrovní systém a jeho komponenty	11
1.1 Ostrovní systém	11
1.1.1 Ostrovní systém bez akumulace.....	11
1.1.2 Ostrovní systém s akumulací	11
1.1.3 Hybridní ostrovní systém.....	11
1.1.4 Spolupráce FVE a VTE.....	12
1.2 Fotovoltaické články	12
1.2.1 Princip fotovoltaiky.....	12
1.2.2 Technologie fotovoltaických článků	13
1.2.3 Charakteristika fotovoltaických článků.....	13
1.2.4 Srovnání fotovoltaický panelů	14
1.2.5 Sluneční záření.....	15
1.3 Větrná turbína	18
1.3.1 Princip větrné turbíny.....	18
1.3.2 Charakteristické vlastnosti větrných turbín.....	18
1.3.3 Energie větru.....	19
1.3.4 Weibullovo rozdělení.....	20
1.3.5 Vhodné lokality pro výstavbu větrných turbín.....	21
1.4 Regulátor nabíjení.....	21
1.4.1 MPPT	22
1.5 Baterie	23
1.5.1 Charakteristika baterií	23
1.5.2 Porovnání materiálů sekundárních baterií.....	24
1.5.3 Srovnání baterií	26
1.6 Elektrocentrála	26

1.7	Střídač	27
2	Charakteristika zatížení.....	28
2.1	Seznam spotřebičů	28
2.2	Diagram zatížení	29
2.2.1	Průměrný roční diagram trvání zatížení.....	29
2.2.2	Srovnání diagramů zatížení.....	30
2.2.3	Průměrný letní a zimní den	31
2.2.4	Charakteristické hodnoty spotřeby.....	32
2.3	Stávající fotovoltaická elektrárna.....	32
3	Posouzení místa instalace.....	35
3.1	Model FVE a srovnání s naměřenými údaji.....	35
3.1.1	Model FVE.....	35
3.1.2	Porovnání modelu se stávající FVE	36
3.2	Model VTE a srovnání s naměřenými údaji	37
3.2.1	Model VTE	37
3.2.2	Porovnání modelu rychlosti větru a naměřeného větru.....	37
3.3	Dimenzování hybridního systému	39
3.4	Model FVE, VTE s bateriemi a elektrocentrálou.....	40
3.5	Analýza nebezpečí zásahu blesku a výměny FV panelů po zásahu.....	42
4	Sestavení variant a stanovení investičních a provozních výdajů	44
4.1	Investiční a provozní náklady	45
4.2	1. varianta – Současný diagram zatížení s celoročním užíváním objektu.....	46
4.3	2. varianta – Omezená spotřeba elektrické energie na vytápění a celoroční využití objektu.....	49
4.4	3. varianta – Současný diagram zatížení a pouze letní využití objektu.....	50
4.5	Srovnání variant	52
4.5.1	Energetické srovnání variant.....	52
4.5.2	Ekonomické srovnání variant.....	53
4.5.3	Environmentální hodnocení	54
	Závěr	57
	Použitá literatura a zdroje informací.....	59
	Seznam zkratk	63
	Seznam obrázků	64

Seznam tabulek	65
Seznam použitých externích souborů	66

Úvod

Současný trend podpory obnovitelných zdrojů neustále posouvá jejich pořizovací cenu do přijatelnějších mezí. V ČR jsou podporovány zdroje připojené k síti, zejména pro vlastní spotřebu provozovatele, protože vzhledem k cenám elektrické energie v distribuční síti, nejsou ceny elektřiny z malých větrných a slunečních elektráren konkurenceschopné, i tato podpora však zlevňuje cenu komponentů pro ostrovní systémy.

Na druhou stranu cena elektřiny z malé sluneční i větrné elektrárny může v závislosti na lokálních podmínkách konkurovat ceně produkce elektřiny z elektrocentrály. Proto jsou tyto zdroje vhodné zejména pro provoz bez připojení k distribuční síti. Jelikož jsou vítr i slunce těžko předvídatelné, jsou sluneční a větrné elektrárny doplňovány záložním zdrojem.

Cílem této diplomové práce je charakterizovat spotřebu rodinného domu na základě předpokladu a srovnat s naměřenými hodnotami. Vytvořit model sluneční a větrné elektrárny a modely porovnat s naměřenými hodnotami přímo v místě objektu. Navrhnout model spolupráce těchto zdrojů s bateriemi a elektrocentrálou. A v poslední části budou sestaveny varianty způsobu použití domu a navrhnout systém pro pokrytí spotřeby.

1 Ostrovní systém a jeho komponenty

1.1 Ostrovní systém

Ostrovní systém je takový systém, který není napojen na veřejný rozvod elektrické energie, tzv. off-grid. Je ideální zejména pro objekty, které nemají možnost se s rozvodné sítí připojit. Součástí takového systému bývají obnovitelné zdroje elektrické energie, případně akumulátory a záložní systém na fosilní paliva pro zvýšení spolehlivosti dodávky.

1.1.1 Ostrovní systém bez akumulace

Z hlediska ztrát je pro ostrovní systém nejvýhodnější elektrickou energii ihned spotřebovávat. Pokud jsou spotřebiče přímo napájené, spolehlivě a správně začínají pracovat až ve chvíli stálé a dostatečné produkce. Systémy bez akumulace jsou vhodné pro čerpání vody do zásobníku a jako sekundární elektrický dohřev TUV či topení nebo jako doplňkový systém snižující variabilní náklady jiného primárního systému.

1.1.2 Ostrovní systém s akumulací

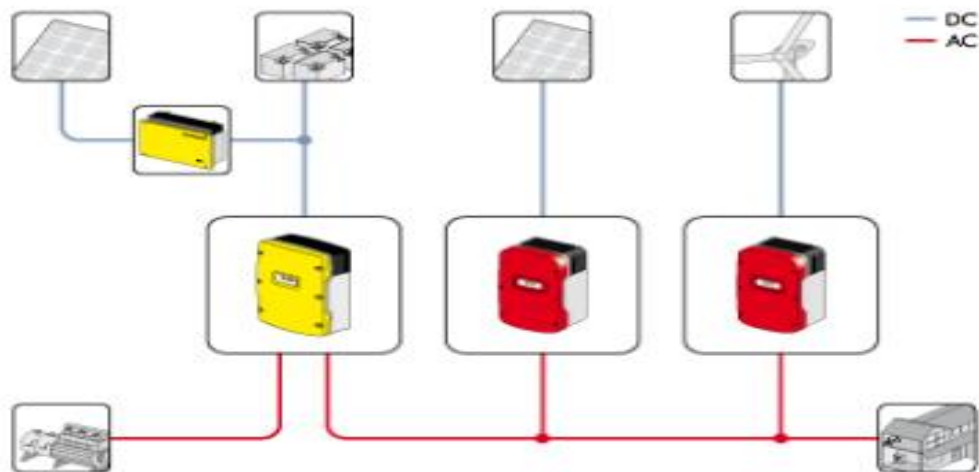
U ostrovních systémů založených na energii větru a slunce se většinou časově nekryje velikost výroby a spotřeby, proto je potřeba elektrickou energii uložit pro pozdější využití. K tomuto účelu se využívají akumulátory energie. Akumulovat elektrickou energii je možné do jiných forem energie, například do chemické energie (baterie, palivové články), gravitační potenciální energie (přečerpávací vodní elektrárna), kinetické energie (setrvačnick). Velikost akumulátoru je dána požadovaným výkonem, spotřebě a počtu autonomních dní. Počet autonomních dnů vyjadřuje časový úsek, po který je akumulací systém schopný krýt spotřebu pouze z akumulátoru, bez dalšího zdroje.

Z hlediska objemu uložené energie je každá uložená kilowatthodina cennější než energie přímo spotřebovávaná, proto je třeba dosáhnout co nejmenších ztrát energie použitím vysoce účinných součástí systému a úsporných spotřebičů.

1.1.3 Hybridní ostrovní systém

Hybridní systém je takový systém, který využívá více než jeden zdroj energie. V podmínkách české republiky je neefektivní pokrývat celoroční spotřebu objektu jedním zdrojem. Například v zimním období je spotřeba energie větší než v létě. Na druhou stranu fotovoltaický systém produkuje méně energie v zimě než v létě, což by vedlo k dimenzování výkonu FV systému na zimní období a tedy velkému počtu panelů, jejichž výkon by byl v létě nevyužitý. Nápodobně malé řeky a potoky v létě mohou vysychat a v zimě zamrzat. Vzhledem k tomu, že obnovitelné zdroje jsou těžko předvídatelné, systém potřebuje záložní zdroj, elektrocentrálu na benzín, naftu či propan butan.

Vzhledem k dostupným zdrojům „paliv“ byl pro zásobování domu elektrickou energií vybrán hybridní systém, který je založen na slunečním záření a větru s ukládáním přebytečné energie do baterií a elektrocentrála. Schéma hybridního ostrovního systému je znázorněno, viz Obrázek 1.



Obrázek 1 - Schéma instalace hybridního systému [32]

1.1.4 Spolupráce FVE a VTE

Teorie spolupráce fotovoltaického a větrného generátoru spočívá v tom, že v období kdy je dostatek slunečního svitu, nefouká vítr a naopak. Tato komplementarita větrné a sluneční energie platí jak během hlavně během různých ročních období. [1] [2] [3] Tím je zajištěn stálý přísun energie. Stálá produkce elektrické energie znamená z hlediska dimenzování drahých baterií investiční úspory. Pro potvrzení této hypotézy je potřeba získat meteorologická data přímo z místa instalace.

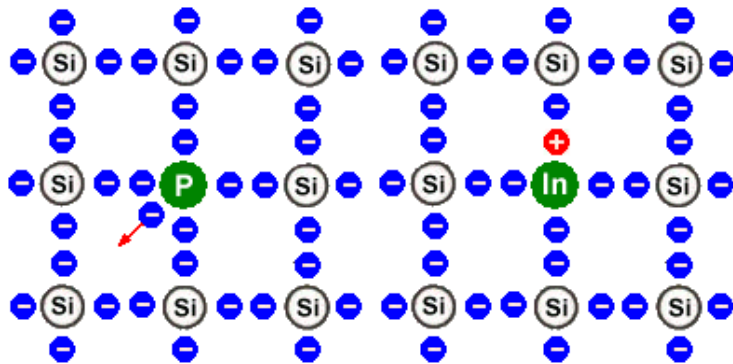
Hybridní ostrovní systém se skládá z fotovoltaických článků (FV panelů), větrné turbíny, regulátoru nabíjení (s MPPT, maximal power point tracker – zařízení pro vyhledávání ideálního bodu výkonu), baterií, měniče, elektrocentrály a dalších komponentů jako kabeláž, ochrany, stožár a konstrukce pro upevnění větrného generátoru a FV panelů atd.

1.2 Fotovoltaické články

Fotovoltaické panely (složené z článků) využívají přeměny energie obsažené ve slunečním záření na elektrickou energii. Nejpoužívanější jsou technologie založené na polovodičích, ale existují i technologie založené na organických látkách. Fotovoltaické panely se skládají z paralelně i sériově spojených článků.

1.2.1 Princip fotovoltaiky

Ve fotovoltaice jsou používány polovodiče, u kterých, pokud jsou vystaveny světelnému záření, dochází k elektrické vodivosti. Fotovoltaický článek je velkoplošná polovodičová dioda s P-N přechodem mezi dvěma polovodiči. Ve chvíli kdy je článek vystaven dostatečnému světelnému záření, fotony předávají svou energii materiálu polovodiče. Pokud by v polovodiči nebyl P-N přechod, excitované elektrony by cestovaly volně a nestaly by se zdrojem napětí.



Obrázek 2 - Vodivost typu N [4]

Obrázek 3 - Vodivost typu P [4]

Vodivost typu N

Pokud bude jako polovodič použit čtyřmocný křemík a budou některé atomy křemíku v mřížce nahrazeny pětímocným prvkem (např. fosfor, arsen, antimon), vznikne polovodič typu N (negativní). Prvek, který má o jeden elektron více, se nazývá donor. Volný, nevázaný elektron je snadno oddělitelný a může se pohybovat krystalickou mřížkou.

Vodivost typu P

Vodivost typu P (pozitivní) je opakem typu N. Do křemíku je přidán prvek se třemi valenčními elektrony (indium, galium, hliník, bor), takový se nazývá akceptor. Tak je možné, aby elektrony přeskakovaly do těchto děr, a tím vznikne pozitivní děrová vodivost.

Oblast styku polovodiče typu P a druhého polovodiče typu N se nazývá P-N přechod. Charakteristickou vlastností tohoto přechodu je usměrňovací účinek, tzn. propouštění proudu pouze v jednom směru. [4]

1.2.2 Technologie fotovoltaických článků

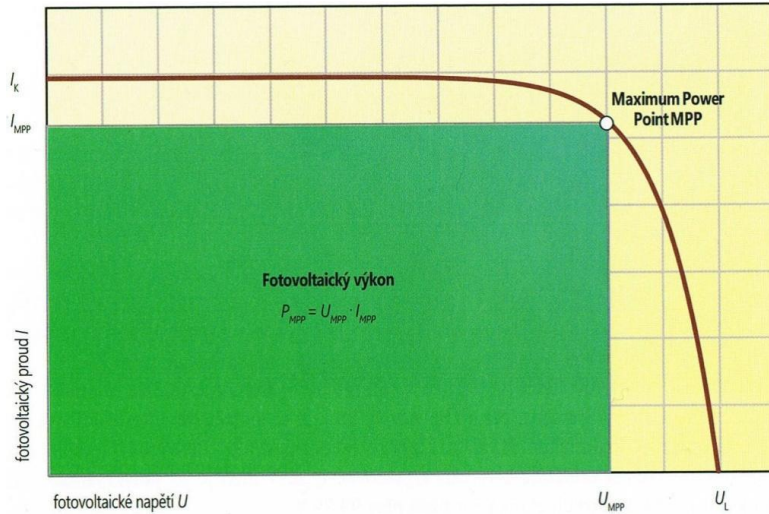
V laboratorních podmínkách je testováno mnoho fotovoltaických technologií. Do komerčního využití se z laboratoře dostaly zejména panely založené na křemíku (Si). Křemíkové panely se člení podle krystalické formy na monokrystalické (mono-Si), polykrystalické (multi-Si) a amorfní (a-Si). Dále na kadmium a telluru (CdTe) a směsi mědi, india, (galia) a selenu (CIS/CIGS).

1.2.3 Charakteristika fotovoltaických článků

Výše uvedené materiály mají samozřejmě různé vlastnosti, dále budou porovnány podle svých základních charakteristik.

U-I charakteristika

Charakteristika vycházející z bodu napětí naprázdno a bodu zkratového proudu. Křivka mezi těmito body charakterizuje článek při všech napětích i proudech. Maximální výkon článku je dán největším obdélníkem sestrojeným pod bodem maximal power point (MPP). U-I charakteristiku bývá možné vyčíst z datového listu panelu. O to, aby panel pracoval v optimu soustavy, se stará regulátor nabíjení. Aby pracoval na svém maximu se stará tzv. maximal power point tracker (MPPT), který nastaví příslušnou hladinu napětí.



Obrázek 4 - U-I charakteristika [5]

Jmenovitý výkon

Jmenovitý výkon (peak) panelu je dán účinností přeměny energie při osvitu 1000 W/m^2 . Hodnota jmenovitého výkonu je vztažena k ploše panelu $A \text{ [m}^2\text{]}$, účinnosti přeměny energie $\eta_{nom} \text{ [%]}$ a $H_0 = 1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$, za standardizovaných podmínek při $25 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$P_{peak} = H_0 * \eta_{nom} * A$$

Účinnost

Jedna z hlavních charakteristik PV článků je účinnost transformace energie slunečního záření na elektrickou energii. Stejně jako ostatní charakteristické vlastnosti závisí na materiálu (Si, CdTe, CIGS) a také na kvalitě a jeho čistotě i úpravě (mono/polykrystalická, tenkovrstvá, vícevrstvá). Účinnost v konci závisí i na dodatečných úpravách panelu, například antireflektivní úprava povrchu, speciální nanostruktura povrchu polovodiče, velikost a úprava předních i zadních kontaktů.

1.2.4 Srovnání fotovoltaických panelů

Z vybraných datových listů fotovoltaických panelů vznikla následující Tabulka 1, která porovnává vlastnosti jednotlivých druhů panelů. Jedná se o nejběžnější FV panely na trhu, jejichž datové listy jsou dostupné na internetu. Z těchto důvodů nejsou uvedeny přesné hodnoty, ale téměř vždy jen rozpětí hodnot. Výjimku tvoří panely GaAs, které se na českém trhu nevyskytují. Tyto vysoce účinné a drahé panely se používají výhradně v oblasti astronautiky.

	Poly Si	Mono Si	Amorfní Si	CdTe	GaAs	CIS, CIGS
Účinnost (dostupných panelů na trhu) [%]	13-16	15-20	6-9	10-16	30	7-13
Plocha na 1 kWp [m ²]	6-8	5-6	11-17	6-12	3-4	8-14
Obvyklá záruka na výkon [roky]	25	25	25	25	25	25
Teplotní koeficient [%/K]	od -0,37 do -0,44	od -0,45 do -0,5	od -0,27 do -0,21	od -0,2 do -0,29	-0,21	od -0,31 do -0,39
Tržní cena [Kč/Wp]	11,25 – 17,5	12,25 – 23,75	2,5 - 15	10	75	15

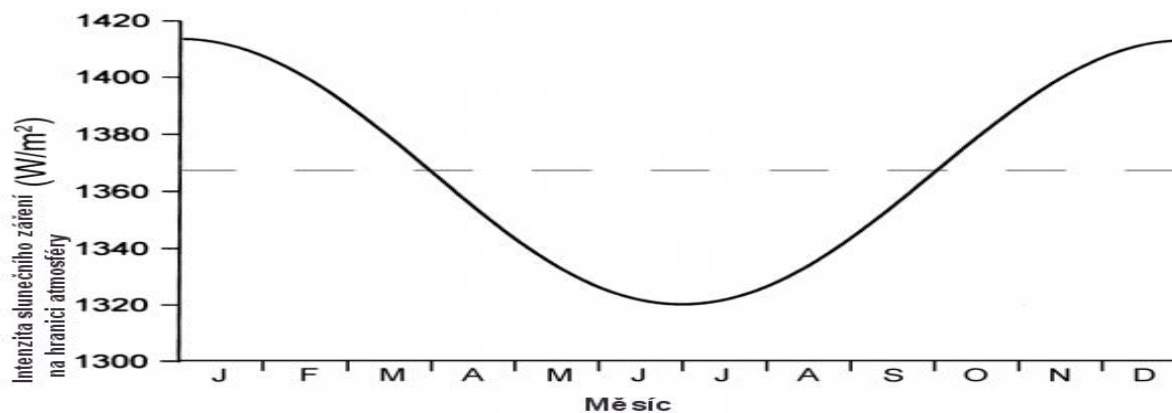
Tabulka 1 - Srovnání fotovoltaických panelů

1.2.5 Sluneční záření

Výkon panelu dále závisí na aktuálním slunečním záření a úhlu dopadu tohoto záření. Zdrojem záření je Slunce. Vyzářuje obrovské množství energie, celkem přibližně o výkonu 63 MW/m². Jak toto záření putuje vesmírem, je zachycováno objekty a mezihvězdným prachem. Čím dále záření putuje, klesá na intenzitě. Když záření doputuje až k Zemi (na hranici atmosféry) jeho vždy za paralelní a o velikosti solární konstanty.

Sluneční konstanta a sluneční záření během roku

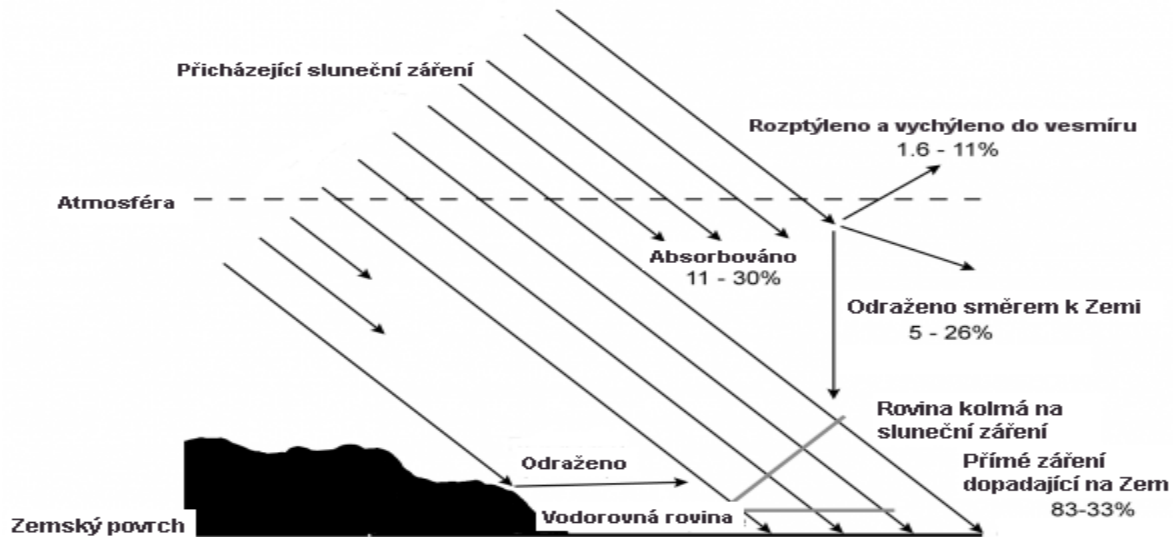
Sluneční konstanta je hodnota výkonu záření, které přichází k zemi, konkrétně byla naměřena hodnota 1361 W/m² a v průběhu se prakticky neliší. Je měřena ve stále stejné vzdálenosti od Slunce. Na rozdíl od sluneční konstanty se množství slunečního záření přicházejícího k zemi mění, protože se Země pohybuje kolem Slunce na elipse, vzdálenost mezi nimi se během roku liší a tím pádem jsou rozdílné i velikosti slunečního záření. Sluneční konstanta se během roku liší jen v závislosti na aktivitě Slunce, množství slunečního záření přicházejícího k Zemi je o 7 % procent vyšší v lednu než v červenci.



Obrázek 5 - Sluneční konstanta, (Zdroj: [6], přeložil Autor)

Atmosférické efekty a rozdělení záření v atmosféře

Jak sluneční záření přichází k Zemi, vstupuje do atmosféry, kterou je silně ovlivněno. Země zachytí přibližně jen 50 % ze sluneční konstanty. Díky vlivům v atmosféře je 11-30 % absorbováno, 1,6-11 % odraženo zpět do vesmíru, 5-26 % odraženo k zemi pod jiným úhlem než původním.



Obrázek 6 - Sluneční záření po vstupu do atmosféry (Zdroj [6], přeložil Autor)

Optimální úhel

Úhel náklonu panelu je dán úhlem náklonu Země, roční dobou, polohou panelu na Zemi a hodinou v daném dni.

Úhel deklinace

Osa rotace země je nakloněna pod úhlem 23,45 °, což je měřeno vzhledem k rovině, která je proložena elipsou oběhu Země kolem Slunce. Úhel mezi bodem na Zemi nacházejícím se na rovníku a středem Sluncem se mění během roku a nazývá se úhel deklinace (δ).

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360 * (284 + n)}{365} \right]$$

Kde n je číslo pořadí dnu v roce ($n=1$ je 1. ledna). Hodnota δ nabývá hodnot od -23,45 ° (zimní slunovrat) do 23,45 ° (letní slunovrat).

Hodinový úhel

Hodinový úhel je dán zeměpisnou šířkou. Fakt, že se Slunce otáčí kolem své osy, zjednodušuje orientační výpočet hodinového úhlu. 1 otáčka je 360 ° a trvá 24 hodin, proto je hodinový úhel (ω_s) dán následujícím vzorcem.

$$\omega_s = (ST - 12) * 15^\circ$$

Kde ST je pravý solární čas (lokální čas, bez letní/zimní změny).

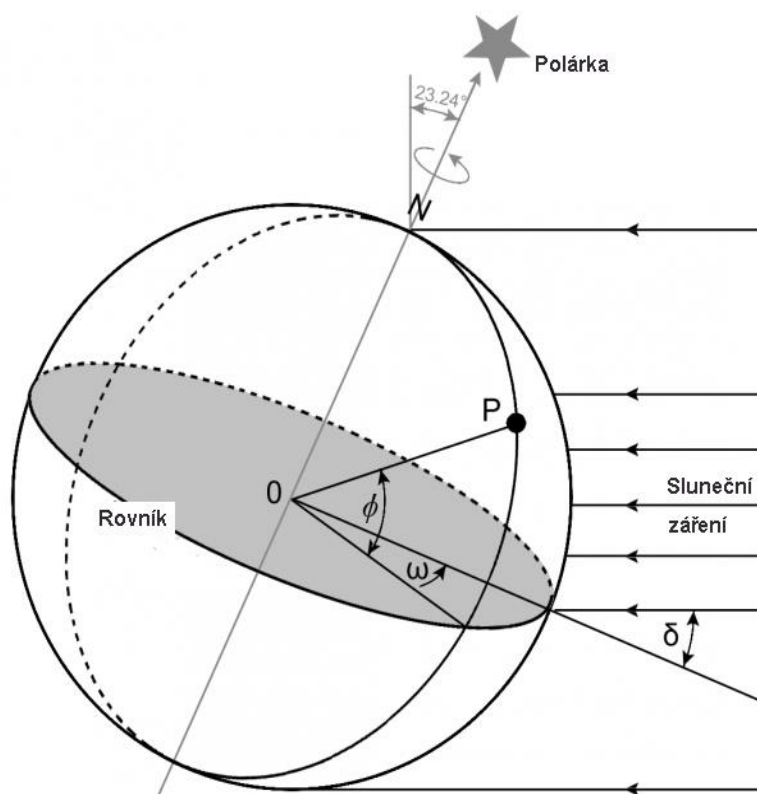
Hodinový úhel (azimut) je záporný od úsvitu a roste do nuly v poledni (kdy bod P na míří přímo ke Slunci – ObrázekObrázek 7), odpoledne se hodnota hodinového úhlu zvyšuje do kladných hodnot až do západu Slunce. Úhel je vždy shodný pro všechna místa s danou zeměpisnou délkou. [7]

Výška Slunce nad obzorem

Úhel dopadajícího slunečního záření (h), výška Slunce nad obzorem se určí podle zeměpisné šířky a úhlu deklinace podle následujícího vzorce.

$$h = 90^\circ - \psi + \delta$$

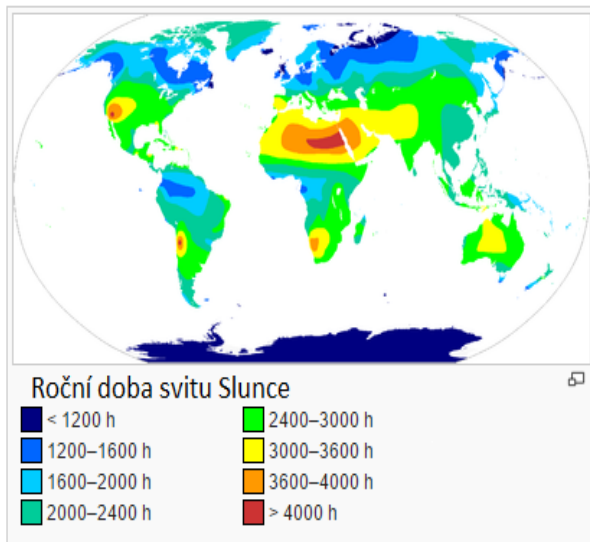
Kde ψ je zeměpisná šířka daného místa, δ je úhel deklinace. [7]



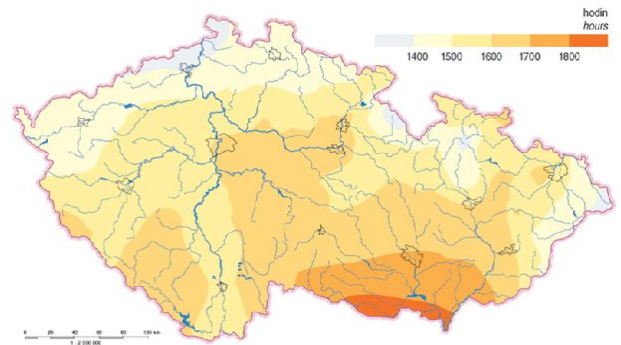
Obrázek 7 - Úhel Slunce nad obzorem (Zdroj: [6], přeložil Autor)

Doba slunečního svitu

Podmínky pro využití sluneční energie v ČR v porovnání s celým světem jsou špatné (viz Obrázek 8). I na malém území jako je ČR se množství hodin liší podle lokality. Doba slunečního svitu bez oblačnosti je 1400 až 1700 hodin za rok (Obrázek 9).



Obrázek 8 - Celosvětová mapa ročního úhrnu doby svitu Slunce (Zdroj: [8], přeložil autor)



Obrázek 9 - Mapa ČR ročního úhrnu doby svitu Slunce [9]

1.3 Větrná turbína

1.3.1 Princip větrné turbíny

Zhruba 2 % slunečního záření je přeměněno na pohyb větru, ze které je však využitelná jen část. Působení aerodynamických sil větru na listy rotoru je tato síla převedena na rotační mechanickou sílu, která je dále pomocí generátoru převedena na sílu elektrickou. Tyto systémy jsou označovány jako větrné elektrárny (VTE) v anglické literatuře pak jako Wind Energy Conversion System (WECS). [5]

1.3.2 Charakteristické vlastnosti větrných turbín

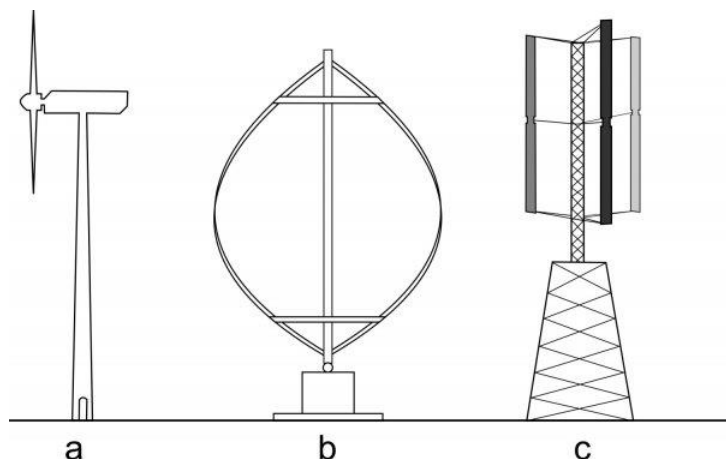
Osa rotace

Podle směru osy rotace se větrné turbíny dělí na horizontální a vertikální. Podle využití větru jsou potom vztlkové a odporové.

Horizontální Ze všech nejčastější jsou vztlkové turbíny se třemi lopatkami (typ „a“ Obrázek 10). Vztlkové lopatky se mohou pohybovat rychleji než vzduch proudící kolem nich, musí se však natáčet kolmo na směr větru. Nevýhodou horizontálních elektráren je, že převodovka a generátor musí být umístěn vysoko nad zem, což zvyšuje náklady na stožár a základy stožáru.

Vertikální Příkladem vztlkové vertikální turbíny je Darrierův rotor (typ „b“ Obrázek 10). Převodovka a generátor je umístěn na zemi a nepůsobí tak žádné problémy při stavbě. Příkladem odporové turbíny je Savoniova turbína (typ „c“ Obrázek 10). Tyto turbíny se nemusí natáčet na směr větru, dosahují však všeobecně menších účinností.

Tabulka 2 - Osa rotace větrných turbín



Obrázek 10 - Osa rotace větrných turbín [10]

Velikost

Mikro větrné turbíny se používají k produkci stejnosměrného proudu pro nabíjení baterií. Pro ostrovní provoz s malou spotřebou jsou vhodné malé větrné turbíny, které se mimo jiné používají k ohřevu vody a vytápění. Střední a velké jsou vhodné jako přímo generující elektrickou energii do rozvodné sítě.

	Mikro	Malá	Střední	Velká
Průměr rotoru [m]	≤ 2	≤ 16	≤ 45	> 45
Plocha turbíny[m²]	≤ 40	≤ 200	≤ 1600	> 1600
Nominální výkon [kW]	≤ 2,5	≤ 60	≤ 750	> 750

Tabulka 3 - Velikost větrných turbín [11]

1.3.3 Energie větru

Energie větru je nejvíce ovlivňována hustotou vzduchu, velikostí oblasti, kterou prochází a rychlostí větru. Rychlost větru je dále závislá na výšce nad zemí a drsností krajiny. Pokud je oblast průchodu větru kruhová (horizontální turbína), je energie větru spočtena podle následujícího vzorce:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 \pi r^2$$

Kde P výkon [W], ρ hustota vzduchu [kg/m³], v je rychlost větru [m/s], π je matematická konstanta, která udává poměr poloměru kružnice ke svému obvodu [], r je poloměr kruhové oblasti[m]. [5] [12]

Jak je ze vzorce patrné, výkon větru je ovlivněn třetí mocninou rychlosti větru, a proto je tento parametr velmi důležitý. Z toho také plyne, že není možné stanovit energii ve větru, pokud je znám průměrná rychlost větru v dané lokalitě. Průměrná rychlost větru slouží pouze k odhadu vhodnosti lokality.

Pro přepočítání mezi známou rychlostí v v určité výšce a neznámou rychlostí větru v_0 v jiné dané výšce je používána Hellmanova rovnice:

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^a$$

Kde v je rychlost větru v požadované výšce h , v_0 je známá referenční rychlost v dané výšce h_0 , a je koeficient drsnosti krajiny, viz následující Tabulka 4. [13]

Třída drsnosti	Popis krajiny	a
0	Otevřená krajina, vodní hladina, písek	0,12
1	Otevřená krajina s ojedinělými keři a stromy	0,15
2	Zemědělská krajina s ojedinělými budovami a stromy	0,18
3	Členitá krajina se stromy, keři, a sousedícími budovami	0,24
4	Vesnice a malá města	0,48

Tabulka 4 - Třídy drsnosti a koeficient Hellmanovy rovnice

Rychlost větru je dále ovlivněna

1.3.4 Weibullovo rozdělení

Údaj o průměrné rychlosti větru je informativní, rychlost větru se stále mění. Při neustálém měření v hodinových intervalech je možné získat 8760 hodinových průměrů rychlosti větru a z těch poté vycházet při výpočtech. Pokud takové měření není k dispozici, a je možné pouze získat průměry za delší dobu měření, při stanovení rozdělení četnosti rychlosti větru je možné využít Weibullovo rozdělení, které se pro rychlosti větru typicky využívá.

Weibulova pravděpodobnostní funkce $p(v)$ pro rychlost větru v vypadá následovně:

$$p(v) = \left(\frac{k}{C}\right) \left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{C}\right)^k\right]$$

Tento výraz je platný pro špičatost (k) Weibulova rozdělení $3 > k > 1$, pokud je k blíže 1, rozdělení rychlosti větru se pohybuje relativně široko od průměrné rychlosti větru a rozdělení pravděpodobnosti je tedy široké. Pokud je k blíže 3 znamená to relativně špičaté rozdělení a rychlosti větru se pohybují relativně blízko průměrné rychlosti. Dále platí pro rychlost větru $v \geq 0$, a $C > 0$, C je faktor škály, která je dána následujícím vzorcem.

$$C = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}$$

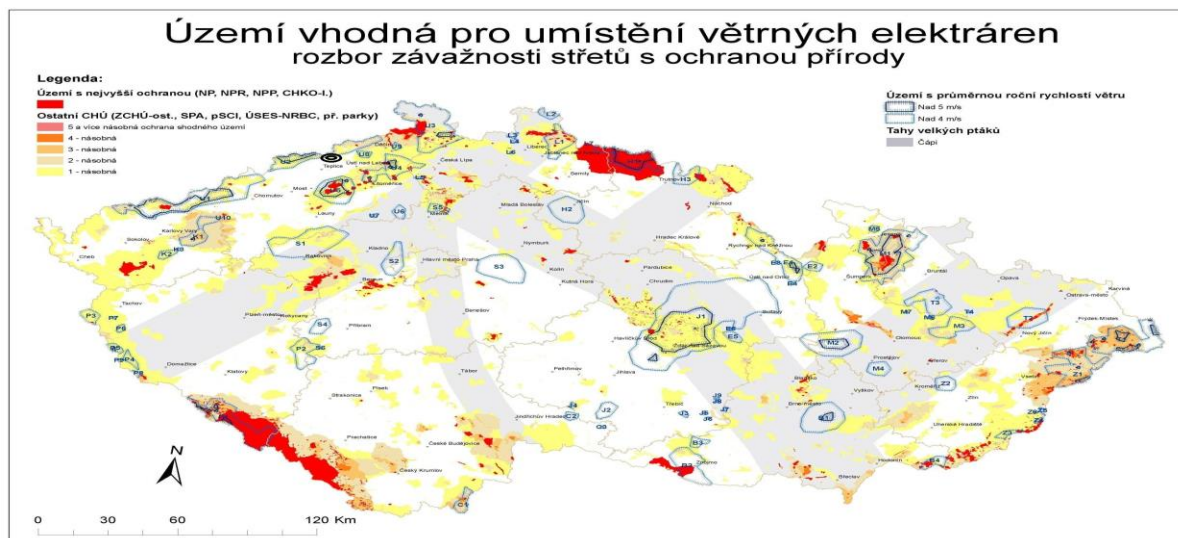
Kde \bar{v} je průměrná rychlost větru a Γ je gamma funkce. [14]

1.3.5 Vhodné lokality pro výstavbu větrných turbín

V ČR je málo oblastí, která jsou pro výstavbu větrných turbín doporučována vzhledem k rychlostem větru na daném území. Na některých místech, kde je dostatečná rychlost větru, výstavbě zamezují pásma ochrany přírody.

Na následujícím obrázku jsou vymezeny vhodné oblasti pro výstavbu VTE, světle modře vhodné oblasti a tmavě modře velmi vhodné lokality. V červených oblastech výstavba není možná, protože se jedná o území s nejvyšší ochranou. [31] Černým kolečkem je vyznačeno místo rodinného domu, pro který je instalace VTE uvažována. Dům leží na hranici vhodného území. Přibližně tři kilometry a 350 výškových metrů od domu jsou instalovány dvě dvoumegawattové turbíny.

Jelikož podmínky výše uvedených velkých turbín a tam kde je uvažována výstavba malé VTE pro rodinný dům se liší, lokální podmínky jsou v tomto případě při rozhodování o výstavbě VTE rozhodující. V literatuře se uvádí, že je potřeba minimálně jednorocní měření rychlosti větru v případě takovýchto situací. [5] Posouzení místo instalace pro větrnou elektrárnu se nachází v kapitole 3.2



Obrázek 11 - Vhodné lokality pro výstavbu VTE v ČR

1.4 Regulátor nabíjení

Regulátor (charger) má na starosti nabíjení akumulátoru. Optimální nabíjení zajišťuje tím, že upraví výstupní napětí z FV generátoru, větrného generátoru a elektrocentrály na úroveň vhodnou pro nabíjení baterií. Regulátor má za úkol řídit tři hlavní procesy, nicméně může pracovat s více informacemi, které je schopný sledovat. Například řídí nabíjení i v závislosti na teplotě baterie, reguluje „přebytečnou“ energii ve spolupráci s předem určeným spotřebičem, nebo rozpozná typ připojené baterie a nabíjí podle programu vhodného pro danou baterii. [15]

Optimální nabíjení

Během nabíjení regulátor hlídá a řídí, aby byla baterie nabíjena optimálním proudem, tak aby zajistil co nejdelší životnost baterie. Regulátor sleduje napětí na bateriích a při dosažení koncového nabíjecího

napětí sníží nabíjecí napětí na doporučovanou nabíjecí hodnotu po určitou dobu. Po uplynutí této doby proces ukončí a odpojí baterie od zdroje, aby nedocházelo k jejich přebíjení.

Hloubka vybití

Stejně jako regulátor chrání baterie před přebíjením, chrání je i před přílišným vybitím. Pokud napětí poklesne na limitně stanovenou úroveň, regulátor odpojí baterie od spotřebičů a zabrání tak dalšímu vybití a poklesu napětí.

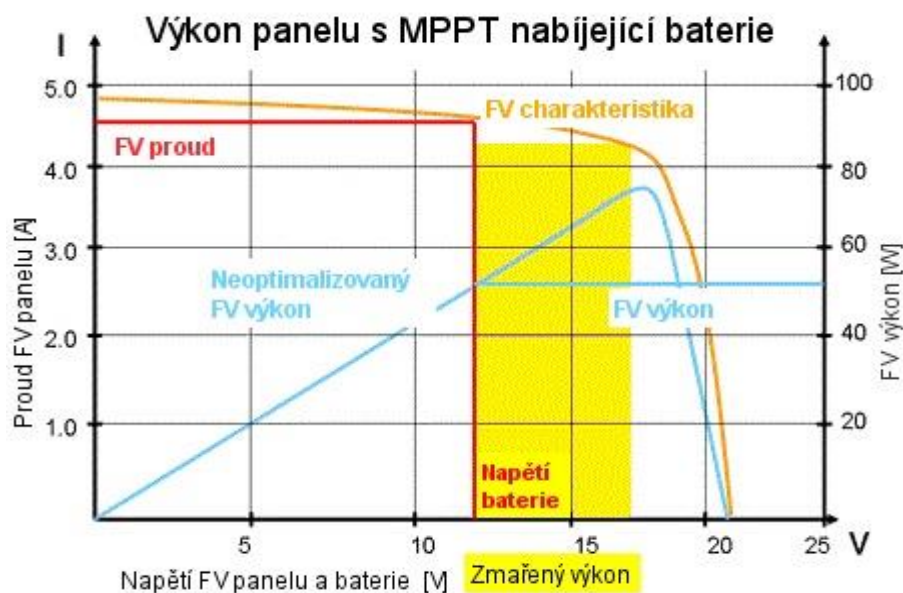
Chrání baterie před vybitím přes solární generátor

Díky svému vnitřnímu odporu se fotovoltaický panel za tmy mění na spotřebič, což by při absenci regulátoru a vestavěné diodě vedlo k obrácení toku energie směrem z akumulátoru do panelu. Tím by byly baterie soustavně vybíjeny prakticky každou noc.

1.4.1 MPPT

Napětí systému je řízeno regulátorem v závislosti na bateriích, což snižuje účinnost systému. Generátory totiž nemohou pracovat při optimálním napětí, to je řešeno právě regulátorem s MPPT. Takový regulátor má integrovaný převodník stejnosměrného napětí, čímž odstraňuje problém s rozdílnými optimálními napětími generátorů a baterií. Následující Obrázek 12 ukazuje na příkladu s 12V baterií a 17V panelem, žlutě vyznačená oblast zobrazuje výkon panelu, který je plýtván při použití klasického regulátoru nabíjení oproti regulátoru s MPPT. Na ose x je napětí, na ose y vpravo výkon a vlevo proud, oranžově je zobrazena UI charakteristika fotovoltaického generátoru. Klasický regulátor bude pracovat na úrovni 12V a 2,6 A tzn., omezí výkon panelu z 85 W (MPP) na 55 W.

Regulátor s MPPT je několikanásobně dražší než klasický regulátor, účinnost klasického regulátoru je přibližně 80 % a účinnost regulátoru s MPPT i >99 %. [16]



Obrázek 12 – Maximal power point tracker - MPPT

1.5 Baterie

Z hlediska účinnosti je nejvýhodnější, pokud je vyrobená energie přímo spotřebovávána. Je však nutné přebytky uchovat pro pozdější použití, kdy jsou zdroje energie nedostačující aktuální spotřebě. K tomuto účelu slouží baterie. Dnes je na trhu mnoho druhů baterií a ne všechny jsou vhodné k použití v systému napájení rodinného domu.

1.5.1 Charakteristika baterií

Primární a sekundární baterie

Hlavní rozdíl mezi primárními a sekundárními bateriemi je ten, že sekundární je možné opakovaně vybit a nabít. Celosvětově poptávka po sekundárních bateriích roste. Příčinou je jejich využití v elektronice, automobilovém průmyslu i energetických systémech pro napájení objektů. [15] Nejčastěji používané trakční baterie jsou lithiové a olovené a Nikl-metal hydridové akumulátory.

Kapacita

Kapacita je měřena v ampérhodinách (Ah) nebo kilowatthodinách (kWh). Kapacita sekundární baterie by neměla být nikdy využita ze 100 %, ale podle doporučení výrobce. Trakční a stacionární baterie jsou si velmi podobné strukturou a využitím, oboje jsou doporučovány vybit maximálně na 20 - 50 % úroveň nabití, podle typu konstrukce.

Při porovnávání baterií se používá veličina specifická kapacita, ta je vztažena na kilogram hmoty baterie. V jednom systému by měly být používány baterie stejného typu, pouze od jednoho výrobce, ideálně i ze stejné série, aby se co nejméně lišila jejich kapacita (a také napětí), a navzájem se baterie vzájemně neovlivňovaly (vzájemně se nedobíjeli, přebíjení baterií s nižší kapacitou atd.)

Nabíjení a vybití

Dynamický vývoj výkonu je dán stavem nabití (state of charge – SOC) anebo hloubkou vybití (depth of discharge – DOD).

$$DOD = 100 \% - SOC$$

Napětí v baterii není stálé, ale snižuje se a vzrůstá spolu s úrovní vybití, resp. nabití. Podle napětí baterie je možné změřit přesný SOC podle tabulkových hodnot dané baterie. Přílišné přebíjení a nedobíjení je pro baterii škodlivé. V případě že dojde k přebíjení, baterie se zahřívá, což způsobuje vedlejší reakce, a mechanické pnutí díky čemuž může být baterie zničena nebo nenávratně snížena kapacita. Pokud baterie dlouhodobě zůstane ve vybitém stavu, kapacita aktivních látek v baterii nenávratně klesá.

Využitelná část baterie je stanovena stavem zbývající energie. Trakční a stacionární baterie je doporučováno provozovat podle pokynů výrobce, bez ovlivnění životnosti to bývá mezi 30-100 % SOC. [17]

Cykly baterie

Jedním cyklem je u baterie nazýváno jedno vybití a nabití využitelné části baterie. Životnost baterie, tedy počet cyklů je omezen a závisí na chemii baterie, hloubce vybití, předchozí historii (např. skladování) a na výrobci. Počet cyklů u nové baterie určuje, kolik cyklů baterie vydrží při správné údržbě a provozu. Po

uplynutí počtu cyklů je baterie stále použitelná, sníží se však kapacita baterie. Konec životnosti se většinou považuje 50-80% původní kapacity.

Teplotní limity

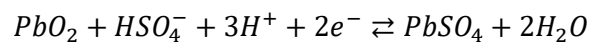
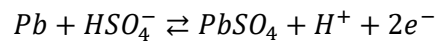
Baterie podávají špatný výkon při extrémně nízkých a vysokých teplotách. Nízké teploty zamezují pohybu reaktantů a způsobují vedlejší reakce (např. pokovování elektrod). Vysoké teploty způsobují rychlejší korozi a vytváření plynů, které zvyšují vnitřní tlak a tlak v baterii, což vede k mechanickému poškození. Aby se předešlo těmto poškozením, baterie jsou od výrobce označeny rozmezí pracovních teplot. [17]

1.5.2 Porovnání materiálů sekundárních baterií

Olověné baterie

V porovnání s následujícími typy je to nejstarší technologie, která zabírá přibližně 40-45 % trhu sekundárních baterií. Což je hlavně díky použití jako startovací baterie v automobilovém průmyslu, existují i olověné trakční a stacionární baterie s vysokou energetickou účinností 70 %.

Chemická reakce probíhající na anodě a katodě zobrazené níže jsou obousměrné, zleva doprava probíhají při vybíjení a zprava doleva při nabíjení.



Největší hrozby pro olověné baterie jsou:

Koroze anody	Způsobuje zvětšení odporu.
Vytváření plynů (vodíku a kyslíku) během přebíjení	Zvyšuje vnitřní tlak, do určité míry se s tímto jevem vypořádá bezpečnostní ventil. Díky ventilu dochází i ke ztrátě vody. Pokud je tlak příliš velký, ventil je trvale poškozen a vnitřní struktura baterie zničena.
Sulfatace	Během vybíjení $PbSO_4$ vytváří krystaly. Nabíjení tyto krystaly mění zpět na aktivní materiál. Sulfatace se děje za vysokých teplot, nebo pokud je baterie ponechána při nízkém napětí (vysoké DOD) po delší dobu. V tu chvíli začíná být problémová, krystalky poté i po plném nabytí zůstanou. Sulfatace snižuje kapacitu baterie.
Poškození separátoru (membrány)	$PbSO_4$ během nabíjení a vybíjení může zaplavit póry separátoru

Tabulka 5 – Procesy zkracující délku života olověné baterie [15] [17]

Olověné startovací baterie jsou většinou pro využití v ostrovním systému nevhodné, jsou projektovány pro dodání vysokého proudu a ihned poté zase dobyty, hluboké vybíjení jim nesvědčí a projevuje se to na jejich životnost. Výjimkou můžou být ostrovní systémy, které mají za úkol vyloženě startování pump a motorů. Naopak olověné VRLA (Valve Regulate Lead Acid) jsou pro použití v běžném ostrovním systému uzpůsobeny. Mezi VRLA patří gelové a AGM (Absorbed Glass Mat) baterie. [15]

Gelové baterie

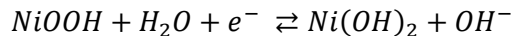
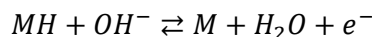
Gelové baterie vychází z technologie startovacích baterií, hlavní rozdíl je v tom, že elektrolyt je v baterii uskladněn ve formě hustého gelu, který je tvořen směsí křemíkové suspenze a elektrolytu. Tento gel zajišťuje, že baterie lépe odolává vyšším teplotám, zvyšuje počet cyklů i při hlubším vybíjení. Baterie je dále více bezpečná, pokud je převrhnuta, elektrolyt neuniká na rozdíl od startovacích baterií. Díky gelu je odolnější vůči otřesům a má nižší rychlost samovybíjení. Gelové baterie mají stejnou kapacitu jako startovací při stejné váze. Gelová baterie má lepší rekombinaci vodíku a kyslíku zpět na vodu a je bezúdržbová.

AGM

AGM baterie obsahuje tekutý elektrolyt, který je nasáknutý do speciální tkaniny ze skla. Výhody AGM jsou následující: dobře odolává nízkým teplotám a podobně jako gelová baterie má dlouhou životnost i při hlubokém vybíjení, nízkou rychlost samovybíjení, vysokou kapacitu při stejné váze a jsou bezúdržbové.

Nikl-Metal Hydridová baterie

Nikl-Metal Hydridová (Ni-MH, M je zde jako zkratka kovu) baterie nabízí vyšší výkonnost, ale při vyšších nákladech než VRLA baterie. NiM-H mají dlouhou životnost a schopnost rychlého nabíjení. Nevýhodou je, že dochází k rychlému samovybíjení. Chemická reakce na katodě a anodě, které jsou obousměrné, tzn., při nabíjení reakce probíhá zleva doprava a při vybíjení zprava doleva. [17]



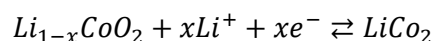
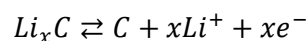
Při nabíjení se vytváří voda. Pokud u NiMH baterií dojde k přebíjení, vzniká vodík a kyslík, což není plně reversibilní děj. Část vodíku a kyslíku se absorbuje zpět do aktivního materiálu, ale tento jev spotřebovává energii a způsobuje tedy mnohem rychlejší samovybíjení. Pokud baterie není používána, je vhodné ji skladovat v chladu, kde dojde ke snížení rychlosti samovybíjení. Další životnost zkracující procesy jsou uvedeny, viz Tabulka 6

Hydrolyza	Proces, při kterém baterie vysychá a zvyšuje se vnitřní odpor a koncentrace elektrolytu.
Koroze	Koroze způsobuje vysychání akumulátoru a ztrátu rovnováhy mezi pozitivní a negativní elektrodou.
Plynování	Aktivní materiál se mění na plyn a tím se zvyšuje tlak v baterii, což má za následek vede až k poškození vnitřního uspořádání baterie.

Tabulka 6 - Procesy zkracující délku života NiM-H baterie [17]

Lithiové baterie

Lithium je velmi lehký kov s velkým elektrochemickým potenciálem. Lithium je používáno s kombinací kobaltu $LiCoO_2$ nebo železa a fosforu $LiFePO_4$, oba typy jsou také nazývány obecně Li-ion. Následuje ukázka rovnic na katodě a anodě při nabíjení a vybíjení.



Lithiové baterie dobře snáší hluboké vybíjení. Stejně jako předešlé baterie mají bezpečnostní ventil. Elektrolyt je absorbován v separátorech. V porovnání s ostatními mají vyšší hustotu energie, vyšší životnost v cyklech i za hlubšího vybíjení. U lithiových baterií jsou hlavním omezujícím prvkem stárnutí procesy dějící se na katodě:

Vrstvení pevného elektrolytu	Pevný elektrolyt blokuje průchod aktivních materiálů ke katodě.
Koroze	Koroze katody snižuje kapacitu tím, že ubývá množství mobilního lithia
Pokovování	Za nízkých teplot se na katodě vytvoří vrstvu kovu, která snižuje napětí, zhoršuje účinnost cyklu a způsobuje nevratný úbytek aktivního lithia.

Tabulka 7 - Procesy zkracující délku života Li-ion baterie [17] [18]

1.5.3 Srovnání baterií

Všechny dále uvedené parametry byly naměřeny při pokojové teplotě.

	Pb baterie	NiMH	Li-ion
Hustota energie [Wh/l]	70	240	400
Specifická energie [Wh/kg]	35	75	150
Počet cyklů	200 (při 100% DOD)	500 (při 80% DOD)	3000 (při 100% DOD)
	1500 (při 25% DOD)	800-3000*	20000 (při 20-40% DOD)
Energetická účinnost [%]	0,65-0,7	0,55-0,65	0,8-0,9
Samovybíjení [%/měsíc]	4-6*	25-30*	<10
Provozní teplota [°C]	-40-60	-20-60	-25-45

Tabulka 8 - Srovnání baterií vhodných do autonomního systému. Zdroj: [17], hodnoty označené * [18]

1.6 Elektrocentrála

Elektrocentrála slouží k pokrytí období, kdy fotovoltaický i větrný generátor neprodukuje dostatečnou energii. Elektrocentrála také může poskytovat peakové výkony a sloužit k dobíjení baterie, aby nedošlo k jejich poškození.

Automatický start/stop elektrocentrály může být nastaven splněním určitých podmínek. Většinou se jedná o hloubku vybití baterií (podle měření napětí na bateriích). Může se jednat o určitý časový interval, který doporučují někteří výrobci komponent pro ostrovní síť. Například Victron Energy doporučuje, nabití olovených baterií alespoň 1x měsíčně na 100 % jejich kapacity, kvůli prodloužení jejich životnosti, zejména zastavení paměťového efektu. Stop elektrocentrály může být zvolen tak, aby byly baterie nabití na určitou úroveň a dále čekat, zda je nedobije FV panely či vítr. Pokud se tak nestane do nastaveného časového intervalu, baterie budou nabití elektrocentrálou

Nabíjení baterií se skládá ze dvou fází. V první fázi se baterie nabíjí konstantním poměrně vysokým proudem až na úroveň cca 80 % SOC u olověných baterií, u lithiových 95 % - přesný údaj je k dostání u výrobce baterie. Tato první fáze je daleko kratší, než druhá fáze. V druhé, jinak nazývané adsorbční fázi se baterie dobije na 100 % SOC. Z tohoto důvodu je baterie obvykle dobíjena elektrocentrálou většinou jen do výše uvedených 80 % (respektive 95 %), zejména kvůli úspoře paliva.

Použití elektrocentrály v hybridním systému s bateriemi je výhodné tím, že vždy elektrocentrála může pracovat při svém optimálním výkonu nebo blízko svému optimu, pokud je její výkon správně navržen. Pracuje totiž, pouze pokud baterie jsou vybité, dobíjí je a zároveň produkuje elektrickou energii pro pokrytí objektu. Obvykle elektrocentrála pracuje v rozmezí 80-100 % svého nominálního výkonu. [19]

1.7 Střídač

Střídač v systému slouží k přeměně stejnosměrného proudu a napětí na střídavý, což umožňuje používat běžně dostupné spotřebiče. Výkon střídače musí být dimenzován tak, aby byl schopen dodávat maximální výkon všech současně zapnutých spotřebičů (s rezervou pro budoucí spotřebiče). Nominální výkon střídače nesmí být dlouhodobě přetěžován, zkracuje to jeho životnost. Pokud je přetěžován, smí být přetížen jen na povelenu dobu až do hodnoty špičkového výkonu. Špičkový výkon je důležitý, zejména v ostrovních systémech pro rozběh indukčních spotřebičů.

Existují dva hlavní typy střídačů. Off-grid (ostrovní) a on-grid (síťový), každý má své specifika. Existují také střídače se zabudovaným regulátorem nabíjení. Směry toků energie, které střídačem prochází, jsou popsány dále, střídač může měnit AC na DC i naopak podle potřeby

1. Z FV panelů (DC) a DC VTE může napájet AC spotřebiče a zároveň přebytky nabíjí baterie (bez přeměny z DC-AC-DC)
2. z baterií napájí spotřebič,
3. řídí výkon elektrocentrály, z ní napájí spotřebiče a dobíjí baterie.

Na rozdíl od elektrocentrály střídače produkují napětí a proud s čistou sinusoidou. Na trhu jsou k dostání střídače jednofázové nebo třífázové. Pokud jsou tři jednofázové střídače propojeny a je určen jeden hlavní (master), který ostatní řídí, vytvoří fázové posuny ostatní střídačů a je tak vytvořena třífázová soustava.

Je možné vytvořit i stejnosměrný ostrovní systém, v takovém by docházelo k menším ztrátám. V AC systémech je napětí několikrát transformováno z DC na AC a naopak, což by bylo stejnosměrným systémem bylo odstraněno. Problém nastává u některých spotřebičů, jako je lednička, mikrovlnná trouba, či zahradní pila na dřevo, které střídavý proud stejně potřebují. Takže i ve stejnosměrných systémech se budou objevovat alespoň mirkoinvertory.

2 Charakteristika zatížení

Charakteristika odběru je tvořena výkonem a časem využití elektrických spotřebičů v objektu. Charakteristika byla provedena na základě přepočtených hodnot typového diagramu dodávky (TDD) pro kategorii 7, která je určena pro tarif D45d [20]. Tento typový diagram dodávky je srovnán se skutečně naměřenými hodnotami. Z naměřených hodnot jsou vytyčeny hodnoty potřebné k dimenzování ostrovního systému. Pro potřeby charakteristiky odběru bylo určeno letní a zimní období. Zimní, topná sezona začíná v říjnu a končí v březnu. Od dubna do září je letní sezona, samozřejmě je topení použito i mimo zimní sezonu, většinou se pro toto přitápění v domě používají krbová kamna. Prodloužení netopné sezony způsobené krbovými kamny je názorně vidět, viz Obrázek 15.

2.1 Seznam spotřebičů

V objektu je využíváno velké množství elektronických spotřebičů, v následující tabulce je uveden jejich seznam a předpokládaná doba využití. Topení a ohřev vody se dohromady podílejí na spotřebě energie více než 70 %. Kotel je regulovatelný dvěma topnými tělesy, obě pouze v režimu vypnuto/zapnuto. První, základní topné těleso má výkon 6 kW a druhé je špičkové s výkonem 3 kW. Celkem je jen 6 spotřebičů, které na spotřebě podílí více než 2 %.

Spotřebič	Počet	Příkon [W]	Čas užití/rok [hod]	Počet cyklů	Spotřeba [kWh]	% celkové spotřeby
Televize	1	188	1095		205,86	1,10%
Satelit	1	30	1095		32,85	0,20%
Rádio doma	1	20	2190		43,8	0,20%
Rádio venku	1	20	600		12	0,10%
DVD	1	80	52		4,16	0,00%
Alarm	1	23	8760		201,48	1,10%
Meteostanice	1	5	8760		43,8	0,20%
DVR+kamery	1	36	8760		315,36	1,70%
Videotelefon	3	3	8760		26,28	0,10%
Mobil	4	4	3	1460	17,52	0,10%
Notebook 1	1	90	2190		197,1	1,10%
Notebook 2	1	90	40		3,6	0,00%
iPad	1	40	3	16	1,92	0,00%
Tiskárna	2	4,8	730		3,504	0,00%
Router	2	12	8760		210,24	1,10%
Notebook 3	1	90	730		65,7	0,40%
Notebook 4	1	90	730		65,7	0,40%
Notebook 5	1	90	104		9,36	0,10%
Reproduktory	3	30	356		10,68	0,10%
Šicí stroj	1	100	20		2	0,00%
Lednička	1	31	8760		269	1,40%
Myčka	1	700	1	365	255,5	1,40%

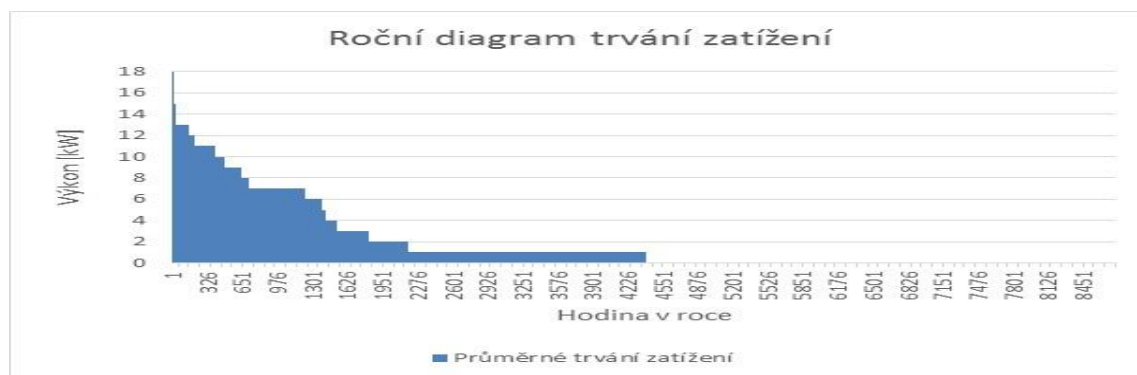
Trouba		1	2350	208		488,8	2,60%
Sporák		1	2000	547,5		1095	5,90%
Rychlovarná konvice		1	2000	0,1	730	146	0,80%
Pračka		1	1200	1	200	240	1,30%
Vysavač		1	2100	0,5	52	54,6	0,30%
Žehlička		1	1800	1	52	93,6	0,50%
Drobné spotř.	kuch.	1	1500	0,5	52	39	0,20%
Drobné spotř.	koup.	1	1200	0,3	365	131,4	0,70%
Měnič FVE		1	2	8760		17,52	0,10%
Topení 1. spirála		1	6000	1300		7800	41,90%
Topení 1+2. spirála		1	9000	400		3600	19,30%
Bojler		1		365		2122	11,40%
Osvětlení		52	15	650		507	2,70%
Dílna a zahrada		1	3000	100		300	1,60%
Celkem				34804		18633	100,00%

Tabulka 9 - Seznam spotřebičů

2.2 Diagram zatížení

2.2.1 Průměrný roční diagram trvání zatížení

Z patnáctiminutových měření v letech 2013-2015 jsem vytvořil diagram trvání zatížení. Během sledovaného období byl pouze jednou naměřen výkon 18 kW, dvakrát 17 kW a třikrát 16 kW. Tento vysoce špičkový výkon 16-18 kW v průměrném roce trvá pouze 45 minut. Špičkový výkon 14-15 kW trvá 17,5 hodiny. Střední výkon 8-13 kW trvá 679,5 hodin. Základní výkon 1-7 kW trvá 3681,5 hodiny. Přesně polovina roku je bez zatížení, to je způsobeno tím, že nejmenší zaznamenávaná hodnota je 1 kW (Obrázek 13). Hodnoty pod 1 kW se zaznamenávají akumulované při postupném nasčítání 1 kW.



Obrázek 13 - Diagram trvání zatížení

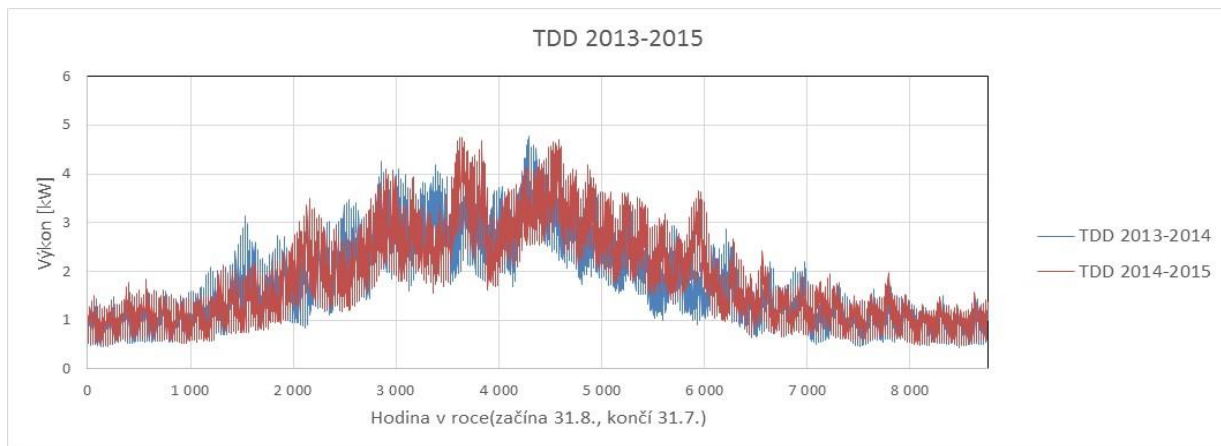
2.2.2 Srovnání diagramů zatížení

V posledních třech letech je používán tarif D45d v předchozích letech byl používán tarif D25d, se kterým však nebylo dosahováno dostatečného teplotního komfortu a proto byl změněn. I když je používané vytápění akumulací, používaný kotel je příliš slabý na to, aby akumulacíním tarifem dům vytopil za osm hodin nízkého tarifu (NT). Celoroční průběh TDD pro tarif D45d (přímotop) byl spočten podle následujícího vzorce. Pokud bych neměl k dispozici naměřené hodnoty, použil TDD pro simulaci spotřeby během roku. TDD se vypočte podle následujícího vzorce:

$$O_h = O_r * \frac{r_h}{\sum_{h=1}^{8760} r_h}$$

Ve výše uvedeném vzorci značí O_h hodnotu odběru pro hodinu odběru h , O_r roční hodnotu odběru r_h koeficient z přepočteného TDD kategorie 7 pro daný rok.

Vzhledem k měřenému období byl následující obrázek vytvořen od srpna do července pro sezony 2013-2014 a 2014-2015. Jak je z následujícího obrázku patrné, oba roky měli velmi podobný průběh.



Obrázek 14 - TDD 2013-2015

Obrázek 15 zobrazuje porovnání typového diagramu dodávky a naměřeného v letech 2013-2015. Typizovaný diagram je více zploštělý, nedochází podle něj k tak velkým rozdílům mezi spotřebou v letním a zimním období. TDD platí pro skupinu uživatelů daného tarifu, jedná se tedy o teoretického průměrného uživatele.

Červenou linií jsou zobrazeny hodnoty skutečně naměřené (denní průměrná hodnota). Skutečné hodnoty jsou v zimě vyšší než předpokládané u skupiny uživatelů, zřejmě protože má dům větší tepelné ztráty než je obvyklé. Což je možné připsat tomu, že RD je umístěním na kraji Krušných hor a tedy tužší podnební podmínky než zbytek republiky.

Nižší skutečná spotřeba během léta oproti typické je dána tím, že je na domě instalována FVE, která spotřebu během dne z části kryje.

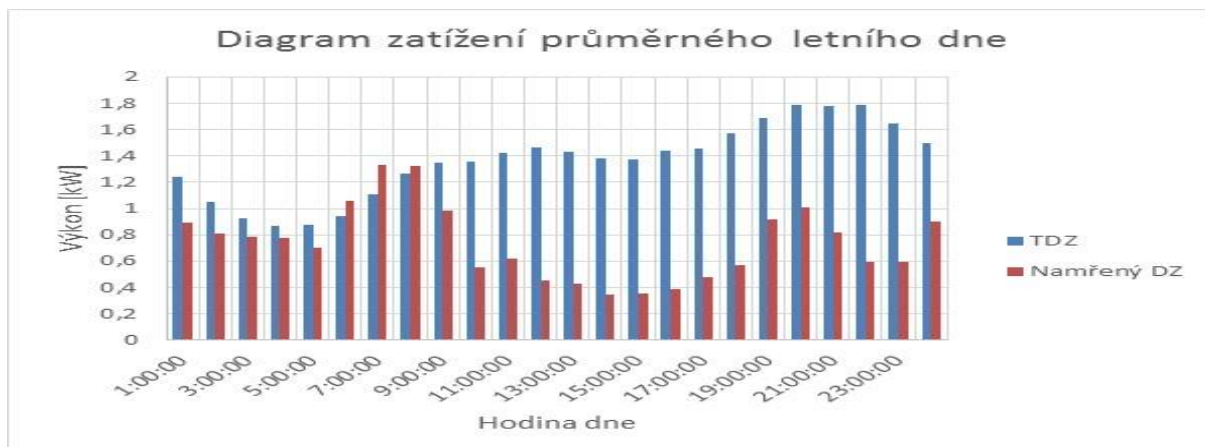
Naměřený diagram je více členitý. Na naměřeném diagramu je také vidět, jak lze topnou sezonu posunout. Díky krbovým kamnům s výměníkem na teplou vodu, který je napojen na podlahové vytápění lze alespoň částečně omezit elektrické vytápění. Což je vidět na následujícím obrázku na začátku druhého roku strmým nárůstem spotřeby elektrické energie. Krbová kamna se na podzim a na jaře používají pravidelně pouze s občasným použitím kotle. Po přechodu na zimu a zapnutí elektrického kotle, jsou využity jen sporadicky.



Obrázek 15 - Srovnání diagramů dodávky

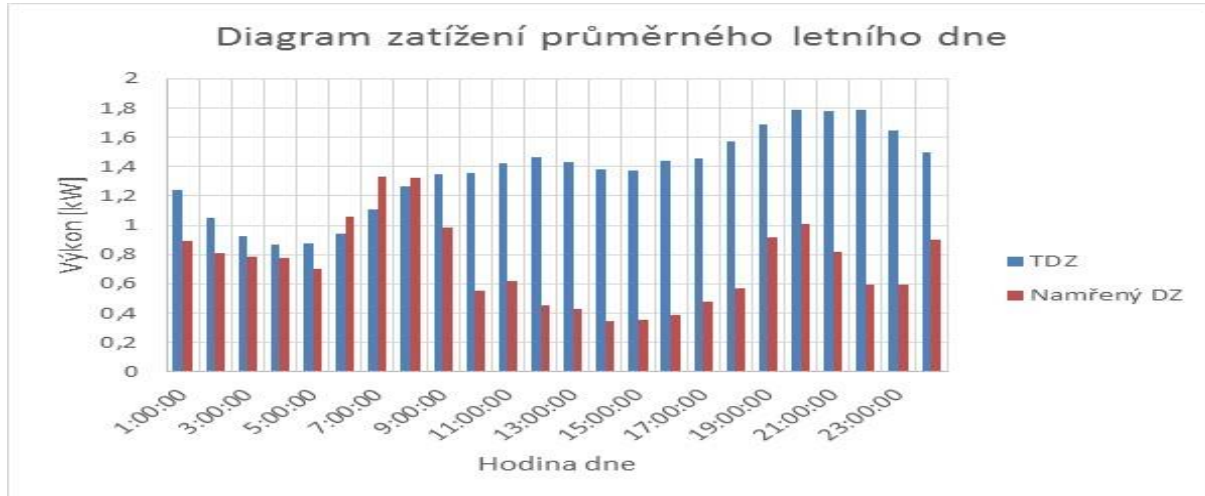
2.2.3 Průměrný letní a zimní den

Na následujícím obrázku v letním průměrném dni se naměřený diagram zatížení oproti typickému uživateli liší tím, že má ranní a večerní špičku. Během dne je oproti typickému uživateli spotřeba snížena o výrobu FVE. Procentuální krytí FVE na celkové spotřebě během celého roku je zobrazeno, viz Obrázek 18.



Obrázek 16 - Diagram zatížení průměrného letního dne

Naměřený diagram zatížení průměrného zimního dne věrně následuje časy nízkého a vysokého tarifu. Vysoký tarif je každý den mezi hodinami 9-10, 11-12, 13-14 a 16-17.



Obrázek 17 - Diagram zatížení průměrného zimního dne

2.2.4 Charakteristické hodnoty spotřeby

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty charakteristické pro spotřebu v domě. Nikdy za dobu měření nedošlo k naměření výkonu vyššího než 18 kW. Průměrná spotřeba činí 16 MWh za rok.

	2013-2014	2014-2015
Spotřeba [kWh]	15627	16418
Max. naměřený výkon [kW]	18,0	17,0
Maximální výkon spotřebičů [kW]	34,8	34,8
Doba využití maxima podle naměřeného maxima [hod]	868,2	965,8
Doba využití maxima podle výkonu spotřebičů [hod]	449,0	471,7
Letní průměrná jednodenní spotřeba [kWh]	17,2	18,25
Zimní průměrná jednodenní spotřeba [kWh]	79,23	82,46

Tabulka 10 - Charakteristické hodnoty spotřeby

2.3 Stávající fotovoltaická elektrárna

Na domě je instalováno 22 panelů s výkonem 230Wp, celkem tedy 5,06 kW. Třífázový střídač Piko Solar 5.5 je zapojen do domácí sítě na FVE byla nainstalována v roce 2010. FVE snižuje naměřenou spotřebu energie oproti výše uvedené spotřebě podle tabulky spotřebičů, dle svého aktuální výkonu. Roční produkce FVE je 4,4 až 5,3 MWh, které jsou spotřebovávány ze 41 až 46 %. Tato FVE zůstane na objektu i nadále.

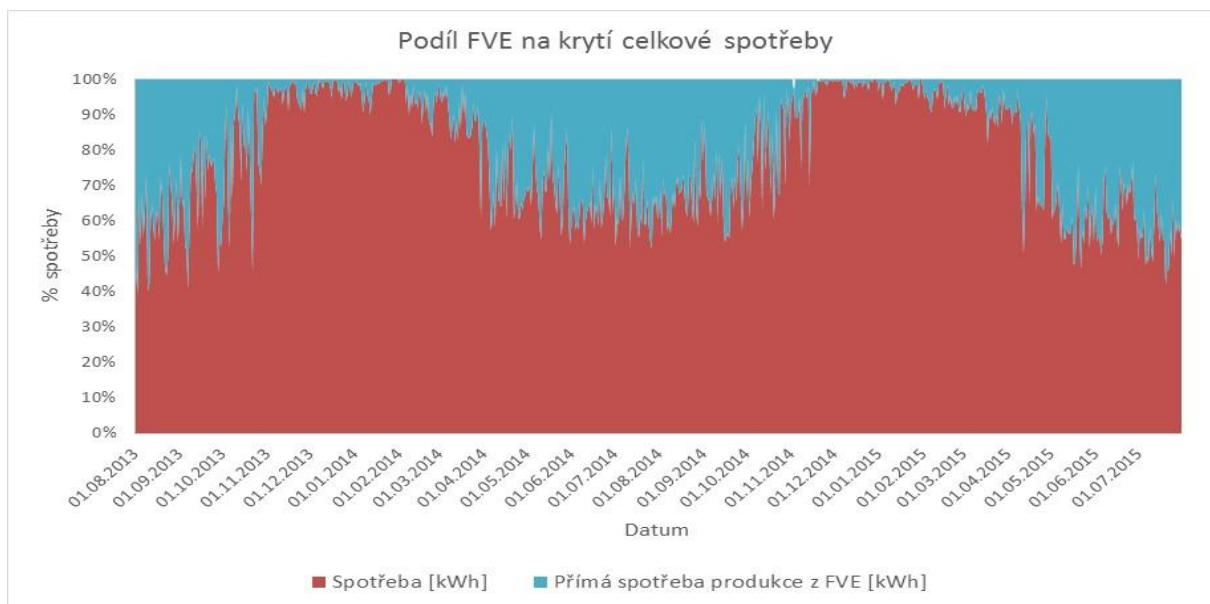
Této úrovni vlastní spotřeby je dosaženo díky Wattrouteru M (SolarControls s.r.o), který podle zadaných pravidel přeměrovává přebytečnou energii do spotřebičů dle zadaných pravidel, například do bojleru pro ohřev teplé užitkové vody (TUV) a elektrického kotle v zimním období či bazén v letním období. 76 % roční produkce je generováno v letním období.

Následující Tabulka 11 ukazuje, jak fotovoltaická elektrárna ovlivňuje současnou spotřebu ze sítě a další údaje o spotřebě a produkci FVE za dvouleté období. Sloupec Spotřeba uvádí spotřebu ze sítě, energie, která bude nutno dodat po odpojení ze sítě. Export do sítě uvádí, jaká energie je bude možné využít pro uložení do baterií. V řádcích jsou uvedeny denní hodnoty měření za dvouleté období, (mimo průměrné roční spotřeby).

1. 8. 2103 - 31. 7. 2105	Spotřeba [kWh]	Export FVE do sítě [kWh]	Produkce FVE [kWh]	Přímá spotřeba produkce z FVE [kWh]	Reálná spotřeba (bez FVE) [kWh]	Poměr spotřeba/ produkce
Maximum	148,00	24,50	31,37	18,77	148,60	
Průměr	47,93	6,98	12,37	5,39	53,32	0,44
Průměrná roční hodnota	16001,38	2694,88	4744,62	2049,74	18051,12	
Letní maximum	86,75	24,50	31,37	18,77	95,36	
Letní průměr	17,74	9,99	17,40	7,40	25,15	0,43
Zimní maximum	148,00	21,25	28,40	14,51	148,60	
Zimní průměr	80,83	3,69	6,77	3,08	83,91	0,46

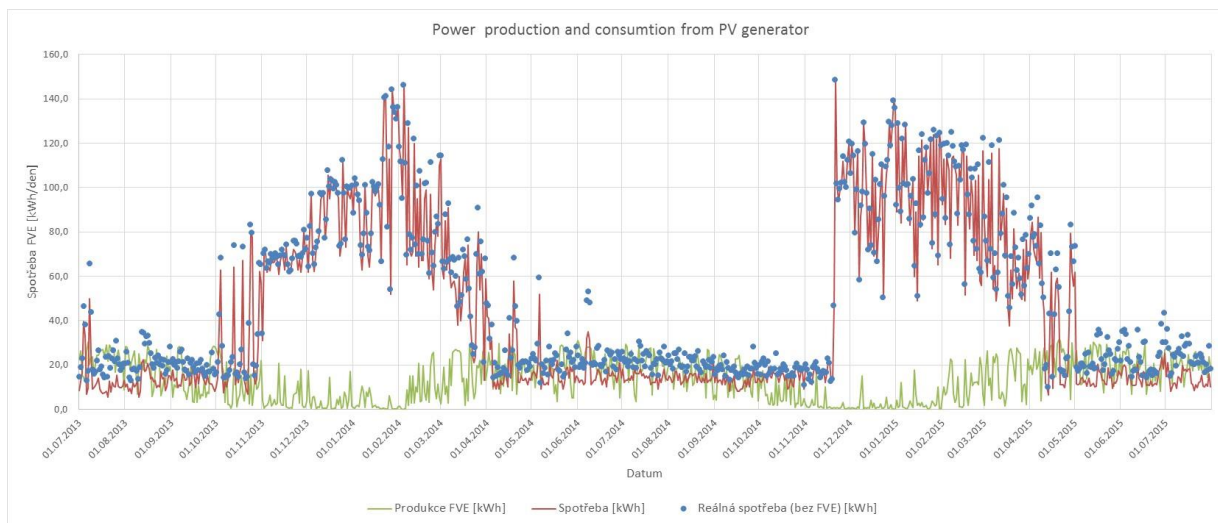
Tabulka 11 - Charakteristika stávající FVE

Následuje Obrázek 18, kde je zobrazen podíl přímé spotřeby z produkce stávající FVE na celkové spotřebě. V létě je podíl výroby FVE na procentuálním krytí spotřeby větší ze dvou důvodů. Spotřeba během letních dnů je v průměru přibližně 4x nižší než v zimě. Produkce FVE je naopak v letních měsících 2,5 krát vyšší než v zimě. V létě dochází ke krytí spotřeby z FVE ze 43 %, přičemž je až 57 % výkonu FVE zůstává nevyužito, protože je generován v době, kdy nemá využití a již ho není kam akumulovat. Pokud by ke stávající FVE byly přidány odpovídající baterie, už nyní by byla letní spotřeba téměř autonomní. V zimním období je produkce menší a spotřeba větší, dochází tedy k procentuálně menšímu pokrytí spotřeby (5 %).



Obrázek 18 – Procentuální podíl FVE na celkové spotřebě

Na následujícím obrázku je zobrazena spotřeba s FVE červeně, bez FVE modře a celková produkce FVE zeleně. K největším rozdílům mezi spotřebou s FVE a bez FVE je v jarních letních a podzimních dnech. V zimě je spotřeba tak veliká, že produkce FVE takřka v celkové spotřebě zaniká.



Obrázek 19 - Podíl FVE v kWh na celkové spotřebě

3 Posouzení místa instalace

Rodinný dům je situován na kopci na okraji města Krupka v Krušných horách. Přípojka plynu a rozvodna jsou vzdáleny 400 m od domu, v roce 1996 byla vybudována pouze elektrická přípojka. V roce 2010 byla na střechu domu nainstalována fotovoltaická elektrárna. Nadmořská výška objektu je 320 m.n.m.

3.1 Model FVE a srovnání s naměřenými údaji

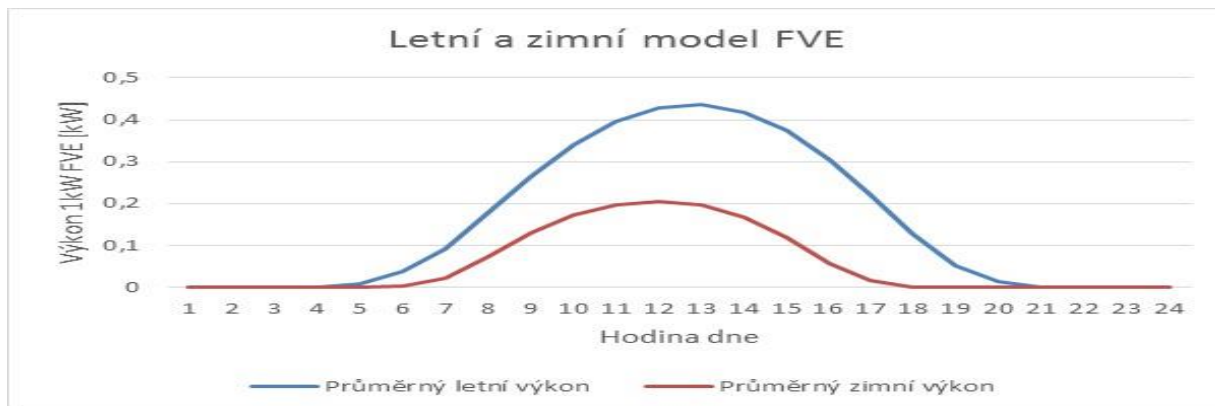
Vytvořil jsem model fotovoltaické elektrárny o nominálním výkonu 1 kWp. Výsledky modelu FVE jsou dány vstupními daty a metodikou výpočtu. Společnost EkoWATT zpracovala studii porovnání tří různých modelů dopadající energie a naměřených dat. Shoda modelů s realitou byla s maximální odchylkou do 5 % za celý rok. Dopadající energie se rok od roku může od sebe lišit do 10 %. [27] Podle mnou naměřených dat se meziročně dopadající energie liší až o 16 %.

3.1.1 Model FVE

Model 1kWp FVE byl vytvořen s použitím meteorologických dat z portálu PVGIS, na základě dopadající výkonu dopadajícího záření na plochu se zadaným sklonem průměrného dne daného měsíce. Model byl vytvořen pro samostatnou FVE bez baterií s následujícími parametry.

- Data dopadajícího záření za průměrný den v měsíci [26]
- Zeměpisná šířka: 50.6844, zeměpisná délka 13.8630 (umístění objektu)
- Sklon panelů 35 °
- Azimut střechy 7 ° (východ - 90 °, jih 0 °)
- Účinnost za daný sklon střechy a azimut 98,3 %
- Účinnost panelu 16,1 %
- Účinnost invertoru 94 %
- Účinnost MPPT 99 %
- Tepelné ztráty zahřátím panelu 5 %
- Úbytek napětí v AC kabelech 1 %
- Úbytek napětí v DC kabelech 1 %
- Zastínění panelů 0 %
- Příliš slabý osvit pro vytvoření dostatečného napětí 3 %
- Sníh a prach 3 %
- Pokles účinnosti panelů 1 % za rok

Průměrný letní a zimní den bude vypadat jako Obrázek 20, průměrná výroba během dne každého měsíce je dále uvedena, viz Tabulka 12,



Obrázek 20 - Sezónní model FVE

3.1.2 Porovnání modelu se stávající FVE

Stávající FVE popsána v kapitole 2.3 je níže porovnána s modelem vytvořeným podle předchozího kapitoly 3.1.1. V následující tabulce je uvedena normovaná produkce energie na instalovaný kWp za průměrný den v daném měsíci. Ve sloupci Naměřená produkce jsou průměrné hodnoty za roky 2013 až 2015. Lednová naměřená data jsou v posledních třech letech velmi nízká. PVGIS poskytuje dlouhodobý průměr, který v tomto případě je porovnáván se střednědobým průměrem tří let, a proto dochází k takovéto odchylce. V ostatních měsících odchylka naměřených dat od modelu od není tak výrazná. Průměrná odchylka za celý rok naměřené produkce od té modelové je -2,2 %. Abych zjistil, zda bude naměřená produkce dlouhodobě nižší než podle modelu, je třeba provést dlouhodobější pozorování. Jedná se zejména o leden, kde odchylka je příliš velká. Již nyní je po 3 letech měření velmi nápadná odchylka -61,7 % od modelové produkce.

	Naměřená produkce kWh/kWp	Modelová produkce kWh/kWp	Odchylka naměřených dat od modelové produkce
Leden	0,48	0,78	-61,7%
Únor	1,57	1,48	5,7%
Březen	3,01	2,67	11,2%
Duben	3,73	3,76	-0,6%
Květen	3,59	3,88	-7,9%
Červen	3,88	4,00	-3,1%
Červenec	4,24	4,00	5,7%
Srpen	3,75	3,71	1,2%
Září	3,00	2,86	4,7%
Říjen	1,90	1,85	2,7%
Listopad	0,89	0,83	7,1%
Prosinec	0,62	0,59	4,5%
Letní průměr	1,41	1,37	3,2%
Zimní průměr	3,70	3,70	0,0%
Průměr	2,56	2,61	-2,2%

Tabulka 12 - Porovnání modelu a naměřených dat FVE

3.2 Model VTE a srovnání s naměřenými údaji

Dům se nachází na hranici oblasti vyznačené jako vhodná pro výstavbu větrných elektráren, viz Obrázek 11. Nadmořská výška objektu je 320 m.n.m. a nachází se téměř na vrcholu kopce. Z těchto důvodů je zkoumána možnost využití VTE jako jednoho zdrojů ostrovního systému.

3.2.1 Model VTE

Model 1kW_p VTE je založen na desetiletém satelitním pozorování rychlosti větru NASA pro danou oblast. Rychlost větru je měřena ve výšce 50 m nad povrchem, proto byla přepočtena do výšky 30 m pro danou lokalitu pomocí Hellmanovy rovnice uvedené v 1.3.3 a dále snižen koeficientem energetického indexu podle charakteru lokality [13]. Vstupní údaje modelu následují.

- Průměrná rychlost větru v měsíci v 50 m [28]
- Energetický index větru dle lokality 0,31
- Přepočet Hellmanovou rovnicí s koeficientem alfa 0,35 (okraj vesnice)
- Průměrná hustota vzduchu 1,21 kg/m³
- Průměrná plocha rotoru na 1 kW 6 m²
- Weibullovo rozdělení větru s koeficientem špičatosti k=2
- Účinnost turbíny 35 %
- Rychlost větru, při které se turbína začíná pracovat 2,5 m/s

3.2.2 Porovnání modelu rychlosti větru a naměřeného větru

Jelikož přímo u domu není žádná větrná elektrárna naistalována, v této části je porovnána zejména rychlost větru. Aby bylo možné srovnat modelové hodnoty s realitou, na střechu domu, 7 m nad zemí byl v lednu 2016 nainstalován anemometr. Srovnání modelu založeném na desetiletém pozorování NASA a čtyřměsíčním měření anemometru. Lednové údaje jsou nejvíce rozdílné, podle naměřených hodnot by energie získána z 1 instalovaného kW VTE skoro desetina oproti modelově vypočtené hodnotě. Trend naměřené rychlosti větru se zdá být opačný (konkávní), než podle hodnot získaných (konvexní). Pro potvrzení této hypotézy je potřeba delší než jednorocní měření rychlosti větru. V následující tabulce data hodnoty N/A označují zatím neznámé hodnoty.

	Naměřená rychlost větru v 7 m [m/s]	Vypočtená rychlost větru v 7 m [m/s]	Odchylka naměřené a vypočtené rychlosti větru [m/s]	Přepočtená rychlost větru ve 30 m [m/s]	Vypočtená rychlost větru ve 30 m [m/s]	Produkce 1kW turbíny za den podle naměřených rychlostí větru [kWh]	Produkce 1kW turbíny za den podle vypočtených rychlostí větru [kWh]
Leden	0,79	1,35	-70%	1,32	2,24	0,06	0,58
Únor	1,33	1,23	7%	2,21	2,05	0,56	0,43
Březen	1,37	1,20	13%	2,28	1,99	0,61	0,38
Duben	1,16	0,98	16%	1,93	1,62	0,34	0,17
Květen	1,70	0,92	46%	2,83	1,53	1,25	0,13
Červen	N/A	0,92	N/A	N/A	1,53	N/A	0,13

Červenec	N/A	0,99	N/A	N/A	1,65	N/A	0,19
Srpen	N/A	0,99	N/A	N/A	1,65	N/A	0,19
Září	N/A	1,14	N/A	N/A	1,91	N/A	0,33
Říjen	N/A	1,18	N/A	N/A	1,97	N/A	0,37
Listopad	N/A	1,30	N/A	N/A	2,17	N/A	0,52
Prosinec	N/A	1,36	N/A	N/A	2,26	N/A	0,48
Letní průměr	1,43	0,99	31 %	2,38	1,65	0,79	0,19
Zimní průměr	1,16	1,27	-17 %	1,94	2,11	0,41	0,46
Průměr	1,27	1,13	2 %	2,11	1,88	0,56	0,32

Tabulka 13 - Srovnání naměřené a modelové rychlosti větru

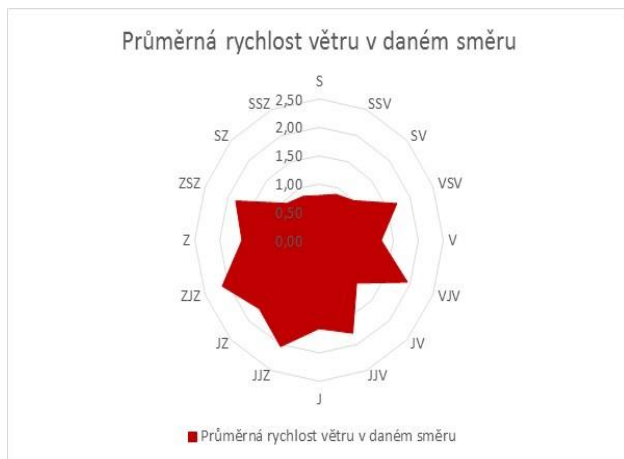
Průměrné rychlosti větru se nejeví jako vhodné pro výstavbu VTE, podle literatury jsou vhodné lokality s průměrnou rychlostí větru až od 4 m/s [31] či více a to 5,25 m/s [11]. Vhodná rychlost větru je posuzována pro zdroje připojené k síti. Pro každý ostrovní systém se může lišit, vzhledem k celkově vyšším sdruženým nákladům výroby, více viz kapitola 0.

Obrázek 21 zobrazuje naměřenou hustotu pravděpodobnosti rychlosti větru a hustota pravděpodobnosti podle Weibullova rozdělení se špičatostí $k = 2$. Naměřená hustota pravděpodobnosti přibližně odpovídá Weibullovu rozdělení, ve vyšší rychlostech však tak prudce neklesá, reálná produkce větrné elektrárny by byla vyšší než podle modelu. Snížení špičatosti Weibullova rozdělení o 0,1 (při naměřených rychlostech větru) znamená nárůst produkce energie až o 0,5 %.

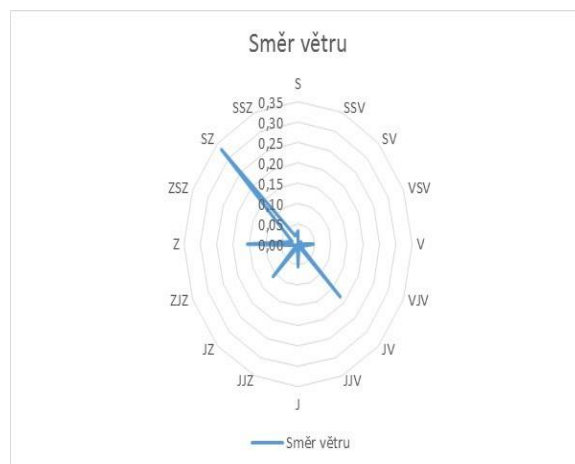


Obrázek 21 - Srovnání naměřené hustoty pravděpodobnosti a hustoty podle Weibullova rozdělení

Následující dva obrázky znázorňují poměrně stálý směr větru, Nejrychleji vítr proudí převážně ve směru východ západ a obráceně. Naopak málo vítr proudí ze severu, kde se blízko nachází les. Nejčastěji potom vítr fouká ze směru severozápad, jihovýchod a západ.



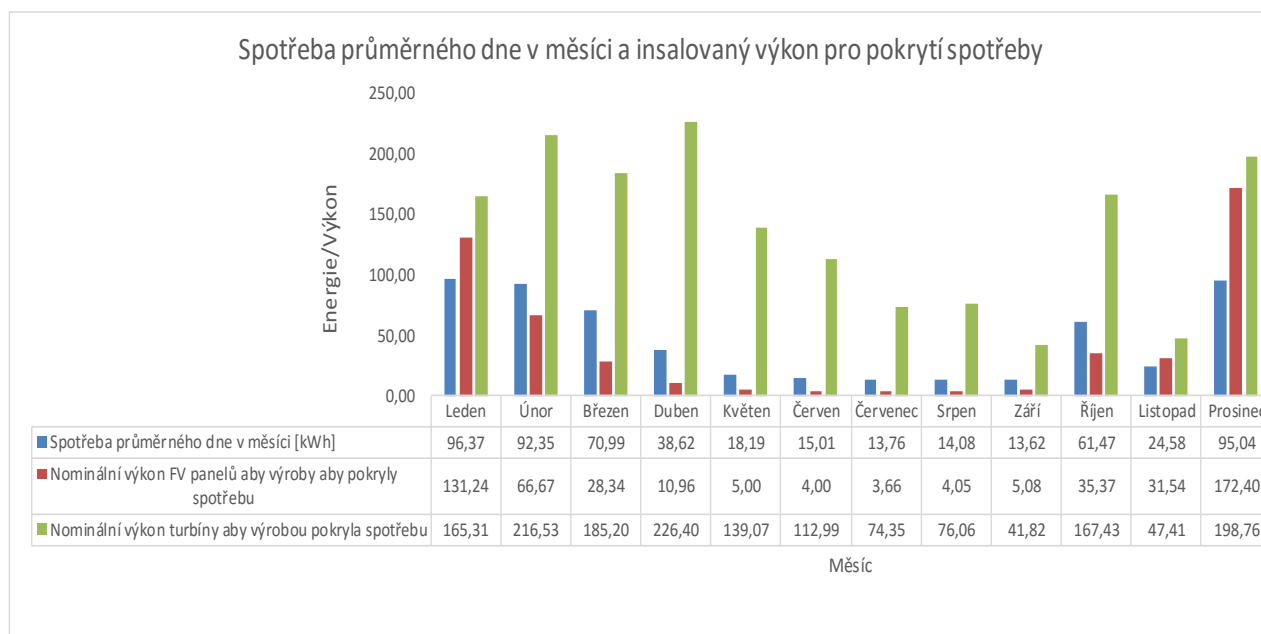
Obrázek 22 - Větrná růžice směr větru



Obrázek 23 - Větrná růžice rychlost větru

3.3 Dimenzování hybridního systému

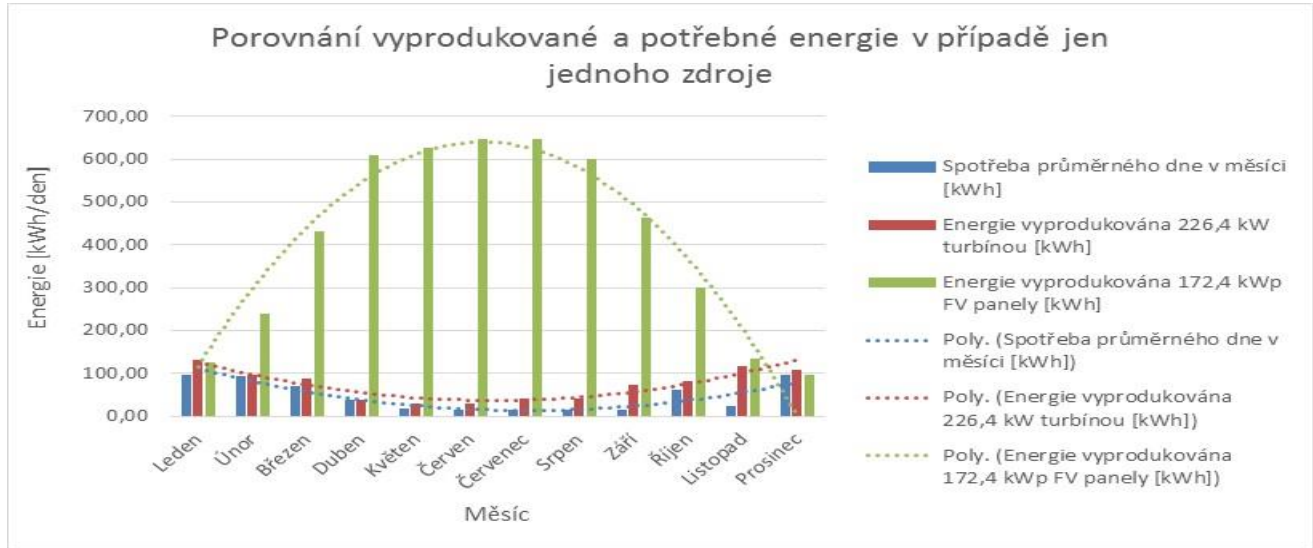
Základní dva krajní body dimenzování a to že celá spotřeba by byla pokryta pouze větrnou turbínou anebo FV panely. Krajní body pro každý měsíc jsou uvedeny dále, viz Obrázek 24. Z tohoto hlediska je nejvhodnější nainstalovat pouze FV panely. Pro pokrytí každého průměrného dne v měsíci je třeba nainstalovat 172,4 kWp FV panelů nebo větrnou turbínu o nominálním výkonu 226,4 kW.



Obrázek 24 - Krajní body dimenzování FVE a VTE

Vzhledem k profilu vyprodukované energii je vhodnější použít pouze větrnou turbínu, viz Obrázek 25. Produkce a během dne výkon FVE v létě mnohonásobně převyšuje spotřebu a příkon, výkon panelů je

v tomto případě regulován frekvencí MPPT a nebo střídače. Pro pokrytí spotřeby nejen během dne ale i v noci je nutné nainstalovat baterie.



Obrázek 25 - Porovnání profilu produkce a spotřeby

Varianty hybridního systému jsem dimenzoval dvěma způsoby. Pro potřeby modelu FVE, VTE, s bateriemi a elektrocentrálou byl použit první způsob. Jednoduchá metoda, založená na průměrné denní spotřebě letního dne, tak aby produkce z obou obnovitelných zdrojů byla přibližně stejná, produkci 1kW FVE a VTE během léta a zimy. Optimální kombinace se určí tak, aby byla pokryta energetická potřeba během průměrného letního dne (zaokrouhlena na celé kW nahoru). [3] Zbytek bude doplněn elektrocentrálou. Tento způsob dimenzování je vhodný pro spotřebu s celoročně stálým zatížením anebo pro pokrytí základního zatížení. Při dimenzování není brán zřetel na ekonomickou optimalizaci systému.

Druhý způsob dimenzování je zaměřen na ekonomiku generované elektrické energie. Nejčastěji používaným ukazatelem ceny energie ze zdroje je sdružená cena energie (LCOE – Levelized Cost of Energy). Sdružená cena energie je podíl sumy nákladů daného zdroje v průběhu celého životního cyklu a sumy množství energie. Přičemž je použita diskontní sazba pro převedení budoucích cen a energie na současnou hodnotu. LCOE bylo minimalizováno za takových podmínek aby v průměrném dnu každého měsíce byla vyprodukována dostatečné množství. [29] [30]

3.4 Model FVE, VTE s bateriemi a elektrocentrálou

Tento model byl vytvořen, pro ukázkou jak spolupracují všechny uvažované zdroje elektrické energie.

Pro tento model byla použita data naměřená od 2.2 do 8. 2. 2015. Model je založen na první variantě dimenzování. K řešení vede cesta přes soustavu rovnic o dvou neznámých.

$$0,19 VTE_i + 3,7 FV_i = 19$$

$$0,46 VTE_i + 1,37 FV_i = 19$$

$$FV_i = 3,57$$

$$VTE_i = 30,73$$

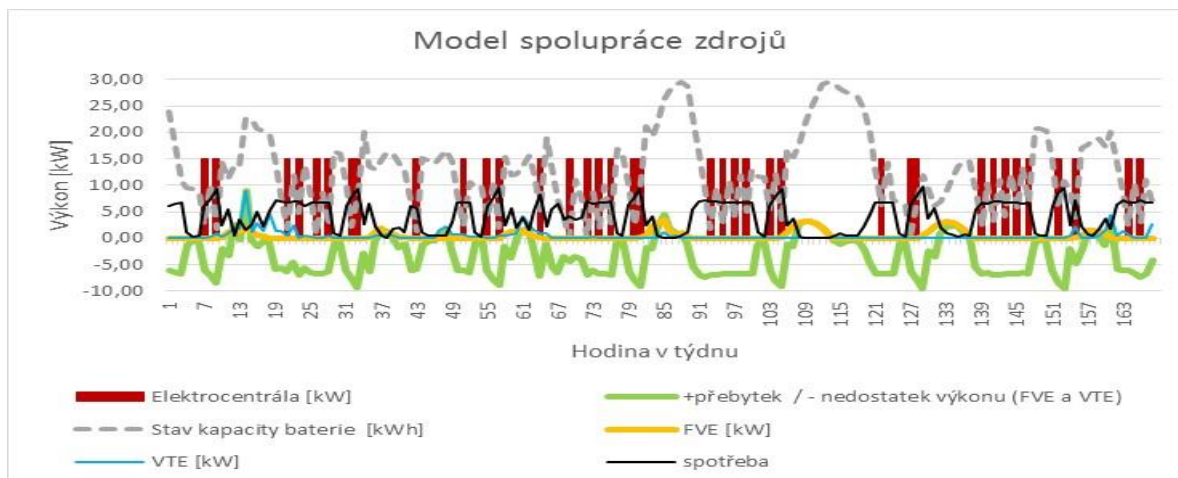
Systém se tedy po zaokrouhlení bude skládat z modelů FVE a VTE s 30kW turbínou a 4kWp FVE, 15kW elektrocentrály, 30kWh využitelné kapacity baterií a naměřené spotřeby. Jsou zde porovnány detailní dvoudenní a týdenní ukázky měsíce února a března roku 2015. Takto dimenzovaná soustava je schopná vytvořit dostatečné množství energie a poskytovat dostatečný výkon, avšak je velmi špatně ovladatelná z hlediska rozložení výkonu zejména VTE. V případě silného větru, není možné celý výkon turbíny akumulovat a je třeba ho přímo použít pro ohřev TUV a kotli na vytápění. Zbyde-li přebytek výkonu, je nutné ho zmařit. Takto velkou VTE je nutno připojit na AC stranu s měničem frekvence, s čímž jsou spřaženy problémy přechodných dějů, kvalita napětí systému, atd. V případě reálné kombinace FVE a VTE je potřeba volit přiměřené velikosti zdrojů v systému.

Přebytek výkonu je akumulován do baterií. V případě, že FVE a VTE nemají dohromady potřebný výkon, systém používá nejdříve baterie. Naopak přebytkem výkonu jsou baterie nabíjeny. Pokud jsou baterie vybity (na bezpečnou hranici), je nastartována elektrocentrála, ta vždy pracuje ve svém optimu. Tím je zajištěna minimální spotřeba paliva na vyrobenou kWh a to že elektrocentrála vždy bude spuštěna alespoň jednu hodinu. Tím že je elektrocentrála provozována v bodě optima, lze dosáhnout úspory paliva na vyrobenou kWh v některých případech až 60 %. [22] [23] [24]

V prvním únorovém týdnu by FVE vyprodukovala 73,64 kWh s maximálním výkonem 3,35 kW, VTE 71,18 kWh s maximálním výkonem 8,87 kW, z produkce obou zdrojů má využití všech výkon – nedochází k situaci, že v době, kdy je malá spotřeba a zároveň jsou plné baterie.

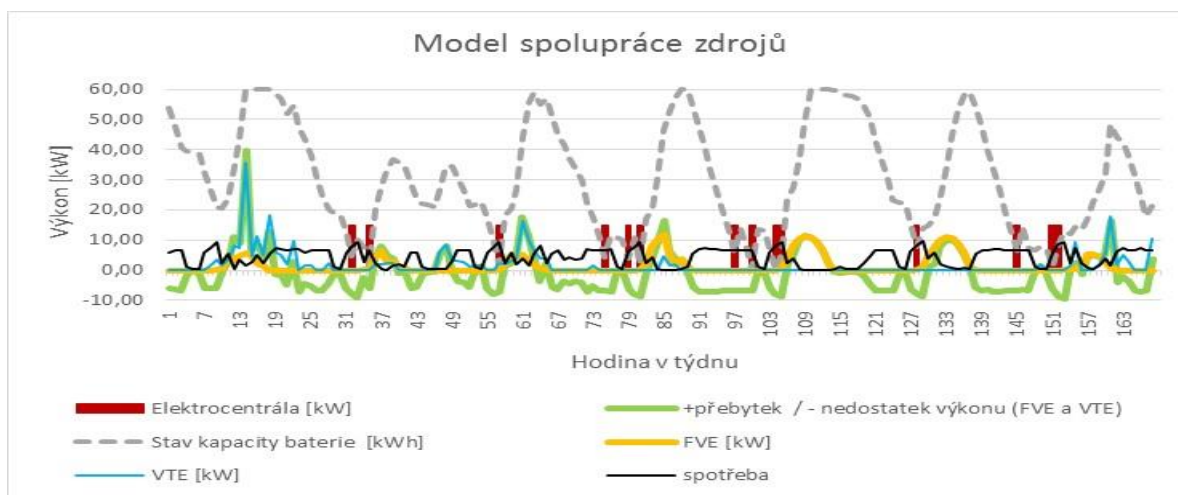
Spotřeba za celý týden byla 714 kWh, elektrocentrála musí doplnit energii 309 kWh, jelikož ale pracuje vždy na plný výkon (15 kW), vyrobí 525 kWh, z čehož je 15 kWh uloženo v bateriích (je počítáno s 3% ztrátou energie na vstupu – účinnost baterií 97 %) a později použito. Počáteční kapacita baterií je 60kWh, konečný 7 kWh. Průběh výkonů všech součástí v čase je zobrazen na následujícím obrázku.

Zelená linie nazvána „+ přebytek/ - nedostatek“ reprezentuje sumu výkonů FVE a VTE sníženou o výkon spotřebičů. Pokud je linie v kladném výkonu, je tento ukládán do baterií, dokud se v nich nenasátá 60 kWh anebo je výkon baterií použit. V případě že je linie „+ přebytek/ - nedostatek“ záporná, znamená to, že je potřeba tento výkon doplnit z baterií, případně z elektrocentrály. Stav baterií je zobrazen s hodinovým zpožděním oproti výkonu FVE, VTE a elektrocentrály.



Obrázek 26 - Model výkonů součástí systému únorový týden - dimenzováno pro letní období

Pokud by byl systém dimenzován, aby OZE pokryly průměrnou zimní spotřebu (120 kW VTE, 14 kWp FVE, 60kWh baterie) Obrázek 26 by se změnil následovně, viz Obrázek 27. V tomto případě již by mohlo docházet k tak velkým výkonům (zejména u VTE), že výkon VTE by musel být omezen i zimním období. S takto dimenzovaným systémem by tedy i v letních měsících docházelo k velkým přebytkům, že by výroba obou obnovitelných zdrojů nemohla být využita.



Obrázek 27 - Model spolupráce zdrojů na pokrytí spotřeby únorový týden - dimenzováno pro zimní období

Takto dimenzovaný systém bude sice fungovat, ale není brán zřetel jeho ekonomiku. Proto jsou následující varianty dimenzovány podle daných variant spotřeby tak, aby sdružené náklady elektřiny byly co nejnižší.

3.5 Analýza nebezpečí zásahu blesku a výměny FV panelů po zásahu

Analýza nebezpečí zásahu blesku a vyplývajících škod byla provedena pomocí programu řídicího se nastaveného na normu ČSN EN 62305-2. Na domě je nainstalována jímací soustava dle platné normy NF

C-100, odstup FV panelů od jímací soustavy je 50 cm. Pravděpodobnost přeskóčení blesku z jímací soustavy na konstrukci panelů je tedy minimální. Pokud není možné vybudovat jímací soustavu, která kryje kulovou oblast zásahu blesku tak, aby koule o daném poloměru nedosáhla od vršku jímací soustavy až k panelům, je nutné konstrukci panelů spojit s jímací soustavou.

Vypočtené riziko ztrát lidských životů a ekonomických hodnot (kompletní ztráta hodnoty) objektu úderem blesku je 0,00002 %. Četnost zásahu domu je dle UTE C17-108 jednou za 80 let, pravděpodobnost zásahu bleskem v dané lokalitě je 0,009 % za rok. I když je pravděpodobnost zásahu malá, je nutné celý objekt pojistit. Pokud by došlo k zásahu bleskem, ekonomika projektu se zhroutí, musí být všechny poničené zařízení obměněna před uplynutím jejich životnosti.

Pokud dojde k zásahu FV panelů bleskem, je prakticky jisté, že dojde k jejich zničení anebo pokud je nutné panely vyměnit z jiných důvodů (pozáruční poruchy, vandalismus, jiné meteorologické příčiny) je třeba volit panely nejlépe stejné značky, napětí i proudu. Panely spojené sériově propouští proud o jmenovité nejnižší hodnotě proudu všech panelů a snižuje se tím výkon celého stringu. Podobně, pokud by byly spojeny panely paralelně o různých napěťových hladinách, výstupní napětí se bude opět řídit nejnižším napětím nejméně výkonného panelu. Pokud stejné panely není možno sehnat, je třeba počítat s tím, že výkonnější panely (zpravidla dražší) zařazené mezi méně výkonné (levnější) celkový výkon systému nezvednou a naopak zmenší výkon i produkci tedy zhorší ekonomiku systému.

4 Sestavení variant a stanovení investičních a provozních výdajů

Vytvořil jsem tři varianty pro celkové ekonomické hodnocení. Varianty byly hodnoceny na dobu životnosti většiny součástí a to 20 let. Během této doby bude potřeba jednou obměnit baterie. Pokud jde o zakomponování kombinace FVE, VTE a generátoru, VTE je do systému začleněna, pouze pokud je vyžadována pro diverzifikaci zdrojů. Důvodem toho je příliš nízká rychlost větru ve vybrané lokalitě a z toho plynoucí příliš vysoká sdružená cena elektřiny.

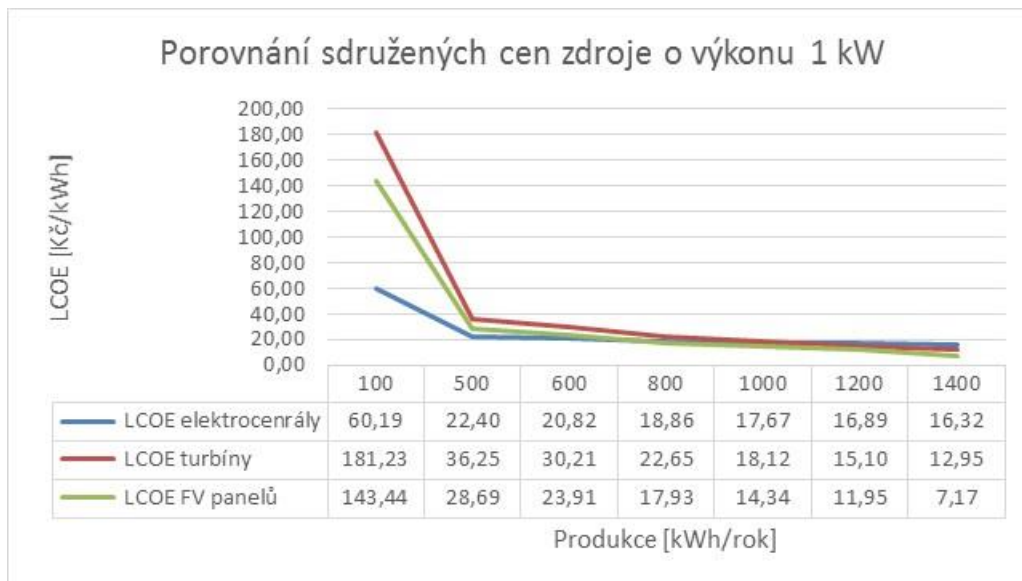
Sdruženou cenu elektřiny jsem stanovil dvojím způsobem. První je sdružená cena elektřiny, která je vyprodukovaná celým systémem (LCOE vyr.) a druhý je sdružená cena elektřiny, která je v systému spotřebována (LCOE spotř.). Jako hlavní ukazatel jsem použil LCOE spotř., zároveň jsem se ho snažil minimalizovat vybráním vhodného instalovaného výkonu každého zdroje. Minimalizaci LCOE jsem provedl s pomocí Řešitele v tabulkovém editoru Microsoft Excel.

Sdružené ceny elektřiny jednotlivých zdrojů (s instalovanou kapacitou baterií 4 kWh na 1 kW zdroje u FVE a VTE a 1 kWh pro elektrocentrálu) jsou uvedeny dále, viz následující Tabulka 14. Sdružené ceny elektřiny jsou v tomto případě uvedeny bez úvěru.

	FV panely (Model podle PVGIS)	Turbína (Model podle vypočtené rychlosti větru ve 30 m)	Elektrocentrála (při 1000 kWh/rok)
LCOE [kč/kWh]	15,48	153,51	17,67

Tabulka 14 - LCOE jednotlivých zdrojů za stávajících podmínek

Sdružená cena 1 vyrobené kWh samozřejmě závisí na celkovém ročním množství vyrobené elektřiny zdrojem, viz Obrázek 28. Větrná turbína by se do systému pravděpodobně dostala až při více než 1050 kWh vyrobených za rok (při produkci elektrocentrály do 1000 kWh/rok). Výroba VTE 1050 kWh za rok znamená roční průměrnou rychlost větru 3,7 m/s. Při větší výrobě elektrocentrály je možné VTE zahrnout do systému až při výrobě 1400 kWh/rok k čemuž je potřeba roční průměrná rychlost větru 4,1 m/s. Průměrná naměřená rychlost za téměř celou první polovinu 2015 roku je 2,1 m/s a tedy příliš nízká.



Obrázek 28 - Sdružené ceny zdroje o výkonu 1 kW

4.1 Investiční a provozní náklady

Před sestavením variant byly stanoveny vstupní údaje modelu. Inflace se bude pohybovat podle prognózy ČNB na úrovni 2 % [25]. Diskont subjektu 3 %. Úvěr je stanoven na 40 % z investice s úrokem 8 %. Cena nafty s dopravou byla stanovena na 35 Kč/litr s každoročním růstem o 1 %. Spotřeba paliva v elektrocentrále na výrobu 1 kWh je 0,37 litru. Cena palivového dřeva na jednu sezonu na otop byla stanovena na 4000 Kč do krbových kamen. Krbová kamna je možné využívat daleko častěji, než dosud. Zejména v zimním období je možné krbovými kamny dům vytápět. Elektrocentrála je proto navržena s nižším výkonem než bývá v zimním období potřeba, předpokládá se, že určitá část tepla bude v zimním období získána touto levnější variantou.

V případě varianty s úplnou absencí elektrického topení na 22 000 Kč (včetně krbových kamen). Investiční a další náklady jednotlivých komponent jsou uvedeny dále, viz Tabulka 15. Roční provozní náklady jsou dány procentem z investice. Práce za sestavení a zapojení systému je určena 5 % z pořizovací ceny komponentů.

Požizovací ceny byly znormovány na jednotku výkonu, pro jednodušší dimenzování jednotlivých komponentů, přičemž jsou později výsledky dimenzování zaokrouhleny a systém sestaven podle požadavků na výkon a vyrobenou energii v každém období.

	Pořizovací cena za instalovaný kW [Kč/kW (* nebo ks)]	Provozní náklady (vlastní spotřeba/ zařízení)	Palivové náklady	Účinnost a ztráty	Předpokládaná životnost (let)
Ostrovní střídač (SMA)	21 100	(až 30 W)		96 %	20
Baterie BMZ ESS	21 600			97 %	13
Turbína	100 000	2 %		35 %	20
FV panely (BenQ)	42 000	2 %		12,64 %	20
Elektrocentrála	15 500	6 %	12,95 Kč/kWh		5
Kotel	200 000*		22 000/rok [35]		20

Tabulka 15 - Investiční a provozní náklady

4.2 1. varianta – Současný diagram zatížení s celoročním užíváním objektu

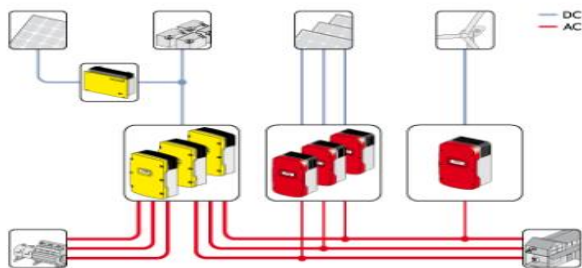
V této variantě je zachován současný diagram zatížení podle naměřených hodnot zobrazený, viz Obrázek 15. Elektrické rozvody nadále zůstanou třífázové (zejména kvůli vytápění elektrickým kotlem). Ostrovní systém je dimenzován na kontinuální výkon 18 kW, čímž nedojde k omezení uživatele. Navíc je možné krátkodobě střídače přetížit. Tento výkon bude využit maximálně tři čtvrtě hodiny ročně, je zde tedy rezerva pro růst spotřebičů mimo tuto špičku.

K současné spotřebě byl před vytvořením systému přičtena vlastní spotřeba všech přidávaných součástí a jednodenní samo vybití baterií. Vlastní spotřeba všech komponent; není zanedbatelná, v tomto případě tvoří až 2,45 kWh za den, v případě že by byl systém neaktivní celých 24 h

V systému budou použity následující komponenty, podle zapojení a různých potřebných nastavení může obsahovat některé kombinace:

- SMA Sunny Island 8.0H (3x 6 kW) [32]
 - Kontinuální výkon 6 kW, 30 minut 8 kW, 5 minut 9,1 kW, 3 vteřiny 11 kW
 - 48 VDC
- Baterie BMZ SSE 7.0 (10) [33]
 - Využitelná kapacita při paralelním zapojení 53,92 kWh při 80 % DOD
 - 48 VDC
- Elektrocentrála (10 kW)
- Střídač STP12000TL-20 (1x 12 kW) podle AC nebo DC zapojení [32]
- FV panely BenQ (50x 260 W, Poly Si, 5 stringů po 10 panelech) [34]

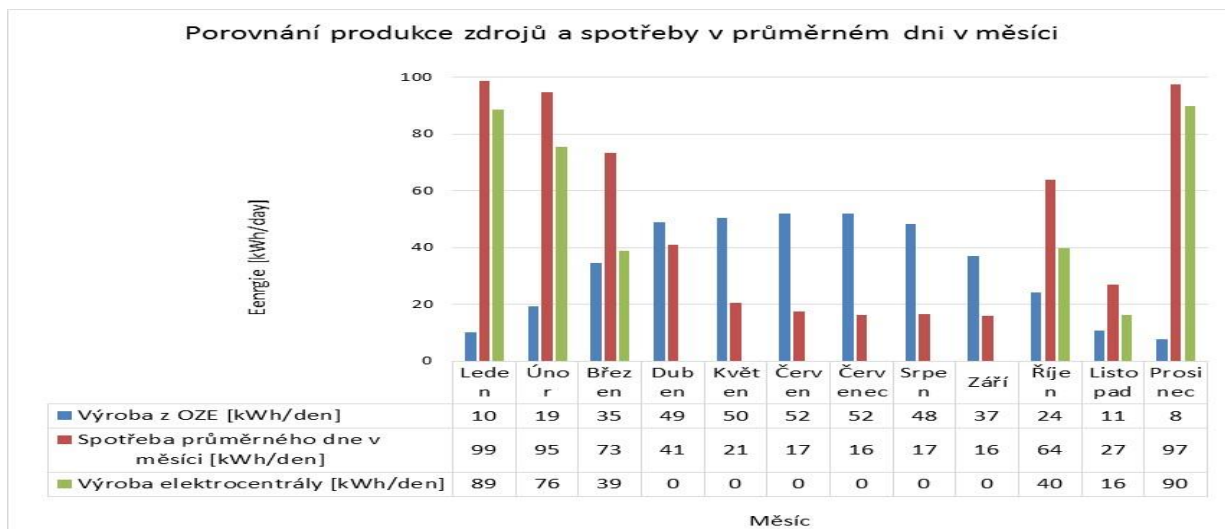
- Systém umožňuje přidat domácí centrum pro řízení spotřebičů (pračka, myčka atp.) Sunny Home Manager [32]
- V systému zůstává stávající třífázová FVE o výkonu 5,06 kW



Obrázek 29 - Schéma zapojení tří fázového ostrovního systému [32]

Aby byly sdružené náklady co nejmenší, podle výpočtu provedeného pomocí řešitele v MS Excel je ideální instalovat 10,93 kW panelů. Kvůli kompatibilitě napětí a proud FV panelů se střídačem a tedy v doporučených mezích je potřeba instalovat 13 kW. Autonomní doba systému bude 26,6 hodiny v průměrný den v roce, v letní průměrný den 60 hodin a v zimní průměrný den 17,5 hodiny.

Na následujícím obrázku je zobrazeno porovnání produkce zdrojů a spotřeby v průměrném dni daného měsíce s výše uvedenými komponenty.



Obrázek 30 - Produkce zdrojů a spotřeby 1. varianty

Elektrocentrála se podílí v zimním období na výrobě elektřiny mezi 53 % a 92 %. I když v létě se elektrocentrála prakticky na produkci nepodílí, za celý rok vyrobí 58 % spotřebované energie. FVE

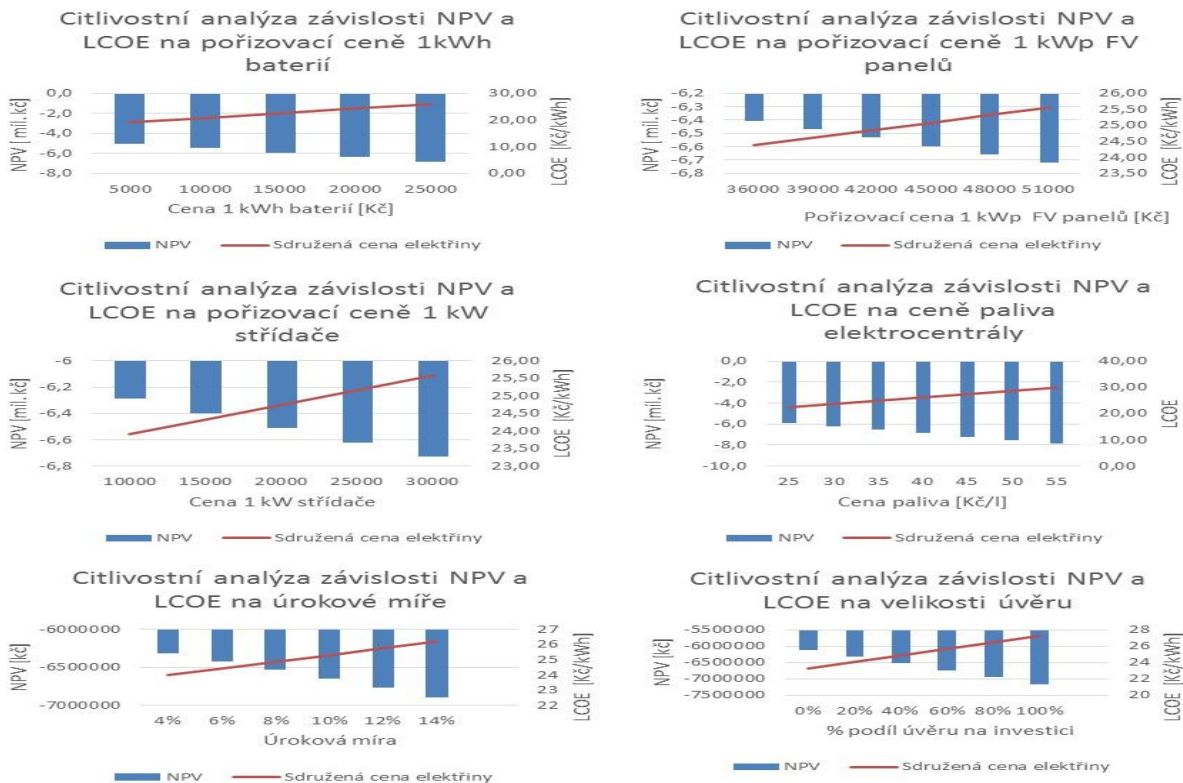
vyrobí energie téměř stejně, ne však ve chvíli kdy je potřeba. V tomto ostrovním systému nebyla použita VTE z důvodu, nízké rychlosti větru v dané oblasti a z toho plynoucí vysoké ceně produkce.

NPV tohoto systému je -6 531 431 Kč, sdružená cena elektřiny je 24,84 Kč/kWh. Další důležité ekonomické informace po provozu ostrovního systému budou uvedeny v kapitole 4.5.

Z investičních nákladů nejvíce NPV a sdruženou cenu elektřiny ovlivňuje cena baterií, panelů a invertorů, z provozních nákladů pak zejména cena paliva elektrocentrály. Proto jsem na tyto 4 parametry vytvořil citlivostní analýzy, které následují spolu s dalším velmi důležitými proměnnými, pro který je nutné udělat citlivostní analýzu a to je výše úvěru a úrok.

Ve všech případech je možné vstupními cenami snížit sdružené náklady v rozmezí jednotek korun. Nejvíce znatelné jsou změny v ceně baterií a ceny paliva elektrocentrály. Baterie a elektrocentrála jsou stěžejními prvky systému, které zabezpečují stabilní chod ostrovního systému a vyrovnávají výkonovou bilanci.

Méně znatelné jsou poté podmínky úvěru, přesto díky nim lze znatelně zvýšit NPV respektive snížit LCOE. Nejméně je pak znatelné ovlivnění ceny FV panelů a střídačů i tak se ale řadí k největším pořizovacím nákladům.



Obrázek 31 - Citlivostní analýzy 1. varianty

4.3 2. varianta – Omezená spotřeba elektrické energie na vytápění a celoroční využití objektu

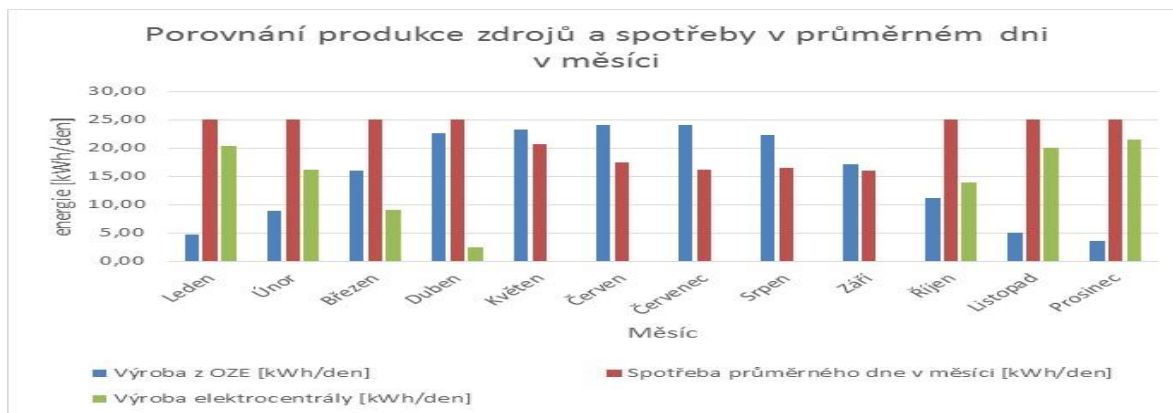
V této variantě je zachován celoroční způsob užívání domu. Z diagramu zatížení byl vyjmut kotel, který je nahrazen kotlem na tuhá paliva. Díky této změně je možné ostrovní systém vybudovat menší a hlavně jednofázový, což znamená investiční úspory, dále bude zkoumáno, zda se tyto změny projeví na ceně produkce. U 2. varianty jsou zkoumány dvě sub-varianty, první řeší sdruženou cenu produkce elektrické energie a druhá cenu elektrické i tepelné energie. Ostrovní systém je navržen pro kontinuální výkon 9,9 kW a průměrnou spotřebu 25 kWh/den v období od října do dubna. Ostrovní systém zůstává prakticky ve stejném složení komponentů jako předchozí, pouze s menšími změnami výkonu.

V systému budou použity následující komponenty, podle zapojení a různých potřebných nastavení může obsahovat některé jen kombinace:

- SMA Sunny Island 4.4M (3x 3,3 kW) [32]
 - Kontinuální výkon 3,3 kW, 30 minut 4,4 kW, 5 minut 4,6 kW, 3 vteřiny 5,5 kW
 - 48 VDC
- Baterie BMZ SSE 7.0 (4x 8 kW, využitelná kapacita 21,57 kWh) [33]
- Elektrocentrála (6 kW)
- Střídač Sunny boy 3000 TL (2x 3 kW) [32]
- FV panely BenQ (25x 260 W) [34]
- Systém umožňuje přidat domácí centrum pro řízení některých spotřebičů (pračka, myčka atp.) Sunny Home Manager [32]
- V systému zůstává stávající FVE, je potřeba ji přeměnit na jednofázovou (výměna střídače za Sunny boy 5000 TL)

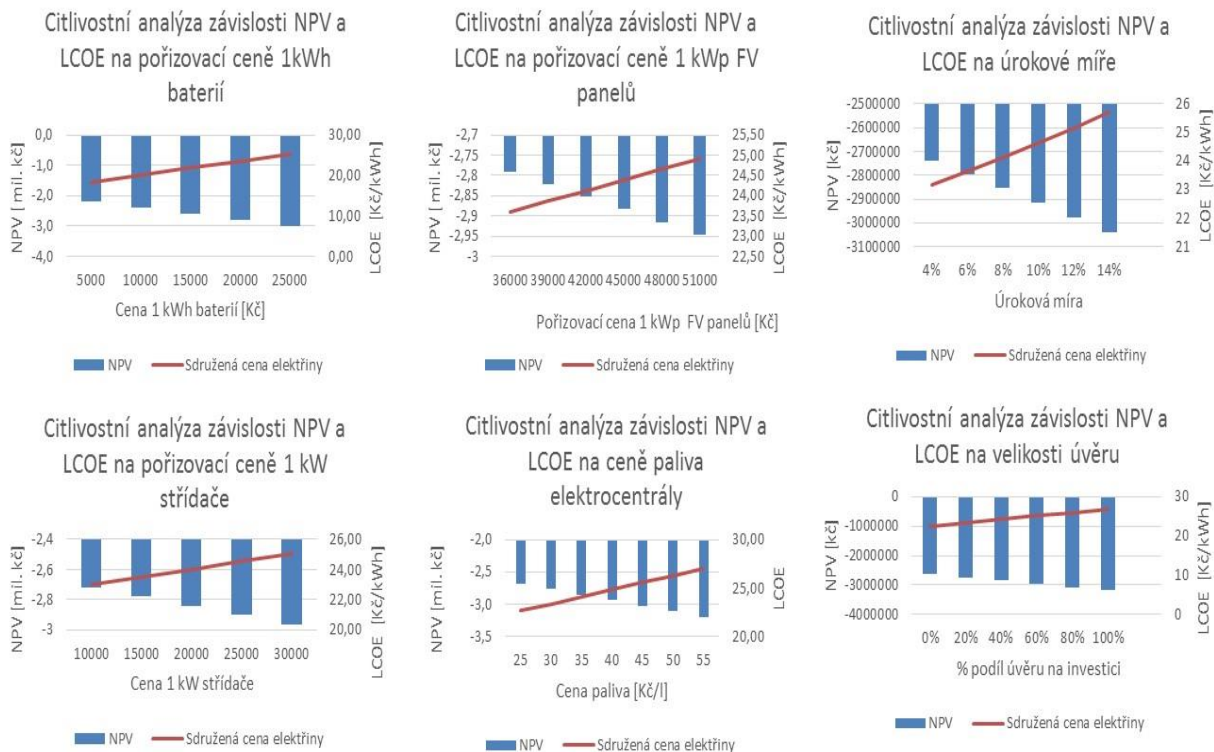
Schéma zapojení ostrovního jednofázového systému je přiblíženo, viz Obrázek 1.

V této variantě při optimalizaci vyšlo 6,65 kWp FV panelů, ze stejného důvodu jako předtím je použito 6,5 kW. Zvolené baterie v tomto případě zajistí autonomii po dobu 23,7 hodiny během průměrného dne v roce, 27,8 hodiny během průměrného letního dne a 20,7 hodiny během průměrného zimního dne.



Obrázek 32 - Porovnání zdrojů a spotřeby 2. varianty

Elektrocentrála v zimním období vyrábí až 86 %, celkem za celý rok vyrobí 38 % spotřebované energie. NPV tohoto systému je -3 307 849 Kč, sdružená cena elektřiny je 28,44 Kč/kWh. Sdružená cena energie (elektrina a topení) je 12,69 Kč/kWh. Další důležité ekonomické informace o provozu ostrovního systému budou uvedeny v kapitole 4.5. Stejně jako v předchozí variantě následují citlivostní analýzy na závislost NPV a LCOE na pořizovacích cenách nejdražších komponentů a palivových nákladů. Důležitá zůstává pořizovací cena baterií. Vzhledem k nižšímu využití elektrocentrály nemá cena paliva tak velký význam jako v předchozí variantě. Jelikož je nutné vyměnit střídač stávající FVE, vzrostl význam pořizovací ceny střídačů. Průběh citlivostních analýz 2. varianty je prakticky totožný s první variantou.



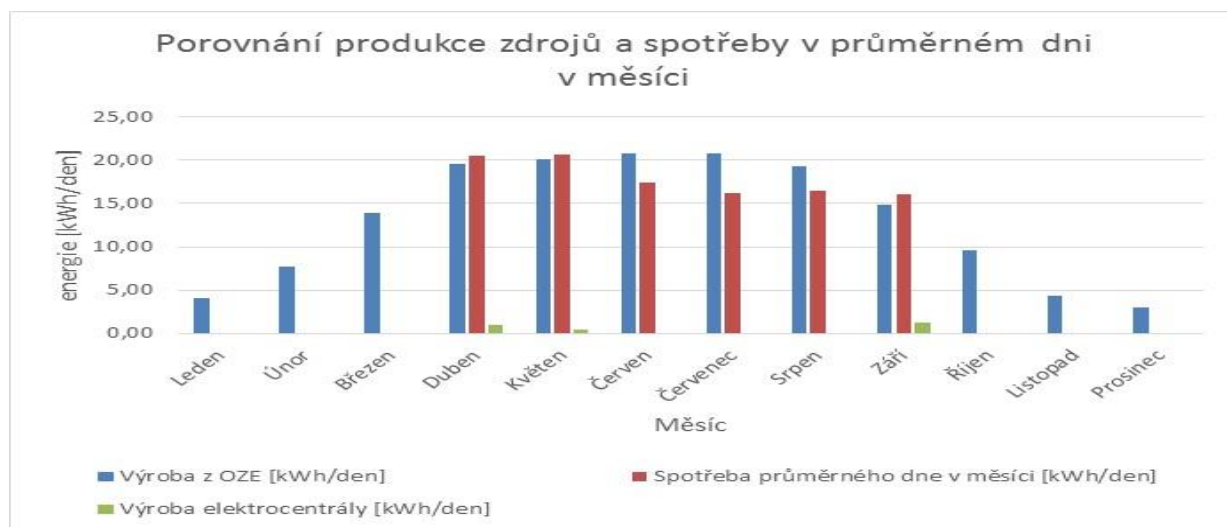
Obrázek 33 - Citlivostní analýzy 2. varianty

4.4 3. varianta – Současný diagram zatížení a pouze letní využití objektu

V této 3. variantě je použit pouze letní diagram zatížení pro dimenzování. Pro úvahu v této variantě se dům používá pouze jako letní chata pro soukromé a případně i komerční využití – nepřetržitý letní provoz. Systém je navržen pro maximální kontinuální výkon 9,9 kW. Veškerá produkce ostrovního systému v zimě bude použita pro temperování objektu, v tomto období bude zcela omezen provoz elektrocentrály. V této variantě nebude potřeba po druhé pořizovat baterie, přes zimu nebudou totiž využívány a nedojde k využití všech cyklů. Dále jsou sníženy náklady na opravy elektrocentrály.

- Ostrovní střídač SMA Sunny Island 4.4M (3x 3,3 kW) [32]
- Baterie BMZ SSE 7.0 (3x 8 kW, využitelná kapacita 16,18 kWh) [33]
- Elektrocentrála (6 kW)
- Střídač Sunny boy 3600 TL [32]
- FV panely BenQ (20x 260 W) [34]
- Systém umožňuje přidat domácí centrum pro řízení některých spotřebičů (pračka, myčka atp.) Sunny Home Manager [32]
- V systému zůstává stávající FVE, je potřeba ji přeměnit na jednofázovou (výměna střídače za Sunny boy 5000 TL)
- Schéma zapojení je totožné s předchozí, 2. variantou

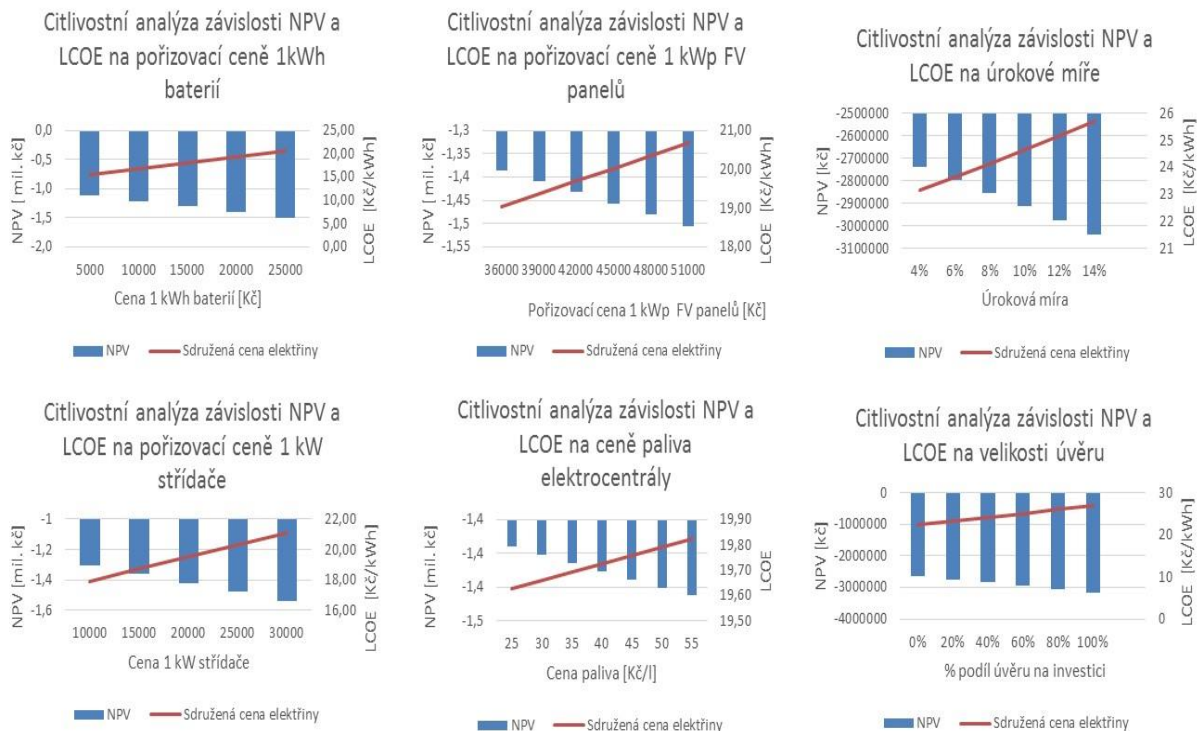
Elektrocentrála v této variantě působí více jako záloha, než aktivní zdroj, viz Obrázek 34, na kterém je výroba elektrocentrály jen nepatrná.



Obrázek 34 - Produkce zdrojů a spotřeba 3. varianty

Autonomie systému se pohybuje mezi 18,8 a 24,2 hodinami. NPV tohoto systému je - 432 958 Kč, sdužená cena elektřiny je 19,69 Kč/kWh. Další údaje jsou uvedeny dále v kapitole 4.5.

Pořizovací ceny baterií a cena paliva jsou opět spolu s podmínkami úvěru nejdůležitější proměnné, stejně jako v předchozích variantách.



Obrázek 35 - Citlivostní analýzy 3. varianty

4.5 Srovnání variant

Všechny tři varianty budou srovnány ze tří hledisek a to ekonomického, energetického a environmentálního. Všechny tři jsou pro uživatele/investora ostrovního systému důležitá. Záleží pouze na něm, co preferuje. Moje úvaha byla při sestavování všech 3 variant následující: nejprve je nutné uspokojit energetickou potřebu s co nejmenším omezením uživatele, poté nalézt ekonomicky ideální variantu a až poté se zamyslet, jaký bude mít varianta environmentální dopad.

4.5.1 Energetické srovnání variant

V následující tabulce jsou porovnány produkce a spotřeby průměrných dnů v měsíci jednotlivých variant a celkové bilance energií a výkonů. Nejvíce energeticky náročná je 1. varianta a 2. varianta, v té druhé však dochází k rozdělení práce do dvou zdrojů – zdroje elektrické energie a tepelné energie. Zde v tabulce je uvedena pouze elektrická energie.

	Varianta 1			Varianta 2			Varianta 3		
[kWh/den]	FVE s bat.	Eelektrocentr ála	Spotřeba	FVE s bat.	Eelektrocentr ála	Spotřeba	FVE s bat.	Eelektrocentr ála	Spotřeba
Leden	10	89	99	5	20	25	4	0	0
Únor	19	76	95	10	15	25	8	0	0
Březen	35	39	73	17	8	25	14	0	0
Duben	49	0	41	24	1	25	20	21	1
Květen	50	0	21	25	0	21	20	21	0,5
Červen	52	0	17	26	0	17	21	17	0
Červenec	52	0	16	26	0	16	21	16	0
Srpen	48	0	17	24	0	17	19	17	0
Září	37	0	16	19	0	16	15	16	1
Říjen	24	40	64	12	13	25	10	0	0
Listopad	11	16	27	5	20	25	4	0	0
Prosinec	8	90	97	4	21	25	3	0	0
Max. výkon [kW]	18	10	18	11	6	10	10	6	10
Spotřeba energie			17 700			7 960			3 276
Produkce energie	11 686	10 255	21 941	5 843	2 861	8 972	4 900	79	4 900

Tabulka 16 - Energetické srovnání variant

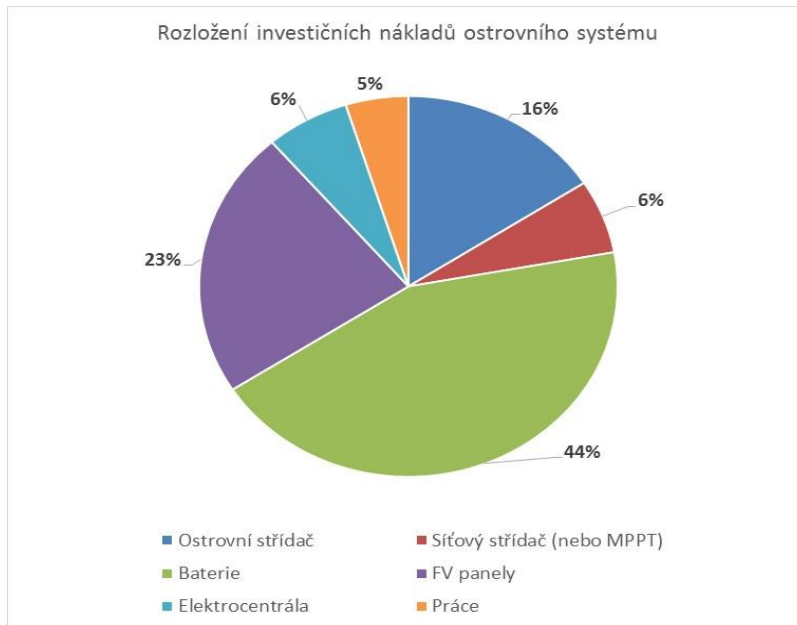
4.5.2 Ekonomické srovnání variant

Tabulka 17 shrnuje ekonomické srovnání variant. Pro druhou variant je v závorce uvedena sub-varianta, která zahrnuje náklady a výnosy jak tepelné energii kotle, tak elektrické energie.

	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
NPV [Kč]	-6 531 431	-2 852 738 (-3 393 492)	-1 432 958
LCOE [Kč/kWh]	24,85	24,13 (12,72)	19,69
Počáteční investice [Kč]	2 435 165	1 247 672 (-1 457 672)	982 191
Provozní náklady [Kč/rok]	20 220	15040 (15 040)	2 790
Palivové náklady [Kč/rok]	145 942	41046 (59046)	5 019
Spotřeba energie (s vlastní spotřebou a ztrátami)	17 700	7960 (17 960)	4900

Tabulka 17 - Ekonomické srovnání variant

Vliv velikosti systému na cenu jednotky produkce z těchto variant není zřejmý, více záleží na dané konfiguraci systému. Na následujícím obrázku jsou rozloženy náklady na první variantu podle podílu na celkové investici. Jak je vidět investici nejvíc ovlivňuje cena baterií, poté FV panelů a jako třetí cena střídačů.



Obrázek 36 - Podíl ceny komponentů na pořizovací ceně

Podle pane Krále, technika poskytování sítí VN a NN ze společnosti ČEZ Distribuce se cena za 1 m přípojky pohybuje v rozmezí 700-1200 Kč/m, podle jiného zdroje, elektromontážní společnosti se cena bude pohybovat kolem až 2000 Kč/m. Při ceně elektrické energie od distributora 4 Kč/kWh, vybudování 400 m dlouhé přípojky (vzdálenost domu k nejbližší trafostanici), ceně přípojky 1200 Kč/m, roční spotřebě 8000 kWh a uvažované době srovná 20 let, tedy situací srovnatelnou s druhou variantou, bude sružená cena elektřiny ze sítě 5,97 Kč/kWh, tedy 4,4 krát nižší.

4.5.3 Environmentální hodnocení

Ostrovní systém v podobě výše uvedených variant má zejména dva dopady na životní prostředí. Oba dva jsou způsobeny elektrocentrálou. První je hluk produkovaný elektrocentrálou, který se pohybuje mezi 70-90 dB ve vzdálenosti 5 m od elektrocentrály. Což je velmi hlasité. Například 40 dB je běžný hovor dvou lidí, 70 dB zvuk pračky - trvalý dlouhodobý zvuk v této hladině již má negativní účinky na člověka. 90 dB má nákladní auto při městském provozu, či kolem projíždějící vlak. Z tohoto důvodu je nutné umístit centrálu dál od obydlených místností, či dodatečně odhlučnit.

Druhé jsou emise výfukových plynů. Většina výrobců elektrocentrál uvádí emise podle standardizované normy EEA známé jako Euro1-5 pro automobily. Všechny vhodné elektrocentrály byly zařazeny do normy Euro 3, což znamená produkci škodlivin CO 2,1 g/kWh a 5 g/kWh NO_x. [36] Množství CO₂ a síry je dáno kvalitou spalované pohonné hmoty a spotřebou elektrocentrály.

Běžná spotřeba naftové je elektrocentrál je 0,37 l/kWh, obsah síry v naftě je limitován na 10 mg/kg, 1 litr nafty váží 0,88 kg, z čehož plyne, že produkce SO₂ je 3,03 mg/kWh. [37]

Spálením galonu nafty vznikne 10084 g CO₂ [38], galon má 3,785 litru. Spotřeba elektrocentrály je 0,37 l/kWh, což znamená, že litrem spálení nafty vznikne 968 g CO₂.

V uhelné elektrárně jsou emise CO 0,65 g/kWh, 7,7 g/kWh NO_x, 5,3 g/kWh SO₂ a 1213 g/kWh CO₂. [39]

V následujících tabulkách jsou uvedeny hodnoty průměrného dne, kolik by která varianta vyprodukovala emisí s porovnáním, kolik by bylo vyprodukováno v uhelném zdroji. Jako první následuje varianta 1. Během léta je v ostrovním systému spotřeba pokryta FVE a proto nejsou produkovány žádné emise. Během zimy jsou vypouštěny větší emise CO, ostatní sledované sloučeniny jsou na mnohem menší úrovni, než v uhelném zdroji.

	Varianta 1				Uhelný zdroj			
	CO [g/den]	NO _x [g/den]	SO ₂ [mg/den]	CO ₂ [kg/den]	CO [g/den]	NO _x [g/den]	SO ₂ [mg/den]	CO ₂ [kg/den]
Leden	186	443	269	87	64	761	524	120
Únor	159	378	229	75	62	730	502	115
Březen	81	194	118	38	48	565	389	89
Duben	0	0	0	0	27	316	218	50
Květen	0	0	0	0	13	159	109	25
Červen	0	0	0	0	11	134	93	21
Červenec	0	0	0	0	11	125	86	20
Srpen	0	0	0	0	11	127	88	20
Září	0	0	0	0	10	124	85	19
Říjen	84	199	121	39	42	492	339	78
Listopad	34	81	49	16	18	208	143	33
Prosinec	189	449	273	89	63	751	517	118
Celkem za rok	22,20 kg	52,86 kg	32,07 g	10,422 t	11,51 kg	136,3 kg	93,81 g	21,47 t

Tabulka 18 - Emise 1. varianty

Ve druhé variantě jsou rozdíly ještě znatelnější, dochází totiž k většímu pokrytí spotřeby z FVE i v zimním období. FVE je sice 2x menší než v případě první varianty, ale spotřeba klesla 4x. V posuzování druhé varianty z environmentálního hlediska není brán zřetel na vytápění objektu, posuzuje se pouze spotřebovaná elektrická energie.

	Varianta 2				Uhelný zdroj			
	CO [g/den]	NO _x [g/den]	SO ₂ [mg/den]	CO ₂ [kg/den]	CO [g/den]	NO _x [g/den]	SO ₂ [mg/den]	CO ₂ [kg/den]
Leden	42	100	60	20	16	193	133	30
Únor	32	77	47	15	16	193	133	30
Březen	16	38	23	8	16	193	133	30
Duben	1	3	2	1	16	193	133	30
Květen	0	0	0	0	13	159	109	25
Červen	0	0	0	0	11	134	93	21
Červenec	0	0	0	0	11	125	86	20
Srpen	0	0	0	0	11	127	88	20
Září	0	0	0	0	10	124	85	19
Říjen	27	65	39	13	16	193	133	30
Listopad	41	98	59	19	16	193	133	30
Prosinec	44	106	64	21	16	193	133	30
Celkem za rok	6,19 kg	14,75 kg	8,95 g	2,91 t	5,17 kg	61,29 kg	42,19 g	9,66 t

Tabulka 19 - Emise 2. varianty

Nejlépe z pohledu emisí je na tom třetí varianta, prakticky celé léto je používána pouze FVE a proto elektrocentrála nevypouští žádné emise. U ostrovního systém u spolu jdou souběžně emise hluku i emise spalín. Pokud elektrocentrála často běží, vyprodukuje noho spalina a neustálý hluk je daleko nepříjemnější než krátkodobý.

	Varianta 3				Uhelný zdroj			
	CO [g/den]	NO _x [g/den]	SO ₂ [mg/den]	CO ₂ [kg/den]	CO [g/den]	NO _x [g/den]	SO ₂ [mg/den]	CO ₂ [kg/den]
Leden	0	0	0	0	0	0	0	0
Únor	0	0	0	0	0	0	0	0
Březen	0	0	0	0	0	0	0	0
Duben	2	5	3	1	13	158	109	25
Květen	1	2	1	0	13	159	109	25
Červen	0	0	0	0	11	134	93	21
Červenec	0	0	0	0	11	125	86	20
Srpen	0	0	0	0	11	127	88	20
Září	3	6	4	1	10	124	85	19
Říjen	0	0	0	0	0	0	0	0
Listopad	0	0	0	0	0	0	0	0
Prosinec	0	0	0	0	0	0	0	0
Celkem za rok	170 g	406 g	246 mg	80 kg	11 506 g	25 227 g	17 364 mg	3 974 kg

Tabulka 20 - Emise 3. varianty

Závěr

V této diplomové práci jsem vypracoval studii využití kombinace malé fotovoltaické a větrné elektrárny pro ostrovní provoz na vybraném objektu. Byla posouzena vhodnost místa instalace vzhledem k místním meteorologickým podmínkám a návrh ostrovního systému tomu přizpůsoben.

V první kapitole jsem obecně popsal ostrovní systém a jeho komponenty, zejména princip a charakteristiku výkonu fotovoltaických článků a větrných turbín v kapitole 1.2 a 1.3. Důležitou součástí ostrovního systému jsou baterie, základní druhy, jejich vlastnosti a nebezpečné procesy, zkracující jejich životnost byly popsány v kapitole 1.5.

Vybraný rodinný dům jsem nejprve charakterizoval pomocí diagramu trvání zatížení naměřených hodnot (kapitola 2.2.1) a poté podle typového diagramu dodávky, který jsem srovnal s naměřenými hodnotami v kapitole 2.2.2. Naměřená spotřeba rodinného domu je specifická tím, že na střeše je již malá FVE instalována. Tato FVE ovlivňuje naměřenou spotřebu domu, pro potřeby výpočtů ostrovního systému uvažováno, že na domě zůstane.

Provedl jsem analýzu nebezpečí zásahu bleskem v kapitole 3.5. Pravděpodobnosti zásahu jsou malé přesto však reálné. Nejlepší ochrana proti ekonomické újmě je pojištění. Při výměně panelů je nutné dbát na velikosti proudu a napětí, aby zbytečně nedocházelo při sériovém či paralelním spojení ke snižování výkonu. Dále se musí dbát na to, aby napětí a proud stringu splňovali určené hranice na vstupu do střídače (nebo MPPT).

Vytvořil jsem model 1kW fotovoltaické elektrárny. Produkce modelové FVE byla porovnána s normovanou produkcí stávající FVE. Ve všech měsících vzájemné odchylky oscilovaly od -7,9 % do 11,2 % až na leden, ve kterém se tříletý naměřený průměr liší od modelu o 61,7 % (kapitola 3.1).

V kapitole 3.2 jsem vytvořil 1kW model větrné turbíny. V přímé blízkosti domu není žádná větrná elektrárna nainstalována, proto byl na střechu v lednu 2016 umístěn anemometr. V tomto případě byly porovnávány tedy pouze rychlosti větru. V lednu se opět naměřená hodnota průměrné rychlosti větru významně liší od hodnoty modelu. Odchylka činí -70 %. Naopak v květnu je průměrná rychlost o 56 % vyšší než modelová. I když je průměrná naměřená rychlost větru ve 30 m za prvních pět měsíců v roce 2,11 m/s a modelová 1,89 m/s, nelze na základě takovéto rychlosti VTE do ostrovního systému integrovat. Elektrocentrála je schopná zastat stejnou práci s menšími náklady.

Hypotéza vzájemného doplňování se fotovoltaické elektrárny a větrné elektrárny během roku nebyla potvrzena, krátkodobé měření rychlosti větru naznačuje spíše opačný trend. Tvar produkční křivky naměřené rychlosti větru je v průběhu roku konkávní na rozdíl od očekávaného konvexního tvaru.

Sdružená cena 1 vyrobené kWh závisí na celkovém ročním množství vyrobené elektřiny zdrojem. Obecně pro všechny tři řešené varianty platí, že VTE je možné integrovat do ostrovního systému až při výrobě 1400 kWh/rok k čemuž je potřeba roční průměrná rychlost větru 4,1 m/s. Průměrná naměřená rychlost i modelová rychlost je tedy příliš nízká.

Použil jsem dvě metody dimenzování hybridního ostrovního systému. První byla použita pouze pro potřeby modelu spolupráce FVE a VTE s bateriemi a elektrocentrálou, protože nebrala v úvahu ekonomiku ostrovního systému. V kapitole 3.5 jsem vytvořil grafický model založený na naměřených datech výroby FVE, naměřené rychlosti větru a naměřené spotřebě. Z tohoto modelu je patrné, že výkon instalovaných prvků musí být v určité rovnováze, aby nemusel být u některých zbytečně omezován.

Stanovil jsem 3 varianty využití objektu a v návaznosti na tom, sestavil ostrovní systém vyhovující určeným podmínkám. Citlivostní analýzy všech variant poukázaly na důležitost cen a podmínek vybraných vstupů. Ekonomické, energetické a environmentální výsledky jednotlivých variant jsou shrnuty v kapitole 4.5.

V dané lokalitě za daných podmínek je elektřina z ostrovního systému při středně velkém odběru domácnosti více než 4x dražší než při zasíťování pozemku a odběru z distribuční sítě.

Všechny varianty zásobování vychází ekonomicky hůře, než výstavba přípojky k pozemku, na druhou stranu všechny varianty produkují menší množství skleníkových a další emisních plynů než výroba elektřiny v uhelné elektrárně. Problém vyvstává s hlasitostí elektrocentrály, která může být zejména v zimním období (kdy často běží) nepříjemná až škodlivá pokud není dostatečně odhlučněna.

Použitá literatura a zdroje informací

- [1] LUŤCHA, J. *Hybridní soustava větrné elektrárny a solárních fotovoltaických článků: Samostatný zdroj elektrické energie*. In: *Časopis Stavebnictví* [online]. 2009 [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: http://www.casopisstavebnictvi.cz/hybridni-soustava-vetrne-elektrarny-a-solarnich-fotovoltackych-clanku_A1906_I26
- [2] FESLI, U., R. BAYIR a M. ÖZER. *Design and Implementation of a Domestic Solar-Wind Hybrid Energy System* [online]. 2009, , 5 [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Mahmut_Ozer2/publication/224091497_Design_and_implementation_of_a_domestic_solar-wind_hybrid_energy_system/links/5469e75e0cf2397f782e8301.pdf
- [3] MARKVART, T. *Dimenzování hybridních systémů fotovoltaika-vítr* [online]. University of Southampton: TZB info, 2012 [cit. 2016-01-11]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/8747-dimenzovani-hybridnich-systemu-fotovoltacka-vitr>
- [4] KUSALA, J. ČEZ. *Svět energie* [online]. 2006 [cit. 2015-12-11]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/solar.htm>
- [5] QUASCHNING, V. *Obnovitelné zdroje energií*. Praha: Grada, 2010. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [6] ITACA [online]. Spain, 2015 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://www.itacanet.org/>
- [7] HABERLIN, Heinrich a TRANSLATED BY HERBERT EPPLE. *Photovoltaics System Design and Practice*. 3rd ed. Hoboken: John Wiley, 2012. ISBN 978-111-9977-001.
- [8] Sunshine Duration. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-08-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Sunshine_duration
- [9] ISOFOENERGY [online]. 2009 [cit. 2015-12-29]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz>
- [10] MÁCA, J., P. ABRAHAM a P. BAČA. *Zkroťte sílu větru*. In: *HW Vše o elektronice a programování* [online]. 2012 [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/zkrotte-silu-vetru-bude-pracovat-pro-vas.html>
- [11] ECO TREND RESEARCH CENTRE, s.r.o. *Souhrn Podmínek pro uplatnění malých OZE v ČR*. Omega, 2014. ENV/CZ009649.
- [12] *Windpower* [online]. Danmark: Danish Wind Industry Association, 2003 [cit. 2015-09-09]. Dostupné z: www.windpower.org

- [13] ŠKORPÍK, J. *Transformační technologie: Využití energie větru*. Brno, 2010, , 8. ISSN 1804-8293. Dostupné také z: <http://www.transformacni-technologie.cz/vyuziti-energie-vetru.html>
- [14] *Retscreen Plus: Wind Energy Project Analysis*. Natural Resources Canada. Ottawa: CANMET Energy Technology Centre Varennes (CETS, NASA, UNEP, GEF), 2004.
- [15] CENEK, M. *Akumulátory a baterie*. Praha: STRO.M, 1996.
- [16] HLINICA, P. Ostrovní fotovoltaické systémy: 6. díl ze seriálu článků - Jaký solární regulátor použít. *Deramax.cz* [online]. [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.deramax.cz/6-jaky-solarni-regulator-pouzit-6-dil-ze-serialu-clanku>
- [17] RAHN, Christopher D. *Battery systems engineering*. Sussex: John Wiley & Sons, Ltd, 2013. ISBN 978-111-9979-500.
- [18] BROUSSELY, M. a G. PISTOIA. *Industrial applications of batteries: from cars to aerospace and energy storage*. Boston: Elsevier, 2007. ISBN 044521607.
- [19] KUSAKANA, K. a J. VERMAAK. Hybrid diesel generator/renewable energy performance modeling. *Renewable energy* [online]. Elsevier, 2013, (67), 97-102 [cit. 2015-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/275182261_Hybrid_diesel_generatorrenewable_energy_system_performance_modeling
- [21] Typový diagram dodávky. *OTE, a.s.* [online]. [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: <http://www.ote-cr.cz/statistika/typove-diagramy-dodavek-elektriny/prepocetene-tdd>
- [22] BORTOLINI, M., M. GAMBERI, A. GRAZIANI a F. PILATI. Economic and environmental bi-objective design of an off-grid photovoltaic–battery–diesel generator hybrid energy system. *Energy Conversion and Management* [online]. 2015, **106**, 1024-1038 [cit. 2016-04-18]. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.10.051. ISSN 01968904. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890415009735>
- [23] IMERGY POWER SYSTEMS, Inc. *Energy Saving using Flow Batteries: Telecom Base Station Application*. Freemont USA, 2015. Dostupné také z: http://assets.imergy.com/uploads/products/case-studies/IMERGY_Telecom_CaseStudies_Paper_-12000001007-002.pdf
- [24] BRUNARIE, J. Fuel savings make a powerful case for hybrid diesel generator systems. *Power engineering* [online]. 2011 [cit. 2016-03-19]. Dostupné z: <http://www.powerengineeringint.com/articles/print/volume-19/issue-8/features/fuel-savings-make-a-powerful-case-for-hybrid-diesel-generator-systems.html>
- [25] ČESKÁ NÁRONÍ BANKA: Měnová politika. *ČNB* [online]. 2016 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z:

https://www.cnb.cz/cs/menova_politika/prognoza/index.html?cnb_css=true

- [26] *PVGIS* [online]. Institute for Energy and Transport, 2015 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmmaps/eur.htm#CZ> a <http://www.photovoltaic-software.com/>
- [27] Ekowatt: Porovnání modelů. *Centrum pro obnovitelné zdroje a úspory* [online]. České Budějovice, 2008 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <http://fotovoltaika.ekowatt.cz/porovnani-modelu.php>
- [28] NASA: Global wind patterns. *Florida Centre for Environmental Studies* [online]. Florida USA, 2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.ces.fau.edu/nasa/content/resources/global-wind-patterns.php>
- [29] BORTOLINI, M., M. GAMBERI, A. GRAZIANI a F. PILATI. *Economic and environmental bi-objective design of an off-grid photovoltaic–battery–diesel generator hybrid energy system* [online]. [cit. 2016-04-22]. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.10.051. ISBN 10.1016/j.enconman.2015.10.051. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890415009735>
- [30] OLADOKUN, V.O. a O.C. ASEMOTA. Unit cost of electricity in Nigeria: A cost model for captive diesel powered generating system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, **52**, 35-40 [cit. 2016-04-22]. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.028. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115006759>
- [31] ERU: Roční zpráva. *Energetický regulační úřad* [online]. 2006 [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: http://www.eru.cz/legacyerustaticdata/user_data/files/statistika_elektro/rocn_zprava/2006/mapy/15.htm
- [32] *SMA* [online]. Niestetal, Germany, 2015 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: www.sma.de
- [33] *BMZ GmbH: The Innovation group* [online]. Karlstein, Germany [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.bmz-gmbh.de/home/0,2,44.html>
- [34] *AU Optronics: Benq Solar* [online]. 2016 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://www.benqsolar.com/?sn=1268&lang=en-US>
- [35] Porovnání nákladů na vytápění: Výpočet a grafické porovnání nákladů na vytápění, teplou vodu a elektrickou energii v budovách. *TZB: Technické zařízení budov* [online]. 2016 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/138-porovnani-nakladu-na-vytapani-tzb-info>
- [36] European emission standards. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/European_emission_standards

- [37] ČEPRO: *EUROOIL* [online]. 2011 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <https://www.ceproas.cz/nafta-motorova>
- [38] Ekoblog: Spočítejte si, kolik emisí CO₂ vyprodukuje Vaše auto. : *DOPRAVA* [online]. Jan Horčík, 2014 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://www.ekoblog.cz/?q=emise>
- [39] Srdečný, K., Truxa, J.: *Obnovitelné zdroje energie v jižních Čechách a Horním Rakousku*, Nakladatelství ARSCI, Praha 2000.

Seznam zkratek

TUV	Teplá užitková voda
OZE	Obnovitelné zdroje energie
FV	Fotovoltaika/fotovoltaický
FVE _(i)	Fotovoltaická elektrárna (instalovaný výkon)
VTE _(i)	Větrná elektrárna (instalovaný výkon)
MPPT	Vyhledávání bodu maximálního výkonu (Maximal power point tracker)
MPP	Bod maximálního výkonu (Maximal power point)
P-N	Pozitivní-negativní
Mono-Si	Monokrystalický křemík
Multi-Si	Multi/polykrystalický křemík
a-Si	Amorfní křemík
DOD	Stav vybití (Depth of discharge)
SOC	Stav nabití (State of charge)
AGM	Elektrolyt absorbovaný v speciální tkanině ze skla (Absorbed Glass Mat)
VRLA	Ventilem regulovaná olověná baterie (Valve Regulate Lead Acid)
U [V]	Napětí
I [A]	Elektrický proud
P [W]	Výkon
A [m ²]	Plocha
E [kWh]	Energie
P _{peak}	Jmenovitý výkon
H ₀	Konstantní výkon dopadajícího světla 1000 W
I _{sc}	Solární konstanta
ρ [kg/m ³]	Hustota
v [m/s]	Rychlost
π	Matematická konstanta
r [m]	Poloměr kruhu
k	Špičatost Weibulova rozdělení
C	Faktor škály
Γ	Gama funkce
LCOE	Sdružená cena elektřiny (Levelized Cost of Electricity)
NPV	Čistá současná hodnota

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schéma instalace hybridního systému [32].....	12
Obrázek 2 - Vodivost typu N [4]	13
Obrázek 3 - Vodivost typu P [4]	13
Obrázek 4 - U-I charakteristika [5].....	14
Obrázek 5 - Sluneční konstanta, [6].....	15
Obrázek 6 - Sluneční záření po vstupu do atmosféry [6].....	16
Obrázek 7 - Úhel Slunce nad obzorem (Zdroj: [6],	17
Obrázek 8 - Celosvětová mapa ročního úhrnu doby	17
Obrázek 9 - Mapa ČR ročního úhrnu doby svitu Slunce [9].....	18
Obrázek 10 - Osa rotace větrných turbín [10].....	19
Obrázek 11 - Vhodné lokality pro výstavbu VTE v ČR	21
Obrázek 12 – Maximal power point tracker - MPPT.....	22
Obrázek 13 - Diagram trvání zatížení.....	29
Obrázek 14 - TDD 2013-2015	30
Obrázek 15 - Srovnání diagramů dodávky	31
Obrázek 16 - Diagram zatížení průměrného letního dne	31
Obrázek 17 - Diagram zatížení průměrného zimního dne	32
Obrázek 18 – Procentuální podíl FVE na celkové spotřebě	34
Obrázek 19 - Podíl FVE v kWh na celkové spotřebě	34
Obrázek 20 - Sezónní model FVE	36
Obrázek 21 - Srovnání naměřené hustoty pravděpodobnosti a hustoty podle Weibullova rozdělení.....	38
Obrázek 22 - Větrná růžice směr větru Obrázek 23 - Větrná růžice rychlost větru.....	39
Obrázek 24 - Krajní body dimenzování FVE a VTE.....	39
Obrázek 25 - Porovnání profilu produkce a spotřeby	40
Obrázek 26 - Model výkonů součástí systému únorový týden - dimenzováno pro letní období	42
Obrázek 27 - Model spolupráce zdrojů na pokrytí spotřeby únorový týden - dimenzováno pro zimní období	42
Obrázek 28 - Sdružené ceny zdroje o výkonu 1 kW.....	45
Obrázek 29 - Schéma zapojení tří fázového ostrovního systému [32].....	47
Obrázek 30 - Produkce zdrojů a spotřeby 1. varianty.....	47
Obrázek 31 - Citlivostní analýzy 1. varianty	48
Obrázek 32 - Porovnání zdrojů a spotřeby 2. varianty.....	49
Obrázek 33 - Citlivostní analýzy 2. varianty	50
Obrázek 34 - Produkce zdrojů a spotřeba 3. varianty	51
Obrázek 35 - Citlivostní analýzy 3. varianty	52
Obrázek 36 - Podíl ceny komponentů na pořizovací ceně.....	54

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Srovnání fotovoltaických panelů	15
Tabulka 2 - Osa rotace větrných turbín.....	18
Tabulka 3 - Velikost větrných turbín [11]	19
Tabulka 4 - Třídy drsnosti a koeficient Hellmanovy rovnice	20
Tabulka 5 – Procesy zkracující délku života olověné baterie [15] [17].....	24
Tabulka 6 - Procesy zkracující délku života NiM-H baterie [17].....	25
Tabulka 7 - Procesy zkracující délku života Li-ion baterie [17] [18]	26
Tabulka 8 - Srovnání baterií vhodných do autonomního systému. [17], hodnoty označené * [18].....	26
Tabulka 9 - Seznam spotřebičů.....	29
Tabulka 10 - Charakteristické hodnoty spotřeby	32
Tabulka 11 - Charakteristika stávající FVE	33
Tabulka 12 - Porovnání modelu a naměřených dat FVE	36
Tabulka 13 - Srovnání naměřené a modelové rychlosti větru.....	38
Tabulka 14 - LCOE jednotlivých zdrojů za stávajících podmínek	44
Tabulka 15 - Investiční a provozní náklady.....	46
Tabulka 16 - Energetické srovnání variant	53
Tabulka 17 - Ekonomické srovnání variant	53
Tabulka 18 - Emise 1. varianty	55
Tabulka 19 - Emise 2. varianty	56
Tabulka 20 - Emise 3. varianty	56

Seznam použitých externích souborů

Sešity aplikace MS excel:

1. 15min diagram zatížení
2. 2012-2015 spotřeba a export FVE
3. Data z meteostanice
4. Energetický audit 2015
5. Model FVE
6. Model větru
7. Model výroby FVE, VTE, generátoru, baterie a spotřeba
8. Spotřeba, FV a vítr 1. a 2. varianta
9. Spotřeba, FV a vítr 3. varianta
10. TDD
11. Výměna FV panelů po zásahu bleskem