

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce  
Obor: Aplikovaná elektrotechnika



# Energetické mikrosítě

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Aleš Moravec  
Vedoucí práce: Ing. Pavel Koblíček, Ph.D.  
Rok: 2024



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Moravec** Jméno: **Aleš** Osobní číslo: **507304**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Energetické mikrosítě**

Název bakalářské práce anglicky:

**Microgrids**

Pokyny pro vypracování:

1. Zorientujte se v problematice tzv. chytrých energetických sítí.
2. Prostudujte dostupná data k realizovaným projektům a zjistěte zkušenosti s jejich provozem.
3. Proveďte kvalitní rešerši na toto téma.
4. Zpracujte přehled využívaných zdrojů energie pro tyto sítě a porovnejte je podle vhodných kritérií mezi sebou.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Garg, V., K., Sharma, S., Overview on Microgrid System. 5th IEEE International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing, 2018, Solan, India.
- [2] Cheng, Y., Zhang, T., Xu, J., Energy Storage Technology in Multiple Microgrids: A Survey. Proceedings of the 40th Chinese Control Conference, 2021, Shanghai, China.
- [3] Chmiel, Z., Bhattacharyya, S. C., Analysis of off-grid electricity system at Isle of Eigg (Scotland): Lessons for developing countries. Renewable Energy, Vol. 81, 2015.
- [4] Neves, D., Silva, C. A., Connors, S., Design and implementation of hybrid renewable energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 31, 2014.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Pavel Koblre, Ph.D. katedra elektrických pohonů a trakce**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Pavel Koblre, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## **Prohlášení**

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

V Praze dne .....

.....  
Aleš Moravec

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu práce Ing. Pavlu Kobrlemu, Ph.D. za věcné připomínky při konzultacích a pomoc při tvorbě bakalářské práce.

Aleš Moravec

## Abstrakt

Tato práce se zabývá energetickými mikrosítěmi a jejich rolí v moderní energetice. Obsahuje základní informace o stávající energetické infrastruktuře a jejím fungování. Následuje rešerše konceptů chytrých sítí v oblastech chytrého měření, komunikace, využívání prvků a popis vztahu mikrosítí s chytrými sítěmi. Hlavní část práce spočívá v popisu projektů osmi českých a šesti zahraničních mikrosítí. Popisy obsahují kontext dané mikrosítě, jakými technologiemi byla mikrosít realizována a jaké jsou praktické výsledky. Na závěr je zpracován přehled a porovnání užitých výrobních a akumulčních technologií.

**Klíčová slova:** mikrosítě, chytré sítě, výroba elektřiny, akumulace elektřiny

## Abstract

This thesis deals with microgrids and their role in modern energy industry. It contains basic review of the existing energy infrastructure and how it operates. This is followed by a review of smartgrid concepts such as smart metering, data transfer, utilization of small grid-connected devices, and a description of the relationship between microgrids and smartgrids. The main part of the thesis consists of project overviews of eight Czech and six foreign microgrids. The overviews contain the context of the given microgrid, the distributed energy resources which were used, and what the results are. The last part is an overview and comparison of the distributed energy resources used in these microgrids.

**Keywords:** Microgrids, Smartgrids, Distributed Generation, Energy Storage Systems

# Obsah

Seznam obrázků	x
Seznam tabulek	xii
Úvod	1
<b>1 Energetická infrastruktura dneška</b>	<b>3</b>
1.1 Typy elektráren	3
1.2 Struktura soustavy	5
1.3 Bilance soustavy	6
1.4 Řízení soustavy	8
1.5 Trh s elektřinou	10
1.6 Teplárenský sektor	11
1.7 Problémy	12
<b>2 Problematika chytrých sítí</b>	<b>15</b>
2.1 Definice	15
2.2 Chytré měření	15
2.3 Komunikace	16
2.4 Využití prvků v síti	18
2.5 Mikrosítě	21
<b>3 Mikrosítě v České republice</b>	<b>23</b>
3.1 Logistické centrum ADLER (Malfini) Ostrava	23
3.2 Strojírny Rumburk	25
3.3 Výrobní závod Fénix Jeseník	29
3.4 Průmyslový areál Tabáčka v Hodoníně	32
3.5 Obec Mikolajice	33
3.6 Město Budišov nad Budišovkou	36
3.7 Obec Kněžice	38
3.8 Zemědělská společnost Bruzovice	39
<b>4 Mikrosítě v zahraničí</b>	<b>41</b>
4.1 Skotský ostrov Eigg	41
4.2 Vesnice Agkistro v Řecku	44
4.3 Farma Agropecuaria Furen na ostrově Gran Canaria	48
4.4 Logistické centrum Lidl ve Finsku	50
4.5 Farma Stone Edge v Kalifornii	51
4.6 Oblast Bonita v Kalifornii	54
<b>5 Technologie výroby elektrické energie v mikrosítích</b>	<b>57</b>
5.1 Fotovoltaické elektrárny	57
5.2 Větrné elektrárny	61



5.3	Vodní elektrárny . . . . .	65
5.4	Malé tepelné elektrárny . . . . .	68
5.5	Porovnání a použití . . . . .	69
<b>6</b>	<b>Technologie akumulace elektrické energie v mikrosítích</b>	<b>73</b>
6.1	Elektrochemické články (baterie) . . . . .	73
6.2	Superkondenzátory . . . . .	76
6.3	Setrvačníky . . . . .	77
6.4	Vodík . . . . .	78
6.5	Porovnání a použití . . . . .	81
	<b>Závěr</b>	<b>85</b>
	<b>Bibliografie</b>	<b>87</b>

# Seznam obrázků

1.1	Zjednodušené zobrazení elektrizační soustavy. . . . .	5
1.2	Bilance jednotlivých krajů. . . . .	6
1.3	Podíl zdrojů energie na výrobě elektřiny v České republice, v Evropě a ve světě pro rok 2023. Vygenerováno z [15]. . . . .	7
1.4	Příklad obecného diagramu zatížení $P = f(t)$ s vymezenými pásmy. . . . .	7
1.5	Modelový příklad změny statické charakteristiky zátěží sítě (ze z1 na z2). . . . .	8
1.6	Podíl jednotlivých paliv na výrobě tepla v rámci Evropské unie v roce 2020. . . . .	11
1.7	Mapa systémů centrálního zásobování teplem ve vybraných evropských státech. . . . .	12
3.1	Vzdušný pohled na výslednou instalaci fotovoltaických panelů. [78] . . . . .	24
3.2	Interiér přístavku s bateriemi (vpravo) a skříněmi obsahující jejich střídače. [78] . . . . .	24
3.3	Letecký snímek výrobního komplexu Strojíren Rumburk s patrnou rozdílnou orientací jednotlivých elektráren. Vygenerováno z [81]. . . . .	26
3.4	Jedna ze skříní s bateriovými packy, patrné jsou silové propoje měděnými šínami na bocích a monitorovací jednotky na přední straně. [82] . . . . .	27
3.5	Skříň v hlavní rozvodně, kde dochází k připojování bateriového úložiště do rozvodné sítě areálu. Vpravo je zčásti vidět transformátor pro galvanické oddělení. [83] . . . . .	28
3.6	Letecký snímek části výrobního areálu FENIX s jednotlivými střechami fotovoltaickými elektrárnami. . . . .	29
3.7	Příklad rozložení menšího kontejnerového provedení akumulčního systému AERS SAS. [86] . . . . .	30
3.8	Instalované čtyřicetistopé kontejnery vedle fotovoltaické elektrárny. Zadní je čistě bateriový. [87] . . . . .	30
3.9	Část průmyslového areálu pokrytá fotovoltaickými elektrárnami s různou orientací. [89] . . . . .	32
3.10	Měniče na jednom z transformátorů, v pozadí se nachází kontejnerová úložiště. [91] . . . . .	33
3.11	Budovy mikrosítě v Mikolajicích. Zleva: budova obecního úřadu, hasičská zbrojnice, prodejna potravin. Vygenerováno z [81]. . . . .	34
3.12	Kogenerační jednotka Wave. [96] . . . . .	34
3.13	Dvě akumulční nádrže na teplou vodu, každá s objemem 1000 l. [97] . . . . .	35
3.14	Komplex obecních budov v Budišově nad Budišovkou. . . . .	36
3.15	Kotelna v objektu základní školy. Zleva: kogenerační jednotka TO-TEM, akumulční nádoba, plynové kondenzační kotle. [98] . . . . .	37

3.16	Schéma energetického systému obce Kněžice. [103]	38
3.17	Místnost s rozvaděči a bateriovým úložištěm. [105]	40
4.1	Fotovoltaická elektrárna u centrální budovy. [110]	42
4.2	Bateriová místnost v centrální budově. [110]	43
4.3	Vybavení přípojky domu. [110]	43
4.4	Graf podílu jednotlivých zdrojů na výrobě elektrické energie od listopadu 2008 do října 2009. [110]	44
4.5	Vodíkový akumulací systém v kontejnerovém provedení. [115]	45
4.6	Schéma systému napájení a akumulace. [115]	46
4.7	Testované diagramy zatížení v ostrovním režimu provozu. [116]	47
4.8	Výsledky podílu baterií a palivových článků na dodávkách energie v ostrovním režimu provozu. [116]	47
4.9	Denní diagram zatížení farmy po jednotlivých hodinách. [117]	48
4.10	Schéma celého systému farmy. Černě střídavé silové propoje, zeleně stejnosměrné silové propoje, modře vodík, zbytek komunikace. [117]	49
4.11	Denní diagram zatížení farmy po všech rozšířeních. [117]	50
4.12	Letecký snímek logistického centra. Vygenerováno z [81].	51
4.13	Bateriové úložiště Tesla Powerpack s měničem Dynapower. [126]	53
4.14	Palivové články. [126]	53
4.15	Mapa všech DER (zdrojů a akumulací) mikrosítě. [127]	54
4.16	Průtočná baterie umístěná v areálu rozvodny. [131]	55
5.1	Světová mapa s výrobním potenciálem fotovoltaických elektráren. [133]	58
5.2	Obvodový model fotovoltaického článku.	59
5.3	Voltampérová a výkonová charakteristika typického fotovoltaického článku.	60
5.4	Mapa rychlosti větru na území České republiky ve výšce odpovídající velkým větrným elektrárnám. [135]	62
5.5	Některé typy větrných turbín. Zleva: horizontální lopatková vztlaková, odporová vertikální Savoniova turbína, vztlaková horizontální Darrieova turbína (dvě různé varianty). [137]	63
5.6	Typická výkonová charakteristika $P = f(v)$ horizontální vztlakové větrné turbíny.	64
5.7	Charakteristika $C_p = f(\lambda)$ pro vybrané typy turbín. [139]	64
5.8	Příklad hydrogramu.	65
5.9	$Q = f(H)$ diagram s vyznačenými oblastmi použití turbín. [7]	67
6.1	Vlevo Rintův model článku, vpravo Théveninův.	73
6.2	Konstrukce klasické olovené baterie. [148]	74
6.3	Schéma průtočné baterie. [7]	76
6.4	Konstrukce setrvačnicku. [157]	78

# Seznam tabulek

5.1	Orientační hodnoty spalného tepla a výhřevnosti pro typická paliva. .	68
5.2	Tabulka použití jednotlivých technologií výroby v popsáných mikrosítích. . . . .	72
6.1	Orientační hodnoty významných parametrů vybraných elektrochemických článků. . . . .	82
6.2	Tabulka použití jednotlivých technologií akumulace v popsáných mikrosítích. Vlastní sloupeček mají technologie objevující se alespoň ve dvou projektech. . . . .	83

# Úvod

První masivněji užívanou formou elektřiny byl stejnosměrný proud z dynam poháněných parními stroji či vodními koly. Díky charakteru stejnosměrného proudu byla elektrifikace dlouho doménou malých soběstačných sítí obsahujících jednu či dvě elektrárny, které napájely malou oblast. Díky rozšíření střídavého proudu a vzrůstajícím nárokům na elektrifikaci se nakonec prosadila koncepce rozsáhlých střídavých sítí, kde bylo jasně vymezeno, v jakých místech jsou zdroje a spotřebiče.

S technologickým rozvojem a politickými tlaky na dekarbonizaci se do popředí dostávají tzv. obnovitelné zdroje. Díky jejich škálovatelnosti se malé elektrárny instalují v rámci rodinných domů či průmyslových hal, čímž postupně mizí tradiční rozdělení na čisté výrobce a čisté odběratele. K malým elektrárnám s nestálou výrobou se často instaluje i bateriová akumulace. Tato distribuce výrobních a akumulčních prvků znovu dává vznik malým soběstačným oblastem, které ale interagují s vnější sítí. Mohou se odpojit, spotřebovat z ní energii nebo do ní energii dodávat. To společně s útlumem klasických elektráren představuje pro elektroenergetiku v Evropě velký problém, ale zároveň také velkou příležitost, jak nasazovat nestálé obnovitelné zdroje a zachovat při tom stabilní dodávky elektrické energie. Často skloňovaný pojem chytrých sítí se snaží o popis takovéto moderní elektroenergetiky. Koncept mikrosítí je pak jeho součástí.

Cílem této bakalářské práce je vytvořit vystihující rešerši stavu současné energetiky, konceptů skrývajících se pod pojmem chytrých sítí a dále popsat a analyzovat realizované projekty mikrosítí včetně přehledu využívaných technologií výroby a akumulace elektrické energie včetně častého propojení s výrobou tepla.



# Kapitola 1

## Energetická infrastruktura dneška

### 1.1 Typy elektráren

Elektrickou energii získáváme transformací různých jiných forem energie. Zdroje těchto forem energie dělíme zpravidla na obnovitelné a neobnovitelné. K této transformaci dochází v elektrárnách. V kontextu této kapitoly je řeč o tom, jakou roli jednotlivé typy elektráren hrají v síti.

#### Elektrárny využívající neobnovitelné zdroje

Neobnovitelné zdroje energie se vyznačují tím, že nedochází k jejich přirozenému obnovování, nebo je natolik pomalé, že je z hlediska rychlosti spotřeby irelevantní. Prakticky mají tedy tyto typy zdrojů omezené zásoby, které je možné vyčerpat. Deklarované světové zásoby těchto zdrojů se však často mění, jelikož dochází k neustálému objevování nových ložisek a vývoji nových metod těžby.

Elektrárny využívající neobnovitelné zdroje jsou typicky tepelné, tj. v procesu přeměny energie dochází k fázové přeměně vody na páru, která následně získanou energii odevzdává turbíně připojené na rotor generátoru. Mezi elektrárny využívající neobnovitelné zdroje patří především:

- ▶ **Uhelné elektrárny.** Spalováním uhlí dochází k uvolňování oxidu uhličitého, což je důvod, proč je dnes tento typ elektráren z ekonomických důvodů (emisní povolenky) na ústupu. Mají velký výkon, jeden blok má typicky stovky MW. U moderních elektráren je možná dobrá regulace, výkon lze snížit i hluboko pod polovinu jmenovitého. Start bloku z nulového výkonu trvá minimálně několik hodin, odstavení je sice možné provést téměř okamžitě, ale je to zpravidla velmi neekonomické. [1] [2]
- ▶ **Plynové elektrárny.** Plynové elektrárny spalují zpravidla zemní plyn, ale někdy se využívají plyny vznikající z jiných zdrojů (biomasa, uhlí, topný olej). Výkony se pohybují v rozsahu jednotek až stovek MW. Oproti uhelným elektrárnám jsou schopny velmi rychle najet na jmenovitý výkon (v řádech minut). Jejich výkon lze také velmi dobře a rychle regulovat. [3]
- ▶ **Jaderné elektrárny.** Jelikož zásoby materiálu vhodného pro štěpení v jaderných elektrárnách jsou omezené, lze je zařadit do této kategorie. Oproti uhelným a plynovým však během provozu nedochází k uvolňování oxidu uhličitého. Problematické jsou ovšem z hlediska rizika jaderných havárií a ukládání

využitého jaderného paliva. Výkon jednoho bloku bývá v řádu vyšších stovek MW. Jaderné elektrárny pracují s relativně velmi málo proměnným výkonem. Regulace je sice možná, ale ekonomicky i technicky problematická. [4]

## Elektrárny využívající obnovitelné zdroje

I v oblasti obnovitelných zdrojů dochází k vytváření elektráren, které jsou jako jeden výkonný celek připojeny k síti.

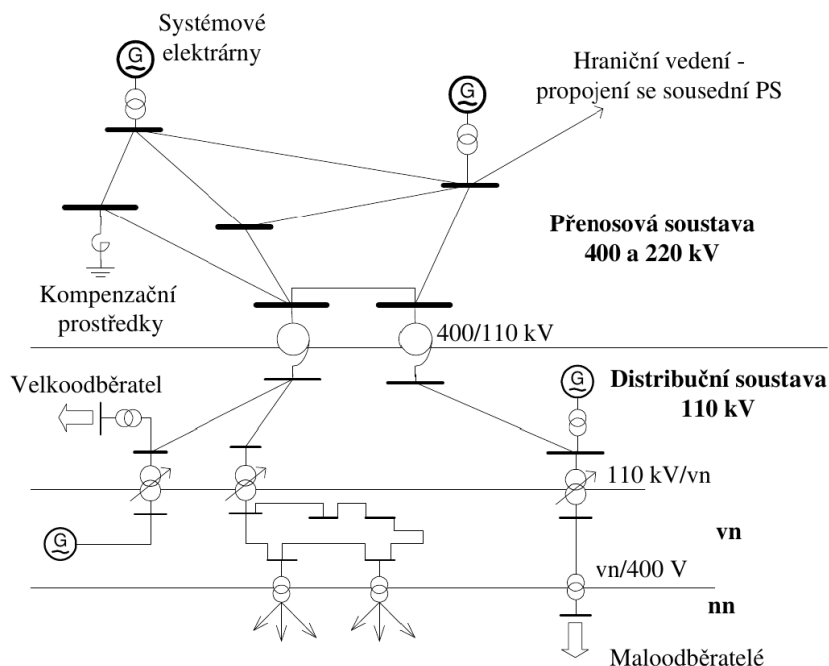
- **Solární elektrárny.** Energie slunečního záření bývá přeměňována buď přímo na elektrickou (fotovoltaická elektrárna), nebo použita k ohřevu teplotnosné kapaliny, která pak funguje jako zdroj tepla pro běžný parní oběh s turbínou a generátorem (termosolární elektrárna). Termosolární elektrárny jsou rozšířené zejména ve Španělsku a Spojených státech amerických [5]. Jelikož dosažitelný výkon se odvíjí od množství energie dopadajícího záření, nelze jejich výkon jakkoliv zvýšit, když je zrovna elektrická energie potřeba. Během provozu se výkon může prudce měnit v rozsahu od téměř nulového po maximální. Instalovaný výkon běžných solárních elektráren připojených do sítě může být až ve stovkách MW. [6]
- **Větrné elektrárny.** Větrné elektrárny využívají kinetickou energii větru a přeměňují ji generátorem na elektrickou. Obdobně jako u solárních elektráren se jejich výkon odvíjí od momentálních podmínek, v tomto případě rychlosti větru. Obdobně jako v případě solárních elektráren je možné pouze částečné snižování výkonu. [7]
- **Vodní elektrárny.** V případě vodních elektráren se pro roztočení generátoru využívá kinetická energie vody. Elektrárna může fungovat bez akumulace, kdy využívá pouze přirozené proudění vody (průtočná), nebo akumulaci využívat pro vyrovnávání období se slabším průtokem vody (akumulační). Speciálním případem jsou pak elektrárny přečerpávací, kde se voda cíleně přečerpává mezi dvěma nádržemi s rozdílnou nadmořskou výškou a přečerpáním je možné akumulovat elektrickou energii při jejím přebytku v síti. Vodní elektrárny s akumulací umožňují velmi rychlý náběh na jmenovitý výkon, mohou mít výkony jednotek GW a akumulovat GWh elektrické energie. [7]
- **Geotermální elektrárny.** Geotermální elektrárny využívají přirozené teplo zemského jádra. Využitelnost této energie je extrémně podmíněna zeměpisnými podmínkami. V kontextu některých zemí se tedy jedná o podstatnou část energetického mixu, například na Islandu nebo v Keni, ale všeobecně je velmi málo využívána. Z hlediska sítě jde v podstatě o klasické tepelné elektrárny. [8] [7]
- **Elektrárny na biomasu.** Tato kategorie je značně rozsáhlá, jelikož energeticky využití biomasy je možné mnoha způsoby. Biomasa se dá přímo spálit, nebo se z ní pomocí chemicko-biologických reakcí dají vytvořit jiné formy paliva, ať už kapalné (metanol, etanol, bionafta) nebo plynné (metan, čpavek). [7]



## 1.2 Struktura soustavy

### Rozvod elektrické energie

Energetická infrastruktura dneška je tvořena převážně velmi výkonnými elektrárnami, z nichž je energie na velké vzdálenosti přenášena na několika různých napěťových úrovních. Tato koncepce vznikla zejména historickým využíváním uhelných, jaderných a vodních elektráren, kde je dosahováno velkých ekonomických i technických úspor z rozsahu a vhodných lokalit pro jejich umístění je málo. [9]



**Obrázek 1.1:** Zjednodušené zobrazení elektrizační soustavy [9].

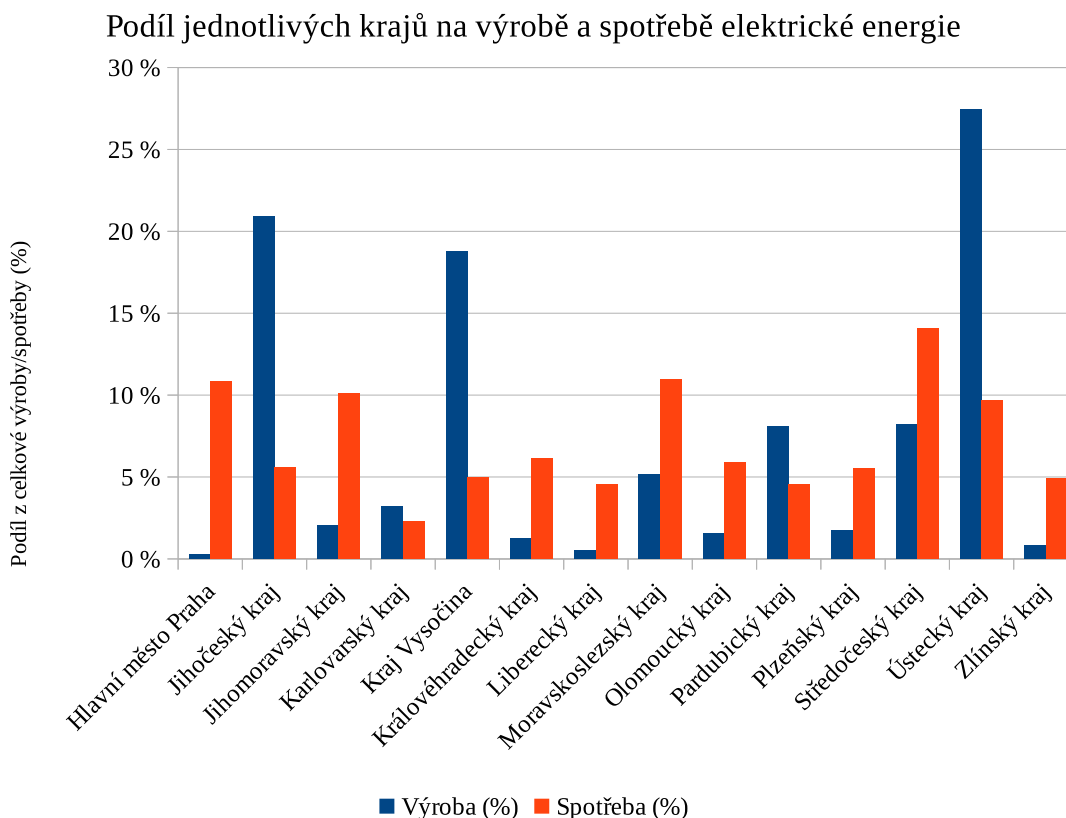
Elektrickou síť proto v základu dělíme na dvě kategorie. Každá slouží k jinému účelu a také bývá provozována jinou organizací. [9]

- **Přenosová soustava** slouží k přenosu elektrické energie z velkých systémových elektráren. Výkon z nich je do této soustavy vyveden přes jejich blokové transformátory přímo. Přes přenosovou soustavu jsou také propojeny jednotlivé státy při přeshraničních spojeních. V České republice do této kategorie spadají napěťové hladiny 400 kV, 220 kV a v některých případech 110 kV.
- **Distribuční soustava** slouží k přenosu elektrické energie dodané z přenosové soustavy a menších elektráren k jednotlivým odběratelům v místě spotřeby. Pracuje s nižšími napěťovými hladinami, v případě České republiky 110 kV (velmi vysoké napětí), 35 kV, 22 kV, 10 kV, 6 kV, 3 kV (vysoké napětí) a 400/230 V (nízké napětí).

### Umístění elektráren

Na příkladu České republiky je centralizace zdrojů do určitých lokalit silně patrná. Například v Ústeckém kraji se dlouhodobě vyrábí více než 25 % veškeré elektrické energie v rámci České republiky, ale samotný kraj tvoří pouhých 10 %

celkové spotřeby [10]. Jedním z důvodů je právě historická dostupnost hnědého uhlí díky povrchové těžbě. Obdobně je na tom například Jihočeský kraj, který převážně díky jaderné elektrárně Temelín za rok 2022 vyrobil celkem 20 % veškeré elektrické energie v rámci České republiky, ale samotný kraj tvoří necelých 6 % spotřeby [11].



Obrázek 1.2: Bilance jednotlivých krajů. Data z [11].

Výstavba elektráren založených na obnovitelných zdrojích energie v trendu centralizace pokračuje, například při budování větrných elektráren umístěných na moři (tzv. offshore větrné elektrárny), z nichž je potřeba vyvést výkon do zbytku Evropy [12] [13]. Vzhledem k útlumu těžby uhlí a výroby elektrické energie z něj se objevují projekty velkých solárních farem, které by v bývalých uhelných regionech využily uvolněnou kapacitu sítě, která je v těchto lokalitách na velký instalovaný výkon zdrojů navržena [14].

### 1.3 Bilance soustavy

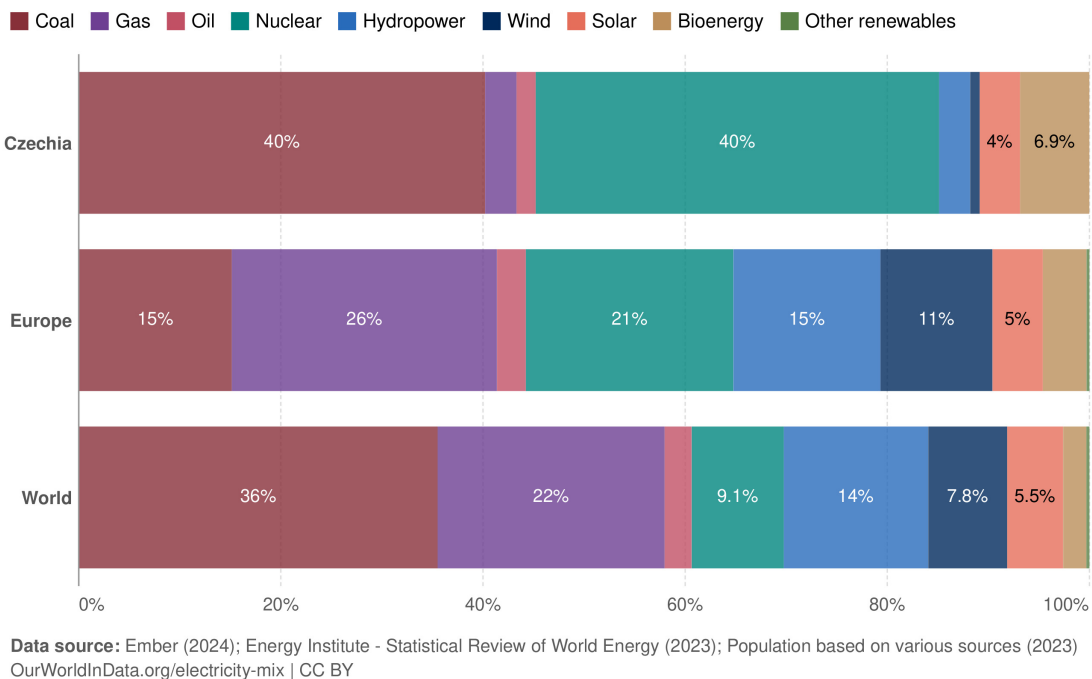
#### Elektroenergetický mix

Na následujícím grafu je znázorněn podíl různých zdrojů na výrobě elektrické energie. Je patrná značná převaha klasických tepelných elektráren, které se vyznačují zmíněnou centralizací výkonu.

## Per capita electricity generation by source, 2023

Our World  
in Data

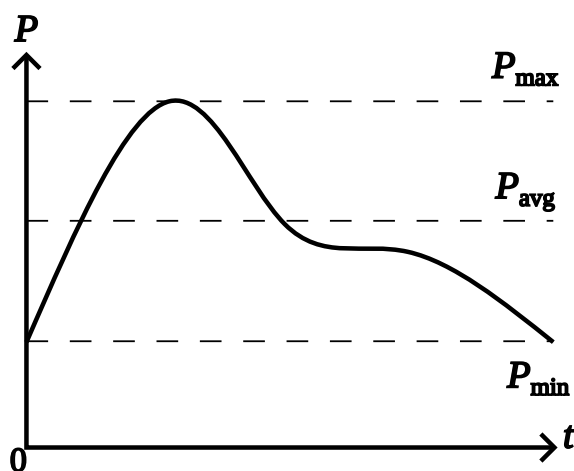
Measured in kilowatt-hours. Other renewables include geothermal, tidal and wave generation.



**Obrázek 1.3:** Podíl zdrojů energie na výrobě elektřiny v České republice, v Evropě a ve světě pro rok 2023. Vygenerováno z [15].

## Diagram zatížení

Specifika jednotlivých elektráren k pokrytí spotřeby elektrické energie můžeme vyjádřit pomocí diagramu zatížení dané soustavy. Diagram udává závislost dodávaného či spotřebovávaného činného výkonu  $P$  na čase  $t$  a to nejčastěji v rámci jednoho dne, pak se jedná o denní diagram zatížení. Můžeme ho rozdělit do pásem. [16]



**Obrázek 1.4:** Příklad obecného diagramu zatížení  $P = f(t)$  s vymezenými pásmy.

- **Základní zatížení.** Toto pásmo leží pod minimálním výkonem  $P_{\min}$ . Typickým zdrojem pro pokrývání tohoto pásma jsou jaderné, uhelné, geotermální a průtočné vodní elektrárny, tj. zdroje, které jsou navrženy primárně pro běh

na konstantním výkonu a není je příliš ekonomické či technicky vhodné regulovat.

- **Pološpičkové zatížení.** Toto pásmo leží mezi minimálním výkonem  $P_{\min}$  a průměrným výkonem  $P_{\text{avg}}$ . K pokrytí se používají zdroje s větší flexibilitou, například akumulární vodní elektrárny, plynové elektrárny, nebo moderní uhelné s ekonomickou regulací.
- **Špičkové zatížení.** Toto pásmo leží mezi průměrným výkonem  $P_{\text{avg}}$  a maximálním výkonem  $P_{\max}$ . K pokrytí je potřeba mít zdroje s dobrou flexibilitou, což poskytují akumulární a přečerpávací vodní elektrárny.

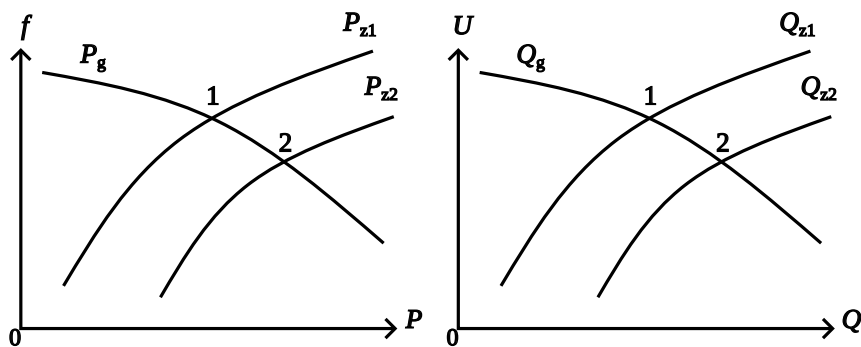
Solární a větrné elektrárny se do tohoto dělení zařazují jen velmi těžko. Během příznivého dne může například větrná elektrárna fungovat v pásmu základního zatížení, jindy může docházet k náhlým změnám rychlosti větru. Fotovoltaická elektrárna z principu základní zatížení nepokryje. Termosolární díky tepelné kapacitě média teoreticky v základním pásmu pracovat může.

Koncept lze použít i pro analýzu spotřeby menších celků v rámci soustavy, průmyslových závodů či distribučních soustav. V případě průmyslových odběratelů lze takto analyzovat i bilanci jalového či zdánlivého výkonu.

## 1.4 Řízení soustavy

### Kvalita elektrické energie

Pojmem kvalita elektrické energie se označuje převážně udržování napětí a frekvence sítě v dovořených mezích. K tomu je potřeba celou soustavu řídit tak, aby byla výroba a spotřeba elektrické energie v každý okamžik v rovnováze. Frekvenci v síti ovlivňuje rovnováha činného výkonu  $P$  a napětí v síti zase rovnováha jalového výkonu  $Q$ . V případě, že dojde k nerovnováze mezi výrobou a spotřebou, soustava zaujme nový pracovní bod s jinými parametry napětí či frekvence, které již dovořeným mezím nemusí odpovídat. Níže je uveden modelový příklad, kdy se soustava vlivem zvýšeného odběru činného výkonu  $P$  přesune z pracovního bodu 1 do pracovního bodu 2 s nižší frekvencí. Obdobný příklad je nakreslen i pro jalový výkon  $Q$  a napětí  $U$ . [9]



Obrázek 1.5: Modelový příklad změny statické charakteristiky zátěží sítě (ze  $z_1$  na  $z_2$ ).

## Podpůrné služby

K udržení žádaných parametrů elektrické energie potřebuje mít provozovatel přenosové soustavy k dispozici prostředky, kterými může případné nerovnováhy vyrovnávat. Tyto prostředky si musí nasmlouvat u jednotlivých výrobců elektrické energie. Souhrnně se označují jako podpůrné služby. V kontextu České republiky jich existuje několik. [17] [18]

- ▶ **Primární regulace frekvence bloku.** Jde o automaticky řízenou funkci. Elektrárenský blok má přesně definovanou změnu výkonu při určité odchylce od frekvence. Tato záloha musí být k dispozici do 30 sekund od zjištění nerovnováhy.
- ▶ **Sekundární regulace výkonu bloku.** Zajišťuje změnu výkonu bloku na základě požadavku sekundárního regulátoru frekvence a salda předávaných výkonů. Požadovaného výkonu musí být schopen dosáhnout do 10 minut.
- ▶ **Minutové zálohy MZ5/MZ15.** Služba spočívá v poskytnutí kladné či záporné změny výkonu na svorkách poskytujícího zařízení. Například jde o zvýšení výkonu bloku, nenajetím plánovaného čerpání v přečerpávací elektrárně či připojení/odpojení zátěže. Služba musí být dostupná do 5 či 15 minut a minimálně po dobu 4 hodin.
- ▶ **Snížení výkonu SV30.** Jde o schopnost elektrárenského bloku do 30 minut snížit svůj výkon na požadovanou hodnotu, nebo ho celý odstavit, a to po dobu minimálně 24 hodin.
- ▶ **Sekundární regulace napětí a jalových výkonů SRUQ.** Automaticky řízená funkce využívající smluvený rozsah jalového výkonu bloku pro regulaci napětí v uzlech energetické soustavy.
- ▶ **Schopnost startu ze tmy.** Schopnost elektrárny najet v případě potřeby na jmenovité parametry i bez vnějšího zdroje elektrické energie. Elektrárna tedy musí být vybavena vlastním záložním zdrojem.
- ▶ **Schopnost ostrovního provozu.** Schopnost elektrárny napájet přidělenou část sítě v případě, že by byla izolována od zbytku soustavy, například z důvodu technické havárie na propojení nebo blackoutu.

## Principy práce propojených soustav

Práci propojených soustav charakterizují dva principy, které vycházejí ze základní struktury podpůrných služeb. [18]

- ▶ **Princip solidarity.** V případě problémů s výkonovou rovnováhou se na jejím udržení v prvních okamžicích podílí všechny elektrárenské bloky vybavené automatickým systémem změny výkonu při detekci odchylky frekvence. Jde o tzv. primární regulaci frekvence. Tento princip může být uplatňován až několik desítek sekund.
- ▶ **Princip neintervence.** Na vzniklou výkonovou nerovnováhu reaguje pouze sekundární regulace výkonu v rámci soustavy, kde k nerovnováze došlo. V praxi

to tedy znamená, že každá soustava, propojená do společné, musí mít v záloze prostředky, kterými je tuto odchylku schopná do deseti minut vyrovnat. Sekundární regulace v rámci postižené soustavy pak nahradí výkon, který ji poskytla celá propojená soustava v rámci principu solidarity. Právě tento princip je problematický pro solární a větrné elektrárny, jelikož v rámci zaručení stability sítě je potřeba mít za ně odpovídající náhradu.

## 1.5 Trh s elektřinou

### Obchod na trzích

Trh s elektřinou je vzhledem k omezeným možnostem jejího skladování velmi specifický. Celý trh je postaven na základním principu nabídky a poptávky společně s tím, že je potřeba přesně dodržovat objemy domluvených transakcí. Každý obchodník na trhu, ať už odběratel či dodavatel, nese odpovědnost za odchylku, kterou vytvoří nedodržením domluveného objemu výroby či spotřeby. V případě nedodržení nasmlouvané bilance následují finanční sankce. [19]

V základu se dělí na dlouhodobý a krátkodobý trh. Na dlouhodobém trhu se elektřina obchoduje v dlouhodobém časovém horizontu (nad několik dní). Pro nakupování elektrické energie v časovém horizontu dní až hodin slouží krátkodobý trh, kde dochází k vykrývání náhlých změn ve spotřebě či výrobě, popřípadě nákupům ve snaze ušetřit oproti ceně domluvitelné na dlouhodobém trhu. [19]

### Dodavatelé elektřiny

Odběratelé elektrické energie, ať už domácnosti či podnikatelé, nakupují elektrickou energii od dodavatelů, kteří působí na trzích s elektrickou energií. Podle charakteru odběrů mají nasmlouvané určité výkonové omezení, které nemohou překročit. [19]

- **Maloodběratelé** na hladině nízkého napětí jsou jednoduše omezeni hodnotou jističe v elektroměrovém rozvaděči.
- **Velkoodběratelé** pracují se systémem tzv. čtvrt hodinových maxim. V patnáctiminutových intervalech je měřicím systémem vyhodnocován průměrný příkon odběrného místa. Ten nesmí překročit deklarovanou hodnotu čtvrt hodinového maxima, jinak následují finanční sankce. Dalším specifikem je vyhodnocování bilance jalového výkonu, jehož deklarovanou hodnotu odběrné místo také nesmí překročit.

Z hlediska cenotvorby mezi odběratelem a dodavatelem pak může mít cenu fixní nebo proměnnou. [20]

- **Fixní cena** je nejběžnějším způsobem nacenění. Odběratel má záruku, že veškerá odebraná elektrická energie bude za domluvenou cenu ve smlouvě. Dodavatel pak pro dosažení zisku musí na trhu s elektřinou nakoupit tak, aby byla cena nižší, než je nasmlouvaná se zákazníkem.
- **Proměnná cena** se v praxi objevuje jako tzv. spotový tarif. Den předem jsou známy ceny elektrické energie pro jednotlivé hodiny, které vyplývají z aktuálního stavu trhu s elektřinou. Zákazník může svůj denní diagram zatížení

optimalizovat tak, aby dosáhl nejmenších nákladů. K tomu musí být vybaven elektroměrem, který toto průběžné vyhodnocování umožňuje, nebo dodavatel na základě charakteru jeho odběru určí předpokládaný denní diagram zatížení.

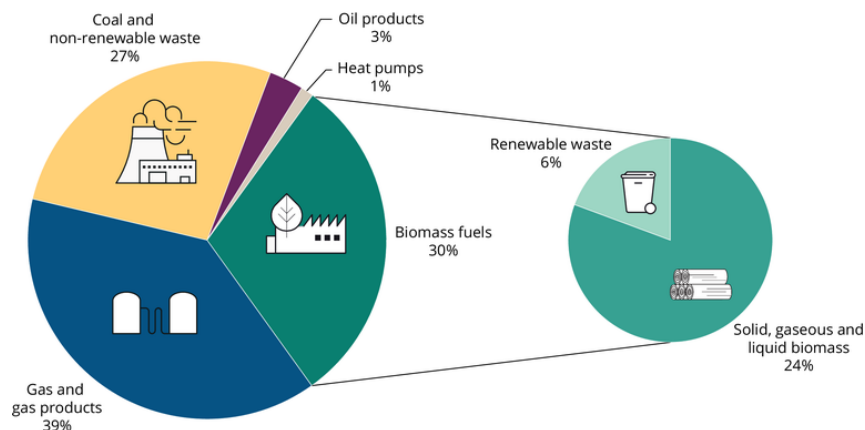
## Agregace flexibility

Do trhu s elektřinou velmi zasáhl rozmach obnovitelných zdrojů. Došlo ke vzniku nového typu koncového zákazníka, tzv. prosumera, který elektřinu spotřebovává i vyrábí. Díky náhlým přebytkům z fotovoltaických a větrných elektráren se v rámci spotového tarifu mohou objevit i záporné ceny. Pokud je tedy odběrné místo vybaveno akumulací, může od dodavatele dostat zaplacen za nabití baterie a o pár hodin později znovu za její vybití do sítě. [21]

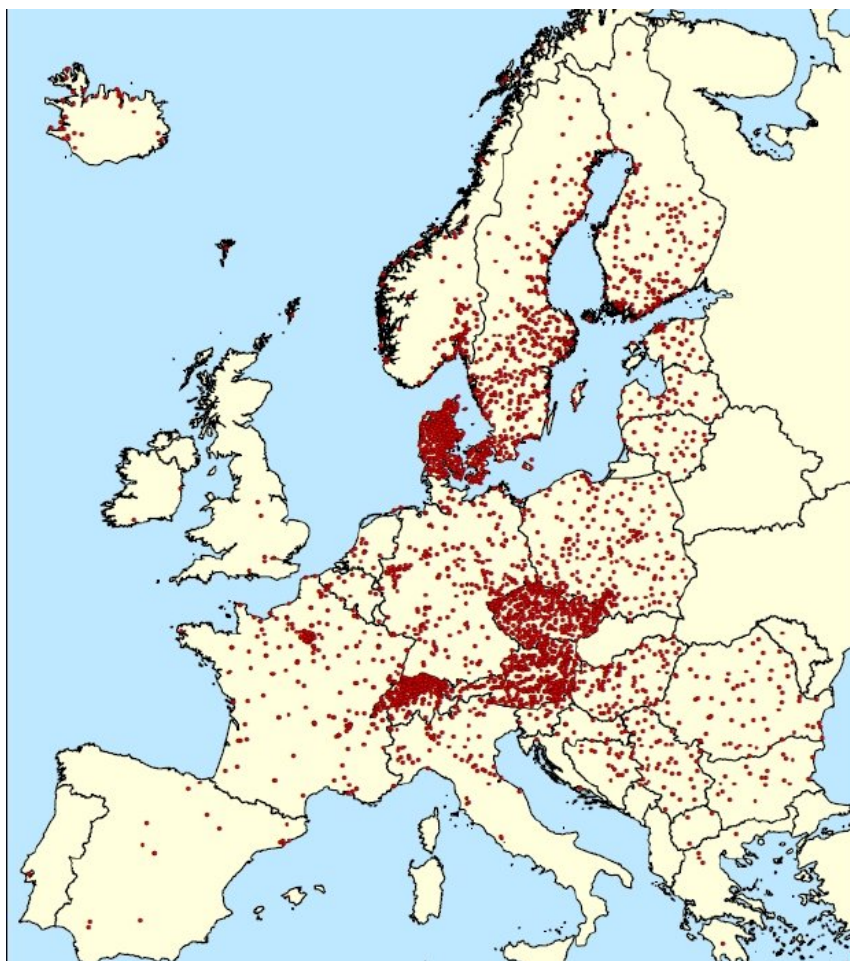
V souvislosti s tím se na trhu s elektřinou objevuje nový prvek v podobě agregátora flexibility malých zdrojů a spotřebičů. To je firma, která sdružuje malé výrobce a spotřebitele elektrické energie – domácnosti či firmy, kteří jí poskytují přístup k ovládání vybraných zátěží či zdrojů (elektrotepelné spotřebiče, bateriová úložiště atd.). Firma je pak koordinovaně ovládá a na trhu vystupuje jako tzv. virtuální elektrárna, která může v určitých mezích snížit či zvýšit výkon podle toho, které podpůrné služby jsou zrovna potřeba. [22]

## 1.6 Teplárenský sektor

S výrobou elektrické energie z fosilních zdrojů je neodmyslitelně spojena i kogenerační výroba, společná výroba elektřiny a tepla v rámci jednoho zařízení, kogenerační elektrárny. Existují ovšem i samostatná zařízení pouze pro produkci tepla, výtopny. Systém centrálního zásobování teplem, tj. zásobování velkého množství objektů z jednoho společného zdroje, je v České republice poměrně rozšířený. Celkem je na tyto systémy připojeno přibližně 1,6 milionu domácností [23]. Zdrojová základna je zaměřena primárně na fosilní paliva. Například v roce 2019 mělo na výrobě tepla v rámci teplárenských soustav hnědé uhlí podíl 42 % a černé uhlí 9 %. Dalšími významnými zdroji byl plyn (19 %) a biomasa (12 %) [24]. Systémy centrálního zásobování teplem jsou velmi rozšířeny i v dalších zemích Evropy a i v nich se k výrobě tepla často používají neobnovitelné zdroje energie. Příklad podílu jednotlivých zdrojů na výrobě tepla v rámci Evropské unie lze vidět na následujícím grafu.



**Obrázek 1.6:** Podíl jednotlivých paliv na výrobě tepla v rámci Evropské unie v roce 2020. [25]



**Obrázek 1.7:** Mapa systémů centrálního zásobování teplem ve vybraných evropských státech. [26]

## 1.7 Problémy

### Uzavírání uhelných elektráren

V době psaní této práce je opožděně v připomínkovém řízení revidovaná verze Státní energetické koncepce. Dokument byl naposledy schválen v květnu 2015 a původně se počítalo s aktualizací v roce 2020. Pracuje s útlumem těžby a využití uhlí pro výrobu elektřiny a tepla do roku 2033 v souladu s evropskými dohodami. V dlouhodobém horizontu jej má nahradit jaderná energetika, v krátkodobém se počítá s plynem. Sama o sobě však jasné řešení útlumu a nahrazení neobsahuje. [27]

Současně se zmíněnou revizí, která teprve připravuje mantinely pro odklon od uhlí, však hrozí uzavření uhelných elektráren několik let před státem plánovaným cílem, čistě z ekonomických důvodů spojených s cenou emisních povolenek a levnou elektřinou z dotovaných obnovitelných zdrojů. Například významné hnědouhelné elektrárny Počerady a Chvaletice. Obě představují instalovaný výkon 1,82 GW a zhruba 15 % veškeré vyrobené elektrické energie v České republice. Při současných podmínkách reálně hrozí jejich odstavení již na jaře 2025. Podle dat, které má k dispozici Ministerstvo průmyslu, bychom tak například během odstávek jaderných bloků museli s výkonovou rezervou spoléhat na dovoz ze zahraničí [28] [29]. Obdobně



signály přichází i od skupiny ČEZ, která by se v případě ztrátového provozu elektráren ocitla pod tlakem minoritních akcionářů [30].

## **Integrace obnovitelných zdrojů energie**

Nepřípravenost stávající sítě na nové typy zdrojů elektrické energie je patrná během připojování malých domácích či firemních fotovoltaických systémů. Ty jsou samy o sobě často zanedbatelných výkonů, jelikož až do ledna roku 2023 šlo bez licence od ERÚ (Energetického regulačního úřadu) připojit do sítě maximálně 10 kWp (nově se limit zvedl na 50 kWp) [31]. Problémy vyvstávají až při masových instalacích v rámci nějaké lokality. Stoupá procento žádostí o připojení elektrické výroby, které musí provozovatelé distribuční soustavy odmítat z důvodu nedostatečných kapacit lokální distribuční sítě. Případná instalace pak musí být provedena tak, aby se veškerá vyráběná elektrická energie spotřebovávala přímo v domácnosti. Dle vyjádření těchto provozovatelů se například instalovaný výkon některých distribučních oblastí na jižní Moravě již pohybuje ve stovkách MWp. [32] [33]

Nutnost stávající sít připravovat na energetickou transformaci potvrzuje například i incident z dubna 2023, kdy byl ČEPS nucen z důvodu udržení výkonové rovnováhy od sítě odpojit velké fotovoltaické elektrárny o celkovém výkonu 400 MW na několik hodin. Podobných incidentů dle provozovatelů distribučních soustav může přibývat. Problematická jsou zejména přechodná období, kdy lze jen obtížně předpovídat intenzitu slunečního záření a tedy i výrobu fotovoltaik. Problém je to i ekonomický, protože zdroje stavěné v rámci dotačních programů mají v takovém případě nárok na kompenzaci ušlých zisků. [34] [35]

## **Nahrazení fosilního teplárenství**

Vzhledem ke zmíněnému energetickému mixu zásobování teplem a časté kogenerační výrobě je sektor obdobně postižen systémem emisních povolenek a dalšími tlaky na utlumení využívání fosilních zdrojů. V krátkodobém horizontu lze zvažovat transformaci stávajících výkonných tepláren na plyn (nad 300 MW) či hybridní výrobu s biomasou (nad 50 MWt). V případě menších výkonů je již flexibilita větší a je možné uvažovat například čistě o biomase či spalování odpadu. [36]

V současnosti probíhají různé projekty, které se snaží nalézt za uhlí náhradu i bez přestaveb na plyn. V pilotním provozu je například horkovod z jaderné elektrárny Temelín, který zásobuje České Budějovice [37]. V Litoměřicích probíhají průzkumné vrty pro budoucí využití geotermální energie [38]. Dalším zajímavým projektem je například využití tepla z prohořívající důlní haldy nebo výroba tuhých paliv z nerecyklovatelného komunálního odpadu [39] [40].

Pro menší sítě centrálního zásobování teplem může být vhodným řešením i decentralizace a zřízení kotelen pro jednotlivé objekty či menší celky. Mezi propagované výhody patří například zmenšení ztrát v rozvodech a pružnější regulace, která může zajistit další úspory. [41]



# Kapitola 2

## Problematika chytrých sítí

### 2.1 Definice

Na exaktní definici chytré sítě nepadají mezi normotvornými orgány jednotná shoda [42] [43]. Některé organizace do definic zařazují nároky na snižování dopadů na životní prostředí či integraci elektromobility. Nejčastějším prvkem definic je ovšem integrace obnovitelných zdrojů energie s nestálým výkonem. [43]

S přihlédnutím k této hlavní motivaci příchodu chytrých sítí se objevují definice popisující chytrou síť jako síť umožňující integraci různých zdrojů a spotřebičů energie o různém výkonu při zachování spolehlivé a bezpečné dodávky elektrické energie o stálých parametrech [44]. Tato definice se objevuje i v doporučeních Evropské komise [45].

V některých případech se chytré sítě definují pouze jako integrace informačních a komunikačních technologií do stávající sítě [46].

Obecně však lze v rámci chytrých energetických sítí rozlišit jednotlivé problematiky chytrého měření, využívání prvků sítě a komunikační infrastruktury.

### 2.2 Chytré měření

Důležitou částí konceptu chytrých sítí je průběžný sběr velkého množství dat z jednotlivých přípojních míst. Zatímco podrobné měření přípojních míst velkoodběratelů je dnes již relativně běžné, v oblasti pokročilého měření přípojních míst maloodběratelů teprve dochází k implementaci technologie do praxe. „Chytrost“ měření spočívá v zaznamenávání podrobného průběhu odběru či výroby daného přípojného místa, možnost pravidelné dálkové komunikace těchto dat a jejich bezproblémové sdílení. V rámci měřicího zařízení je pak také možnost implementovat ovládání prvků obsažených v daném přípojném místě (významné spotřebiče či zdroje). To je velmi obecná definice, ale konkrétní požadavky na zmíněnou „chytrost“ se odvíjí od lokální legislativy či standardů.

Evropská komise inteligentní měřicí systém definuje jako systém umožňující měřit spotřebu energie, který poskytuje více informací než klasický měřicí přístroj a může předávat a přijímat údaje ve formátu elektronické komunikace. Zároveň na tyto systémy stanovuje následující praktické požadavky. [45]

- Systém poskytuje naměřené hodnoty přímo zákazníkovi a jakékoliv třetí straně, kterou určí.

- Údaje se musí ukládat alespoň každých 15 minut, aby bylo možné je použít k dosažení úspor energie.
- Umožňuje odečet na dálku.
- Umožňuje obousměrnou komunikaci s vnější sítí pro možnost údržby a kontroly.
- Podporuje pokročilé systémy sazeb.
- Umožňuje dálkovou kontrolu zapínáním či vypínáním a/nebo omezení výkonu.
- Zajišťuje bezpečnou datovou komunikaci včetně prevence a systému pro odhalování podvodů.
- Pro distribuovanou výrobu zajišťuje čtyřkvadrantové měření (definováno jako dovozní/vývozní a reaktivní).

V rámci Evropy se koncept chytrého měření zavádí více než 10 let. V některých zemích jako Španělsko, Švédsko či Finsko bylo dosaženo pokrytí téměř 100 % již v roce 2019. V jiných státech je dosažení společného evropského cíle (pokrytí z 80 %) odkládáno až na rok 2030. To vytváří značnou technologickou propast, jelikož některé starší instalace nemusí plně odpovídat moderním požadavkům, jako například zmíněná schopnost práce s pokročilými cenovými tarify, mezi které lze zařadit účtování elektřiny podle hodinových cen. [47]

V současné době se v České republice technologie chytrého měření poměrně rozmáhá. Díky nové legislativě (vyhláška o měření elektřiny č. 359/2020 Sb) bude docházet od 1.7.2024 k plošné výměně elektroměrů za nové, splňující definované legislativní požadavky na chytré elektroměry. Týká se to odběrných míst na nízkém napětí s roční spotřebou nad 6 MWh. Hlavním znakem je průběžné měření s dálkovým přenosem údajů, které je vybaveno standardizovaným komunikačním protokolem pro poskytnutí dat zákazníkovi či na jeho žádost třetím stranám. Tato vyhláška je tedy v souladu s již uvedenými doporučeními Evropské komise. [48]

K podobnému vývoji, avšak opožděnému, dochází i v oblasti chytrého měření spotřeby plynu. V Evropě je zhruba 45 % odběrných míst vybaveno chytrým měřením. [49]

## 2.3 Komunikace

### Požadavky na komunikaci

Hlavním úkolem komunikační infrastruktury v chytrých sítích je sběr dat z jednotlivých bodů chytrého měření a následný přenos instrukcí pro aktivní prvky na základě vyhodnocení těchto dat. Pro správné fungování chytré sítě jsou na komunikační infrastrukturu kladeny primárně následující požadavky. [50] [51]

- **Odolnost proti rušení.** V hustě zastavěných oblastech může být bezdrátový přenos informací problematický, jelikož je oblast zahlcena jinými bezdrátovými sítěmi. Obdobně vysokofrekvenční přenos přes silové vodiče může být snadno rušen vyššími harmonickými od polovodičových měničů.

- **Dostatečná přenosová kapacita.** Počet elektroměrů se v rámci evropských soustav pohybuje v řádech milionů až desítek milionů. I při přenosu dat jednou za několik málo minut se jedná o obrovské datové toky.
- **Standardizace.** V současnosti existuje velké množství komunikačních standardů používaných pro prvky zařaditelné do chytrých sítí.
- **Bezpečnost.** Údaje o elektrické spotřebě a přístup k ovládání aktivních prvků musí být velmi dobře zabezpečeny, možnosti zneužití jsou značné (průmyslová špionáž, sabotáž, terorismus, manipulace s daty).

Problém s nevhodně navrženou komunikační infrastrukturou se objevil například ve Velké Británii, kde část první generace chytrých měřicích zařízení používá ke komunikaci veřejné 2G/3G mobilní sítě. Ty je však v plánu vyřadit z provozu nejpozději do roku 2033. Bude tedy muset dojít k plošné výměně, i když instalace zasažených měřicích přístrojů probíhala ještě do roku 2018. Problém se týká 7 milionů zařízení, což představuje zhruba pětinu ze všech instalovaných. [52] [53]

Vzhledem k různorodosti a rozsáhlosti sítě se často uvažuje a používá topologie obdobná internetovým sítím, tj. sdružování jednotlivých prvků do menších sítí, za které pak komunikuje nějaký centrální prvek. Pro komunikaci v různých úrovních této sítě se pak používají různé technologie. V základu lze hovořit o třech úrovních. [50]

## Topologie komunikace

- **HAN (Home Area Network).** Jedná se o síť spojující prvky v rámci domácnosti nebo malého průmyslového podniku. Spadají sem prvky chytrého měření (elektřina, voda, teplo, plyn) a ovládací prvky významných zdrojů či spotřebičů (baterie, fotovoltaika, bojler, kotle, tepelná čerpadla). Osvědčenými komunikačními technologiemi jsou bezdrátové ZigBee a drátový Ethernet. Přes ně dochází ke komunikaci mezi zmíněnými prvky a prvkem centrálním, přes který celá síť komunikuje navenek. To může být elektroměr, ale taky samostatné zařízení, ke kterému je elektroměr připojen na stejné úrovni jako například vodoměr či plynoměr. [54] [51]
- **NAN (Neighborhood Area Network).** NAN komunikuje s jednotlivými HAN, ukládá jejich data a posílá jim instrukce. Centrální prvek je pak umístěn například v trafostanici pro danou lokalitu nebo komplex, přičemž data z jednotlivých přípojných míst může získávat vysokofrekvenčním datovým přenosem přes silové vodiče nebo bezdrátově přes mobilní sítě.
- **WAN (Wide Area Network).** WAN komunikuje s jednotlivými NAN a předává jejich data na místa jako jsou řídicí dispečinky či velíny velkých elektráren. Vzhledem k velkému množství dat a již existujícím sítím se v této síti uplatňuje zejména prověřený Ethernet.

## 2.4 Využití prvků v síti

### Stacionární bateriové systémy

Používání velkých akumulčních prvků na úrovni vysokého či velmi vysokého napětí samo o sobě nijak není podmíněno chytrou sítí. Tento koncept známe již dlouhodobě v podobě přečerpávacích elektráren. Chytrá síť umožní pouze jejich efektivnější využívání.

Velkou výzvou je ovšem zapojení menších bateriových úložišť, jejichž kapacita je sama o sobě malá, v řádech kWh, ale v rámci celé sítě v součtu nezanedbatelná. V současnosti se jedná zejména o bateriová úložiště k domácím fotovoltaikám.

Významné jsou v tomto ohledu například projekty německé firmy Sonnen GmbH vyrábějící domácí bateriová úložiště. Provozuje platformy, na nichž její zákazníci mohou navzájem obchodovat s elektřinou. Také provozuje speciální tarif, při kterém zákazník pronajímá své bateriové úložiště výměnou za paušální platby a určité množství elektrické energie zdarma. Firma pak na trhu poskytuje kapacitu těchto zdrojů. Výhodou tohoto obchodního modelu je zejména to, že investice do baterií je čistě v gesci zákazníků. [55]

Zajímavá je také spolupráce Sonnen GmbH s firmou IBM a operátorem přenosové soustavy v Nizozemsku a Německu TenneT. Ta se snaží vyřešit problém s vyvedením výkonu z velkých větrných elektráren na moři. Během dne se baterie na severu země nabíjí a baterie na jihu vybíjí. Přes noc, kdy je dostupná kapacita přenosové soustavy větší, pak z této naakumulované kapacity dobíjí baterie na jihu. Ačkoliv jsou ztráty až 10 %, údajně je tento proces stále ekonomicky výhodnější, než během dne masivně tlumit regulovatelné zdroje a provádět různé další dispečerské zásahy pro přenos energie během dne. [56]

U nás technologii zapojování bateriových úložišť do stabilizace sítě testuje ČEPS [57]. Obecně se podobné projekty potýkají s třemi hlavními překážkami [58].

- **Legislativa.** V České republice se v právním řádu koncepty komunitní energetiky a energetických společenství objevují až v současnosti s novelou Energetického zákona. [59]
- **Obchodní model.** Je potřeba nalézt takový, aby byl zákazník ochoten pronajmout svojí kapacitu baterie, tj. aby se mu toto řešení vyplatilo oproti standardnímu použití k napájení spotřebičů v domácnosti nebo prodávání do sítě v rámci běžných tarifů.
- **Technologická nekompatibilita.** Zprovoznění plnohodnotné komunikace bateriového systému s infrastrukturou distributora nemusí být možné. Zmíněné projekty v Německu firma může relativně jednoduše realizovat díky tomu, že je sama výrobcem používaných úložišť.

### Spotřebiče v domácnostech

Obdobně jako v případě velkokapacitní akumulace, ani spínání spotřebičů nevyžaduje moderní chytrou síť. Systém hromadného dálkového ovládnání se používá už desítky let a první pokusy už jsou téměř století staré [60]. Nasazení nových technologií umožňuje pouze komplexnější regulaci více prvků. Pro tyto účely je však potřeba spotřebiče kategorizovat a určit, které z nich se pro zapojení do chytrých sítí hodí

nejvíce. Důležitá hlediska jsou v tomto případě zejména pravidelnosti či predikovatelnosti spouštění a priorit, s jakou zařízení musí dostávat elektrickou energii. Na základě těchto faktorů lze ke kategorizaci přistoupit následovně. [61] [62]

- **Nekontrolovatelná zátěž.** Sem spadají spotřebiče s poměrně malou flexibilitou, například televize, počítače, osvětlení, lednička, trouba apod. Spotřebičům v této kategorii buď výkon omezit nelze, nebo je to nežádoucí.
- **Pravidelná kontrolovatelná zátěž.** Jde pravděpodobně o nejvýznamnější kategorii, spadá sem sektor vytápění, ventilace a klimatizace, tj. tepelná čerpadla, klimatizace či bojler. Dají se bez větších problémů přerušovaně spínat či regulovat. Nutnost jejich spouštění je také poměrně dobře predikovatelná.
- **Nahodilá kontrolovatelná zátěž.** Sem spadají například pračky, sušičky nebo myčky nádobí. Jejich spouštění lze automaticky předpovídat jen obtížně. U těchto spotřebičů nemusí být problém odložit spuštění. Například ráno připravit pračku a spouštět ji automaticky až dopoledne při předpovězeném přebytku z domácí fotovoltaiky.

Pro přímou kontrolu v rámci sítě je vhodná převážně druhá kategorie spotřebičů, přičemž základní spínání, např. bojlerů, je realizováno již zmíněným systémem hromadného dálkového ovládání. Kategorie s největším potenciálem pro využití tak představují čím dál tím rozšířenější tepelná čerpadla pro vytápění či klimatizaci. Flexibilita systému s tepelným čerpadlem se odvíjí od dovolené odchylky výstupního tepla, výkonu čerpadla a akumulačních vlastností vytápěného objektu. Řízení je možné provádět z několika hledisek. [63]

- **Stabilita sítě.** Výkon čerpadla se může měnit při přebytku či nedostatku elektrické energie, popřípadě momentálních kapacit místní sítě. Pokud je v lokalitě hodně tepelných čerpadel, koordinovanou regulací se snižují nároky na lokální distribuční soustavu. Při nekoordinovaném spouštění na termostat může docházet k velkým špičkovým zatížením, na které pak provozovatel soustavy musí navrhnout příslušná vedení a transformátory.
- **Využití obnovitelných zdrojů energie.** V zimním období se jedná zejména o využití přebytků z větrných elektráren v rámci celé sítě. V létě při přípravě teplé užitkové vody nebo klimatizaci lze uvažovat využívání přebytků ze síťových či domácích fotovoltaických elektráren.
- **Ekonomika provozu.** Cena elektrické energie jako taková představuje určitou informaci o momentálním stavu soustavy. Při správně nastavených mechanismech obsahuje tedy toto hledisko dvě předchozí zmíněná a nepřímou motivuje zákazníka k jejich zohledňování.

K implementaci nastíněného zapojení tepelných čerpadel již v praxi dochází. ČEZ Prodej u své dceřiné společnosti vyrábějící tepelná čerpadla testuje systém, kde by si uživatel nastavil míru flexibility, jakou chce poskytnout, v podobě dovolené teplotní odchylky [58]. Obdobně jeden z provozovatelů německé přenosové soustavy TenneT se ve svém projektu snaží čerpadla regulovat s ohledem na aktuální výrobu z obnovitelných zdrojů energie [64].

## Elektromobily

S rozmachem elektromobility se objevují i myšlenky a projekty na zapojení elektromobilů do stabilizace sítě. Elektromobily disponují značnou kapacitou baterií v řádu vyšších desítek kWh, což násobně překonává běžná domácí bateriová úložiště. Zároveň se tím mohou zredukovat jejich dopady na síť, která by vzhledem k potřebnému nabíjecímu výkonu „hloupé“ nasazení snesla jen po masivních investicích [65]. Výkony nabíječek se pohybují v rozmezí jednotek až stovek kW. Pokud bychom tedy chtěli například parkovací dům vybavit odpovídajícím množstvím výkonnějších nabíječek (desítky až stovky kW), nutný rezervovaný příkon se výrazně zvýší. Z hlediska spolupráce se sítí můžeme rozlišit tři provozní režimy.

- **Kontrolované nabíjení.** Přes síť se nastaví omezení nabíjecího výkonu, popřípadě se načasuje jeho začátek. Pokud se například v oblasti s rodinnými domy všichni večer vrátí domů, požadavek uživatelů bude, aby se elektromobil nabil do rána na určitou hodnotu. Nabíjení se pak postupně rozloží, aby v lokalitě nevznikl špičkový odběr. Nedojde tak k přetížení stávající sítě a nebude nutné ji více posilovat. [66] [65]
- **Zdroj pro domácnost (Vehicle2Home – V2H).** Elektromobil funguje jako zdroj pro ostrovní provoz domácnosti. Je připojen k domácí nabíječce (tzv. wallboxu), která je napojena na rozvod v domácnosti. V jednodušším případě má elektromobil standardní zásuvkový vývod. Výkon, který může elektromobil dodat, se liší pro různé modely. Například menší vozy čínské značky MG (MG4 a MG ZS) podporují 2,2 kW. Objevují se ale i auta jako Ford F150 Lightning, která poskytnou 9,6 kW, což při kapacitě baterie až 130 kWh může domácnost udržet v provozu i několik dní, v případě moderního úsporného domu i déle. [67] [68] [69]
- **Zdroj pro síť (Vehicle2Grid – V2G).** Elektromobily poskytují služby síti jako zdroje. Mohou se tak podílet na napěťové a frekvenční stabilizaci sítě, popřípadě i kompenzaci účinníku. Vozidla jsou v tomto případě uvažována ve skupinách, přičemž jejich činnost má pod kontrolou agregátor flexibility, který pak s jejich potenciálem obchoduje na trhu s elektřinou. Zároveň k nim má přístup provozovatel soustavy, pro případ řešení akutních problémů mimo trh s elektřinou. Do toho vstupují i omezení od uživatele či výrobce na dovolený maximální výkon nebo využitelné rozmezí kapacity baterie. Tyto parametry se navíc mohou měnit v čase. Například může uživatel před dlouhou cestou využitelnou kapacitu zmenšit, nebo se v horkých letních měsících objeví snížení výkonu z důvodu problémů s chlazením baterie. Dalším důležitým a nestálým parametrem je pak samotné umístění elektromobilu. Řízení takového systému je tak velmi komplexní a vyžaduje další výzkum a testování. [69] [66] [65]

V praxi se režim V2G testuje například v Německu, kde provozovatel přenosové soustavy TenneT spolupracuje s automobilkou Nissan na využívání elektromobilů pro větší využití obnovitelných zdrojů na severu země. Elektromobily své nabíjení časovaly tak, aby bylo možné využít energii z obnovitelných zdrojů. Při nedostatku energie pak naopak do sítě dodávaly, aby nebylo nutné hledat kapacity ve fosilních záložních zdrojích. To vše s přihlédnutím k tomu, aby nebylo omezeno využití vozidel k dopravě. [70]



Technologii V2H pak již od roku 2011 cíleně využívá Nissan při výpadcích elektřiny při přírodních katastrofách v Japonsku. Na základě prvotních zkušeností při zemětřesení v roce 2011, rok po uvedení první generace Nissanu Leaf, rozvinul spolupráci s obcemi, které pak mohou své elektromobily využít jako záložní zdroje pro napájení evakuačních center nebo kritických částí zdravotnických zařízení. [71]

## 2.5 Mikrosítě

### Definice

Mikrosít se dá definovat jako skupina propojených zátěží a zdrojů energie zvaných „Distributed Energy Resources“ (DER), která má jasně vymezené elektrické hranice a vůči hlavní síti se chová jako jeden prvek. Může fungovat na síti připojená i odpojená. Tato definice vychází z prvotních úvah o mikrosítích, které prováděly pracovníci Ministerstva energetiky Spojených států amerických. [72]

I když lze často narazit na jinak formulovanou definici, klíčové myšlenky jako užití DER, definované hranice, režimy provozu či chování vůči síti se objevují prakticky ve všech. Obdobně panuje jistá shoda i na dalších důležitých pojmech a definicích, které jsou pro analýzy mikrosítí podstatné. [73] [42] [74] [75]

### Pojmy

- ▶ **Distributed Energy Resources (DER).** Tento pojem označuje zdroje typicky používané právě v mikrosítích. Termín „distributed“ naráží na rozdílnost oproti konvenčním elektrárnám. Místo velkého centrálního zdroje s velkým výkonem, kde je výroba soustředěna v jednom místě, se objevuje více menších zdrojů rozestých na více místech, které mají ale v součtu srovnatelný výkon. Cíleně nelze mluvit přímo o elektrárně, protože pod tento pojem spadají i akumulční prvky. Proto DER dělíme dále na:
  - **Distributed Generation (DG) – zdroje.** Jedná se o zdroje elektrické energie, které ji nezískávají z cíleně naakumulované jiné formy. Spadají sem fotovoltaické panely, větrné turbíny či kogenerační jednotky. Vzhledem k tomu, že přečerpávací vodní elektrárny se v mikrosítích prakticky nepoužívají, lze sem všeobecně zařadit vodní elektrárny.
  - **Energy Storage System (ESS) – akumulace.** Většinou se jedná o systém pro skladování nějaké formy energie vybavený technikou pro přeměnu této formy na elektrickou energii a naopak. Mezi takové patří bateriová úložiště, sestavy vodíkových nádrží s palivovými články, setrvačníky či superkondenzátory. Jelikož se často elektrická energie může využívat na teplo, při přehlednutí požadavku na oboustrannou přeměnu sem můžeme zařadit i akumulaci tepla do látek v různých skupenstvích.
- ▶ **Point of Common Coupling (PCC) – přípojně místo.** Tento pojem označuje bod, v němž je mikrosít připojena k hlavní síti. Figuruje jako hranice mezi mikrosítí a vnější sítí. Tomu odpovídá přístrojové vybavení, je zde nutné mít odpovídající spínací přístroje, měřicí přístroje monitorující obě strany, popřípadě i řídicí systém pro přechody mezi provozními režimy. Může zde být

umístěno i chytré měření, ale taky může být dále po vedení v hlavní síti, aby k němu měl provozovatel vždy volný přístup.

- **Provoz na síti.** V tomto režimu je mikrosít přes PCC napojena na vnější síť. Všechny DER v provozu tak pracují synchronně v souladu s parametry elektrické energie vnější sítě. Mikrosít se v tomto stavu může chovat vůči vnější síti jako odběratel či výrobce elektrické energie, popřípadě mohou být zdroje ve výkonové rovnováze s lokálními zátěžemi a mikrosít tak bude vůči vnější síti neutrální.
- **Ostrovní provoz.** Mikrosít je odpojena od vnější sítě. Všechny DER a zátěže tak musí být ve výkonové rovnováze. Parametry elektrické energie v mikrosíti jsou určeny pouze prvky v ní.

## Vztah chytrých sítí a mikrosítí

Mikrosítě představují významnou část problematiky chytrých sítí. S rozvojem obnovitelných zdrojů energie dochází k decentralizaci výroby, jelikož je možné tyto zdroje nasazovat a provozovat ve zlomkových výkonech oproti klasickým elektrárnám. Instalace je často spojená s lokální akumulací energie, čímž přirozeně dochází ke vzniku mikrosítí s velmi proměnlivou výkonovou bilancí vůči hlavní síti.

S tím je spojená nutnost podrobného měření a obousměrné komunikace mezi řízením celé sítě a řízením mikrosítě. Tyto problematiky byly již zmíněny a popsány. Komunikace v rámci mikrosítě vlastně odpovídá komunikační vrstvě HAN v rámci chytré sítě. Zapojování malých lokálních bateriových úložišť a spotřebičů do stabilizace sítě je vlastně zapojování vzniklých mikrosítí. Komunikace a řízení jednotlivých prvků vyžaduje práci s obrovským množstvím dat. Pokud se například komplex budov přetransformuje na mikrosít, významně se tyto nároky sníží. Místo sběru dat a řízení jednotek či desítek přípojných míst se celý komplex bude jevit pouze jako jedno přípojně místo. Pokud bude potřeba odpojit nějaké zátěže nebo dodávat do sítě energii z akumulčních prvků, nebude nutné přímo ovládat jednotlivá zařízení, ale vyšle se jen požadavek mikrosíti. Teprve její řídicí systém rozhodne, s ohledem na lokální podmínky a omezení uživatelů, co za kroky provést pro uspokojení požadavku.

Nezávislost mikrosítě pak představuje výhodu pro ni samotnou i pro vnější síť, která nemusí pro toto přípojně místo zaručovat stabilní dodávku energie. Nemusí tak například startovat záložní zdroje pokud náhle dojde k dočasnému útlumu výroby, pouze mikrosít nechá odpojit. Právě tato flexibilita je v síti potřeba při integraci většího množství obnovitelných zdrojů energie s nestálým výkonem. Můžou ji poskytnout i velké prvky jako přečerpávací elektrárny nebo velká bateriová úložiště, jejich výstavba a financování je však v současnosti komplikovaná. Oproti tomu mikrosítě, jak již bylo zmíněno, vznikají přirozeně a představují tak značný nevyužitý potenciál, který stále roste.

# Kapitola 3

## Mikrosítě v České republice

### 3.1 Logistické centrum ADLER (Malfini) Ostrava

#### Kontext

Logistické centrum společnosti Malfini (dříve ADLER) se nachází v průmyslovém areálu Ostrava Business Park. Společnost se zabývá reklamním textilem. Skladová hala má plochu téměř 20 000 m<sup>2</sup>. Vzhledem k povaze objektu je elektrická energie spotřebovávána převážně na napájení elektrických vysokozdvížných vozíků, firemních elektromobilů, vzduchotechniku, osvětlení, pásové dopravníky atd. Dále je objekt potřeba vytápět. Spotřeba elektrické energie objektu se pohybuje kolem 1,2 MWh denně v rámci pětidenního pracovního týdne. Motivací pro vybudování mikrosítě byla politika firmy i ekonomika provozu. [76]

#### Realizace

Hlavním zdrojem elektrické energie jsou fotovoltaické panely na střeše a fasádě budovy. Celkový instalovaný výkon je 296 kWp. Velikost systému byla navržena s ohledem na samospotřebu, nebylo cílem prodávat přetoky do sítě. Čtvrtina panelů je umístěna vertikálně na plášti budovy. Zbytek panelů se nachází na střeše a jejich sklon je 20 stupňů od roviny. Všechny panely jsou orientovány na jih. Umístění vertikálních panelů na fasádu poskytuje určitý zisk i v zimě, dopadá na ně i odražené světlo od zasněžených povrchů, přičemž není potřeba odmetat sníh z nich samotných. Celá instalace je viditelná na obrázku 3.1. K panelům jsou instalovány dvě plynové kogenerační jednotky TOTEM, každá s výkonem 25 kWe a 50,2 kWt. Kogenerační jednotky běží pouze během topné sezóny. Poskytují dodávku tepla a zároveň přes zimu částečně nahrazují výrobu ze střešní fotovoltaiky. [76] [77] [78]



**Obrázek 3.1:** Vzdušný pohled na výslednou instalaci fotovoltaických panelů. [78]

Není zde jeden velký centrální střídač propojující baterie, fotovoltaiku a síť. Fotovoltaiku má na starost několik třífázových střídačů Fronius ECO o výkonu 25 kW s technologií MPPT. Každý obsluhuje několik řetězců panelů. Akumulace je realizována 360 kWh v bateriích typu LFP od PylonTechu, které obsluhují dva střídače o souhrnném výkonu 200 kW. Úložiště je běžné konstrukce, která se používá i v mnohem menších kapacitách do rodinných domů, celý systém je akorát naškálován a umístěn v rack konstrukci. Kogenerační jednotky, baterie a všechny střídače jsou umístěny v nově zbudovaných přístavcích, které splňují příslušné požadavky na požární bezpečnost. Interiér jednoho z nich je na obrázku 3.2. [76] [77] [78]



**Obrázek 3.2:** Interiér přístavku s bateriemi (vpravo) a skříněmi obsahující jejich střídače. [78]

Celý systém je vybaven pokročilým řízením, které zohledňuje aktuální ceny na trhu s elektřinou, plánovaný provoz haly a předpovědi počasí. Na základě těchto dat pak koriguje nabíjení baterií. Systém též umožňuje flexibilní nabíjení vysokozdvíhacích vozíků ve třech režimech: okamžitě dobij, dobij do druhého dne a dobij do nastaveného času. Nabíjení pak proběhne tak, aby bylo co nejlevnější. Dalšími službami je ořezávání špiček, kompenzace účinníku, plynulý přechod na ostrovní provoz

nebo start celé haly při výpadku vnějšího napájení. Přechod do ostrovního režimu při detekci výpadku vnější sítě probíhá natolik rychle, že jej žádná používaná technika, včetně výpočetní, nevyhodnotí jako výpadek a nevypne se. [76] [77] [78]

## Výsledky

Investice se s ohledem na vývoj cen elektrické energie velmi vyplatila. Cena fotovoltaického systému s bateriemi byla cca. 17 milionů Kč s dotací 8,8 milionu Kč. Náklad na kogenerační jednotky byl 3 miliony Kč. Deklarovaná návratnost ještě před energetickou krizí byla 7 až 8 let u fotovoltaiky a 3 až 5 let u kogenerace. [76]

Soběstačnost areálu se nyní pohybuje v průměru na 80 %. Bateriové úložiště by v případě nutnosti zvládlo provozovat halu přes noc, ve spolupráci s fotovoltaikou by hala mohla fungovat několik dní odpojená od sítě. Konkrétní čísla však závisí na stavu nabití elektrických vysokozdvíhových vozíků. Díky vlastním zdrojům není potřeba řešit překračování dovolených čtvrt hodinových maxim. Zatím však nedošlo ke snížení rezervovaného příkonu, které by přineslo další úspory. [76]

Vzhledem k těmto dobrým výsledkům se uvažuje o posílení fotovoltaiky a založení energetické komunity s okolními objekty, kterým by systém dodával přebytky elektrické energie. Pro to by se část distribuční sítě musela dostat do soukromého vlastnictví, nebo by muselo dojít k domluvě s provozovatelem. Další variantou je počkat na zavedení legislativy, která by dohodu značně zjednodušila. [76]

## 3.2 Strojírny Rumburk

### Kontext

Výrobní komplex společnosti Strojírny Rumburk se nachází ve Šluknovském výběžku, těsně u hranic s Německem. Společnost se zabývá kusovou a malosériovou strojírenskou výrobou (obráběním kovů) až do deseti tun. Ve firmě je provoz na dvě až tři směny, záleží na aktuálním počtu zakázek, někdy provoz běží i o víkendu. Denní spotřeba objektu se pohybuje v rozmezí 1,2 až 1,8 MWh. Firma si větší fotovoltaiku chtěla pořídit již před mnoha lety, ale kvůli problémům s legislativou a připojovacími podmínkami nakonec došla k menší instalaci 30 kWp v roce 2013. Motivací pro projekt mikrosítě byla eliminace mikrovýpadků elektrické energie, které některé stroje zaznamenávají a odstaví se, a vize do budoucna, kdy firma počítá s tím, že by se její systém mohl zapojovat do regulace elektrizační soustavy. Další součástí budoucí vize je elektrifikace firemní flotily automobilů. [79]

### Realizace

Jediným zdrojem elektrické energie jsou zde fotovoltaické panely rozmístěné na celkem pěti budovách. Jednotlivé elektrárny jsou orientovány na různé světové strany (východ, jih) a panely mají různý sklon. Tato různá orientace je z důvodu optimalizace na maximální samospotřebu v průběhu směn a celého roku, nikoliv na maximální celkový zisk ze všech panelů. Z tohoto důvodu celá instalace nedosahuje ve špičkách deklarovaných 210 kWp, ale pouze kolem 180 kWp. Různá orientace panelů zajišťuje jistou výrobu i v zimě, která se pohybuje kolem 10 až 20 % letních

špiček. Na některých panelech v zimě pravidelně roztává sníh, na jiných není vyvíjeno dostatečné teplo. Žádné cílené odhrnování sněhu se neprovádí. Rozmístění na jednotlivé budovy je zachyceno na obrázku 3.3. [79] [80]



**Obrázek 3.3:** Letecký snímek výrobního komplexu Strojíren Rumburk s patrnou rozdílnou orientací jednotlivých elektráren. Vygenerováno z [81].

Obdobně jako v případě logistického centra v Ostravě zde není velký centrální střídač propojující baterie, fotovoltaiku a síť. Při návrhu se muselo počítat s vysokým komínem, který na jednotlivé panely vrhá stín. Poloha tohoto stínu se pak samozřejmě mění během dne a roku. Z tohoto důvodu zde panely mají individuální DC/DC měniče, optimizéry od SolarEdge, které technologií MPPT maximalizují zisk z každého panelu zvlášť. Je tak možné individuálně monitorovat výrobu či závady jednotlivých panelů. V případě závady na nějakém panelu jej optimizér automaticky vyřadí a nedochází tak ke snížení výkonu celého stringu. Optimizéry také umožňují v případě požáru vyzkratovat jednotlivé panely, takže na střeše již není napětí celého stringu v řádech stovek voltů, ale pouze napětí jednotlivých panelů v řádu nízkých

desítek voltů, což už umožňuje běžné hasicí postupy, včetně užití vody. Fotovoltaické elektrárny na jednotlivých budovách mají vlastní střídače přímo v nich, blízko místa spotřeby. Je zde jeden 82,8kW střídač a zbytek elektráren obsluhují 25kW střídače, všechny od SolarEdge. [79] [80]

Akumulace je provedena dvěma bateriovými úložišti AERS AES (Advanced Energy Storage), každé má kapacitu 204 kWh, technologie článků je LFP. Vnitřek jedné ze skříní úložiště je viditelný na obrázku 3.4. Úložiště jsou vyvinuta právě pro průmysl. Mají centrální střídač od Škoda Electric s jmenovitým výkonem 360 kW a špičkovým až 400 kW. Záloha pro přechod do ostrovního režimu je realizována UPS systémem. Bateriová úložiště jsou provozována střídavě, aby mezi nimi nedocházelo k tokům energie. Vždy je tedy v provozu jen jedno, po vybití či nabití se odpojí a připojí se druhé. Celý systém bateriových úložišť se střídačem je galvanicky oddělen transformátorem. Jednotlivé bateriové packy ve skříních mají vlastní monitorovací systém, který komunikuje s centrální řídicí jednotkou přes CAN sběrnici. [79]



**Obrázek 3.4:** Jedna ze skříní s bateriovými packy, patrné jsou silové propoje měděnými šínami na bocích a monitorovací jednotky na přední straně. [82]

Primárně je systém řízen na ořezávání špiček a kompenzaci účinníku, k výpadkům vnější sítě dochází málokdy. V případě detekce napětí či frekvence nevyhovující ČSN je ale schopen přejít plynule do ostrovního režimu. Skříň, kde je výbava realizující tento přechod, je na obrázku 3.5. V hlavní výrobní hale je světelná indikace semaforem, který indikuje stav nabití bateriových úložišť. Zelená znázorňuje dostatečně nabitě baterie, výroba tak běží převážně z vlastních zdrojů. Oranžová znázorňuje vybíjející se baterie a červená zcela vybité, v takovém případě výroba běží čistě na elektrickou energii ze sítě. Výroba se díky této jednoduché indikaci může plánovat na samospotřebu a energeticky náročné činnosti se pak převážně provádí na elektrickou energii vlastní výroby. [79]



**Obrázek 3.5:** Skříň v hlavní rozvodně, kde dochází k připojování bateriového úložiště do rozvodné sítě areálu. Vpravo je zčásti vidět transformátor pro galvanické oddělení. [83]

## Výsledky

System plní všechny své účely bez problémů. Již několikrát plynule přešel do ostrovního režimu a výroba tak nemusela být kvůli mikrovýpadku pozastavena. Během provozu na síti pak ořezává špičková zatížení o desítky kW. Akumulace umožňuje v praxi ostrovní provoz téměř celou jednu směnu, v létě díky velkým ziskům z fotovoltaiky i několik dní. Do budoucna se počítá s dalším rozšířením akumulace (až na 1 MWh) a fotovoltaiky. Motivací je prodej elektřiny do sítě podle spotových cen a využívání přebytků k nabíjení elektromobilů na plánované dobíjecí stanici. [79] [82]



## 3.3 Výrobní závod Fénix Jeseník

### Kontext

Výrobní závod Fénix s.r.o. se nachází v Jeseníku. Firma se zabývá výrobou a instalací systémů elektrického vytápění, převážně sálavých topných panelů, ale i rohoží či kabelů. V závodě je plně automatická strojírenská výroba využívající CNC stroje, svařovací či ohýbací roboty, extrudační linky atd. Roční spotřeba elektrické energie je kolem 3 GWh, tj. v průměru zhruba 8,26 MWh denně. To je dáno použitím elektrického vytápění, energeticky náročnou výrobou a až třísměnným provozem. Rezervovaný příkon areálu by bez opatření byl kolem 700 až 800 kW během zimy. Firma se v lokalitě dlouhodobě potýkala s problémem mikrovýpadků. Docházelo k nim až třicetkrát za rok, přičemž většina automatizované výroby se při takové události odstaví. To firmě způsobovalo značné finanční ztráty, výroba nějakou dobu stojí a zmaří se určité množství materiálu. V průměru tak při každém mikrovýpadku vznikla škoda 70 až 100 tisíc Kč. [84] [85]

### Realizace

Instalace probíhala ve dvou fázích. V roce 2019 se položil základ v podobě rozšíření výkonu prvotní fotovoltaiky na 130 kWp a instalace bateriového úložiště 610 kWh. O tři roky později došlo k rozšíření výkonu fotovoltaiky v areálu na 891 kWp a bateriového úložiště na 3 MWh. Dále byla nainstalována experimentální větrná elektrárna o výkonu 10 kW. Fotovoltaické elektrárny jsou na několika budovách a část je na volně zpevněné ploše v areálu. Část z nich lze vidět na obrázku 3.6. Několik desítek kusů panelů je také na fasádách. Střídače k původní fotovoltaice jsou od firmy ABB. Instalovány jsou v rozvaděčích v jednotlivých budovách, co nejbližší místu spotřeby. Větrná elektrárna je experimentální o výkonu 10 kW. Konstrukčně se jedná o Darrieovu turbínu. [84] [85]

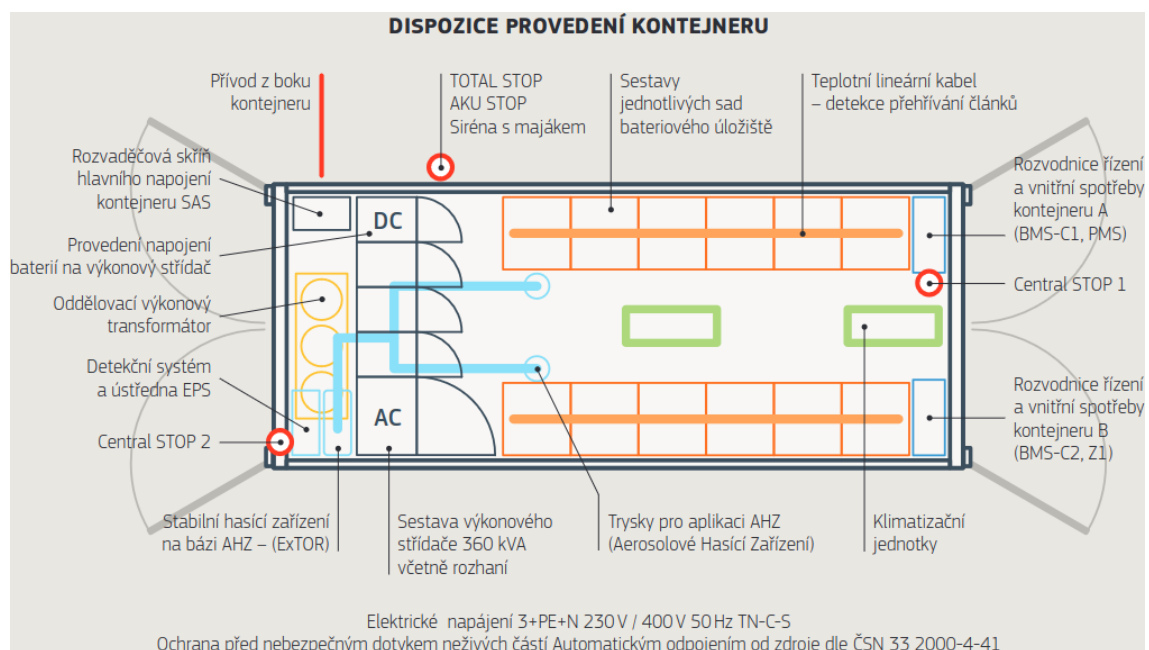


**Obrázek 3.6:** Letecký snímek části výrobního areálu FENIX s jednotlivými střešními fotovoltaickými elektrárnami.

Akumulace je provedena bateriovým úložištěm SAS od AERS, obdobně jako ve Strojárnách Rumburk. AERS je dceřinou firmou společnosti Fenix Group. První část akumulace (610 kWh) se nachází v objektu bývalého skladu, který prošel rekonstrukcí. Jsou zde nainstalována dvě bateriová úložiště technologie LFP, každé

o kapacitě 305 kWh, dva měniče Škoda Electric o výkonu 350 kW s přetížitelností 400 kW, dva přípojovací transformátory 400 kVA a veškeré monitorovací, řídicí, hasicí a klimatizační systémy. Dále je zde standardní zálohování UPS o napětí 24 V. [84] [85] [86]

Druhá část akumulace se nachází na zpevněné ploše v areálu, hned vedle fotovoltaické elektrárny. Jedná se o integrované řešení, které firma AERS nabízí, stačí jej připojit k vnější třífázové síti. Tvoří jej dva čtyřicetistopé lodní kontejnery s LFP články o kapacitě 2368 kWh doplněné stejnou výzbrojí jako v případě řešení uvnitř objektu (dva měniče, dva transformátory a ostatní doplňkové systémy). Jeden je obsazen pouze články a je elektricky propojen s druhým, kde se již nachází i transformátory a měniče. Hasicí, klimatizační a monitorovací zařízení jsou pochopitelně v obou. Vnitřní uspořádání menšího kontejnerového řešení je na obrázku 3.7. [85]



**Obrázek 3.7:** Příklad rozložení menšího kontejnerového provedení akumulčního systému AERS SAS. [86]



**Obrázek 3.8:** Instalované čtyřicetistopé kontejnery vedle fotovoltaické elektrárny. Zadní je čistě bateriový. [87]

Řídicí systém je v tomto případě orientován na široké spektrum činností. Algoritmus řídí akumulční prvky na nabíjení z distribuční soustavy, fotovoltaiky, vybití do distribuční soustavy a kompenzaci účinníku. Tyto činnosti plánuje dopředu podle predikce osvitů fotovoltaických elektráren, plánu spotřeby celého areálu a den předem známých cen elektrické energie (areál má spotový tarif). [85] [87]

## Výsledky

První instalace úložiště s kapacitou 610 kWh se brzy setkala s úspěchem. Po cca. 2 letech provozu dokázal systém zabránit 95 % mikrovýpadků, což představuje roční úsporu kolem 2 milionů Kč. Další úspory pak tvoří snížení rezervované kapacity areálu o 150 kW (roční úspora kolem 150 tisíc Kč) a úspora pořizovacích nákladů na kompenzaci účinníku (kolem 1 milionu Kč). Při pořizovací ceně 14,5 milionů Kč pak vychází návratnost samotného úložiště kolem 6 až 7 let. Úložiště bylo také schopné částečně udržet areál v provozu během osmihodinové odstávky trafostanice. Fotovoltaika s výkonem 130 kWp pak byla za rok schopna vyrobit kolem 5 až 7 procent celkové spotřeby areálu. [84]

Rozšíření fotovoltaiky a bateriového úložiště již bylo motivováno ne prevencí mikrovýpadků a ořezáváním špiček, ale převážně spočítanými úsporami při použití spotového cenového tarifu v kombinaci s ukládáním levné elektřiny z fotovoltaiky. Přineslo také možnost zálohovat areál v plném provozu až na 5 hodin. Soběstačnost areálu díky fotovoltaike se v období duben až srpen 2023 pohybovala v desítkách procent. I když byl v roce 2023 aktivní cenový strop, úspora vůči němu v období leden až srpen je téměř 5 milionů Kč. I v lednu, kdy se soběstačnost areálu díky fotovoltaike pohybovala na 3 %, vycházela průměrná cena za kWh o 29 % nižší než cenový strop. Při poměrně velké pořizovací ceně téměř 60 milionů je v kombinaci s dotací 11,5 milionu a dalšími úsporami deklarovaná návratnost kolem 7 let. [85]

Větrná elektrárna se jako vhodný doplněk k fotovoltaike neukázala a sešlo se z původní myšlenky instalace pěti dalších. Do budoucna je pak dalším potenciálním zdrojem energie vodní tok Staříč. Měla by zde vyrůst 50kW průtočná vodní elektrárna. [85]

## 3.4 Průmyslový areál Tabačka v Hodoníně

### Kontext

Průmyslový areál Tabačka v Hodoníně tvoří celkem třicet budov. Areál má vlastní lokální distribuční soustavu napojenou na 22 kV a jeho provozovatel drží licenční oprávnění na výrobu a distribuci elektrické energie a tepla. Historicky zde působil tabákový a strojní průmysl, od roku 2009 jsou pak jednotlivé budovy nabízeny k dlouhodobému či krátkodobému pronájmu. [88] [89]

### Realizace

Energetická soběstačnost areálu je budována již delší dobu. Prvotní instalace fotovoltaiky proběhla již v roce 2010, později došlo k instalaci kogenerační jednotky na zemní plyn KE-KEMNG-500 s výkonem 530 kWe a 630 kWt. Dalšími zdroji tepla pak jsou samostatné plynové kotle a elektrokotle, kterými je voda ohřívána při nadbytku výroby z fotovoltaických panelů. Nejnovějším zdrojovým prvkem je rozšíření fotovoltaiky na velké množství budov v areálu, celkem se jedná přibližně o 600 kWp. Většina elektráren je orientována na jih, u některých to vzhledem ke sklonu střechy nebylo možné. Část instalace je vidět na obrázku 3.9. [88] [89]



**Obrázek 3.9:** Část průmyslového areálu pokrytá fotovoltaickými elektrárnami s různou orientací. [89]

Nově byla také nainstalována bateriová akumulace v podobě dvou kontejnerových řešení Huawei Luna s celkovou kapacitou 3 MWh. Tyto kontejnery obsahují veškerou řídicí, monitorovací, klimatizační a hasicí techniku. Bateriové packy typu LFP jsou v každém kontejneru umístěny v šesti sekcích, každá obsahuje 21 kusů. Sekce i packy jsou individuální, tj. odpojení jednoho z důvodu závady nebrání provozu ostatních. Měníče jsou umístěny venku, ve skříních odolných povětrnostním podmínkám. Je jich celkem deset, každý má výkon 200 kW. Celý systém je pak přes dva transformátory zapojen na vysokonapěťové straně místní soustavy, tj. na 22 kV.

To je z důvodu předpokládaného budoucího využití na poskytování podpůrných služeb. [88] [90]



**Obrázek 3.10:** Měníče na jednom z transformátorů, v pozadí se nachází kontejnerová úložiště. [91]

## Výsledky

Výsledkem dlouhodobé investice do energetické soběstačnosti areálu je zejména deklarovaná nízká cena energií oproti standardním podmínkám na trhu. [89]

Instalace bateriového úložiště a fotovoltaiky umožnila snížení rezervovaného příkonu celého areálu. Případní zájemci o pronájem prostor pro výrobu s velkými odběrovými špičkami tak mohou mít zajištěny bezpečnou dodávku elektrické energie, pro kterou by se jinde muselo výrazně investovat do kapacity přípojky. Potenciálním projektem je využití akumulace pro rychlé dobíjecí stanice elektromobilů, kde by opět nemuselo dojít k masivním investicím do stávající přípojky. Také je do budoucna možné již zmíněné využití akumulace pro podpůrné služby, s tím je však potřeba počkat na změnu legislativy a podporu od provozovatele přenosové soustavy. [88]

## 3.5 Obec Mikolajice

### Kontext

Obec Mikolajice se nachází na Opavsku. Mikrosít zahrnuje tři budovy ve vlastnictví obce. Jde o hasičskou zbrojnici, obchod s potravinami a budovu obecního úřadu, kde se ještě nachází turistická ubytovna, hospoda, ordinace lékaře a kulturní sál. Zajištěny jsou dodávky tepla a elektřiny. Obec disponuje 42 ha obecních lesů, na kterých hospodaří. Není zde zaveden plyn. [92] [93] [94]

Motivací projektu bylo snížení nákladů obcí zajišťovaných či dotovaných služeb v těchto budovách, zejména pak prodejny potravin. Náklady na elektřinu a teplo totiž tvořily jejich největší část. Teplo bylo zajišťováno kotli na hnědé uhlí, které obsluhoval obecní zaměstnanec. Dodávka elektrické energie byla zajištěna připojením jednotlivých budov na nízkonapěťovou distribuční soustavu. [92] [94]

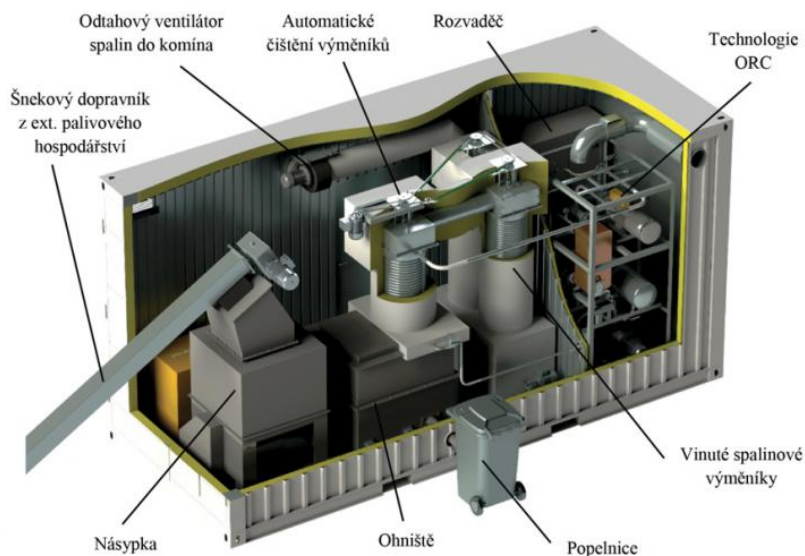


**Obrázek 3.11:** Budovy mikrosítě v Mikolajicích. Zleva: budova obecního úřadu, hasičská zbrojnice, prodejna potravin. Vygenerováno z [81].

## Realizace

První zdrojem elektrické energie je zde fotovoltaika na střeše obchodu s potravinami. Fotovoltaická elektrárna má výkon 10 kWp a je orientována na jih. Jednotlivé panely jsou vybaveny optimizéry, které řeší problémy se zastíněním a poskytují individuální řízení. [92] [94]

Druhým zdrojem elektrické energie a jediným zdrojem tepla je experimentální kogenerační jednotka WAVE v kontejnerovém provedení. Nachází se vedle budovy obchodu s potravinami. Palivem jsou dřevní pelety, které podavač dopravuje z velkoobjemového úložiště v budově. Teplo získané spalováním ohřívá v trubkovém výměníku organickou pracovní látku. Část energie je pak z ohřátého média odebrána v lamelovém expandéru, který roztáčí asynchronní generátor s frekvenčním měničem. Zbytek energie je pak odebrán ochlazením ve výměníku s vodou, která pak slouží k vytápění budov. Celá kogenerační jednotka má výkon 3 kWe a 60 kWt s vlastní spotřebou 0,9 kWe. Systém dodávky tepla je plně automatický, včetně elektrického zapalování. Jednotka vyžaduje pouze jednou za pár měsíců doplnit úložiště pelet a vynést popel. [92] [95]



**Obrázek 3.12:** Kogenerační jednotka Wave. [96]

Akumulace elektrické energie je provedena bateriovým úložištěm technologie LFP od Pylontech s kapacitou 15 kWh, které je napojeno na měnič SolaX. Ten obsluhuje panely i bateriové úložiště. Umožňuje také ostrovní provoz celé mikrosítě (jde o tzv. hybridní měnič). Jelikož kogenerační jednotka má problematickou regulaci, je periodicky spínána pro natopení dvou akumulčních nádob na teplou vodu. [92] [93]



**Obrázek 3.13:** Dvě akumulční nádrže na teplou vodu, každá s objemem 1000 l. [97]

Při instalaci zdrojů a akumulací byly mezi budovami vybudovány technické kanály, kam byly uloženy trubky pro rozvod teplé vody a kabely pro rozvod elektrické energie. Všechny tři budovy tak mají pouze jedno přípojné místo k vnější distribuční soustavě. [92] [93]

Řídicí systém pracuje na základě predikce předpovědi počasí a optimalizuje svůj provoz s ohledem na maximální samospotřebu elektrické energie. Vybudovaný rozvod tepla umožňuje na dálku ovládat vytápění jednotlivých místností. Dochází tedy nejen k řízení nabíjení a vybíjení baterií dle predikcí osvitů, ale také ke změnám spínací periody kogenerační jednotky dle předpokládané teploty v používaných místnostech v objektech. [93] [94]

## Výsledky

Projekt splnil svůj účel. Náklady na dodávky tepla díky absenci obsluhujícího zaměstnance klesly. Kogenerační jednotka v kombinaci s fotovoltaickou elektrárnou vyrobí zhruba 30 % z celkové spotřebované elektrické energie v objektech. Další úspory v řádech nižších desítek tisíc Kč ročně vznikly díky sloučení několika odběrných míst do jednoho centrálního. Díky inteligentnímu systému řízení se tepelná spotřeba objektů snížila o 15 %. Celkové náklady kolem 4,5 milionu Kč se povedlo z 80 % uhradit z dotace, díky čemuž je predikovatelná návratnost pouhé 4 roky. [92] [93] [94]

S přibývajícím měsícem provozu se projevily i původně neplánované pozitivní dopady. Schopnost systému fungovat i při výpadku vnější sítě je velmi výhodná v případě živelných katastrof. Hasičské vozy mohou vyjízdit hned, jelikož externí elektrický kompresor udržuje jejich brzdy natlakované, funguje elektrický pojezd bran, mohou si nabíjet techniku nebo vysílačky. Dále pak komplex budov může

fungovat jako nouzové shromaždiště, kde je k dispozici teplo a elektrická energie. Výhodné je též zálohování chladících zařízení v prodejně potravin, kde může výpadek elektrické energie napáchat velké finanční škody. [92] [93] [94]

Projekt inspiroval obyvatele obce i další samosprávy v okolí k modernizaci jejich systémů vytápění, popřípadě instalacím fotovoltaiky. Z průběžného měření vyplývá, že zrušení jednotlivých uhelných kotelen mělo pozitivní vliv na ovzduší v obci. [92]

Do budoucna se plánuje instalace další fotovoltaické elektrárny na budovu hasičské zbrojnice a rozšíření bateriové akumulace. To by mělo umožňovat napájet z mikrosítě i systém veřejného osvětlení v obci, což přinese další úspory. [94]

## 3.6 Město Budišov nad Budišovkou

### Kontext

Město Budišov nad Budišovkou se nechalo inspirovat projektem v blízkých Mikolajicích. Nachází se také na Opavsku a mikrosítě zde zahrnuje radnici, kulturní dům a základní školu. Dodávky tepla zajišťovalo několik plynových kotelen se starými atmosférickými kotli. Celý systém byl převzat v roce 2016 od soukromého provozovatele. Následně byl auditem vyhodnocen jako neúčinný a předimenzovaný. V objektu kulturního domu je biomasová kotelná o výkonu 150 kW. Hlavní motivací bylo celý systém modernizovat pro ekonomičtější provoz. Dodávky elektřiny pak byly zajištěny pouze připojením jednotlivých budov na nízkonapěťovou distribuční soustavu. [98] [99] [100]



Obrázek 3.14: Komplex obecních budov v Budišově nad Budišovkou.

### Realizace

Elektrickou energii zde vyrábí dva zdroje. Prvním je fotovoltaická elektrárna o výkonu 10,54 kWp. Umístěna je na střeše kulturního domu, orientována je na jih. Druhým je kogenerační jednotka TOTEM o výkonu 20 kW<sub>e</sub> a 48 kW<sub>t</sub>. Plyn je spalován v upraveném zážehovém spalovacím motoru, který roztáčí asynchronní generátor s frekvenčním měničem. Teplo je pak získáváno chlazením tohoto motoru. Kogenerační jednotka je umístěna v kotelně základní školy společně s dvěma novými



85kW plynovými kondenzačními kotli. V kotelně městského úřadu byly instalovány další dva plynové kondenzační kotle, každý s výkonem 49 kW. Biomasová kotelna v kulturním domě byla pouze modernizována. [98] [100]

Akumulace elektrické energie je řešena bateriovým úložištěm typu LFP o kapacitě 19,2 kWh a umožňuje ostrovní provoz celé mikrosítě. Úložiště je umístěno v kulturním domě. Akumulace tepla je řešena akumulací nádobou s objemem 2000 l a zásobníkem na teplou vodu 400 l. [98] [100]



**Obrázek 3.15:** Kotelna v objektu základní školy. Zleva: kogenerační jednotka TOTEM, akumulací nádoba, plynové kondenzační kotle. [98]

Všechny budovy jsou propojeny venkovním elektrickým vedením a k nízkonapěťové distribuční soustavě jsou nově připojeny pouze přes jedno odběrné místo umístěné v budově základní školy. Tepelně bylo z památkových důvodů možné propojit pouze kulturní dům se základní školou. Celá instalace je pak vybavena automatickým řídicím systémem. U tepla je snaha dosáhnout nejúspornějšího provozu, u elektřiny pak minimalizovat přetoky do distribuční soustavy, tj. maximalizovat samospotřebu. [98] [100]

Město si v rámci projektu pořídilo sedmimístný elektromobil Nissan eNV200, který slouží pro potřeby organizací a spolků města. Nabíjení elektromobilu je zajištěno nabíječkou umístěnou na objektu základní školy. Její výkon je 22 kW. [100] [101]

## Výsledky

Projekt přinesl očekávané úspory, na dodávkách tepla a elektrické energie obec šetří až 300 tisíc Kč ročně, přičemž náklady projektu byly kolem 5 milionů Kč. Ty se podařilo ze 75 % pokrýt z dotačního programu. Díky relativně velkému instalovanému elektrickému výkonu má skupina budov soběstačnost 80 %. V případě výpadku vnější sítě dokážou baterie zálohovat budovy až na 12 hodin. I tak se ale uvažuje o budoucím posílení kapacity baterie a výkonu fotovoltaiky. [99] [100] [101]

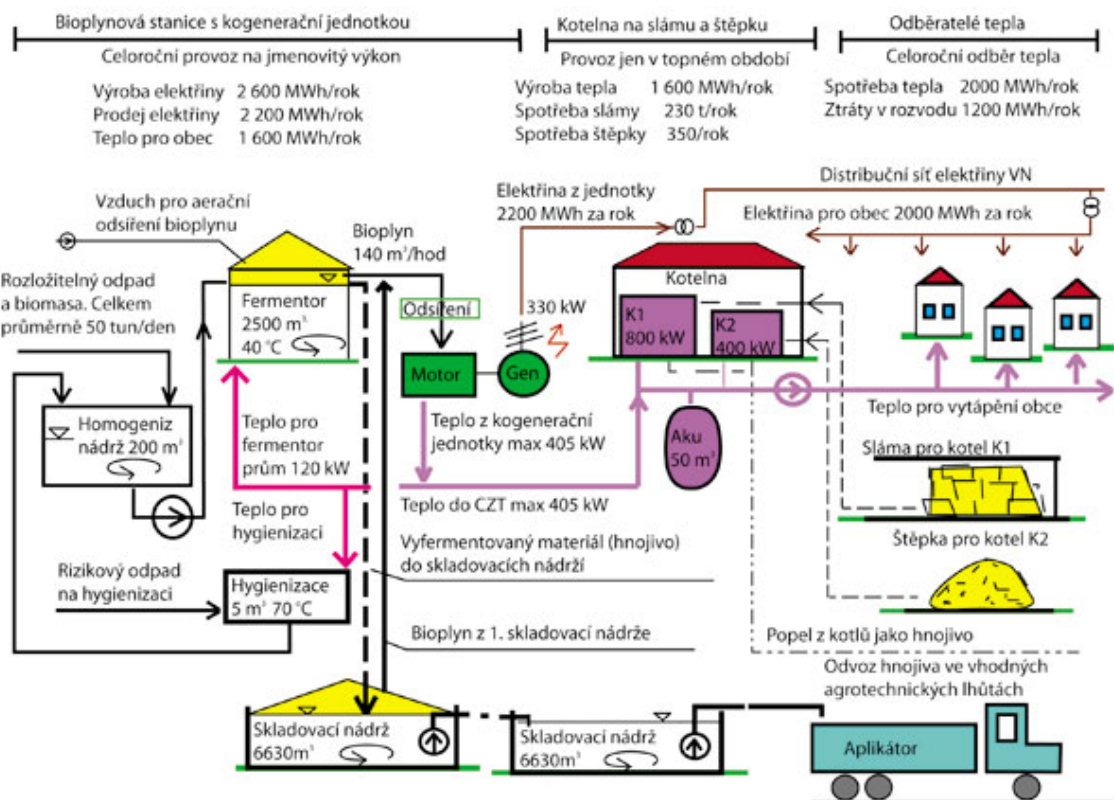
## 3.7 Obec Kněžice

### Kontext

Obec Kněžice se nachází ve Středočeském kraji a žije v ní kolem 500 obyvatel. O energetické nezávislosti obce se začalo uvažovat již v roce 2000, kdy došlo k vyčlenění prostor pro tyto účely v územním plánu. Obec není plynofikována a dodávky tepla tak byly v režii kotlů na dřevo či uhlí v jednotlivých budovách. Prvotním projektem pro zvýšení energetické nezávislosti bylo vybudování linky na výrobu dřevních pelet, které pak obec prodávala teplárnám a svým občanům. [102]

### Realizace

Hlavním zdrojem elektrické a tepelné energie je bioplynová stanice vybudovaná v roce 2006. Zde dochází ke zpracování odpadu, který obec sváží či kupuje z okolí. To zahrnuje bioodpad, žumpy a jímky (obec nemá splaškovou kanalizaci). Po prvotní úpravě vzniká ve fermentoru bioplyn, který je následně spalován v zážehovém motoru. Ten roztáčí generátor o výkonu 330 kW a zbytkové teplo z něj pak představuje výkon 405 kWt. Pro provoz v topné sezóně je zde ještě kotelna s jedním 800kW kotlem na slámu a druhým 400kW kotlem na štěpku. Elektrický výkon je vyveden do sítě vysokého napětí. Podrobné schéma celého systému je na následujícím obrázku. [102] [103]



Obrázek 3.16: Schéma energetického systému obce Kněžice. [103]

V obci je rozveden vlastní teplovod, který je napojen na jednotlivé rodinné domy. Díky výměníkům v jednotlivých domácnostech jsou otopné soustavy domů

izolovány a tak mohou mít stále klasické kotle v záloze, čehož využívají při odstávkách. Celá obec je zásobena energií ze standardní distribuční soustavy, není zde tedy klasická elektrická mikrosíť. Na systém je v současnosti napojeno zhruba 94 % obyvatel žijících v obci. [102] [103]

## Výsledky

Ačkoliv tento projekt v současnosti není elektrickou mikrosítí, o jejím vytvoření se uvažuje. Panují i úvahy o vybudování fotovoltaických elektráren s bateriovými úložišti, což by ještě více podpořilo nezávislost obce. Bioplynová stanice ročně vyrobí kolem 2200 MWh, což násobně převyšuje nároky všech obyvatel. Současná praxe je standardní prodej vyrobené elektřiny do soustavy. [102] [103] [104]

Co se týká systému rozvodu tepla, ten plní svůj účel. V obci se významně zlepšilo ovzduší a díky nastavené cenové politice, aby se domácnostem nevyplácelo topit např. uhlím, mají obyvatelé velmi nízké náklady na topení. Projekt bylo ovšem velmi náročné prosadit a zrealizovat, jelikož náklady se pohybovaly kolem 140 milionů Kč. Dotací se je povedlo snížit na pouhých 43 milionů Kč, což vyústilo v návratnost 15 let. Vzhledem k velké dotaci je otázkou, jak by byla investice reálná bez ní. [102] [104]

## 3.8 Zemědělská společnost Bruzovice

### Kontext

Zemědělská společnost Bruzovice se nachází ve stejnojmenné obci, kde využívá prostory bývalého JZD. Jde o menší farmu s 20 zaměstnanci, hospodaří na 1200 ha půdy. Součástí jejich provozu je i kravín, který se stal prvotním impulzem pro vytvoření mikrosítě. Kvůli nedostatku pracovních sil došlo k robotizaci dojení, což mělo ovšem za následek zvýšené nároky na elektrifikaci farmy. Docházelo k častým výpadkům elektrické energie, kvůli kterým si společnost pronajímala velkou elektrocentrálu. Dojící robot je navržen pro nepřetržitý provoz celý den. [105]

### Realizace

Na střechách hospodářských budov v areálu byly vybudovány fotovoltaické elektrárny o celkovém výkonu 79,56 kWp. Akumulace vyrobené energie je realizována bateriovým úložištěm technologie NMC o kapacitě 102,54 kWh. To je umístěno v budově bývalého vepřína, kde byla vytvořena klimatizovaná místnost. Systém je řízen s ohledem na maximální samospotřebu. Limit pro vybíjení baterií v provozu na síti je nastaven na 50 %. Přejít na ostrovní provoz v případě výpadku elektrické energie je plynulý, robotizace ho nezaznamená. [106] [107] [105]



**Obrázek 3.17:** Místnost s rozvaděči a bateriovým úložištěm. [105]

## Výsledky

Vytvoření mikrosítě vyřešilo problém s výpadky elektrické energie. Díky možnosti výroby a akumulace je celý areál částečně soběstačný a šetří ročně víc jak 600 tisíc Kč. Baterie umožňují při plném nabití zálohovat provoz areálu po dobu 24 hodin. Náklady na projekt se pohybovaly kolem 7 milionů Kč a 80 % bylo pokryto z dotací. [106] [107] [105]

Do budoucna společnost uvažuje investici do elektromobilů a vybudování dvou až tří nabíjecích stanic. [105]

# Kapitola 4

## Mikrosítě v zahraničí

### 4.1 Skotský ostrov Eigg

#### Kontext

Ostrov Eigg se nachází v souostroví na západě Skotska, 12,5 kilometru od jeho pobřeží. Jeho rozloha je 30,5 km<sup>2</sup> a trvale ho obývá přibližně 100 obyvatel. Pozemky ostrova jsou ve vlastnictví a správě spolku Isle of Eigg Heritage Trust.

Ostrov nebyl nikdy elektrifikován připojením na pevninskou soustavu. Zdrojem elektřiny byly vždy elektrocentrály a dvě malé vodní elektrárny, které napájely jednotlivé budovy či menší skupinky domů. Na ostrově též nikdy nebyla vybudována infrastruktura, která by tyto skupinky domů elektricky propojila. Veškeré palivo pro elektrocentrály se muselo dovážet z pevniny. Vytápění je dodnes řešeno palivovým dřevem, jelikož na ostrově je celkem rozvinuté lesnictví. [108]

Motivací projektu bylo zvýšení nezávislosti ostrova a ochrana lokálního životního prostředí. Připojení ostrova podmořským kabelem bylo na počátku projektu zavrženo kvůli příliš velkým nákladům a složité byrokracii. [109]

#### Realizace

Aby se zvýšila nezávislost ostrova, zdrojovou základnu tvoří kombinace obnovitelných zdrojů energie s akumulací a záložní generátory v centrální budově.

V současnosti je nejvýkonnějším obnovitelným zdrojem elektřiny fotovoltaická elektrárna umístěná u již zmíněné centrální budovy. Všechny panely mají v součtu výkon 170 kWp. Většina se nachází na travnaté zemi. Sklon od roviny je 20 stupňů a orientace je jižní. Na střeše centrální budovy jsou pak dva soubory panelů po 10,5 kWp, jedna s orientací na západ, druhá na východ. [108] [110]

Původní 9,9kWp instalace z roku 2008 je tvořena 60 kusy 165Wp panelů, které jsou po dvou řetězcích o 10 kusech zapojeny do celkem třech jednofázových měničů SunnyBoy SB o výkonu 3 kW. První rozšíření o 22 kWp proběhlo v roce 2011, tvoří ho 126 kusů 180Wp panelů napojených na tři jednofázové měniče SMC 7000HV o výkonu 7 kW. Následovalo rozšíření v roce 2013 o 22,5 kWp tvořené 90 kusy 250Wp panelů napojených znovu na tři jednofázové měniče SMC 7000HV. Poslední rozšíření přišlo v roce 2022, kde se přidalo pět souborů po 22 kusech 440Wp panelů, přičemž každý soubor je napojen na třífázový měnič STP-20000TL o výkonu 20 kW. Stejný měnič je použit i pro střešní fotovoltaickou elektrárnu. Všechny použité měniče disponují technologií MPPT. [110]



**Obrázek 4.1:** Fotovoltaická elektrárna u centrální budovy. [110]

Dalším významný obnovitelný zdroj elektřiny jsou tři průtočné vodní elektrárny s celkovým výkonem 112 kW. Největší z nich je vybavena třífázovým generátorem Gilkes o výkonu 100 kW a voda je k ní přiváděna podzemním potrubím z uměle vytvořeného jezera, což vytváří spád více než 100 m. Výkon je pak vyveden přes transformátor do vysokonapěťové sítě. Dvě menší vodní elektrárny o výkonu 6 kW jsou pak původní a byly pouze modernizovány. [108] [110]

Posledním obnovitelným zdrojem jsou pak čtyři větrné turbíny PROVEN WT6000 o výkonu 6 kW. Konstrukce je klasická lopatková s horizontální osou. Pro připojení na síť je jejich třífázový střídavý výstup zapojen do měničů Windy Boy WB-6000A. Elektrická energie o stálých parametrech je pak vyvedena přes transformátor do vysokonapěťové sítě. [108] [110]

Jako záloha celého systému slouží dvě naftové elektrocentrály, každá s výkonem 64 kW. Ty se spouští při vybití baterií pod 50 % kapacity a vypnou se při dosažení 90 %. [108] [111]

Původní akumulace je realizována pomocí systému složeného ze čtyř skupin baterií Rolls Solar RB 4KS25PS. V každé skupině jich je 24 a celkové napětí každé skupiny je 48 V. Technologicky jde o olovené galvanické články. Obsluhuje je celkem dvanáct jednofázových střídačů Sunny Island SI-5048 o výkonu 5 kW, z nichž jsou vytvořeny čtyři třífázové celky o výkonu 15 kW, které obsluhují jednotlivé skupiny baterií. V letech 2019 až 2023 došlo k rozšíření systému o šest dalších třífázových celků, čtyři z nich tvoří již zmíněné měniče SI-5048 a dva jsou tvořeny měniči Sunny Island SI-8.0H o výkonu 6 kW. Využívaná kapacita systému (než nastartuje naftová záloha) je pak 530 kWh s dostupným výkonem 156 kW. [108] [109] [110]



**Obrázek 4.2:** Bateriová místnost v centrální budově. [110]

Jako doplňková akumulace v experimentálním provozu pak od roku 2014 funguje setrvačnickový systém od Kinetic Traction System a od roku 2018 systém z grafenových superkondenzátorů SkelGrid. [112]

Rozvod elektrické energie na ostrově je realizován třífázovou sítí vysokého napětí úrovně 3,3 kV. K ní jsou pak přes transformátory připojeny vodní a větrné elektrárny nebo skupiny budov. Pro zajištění stability sítě je odběr běžné přípojky omezen na 5 kW, pro podnikatelské účely 10 kW. Jednotlivé přípojky umožňují uživateli sledovat aktuální spotřebu a upozorňují v případě hrozby dosažení limitu. [108] [110]

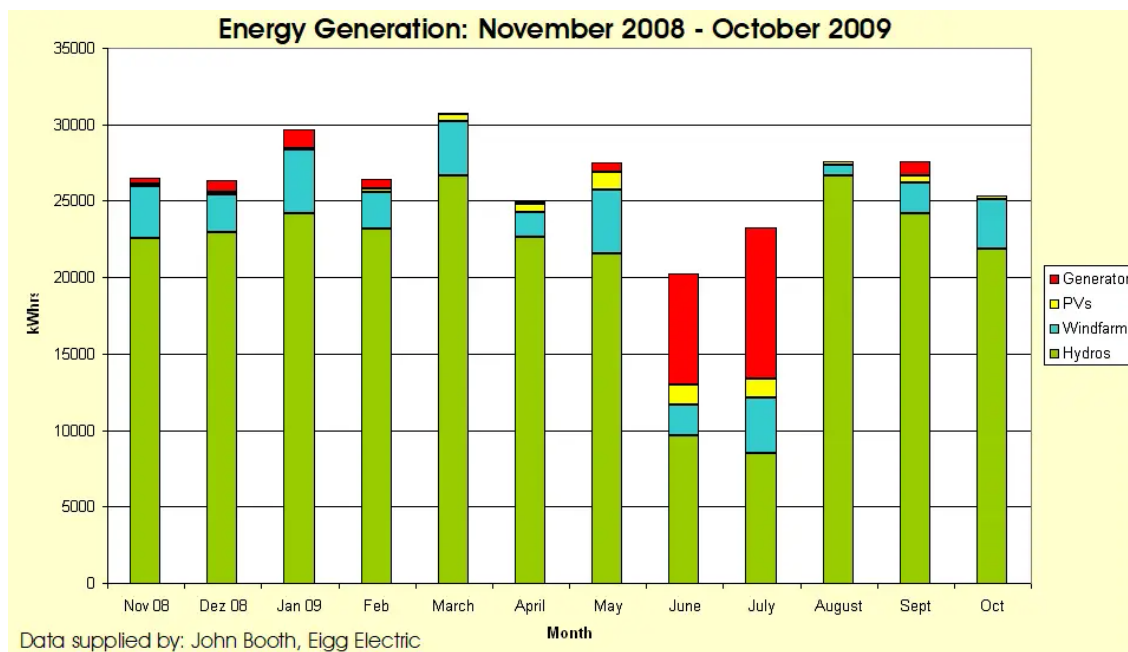


**Obrázek 4.3:** Vybavení přípojky domu. [110]

Vzhledem k místním podmínkám a zdrojové základně jsou velké nadbytky elektrické energie převážně v zimě. Pro stabilizaci sítě pak slouží systém frekvenčně spínaných přímotopů v některých budovách. Pro případy, kdy to nestačí, jsou u větrných elektráren umístěny venkovní přímotopy. Poslední možností, ke které se přistupuje, je omezení výkonu na velké vodní elektrárně. [108] [111]

## Výsledky

Mikrosít úspěšně funguje již od února roku 2008 a jak již bylo řečeno, stále probíhá její rozšiřování. Nezávislost ostrova na dovozech nafty se s doplňováním fotovoltaiky postupně zvyšovala. Níže uvedený graf odpovídá původní zdrojové základně.



**Obrázek 4.4:** Graf podílu jednotlivých zdrojů na výrobě elektrické energie od listopadu 2008 do října 2009. [110]

Pro mikrosít je naprosto kritická 100kW vodní elektrárna. Bez ní by dle simulací ostrov nepokryl z obnovitelných zdrojů ani polovinu své spotřeby a obzvláště v zimních měsících by míra zapojení naftové zálohy byla značná. V případě ostrovů, které podobným potenciálem nedisponují, by bylo možné uvažovat o náhradě přílivovými vodními elektrárnami. To je ovšem stále málo využívaná technologie, projekt by tak vlastně byl podobně experimentální, jako byl tento v roce 2008. [111]

Celý systém pak vyšel v době vzniku levněji, než by byla cena podmořského kabelu. Ta byla v roce 2003 odhadována mezi 2 až 5 miliony liber. Konečné náklady na mikrosít, po instalacích v roce 2008, byly zhruba 1,7 milionu liber. [109]

Testované technologie superkondenzátorů a setrvačnicků k vykrývání krátkodobých špiček se ukazují jako vhodné zejména pro prodlužování životnosti stávajících olověných baterií. [112]

## 4.2 Vesnice Agkistro v Řecku

### Kontext

Vesnice Agkistro se nachází na severu Řecka. Má kolem 350 obyvatel a je zde vybudována průtočná vodní elektrárna. Ta je připojena do sítě vysokého napětí 20 kV. Síť je v lokalitě značně nestabilní, což bránilo vybudování potravinářské výroby pro sezónní zpracovávání místních produktů. Zátěže v ní tvoří ledničky a další konstantně běžící zařízení s příkonem kolem 5 kW, 3kW sušičky



a 32kW vytápění. Nejbližší transformátor je již výkonově obsazen a k výrobě by tak muselo být vybudováno vedení o délce 20 km od jiného transformátoru. Zároveň je cena elektřiny ze sítě mnohem vyšší, než za kterou by šla nakupovat přímo z vodní elektrárny. Mikrosít v tomto případě zahrnuje tuto výrobu a systém vodíkové a bateriové akumulace. Vznikla jako jedna z několika dalších mikrosít s vodíkovou akumulací v rámci projektu REMOTE. [113] [114]

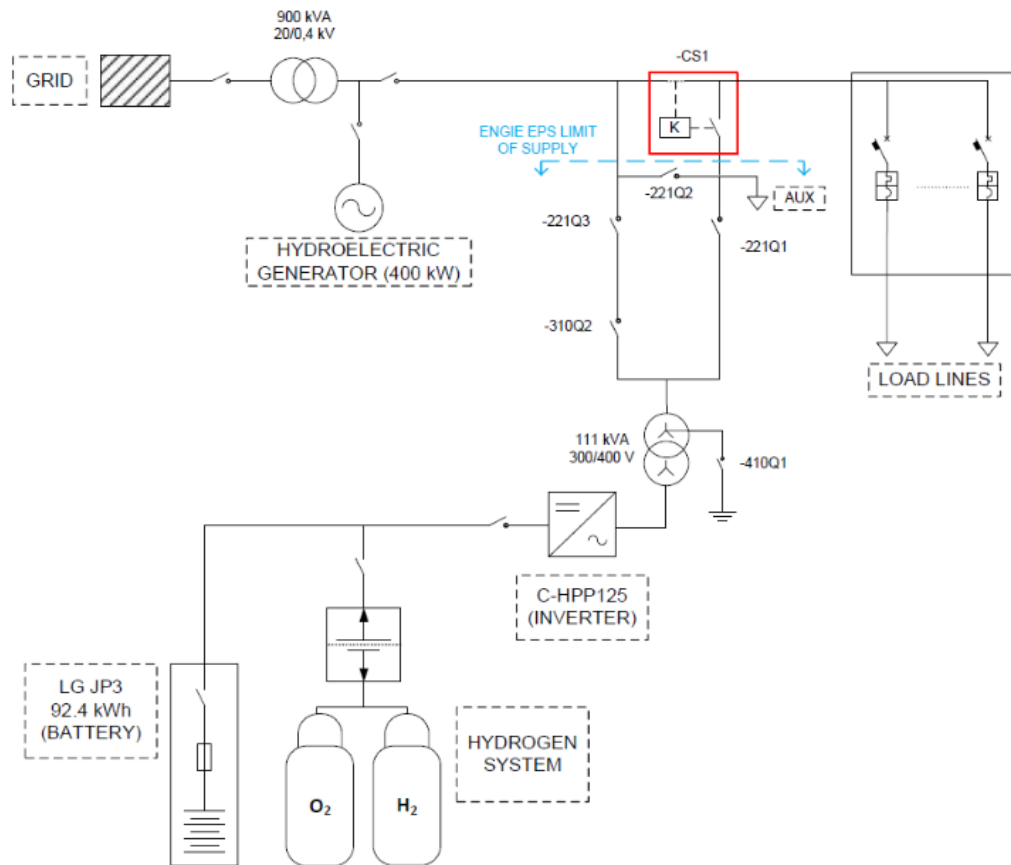
## Realizace

Dostupná část výkonu z vodní elektrárny je 400 kW. Celý akumulční systém je v kontejnerovém provedení. P2G část vodíkové akumulace je tvořena alkalickým elektrolyzérem o výkonu 25 kW s účinností 63 % a umožňuje výkonovou regulaci v rozsahu 20 až 100 %. G2P část je tvořena dvěma palivovými články s PEM, každý s výkonem 25 kW, účinností 50 % a umožňující výkonovou regulaci v rozsahu 15 až 100 %. Vodík je pak uložen v nádrži o objemu 12 m<sup>3</sup>, což při parametrech skladování představuje 854 kWh využitelného vodíku. Se zahrnutím účinnosti systému a konzervativního odhadu denní spotřeby výroby 250 kWh tak jednotka může napájet provoz jeden až dva dny. K vodíkové akumulaci je doplňková bateriová akumulace využívající Li-pol baterie LG Chem JP3 s celkovou kapacitou 92,4 kWh. [114] [115]

Baterie a elektrolyzér jsou pak přes DC/DC měniče stejnosměrně propojeny a do střídavé sítě zapojeny přes centrální měnič a oddělovací transformátor. [115]



**Obrázek 4.5:** Vodíkový akumulční systém v kontejnerovém provedení. [115]

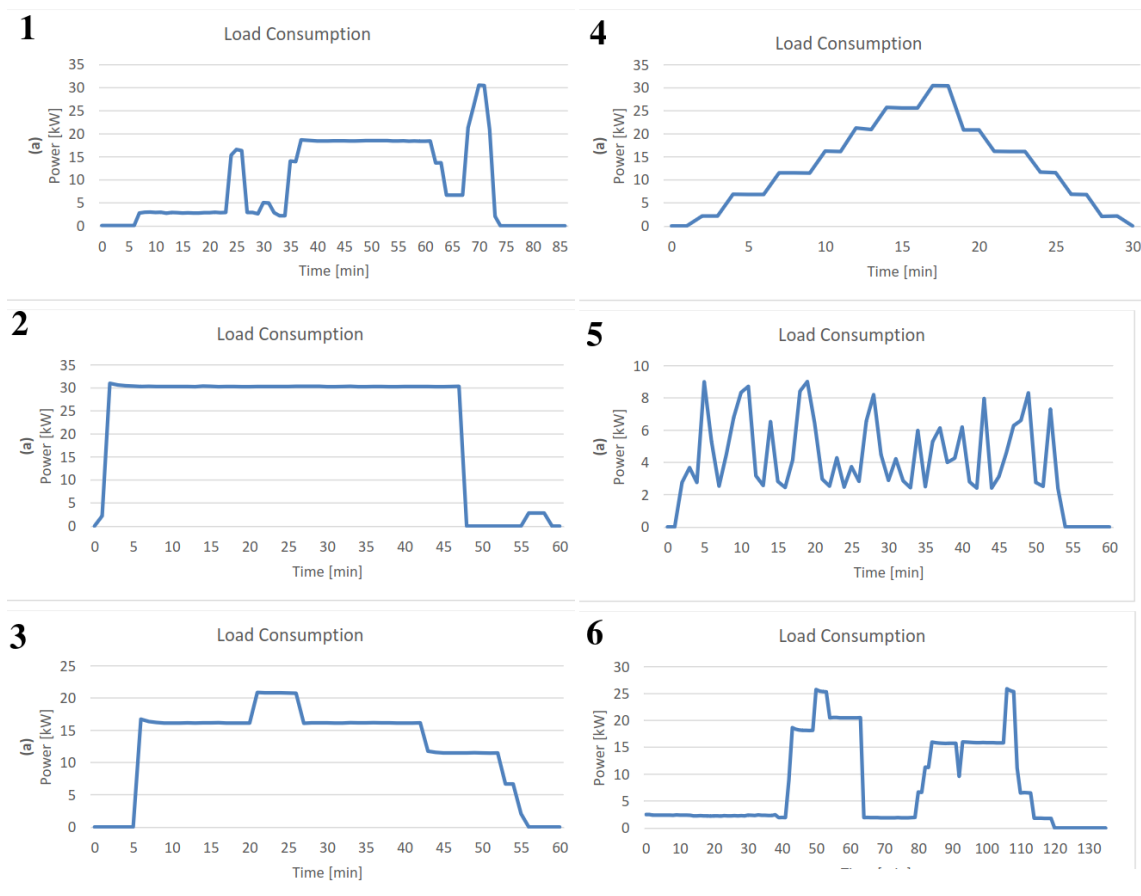


**Obrázek 4.6:** Schéma systému napájení a akumulace. [115]

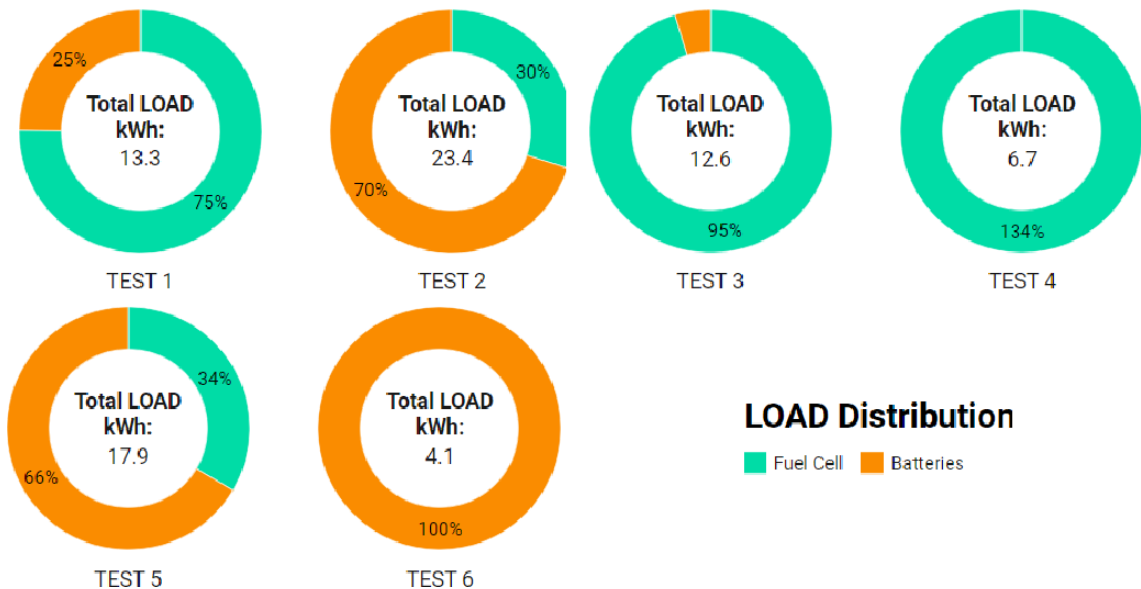
Systém umožňuje ostrovní provoz i provoz na síti. Na krátkodobé vykrývání diagramu zatížení se používají baterie, na dlouhodobé vykrývání pak palivové články. V provozu na síti jsou baterie nabíjeny, jakmile jejich kapacita klesne pod 50 %. K výrobě vodíku pak dojde pokud jsou již baterie nabitě nad 30 % a zároveň je stav vodíkové nádrže pod 20 %. Při přechodu do ostrovního režimu se přednostně využijí baterie, dokud jejich kapacita neklesne pod 10 % SOC. Pak startují palivové články, ale pouze pod podmínkou, že je nádrž na vodík alespoň z 20 % plná. [115] [116]

## Výsledky

Tato mikrosít je značně experimentální. Byla dokončena v červenci 2020 a od té doby se značná část provozu věnovala testování různých diagramů zatížení a sbírání dat. Část výsledků těchto měření jsou na grafech v obrázcích 4.7 a 4.8. Kvůli relativně novým technologiím v podobě vodíkové části se objevovaly problémy jako například poškození čerpadel, problémy s udržením elektrické stability systému v ostrovním provozu nebo úniky kyslíku. V dubnu 2023 pak dokonce v oblasti došlo k natolik masivnímu výpadku, že celý systém už nebylo možné opětovně zprovoznit, a bylo potřeba vyměnit baterie UPS zálohování. Elektrolyzér byl zvolen polovičního výkonu než palivové články kvůli tomu, že byla vodní elektrárna považována za relativně stabilní zdroj. S přihlédnutím k těmto problémům by ovšem bylo vhodnější použít výkonnější. [115] [116]



Obrázek 4.7: Testované diagramy zatížení v ostrovním režimu provozu. [116]



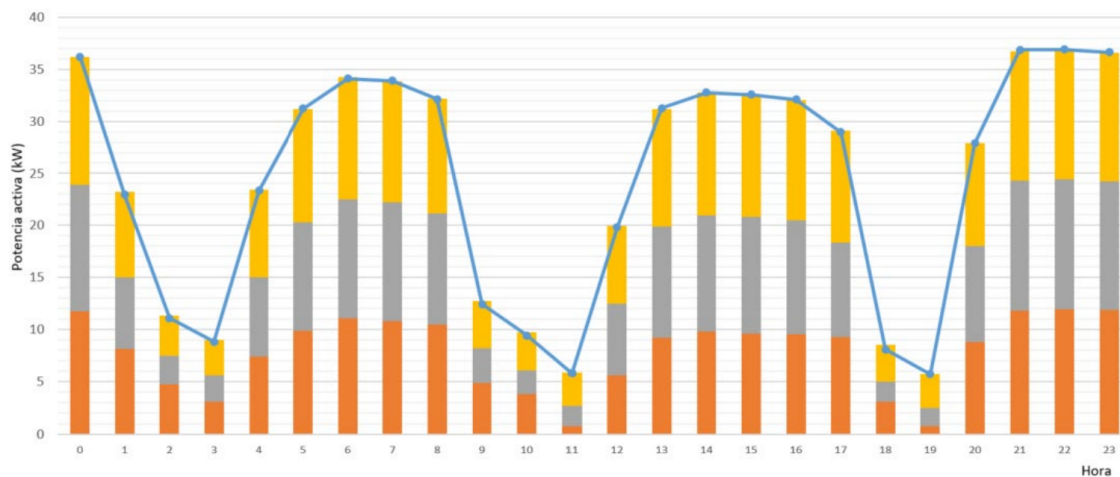
Obrázek 4.8: Výsledky podílu baterií a palivových článků na dodávkách energie v ostrovním režimu provozu. [116]

## 4.3 Farma Agropecuaria Furen na ostrově Gran Canaria

### Kontext

Gran Canaria je jeden z největších ostrovů Kanárských ostrovů. Projekt mikrosítě se v tomto případě týkal zlepšení dodávek elektrické energie do tamních kravských stájí a mlékárny. Ta do té doby fungovala pouze s fotovoltaickou elektrárnou o výkonu 100 kWp a záložní naftovou elektrocentrálou o výkonu 100 kVA. Přípojka na vnější síť zde nebyla. [117]

Původně měla zátěž cyklický charakter díky systému automatického dojení, který vytvářel špičky kolem 35 kW každých 8 hodin. Rozdíly v rámci roku či týdne nebyly prakticky žádné. [117]



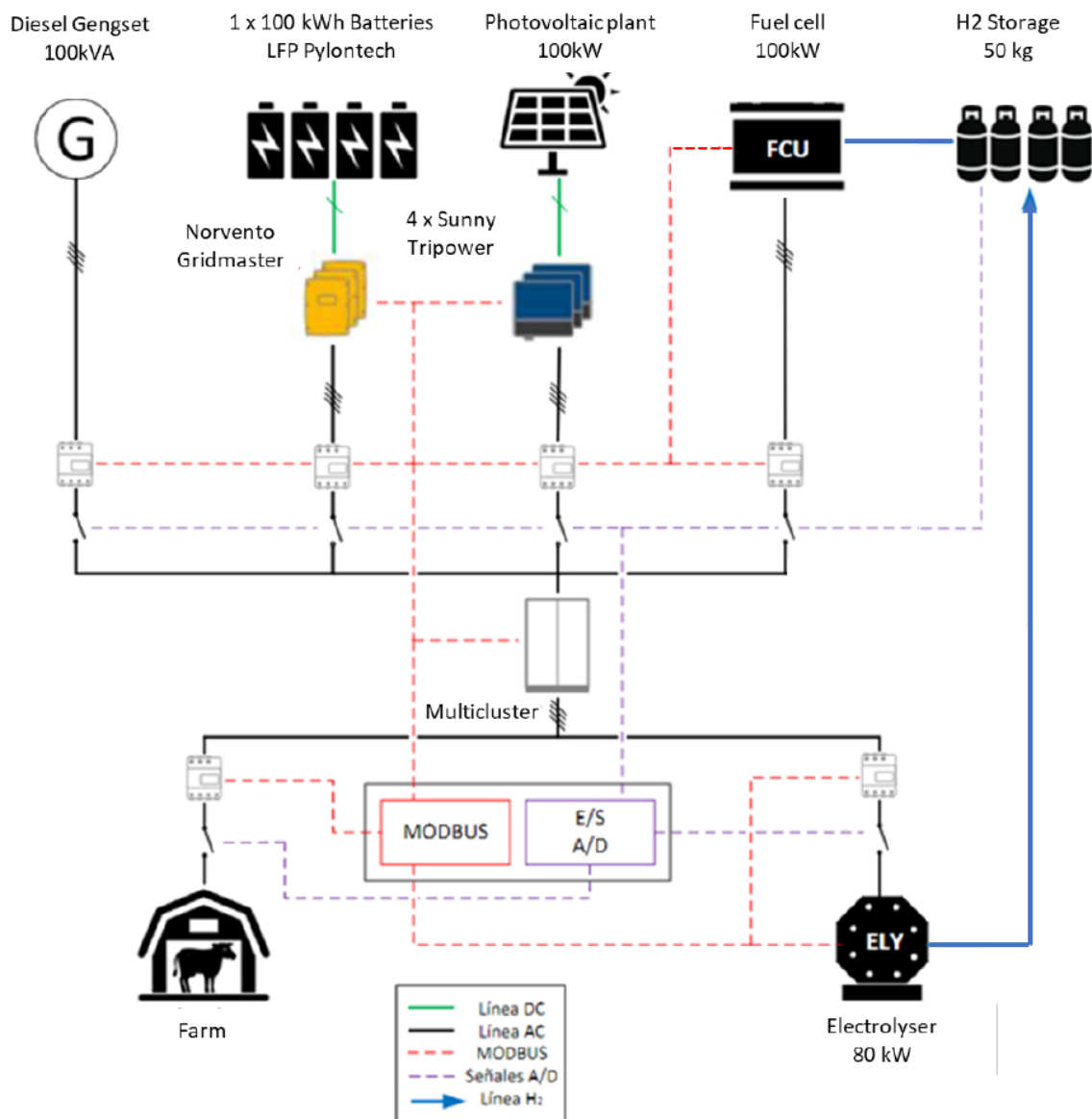
Obrázek 4.9: Denní diagram zatížení farmy po jednotlivých hodinách. [117]

Tato mikrosít je stejně jako ta u vesnice Agkistro v Řecku součástí projektu REMOTE. V rámci něj byla instalována bateriová a vodíková akumulace.

### Realizace

P2G část vodíkové akumulace je tvořena alkalickým elektrolyzérem o výkonu 70 kW. G2P část je tvořena 100 kW výkonu v palivových článcích. Dá se předpokládat, že účinnosti budou vzhledem k příbuznosti projektů stejné jako v případě již zmíněného REMOTE projektu v Agkistru. Nádrž pojme 50 kg vodíku. Bateriovou akumulaci tvoří úložiště o kapacitě 100 kWh. Složené je z modulů od Pylontech, využívají technologii LFP. Bateriová akumulace je určena pro kratší dobu provozu, vodík pro dlouhodobé skladování. [117]

Již instalovanou fotovoltaickou elektrárnu obsluhují čtyři třífázové měniče Sunny Island Tripower. Bateriový systém obsluhuje jeden centrální měnič Norvento Gridmaster. [117]



**Obrázek 4.10:** Schéma celého systému farmy. Černě střídavé silové propoje, zeleně stejnosměrné silové propoje, modře vodík, zbytek komunikace. [117]

Řízení je založeno na maximalizaci využití fotovoltaické elektrárny. Pokud produkuje přebytky, přednostně se nabíjí baterie. Pokud dosáhnou 90 %, startuje elektrolýzér a přebytky se ukládají do vodíku. V noci funguje vodík s bateriemi paralelně. Palivové články fungují s určitým konstantním výkonem a baterie pak vykrývají vyšší spotřebu, nebo se nabíjí z přebytků elektrolýzéro v případě odlehčení. Naftová záloha startuje tehdy, když není schopen aktuální spotřebu pokrýt tandemem fotovoltaické elektrárna, baterie a elektrolýzér. Další takovou situací je pokud by předpokládaný start naftové zálohy vycházel během dojícího cyklu. Během něj se totiž nedá k mikrosíti náfázovat. Řídící systém byl po instalaci doplněn o funkci předpovědi výkonu fotovoltaiky dle předpovědi počasí. [117] [118]

## Výsledky

Projekt splnil svůj hlavní účel, tj. umožnit rozšíření farmy. Došlo k zvětšení kapacity krav z 600 na 2000 a instalaci nových chladících zařízení. Nový denní

diagram zatížení je tak mnohem víc nepravidelný a špička dosahuje až 120 kW. Po všech těchto rozšířeních je mikrosít schopná 75 % své spotřeby pokrýt z fotovoltaické elektrárny. [117]



**Obrázek 4.11:** Denní diagram zatížení farmy po všech rozšířeních. [117]

Pro zvýšení zmíněného 75% podílu se plánuje výměna panelů ve stávající elektrárně, což by zvedlo její výkon ze 100 na 150 kWp. Další možností je instalace nových fotovoltaických elektráren na budovy v areálu. Překročení limitu 100 kWp by ovšem znamenalo nutnost vyjednat si povolení od lokálních úřadů. [117] [118]

Paralelně se v oblasti Kanárských ostrovů objevují další projekty vodíkové energetiky, například pro dopravu nebo vytápění. [119] [120]

## 4.4 Logistické centrum Lidl ve Finsku

### Kontext

Logistické centrum společnosti Lidl se nachází u města Järvenpää v jižním Finsku, celý areál zabírá přes 60 tisíc m<sup>2</sup>. Téměř třetinu budovy zabírají chladírenská zařízení. V lokalitě je systém centrálního zásobování teplem pro domácnosti. Mikrosít pro logistický areál zde vybuodovala firma Schneider Electric. [121]



**Obrázek 4.12:** Letecký snímek logistického centra. Vygenerováno z [81].

## Realizace

Jediným zdrojem elektrické energie je zde střešní fotovoltaická elektrárna umístěná na ploché střeše budovy. Její výkon je 500 kWp. Panely mají záměrně vyšší sklon kvůli lepšímu rozložení výroby v průběhu roku. [122]

Akumulace elektrické energie je zde ve formě bateriového úložiště 1,6 MWh s maximálním výstupním výkonem 2,6 MW. Akumulace tepla řeší zásobníky uchovávající teplo z výměníků chladírenských zařízení. Díky velkému výkonu bateriového úložiště poskytuje logistické centrum podpůrné služby místní síti. V případě nedostatku elektrické energie se umí odpojit a fungovat čistě v ostrovním režimu. [123] [121] [124]

Unikátní je to, že centrum obchoduje i na trhu zdejšího systému centrálního zásobování teplem. Teplo, které nevyužije pro vlastní potřeby, prodává do sítě zásobující přibližně 500 nedalekých domů. [121] [123]

Řídicí systém celé mikrosítě pak operuje se všemi standardními faktory jako jsou ceny elektrické energie, spotřeba elektrické energie a předpovědi počasí. [121]

## Výsledky

Vybudovaná mikrosít snižuje náklady na provoz logistického centra přibližně na polovinu. [121]

## 4.5 Farma Stone Edge v Kalifornii

### Kontext

Farma Stone Edge se nachází na západě Kalifornie. Jde o rodinnou farmu specializující se na organické a udržitelné zemědělství. Environmentální myšlenky byly i hlavní motivací pro vybudování experimentální mikrosítě, která by převážně fungovala v ostrovním režimu. Praktická realizace započala v roce 2012.

Základní zatížení farmy je 15 kW. Významnými spotřebiči jsou pak čerpadla na zavlažování, největší z nich má příkon 30 kW a je vybaveno frekvenčním měničem.

Šest menších pak mají v součtu příkon 50 kW a frekvenčním měničem je vybavena pouze polovina. Čerpadla ovšem nikdy nepracují současně. Další významnou zátěží je nabíječka na elektromobily s výkonem 30 kW. V praxi je špičkový příkon celého areálu zhruba 100 kW. Mikrosít zahrnuje 25 budov na cca. 65 tisících m<sup>2</sup> půdy. [125] [126]

## Realizace

V areálu je celkem sedm míst, uzlů sítě, u kterých jsou umístěny akumulční, výrobní či řídicí prvky. Je zde několik různých typů akumulací a metod výroby. Všechny jsou propojeny centrálním vedením, které se skládá z třífázového rozvodu se sdruženým napětím 480 V a třívodičovým rozvodem s napětím 240/120 V, který je v Americe používán pro domovní instalace. Vedle nich je tažena ještě komunikační síť a záložní nízkonapěťová stejnosměrná UPS síť. [125]

Obnovitelným zdrojem elektrické energie jsou zde fotovoltaické panely. Ty jsou v podobě sedmi menších elektráren rozesety po celém areálu. Jednotlivé panely jsou vybaveny mikroměniči Enphase M250 a Enphase S280, jejichž výstup je přímo o síťových parametrech. Dvě elektrárny jsou místo mikroměničů vybaveny centrálním měničem SMA Tripower. Měniče jsou standardně vybaveny technologií MPPT. Souhrnný výkon všech elektráren je 160 kWp. Záložním zdrojem je pak 65kW vysokootáčková mikroturbína Capstone C65, která spaluje mix zemního plynu a vodíku získaného elektrolýzou. Systém s turbínou je trigenerační. Spaliny ohřívají dvě akumulční nádoby s celkovou kapacitou téměř 2000 l vody. Ty jsou napojeny na absorpční chladič technologie Li-Br, jehož chlazení je zajištěno výměníkem ve studni. Tento systém vytápí a chladí celkem čtyři budovy a dva bazény. [125] [126]

Bateriová akumulace je rozeseta prakticky do všech uzlů v areálu. Jsou zde nasazeny celkem tři bateriové technologie od několika výrobců.

Nejvíce je zastoupena technologie LFP, většina od výrobce SimpliPhi Power. První bateriové úložiště má kapacitu 10,5 kWh s dostupným výkonem 5,7 kW přes měnič Schneider a slouží pro UPS zálohování. Další je umístěno ve vodíkovém parku a slouží jako doplněk k palivovým článkům, má kapacitu 3,5 kWh a je s nimi napojeno na společný měnič. Největší úložiště má kapacitu 256 kWh s dostupným výkonem 120 kW přes měnič Dynapower. Je děleno do sekcí po dvaceti kusech modulů s kapacitou 3,6 kWh. Druhým záložním systémem je pak úložiště s kapacitou 45 kWh a dostupným výkonem 23,8 kW přes měnič SMA Sunny Island. Třetí záložní systém je jediné úložiště co není od výrobce SimpliPhi, ale od Sony, dostupná kapacita je 9,6 kWh s výkonem 2,4 kW přes měnič Outback. [125] [126]

Další technologií baterií je NMC. Tyto baterie jsou využívány primárně pro vykrývání špičkových zatížení celé sítě. Úložiště využívající baterie LG Chem RESU má kapacitu 10 kWh a připojeno je přes měnič SolarEdge SE 7600. Největším bateriovým úložištěm v celé mikrosíti je Tesla Powerpack skládající se z baterií určených pro elektromobily. Kapacita je 475 kWh s výkonem 250 kW přes měnič Dynpower. [125] [126]





**Obrázek 4.13:** Bateriové úložiště Tesla Powerpack s měničem Dynapower. [126]

Poslední bateriovou technologií jsou sodíkovo-iontové baterie se slanovodním elektrolytem. Kapacita úložiště je 100 kWh s výkonem 16 kW. [125] [126]

V této mikrosíti je poměrně rozvinutý systém pro akumulaci elektrické energie do vodíku. Tyto technologie jsou soustředěny do jedné oblasti. P2G část se skládá z elektrolyzérů Areva H2 Gen který využívá technologii PEM. Spouští se až po nabití všech bateriových úložišť. G2P část je složena z dvanácti 2,33kW palivových článků PlugPower ReliOn, taktéž s technologií PEM, o celkovém výkonu 28 kW. Ty jsou spojeny přes Siemens Sinamics měnič s výkonem 30 kW do stejnosměrného tandemu s již zmíněným bateriovým úložištěm pro vykrývání špiček. Tento tandem je pak do střídavé sítě zapojen přes měnič Ideal Power 30 kW. Vodík je skladován ve 48 kusech 1kg nádrží a jedné velké 200kg. Kromě využití v palivových článcích dochází ke zmiňovanému spalování se zemním plynem v mikroturbíně. Dále je tankován do vodíkových vozidel Toyota Mirai a Honda Clarity na čerpací stanici od Millennium Reign Energy. [125] [126]



**Obrázek 4.14:** Palivové články. [126]

Řízení takto rozmanitého souboru technologií je realizováno přes řídicí systém od Heila IQ. Zdroje, akumulace i frekvenční měniče jsou všechny opatřeny vlastním mikropočítačem, který pak komunikuje se všemi ostatními již jednotným komunikačním standardem. Není zde jeden nadřazený řídicí prvek, ale několik, což zvyšuje

spolehlivost v případě poruch. Systém umožňuje i vzdálenou kontrolu přes internet. [125] [126]

Na obrázku 4.15 je rozmístění zmíněných technologií výroby a akumulace v rámci areálu.



**Obrázek 4.15:** Mapa všech DER (zdrojů a akumulací) mikrosítě. [127]

## Výsledky

Z projektu původně myšleného čistě pro zajištění energetické nezávislosti farmy se stal částečně technologický inkubátor, kde se v praxi testují nové technologie. Celá farma většinu času funguje v ostrovním režimu a do sítě se připojuje pouze v případě údržby nebo při nedostatku elektrické energie v zimě. Vzhledem k problémům v elektrizační soustavě Kalifornie v posledních letech tedy mikrosít plní svou funkci. To se ukázalo i během rozsáhlých požárů, které zastihly i okolí farmy. Během nich byla mikrosít týden opuštěna a z vnější sítě nebyla dostupná elektrická energie. Kouř a popel způsobily pokles výkonu fotovoltaických elektráren na polovinu, což i tak stačilo pro kontinuální zavlažování, které ochránilo vinice a pole před horkem a fungovalo i jako prevence dalšího šíření ohně. [128] [129]

Mezi do budoucna uvažovaná vylepšení patří například připojení řídicího systému na satelitní internet, což by umožnilo kontrolu nad farmou v případě katastrof i při výpadku lokální komunikační sítě. Dlouhodobým projektem je pak rozšíření vodíkové akumulace na 500 kg, což by mělo umožnit překlenovat zimní období bez nutnosti větších dodávek ze sítě. [126] [129]

## 4.6 Oblast Bonita v Kalifornii

### Kontext

Oblast Bonita se nachází na jihu Kalifornie a projekt v tomto případě zahrnuje skupinu 66 přípojných míst napájených z rozvodny. Charakterem se jedná o mix

průmyslu a domácností. Projekt provozuje přímo provozovatel místní rozvodné sítě. [130]

## Realizace

Zdrojem elektrické energie jsou zde pouze drobné fotovoltaické elektrárny na jednotlivých domech, které byly instalovány nezávisle. Celá mikrosít funguje většinu času jako běžná součást vnější sítě. Projekt spočíval v instalaci velké průtočné baterie s vanadovou technologií. Ta má kapacitu 8 MWh a výkon 2 MW. Tato akumulace umožňuje plynulý přechod na ostrovní provoz nebo start ze tmy v případě náhlého výpadku. Během normálního provozu pak poskytuje flexibilitu síti. Jedná se o stále o málo využívanou technologii a hlavním cílem realizace bylo především získat poznatky z praktického provozu. [130]



Obrázek 4.16: Průtočná baterie umístěná v areálu rozvodny. [131]

## Výsledky

Projekt byl instalován již v roce 2017 a 5 let testován. Průtočná baterie funguje spolehlivě téměř 99 % doby provozu a všechny deklarované funkce byly mnohokrát otestovány. Nejdéle celá mikrosít fungovala v ostrovním režimu po dobu pěti hodin. Podle výsledků testů se dá předpokládat pokles kapacity zhruba na 90 % během následujících 20 let. [130]



# Kapitola 5

## Technologie výroby elektrické energie v mikrosítích

Obsahem této kapitoly je popis technologií spadajících pod pojem Distributed Generation, který je součástí zdrojů zvaných Distributed Energy Resources. Podrobné vymezení těchto pojmů bylo provedeno v části 2.5.

### 5.1 Fotovoltaické elektrárny

#### Energie slunečního záření

Základem pro posouzení konkrétní fotovoltaické elektrárny je určení výkonu, který je v daném místě dostupný ze slunečního záření. Slunce jako takové má zářivý výkon  $P_s = 3,85 \cdot 10^{26}$  W. Ve vzdálenosti  $r$  od Slunce je tedy výkon na jednotkovou plochu (ozáření)  $G$  určen vztahem

$$G = \frac{P_s}{4 \cdot \pi \cdot r^2}. \quad (5.1)$$

Pro účely standardizace se zavádí solární konstanta  $G_0 = 1368$  W/m<sup>2</sup>, která popisuje průměrnou hodnotu ozáření na jednotkové ploše atmosféry kolmé na směr šíření slunečního záření. Paprsky na povrch Země dopadají pod proměnlivým úhlem. V atmosféře dochází k rozptylu a pohlcování záření, přičemž míra těchto jevů závisí na jejím konkrétním složení (částice v ovzduší, vzdušná vlhkost, zvýšená koncentrace určitých plynů). Ozáření v místě se odvíjí i od okolí, jelikož záření může být od některých povrchů odraženo směrem na panely elektrárny. Celková ozáření se tedy skládá ze tří složek. [7]

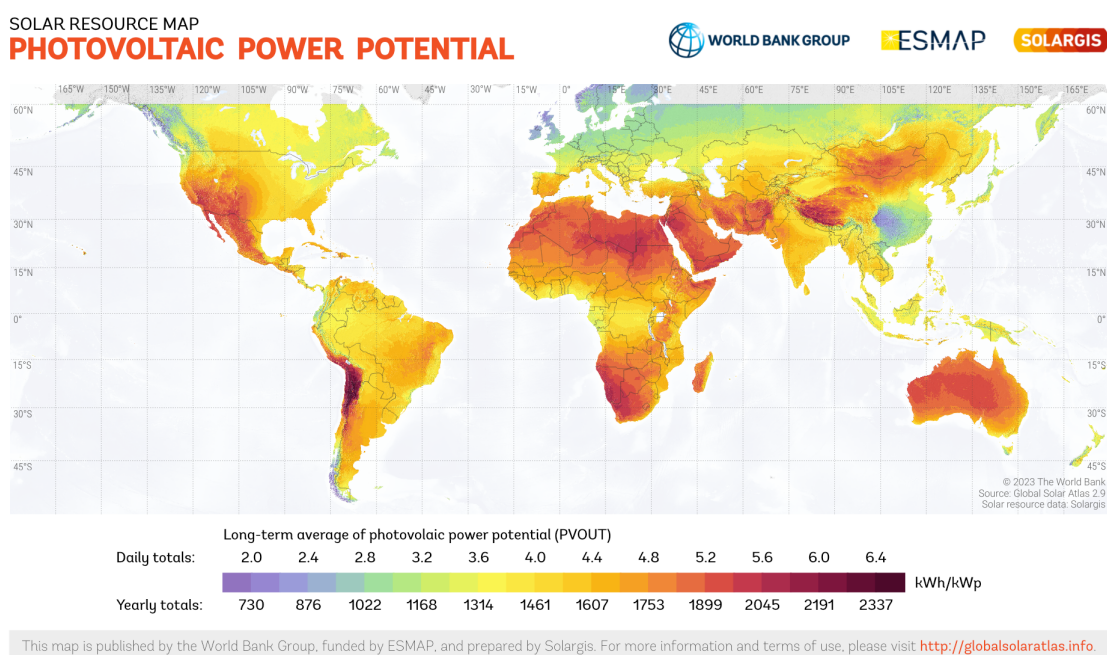
- **Přímé záření.** Zahrnuje záření, které na své cestě nebylo odraženo ani rozptýleno, tj. pochází přímo ze Slunce (slunečního kotouče – průmětu Slunce na oblohu).
- **Difúzní záření.** Zahrnuje rozptýlené záření, které pochází z celé oblohy mimo sluneční kotouč.
- **Odražené záření.** Zahrnuje záření, které pochází z odrazů od okolních povrchů nebo atmosféry samotné.

Podíl difúzního záření nemáme šanci v praxi ovlivnit. Odražené záření se využívá ve speciálních elektrárnách, které používají systémy zrcadel a koncentrují tak energii dopadající na velkou plochu do plochy mnohem menší. Dalším možným využitím odraženého záření je orientace panelů pod větším sklonem, což například umožňuje využití záření odraženého od zasněžené země v zimě. Maximální možné přímé záření na panel dopadá, když je pomyslná přímka vedená ze slunečního kotouče k panelu kolmá na jeho povrch. V případě běžné fotovoltaické elektrárny (bez zrcadel a proměnlivé orientace panelů) se orientujeme na přímé záření. [7]

Při znalosti aktuální hodnoty přímé ozáření  $G_p$  a vzájemné polohy panelu a slunce můžeme určit ozáření povrchu fotovoltaického panelu  $G_{fvp}$ . [132]

$$G_{fvp} = G_p (\cos(\alpha) \sin(\beta) \cos(\Psi - \Theta) + \sin(\alpha) \cos(\beta)) \quad (5.2)$$

Jednotlivé úhly charakterizují právě zmíněnou vzájemnou polohu.  $\alpha$  je sklon slunce vůči zemi,  $\beta$  je sklon panelu vůči zemi,  $\Psi$  je azimut modulu a  $\Theta$  je azimut slunečního kotouče. Pro základní posouzení výkonu fotovoltaiky lze použít veřejně dostupná data o ozáření či výrobě. Výrobní potenciál se udává v jednotkách kWh/kWp. Hodnota nám říká, kolik kWh za rok vyrobí elektrárna s výkonem 1 kW s optimální konstantní orientací pro danou lokalitu. Některé modely při zadání specifik instalace (povrch, okolní prostředí) dokážou zahrnout i vliv teploty okolí.



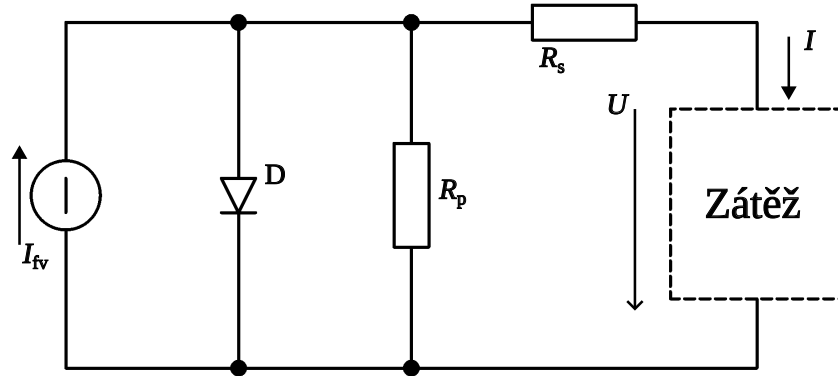
**Obrázek 5.1:** Světová mapa s výrobním potenciálem fotovoltaických elektráren. [133]

## Fotovoltaický článek a jeho výkon

Fotovoltaické panely se skládají z fotovoltaických článků. Ty využívají fotovoltaický jev pro přeměnu energie dopadajícího slunečního záření na stejnosměrný elektrický proud. V principu je fotovoltaický článek velkoplošná polovodičová dioda, v níž dochází k uvolňování elektronů z valenčního do vodivostního pásu díky dodání energie fotonu slunečního záření.

K uvolnění elektronu dojde za předpokladu, že energie dopadajícího fotonu je dostatečná pro přechod elektronu mezi energetickými hladinami. Pokud je energie

málo, přemění se na teplo. Pokud je jí více, než je nutné, zbytek se také přemění na teplo. Z uvedeného vyplývá, že fotovoltaické články využijí pouze určitý interval dopadajícího spektra slunečního záření. Zároveň se podle konkrétního použitého materiálového mixu polovodiče budou měnit energetické hladiny. Základní chování fotovoltaického článku lze vystihnout následujícím obvodovým modelem.



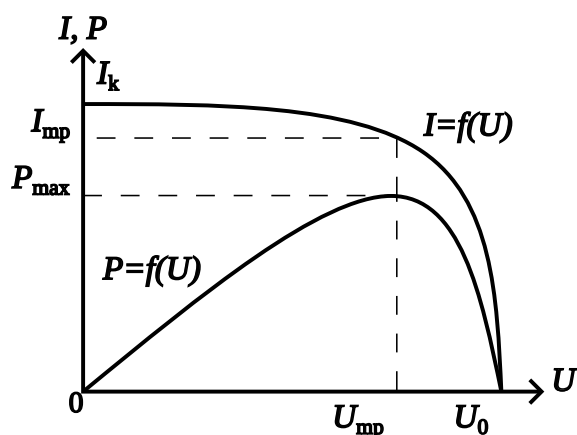
Obrázek 5.2: Obvodový model fotovoltaického článku.

- **Proudový zdroj** představuje proud generovaný fotovoltaickým jevem.
- **Dioda D** respektuje vlastnosti přechodu PN, proud skrz ní souvisí s rekombinacemi.
- **Sériový odpor** představuje odpor kontaktů a dalších vodivých cest panelu. Pro ideální článek platí  $R_s \rightarrow 0$ .
- **Paralelní odpor** představuje odpor zkratů uvnitř panelu, kde se proud uzavírá mimo zátěž. Ty mohou vznikat při výrobě nebo postupnou degradací. Pro ideální článek platí  $R_p \rightarrow \infty$ .

Pro uvedený neideální obvodový model jde odvodit rovnice voltampérové charakteristiky  $f(U, I)$ .

$$f(U, I) : I_{fv} - I_0 \cdot \exp \left[ \frac{q(U + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T} \right] - \frac{U + I \cdot R_s}{R_p} = I \quad (5.3)$$

$q$  je jednotkový náboj elektronu,  $n$  je tzv. faktor ideálnosti, který se odvíjí od konkrétního složení polovodiče,  $k$  je Boltzmanova konstanta a  $T$  je teplota. Uvedenou rovnici lze společně s křivkou výkonu  $P = f(U)$  vyjádřit graficky.



**Obrázek 5.3:** Voltampérová a výkonová charakteristika typického fotovoltaického článku.

Bod maximálního výkonu je z hlediska využití fotovoltaické elektrárny velmi důležitý. Dnes je prakticky v každém fotovoltaickém měniči technologie MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), která se snaží, aby fotovoltaický systém pracoval co nejbližší tomuto bodu. Napětí a proud v tomto bodě bývají součástí štítku každého fotovoltaického panelu. Obdobně se udává proud nakrátko a napětí naprázdno. Obojí pochopitelně pro standardní testovací podmínky.

## Zapojení článků

Jelikož napětí naprázdno běžného křemíkového fotovoltaického článku je pouze v rozmezí 0,5 až 0,6 V, v panelech se vždy vyskytuje forma sériového zapojení článků. Při sériovém spojení se objevuje problém, pokud dojde k omezení generovaného proudu jedním z nich, například kvůli zastínění. V takovém případě celou kombinaci protéká proud, který odpovídá nejmenšímu proudu ze všech článků a přebytečná energie se v problematickém článku maří na teplo. I malý stín tak dokáže snížit výkon celé kombinace o desítky procent nebo dokonce poškodit panel lokálním přehřátím. Z tohoto důvodu se v rámci jednoho panelu často provádí různé sérioparalelní kombinace a k sériovým kombinacím se paralelně připojují překlenovací diody. [7]

## Zapojení panelů a měničů

Zapojení fotovoltaických elektráren lze rozdělit na tři základní architektury. [7]

- **Systém s centrálním měničem.** V tomto případě jsou jednotlivé panely sériově spojeny do stringů (řetězců). Jednotlivé stringy jsou pak propojeny paralelně a celá kombinace je připojena na centrální měnič. Tento způsob zapojení je často nejlevnější, ale obdobně jako v případě spojování článků jsou zde panely v sérii omezovány tím nejméně výkonným. Bod maximálního výkonu celého zapojení může mít znatelně nižší výkon, než by odpovídal součtu od jednotlivých panelů.
- **Systém s řetězcovými měniči.** Každý string má vlastní měnič. Jde o něco dražší architekturu, ale disponuje vyšší účinností.



- **Systém s mikroměniči.** Každý panel má vlastní měnič, který má střídavý síťový výstup. Tato architektura poskytuje maximální možný výkon, ale je nejdražší.

Prakticky se fotovoltaické měniče realizují tak, že je zde DC/DC měnič realizující sledování maximálního bodu výkonu a jeho výstup je teprve vstupem pro DC/AC měnič, který poskytuje střídavý výstup o síťových parametrech. Z této topologie pak vychází ještě dvě další hybridní varianty, z nichž druhá se vyskytla v některých zmíněných mikrosítích.

- **Systém s multi MPPT měničem.** Jde o hybrid mezi systémem s centrálním měničem a s řetězcovými měniči. Fotovoltaický měnič disponuje dvěma či více stejnosměrnými vstupy, z nichž každý má vlastní DC/DC měnič realizující sledování maximálního bodu výkonu, ale AC/DC měnič je zde pouze jeden společný. [134]
- **Systém s optimizéry.** Jde o obdobu systému s mikroměniči. Každý panel má vlastní malý DC/DC měnič realizující sledování maximálního bodu výkonu. Výstup z fotovoltaiky tak zůstává stejnosměrný a systém může být realizován například s centrálním měničem.

## 5.2 Větrné elektrárny

### Energie větru

Větrné elektrárny fungují díky kinetické energii proudících mas vzduchu, větru. Ten v principu vzniká v důsledku rozdílných teplot částí atmosféry. V různých místech atmosféry a povrchu je odraženo či pohlceno různé množství slunečního záření, čímž dochází k nerovnoměrnému ohřevu. Vzniklé proudění je pak navíc ovlivňováno profilem zemského povrchu, proudění je kladen různý odpor, svou roli hraje i tření. [7]

Rychlost větru  $v$  v určité výšce nad povrchem  $h$  se dá orientačně určit podle empirického vztahu známého jako Wind profile power law.

$$v = v_0 \cdot \left( \frac{h}{h_0} \right)^n \quad (5.4)$$

$v_0$  je referenční rychlost větru změřená ve výšce  $h_0$  nad zemí a  $n$  je tabulkový koeficient zohledňující místní prostředí (povrch, teplota vzduchu atd.). Kinetická energie větru tvořeného masou vzduchu o hmotnosti  $m$  s rychlostí  $v$  pak odpovídá známému vztahu.

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (5.5)$$

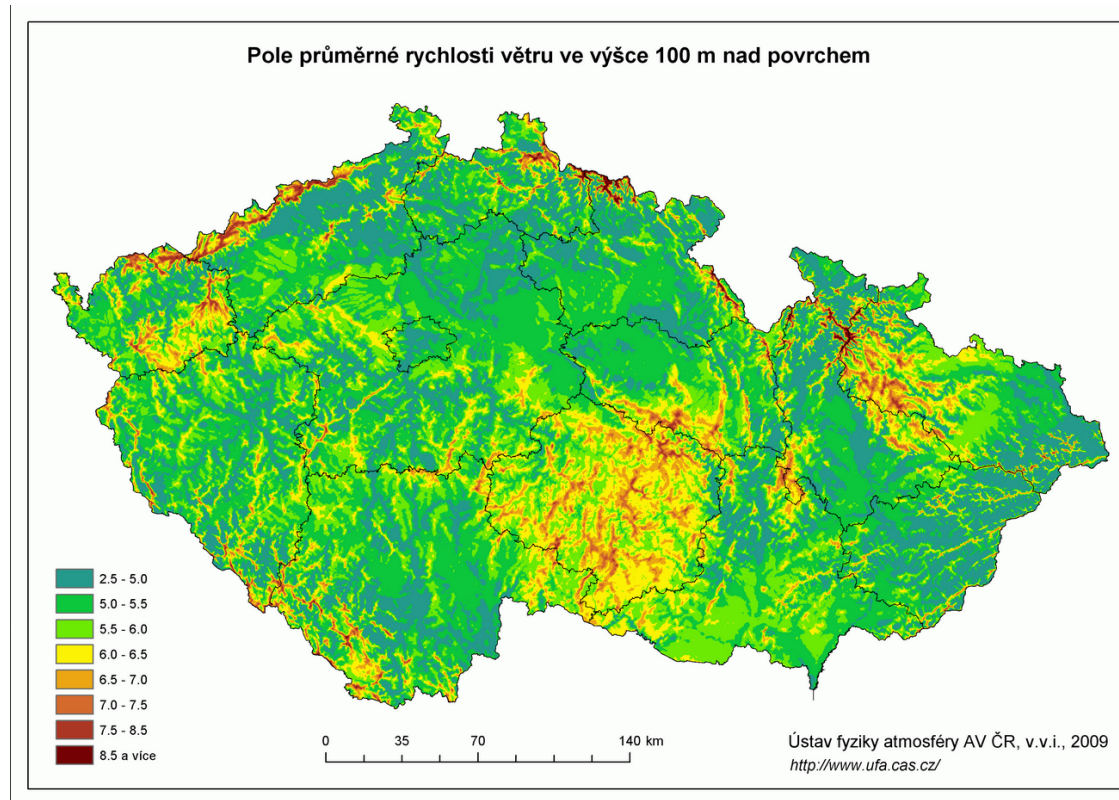
Z toho lze vydělením časem  $t$  odvodit teoretický výkon, který má vrstva vzduchu s tloušťkou  $a$ , plochou  $S$  a hustotou  $\rho$ .

$$P_{\max} = \frac{E_k}{t} = \frac{\rho \cdot S \cdot a \cdot v}{2 \cdot t} = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (5.6)$$

Tohoto výkonu ovšem v praxi nelze dosáhnout. Teoretický horní limit je omezen Betzovým pravidlem, které udává, že z média pohybujícího se určitou rychlostí je

možné rotorem získat jen  $\frac{16}{27}$ , tj. 59,3 % jeho energie. Tato úvaha ani nijak nepočítá s jakýmkoliv ztrátami, vychází čistě z teoretického rozdílu kinetických energií před a za rotorem, který má nekonečné množství nekonečně tenkých lopatek. [7]

Obdobně jako v případě slunečního záření lze prvotní odhady ohledně výkonu provést na základě veřejně dostupných dat a map rychlosti větru. Některé tyto soubory dat mají integrovaný základní model větrné turbíny a ukazují rovnou i orientační výkon.



**Obrázek 5.4:** Mapa rychlosti větru na území České republiky ve výšce odpovídající velkým větrným elektrárnám. [135]

## Typy turbín

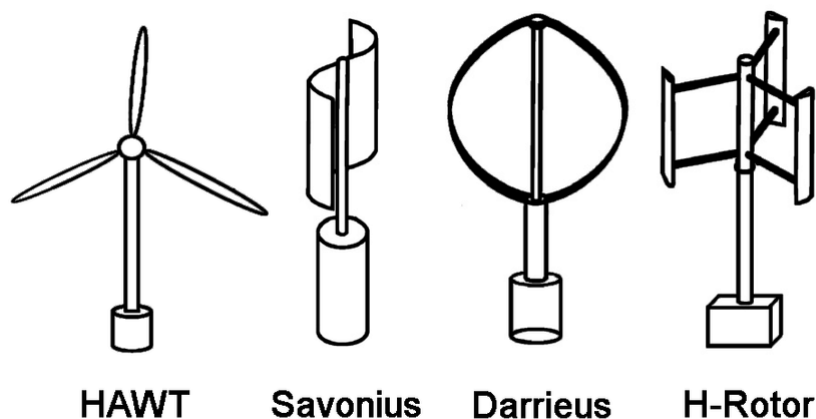
Větrná turbína je zařízení, které dokáže větru kinetickou energii odebrat a převést jí na rotační pohyb hřídele. Existují dva základní mechanismy, které tento převod realizují. Podle nich se dají dělit i větrné turbíny. [7]

- **Odporové větrné turbíny.** Odporový mechanismus spočívá v tom, že část turbíny klade síle větru jiný odpor než jiná část. Vznikne tak točivý moment, který je na hřídeli turbíny dostupný. Různého odporu lze docílit tvarem nebo natočením lopatek. Tento typ turbín má zpravidla menší účinnost, ale dokáže fungovat v širším pásmu rychlostí větru.
- **Vztlakové větrné turbíny.** V tomto případě je využíváno vztlakových sil a části větrné turbíny efektivně fungují jako křídla letadla. Obtékající masa vzduchu vytváří vztlakovou sílu, která je kolmá na směr jejího proudění. Tato síla pak vytvoří točivý moment na hřídeli turbíny. Vztlakové turbíny jsou účinnější, ale fungují v menším pásmu rychlostí větru. Často tedy obsahují nějaký

pomocný mechanismus, který toto pásmo rozšiřuje změnou geometrie turbíny za provozu.

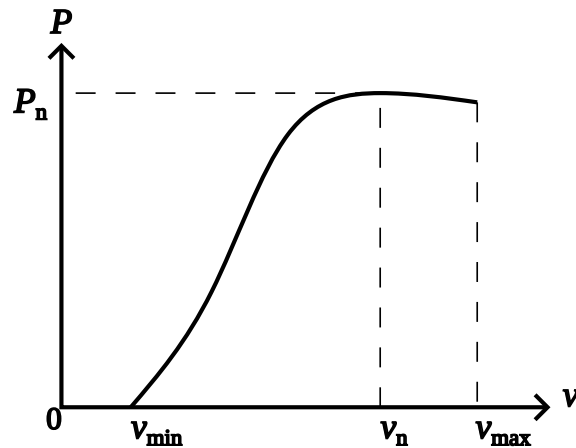
Na každou turbínu samozřejmě působí odporová i vztlaková síla. Toto dělení vyjadřuje pouze kterou z nich turbína využívá primárně a cíleně. Existují i experimentální elektrárny, které sílu větru nevyužívají pro vytvoření točivého momentu, ale pro tvorbu vibrací [136]. Další dělení větrných turbín vyplývá z jejich osy otáčení. [7]

- **Horizontální uložení.** Toto uložení je nejčastější u velkých vztlakových větrných turbín vyskytujících se ve větrných parcích. Mají větší účinnost, ale jejich výkon se odvíjí nejen od rychlosti větru, ale i od směru. V případě menších konstrukcí se tak často přidává mechanismus pro natočení turbíny do směru proudění větru. Nevýhodou je umístění generátoru či převodovky ve výšce turbíny. To klade zvýšené nároky na celou konstrukci.
- **Vertikální uložení.** Vertikální uložení umožňuje přenášet moment na zem i bez převodovky a tam teprve umístit generátor. Celá konstrukce tak může být jednodušší a levnější. Tyto turbíny ale mají menší účinnost.



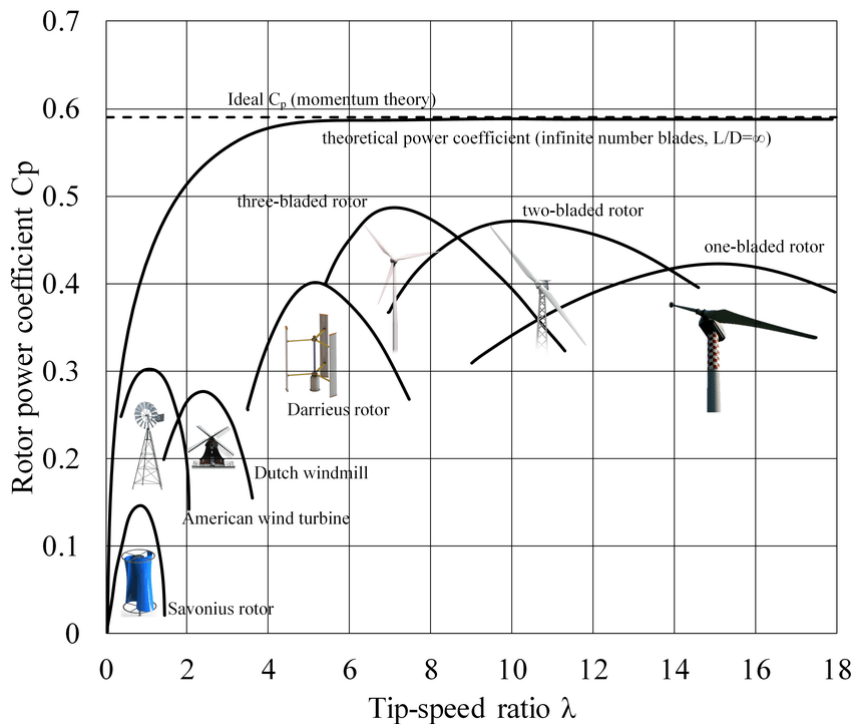
**Obrázek 5.5:** Některé typy větrných turbín. Zleva: horizontální lopatková vztlaková, odporová vertikální Savoniova turbína, vztlakové horizontální Darrieovy turbíny (dvě různé varianty). [137]

Základní informací o větrné turbíně je pak výkonová křivka, která nám udává výkon turbíny při různých rychlostech větru. Lehký pokles výkonu po dosažení jeho maxima, které odpovídá jmenovité rychlosti a jmenovitému výkonu, je způsoben různými regulačními mechanismy, například natáčením lopatek. Po dosažení maximální konstrukční rychlosti by měl zafungovat automatický bezpečnostní mechanismus a turbínu zabrzdít.



**Obrázek 5.6:** Typická výkonová charakteristika  $P = f(v)$  horizontální vztlakové větrné turbíny.

Pro teoretické porovnání druhů větrných turbín různých velikostí se často používá charakteristika  $C_p = f(\lambda)$ .  $C_p$  je poměr využití energie větru ku jeho celkové energii, tj. maximální hodnota  $C_p$  je zmíněný Betzův limit 0,593.  $\lambda$  je pak poměr tangenciální rychlosti hrotu lopatky ku rychlosti větru. [138]



**Obrázek 5.7:** Charakteristika  $C_p = f(\lambda)$  pro vybrané typy turbín. [139]

## Zapojení generátorů

K převodu mechanické energie na elektrickou se dnes používají výhradně synchronní a asynchronní generátory. U každého existují různé způsoby, jak dostat na výstupu elektrickou energii o síťových parametrech. Do systému mohou být zařazeny ještě převodovky s konstantním převodem. [140]

- **Synchronní generátor.** Při použití synchronního generátoru existují dvě varianty zapojení. Buď se turbína zapojí přímo na hřídel generátoru a ten je následně do sítě připojen přes frekvenční měnič, nebo je mezi turbínu a generátor zařazena převodovka s proměnlivým stupněm převodu, která pro generátor zajišťuje konstantní otáčky.
- **Asynchronní generátor.** Jednoduché provedení s asynchronním generátorem bývá s klecovým rotorem, kdy je stator do sítě připojen přes frekvenční měnič. Druhá varianta je s dvojitým napájením, kde je rotor kroužkový. V tom případě je stator zapojen přímo na síť a k regulaci dochází frekvenčním měničem připojeným na rotor.

## 5.3 Vodní elektrárny

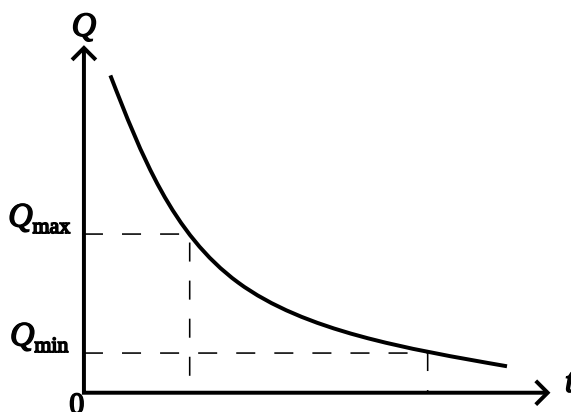
### Energie vody

Energie vody je nejstarším využívaným obnovitelným zdrojem. Pro hodnocení vodní elektrárny z energetického hlediska se používá hydroenergetický potenciál, který udává teoretický maximální výkon vodní elektrárny získatelný ze spádu v daném místě.

$$P = Q \cdot H \cdot g \cdot \rho \quad (5.7)$$

$Q$  je objemový průtok vody,  $H$  je spád mezi vodním zdrojem a turbínou,  $g$  je gravitační konstanta a  $\rho$  je hustota vody.

Průtok je proměnlivý v rámci dní i roků. Ze statistických měření na daném vodním toku se určí hydrogram. To je křivka  $Q = f(t)$  pro suchý rok, průměrný rok a mokrý rok. Hodnoty průtoku jsou v grafu seřazeny podle velikosti. Na příkladu hydrogramu níže je vyznačen maximální turbínou využitelný průtok  $Q_{\max}$  a minimální průtok pro její fungování  $Q_{\min}$ . Turbína vyrábí elektrickou energii po dobu, kdy je dostupný průtok alespoň  $Q_{\min}$ . Pokud je dostupný průtok  $Q_{\max}$  a větší, turbína pracuje s maximálním možným výkonem. [7]



Obrázek 5.8: Příklad hydrogramu.

Pokud bychom chtěli vyhodnotit čistě teoretický hydroenergetický potenciál v podobě energie, získali bychom ho integrací z naměřených dat v rámci celého roku.

$$E_{\text{hmax}} = \int_0^{365} Q(t) \cdot H \cdot g \cdot \rho(t) \cdot dt \quad (5.8)$$

Pokud už známe parametry turbíny, můžeme vynést křivku  $P = f(t)$  a určit reálný hydroenergetický potenciál.

## Typy turbín

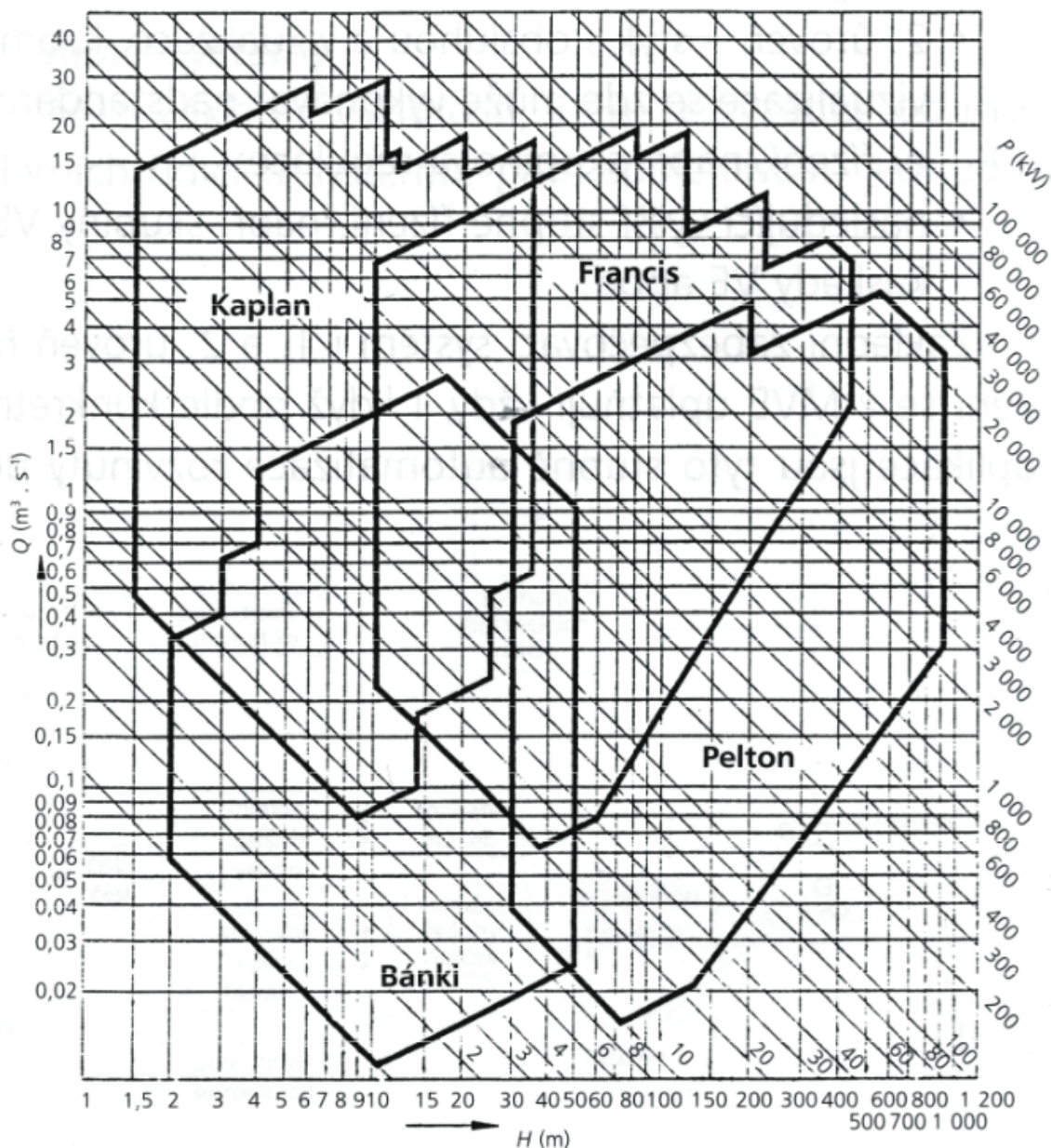
Vodní turbína se skládá z rozváděcího statického kola a oběžného rotačního kola. Obdobně jako v případě větrných turbín, i zde hovoříme o dvou základních typech turbín podle funkčního mechanismu. [7]

- ▶ **Rovnotlaké vodní turbíny.** Voda z turbíny vystupuje pod stejným tlakem, s jakým do ní vstoupila. Na rozváděcím kole se mění tlaková energie vody na kinetickou.
- ▶ **Přetlakové vodní turbíny.** Voda z turbíny vystupuje s menším tlakem, než s jakým do ní vstoupila. Na rozváděcím kole se mění pouze část tlakové energie vody na kinetickou.

Konstrukcí vodních turbín existuje velké množství. Mezi ty nejznámější a nej-používanější patří následující. [7]

- ▶ **Francisova turbína.** Přetlaková turbína s oběžným kolem s pevnými lopatkami. Regulace je realizována natáčivými lopatkami na statické části.
- ▶ **Kaplanova turbína.** Přetlaková turbína s natáčivými lopatkami na statické i oběžné části.
- ▶ **Peltonova turbína.** Rovnotlaká turbína s rozváděcím kolem tvořeným dýzami (tryskami), ze kterých vychází regulovatelný vodní paprsek a dopadá na oběžnou část.
- ▶ **Bánkiho turbína.** Rovnotlaká vodní turbína s oběžným kolem připomínajícím mlýnské kolo.

Jednotlivé konstrukce mají velké množství variant, které mohou být uzpůsobeny podle požadavků na otáčky, horizontální či vertikální uložení nebo efektivní čerpadlový chod. Prvotní posouzení vhodnosti turbíny pro konkrétní aplikaci lze provést z diagramů  $Q = f(H)$ , kde jsou vymezeny oblasti použití.



Obrázek 5.9:  $Q = f(H)$  diagram s vyznačenými oblastmi použití turbín. [7]

## Generátory vodních elektráren

Obdobně jako v případě větrných elektráren, i zde najdeme výhradně synchronní a asynchronní generátory. V současnosti je velká část malých vodních elektráren vybavena asynchronními generátory. [7]

Specifikem vodních elektráren je, že je zde možné velmi dobře regulovat parametry na hřídeli pomocí zmíněných mechanismů. Výkyvy v průtoku je zase možné eliminovat vybudováním přehrady. Použití polovodičových měničů v zapojeních obdobných jako v případě větrných elektráren pak umožňuje provoz elektrárny i při průtoku nedostatečném pro provoz při použití čistě mechanické regulace. V případě budování nových elektráren je zase možné použít jednodušší varianty konstrukce turbín. [141]

## 5.4 Malé tepelné elektrárny

### Paliva

Pro málo výkonné zdroje se dají použít různá paliva všech možných skupenství.

- **Plyn.** Nejpoužívanější je bezpochyby zemní plyn. Často je též spalován vodík, propan, bioplyn nebo dřevoplyn.
- **Pevná paliva.** Hodí se zejména dřevní produkty jako štěpka či pelety, jelikož umožňují snadnou automatickou dodávku do spalovacího prostoru.
- **Kapalná paliva.** Nejčastější je nafta či benzín pro záložní elektrocentrály.

Jednotlivá paliva lze porovnat pomocí výhřevnosti, která udává teplo, které se uvolní dokonalým spálením hmotnostní či objemové jednotky paliva. Při práci s touto veličinou je třeba mít na paměti, že v ní není zahrnuta energie páry ve spalinách. S tou se počítá jako s nevyužitou ztrátou. Pokud budeme uvažovat energii páry, tedy že jí odebereme teplo a zkondenzuje, mluvíme o spalném teple. Tento detail je důvodem, proč se u novějších zařízení může objevovat udávaná účinnost větší než 100 %. Výpočet je totiž prováděn dle starších metod, kde se jako energetický vstup nebere spalné teplo, ale výhřevnost. [142]

Následující tabulka obsahuje orientační hodnoty spalného tepla a výhřevnosti pro zmiňovaná paliva. [143]

Palivo	Spalné teplo (MJ/kg)	Výhřevnost (MJ/kg)
Vodík	142	120
Metan	56	50
Propan	50	46
Nafta	49	43
Dřevo	21	17

**Tabulka 5.1:** Orientační hodnoty spalného tepla a výhřevnosti pro typická paliva.

### Přeměna chemické energie na elektrickou energii

V kontextu zmíněných mikrosít lze hovořit o třech způsobech přeměny chemické energie paliv na rotační pohyb hřídele.

- **Pístové spalovací motory.** Může se jednat o motory vznětové i zážehové. Jde prakticky o nejvíce využívanou technologii, ať už jde o naftové záložní generátory nebo kogenerační jednotky na plynná paliva. Expanze způsobená spalováním uvnitř komory působí na její stěny a píst, který koná periodický přímočarý pohyb.
- **ORC systémy.** Organický Rankinův cyklus je variantou klasického Rankinova cyklu, který je používán ve velkých tepelných elektrárnách. Ohřívání médium zde ovšem není voda, ale organická látka, které má oproti vodě značně nižší bod varu. Tlaková energie je odebrána v expandéru, který může být podobný klasické elektrárenské turbíně, ale objevují se často i alternativní expandéry, například lamelové, šroubové, pístové či spirálové. [144]



- ▶ **Spalovací turbíny.** V komoře dochází ke spalování paliva, nejčastěji plynného, v atmosféře stlačeného vzduchu. Vzniklé spaliny následně prochází turbínou s lopatkami a odevzdávají jim svojí kinetickou energii.

Na hřídeli je v případě moderních systémů synchronní či asynchronní generátor s frekvenčním měničem.

## Kombinovaná výroba

Tepelné elektrárny produkují značné množství odpadního tepla. Jde až o desítky procent z původního vstupu. Je tedy velmi ekonomické a efektivní, když konstrukce jednotky umožňuje jeho využití. [7]

- ▶ **Kogenerace.** Výměník spalin a chlazení média jsou napojeny na systém vytápění či ohřev teplé užitkové vody.
- ▶ **Trigenerace.** Jde o rozšíření kogenerace, kde je navíc systém absorpčního nebo adsorpčního chlazení. Zatímco u standardních chladících zařízení je pro realizaci chladícího děje použit elektrický kompresor, u sorpčního chlazení je použita tepelná energie.

## 5.5 Porovnání a použití

Na základě charakteristik jednotlivých zdrojů a jejich použití v mikrosítích se lze u každé technologie výroby zaměřit na hlediska dostupnosti vstupní energie, náročnosti provedení a průběhu dodávek.

### Dostupnost vstupní energie

- ▶ **Fotovoltaické elektrárny.** Energie slunečního záření ve využitelném množství je dostupná prakticky všude. Smysl má i v místech, která jsou na tom z hlediska její dostupnosti relativně špatně, což lze vidět například u mikrosítě ostrova Eigg. Významnější omezení můžou představovat jen případy jako hluboké údolí, velké množství vysokých staveb v okolí nebo umístění v hustém lese.
- ▶ **Větrné elektrárny.** Ačkoliv vítr vzniká jako důsledek energie slunečního záření, jeho dostupnost pro praktické využití je nižší. Problém je to, že větrná turbína pro provoz vyžaduje určitý rychlostní interval. Z tohoto důvodu jsou větrné elektrárny vhodné jen pro určité lokality, zpravidla umístěné na ostrovech, pobřežích či ve vyšších nadmořských výškách.
- ▶ **Vodní elektrárny.** Místa s dostupnou energií vody byla využívána již historicky. Obdobně jako u větrných elektráren, turbína funguje optimálně v určitém rozmezí parametrů, v tomto případě již zmíněného průtoku a spádu. Dostupnost je tak velmi individuální.
- ▶ **Tepelné elektrárny.** V tomto případě záleží na konkrétních surovinách. Skladování paliva v jakémkoliv skupenství je v případě běžných surovin jako dřevní produkty, zemní plyn, propan, nafta atd. dobře zvládnuté. V případě zemního

plynu roli hraje plynofikace dané lokality, popřípadě jak reálné je dobudování přípojky. U mikrosítí jsou z hlediska nezávislosti velmi zajímavé dřevní produkty. Pokud provozovatel hospodaří na lesních pozemcích, pořízení technického vybavení pro výrobu dřevních pelet či štěpky může přinést podobnou nezávislost jako ostatní obnovitelné zdroje, kdy je „zvenku“ potřeba jen samotná technologie a její servis.

## Náročnost provedení

- **Fotovoltaické elektrárny.** Instalace fotovoltaických panelů na zpevněnou plochu či zem je velmi jednoduchá. Při instalaci na střechu objektu je již situace složitější, výzvou je práce ve výškách, statika budovy, ochrana před bleskovými výboji nebo požární bezpečnost. Pokud není použit systém s mikroměniči, je potřeba najít vhodnou místnost pro umístění centrálního měniče nebo řetězových měničů. Vzhledem ke snadné škálovatelnosti do velkých celků může být problémem legislativní omezení výkonu, které se někdy vztahuje i na elektrárny v čistě ostrovním režimu, jako v případě mikrosítě na ostrově Gran Canaria.
- **Větrné elektrárny.** Malé větrné elektrárny se někdy využívají na střechách budov, kde je instalace relativně jednoduchá. U stožárových instalací je vzhledem k výšce třeba klást důraz na pevnost celé konstrukce a jejího uchycení, ochranu při zvýšených rychlostech větru nebo ochranu před bleskovými výboji. Velkým problémem může být u některých turbín hluk. Malé větrné elektrárny jsou často dodávány včetně integrovaného měniče přímo v konstrukci.
- **Vodní elektrárny.** Z hlediska provedení jsou vodní elektrárny asi nejnáročnější. Výjimku mohou tvořit případy, kdy byl tok již historicky upraven vybudováním jezu, odvodního kanálu či přehrady. Oproti ostatním technologiím vyžaduje výrazně individuálnější přístup. Jelikož má vodní elektrárna potenciál změnit podmínky celého toku, zpravidla je nejsložitější i z hlediska legislativního.
- **Tepelné elektrárny.** Zejména v případě kogeneračních jednotek se spalovacími motory je instalace velmi jednoduchá. Zpravidla se dodávají jako zakrytovaný celek nebo jsou v kontejnerovém provedení. Přímo v místě pak proběhne jen připojení k místní infrastruktuře a nastavení.

## Průběh dodávek

- **Fotovoltaické elektrárny.** Fotovoltaika je již z principu velmi nestálý zdroj, ať už v rámci dní či ročních období. Pokud je potřeba stabilní zdroj, při porovnávání z hlediska technické či ekonomické náročnosti instalace je potřeba brát v potaz i vybudování vhodné formy akumulace.
- **Větrné elektrárny.** Nestálost výroby větrných elektráren může být výrazně menší i větší, což je dáno již zmíněnými specifiky lokality a větrné turbíny. Pokud je mikrosít rozlehlejší či geograficky členitá, objeví se i znatelný rozdíl mezi soustředěním výkonu do jedné turbíny a do více turbín na více místech.

- **Vodní elektrárny.** Vodní elektrárny se zpravidla budují jako stabilní zdroje u nichž dochází pouze k sezónním rozdílům. V případě malých toků můžou být problémem náhlá lokální sucha.
- **Tepelné elektrárny.** Malé kogenerační jednotky umožňují nepřetržitý provoz, který omezí pouze nedostatek paliva nebo servisní úkony. Pokud je ale teplo používáno primárně k vytápění, provozují se z ekonomických důvodů sezónně.

## Tabulka použití v mikrosítích

Mikrosít	Fotovoltaické elektrárny	Větrné elektrárny	Vodní elektrárny	Kogenerační jednotky
Logistické centrum ADLER Ostrava	296 kWp	Ne	Ne	50 kWe, 100,4 kWt
Strojírny Rumburk	210 kWp	Ne	Ne	Ne
Výrobní závod Fénix Jeseník	891 kWp	10 kW	Plánováno 50 kW	Ne
Průmyslový areál Tabačka Hodonín	600 kWp	Ne	Ne	530 kWe, 630 kWt
Obec Mikolajice	10 kWp	Ne	Ne	3 kWe, 60 kWt
Město Budišov nad Budišovkou	10,54 kWp	Ne	Ne	20 kWe, 48 kWt
Obec Kněžice	Ne	Ne	Ne	330 kWe, 405 kWt
Zemědělská společnost Bruzovice	79,56 kWp	Ne	Ne	Ne
Ostrov Eigg	170 kWp	24 kW	112 kW	Ne
Vesnice Agkistro	Ne	Ne	400 kW	Ne
Farma Agropecuaria Furen	100 kWp	Ne	Ne	Ne
Logistické centrum Lidl	500 kWp	Ne	Ne	Ne
Farma Stone Edge	160 kWp	Ne	Ne	65 kWe, ? kWt
Oblast Bonita	Ano	Ne	Ne	Ne

**Tabulka 5.2:** Tabulka použití jednotlivých technologií výroby v popsáných mikrosítích.

# Kapitola 6

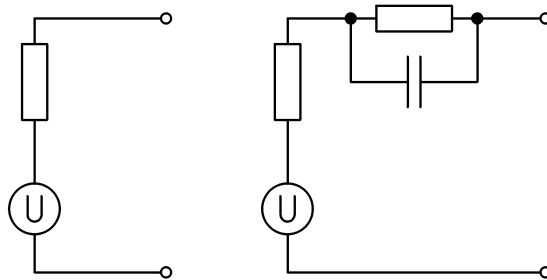
## Technologie akumulace elektrické energie v mikrosítích

Tato kapitola pojednává o technologiích akumulace energie – Energy Storage Systems. Vymezení tohoto pojmu, stejně jako v případě Distributed Generation v předchozí kapitole, je provedeno v části 2.5.

### 6.1 Elektrochemické články (baterie)

Každý elektrochemický článek se skládá ze dvou elektrod, elektrolytu a separátoru. Elektrody slouží jako vodiče 1. třídy (přenáší náboj přes volné elektrony), elektrolyt jako vodič 2. třídy (přenáší náboj přes ionty). Separátor pak zajišťuje oddělení elektrod od sebe a umožňuje pouze iontovou vodivost. Termín baterie pak označuje navzájem propojenou skupinu galvanických článků. [7]

Pro popis chování článku se využívají různá náhradní schémata. Nejjednodušší Rintův model postihuje pouze vnitřní odpor článku. Složitější Théveninův model díky paralelní RC kombinaci zahrnuje částečné i přechodné děje vznikající při proměnlivém zatěžování. Zdroj v obou případech představuje vnitřní napětí článku, které se mění s postupným vybíjením či nabíjením. [145]



Obrázek 6.1: Vlevo Rintův model článku, vpravo Théveninův.

Z hlediska dlouhodobého používání pak články charakterizuje počet cyklů, které vydrží. Cykly je potřeba popsat, protože životnost článku při nabíjení a vybíjení v rozsahu 50 až 80 % udávané kapacity může být dramaticky jiná, než při cyklování v rozmezí 0 až 100 %. Limity vybíjecího či nabíjecího proudu jsou často popsány pomocí metriky „C-rate“. Pro článek s udávanou kapacitou 10 Ah je například proud 1C roven 10 A, proud 5C roven 50 A a C/2 roven 5 A. [146]

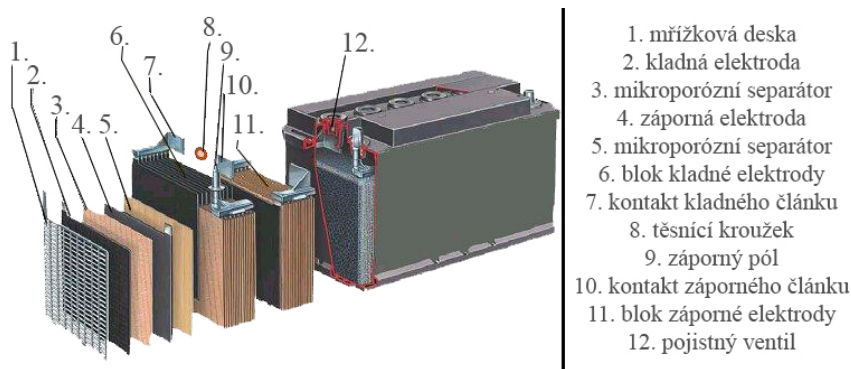
## Olověné články

Olověné články jsou nejstarší metodou elektrochemické akumulace energie. Běžně dostupné olověné akumulátory se skládají z několika olověných článků. Základem je kladná  $\text{PbO}_2$  elektroda a záporná  $\text{Pb}$  elektroda. Elektrolyt zpravidla tvoří  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ve formě vodního roztoku nebo gelu. Separátor je například polyethylen nebo rohož ze skelných vláken. Základní reakci uvnitř článku lze popsat následující rovnicí. [147]



Při vybíjení (zleva doprava) olovo a oxid olovičitý reagují s kyselinou sírovou za vzniku vody a síranu olovnatého. Koncentrace kyseliny sírové v elektrolytu se tak s vybíjením zmenšuje. Při nabíjení je proces opačný. Konstrukce a aditiva zlepšují vlastnosti pro různé oblasti použití. V úložiscích pro mikrosítě se používají dva typy baterií. [147]

- **Záložní baterie.** Jsou určeny pro dlouhodobý provoz. Slouží pro pohotovostní zálohování, tj. jsou součástí zdrojů nepřerušovaného napájení. Nejsou určeny pro časté hluboké nabíjení a vybíjení, ale jako levná a spolehlivá záloha k důležitým systémům, než naskočí záložní elektrocentrála.
- **Baterie pro cyklický provoz.** Tyto baterie jsou uzpůsobeny pro časté nabíjení a vybíjení s využitím velké části kapacity. Před rozmachem obnovitelných zdrojů byly určeny pro trakční využití, ale dnes mohou sloužit jako relativně levná forma drobné akumulace.



Obrázek 6.2: Konstrukce klasické olověné baterie. [148]

U olověných baterií se objevují dva problematické jevy. [147]

- **Plynování.** Při používání baterie může docházet k uvolňování kyslíku a vodíku z vody. Tím akumulátor vysychá. To se dříve řešilo doléváním, dnes jsou na trhu bezúdržbové akumulátory, které jsou zapouzdřené. Ty jsou často opatřeny ventilem, který plyny vypustí pouze při dosažení nebezpečně vysokého tlaku.
- **Sulface.** Pokud je baterie dlouhodobě uchovávána ve vybitém stavu, dochází k růstu krystalů  $\text{PbSO}_4$  na elektrodách, čímž se zmenšuje aktivní plocha elektrod a tím i možnosti vybíjení či nabíjení. Zmenšení aktivní plochy má také za následek zvýšené oteplení.

## Lithium-iontové články

Lithium-iontové články byly zkoumány dlouhá léta, ale reaktivnost lithia byla velkým problémem pro zvládnutí výroby a používání. Komerční prodej a rozšíření začalo až v devadesátých letech. Běžně prodávané akumulátory, například typ 18650, jsou samostatnými články. Základem je záporná uhlíková elektroda a kladná elektroda ze sloučeniny kovu a lithia. Elektrolyt tvoří soli lithia v organických rozpouštědlech. Separátory se vyskytují například z polymerů nebo keramiky. [149]

Volba materiálů kladné elektrody se značně projevuje v celkových vlastnostech článku. Proto se dle nich dělí a označují. Nejpoužívanější typy, které se zároveň vyskytly ve zmíněných mikrosítích, jsou následující. [150]

- ▶ **NMC (Nikl-Mangan-Kobalt).** Elektroda tvořena sloučeninou  $\text{LiNiMnCoO}_2$ . V dnešní době velmi používané, ať už pro elektromobilitu nebo bateriová úložišť. Existují různé varianty dělené dle poměrů jednotlivých složek. Je zde snaha používat co nejméně kobaltu.
- ▶ **LFP (Lithium-Železo-Fosfát.)** Elektroda tvořena sloučeninou  $\text{LiFePO}_4$ . Oproti ostatním technologiím mají menší energetickou hustotu, ale jsou jedny z nejbezpečnějších a mají dlouhou životnost. Další výhodou je absence kobaltu. Původně byly používány čistě v bateriových úložiscích, ale dnes již konkurují NMC článkům v elektromobilech.
- ▶ **Li-Pol.** Tato kategorie se nevyznačuje použitím specifického materiálu elektrody, ale elektrolytu. Ten je zde polymerní v pevném/gelovém stavu. Konstrukce článků není tradiční cylindrická, ale jde nejčastěji o malé ploché vaky.

Vzhledem ke zmiňované vysoké reaktivnosti lithia je kromě standardních údajů důležitá i tzv. teplota tepelného úniku. To je teplota, která když se v rámci článku objeví, například kvůli zkratu, uvolňuje se vlivem exotermních reakcí větší množství tepla, než z něj přirozeně odchází. Dojde tak k rychlé řetězové reakci, která má v nejlepším případě za následek pouze zničení samotného článku. Nebezpečí spočívá zejména v tom, že je součástí materiálů často kyslík, takže reakce pokračuje i když není k dispozici kyslík atmosférický. [151]

## Sodíkové články

O sodíku se uvažuje jako o jedné z možných náhrad lithia v budoucnosti. Existují dva hlavní proudy zkoumající jeho využití. [152] [153]

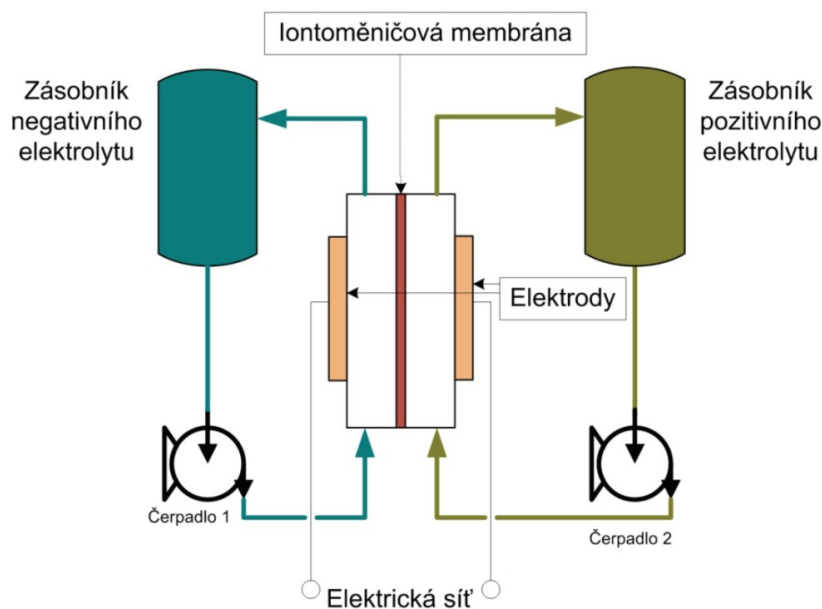
- ▶ **Sodíko-iontové.** Konstrukce a materiály jsou často podobné lithium-iontovým. Na trh se teprve dostávají, v současnosti je možné pořídit například články v populárním formátu 18650 a objevují se i první elektromobily s touto technologií [154].
- ▶ **Sodíko-sírové.** Oba tyto materiály jsou v přírodě dostupné, což je velká výhoda této technologie. Překážkou je pracovní teplota, která se pohybuje v rozmezí 300 až 400 °C.

## Průtočné baterie

Průtočné baterie jsou další možnou formou elektrochemické akumulace v budoucnosti. Základní princip průtočné baterie je v tom, že aktivní materiály, jejichž interakcí vzniká elektrický proud, jsou uloženy v separátních nádobách. Do komory, kde dochází k reakci a je zde umístěna membrána, jsou z nich čerpány. [155]

Obrovskou výhodou takového řešení je oddělení návrhu baterie pro určitý výkon a pro určitou kapacitu. Zatímco u běžné baterie zvětšením rozměrů článků či spojováním měníme i požadavky na ideální vybíjecí či nabíjecí proud, v případě průtočných baterií ovlivňuje výkon baterie reakční komora a její kapacitu velikost nádrží na aktivní materiály. [155]

Existuje mnoho různých kombinací aktivních látek, které často vychází i z klasických baterií, například průtočná baterie založené na principech klasické olověné. V současnosti nejvíce propagovanou technologií jsou průtočné baterie založené na vanadu. [155]



Obrázek 6.3: Schéma průtočné baterie. [7]

Tento typ baterií má oproti konvenčním malou energetickou hustotu, ale vyniká škálovatelností, dlouhou životností a snadným řízením reakce uvnitř komory pomocí čerpadel. [155]

## 6.2 Superkondenzátory

Jako superkondenzátory či ultrakapacitory se označují kondenzátory, které se oproti běžným vyznačují významně větší kapacitou energie. Toho je dosaženo elektrostatickými jevy, elektrochemickými jevy nebo jejich kombinací. [156]

- **Hybridní kondenzátory.** Tato technologie kombinuje uchovávání energie elektrostatickými jevy a elektrochemickými jevy. Jak již název napovídá, jde tedy v podstatě o hybrid mezi klasickým kondenzátorem a baterií.
- **Pseudokondenzátory.** Pseudokondenzátory dosahují chování kondenzátorů pomocí elektrochemických jevů.



- **Dvouvrstvé kondenzátory (EDLC).** Kondenzátory typu EDLC využívají primárně elektrostatických jevů, základním principem tedy jde o klasické kondenzátory v pravém slova smyslu a dále je řeč o nich.

Všeobecně známé vzorce pro kapacitu jednoduchého deskového kondenzátoru a energii v něm obsaženou jsou:

$$C = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (6.2)$$

$\varepsilon_0$  je permitivita vakua,  $\varepsilon_r$  je permitivita dielektrika mezi elektrodami,  $S$  je plocha elektrod,  $d$  je vzdálenost mezi nimi,  $U$  je napětí mezi nimi. Základním principem EDLC je zvětšení plochy elektrod pomocí forem uhlíku s velkou efektivní plochou, tj. pórovitým, drsným povrchem, kterého nelze dosáhnout běžnou mechanickou úpravou, ale vyplývá přímo z vlastností dané formy uhlíku.

Základní myšlenkou nasazení superkondenzátorů pro energetické účely je vyplnění prostoru mezi vlastnostmi klasických kondenzátorů a baterií. Superkondenzátor má energetickou kapacitu významně větší než běžný kondenzátor. Oproti bateriovému systému je však relativně malá. Na rozdíl od baterie má ovšem schopnost se nabíjet a vybíjet velkými proudy a s rychlým náběhem v řádu milisekund, to vše při zachování dobré životnosti. To je provozní chování, které klasickým bateriím životnost významně zkracuje. [7]

## 6.3 Setrvačníky

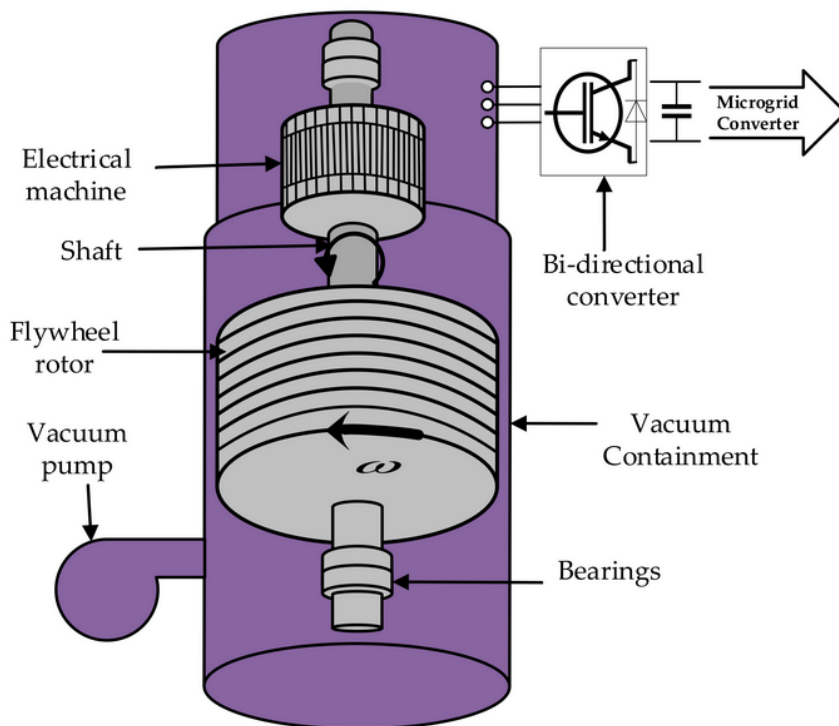
Setrvačníky jsou zařízení uchovávající energii v podobě kinetické energie rotačního pohybu. Za předpokladu nehybné osy rotace pro ní platí známý vztah:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (6.3)$$

$J$  je moment setrvačnosti tělesa a  $\omega$  úhlová rychlost otáčení. Množství uložené energie tedy ovlivňují tyto dvě veličiny. Moment setrvačnosti  $J$  určuje rozložení hmoty v rámci setrvačníku.

$$J = \int_m r^2 dm \quad (6.4)$$

Limitujícími faktory v případě setrvačníku je zejména pevnost materiálů a ztráty třením. Z bezpečnostních důvodů jsou tělesa setrvačnicků navrhována tak, aby se při případném rozštěpení rozdělily na co nejvíce malých kousků s malou kinetickou energií. Pro omezení ztrát třením se těleso nachází ve vakuové komoře a mechanická vazba na hřídel je provedena speciálními typy klasických ložisek nebo ložisky supravodivými či magnetickými. [7]



Obrázek 6.4: Konstrukce setrvačníku. [157]

Oblast použití setrvačníků je se překrývá s oblastí použití superkondenzátorů. Setrvačníky jsou zamýšleny primárně pro vykrývání krátkých intervalů nedostatku energie – sekund až minut. Rotory synchronních generátorů v elektrárnách plní principem podobnou funkci. Vzhledem k časté absenci těchto metod výroby v případě mikrosítí se tak tato technologie jeví perspektivně. [7]

## 6.4 Vodík

### Vlastnosti a skladování vodíku

Vodík je z hlediska energetického využití velmi zajímavý prvek. Dá se pomocí elektrické a tepelné energie vyrobit, uskladnit a následně převést zpět znovu na elektrickou či tepelnou energii. Největší výzvou je v současnosti jeho skladování, kde se vyskytuje několik významných problémů. [158]

- **Snadná zápalnost.** Vodík je ve směsi s kyslíkem a tedy i na vzduchu snadno zápalný a dobře hoří, od určitých koncentrací je výbušný.
- **Difuzivita.** Vodík díky svým vlastnostem (nejjednodušší a nejlehčí chemický prvek) snadno proniká i přes zdánlivě pevné, neporézní materiály. I při skladování v kovových tlakových lahvích tak dochází k nezanedbatelným únikům, které mohou jít až do jednotek procent objemu za den.
- **Vodíková koroze, křehnutí.** Tento jev souvisí s difuzivitou – při pronikání do materiálů se v nich může začít hromadit a tvořit uvnitř mikroskopické vodíkové kapsy. Při náhlé změně teploty se vlivem rozdílných roztažností materiálu nádoby a vodíku vytvoří mikroskopické trhliny.

- ▶ **Záporný Joulův-Thomsonův koeficient.** Vodík je společně s heliem a neonem jedním z plynů, který při pokojových teplotách vykazuje záporný Joulův-Thomsonův koeficient. Ten obecně popisuje chování plynu při adiabatické expanzi do vakua přes škrtku/pórovitou zátku. Záporná hodnota koeficientu v praxi znamená, že při tomto jevu se vodík ohřívá, což může teoreticky vést k překročení zápalné teploty.

Kolem skladování vodíku tak již roky probíhá intenzivní výzkum. Vyvinutí jednoduchého a levného systému pro dlouhodobé skladování by otevřelo cestu sezónnímu skladování energie z obnovitelných zdrojů. Vybranými metodami skladování jsou: [7]

- ▶ **Skladování v kapalném skupenství.** Klasický princip jako u ostatních plynů. Vodík je skladován v nádobách při teplotě  $-253\text{ °C}$ . Lze tak dosáhnout značné energetické hustoty, ale proces zkapalnění je velmi nákladný a spotřebuje až třetinu energie, kterou lze z uloženého vodíku získat spaláním.
- ▶ **Skladování v plynném skupenství.** I tento způsob skladování vychází ze zaběhlých technologií. Vodík je v bezsvarových nádobách s tlakem v řádech stovek barů. Nižší hodnoty tlaku jsou u klasických ocelových nádob, vyšších hodnot a menších ztrát difúzí lze dosáhnout pomocí kompozitních konstrukcí. Energetická hustota je menší než u zkapalněného. Často se místo jedné velké nádoby používá systém několika menších, vzájemně propojených.
- ▶ **Sorpce.** Vodík se dá skladovat pomocí vazeb na povrchu uhlíkových nanostruktur (nanotrubice, porézní grafit). Na rozdíl od předchozích dvou možností je tato varianta značně experimentální a stále je pouze předmětem výzkumu.
- ▶ **Skladování ve sloučenině.** Velmi perspektivní metoda je použít vodík k výrobě nějaké jiné chemické látky, která se skladuje jednoduše. Celý proces vodíkové akumulace to však pochopitelně zesložití. Velmi slibně se jeví skladování v podobě čpavku ( $\text{NH}_3$ ), jelikož dusík lze získat z atmosféry. Čpavek se dá navíc využít sám o sobě, v minulosti sloužil jako palivo pro pístové spalovací nebo raketové motory.

## Výroba vodíku (Power to Gas, P2G)

Ačkoliv je technika výroby vodíku v chemickém průmyslu zvládnutá, většina jej je vyráběna z fosilních paliv. Mezi používané metody patří rozklad zemního plynu pomocí páry, oxidace těžkých ropných produktů a plynování uhlí či koksu. Při všech těchto procesech se uvolňuje oxid uhličitý a pro energetické využití jsou daleko vhodnější přímo zdrojové suroviny. Z hlediska akumulace energie v mikrosítích dávají smysl metody výroby vodíku rozkladem vody. [7]

- ▶ **Klasická elektrolýza.** Jednoduchý a ověřený způsob výroby rozkladem vody pomocí stejnosměrného proudu. Jelikož čistá voda není dostatečně vodivá, je potřeba do ní přidat malé množství pomocné látky. Například se používá hydroxid draselný, pak mluvíme o alkalické elektrolýze.
- ▶ **Vysokoteplotní elektrolýza.** Část energie k rozkladu je dodána v podobě tepelné energie. Výhodné to může být například v průmyslovém provozu, kde

je k dispozici odpadní teplo. Do elektrolyzéry je vstupem pára s malým množstvím vodíku, ven jde vodík s malým množstvím páry. Lze dosáhnout vyšší účinnosti než v případě klasické elektrolýzy, ale vodík je potřeba z výstupní směsi izolovat.

- **Termochemické reakce.** Využívají procesů s pomocnými chemickými látkami, které se v rámci procesu výroby recyklují. Příkladem může být S-I cyklus využívající oxid siřičitý a jód.

Teoreticky je možný i čistě termický rozklad vody. K němu dochází při teplotách nad 2500 °C, což představuje hlavní problém této metody – konstrukčních materiálů vhodných pro takový výrobek vodíku je velmi málo. [159]

## Konverze na energii (Gas to Power, G2P)

Existují dva způsoby, jakými lze z uloženého vodíku získat zpět elektrickou energii. První variantou je spalování. To již bylo zmíněno v kapitole o výrobě elektrické energie. Druhou variantou jsou elektrochemické palivové články.

Princip palivového článku je v podstatě stejný jako u elektrochemických článků tvořících klasické baterie. Rozdílem je, že baterie je optimalizovaná pro obousměrnou konverzi energie a zároveň jsou v ní veškeré chemické látky přímo uloženy. Z druhého hlediska výjimku tvoří baterie průtočné, které jsou palivovým článkům asi nejpodobnější. Existuje i malá kategorie palivových článků optimalizovaných na obousměrnou konverzi (Regenerative Fuel Cell, RFC) a v takovém případě je definiční hranice poměrně nejasná. Stejně tak lze na technologii palivových článků založit elektrolyzér. [7]

Palivový článek se v základu skládá z elektrod, elektrolytu a katalyzátoru. Elektrody a katalyzátor musí být v prostředí vznikajících chemických látek a elektrolytu stabilní, musí mít dobrou vodivost a velkou aktivní plochu, čehož je dosaženo například pórovitou strukturou. Palivové články jsou pak spojeny do palivových modulů. Součástí článků jsou kanálky, kudy se jednotlivé chemické látky přivádí a odvádí. Mezi jednotlivými články jsou vloženy chladičí desky. [7]

Základní principem je oxidace vodíku na ionty vodíku a elektrony. Elektrony putují přes vnější obvod skrz zátěž a ionty vodíku přes elektrolyt na druhou elektrodu. Tam se ionty vodíku a elektrony spojí s kyslíkem a vznikne voda. [7]



Palivové články zmíněné v mikrosítích jsou nízkoteplotní a využívají technologii PEM. Jejich charakteristikou je pevný elektrolyt v podobě polymerní membrány. Výhodami této technologie je výkon, dobrá regulace a možnost studeného startu. Nevýhodou jsou zvýšené nároky na čistotu paliva. Na této technologii se staví i elektrolyzéry.

## Barvy vodíku

Chemicky se vyčištěný vodík vyrobený jakoukoliv cestou nebude téměř lišit od jakéhokoliv jiného. Jelikož velká část motivace rozvoje vodíkové energetiky je založená na omezení emisí oxidu uhličitého, dělí se vodík podle způsobu výroby na

různé barvy. Způsob výroby je významný údaj, jelikož cena na trhu se kvůli emisním povolenkám může v budoucnosti velmi lišit. Například Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky zmiňuje následující dělení. [160]

- ▶ **Zelený vodík** je vyroben elektrolýzou či biochemickými rozklady pomocí energie z obnovitelných zdrojů.
- ▶ **Tyrkysový vodík** je vyroben rozkladem zemního plynu, oxid uhličitý je ale zachytáván.
- ▶ **Šedý vodík** je vyroben z fosilních paliv bez zachytávání oxidu uhličitého.

Dále například na stránkách Světového ekonomického fóra najdeme další používaná označení. [161]

- ▶ **Černý a hnědý vodík** je vyroben rozkladem živce či uhlí.
- ▶ **Růžový vodík** je vyroben elektrolýzou pomocí energie z jaderných elektráren.
- ▶ **Žlutý vodík** je vyroben specificky pomocí energie z fotovoltaických elektráren.

Nutno říci, že tento styl označování zůstává spíše doménou konceptů a úvah, popřípadě je používán interně v organizacích či firmách. Není zaveden žádnou legislativou či normou. Až na základní rozdělení na šedou a zelenou se málokdo na konkrétní sestavě barev a jejich definic shodne.

## 6.5 Porovnání a použití

### Obecné porovnání technologií

V oblasti běžných mikrosítí se k akumulaci elektrické energie ve velkém množství používají výhradně lithium-iontové články. Olověné články jsou jako velkokapacitní úložiště užity pouze v případě ostrova Eigg a to pravděpodobně kvůli době vzniku. Technologie experimentálních elektrochemických článků, setrvačníků, superkondenzátorů či vodíku jsou stále ještě velmi málo využívány a nedají se tak příliš objektivně porovnávat z hlediska praktických zkušeností v masovém nasazení. I v případě konvenčních článků je obecné objektivní porovnání problematické, protože vývoj v této oblasti probíhá extrémně rychle. To je vidět právě na případě technologie LFP, která se pro svou malou energetickou hustotu využívala pouze ve stacionárních úložištích, ale dnes už je běžná v elektromobilech. Níže uvedená tabulka zahrnující lithium-iontové a olověné technologie je tedy velmi orientační. Například životnost olověných akumulátorů může při speciálních konstrukcích a zacházení překonat i 1000 cyklů.

Technologie	Životnost (cykly)	Energetická hustota (Wh/kg)	Teplota úniku (°C)
Olovo [162]	50 až 500	30 až 40	-
LFP [150]	2000 a více	90 až 120	270
NMC [150]	1000 až 2000	150 až 220	210

**Tabulka 6.1:** Orientační hodnoty významných parametrů vybraných elektrochemických článků.

## Bateriové úložiště

Pro praktické využití nelze uvažovat jen články, ale celé úložiště včetně jeho vlastní spotřeby. Hypotetickým příkladem může být úložiště v kontejnerovém provedení, které bychom nevhodně umístili na otevřené prostranství bez stínu. Klimatizační technika uvnitř kontejneru by pak působila jako velmi znatelné samovybívání, ačkoliv by samotná technologie článků byla z tohoto hlediska bezproblémová.

Při posuzování konkrétního bateriového úložiště pro použití v mikrosítě by se mělo kromě výběru na základě konkrétní chemie článků hledět na deklarované parametry úložiště jako celku.

- **Výkon a kapacita.** Výkon není omezen jen samotným střídačem, ale také konkrétní technologií článků a jejich spojením do baterií. Je tedy například dobré si položit otázku, jestli udávaný jmenovitý výkon střídače nepředstavuje pro články nadprůměrné zatížení a nedojde tak k jeho omezování na základě vzrůstu teploty uvnitř.
- **Podmínky a jejich zajištění.** Úložiště by mělo mít deklarovaný rozsah provozních teplot. V případě, že je vybaveno vlastním klimatizačním systémem, je dobré zjistit, jaký má tento systém spotřebu při podmínkách v místě, kam má být umístěno.
- **Životnost.** Životnost je důležitá zejména při ekonomických kalkulacích. Po proměření či návrhu zdrojové a spotřebičové základny dané mikrosítě by mělo být orientačně jasné, kolik energie je potřeba akumulovat, jak často a jakým výkonem bude docházet k nabíjení a vybíjení. Pokud výrobce udává životnost v letech, je potřeba zjistit, co považuje za typické použití úložiště během roku a jak moc to odpovídá požadovaným podmínkám.

## Tabulka použití v mikrosítích

Mikrosítě	LFP	NMC	Vodík	Ostatní
Logistické centrum ADLER Ostrava	360 kWh	Ne	Ne	Ne
Strojírny Rumburk	408 kWh	Ne	Ne	Ne
Výrobní závod Fénix Jeseník	2978 kWh	Ne	Ne	Ne
Průmyslový areál Tabačka Hodonín	3 MWh	Ne	Ne	Ne
Obec Mikolajice	15 kWh	Ne	Ne	Ne
Město Budišov nad Budišovkou	19,2 kWh	Ne	Ne	Ne
Obec Kněžice	Ne	Ne	Ne	Ne
Zemědělská společnost Brzuzovice	Ne	102,54 kWh	Ne	Ne
Ostrov Eigg	Ne	Ne	Ne	Olovo 530 kWh, setrvačníky a superkondenzátory.
Vesnice Agkistro	Ne	Ne	250 až 500 kWh	Li-Pol 92,4 kWh
Farma Agropecuaria Furen	100 kWh	Ne	50 kg	Ne
Logistické centrum Lidl	Ne	Ne	Ne	1,6 MWh pravděpodobně lithium-lontové
Farma Stone Edge	324,6 kWh	485 kWh	248 kg	Sodíko-iontová 100 kWh
Oblast Bonita	Ne	Ne	Ne	Průtočná vanadová 8 MWh

**Tabulka 6.2:** Tabulka použití jednotlivých technologií akumulace v popsáných mikrosítích. Vlastní sloupeček mají technologie objevující se alespoň ve dvou projektech.

Tabulka použití jednotlivých technologií akumulace v popsáných mikrosítích. Vlastní sloupeček mají technologie objevující se alespoň ve dvou projektech.





# Závěr

V první kapitole této bakalářské práce je stručně popsán stávající stav energetiky a problémy, s nimiž se potýká. Odstavení uhelných elektráren je minimálně v České republice řešeno dosti úspěšně, a je tak naprosto reálnou možností, že do pár let zmizí náš současný status významného vývozce elektrické energie v rámci Evropy. Výstavba velkého množství obnovitelných zdrojů, zejména domácích a firmenních fotovoltaik, zase způsobuje toky výkonů, na které síť není navržena. Tématika útlumu těžby uhlí se týká i sektoru teplárenství, který je tímto postižen možná ještě více než energetika. Mnoho teplárenských sítí bude v následujících letech pravděpodobně vyžadovat investice do přechodu na nové typy paliv (plynu či biomasy), popřípadě dojde k jejich rozpadu.

V druhé kapitole jsou vystihnuty základní myšlenky konceptu chytrých sítí, který má potenciál významně zvětšit možnosti nasazování nestálých obnovitelných zdrojů energie pomocí sběru velkého množství dat a řízení velkého množství prvků.

Problematika chytrého měření je popsána pomocí doporučení Evropské komise, které převzala i Česká republika do své legislativy. K nasazování chytrého měření u nás dochází postupně, ale v jiných zemích již funguje řadu let, což způsobuje problémy s technickou nekompatibilitou vytvářením nových standardů a zvyšováním nároků na funkcionalitu měřících zařízení.

Dále jsou stanoveny obecné nároky na komunikaci v rámci chytrých sítí. Část vychází z obecných úvah o odolnosti proti rušení v rámci používaných technologií, nutné přenosové kapacitě a nárocích na standardizaci a bezpečnost. Dále jsou popsány problémy, které se vyskytly při praktické realizaci v zahraničí a je uvedena základní topologie komunikace pro chytré sítě.

V předposlední části pojednání o chytrých sítích jsou popsány jednotlivé prvky a jaké možnosti a problémy přinášejí. Spadají sem stacionární bateriová úložiště, spotřebiče v domácnostech a elektromobily. Ve všech případech jsou také uvedeny odkazy na pilotní projekty jejich využití. Ve většině případů je nasazení těchto prvků brzděno nedostatečnou standardizací, legislativou či hledáním vhodného obchodního modelu.

Závěrem pojednání chytrých sítí je definice pojmu mikrosít, prvků jenž obsahují a provozních režimů. Navázáno je úvahou, jakou roli mohou mikrosítě hrát v chytrých sítích a jak svojí flexibilitou v podobě vlastních zdrojů energie mohou energetice pomoci s výpadkem stabilních zdrojů.

Těžištěm práce je pak popis osmi českých a šesti zahraničních mikrosítí. Kontextová část obsahuje základní informace o tom, jaké nároky byly v daném místě kladeny na zásobování elektrickou energií či teplem, jak byly tyto nároky uspokojovány dříve a co bylo motivací vybudováním mikrosítě. Realizační část obsahuje specifikace výrobních a akumulčních technologií či popisy řízení a chování. V části výsledky je pak souhrn zkušeností s provozem, deklarovaná návratnost investice či

jaké jsou vize do budoucna.

Poslední dvě kapitoly se pak věnují popisu a porovnání technologií výroby a akumulace, které se objevují ve zkoumaných mikrosítích. Z přehledu je patrná jasná dominance fotovoltaických elektráren a bateriových úložišť technologie LFP. U ostatních obnovitelných zdrojů je pro jejich praktické nasazení patrná významně větší náročnost na místní podmínky. Zajímavé jsou pilotní projekty nasazování nových technologií akumulace jako jsou setrvačníky, superkondenzátory, vanadové průtočné baterie či akumulace do vodíku. Technologie výroby jsou pak porovnány z hlediska dostupnosti vstupní energie, náročnosti provedení a průběhu dodávek elektrické energie. U porovnání akumulačních metod není kladen důraz na data konkrétních technologií, ale spíše na co se zaměřit při výběru komerčního bateriového úložiště.

# Bibliografie

- [1] *Uhelné elektrárny skupiny ČEZ*. Skupina ČEZ. URL: <https://www.svetenergie.cz/data/web/vzdelavaci-program-cez/tiskoviny/uhelne-elektrarny-skupiny-cez.pdf>.
- [2] David Vobořil. *Agora: Stávající uhelné elektrárny mohou soustavě poskytnout vyšší flexibilitu, než se předpokládá*. oEnergetice.cz. URL: <https://oenergetice.cz/elektrina/agora-stavajici-uhelne-elektrarny-mohou-soustave-poskytnout-vyssi-flexibilitu-nez-se-predpoklada>.
- [3] David Vobořil. *Paroplynová elektrárna – princip funkce*. oEnergetice.cz. URL: <https://oenergetice.cz/technologie/paroplynova-elektrarna-princip-funkce>.
- [4] Jan Žižka. *Flexibilita jaderných elektráren – šance pro zastánce atomu?* oEnergetice.cz. URL: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/flexibilita-jadernych-elektraren-sance-zastance-atomu>.
- [5] Sylvain Rodat a Richard Thonig. „Status of Concentrated Solar Power Plants Installed Worldwide: Past and Present Data“. In: *Clean Technologies* 6 (břez. 2024), s. 365–378. DOI: 10.3390/cleantechnol6010018.
- [6] Nouha Mansouri et al. „Large Photovoltaic Power Plants Integration: A Review of Challenges and Solutions“. In: *Energies* 12.19 (2019). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en12193798. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/19/3798>.
- [7] Petr Mastný et al. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. 2011.
- [8] U. S. Energy Information Administration. URL: <https://www.eia.gov/international/data/world/electricity/electricity-generation>.
- [9] Karel Máslo a kolektiv. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*.
- [10] Iva Princová. *Energetika v Ústeckém kraji v roce 2022*. Krajská správa ČSU v Ústí nad Labem, 16. lis. 2023.
- [11] *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy České republiky*. Energetický regulační úřad. URL: <https://eru.gov.cz/rocní-zpráva-o-provozu-elektrizacni-soustavy-cr-pro-rok-2022>.
- [12] Benjamin Wehrmann. *Lack of grid capacity lets output of Germany’s North Sea offshore wind turbines drop in 2023*. Clean Energy Wire. URL: <https://www.cleanenergywire.org/news/lack-grid-capacity-lets-output-germans-north-sea-offshore-wind-turbines-drop-2023>.

- [13] Yukun Niu et al. „Analysis of Offshore Wind Power Integration“. In: *Journal of Physics: Conference Series* 1920.1 (květ. 2021), s. 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1920/1/012009. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1920/1/012009>.
- [14] Michaela Rambousková a Michal Turek. *Místo končícího uhlí mají sever Čech spasit soláry. Ne všichni jsou nadšení*. Seznam Zprávy. URL: <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/domaci-zivot-v-cesku-misto-konciciho-uhli-maji-sever-cech-spasit-solary-ne-vsichni-jsou-nadseni-246499>.
- [15] *Per capita electricity generation by source, 2023*. Our World in Data. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-electricity-source-stacked>.
- [16] Jaroslav Doležal et al. *Jaderné a klasické elektrárny*. 2011.
- [17] David Vobořil. *Podpůrné služby - přenos elektřiny*. oEnergetice.cz. URL: <https://oenergetice.cz/elektrina/podpurne-sluzby-prenos-elektriny>.
- [18] Ivo Doležel. *Energetika II: Přenosová a distribuční soustava*. Přednáška. Praha: FEL ČVUT.
- [19] Jiří Salavec. *Trh s elektřinou - specifika, účastníci trhu a rozdělení*. oEnergetice.cz. URL: <https://oenergetice.cz/trh-s-elektrinou/trh-s-elektrinou>.
- [20] Jan Schindler. *Jak si ověřit velkoobchodní ceny elektřiny a plynu?* URL: <https://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energii/23098-jak-si-overit-velkoobchodni-ceny-elektriny-a-plynu>.
- [21] *Energeticky aktivní spotřebitelé ve vybraných zemích EU*. Svaz moderní energetiky. URL: <https://www.modernienergetika.cz/wp-content/uploads/2020/12/Studie-prosumers-v-zemi%CC%81ch-EU-final.pdf>.
- [22] Jiří Zilvar. *Agregátoři otevírají trh podpůrných služeb malým hráčům*. TZB-info. URL: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/22415-agregatori-oteviraji-trh-podpurnych-sluzeb-malym-hracum>.
- [23] *Česká republika přechází na nové zdroje vytápění, 4 miliony obyvatel a firmy dostanou cenově dostupné teplo i nadále*. Ministerstvo průmyslu a obchodu. URL: <https://www.mpo.cz/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/ceska-republika-prechazi-na-nove-zdroje-vytapeni--4-miliony-obyvatele-a-firmy-dostanou-cenove-dostupne-teplo-i-nadale--256716/>.
- [24] *Roční zpráva o provozu teplárenských soustav ČR*. Energetický regulační úřad. URL: <https://eru.gov.cz/rocnizprava-o-provozu-teplarenskych-soustav-cr-za-rok-2019>.
- [25] David Vobořil. *Gross EU heat production by fuel in CHP and district heating plants, 2020*. European Environment Agency. URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/gross-eu-heat-production-by>.
- [26] Elina Mäki, Eemeli Tsupari a Jussi Ikäheimo. *The role and opportunities for solar energy in Finland and Europe*. Led. 2015. DOI: 10.13140/RG.2.1.2764.0486.

- [27] *Aktualizace Státní energetické koncepce (SEK)*. Ministerstvo průmyslu a obchodu. URL: <https://www.mpo.cz/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/aktualizace-statni-energeticke-koncepce-sek--279668/>.
- [28] *Konec uhelných elektráren zvládneme, řekl Síkela. Zákon bude do příštího roku*. iDnes.cz. URL: [https://www.idnes.cz/ekonomika/domaci/sikela-chysta-zakon-ktery-zajisti-postupny-odchod-od-uhli-do-2033.A240303\\_150704\\_ekonomika\\_vank](https://www.idnes.cz/ekonomika/domaci/sikela-chysta-zakon-ktery-zajisti-postupny-odchod-od-uhli-do-2033.A240303_150704_ekonomika_vank).
- [29] Zuzana Kubátová. *Tykač varuje, že už za rok zavře své elektrárny. Ve hře je 3000 pracovních míst*. Seznam Zprávy. URL: <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/ekonomika-tykac-varuje-ze-uz-za-rok-zavre-sve-elektrarny-ve-hre-je-3000-pracovnich-mist-246879>.
- [30] Zuzana Kubátová. *Šéf ČEZ: Ani levná elektřina z Německa nám nebude stačit*. Seznam Zprávy, 23. říj. 2023. URL: <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/ekonomika-firmy-sef-cez-uhelne-elektrarny-zacnou-prodelavat-za-dva-roky-neudrzime-je-238687>.
- [31] *Zákon č. 458/2000 Sb. § 3 - Podnikání v energetických odvětvích*.
- [32] Martin Petříček. *Máte smůlu, nemůžeme vás připojit. Zájemci o fotovoltaiku to slyší stále častěji*. Týdeník Ekonom, 27. říj. 2022. URL: <https://ekonom.cz/c1-67130560-mate-smulu-nemuzeme-vas-pripojit-zajemci-o-fotovoltaiku-to-slysi-stale-casteji>.
- [33] Martin Petříček. *Distributoři: Počet připojených fotovoltaik ve čtvrtletí několiknásobně vzrostl*. oEnergetice.cz, 27. říj. 2022. URL: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/distributori-pocet-pripojenych-fotovoltaik-ve-ctvrtletí-nekolikanasobne-vzrostl>.
- [34] Zuzana Kubátová. *Velikonoční stopka: O svátcích odpojil ČEPS stovky zelených elektráren*. Seznam Zprávy. URL: <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/ekonomika-firmy-velikonocni-stopka-o-svatcich-odpojil-ceps-stovky-zelenych-elektraren-229281>.
- [35] Sára Mazúchová. *Odpojené soláry vyjdou draho. Česko nemá dost baterií na ukládání elektřiny*. Seznam Zprávy. URL: [https://www.idnes.cz/ekonomika/domaci/odpojeni-fotovoltaicke-elektrarny-ceps-baterie-solary-velikonocni-pondeli.A230418\\_171958\\_ekonomika\\_maz](https://www.idnes.cz/ekonomika/domaci/odpojeni-fotovoltaicke-elektrarny-ceps-baterie-solary-velikonocni-pondeli.A230418_171958_ekonomika_maz).
- [36] J. Knápek et al. *Klimaticko-energetické investice v teplárenství 2014-2030*. ČVUT v Praze, 2021. URL: <https://iuhli.cz/teplarny-maji-o-uhli-za-limity-zajem/>.
- [37] *Horkovod z Temelína dodal loni Budějovicím 258 TJ tepla, nejvíc je to v mrazech*. oEnergetice.cz. URL: <https://oenergetice.cz/teplo/horkovod-z-temelina-dodal-loni-budejovicim-258-tj-tepla-nejvic-je-to-v-mrazech>.
- [38] *V Litoměřicích hloubí dva průzkumné vrty kvůli geotermální energii*. oEnergetice.cz. URL: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje-energie/v-litomerich-hloubi-dva-pruzkumne-vrty-kvuli-geotermalni-energii>.

- [39] *Skupina Veolia plánuje v přerovské teplárně vyrábět palivo z odpadu.* oEnergetice.cz, 20. pros. 2023. URL: <https://oenergetice.cz/teplo/skupina-veolia-planuje-v-prerovske-teplarne-vyrabet-palivo-z-odpadu>.
- [40] *Odborníci zjišťují, zda by se teplo z haldy v Ostravě dalo využít k vytápění.* oEnergetice.cz, 17. říj. 2023. URL: <https://oenergetice.cz/teplo/odbornici-zjistuji-zda-by-se-teplo-z-haldy-v-ostrave-dalo-vyuzit-k-vytapeni>.
- [41] Josef Hodboď. *Které teplárny spalující uhlí si zaslouží modernizační podporu?* TZB-info. URL: <https://energetika.tzb-info.cz/21532-ktere-teplarny-spalujici-uhli-si-zaslouzi-modernizacni-podporu>.
- [42] Adam Hirsch, Yael Parag a Josep Guerrero. „Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90 (2018), s. 402–411. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.040>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211830128X>.
- [43] Anuj Sharma et al. „Approaches Leading to Different Definitions of Smart Grid: A Review“. In: *2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC)*. 2018, s. 600–606. DOI: 10.1109/PEEIC.2018.8665663.
- [44] Ilhami Colak. „Introduction to smart grid“. In: *2016 International Smart Grid Workshop and Certificate Program (ISGWCP)*. 2016, s. 1–5. DOI: 10.1109/ISGWCP.2016.7548265.
- [45] *2012/148/EU: Commission Recommendation of 9 March 2012 on preparations for the roll-out of smart metering systems.* Břez. 2012.
- [46] „IEEE Recommended Practice for Smart Grid Communications Equipment – Test Methods and Installation Requirements“. In: *IEEE Std 1909.1-2014* (pros. 2014), s. 1–40. DOI: 10.1109/IEEESTD.2014.6991459.
- [47] C Alaton a F Tounquet. *Benchmarking smart metering deployment in the EU28 Final report.* European Commission a Directorate-General for Energy - Publications Office, 2020. DOI: [doi/10.2833/492070](https://doi.org/10.2833/492070).
- [48] *Vyhláška č. 359/2020 Sb. Vyhláška o měření elektřiny.*
- [49] Ryan Daws. *European smart gas meters penetration hit 45 percent in 2023.* IoTnews. URL: <https://www.iottechnews.com/news/2024/mar/07/european-smart-gas-meters-penetration-hit-45-percent-2023/>.
- [50] Dmitry Baimel, Saad Tapuchi a Nina Baimel. „Smart Grid Communication Technologies“. In: *Journal of Power and Energy Engineering* 04 (led. 2016), s. 1–8. DOI: 10.4236/jpee.2016.48001.
- [51] Nataša S. Živic, Obaid Ur-Rehman a Christoph Ruland. „Evolution of smart metering systems“. In: *2015 23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*. 2015, s. 635–638. DOI: 10.1109/TELFOR.2015.7377547.
- [52] *Update on the rollout of smart meters. Seventy-Second Report of Session 2022–23.* House of Commons Committee of Public Accounts, 2023. URL: <https://committees.parliament.uk/publications/41730/documents/206773/default/>.

- [53] *Upgrading first-generation (SMETS1) smart meters*. Data Communications Compan, 2023. URL: <https://www.smartdcc.co.uk/our-smart-network/current-programmes/smets1-enrolment-and-adoption/>.
- [54] Thomas Hartmann et al. „Generating realistic Smart Grid communication topologies based on real-data“. In: *2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. 2014, s. 428–433. DOI: 10.1109/SmartGridComm.2014.7007684.
- [55] Jiří Zilvar. *Sonnen: čím více přetoků, tím lépe. Jak to vypadá, když je fotovoltaika žádoucí*. TZB-info. URL: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/20494-sonnen-cim-vice-pretoku-tim-lepe-jak-to-vypada-kdyz-je-fotovoltaika-zadouci>.
- [56] Jiří Zilvar. *Oliver Koch: nakupujte elektrinu od sousedů! Je čistá a dostupná*. TZB-info. URL: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/20528-oliver-koch-nakupujte-elektinu-od-sousedu-je-cista-a-dostupna>.
- [57] *Domácnosti se možná budou podílet na stabilitě sítě, ČEPS to úspěšně otestoval*. ČTK. URL: <https://www.ceskenoviny.cz/zpravy/2473083>.
- [58] Jiří Zilvar. *Domácnosti s baterií jako zdroj flexibility pro podpůrné služby*. TZB-info. URL: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/22151-domacnosti-s-baterii-jako-zdroj-flexibility-pro-podpurne-sluzby>.
- [59] Martin Glogar. *Novela energetického zákona*. Právní prostor. URL: <https://www.pravniprostor.cz/zmeny-v-legislative/vyslo-ve-sbirce-zakonu/novela-energetickeho-zakona6>.
- [60] Eduard Majling. *Odborníci zjišťují, zda by se teplo z haldy v Ostravě dalo využít k vytápění*. oEnergetice.cz. URL: <https://oenergetice.cz/elektrina/hdo-smart-grid-fungujici-jiz-pul-stoleti>.
- [61] S. Rauf et al. „Domestic Electrical Load Management Using Smart Grid“. In: *Energy Procedia* 100 (2016). 3rd International Conference on Power and Energy Systems Engineering, CPESE 2016, 8-10 September 2016, Kitakyushu, Japan, s. 253–260. ISSN: 1876-6102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.174>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216311353>.
- [62] Félix Iglesias Vázquez et al. „Electricity Load Management in Smart Home Control“. In: led. 2011.
- [63] David Fischer a Hatef Madani. „On heat pumps in smart grids: A review“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70 (dub. 2017), s. 342–357. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.182.
- [64] Jan Budín. *V Německu otestují využití tepelných čerpadel pro stabilizaci sítě*. oEnergetice.cz. URL: <https://oenergetice.cz/prenos-elektriny/nemcku-otestuji-vyuziti-tepelnych-cerpadel-stabilizaci-site>.
- [65] João A. Peças Lopes, Filipe Joel Soares a Pedro M. Rocha Almeida. „Integration of Electric Vehicles in the Electric Power System“. In: *Proceedings of the IEEE* 99.1 (2011), s. 168–183. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2066250.

- [66] I. Sami et al. „A Bidirectional Interactive Electric Vehicles Operation Modes: Vehicle-to-Grid (V2G) and Grid-to-Vehicle (G2V) Variations Within Smart Grid“. In: *2019 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*. 2019, s. 1–6. DOI: 10.1109/CEET1.2019.8711822.
- [67] *Which Electric Cars Have Bidirectional Charging (V2L, V2G, V2H)?* zecar. URL: <https://zecar.com/resources/which-electric-cars-have-bidirectional-charging>.
- [68] *F-150 Lightning™ Intelligent Backup Power Frequently Asked Questions*. URL: <https://www.ford.ca/support/how-tos/electric-vehicles/home-charging/f-150-lightning-intelligent-backup-power-faqs/>.
- [69] Chunhua Liu et al. „Opportunities and Challenges of Vehicle-to-Home, Vehicle-to-Vehicle, and Vehicle-to-Grid Technologies“. In: *Proceedings of the IEEE* 101.11 (2013), s. 2409–2427. DOI: 10.1109/JPROC.2013.2271951.
- [70] *Nissan, TenneT and The Mobility House: Electric cars save surplus wind energy and reduce CO2*. Nissan News. URL: <https://europe.nissannews.com/en-GB/releases/release-e732548833d2fedc16dbc084e9002fa8-nissan-tennet-and-the-mobility-house-electric-cars-save-surplus-wind-energy-and-reduce-co2?>
- [71] *How Nissan is using electric cars to power disaster recovery*. 16. pros. 2020. URL: <https://uk.nissannews.com/en-GB/releases/release-fbbfa237498209134a3d52d94a269500-how-nissan-is-using-electric-cars-to-power-disaster-recovery>.
- [72] Dan T. Ton a Merrill A. Smith. „The U.S. Department of Energy’s Microgrid Initiative“. In: *The Electricity Journal* 25.8 (2012), s. 84–94. ISSN: 1040-6190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tej.2012.09.013>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040619012002254>.
- [73] Benjamin Kroposki, Thomas Basso a Richard DeBlasio. „Microgrid standards and technologies“. In: *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. 2008, s. 1–4. DOI: 10.1109/PES.2008.4596703.
- [74] Vijay Kumar Garg a Sudhir Sharma. „Overview on Microgrid System“. In: *2018 Fifth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC)*. 2018, s. 694–699. DOI: 10.1109/PDGC.2018.8745849.
- [75] Yeliz Yoldaş et al. „Enhancing smart grid with microgrids: Challenges and opportunities“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72 (květ. 2017), s. 205–214. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.064.
- [76] Jan Staněk. *296 kWp hybridní fotovoltaika s 360 kWh úložištěm a kogenerací / Electro Dad 272*. YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=6cdikQJKNL0>.
- [77] *ADLER Czech zahajuje provoz unikátního hybridního fotovoltaického systému*. Ministerstvo průmyslu a obchodu. URL: <https://www.mpo.cz/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/adler-czech-zahajuje-provoz-unikatniho-hybridniho-fotovoltaikeho-systemu--248892/>.



- [78] *Pořízení akumulace včetně OZE ve společnosti MALFINI, a.s. (dříve ADLER Czech a.s.)* Young4Energy. URL: <https://young4energy.cz/ukazka-reference/adler/#>.
- [79] Jan Staněk. *210 kWp fotovoltaika a 408 kWh úložiště Strojíren Rumburk - příběh* | *Electro Dad 223*. YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=91BzSL1ISCE>.
- [80] *Strojírny Rumburk, FVE 211kW*. SEPO COMPANY s.r.o. URL: <https://sepocompany.cz/reference/strojirny-rumburk-fve-211kw/>.
- [81] *Mapy.cz*. Seznam.cz, 2024. URL: <https://mapy.cz>.
- [82] *Špičkovací stanice AERS v Rumburku funguje k plné spojenosti majitele strojíren i generálního dodavatele*. TZB-info. URL: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/21289-spickovaci-stanice-aers-v-rumburku-funguje-k-plne-spojenosti-majitele-strojiren-i-generalniho-dodavatele>.
- [83] *New SAS system handed over to Strojírny Rumburk s.r.o. AERS*. URL: <https://www.aers.cz/en/nove-zarizeni-sas-predano-strojirnam-rumburk>.
- [84] Jan Staněk. *610 kWh baterie ve fabrice - prevence mikrovýpadků v robotizované výrobě* | *Electro Dad 252*. YouTube. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=bs0\\_QNyxv8k](https://www.youtube.com/watch?v=bs0_QNyxv8k).
- [85] Jan Staněk. *891 kWp fotovoltaiky + 10 kW větru + 3 MWh úložiště ve Fenixu Jeseník* | *Electro Dad 549*. YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=iwrCn-ExoIk>.
- [86] *Průmyslové bateriové úložiště SAS*. AERS. URL: <https://www.aers.cz/userfiles/files/velkokapacitni-bateriove-uloziste-sas.pdf>.
- [87] *Energetický koncept Fenix - finální výsledky 2023*. Fenix Group. URL: [https://www.fenixgroup.cz/cs/aktuality/energeticky-koncept-fenix-finální-vysledky-2023%3Futm\\_content%3Dcs\\_news](https://www.fenixgroup.cz/cs/aktuality/energeticky-koncept-fenix-finální-vysledky-2023%3Futm_content%3Dcs_news).
- [88] Jiří Zilvar. *Huawei v ČR instalovalo svou první kontejnerovou baterii, podporuje průmyslový areál v Hodoníně*. TZB-info. URL: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/26323-huawei-v-cr-instalovalo-svou-prvni-kontejnerovou-baterii-podporuje-prumyslovy-areal-v-hodonine>.
- [89] *Tabačka Hodonín*. Tabačka Hodonín, s.r.o. URL: <https://www.tabacka.eu/>.
- [90] *4 MWh: Hodonínský průmyslový areál Tabačka získal unikátní bateriové úložiště*. Solární novinky.cz. URL: <https://www.solarninovinky.cz/4-mwh-hodoninsky-prumyslovy-areal-tabacka-ziskal-unikatni-bateriove-uloziste/>.
- [91] *PVS PLUS - projekt průmyslového areálu Tabačka Hodonín – 3MWh bateriové úložiště*. YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=WeQ0jXEP9Yg>.
- [92] Jan Staněk. *Venkov v balíku - o energetické nezávislosti obcí (jako v Mikolajicích)* | *Electro Dad 348*. YouTube. URL: [https://www.youtube.com/watch?v=\\_sNWCBY6jE](https://www.youtube.com/watch?v=_sNWCBY6jE).
- [93] *Kogenerační kotel Wave*. Obec Mikolajice. URL: <https://www.mikolajice.cz/obec/kogeneracni-kotel-wave-1/>.

- [94] *Exkurzie za příkladmi dobré praxe: Mikolajice*. YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=dog92EwiqY8>.
- [95] Václav Vodička a Zbyněk Zelený. *Wave – vývoj a experimentální provoz malého kogeneračního zařízení na biomasu*. TZB-info. URL: <https://energetika.tzb-info.cz/kogenerace/16842-wave-vyvoj-a-experimentalni-provoz-maleho-kogeneracniho-zarizeni-na-biomasu>.
- [96] Jan Špale. *Wave120 - kogenerační ORC jednotka na dřevní štěpku v kontejnerovém provedení*. allForPower. URL: <https://allforpower.cz/obnovitelne-zdroje/wave120-kogeneracni-orc-jednotka-na-drevni-stepku-v-kontejnerovem-provedeni-322>.
- [97] *Výstavba zdroje na KVET z biomasy (OZE) s akumulací energie a instalací FVE doplněná o inteligentní řídicí systém pro Služby Mikolajice s.r.o.* Young4Energy. URL: <https://young4energy.cz/ukazka-reference/mikolajice/#>.
- [98] *Vytvoření malé lokální distribuční sítě pro distribuci tepla a elektřiny s prvky SMART GRID - inteligentním řídicím systémem a řízením spotřeby pro tři objekty v majetku Města Budišov nad Budišovkou*. Young4Energy. URL: <https://young4energy.cz/ukazka-reference/budisov/#>.
- [99] *Budišov nad Budišovkou má unikátní síť pro teplo a elektřinu*. TZB-info. URL: <https://oze.tzb-info.cz/125303-budisov-nad-budisovkou-ma-unikatni-sit-pro-teplo-a-elektrinu>.
- [100] *Vytvoření malé lokální distribuční sítě pro distribuci tepla a elektřiny s prvky SMART GRID – inteligentním řídicím systémem a řízením spotřeby pro tři objekty v majetku Města Budišov nad Budišovkou*. Budišov nad Budišovkou. URL: <https://www.budisov.eu/mesto/projekty/zrealizovane-projekty/vytvoreni-male-lokalni-distribucni-site-pro-distribuci-tepla-a-elektriny-s-prvky-smart-grid-inteligentnim-ridicim-systemem-a-rizenim-spotreby-pro-tri-objekty-v-majetku-mesta-budisov-nad-budisovkou/>.
- [101] *Dobrá praxe z obcí a měst - Inovace na venkově - Budišov nad Budišovkou*. Rok v obci. URL: <http://www.rokvobci.cz/dobra-praxe-z-obci-a-mest/detail/214-budisov-nad-budisovkou---pro-t/>.
- [102] *Exkurzie za příkladmi dobré praxe: Obec Kněžice*. YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=BkUs0QfRY0s>.
- [103] *Kněžice: komplexní energetické řešení*. Časopis stavebnictví. URL: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-knezice-komplexni-energeticke-reseni.html>.
- [104] *V Kněžicích platí za teplo 16 let stejně, plánují lokální distribuci elektřiny*. ČTK. URL: <https://www.ceskenoviny.cz/zpravy/2223388>.
- [105] Milan Jedlička. *Kravin s dojícím robotem Lely Astronaut energeticky podporuje fotovoltaika, která pomůže i s elektrifikací farmy*. Agroportal24h.cz. URL: <https://www.agroportal24h.cz/clanky/kravin-s-dojicim-robotem-lely-astronaut-energeticky-podporuje-fotovoltaika-ktera-pomuze-i-s-elektrifikaci-farmy>.

- [106] *Zemědělská společnost Bruzovice si bude nově vyrábět energie sami.* Young4Energy. URL: <https://young4energy.cz/bruzovice-si-budou-nove-vyrabet-energii-sami/>.
- [107] *Instalace fotovoltaické elektrárny s bateriovým systémem s nezbytnými úpravami elektrorozvodů v Zemědělské společnosti v Bruzovicích.* Young4Energy. URL: <https://young4energy.cz/ukazka-reference/bruzovice/#>.
- [108] *About Eigg.* The Isle of Eigg. URL: <http://isleofeigg.org/>.
- [109] Zbigniew Chmiel a Subhes C. Bhattacharyya. „Analysis of off-grid electricity system at Isle of Eigg (Scotland): Lessons for developing countries“. In: *Renewable Energy* 81 (2015), s. 578–588. ISSN: 0960-1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.061>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115002438>.
- [110] *Isle of Eigg.* Wind a Sun Powering the future. URL: <https://www.windandsun.co.uk/pages/isle-of-eigg>.
- [111] Lewis Breen. „Modelling, Optimisation and the Lessons Learned of a Renewable Based Electrical Network – The Isle of Eigg“. Dipl. pr. University of Strathclyde Engineering, 2015.
- [112] Steve Bush. *Electronica: Power grid supercapacitor for Scottish island.* ElectronicWeekly. URL: <https://www.electronicweekly.com/news/electronica/electronica-power-grid-supercapacitor-scottish-island-2018-11/>.
- [113] Kyrre Sundseth et al. *Deliverable D2.1: Analysis of the economic and regulatory framework of the technological demonstrators.* URL: <https://www.remote-euproject.eu/remote18/rem18-cont/uploads/2022/04/REMOTE-approved-version-D2.1.pdf>.
- [114] Paolo Marocco et al. *Deliverable D2.2: Technical specification of the technological demonstrators.* URL: <https://www.remote-euproject.eu/remote18/rem18-cont/uploads/2022/04/REMOTE-approved-version-D2.2.pdf>.
- [115] L. Baldini. *Deliverable D3.8: First report on plant operation and maintenance and data acquisition for DEMO 2 - Greece.* URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/779541/results/de>.
- [116] Alexandros Kafetzis et al. *Deliverable D3.9: Final report on plant operation and maintenance and data acquisition for DEMO 2 – Greece.* URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/779541/results/de>.
- [117] Laura Villacián a Pilar Gascón. *Deliverable D3.10: First report on plant operation and maintenance and data acquisition for DEMOs Group 1 – Spain.* URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/779541/results/de>.
- [118] Laura Villacián, Pilar Gascón a Santiago Díaz. *Deliverable D3.12: Final report on plant operation and maintenance and data acquisition for DEMOs Group 1 – Spain.* URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/779541/results/de>.
- [119] Joathan Jones. *Green hydrogen for heating to pilot in Canary Islands.* URL: <https://www.powerengineeringint.com/hydrogen/green-hydrogen-for-heating-to-pilot-in-canary-islands/>.

- [120] *Wolftank Iberia introduces hydrogen refueling to the Canary Islands*. URL: <https://wolftankgroup.com/news/wolftank-iberia-introduces-hydrogen-refueling-to-the-canary-islands/>.
- [121] Darrell Proctor. *Innovative Microgrid Will Power Finnish Distribution Center*. URL: <https://www.powermag.com/innovative-microgrid-will-power-finnish-distribution-center/>.
- [122] *Tiedote: Lidl vie ympäristövastuun uudelle tasolle*. URL: <https://finnwind.fi/2018/02/01/tiedote-lidl-vie-ymparistovastuun-uudelle-tasolle/>.
- [123] Eero Pehkonen. *Teollinen mikroverkko kysyntäjoustoja hyödyntävän energianhallintajärjestelmän osana*. URL: <https://www.sahkomaailma.fi/teollinen-mikroverkko-kysyntajoustoja-hyodyntavan-energianhallintajarjestelman-osana/>.
- [124] *Lidl's distribution centre has the most effective internal energy storage and micro-network in Finland*. URL: <https://www.sweco.fi/en/insight/news/lidls-distribution-centre-has-the-most-effective-internal-energy-storage-and-micro-network-in-finland/>.
- [125] *MicroGrid Tour*. Stone Edge Farm MicroGrid. URL: <https://sefmicrogrid.com/overview/tour/>.
- [126] *MicroGrid Components*. Stone Edge Farm MicroGrid. URL: <https://sefmicrogrid.com/overview/components/>.
- [127] Jorge Elizondo. *Stone Edge Farm Microgrid*. California Energy Commission Microgrid Workshop.
- [128] *Case study: Providing Power During the 2017 California Wildfire Power Outages*. Heila. URL: [https://heilatech.com/wp-content/uploads/2023/08/Heila\\_Tech\\_Stone\\_Edge\\_Farms\\_Case\\_Study\\_8.5x11.pdf](https://heilatech.com/wp-content/uploads/2023/08/Heila_Tech_Stone_Edge_Farms_Case_Study_8.5x11.pdf).
- [129] Kyle Field. *Stone Edge Farm — A Sandbox For Microgrid Development*. Clean Technica. URL: <https://cleantechnica.com/2017/11/24/stone-edge-farm-sandbox-microgrid-development/>.
- [130] Emilliano Bellini. *Sumitomo reveals testing results of redox flow battery project in California*. pv magazine International. URL: <https://www.pv-magazine.com/2023/07/10/sumitomo-tests-redox-flow-battery-as-microgrid-in-california/>.
- [131] *Go with the flow: Battery system in Bonita to be tested for use in microgrids*. The San Diego Union-Tribune. URL: <https://www.sandiegouniontribune.com/business/story/2021-01-28/flow-battery-project-extended>.
- [132] Christiana Honsberg a Stuart Bowden. *Properties of Sunlight: Arbitrary Orientation and Tilt*. pvEducation. URL: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/arbitrary-orientation-and-tilt>.
- [133] *Specific photovoltaic power output*. Global Solar Atlas. URL: <https://globalsolaratlas.info/map>.
- [134] Alpesh Desai et al. „Multiple MPPT based String Inverter effect on Annual performance: Observations at Utility scale Solar PV Plants“. In: *2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. 2021, s. 0011–0017. DOI: 10.1109/PVSC43889.2021.9518823.

- [135] *Větrná energie*. Ústav fyziky atmosféry. URL: <https://www.ufa.cas.cz/stuktura-ustavu/oddeleni-meteorologie/projekty/vetrna-energie/>.
- [136] Adel El-Shahat et al. „Bladeless Wind Turbine (Case Study)“. In: *2019 SoutheastCon*. 2019, s. 1–5. DOI: 10.1109/SoutheastCon42311.2019.9020510.
- [137] Peter Kozak. „Effects of Unsteady Aerodynamics on Vertical-Axis Wind Turbine Performance“. Dis. pr. Čvn. 2014.
- [138] Oscar Carranza Castillo et al. „Comparison of Power Coefficients in Wind Turbines Considering the Tip Speed Ratio and Blade Pitch Angle“. In: *Energies* 16.6 (2023). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en16062774. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/6/2774>.
- [139] Erich Hau. *Windkraftanlagen: Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*. Led. 2008. ISBN: 978-3-540-72150-5. DOI: 10.1007/978-3-540-72151-2.
- [140] N. S. Patil a Y. N. Bhosle. „A review on wind turbine generator topologies“. In: *2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)*. 2013, s. 625–629. DOI: 10.1109/ICPEC.2013.6527733.
- [141] Marek Korzeniewski. „AC/DC/AC converter in small hydroelectric power plant“. In: *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences* 59 (pros. 2011), s. 507–511. DOI: 10.2478/v10175-011-0062-6.
- [142] Jiří Horák a Petr Kubesa. *O spalování tuhých paliv v lokálních topeništích*. TZBinfo. URL: <https://energetika.tzb-info.cz/8618-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-1>.
- [143] Linstrom Peter. *NIST Chemistry WebBook*. National Institute of Standards a Technology.
- [144] Václav Vodička. „Optimalizace lamelového expandéru pro tepelné oběhy nízkých výkonů“. Dis. pr. ČVUT v Praze, 2019.
- [145] David Ramsey et al. „Comparison of equivalent circuit battery models for energetic studies on electric vehicles“. In: *2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. 2020, s. 1–5. DOI: 10.1109/VPPC49601.2020.9330891.
- [146] *A Guide to Understanding Battery Specifications*. MIT Electric Vehicle Team. URL: [http://web.mit.edu/evt/summary\\_battery\\_specifications.pdf](http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf).
- [147] J. Jung, L. Zhang a J. Zhang. *Lead-Acid Battery Technologies: Fundamentals, Materials, and Applications*. CRC Press, 2015. DOI: <https://doi-org.ezproxy.techlib.cz/10.1201/b18665>.
- [148] *Dělení automobilových baterií*. URL: <https://www.zpetnyodber.eu/komodity/autobaterie/>.
- [149] *How do Lithium Batteries Work?* Battery University. URL: <https://batteryuniversity.com/article/bu-204-how-do-lithium-batteries-work>.
- [150] *Types of Lithium-Ion*. Battery University. URL: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>.

- [151] Seham Shahid a Martin Agelin-Chaab. „A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries“. In: *Energy Conversion and Management: X* 16 (2022), s. 100310. ISSN: 2590-1745. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100310>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174522001337>.
- [152] G. Zhao a R.R. Gaddam. *Handbook of Sodium-Ion Batteries: Materials and Characterization*. Jenny Stanford Publishing, 2023. ISBN: 9789814968157. URL: <https://books.google.cz/books?id=7SpgzweECAAJ>.
- [153] Tomáš Reichl. *Sodíkové baterie - konstrukce, princip činnosti a aplikace*. oEnergetice.cz. URL: <https://oenergetice.cz/elektrina/sodikove-baterie-konstrukce-princip-cinnosti-a-aplikace>.
- [154] Jiří Opletal. *Volkswagen-backed JAC Yiwei EV powered by sodium-ion battery starts mass production in China*. URL: <https://carnewschina.com/2023/12/27/volkswagen-backed-jac-yiwei-ev-powered-by-sodium-ion-battery-starts-mass-production-in-china/>.
- [155] Álvaro Cunha et al. „Vanadium redox flow batteries: a technology review“. English. In: *International journal of energy research* 39.7 (2015), s. 889–918.
- [156] Petr Dvořák. „Materiály pro superkondenzátory“. Dis. pr. VUT v Brně, 2014.
- [157] Abid Soomro, Keith R. Pullen a Mustafa E. Amiryar. „Hybrid PV System with High Speed Flywheel Energy Storage for Remote Residential Loads“. In: *Clean Technologies* 3.2 (2021), s. 351–376. ISSN: 2571-8797. DOI: 10.3390/cleantechnol3020020. URL: <https://www.mdpi.com/2571-8797/3/2/20>.
- [158] Luboš Kotek. *Specifika analýzy rizik vodíku*. AUTOMA Časopis pro automatizační techniku. URL: [https://automa.cz/cz/casopis-clanky/specifika-analyzy-rizik-vodiku-2006\\_11\\_31466\\_639/](https://automa.cz/cz/casopis-clanky/specifika-analyzy-rizik-vodiku-2006_11_31466_639/).
- [159] Zdeněk Trinkewitz. *Pohonné hmoty „na zeleno“*. ELEKTRO Časopis pro elektrotechniku. URL: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/pohonne-hmoty-na-zeleno--11455>.
- [160] *Vodíková strategie České republiky*. Ministerstvo průmyslu a obchodu. URL: [https://www.mpo.gov.cz/images/Vod\\_kov\\_\\_\\_strategie\\_26.7.2021.pdf](https://www.mpo.gov.cz/images/Vod_kov___strategie_26.7.2021.pdf).
- [161] Natalie Marchant. *Grey, blue, green – why are there so many colours of hydrogen?* World Economic Forum. URL: <https://www.weforum.org/agenda/2021/07/clean-energy-green-hydrogen/>.
- [162] D. Linden a T. Reddy. *Handbook of Batteries*. McGraw-Hill handbooks. McGraw-Hill Education, 2001. ISBN: 9780071414753. URL: <https://books.google.cz/books?id=XquySsZp5jsC>.