

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra materiálů a technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Využití aktuálních technologií pro rychlé vyrovnávání výkonových bilancí v
podmínkách ČR

Autor práce:

Marek Vácha

Vedoucí práce:

Ing. Václav Mužík, Ph.D.

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Marek VÁCHA**
Osobní číslo: **E19B0068P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Téma práce: **Využití aktuálních technologií pro rychlé vyrovnávání výkonových bilancí v podmínkách ČR**
Zadávací katedra: **Katedra materiálů a technologií**

Zásady pro vypracování

1. Popište aktuálně využívané technologie pro rychlé vyrovnávání výkonové bilance v distribučních a přenosových sítích.
2. Zhodnoťte jejich aplikovatelnost v podmínkách provozu ČR.
3. Vytvořte model provozu vyrovnávacího zařízení v jednotlivých režimech (peak shaving, load shifting atd.).
4. Vyhodnoťte provoz z hlediska technického, ekologického a ekonomického.



Rozsah bakalářské práce: **30 – 40**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

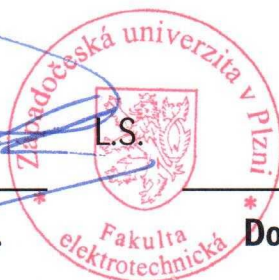
Seznam doporučené literatury:

1. S. Duerr, C. Ababei and D. M. Ionel, „Load balancing with energy storage systems based on co-simulation of multiple smart buildings and distribution networks,“ *2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, San Diego, CA, USA, 2017, pp. 175-180, doi: 10.1109/ICRERA.2017.8191262.
2. IRENA – International Renewable Energy Agency, „Virtual Power Lines – Innovation landscape brief“, Abu Dhabi, 2020.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Mužík, Ph.D.**
Research and Innovation Centre for Electrical
Engineering

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá problematikou jak akumulčních zařízení v distribučních sítích ze strany spotřebitele, tak možností využití takového zařízení pro poskytování podpůrných frekvenčních služeb. V práci jsou nastíněny aktuální technologie pro rychlé vyrovnávání výkonové bilance a jejich možná aplikace na území ČR. Jsou zde i shrnuty legislativní podmínky pro poskytování podpůrných služeb výkonové bilance. Praktická část se věnuje simulaci integrace kogenerační jednotky, fotovoltaické elektrárny a vhodně velkého bateriového úložiště do blíže nespecifikovatelného objektu. Závěrem práce je technické, ekologické a ekonomické zhodnocení využití bateriového úložiště a možná aplikovatelnost.

Klíčová slova

Peak-shaving, load-shifting, technologie pro akumulaci, bateriové úložiště, výkonová bilance.

Abstract

The bachelor's thesis deals with the issue of both storage facilities in distribution networks by the consumer and the possibility of using such equipment to provide frequency supporting services. The work outlines the current technologies for rapid balancing of the power balance and their possible application in the Czech Republic. It also summarizes the legislative conditions for the provision of performance balance support services. The practical part deals with the integration of a co-generation unit, a photovoltaic power plant and a suitably large battery storage facility into an unspecified building. The conclusion of the work is a technical, ecological and economic evaluation of the use of battery storage and possible applicability.

Keywords

Peak-shaving, load-shifting, energy storage technologies, battery storage, energy balance.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Václavu Mužikovi, Ph.D. za jeho přístup, metodické pokyny a cenné profesionální rady, které vedly k vypracování této práce.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	vi
Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	viii
1 Aktuálně využívané technologie pro rychlé vyrovnávání výkonové bilance	2
1.1 Výkonová bilance	2
1.1.1 Peak-shaving	3
1.1.2 Load-shifting	3
1.2 Mechanické systémy	3
1.2.1 Přečerpávací vodní elektrárny	3
1.2.2 Akumulační elektrárny využívající stlačený vzduch	4
1.2.3 Setrvačníky	5
1.2.4 Plynové elektrárny	6
1.2.5 Diesel generátory	7
1.3 Elektrochemické systémy	7
1.3.1 Olověné akumulátory	8
1.3.2 Lithiové akumulátory	8
1.3.3 Sodíko-sírové akumulátory	9
1.3.4 Nikl-kadmiové akumulátory	9
1.3.5 Průtočné akumulátory	10
1.4 Superkapacitory	10
1.5 Supravodivý indukční akumulátor	11
1.6 Výroba syntetického paliva - PtG	11
1.7 Tepelná akumulace	12
2 Aplikovatelnost technologií v podmínkách provozu ČR	14
2.1 Systémové služby - SyS	14
2.1.1 Primární regulace frekvence	14
2.1.2 Sekundární regulace frekvence a výkonu	14
2.1.3 Terciální regulace výkonu	15
2.1.4 Další prostředky pro zajištění SyS:	15
2.2 Podpůrné služby - PpS	15
2.2.1 Zálohy pro automatickou regulace frekvence – FCR	16
2.2.2 Regulace výkonové rovnováhy s automatickou aktivací – aFRR	16

2.2.3	Regulace výkonové rovnováhy s manuální aktivací – $mFRR_t$	17
2.2.4	Proces náhrady záloh – RR	17
2.2.5	Proces vyrovnávání výkonové bilance	17
2.2.6	Akumulační a agregované zařízení poskytující podpůrné služby	19
3	Model provozu vyrovnávacího zařízení	20
3.1	Analyzovaná data	20
3.2	Peak-shaving	21
3.3	Load-shifting	23
3.4	Zhodnocení modelu	26
4	Vyhodnocení provozu	28
4.1	Hledisko technické	28
4.1.1	Parametry navrhovaného řešení	28
4.2	Hledisko ekologické	30
4.3	Hledisko ekonomické	30
4.3.1	Cena elektrické energie	30
5	Závěr	33
	Seznam použité literatury	37

Seznam použitých symbolů a zkratek

Značka	Popis
PDS	Provozovatel distribuční soustavy
PPS	Provozovatel Přenosové soustavy
ČEPS	Česká energetická přenosová soustava
ČEZ	České energetické závody
DS	Distribuční soustava
PS	Přenosová soustava
Sys	Systémové služby
PpS	Podpůrné služby
SRUQ	Sekundární regulace U/Q
FCR	Zálohy pro automatickou regulaci frekvence
aFRR	Regulace výkonové rovnováhy s automatickou aktivací
mFRR	Regulace výkonové rovnováhy s manuální aktivací
RR	Proces náhrady záloh
OP	Ostrovní provoz
BS	Start ze tmy
SOGL	NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2017/1485 ze dne 2. srpna 2017, kterým se stanoví rámcový pokyn pro provoz elektroenergetických přenosových soustav.
EBGL	NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2017/2195 ze dne 23. listopadu 2017, kterým se stanoví rámcový pokyn pro obchodní zajišťování výkonové rovnováhy v elektroenergetice
OTE	Operátor trhu s elektřinou
ERÚ	Energetický regulační úřad

Seznam obrázků

1.1	Graficky znázorněná metoda peak-shavingu	3
1.2	Graficky znázorněná metoda load-shiftingu	3
1.3	Schéma otevřeného a uzavřeného systému [5]	4
1.4	Schéma setrvačnicku [7]	6
1.5	Schéma plynové elektrárny [17]	7
2.1	Proces vyrovnávání výkonové bilance [32]	18
3.1	Graf spotřebované energie po odečtení výroby	21
3.2	Závislost počtu překročení na nastaveném rezervovaném příkonu	22
3.3	Grafy po použití metody peak-shavingu	22
3.4	Graf zobrazující spotřebu pro jeden den	23
3.5	Graf zobrazující spotřebu v jednotlivých dnech v týdnu.	24
3.6	Grafy po použití metody load-shiftingu	24

Seznam tabulek

1.1	Porovnání jednotlivých parametrů vybraných technologií [7], [29], [30]	13
2.1	Možná aplikace technologií pro podpůrné služby	18
3.1	Rezervovaný příkon pro baterii 340 kWh	25
3.2	Rezervovaný příkon pro baterii 672 kWh	25
3.3	Rezervovaný příkon pro baterii 1008 kWh	26
3.4	Vliv jednotlivých baterií na spotřebu	26
4.1	Parametry úložiště TPS od TESVOLT [33]	28
4.2	Parametry úložiště TPS 336 kWh [33]	29
4.3	Parametry úložiště TPS 672 kWh [33]	29
4.4	Parametry úložiště TPS 1008 kWh [33]	29
4.5	Hodnoty emisního faktoru CO_2 pro vyrobenou elektřinu v ČR [34]	30
4.6	Vliv jednotlivých baterií na spotřebu objektu	31

Úvod

V současné době jsou jedny z hlavních témat společnosti ekologie a klimatické změny. Snažíme se proto přecházet na zdroje, které při výrobě neprodukují emise. U některých z těchto zdrojů je ovšem problematické docílit stabilní výroby elektrické energie. Jsou to především větrné a fotovoltaické elektrárny. Takové kolísání výroby pak může být jedním z faktorů pro vytvoření odchylky frekvence v celé síti. Frekvence je pro elektrizační soustavu jedna z hlavních parametrů, a proto je kladen důraz na její udržování na jmenovité hodnotě. Pro takovýto úkol pak jsou určeny výrobní nebo akumulární zařízení, schopny rychle reagovat na požadavek a začít dodávat či odebírat elektrickou energii.

V první kapitole této práce jsou popsány jednotlivé technologie pro rychlé vyrovnávání výkonové bilance v síti, které jsou aktuálně používány, či se jejich použití plánuje v následujících letech. Druhá kapitola pak popisuje legislativní požadavky pro poskytování služeb výkonné bilance na území ČR. Dále je zde vysvětlen postup vyrovnávání frekvence pomocí těchto služeb. Na závěr této kapitoly je nastíněna možná aplikace jednotlivých technologií právě pomocí těchto podpůrných služeb.

Praktická část se pak zabývá možnou integrací akumulárního zařízení do sítě ze strany spotřebitele. Z poskytnutých dat o spotřebě a výrobě elektrické energie obecného objektu je vytvořen model. Do tohoto modelu je pak implementováno bateriové úložiště, na které se aplikují metody peak-shavingu a load-shiftingu. Závěrem celé bakalářské práce je pak zhodnocení provozu takového zařízení z hlediska technického, ekologického a ekonomického.

1 Aktuálně využívané technologie pro rychlé vyrovnávání výkonové bilance

1.1 Výkonová bilance

Výkonová bilance je pojem popisující jeden z hlavních úkolů provozovatelů sítí, vyrovnat množství vyrobené a spotřebované elektrické energie. Základním předpokladem pro vyrovnání výkonové bilance je předvídání výroby a spotřeby elektrické energie. S nástupem obnovitelných zdrojů se proces předvídání zkomplikoval kvůli jejich nepravidelnosti a částečné nepředvídatelnosti. Výkonová rovnováha je ovlivněna především velkoobchodním trhem dle nabídky a poptávky. Na základě toho se uzavírají smlouvy o dodávce nebo odběru energie. Výchytky z rovnovážného stavu mohou být způsobeny například výpadkem výrobního bloku, rozdílem mezi nasmlouvanou dodávkou a spotřebou, nebo klimatickými změnami. [1]

Budeme-li uvažovat, že soustava je napájena fiktivním zdrojem, ustálený chod této soustavy lze vyjádřit vztahem: [2]

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_E \quad (kg \cdot m^2; rad/s; N \cdot m), \quad (1.1)$$

kde J vyjadřuje moment setrvačnosti soustrojí, $\frac{d\omega}{dt}$ vyjadřuje změnu úhlové rychlosti soustrojí v čase, M_T vyjadřuje moment na hřídeli a M_E vyjadřuje elektrický moment. Vztah se dá upravit na tvar: [2]

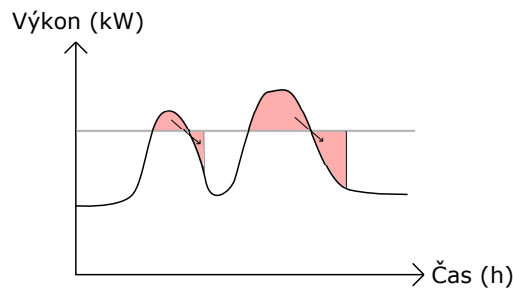
$$\frac{T_m \cdot S_{NG}}{f_n} \cdot \frac{df}{dt} = P_T - P_E = \Delta P \quad (s; MVA; Hz; Hz; MW), \quad (1.2)$$

kde T_m vyjadřuje mechanickou časovou konstantu soustrojí, S_{NG} vyjadřuje zdánlivý elektrický výkon soustrojí, f_n vyjadřuje síťovou frekvenci (50 Hz), $\frac{df}{dt}$ vyjadřuje změnu frekvence v čase, P_T vyjadřuje výkon na hřídeli, P_E vyjadřuje elektrický výkon a ΔP vyjadřuje změnu výkonu. Z tohoto vztahu je patrné, že změna výkonu přímo ovlivňuje změnu frekvence v síti.

Frekvence sítě je parametr stejný pro celou propojenou síť, na rozdíl od napětí. To se dá regulovat lokálně například odbočkami transformátorů. Nerovnováha výkonové bilance může ohrozit stabilitu celé propojené sítě. Výkonové bilance můžeme dosáhnout následujícími metodami. [1]

1.1.1 Peak-shaving

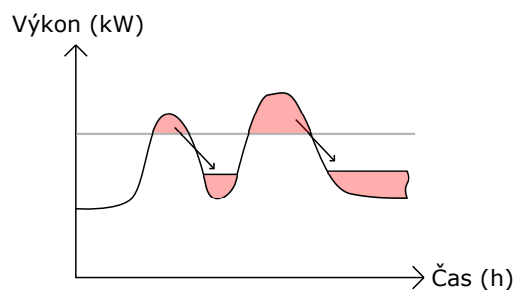
Pomocí peak-shavingu spotřebitel rychle a na krátkou dobu sníží spotřebu energie, aby se vyhnul prudkému nárůstu spotřeby. To je možné buď dočasným omezením výroby, aktivací systému výroby energie na místě nebo akumulací. [3], [4]



Obrázek 1.1: Graficky znázorněná metoda peak-shavingu

1.1.2 Load-shifting

Load-shifting je také metoda pro krátkodobé snížení spotřeby elektrické energie. Na rozdíl od peak-shavingu se však při této metodě snažíme přesunout množství energie do spodní části výkonového diagramu, popřípadě využít energii pod nulovou osou diagramu (ze strany spotřebitele se jedná o přebytky energie). [3]



Obrázek 1.2: Graficky znázorněná metoda load-shiftingu

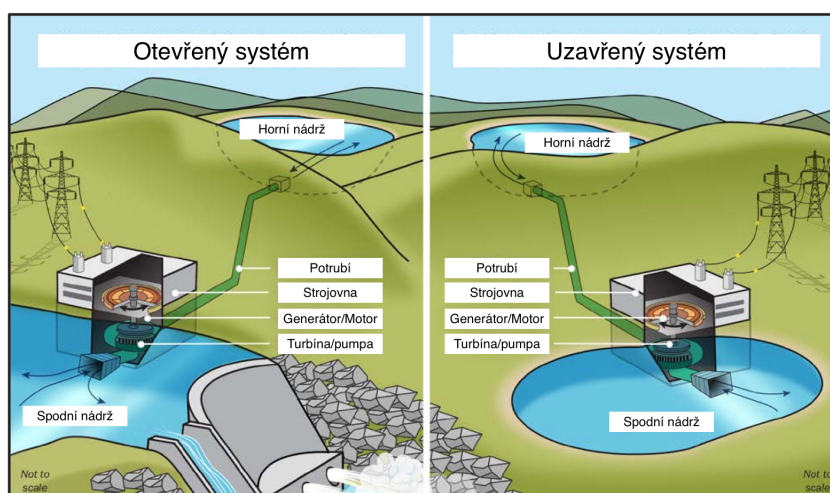
1.2 Mechanické systémy

1.2.1 Přečerpávací vodní elektrárny

Přečerpávací vodní elektrárny (PVE) jsou procentuálně stále největšími akumulátory elektrické energie v ČR i celosvětově. Energie je zde akumulována ve formě vody uložené ve výše položené nádrži. Při nedostatku energie se tato voda uvolní a roztáčí tak turbínu, která pohání generátor. Voda se poté ukládá v níže položené nádrži. Při přebytku energie se poté čerpá zpět do horní nádrže. PVE můžeme rozdělit na dva typy: [5]

- otevřený systém, kde dolní nádrž je přímo napojena na přírodní toky,

- uzavřený systém, kde celý systém je oddělen od přírodních toků. U tohoto systému je menší riziko negativních účinků na okolní ekosystém.



Obrázek 1.3: Schéma otevřeného a uzavřeného systému [5]

Mezi výhody PVE patří rychlá regulovatelnost, životnost a možnost dlouhodobého ukládání energie. Hlavní nevýhodou je nízká specifická energie. S tím souvisí vyšší nároky na výstavbu, jak geologické, tak finanční. Pro dosažení vyšší hustoty energie je potřeba zvýšit výškový rozdíl mezi nádržemi. To je však ne vždy jednoduše realizovatelné. [6], [7]

V současné době jsou v České republice provozované tři PVE – Štěchovice II, Dalešice a Dlouhé stráně. PVE Štěchovice II je součástí tzv. Vltavské kaskády (vodní elektrárny ležící na řece Vltavě) a je nejmenší z těchto třech, má výkon 45 MW. PVE Dalešice je umístěna v blízkosti JE Dukovany a má výkon 480 MW. Je navržena tak, aby v případě poruchy JE nahradila jeden její blok. PVE Dlouhé stráně je elektrárna s největší reverzní turbínou v Evropě, největším instalovaným výkonem v ČR a největším spádem v ČR. Její instalovaný výkon je 650 MW. Všechny jmenované PVE mohou najet z nečinnosti na plný výkon do 2 minut a jsou vybaveny Francisovo turbínou, která je schopna reverzního chodu. Oproti tomu největší PVE na světě je elektrárna Tři soutěsky v Číně. Instalovaný výkon je 26,3 GW. Ten by měl být do roku 2030 zvýšen na 100 GW. [8], [9]

1.2.2 Akumulační elektrárny využívající stlačený vzduch

Akumulační elektrárny využívající stlačený vzduch (Compressed Air Energy Storage-CAES) fungují na principu, kdy se energie akumuluje ve formě stlačeného vzduchu a může být uchovávána ve vytěžených solných jeskyních (zatím nejpoužívanější), opuštěných dolech nebo vyztužených vrtech. Při přebytku energie elektromotorem poháněný kompresor natlakuje vzduch a ukládá ho do úložných prostorů. Při potřebě energie se stlačený vzduch uvolní ze zásobníku a expanduje v plynové turbíně, které pak pohání elektrický generátor. CAES můžeme rozdělit na několik typů: [7], [10]

- diabatický proces (D-CAES), kdy teplo při kompresi je rozptýleno a před expanzí je stlačený vzduch ohříván v plynové spalovací komoře,
- adiabatický proces (A-CAES), kdy se stlačený vzduch a teplo ukládají do společného zásobníku,
- vylepšený adiabatický proces (AA-CAES), kdy teplo je skladováno zvlášť a využívá se pro předehřátí stlačeného vzduchu před expanzí v turbíně,
- izotermický proces (I-CAES), kdy akumulární nádrž je udržována při konstantní teplotě při nabíjení i vybíjení.

Účinnost diabatického procesu je přibližně 40 %. Akumulací a znovuvyužitím tepla se účinnost může zvýšit až na 70 %. Se vzrůstající akumulací tepla samozřejmě rostou i investiční náklady. Velkou výhodou je možnost dlouhodobé akumulace elektrické energie. Nevýhodami pak nutnost vhodných geologických podmínek pro výstavbu, nižší účinnost a vysoké investiční náklady. [11]

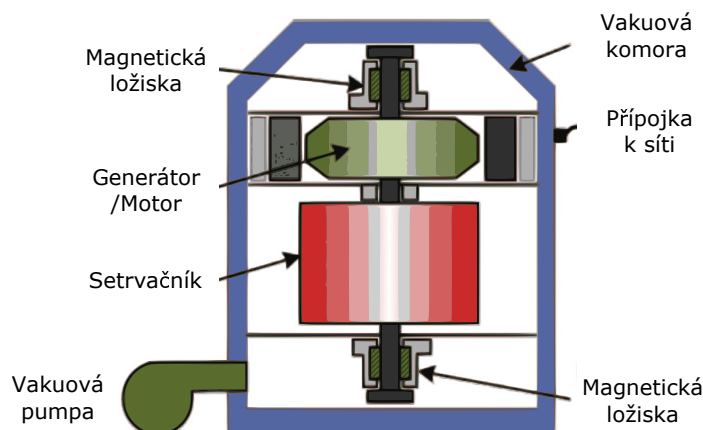
Jako první byla uvedena do provozu akumulární elektrárna v Huntorfu, Německo. Využívá diabatický systém a stlačený vzduch akumuluje ve dvou solných jeskyních o celkovém objemu 150 000 m³. Je schopna dodávat 290 MW pod dvě hodiny. Adiabatický systém jako první využil v německém projektu ADELE. Tato akumulární elektrárna má výkon 90 MW a může dodávat elektrickou energii do sítě až 4 hodiny. V roce 2016 byl v Číně úspěšně otestován prototyp AA-CAES o výkonu 100 MW. Jeho účinnost dosahovala 70 %. [11], [12]

1.2.3 Setrvačníky

Setrvačník je zařízení ukládající elektrickou energii ve formě rotačního pohybu. Obecně se skládají z hmoty uložené v ložiskách a roztočené na vysoké otáčky. Tato hmota je roztočena motorem při přebytku energie. Naopak při nedostatku je roztočený setrvačník připojen na motor, který generuje elektrickou energii. Historicky byl setrvačník vyroben z oceli uložen v konvenčních ložiskách. S vývojem nových technologií se ovšem ocel nahrazuje uhlíkovými vlákny, konvenční ložiska magnetickými a celé soustrojí je uloženo ve vakuu. Všechny tyto vlastnosti značně vylepšují účinnost zařízení. Rychlost otáčení setrvačníku je řádově desítky tisíc otáček za minutu. Mezi nevýhody patří především neschopnost dlouhodobé akumulace a krátký čas dodávání energie do sítě. Mezi hlavní výhody patří možnost dodávání energie s minimálním zpožděním a kvadratická závislost akumulované energie na úhlové rychlosti ústrojí viz. vztah 1.3:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (J; kg \cdot m^2; rad/s), \quad (1.3)$$

kde J je moment setrvačnosti a ω je úhlová rychlost setrvačníku.



Obrázek 1.4: Schéma setrvačnicku [7]

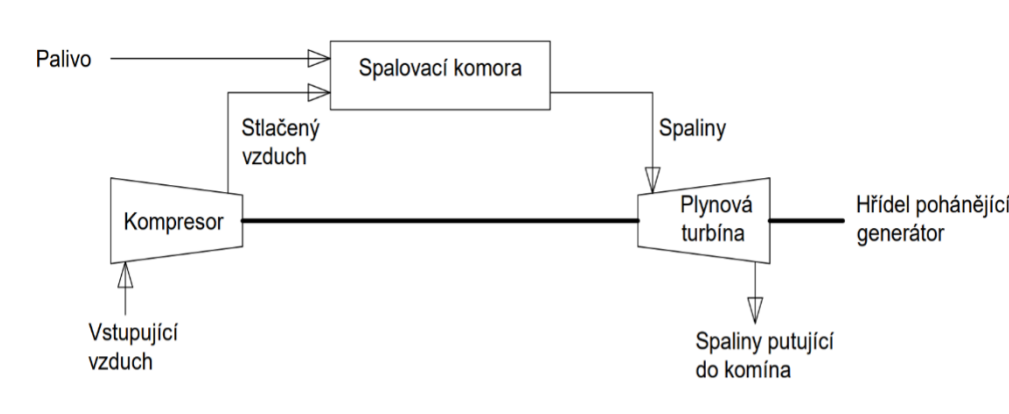
V USA v blízkosti města New York vznikla mezi roky 1997-2009 setrvačnicková "farma" Beacon Power s instalovaným výkonem 20 MW. Několik let na to byla postavena obdobná "farma" ještě v Pensylvánii. Obě provozuje společnost Energy Capital Partners zabývající se výrobou elektřiny v USA. [13] [14]

1.2.4 Plynové elektrárny

Plynová elektrárna obsahuje tři základní části: [15]

- Kompressor, který žene a stlačuje vzduch do spalovací komory. Tlak vzduchu se pohybuje mezi hodnotami 1,2 a 3 MPa.
- Spalovací komora, kde se mixuje stlačený vzduch s palivem. Zde se také směs spálí za vysokých teplot (cca 800–1450 °C).
- Turbína, která se skládá z velkého množství lopatek, které expandovaná směs roztáčí. Roztočená turbína pak pohání kompresor a generátor elektrické energie.

Pro zlepšení efektivity se snažíme využít spaliny vystupující z turbíny. Způsoby jsou například predehřát stlačený vzduch zbytkovým teplem spalin (rekuperátor) nebo využít zbytkové teplo na vytápění (kogenerační jednotka). Palivem může být zemní plyn, plyny získané zplyňováním uhlí (energo plyny), biomasy, popřípadě ne moc používaný topný olej. Hlavními výhodami oproti uhelným elektrárnám jsou rychlost výstavby, cena, velikost a rychlost změny výkonu. Vzhledem k tomu, že plynová elektrárna nepracuje s párou, není zde potřeba výstavby chladicích věží. Jsou také šetrnější k životnímu prostředí, neprodukují totiž žádný popílek a emise SO_2 jsou nižší až o 70 %. Kvůli vysokým teplotám je životnost plynové turbíny nižší než parní turbíny. Rotační energie pohánějící kompresor je z velké části tvořena turbínou, což snižuje účinnost a při startu je potřeba pomocný zdroj pro stlačení vzduchu. Plynové elektrárny se téměř výhradě používají jako zdroje pokrývající výkonové špičky v síti nebo jako záložní zdroje také kvůli tomu, že ceny paliv (především zemního plynu) jsou vysoké a běžný provoz by se ekonomicky nevyplatil. [16]



Obrázek 1.5: Schéma plynové elektrárny [17]

1.2.5 Diesel generátory

Diesel generátor se skládá ze spalovacího motoru a synchronního generátoru. Spalovací motor spotřebovává palivo (nejčastěji motorovou naftu) a vytváří tak na hřídeli točivý moment. Ten pohání synchronní generátor, který vyrábí elektřinu. Nejčastěji je používán jako zdroj elektrické energie v místech bez možnosti připojení k elektrické síti nebo jako záložní zdroj v budovách, které jsou náhlé na výpadek elektřiny (nemocnice). Dále se mohou zajišťovat podpůrné služby energetické soustavě jako například zajištění stability nebo bezpečnosti dodávky regulace. Jako příklad mohu uvést diesel generátory Plzeňské energetiky a.s. Jejich elektrický výkon je 3 x 6,7 MW a dokáží dosáhnout plného výkonu do dvou minut od startu. Z důvodu náročnosti na množství paliva nelze provoz motorgenerátorů uvažovat dlouhodobě. [2], [18]

1.3 Elektrochemické systémy

Akumulátory jsou jednou z nejpoužívanějších technologií v průmyslu. V posledních desetiletích roste jejich rozmach především díky značnému snížení pořizovacích nákladů, relativně rychlé výstavbě a velmi rychlé době odezvy. Místo pro instalaci může být poměrně flexibilní, buď uvnitř budovy, nebo v blízkosti zařízení. V současné době jsou za hlavní překážky zavádění rozsáhlých zařízení považovány relativně krátké doby cyklování a vysoké náklady na údržbu. Navíc mnoho typů baterií nelze zcela vybit kvůli jejich životnosti v závislosti na cyklu. Likvidace nebo recyklace vyhozených baterií musí být také zvažena, pokud jsou použity toxické chemické materiály. [7]

Systémy akumulátorů se skládají z řady elektrochemických článků zapojených sériově nebo paralelně, které vyrábějí elektřinu s požadovaným napětím z elektrochemické reakce. Každý článek obsahuje dvě elektrody (zápornou anodu a kladnou katodu), porézní separátor a elektrolyt, který může být v pevném, kapalném nebo vláknitém/viskózním stavu. [7]

1.3.1 Olověné akumulátory

Olověné akumulátory jsou používány přes 100 let. I když většinou parametrů nedokážou konkurovat dnešním lithiovým akumulátorům, stále se značně používají kvůli jejich výrazně nižší ceně. Katoda je vyrobena z PbO_2 , anoda je vyrobena z Pb, separátor ze skleněných vláken, PVC nebo celulózy, a elektrolytem je kyselina sírová H_2SO_4 . Elektrolyt může být kapalný, ve formě gelu nebo nasáknutý do skelné vaty. Olověné akumulátory se vyznačují rychlou odezvou, malým denním samovybíjením a relativně vysokou účinností cyklu. Jejich jmenovité napětí je 2 V. Olověné akumulátory lze použít ve stacionárních zařízeních jako záložní zdroje energie pro datové a telekomunikační systémy a aplikace energetického managementu. Na celém světě však stále existují omezené instalace v užitkovém měřítku, a to především kvůli jejich relativně nízkým cyklům a specifické energii. Navíc mohou fungovat špatně při nízkých teplotách, takže je normálně vyžadován systém tepelného managementu, což zvyšuje náklady. Vybíjecí čas je relativně rychlý, ale pro plné nabití vyžadují více než 14 hodin. Při rychlém nabíjení se vytváří vodík, který způsobuje ztrátu vody a zhoršení parametrů akumulátoru. Moderní olověné akumulátory zamezují tomuto jevu přidáním uhlíku na katodu (ALC – advanced lead-carbon). Z akumulátoru se tak stává kvazi-asymetrický superkapacitor, který zlepšuje chování při nabíjení a vybíjení, snižuje stárnutí a zvyšuje vodivost. Bohužel touto změnou se zhoršuje tvrdost zdroje a při vybíjení dochází k poklesu napětí. [7], [19]

Největším olověným akumulátorovým úložištěm na světě byla do roku 2017 součásti větrné elektrárny ve městě Notrees, Texas, USA. Právě v roce 2017 byly olověné akumulátory vyměněny lithium-iontovými. Výkon této baterie byl 36 MW a její kapacita byla 24 MWh. Dalším velkým akumulátorovým úložištěm je například Chino Battery Project ve státě California, USA. Je především určena pro stabilizaci sítě a nastartování elektráren, které nejsou schopny black-startu. Její výkon je 14 MW a kapacita je 40 MWh. Je složena z 8 256 olověných baterií. [20]

1.3.2 Lithiové akumulátory

Li-ion akumulátor se skládá z katody vyrobené z oxidu lithného kovu, jako je $LiCoO_2$ a $LiMO_2$, anody vyrobené z grafitického uhlíku, separátoru vyrobeného z pórovitého polypropylenu nebo polyetyleny o velmi malé tloušťce (5-25 um), který zabraňuje elektrické propojení elektrod a zároveň dovoluje průchod lithiových iontů, a elektrolytu vyrobeného z elektricky nevodivé organické kapaliny obsahující rozpuštěné soli lithia, jako je $LiClO_4$ nebo $LiBF_4$. Jsou svinovány do svitků a jsou uzavřeny v kovovém obalu. Li-ion akumulátory jsou preferovány především díky nízké době odezvy a specifické energii. Li-ion baterie mají také vysokou účinnost cyklu, až 97 %. Mezi další výhody patří plochá vybíjecí křivka, která určuje tvrdost zdroje, jednoduchá a rychlá výstavba, nízké samovybíjení a velký počet cyklů, který je vysoký především díky tomu, že ionty lithia se pouze umístí do mřížky materiálu anody a nereagují s ní. Jmenovité napětí článku je 3,7 V. Hlavní nevýhodou je použití lithia, které na vzduchu reaguje a degraduje. S tím jsou spojeny vyšší nároky na těsnost pouzdra a komplikovanější recyklace. Mezi další nevýhody pak patří například i nutnost balančních obvodů pro jednotlivé akumulátorové články, což navyšuje složitost a cenu. [7], [21]

Největším akumulátorovým systémem je Hornsdale Power v Austrálii. Je připojen k větrné farmě společnosti Neoen o výkonu 315 MW. Výkon úložiště byl v roce 2020 zvýšen z 100 MW na 150 MW. Zajímavostí je, že výstavba původního úložiště trvala pouhých 100 dní. V blízké budoucnosti by měly být postaveny podobné systémy například v Anglii nebo USA (Florida, Arizona, Lancaster). Příkladem z ČR je velkokapacitní akumulátor v elektrárně Tušimice. Jeho výkon je 4 MW a řadí se tak mezi největší na našem území. Jeho využívání se vyšplhalo k 99 % během prvních tří měsíců standardního provozu. Společnost ČEZ chce dokonce do roku 2030 navýšit akumulační kapacitu ČR až na 300 MW. [21], [22]

1.3.3 Sodíko-sírové akumulátory

Sodíko-sírové akumulátory (NaS) využívají jako dvě elektrody roztavený sodík a roztavenou síru a jako pevný elektrolyt využívají oxid hlinitý. Reakce normálně vyžadují teplotu 300 °C, aby se zajistilo, že elektrody budou v kapalném stavu, což je jedna ze zásadních nevýhod. Mezi výhodné vlastnosti NaS baterií patří relativně vysoké hodnoty specifické energie a téměř nulové denní samovybití. Baterie používá levné, netoxické materiály, což vede k vysoké recyklovatelnosti. Omezeními jsou však vysoké roční provozní náklady a další systém potřebný k zajištění provozní teploty. Právě zajištění provozní teploty snižuje celkovou účinnost akumulátoru. NaS akumulátory jsou považovány za jedny z nejslibnějších kandidátů pro aplikace EES s vysokým výkonem. [7]

Největší instalace těchto baterií se do roku 2018 nacházela v Rokkasho, Japonsko. Využívala se zde k optimalizaci výkonu větrných elektráren. Instalovaný výkon je 34 MW a kapacita 245 MWh. V lednu roku 2019 bylo spuštěno akumulační zařízení v Abu Dhabi, UAE. Jeho výkon dosahuje 108 MW a kapacita 648 MWh. Akumulátor pomáhá městu s vyrovnáváním výkonové bilance ve špičkách a slouží také jako záložní zdroj v případě výpadku sítě. [7], [23]

1.3.4 Nikl-kadmiové akumulátory

Nikl-kadmiové akumulátory (NiCd) používá jako dvě elektrody hydroxid nikelnatý a kovové kadmium, jako elektrolyt vodný alkalický roztok a jako separátor porézní plasty nebo skleněná vlákna. Obvykle má relativně vysokou spolehlivost a mechanickou odolnost, nízké nároky na údržbu, možnost rychlého nabití a vybití a velký rozsah pracovních teplot (-40 až +70 °C). Mezi hlavní nevýhody NiCd akumulátorů patří malá specifická energie, pokles napětí na konci vybití cyklu, a především obsah kadmia a niklu, což jsou toxické těžké kovy, které mohou mít za následek ohrožení životního prostředí. Akumulátor také trpí paměťovým efektem, kdy se maximální kapacita může dramaticky snížit, pokud je baterie opakovaně dobíjena i po částečném vybití. [7]

V energetice pro akumulaci elektrické energie se NiCd akumulátory příliš nevyskytují. Jeden z mála příkladů je provoz 6,25 MWh akumulačního zařízení v Golden Valley, Aljaška. To dosahuje účinnosti 72–78 % a bylo zvoleno především kvůli nízkým teplotám. [7]

1.3.5 Průtočné akumulátory

Průtočný akumulátor (Redox Flow Battery – RFB) je kombinace konstrukce klasické baterie a palivového článku. Elektrolyt je rozdělen na pozitivní a negativní a je uložen v externích nádržích. Při nabíjení přiložené napětí nutí ionty kladného elektrolytu uvolnit elektron. Tato reakce se nazývá oxidace. Uvolněné elektrony putují do záporného elektrolytu, kde nastává redukční reakce. Označení "redox" dostala baterie právě díky těmto procesům. Naopak při vybíjení tyto akumulované elektrony putují zpět přes připojenou zátěž. Každá nádrž má své čerpadlo, které vhání elektrolyt do akumulátoru. Velikost nádrží ovlivňuje její kapacitu. Největší výhodou je dlouhá životnost, která přesahuje 10 000 cyklů a je především ovlivněna membránou. Akumulátory používají nehořlavé materiály, které zajišťují vysokou bezpečnost. Pro zvýšení možné akumulované energie stačí jednoduše zvýšit objem nádrží elektrolytů. Zásadní nevýhodou je malá specifická energie průtočných baterií, která může být v porovnání s lithiovými akumulátory až pětina. V současné době jsou především dva druhy těchto akumulátorů, zinko-bromidový (ZnBr) a vanadium redoxový (VRB). Právě VRB technologie je považována za nejpokročilejší průtočný akumulátor. Jako jediný aktivní prvek používají vanad ve čtyřech oxidačních stavech (V(IV)/V(V) pozitivní redoxní pár, V(II)/V(III) negativní redoxní pár). Právě použití jediného aktivního prvku vede k téměř nulové ztrátě kapacity akumulátoru. Nesmí ale být překročena teplota 50-60 °C, kdy dochází k narušení struktury kladného elektrolytu. Proto musí být přítomen chladičový systém, který udržuje teplotu akumulátoru v rozmezí 10-40 °C. Tento systém však navyšuje provozní náklady. Jmenovité napětí článku je 1,4 V a účinnost akumulátoru dosahuje až 85 %. Cena vanadu je značně závislá na regulacích a zvýšené poptávce na čínském trhu, který představuje přibližně polovinu trhu s vanadem. [7], [24]

V roce 2016 byl schválen projekt na výstavbu největší RFB. Měl by dosahovat výkonu 200 MW, kapacity 800 MWh a měl by se nacházet poblíž města Dalian, Čína. Jeho hlavním úkolem bude zajišťovat stabilitu sítě. Aktuálně je ve fázi zkušebního provozu. [24], [25]

1.4 Superkapacitory

Superkapacitory obsahují dvě vodivé elektrody, elektrolyt a porézní membránový separátor. Díky své struktuře mohou mít superkondenzátory jak vlastnosti tradičních kondenzátorů, tak elektrochemických baterií. Energie se ukládá ve formě statického náboje na površích mezi elektrolytem a dvěma elektrodami vodiče. Vzhledem k tomu, že náboj je skladován fyzicky, nedochází k žádným chemickým nebo fázovým změnám, je proces rychlý a vysoce reverzibilní a cyklus vybíjení a nabíjení je mnohokrát opakovatelný. Superkondenzátor má omezené napětí na 2,5–2,7 V. Řetězce s více než třemi kondenzátory vyžadují vyrovnávání napětí, aby se zabránilo přepětí jakéhokoli článku. Lithium-iontové baterie sdílejí podobný ochranný obvod. Superkondenzátory také kriticky pronikly do elektrických pohonných jednotek. Díky ultra rychlému nabíjení během regenerativního brzdění a dodávání vysokého proudu při zrychlení je superkondenzátor ideální jako zesilovač špičkového zatížení pro hybridní vozidla a také pro aplikace s palivovými články. Jeho široký teplotní rozsah a dlouhá životnost nabízí výhodu oproti baterii. Účinnost cyklu se

pohybuje okolo 90 %. Denní rychlost samovybíjení superkondenzátorů je však vysoká a kapitálové náklady jsou rovněž vysoké. Specifická energie superkondenzátoru je 10–20krát menší než u Li-ion. Další nevýhodou je vybíjecí křivka. Zatímco elektrochemická baterie dodává stabilní napětí v použitelném výkonovém pásmu, napětí superkondenzátoru lineárně klesá, čímž se snižuje využitelné výkonové spektrum. Superkondenzátory nejsou vhodné pro rozsáhlé a dlouhodobé skladování elektrické energie. [7]

1.5 Supravodivý indukční akumulátor

Typický systém supravodivého indukčního akumulátoru (Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES) se skládá ze tří hlavních součástí, které zahrnují: supravodivou cívkovou jednotku, subsystém pro úpravu energie a subsystém chlazení a vakua. Systém SMES ukládá elektrickou energii v magnetickém poli generovaném stejnosměrným proudem v supravodivé cívce, která byla kryogenicky ochlazená na teplotu nižší, než je její supravodivá kritická teplota. Obecně, když proud prochází cívkou, elektrická energie se rozptýlí jako teplo kvůli odporu drátu; je-li však cívka vyrobena ze supravodivého materiálu, jako je rtuť nebo vanad, ve svém supravodivém stavu vznikne nulový odpor a elektrická energie může být uložena téměř bez ztrát. Velikost akumulované energie je určena vlastní indukčností cívky a proudem, který jí protéká viz vztah 1.4: [7]

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (1.4)$$

kde L je indukčnost cívky a I je protékající proud.

Supravodivé cívky lze rozdělit do dvou skupin: nízkoteplotní supravodivé (Low Temperature Superconducting - LTS) cívky, pracující při teplotě 5 K, a vysokoteplotní supravodivé cívky (High Temperature Superconducting - HTS), pracující při teplotě 70 K. Technologie LTS-SMES je vyspělejší a komerčně dostupná, zatímco HTS-SMES je v současné době ve fázi vývoje. Mezi vlastnosti SMES patří relativně rychlá doba odezvy, velmi rychlá doba úplného vybití, vysoká účinnost cyklu a dlouhá životnost. Na rozdíl od dobíjecích baterií jsou zařízení SMES schopna vybití téměř celou nahromaděnou energii s malou degradací po tisících úplných cyklech. Nevýhodou je, že mají vysoké kapitálové náklady, vysoké denní samovybíjení a negativní dopad na životní prostředí kvůli silnému magnetickému poli. Kromě toho je cívka citlivá na malé změny teploty, které mohou způsobit ztrátu energie. Z výše uvedeného vyplývá, že SMES je vhodný pro krátkodobé skladování elektrické energie. [7], [26]

1.6 Výroba syntetického paliva - PtG

Power-to-Gas (PtG) je koncept, který přeměňuje elektrickou energii na chemickou energii pomocí CO_2 a H_2O . Syntetický vodík a metan se dnes většinou vyrábí z fosilních paliv a biomasy. PtG však znamená použití obnovitelné elektřiny k výrobě těchto paliv prostřednictvím elektro-

lýzy a metanizace. Prvním krokem v procesu je výroba syntetického vodíku H_2 z vody a energie z obnovitelných zdrojů prostřednictvím elektrolýzy. Tento vodík lze buď použít přímo, přidat do stávající směsi plynů, nebo jej lze nechat projít druhým stupněm, ve kterém reaguje H_2 s oxidem uhličitým za vzniku metanu CH_4 . Metan je klíčovou složkou zemního plynu a lze jej přímo použít v jakékoli z dnešních standardních plynárenských aplikací. CO_2 používaný v procesu metanizace je zachycován ze vzduchu nebo z biomasy či bioplynu, aby byl zajištěn uzavřený uhlíkový cyklus. Pokud by oxid uhličitý pocházel z fosilního zdroje, jako je tomu v současných průmyslových procesech, nepočítal by se jako uhlíkově neutrální. Syntetický plyn lze použít k dlouhodobému skladování energie a dobře se transportuje. Lze jej použít k vytvoření vysokých teplot potřebných v průmyslových procesech a umožnil by pokračující využívání stávající infrastruktury. Tím pádem by nebylo potřeba rozsáhlé modernizace elektráren a spotřebičů, což by ušetřilo spoustu peněz. Syntetická paliva mají ale značné nevýhody. Během elektrolýzy, metanizace a skladování se ztrácí mnoho energie, což znamená, že jejich výroba vyžaduje velké množství energie. Účinnost elektrolýzy je jen 67–81 % a po dodatečném kroku metanizace klesá na 54 - 65 %. I materiály pro tyto elektrolýzy jsou nákladné. [7], [27]

1.7 Tepelná akumulace

Tepelná akumulace (Thermal energy storage - TES) zahrnuje řadu technologií, které ukládají dostupnou tepelnou energii pomocí různých přístupů v izolovaných úložištích. Systém TES se běžně skládá ze skladovacího média v nádrži, izolovaného chladiče nebo zabudovaného chladičového systému, potrubí a čerpadla. Na základě rozsahu provozních teplot lze TES rozdělit do dvou skupin:

- nízkoteplotní TES (skládající se z vodonosných nízkoteplotních TES a kryogenních zásobníků energie)
- vysokoteplotní TES (včetně latentního tepla TES a betonové tepelné akumulace).

Nízkoteplotní TES běžně používá vodou chlazené a ohřívací procesy, což je vhodnější pro peak-shaving a průmyslové chlazení. Kryogenní skladování energie využívá krypton (jako kapalný dusík nebo kapalný vzduch) k dosažení přeměny elektrické a tepelné energie. Například technologie zkapalněného vzduchu (Liquid Air Energy Storage - LAES) přitahuje pozornost díky vysokému poměru expanze z kapalného do plynného skupenství a vysokým hustotám výkonu kapalného vzduchu ve srovnání s plynným skupenstvím vzduchu. Latentní teplo TES využívá speciální materiály (Phase Change Materials - PCMs) jako úložné médium a využívá absorpci nebo emise energie těchto PCM při přechodu kapalina-pevná látka a při konstantní teplotě. Tepelná akumulace betonu využívá beton nebo litou keramiku k akumulaci tepelné energie, obvykle podporovanou syntetickým olejem jako teplotnosnou kapalinou. Výše uvedené technologie TES mají různé vlastnosti s různými aplikacemi. Například akumulace latentního tepla může poskytnout relativně vysokou hustotu akumulace s malým rozměrem zásobníku, proto se použití této technologie v budovách značně rozšiřuje. Systém TES dokáže uchovat velké množství energie bez

větších rizik a jeho denní ztráty samovybíjením jsou malé, nabízí dobrou specifickou energii a systém je ekonomicky méně náročný. Účinnost cyklu systémů TES je však obvykle nízká. [7], [28]

Technologie	Specifická energie (Wh/kg)	Životnost (rok)	Cyklická účinnost (%)	Doba náběhu	Vhodná skladovací doba
Přečerpávací vodní elektrárna	0,1-1,5	40+	70-85	Minuty	Hodiny-měsíce
Akumulace stlačeného vzduchu	30-60	20-40	42-70	Minuty	Hodiny-měsíce
Setrvačníky	5-80	15+	90-95	Sekundy	Sekundy-minuty
Olověné akumulátory	30-50	5-15	70-80	Milisekundy	Minuty-dny
Li-iontové akumulátory	75-200	5-15	75-90	Milisekundy	Minuty-dny
Sodíko-sírové akumulátory	150-240	5-15	75-90	-	Hodiny-měsíce
Nikl-kadmiové akumulátory	45-80	10-20	60-70	Milisekundy	Minuty-dny
Průtočné akumulátory	10-30	5-20	75-85	Milisekundy	Hodiny-měsíce
Superkapacitory	2,5-15	10-30	90-97	Milisekundy	Sekundy-hodiny
Supravodivý indukční akumulátory	0,5-5	20+	95-97	Milisekundy	Minuty-hodiny
Výroba syntetického paliva	800-10000	20+	54-65	Sekundy	Hodiny-měsíce
Tepelná akumulace	80-120	10-20	30-60	Minuty	Minuty-dny
Plynové elektrárny	-	20-	30-40	Minuty	-
Diesel generátory	-	30-	20 - 40	Minuty	-

Tabulka 1.1: Porovnání jednotlivých parametrů vybraných technologií [7], [29], [30]

2 Aplikovatelnost technologií v podmínkách provozu ČR

Kodex PS je veřejně přístupný dokument vydávaný společností ČEPS. Publikují se zde informace pro účastníky trhu a pravidla, která udávají minimální konstrukční, technické a provozní požadavky pro připojení a užívání přenosové soustavy (PS). Dále se zde definují podmínky pro poskytování podpůrných služeb a přenosových služeb. [31]

2.1 Systémové služby - SyS

Tyto služby zajišťuje ČEPS koordinační nebo řídicí formou. K zajištění těchto služeb využívá podpůrné služby (PpS) jednotlivých účastníků trhu s elektřinou. [31]

Mezi systémové služby patří: [31]

- udržování kvality elektřiny,
- udržování výkonové rovnováhy v reálném čase,
- obnovení provozu,
- dispečerské řízení.

2.1.1 Primární regulace frekvence

Synchronně propojená soustava (například Evropa) se rozděluje na regulační oblasti. Každá oblast pak musí udržovat výkonovou zálohu na primární regulaci frekvence pro synchronní spolupráci mezi sebou. Primární regulace frekvence je založena na principu solidarity. Nastane-li tedy narušení výkonové rovnováhy, všechny výrobní moduly, zahrnuté v primární regulaci frekvence, se podílejí na vyrovnání této rovnováhy. Celková primární rezerva je pro synchronně propojenou soustavu 3000 MW. Každé oblasti je pak přidělena primární rezerva úměrná její velikosti. Pro ČR je to přibližně 90 MW. K zajištění primární regulace frekvence se využívá PpS SVR FCR. [31]

2.1.2 Sekundární regulace frekvence a výkonu

Sekundární regulátor frekvence automaticky zajišťuje výkonovou rovnováhu. Je umístěn na dispečinku ČEPS a jsou na něj připojeni poskytovatelé PpS SVR aFRR a hraniční rozvodny

měřící předávaný výkon. Sekundární regulace navazuje na primární regulaci frekvence a postupně tak nahrazuje výkon, který byl poskytnut na principu solidarity. [31]

2.1.3 Terciální regulace výkonu

Terciální regulace výkonu slouží pro nahrazení vyčerpané sekundární regulační zálohy. Využívají se tak výrobní bloky poskytující PpS SVR mFRR a RR. [31]

2.1.4 Další prostředky pro zajištění SyS:

- zajištění stability přenosu,
- sekundární regulace napětí,
- terciální regulace napětí,
- obnovení provozu po úplném nebo částečném rozpadu soustavy,
- zajištění kvality napěťové sinusovky.

2.2 Podpůrné služby - PpS

Podpůrné služby jsou podle kodexu definované jako: „*Činnost fyzických a právnických osob zajišťujících provozování elektrizační soustavy, kvalitu a spolehlivost dodávky elektřiny.*“ PpS se dělí na: [31]

- služby výkonové rovnováhy (SVR): FCR, aFRR, mFRR_t a RR,
- ostatní podpůrné služby: SRUQ (zařízení připojených do PS), OP, BS.

Od 1.4.2019 se změnil termíny označující jednotlivé služby výkonové rovnováhy. Názvy se tak harmonizovaly s evropským nařízením SOGL a EBGL. Na následujících řádkách je uvedena zjednodušená změna: [31]

- primární regulace (PR) - záloha pro automatickou regulaci frekvence (FCR),
- sekundární regulace (SR) - záloha pro regulaci výkonové rovnováhy s automatickou aktivací (aFRR),
- minutové zálohy (MZ_t) - zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací do t minut (mFRR_t),
- snížení výkonu (SV30) - proces náhrady záloh (RR), který se dá rozdělit na kladnou (RR+) a zápornou (RR-) službu .

Všechny podpůrné služby musí splňovat tyto obecné požadavky: [31]

- měřitelnost – se stanovenými kvantitativními parametry a způsobem měření,
- garantovaná dostupnost služby s možností vyžádat si inspekci,
- certifikovatelnost – stanovený způsob prokazování schopnosti poskytnout služby, pomocí periodických testů,
- možnost průběžné kontroly poskytování PpS.

2.2.1 Zálohy pro automatickou regulaci frekvence – FCR

Zálohy pro automatickou regulaci frekvence (FCR) je služba definovaná jako: *"lokální automatická funkce, spočívající v přesně definované změně výkonu jednotky v závislosti na odchylce frekvence od zadané hodnoty."* Změna výkonu jednotky je realizovaná pomocí prosociálního regulátoru závislého na odchylce frekvence a je tedy dána rovnicí: [31]

$$\Delta P_{KORf} = -\frac{100}{S} \cdot \frac{P_n}{f_n} \cdot \Delta f \quad (2.1)$$

$(MW; \%; MW; Hz; Hz),$

kde ΔP_{KORf} je požadovaná změna výkonu jednotky, P_n je nominální výkon jednotky, Δf je odchylka frekvence od zadané hodnoty, S je statika korektoru frekvence, f_n je jmenovitá hodnota frekvence.

Poskytovatel FCR musí uvolnit 100 % rezervované velikosti zálohy do 30 sekund od okamžiku vzniku odchylky frekvence a do 15 sekund 50 % rezervované velikosti FCR. Je-li odchylka frekvence 200 mHz, musí být uvolněna veškerá rezervovaná záloha FCR. Maximální velikost vykupované FCR je 10 MW pro jednu jednotku, čímž se omezuje vliv výpadku jednotek pokutujících PpS. Minimální velikost FCR je 1 MW. [31]

2.2.2 Regulace výkonové rovnováhy s automatickou aktivací – aFRR

Regulace výkonové rovnováhy s automatickou aktivací (aFRR) je služba definována jako: *„Zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s automatickou aktivací realizované prostřednictvím změny hodnoty výkonu regulované jednotky, jak je požadováno regulátorem frekvence a salda předávaných výkonů.“* Služba je centrálně řízena a zajišťována provozovatelem přenosové soustavy (ČEPS). Účelem této služby je nahradit výkon poskytnutý od FCR. Poskytovatel této služby musí uvolnit veškerou nasmlouvanou energii do 7,5 minut od požadavku. Tato doba je plánována zkrátit na 5 minut do roku 2025. Minimální poskytovaná velikost aFRR je 1 MW a maximální velikost je 70 MW. Tato služba se rozděluje na kladnou aFRR+ a zápornou aFRR-, které mohou být poskytovány současně, ale musí být dodržena stejná doba náběhu. [31]

2.2.3 Regulace výkonové rovnováhy s manuální aktivací – mFRR_t

Regulace výkonové rovnováhy s manuální aktivací (mFRR_t) je služba definována jako: „*Manuálně ovládané zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy realizované poskytnutím kladné (mFRR_{t+}) nebo záporné (mFRR_{t-}) jednotkou do t minut od příkazu dispečinku ČEPS.*“ mFRR_t je využíváno především při výpadku velkých zdrojů v soustavě. Služba aFRR je schopna vyrovnat jen základní výchylky, ale v kombinaci s mFRR_t lze dosáhnout vyrovnání výkonové bilance i při výpadku největšího zdroje v soustavě. Pokyn pro aktivaci mFRR_t vydává dispečer ČEPS tehdy, kdy dochází k vyčerpání regulační energie v aFRR. mFRR_t lze poskytovat ve dvou variantách v závislosti na době plného náběhu t: [31]

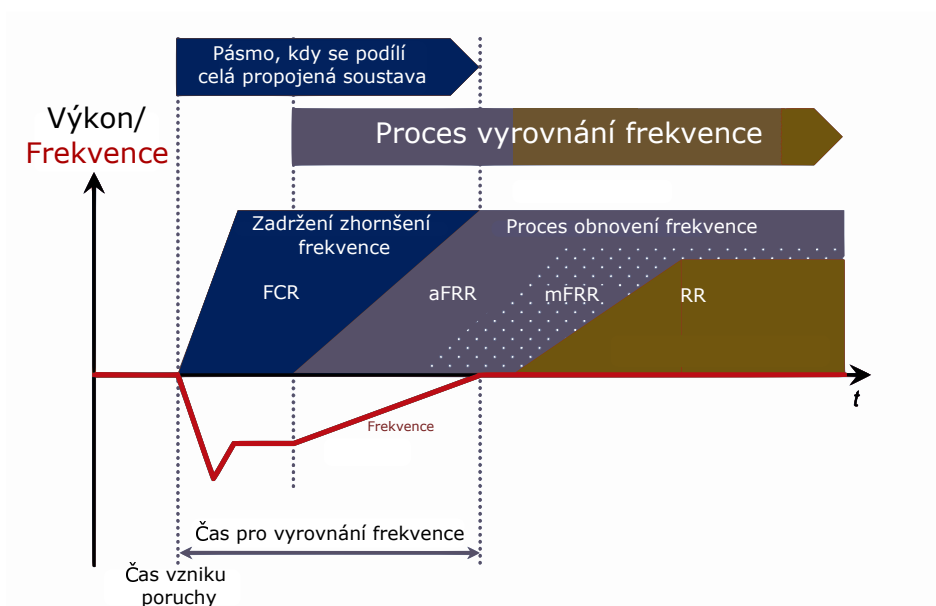
- mFRR₅ - Požadovaná změna výkonu musí být provedena do 5 minut od příkazu dispečera. Minimální velikost poskytovaného výkonu na jedné jednotce je 1 MW a maximální určuje ČEPS. Minimální doba poskytování služby jsou 4 hodiny za jeden obchodní den i v případě aktivace této služby na konci intervalu její rezervace.
- mFRR_{12,5} - Požadovaná změna výkonu musí být provedena do 12,5 minut od příkazu dispečera. Tato služba má čas rozdělen na 2,5 minut přípravy a 10 minut rampování (změny výkonu). Minimální velikost poskytovaného výkonu na jedné jednotce je 1 MW a maximální velikost je 70 MW. Minimální doba poskytování služby je 15 minut.

2.2.4 Proces náhrady záloh – RR

Proces náhrady záloh (RR) je služba poskytující kladnou (RR+), nebo zápornou (RR-) sjednanou regulační energii do 30 minut od příkazu dispečera ČEPS. Minimální velikost této služby na jedné jednotce je 1 MW a maximální velikost je 70 MW. Poskytovatel ji může poskytovat na pevnou čtvrt hodinu nebo její násobek (minimálně 15 minut, maximálně 60 minut). [31]

2.2.5 Proces vyrovnávání výkonové bilance

Proces vyrovnávání výkonové bilance je naznačen na obrázku 2.1. Celý proces začíná frekvencí ustálenou na jmenovité hodnotě. V momentě vyskytnutí poruchy začne frekvence klesat. Jakmile frekvence klesne pod určitou hodnotu, zareaguje FCR a stabilizuje frekvenci na uvedenou mez. Na vyrovnání frekvence se podílejí všechny propojené soustavy v dané synchronní oblasti (princip solidarity). V následujících okamžicích má soustava, v níž vznikla porucha, povinnost vyregulovat frekvenci na jmenovitou hodnotu. Využívá k tomu služba aFRR a díky ní začne snižovat odchylku frekvence. Nestačí-li regulační energie v dané službě, dispečer ČEPS aktivuje službu mFRR. Díky této službě se vyreguluje frekvence a může být uvolněna využitá energie ze FCR. Jako poslední je využita služba RR, která postupně nahrazuje aFRR. To se děje především proto, že regulační energie v aFRR je dražší a chceme, aby služba aFRR byla připravena na další možnou poruchu. [31], [32]



Obrázek 2.1: Proces vyrovnavání výkonové bilance [32]

Technologie	Vhodná podpůrná služba	Zdůvodnění
Přečerpávací vodní elektrárna	aFRR	Automaticky regulovatelné regulátorem ČEPSu, rychlá doba náběhu.
Akumulace stlačeného vzduchu	aFRR	Automaticky regulovatelné regulátorem ČEPSu, rychlá doba náběhu.
Setrvačníky	FCR	Vhodné jako součást výrobního zařízení pro zlepšení dynamických vlastností.
Olověné akumulátory	FCR	
Li-iontové akumulátory	FCR	
Sodíko-sírové akumulátory	FCR	
Nikl-kadmiové akumulátory	FCR	
Průtočné baterie	FCR	
Superkapacitory	FCR	
Supravodivý indukční akumulátory	FCR	
Výroba syntetického paliva	FCR	
Tepelná akumulace	mFRR	Rychlost náběhu vhodná pro tuto službu.
Plynové elektrárny	aFRR	Automaticky regulovatelné regulátorem ČEPSu, rychlá doba náběhu.
Diesel generátory	mFRR	Využití, kdy nestačí aFRR a v nouzových stavech (black start, ostrovní provoz).

Tabulka 2.1: Možná aplikace technologií pro podpůrné služby

2.2.6 Akumulační a agregované zařízení poskytující podpůrné služby

Nově jsou v Kodexu PS vypsány i podmínky pro provoz s omezenými zásobníky energie. Ty dovolují připojit i samotné akumulační zařízení, musí být ale sestavena nabíjecí/vybíjecí strategie, kterou společnost ČEPS posoudí. Tento proces sestavování a schvalování je velmi individuální. Další novinka je možnost vytvoření tzv. agregčního bloku. Ten se může skládat z více energetických zařízení. Tento systém slučuje více menších zdrojů do jednoho virtuálního bloku a umožňuje poskytování podpůrných služeb. Poskytování výkonových záloh je řízeno z jednoho terminálu. Tento terminál poté řídí všechna energetická zařízení zahrnutá v agregčním bloku. Tyto nové možnosti umožňují vstup většímu počtu subjektů, což by v budoucnu mohlo vést k větší konkurenci a tím nižším cenám za podpůrné služby. Takový pokles cen by mohl být viditelný i na cenách spotřebitelů elektrické energie. Dále tyto změny mohou decentralizovat systém poskytování služeb a tím zvýšit jeho bezpečnost. [31]

3 Model provozu vyrovnávacího zařízení

Původní záměr praktické části práce byla simulace výrobního bloku poskytující podpůrné služby a skládající se buď z kogenerační jednotky a bateriového úložiště, nebo fotovoltaické elektrárny a bateriového úložiště. Problém je, že podpůrné služby mohou být aktivovány kdykoli. Vzhledem k tomu, že výroba elektrické energie v kogenerační jednotce je navázaná na teplo a toto teplo nemůže být mařeno, byl by návrh takového bloku problematický. To podobné platí i pro fotovoltaickou elektrárnu, kde je problém s nepravidelností výroby. Pokud by tedy byl požadavek ČEPSu na poskytnutí sjednané regulační energie v okamžik, kdy baterie není nabitá a nelze zbytek energie vyrobit, došlo by k nesplnění požadavku, a to by vedlo k pokutě. Tyto pokuty jsou opravdu vysoké a jedna až dvě dokážou finančně odstavit celý výrobní blok. Další možností bylo využití systému s omezenými zásobami energie nebo agregačních bloků popsanych v kapitole 2.2.6. Tyto změny byly zavedeny do Kodexu PS v roce 2021 a bohužel k nim nebylo nalezeno dostatečné množství informací pro sestavení modelu.

Byl proto zvolen postup, kdy se bude řešit omezování špiček a přebytků energie putujících do sítě ze strany spotřebitele. I tento postup do jisté míry pozitivně ovlivňuje síť. Přesouvá totiž spotřebovanou energii z části dne s největší poptávkou, a tím sníží nutný rezervovaný výkon služeb zajišťující výkonovou rovnováhu. Jako akumulární zařízení byla zvolena technologie lithiových baterií. Hlavními důvody byly vysoké nabíjecí a vybíjecí výkony, menší nutné prostory pro integraci, vyšší účinnost, rychlá doba náběhu a vhodná doba akumulace.

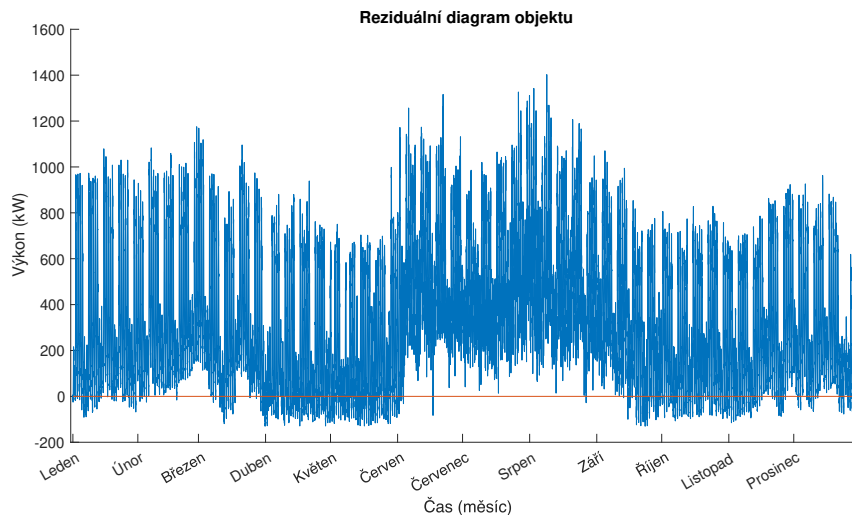
3.1 Analyzovaná data

Na praktickou část práce byla poskytnuta data z reálných aplikací. Jednalo se o roční spotřebu blíže nespecifikovaného areálu, výrobu fotovoltaické elektrárny a kogenerační jednotky. Data měla formu celoročních čtvrt hodinových maximálních hodnot výkonu.

Pro zpracování dat byl použit software MATLAB, který se pro spravování velkého množství dat dle mého názoru hodí nejvíce.

Data byla převedena na vektory o 35040 prvcích. U dat výroby z fotovoltaiky bylo nutné odstranit 96 hodnot ze 60. dne, jednalo se totiž o data z přestupného roku. Po upravení byla od dat spotřeby odečtena data o výrobě a tento výsledek byl vykreslen na obrázku 3.1 (dále nazývaný reziduální diagram). Když se uzavírá smlouva s dodavatelem elektrické energie, tak jedna z důležitých položek je rezervovaný příkon ze sítě. Ten reprezentuje maximální možný odebíraný výkon ze sítě. Je-li tento výkon překročen, spotřebitel platí pokuty v řádech desítek tisíc. Je proto kladen důraz, aby tato situace nenastala. Zároveň spotřebitel za každou kW tohoto

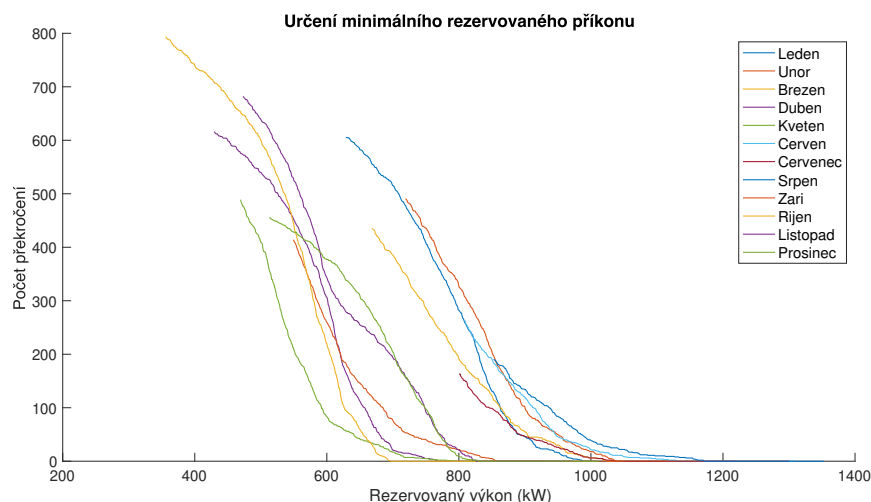
výkonu platí měsíční částku, bez ohledu, zda je tento výkon spotřebovaný. Jak je vidět z grafu, tak maximální odebíraný výkon se v průběhu roku mění. Byl by-li nastaven pouze jeden rezervovaný příkon pro celý rok, docházelo by k neefektivnímu využití a ekonomickým ztrátám. Byl tedy zvolen postup, kdy každý měsíc se bude z tohoto hlediska řešit samostatně.



Obrázek 3.1: Graf spotřebované energie po odečtení výroby

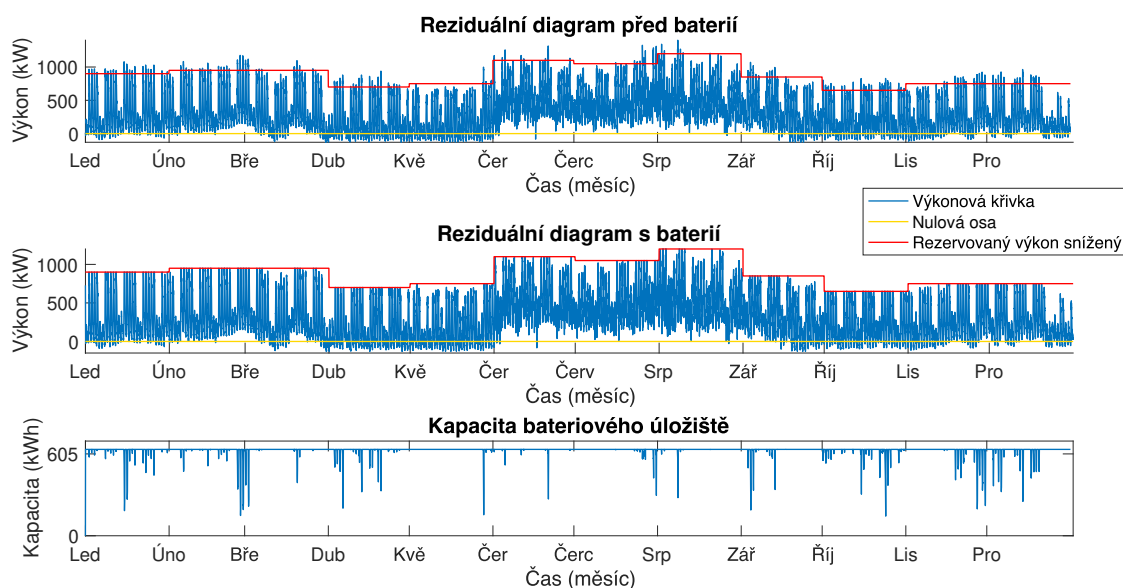
3.2 Peak-shaving

Úkolem bylo snížení rezervovaného příkonu pomocí akumulárního zařízení. Bylo tedy navrženo bateriové úložiště, kterému byla na začátku zadána kapacita, vybíjecí a nabíjecí výkon, meze pro vybití a nabití úložiště (SoC_min a SoC_max) a účinnost celého cyklu vybití a nabití. Účinnost se skládala z účinnosti bateriového úložiště (90 %) a účinnosti měniče (97 %). Byl navržen simulační program, který porovnával spotřebu energie se zvolenou hodnotou rezervovaného příkonu. Byla-li spotřeba nižší než zvolená hodnota rezervovaného příkonu, rozdíl těchto hodnot se uložil do bateriového úložiště a naopak, byla-li vyšší, rozdíl se odečetl z bateriového úložiště. Tento program neřešil, kdy se má baterka nabíjet. Šlo pouze o stanovení, o kolik může být maximálně snížený rezervovaný příkon pro danou velikost úložiště. Program tedy zkoušel nastavit různé úrovně výkonu, kterými by omezil rezervovaný příkon. Nastala-li situace, kdy bateriové úložiště nedokázalo pokrýt tuto špičku, zaznamenalo se, kolikrát toho nebylo schopno, a zvýšila se hodnota rezervovaného příkonu. Výstup této simulace lze vidět na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Závislost počtu překročení na nastaveném rezervovaném příkonu

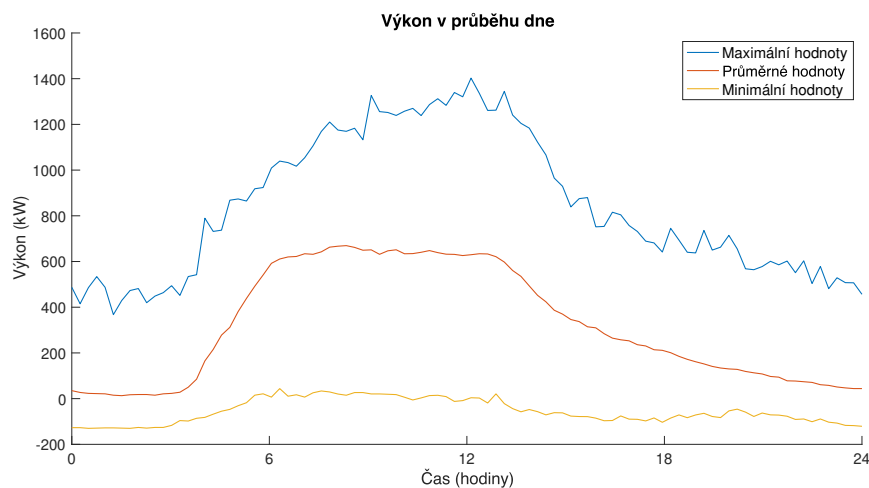
Byly tedy zjištěny snížené hodnoty rezervovaného výkonu a s nimi se nadále počítalo. Sestrojený graf, který je možné vidět na obrázku 3.3, ukazuje, jak byl proveden peak-shaving a jak na jednotlivé špičky reagovalo bateriové úložiště. Jak je vidět v měsíci květnu, bateriové úložiště omezilo pouze jednu výkonovou špičku. Tento měsíc je příkladem, kdy kvůli jediné špičce je nastavena hodnota rezervovaného příkonu tak vysoko, že ostatní špičky v měsíci tím nejsou vůbec omezeny. V tomto případě metoda peak-shavingu nestačí, a je proto nutné lépe naplánovat spotřebu objektu.



Obrázek 3.3: Grafy po použití metody peak-shavingu

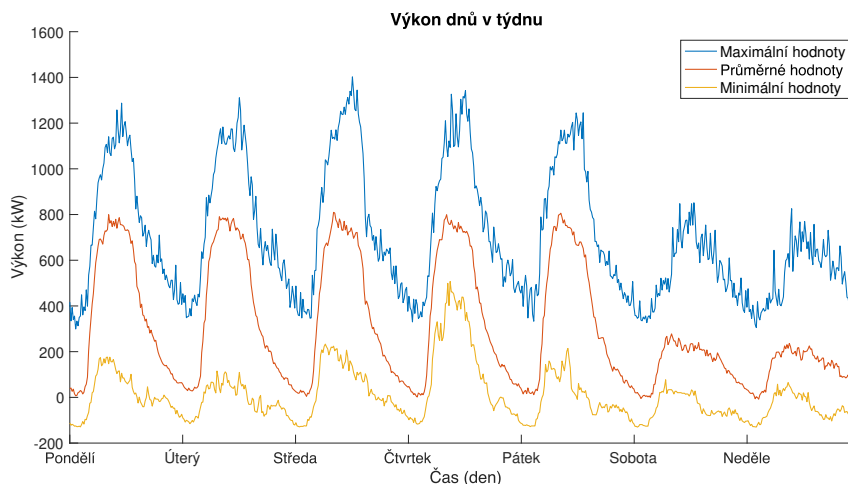
3.3 Load-shifting

Jak je vidět na dalším obrázku 3.3, bateriové úložiště úspěšně omezuje výkon, ale po většinu roku je plně nabito. Nedochází tak jeho plnému využití. Proto bylo zvoleno, že bateriové úložiště se také bude využívat pro akumulaci přebytků energie do sítě. Ty jsou způsobeny větší výrobou než spotřebou. Jejich akumulace je vhodná z toho důvodu, že výkupní cena elektrické energie je menší než cena za spotřebovanou energii. Pro akumulaci těchto přebytků energie musel být celý provoz bateriového úložiště rozdělen na několik režimů. Na obrázku 3.4 je možné poznat, že v ranních a odpoledních hodinách s největší pravděpodobností dochází k přebytkům energie a v dopoledních až odpoledních dochází k možnému výskytu špičky. Byl tak sestaven režim, kdy se v ranních hodinách nabíjí bateriové úložiště z přebytků, v ranních až dopoledních se úložiště dobíjí na maximální dovolenou kapacitu z důvodu možného výskytu špičky, v dopoledních až odpoledních hodinách pokrývá bateriové úložiště možné výkonové špičky, v odpoledních až večerních hodinách se bateriové úložiště vybíjí na určitou hodnotu nabití, aby mohlo akumulovat přebytky energie ve večerních hodinách. Jak je možné vidět na obrázku 3.1, v letních měsících se neočekávají velké přebytky energie, a tak hodnota vybití byla zvýšena pro snížení ztrát a počtu cyklů bateriového úložiště.



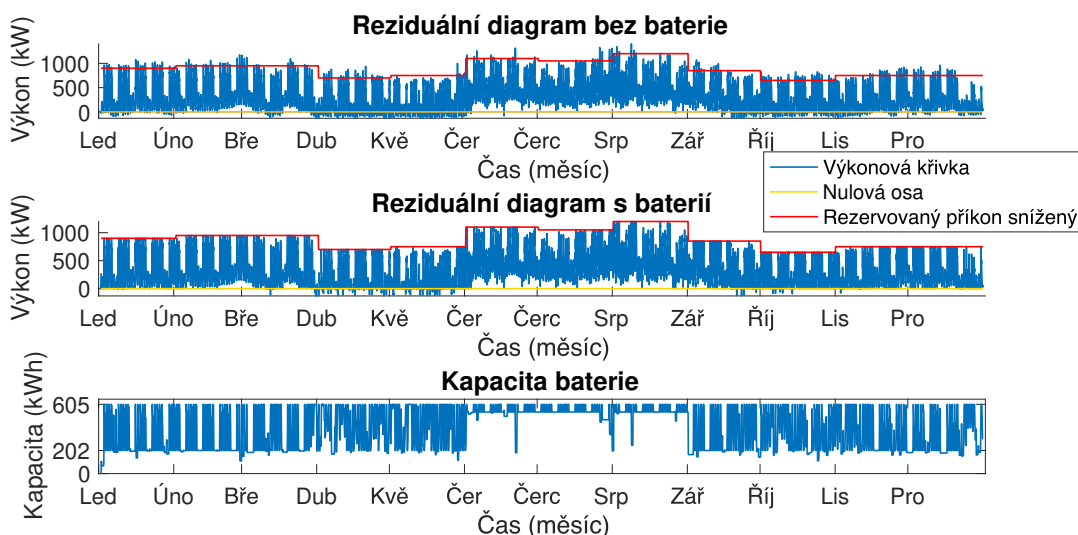
Obrázek 3.4: Graf zobrazující spotřebu pro jeden den

Další pohled na provoz bateriového úložiště je možné vidět na obrázku 3.5. Je z něj možné poznat, že potřeba peak-shavingu byla pouze ve všední dny. O víkendech okamžitý odebraný výkon takových hodnot nedosahuje. O víkendech tak byl nastaven režim, kdy je snaha akumulovat veškeré přebytky energie po celý den. Vyskytla-li se spotřeba energie, akumulací úložiště jí pokrylo a tím umožnilo další akumulování přebytků energie. Zároveň se tím snížily ztráty i počet cyklů bateriového úložiště.



Obrázek 3.5: Graf zobrazující spotřebu v jednotlivých dnech v týdnu.

Tyto režimy byly implementovány do simulačního programu pro peak-shaving a byl vykreslen graf, který je možné vidět na obrázku 3.6. Jak je vidět, hranice rezervovaných příkonů se nezměnily a bateriové úložiště bylo schopno akumulovat velkou část přebytků. Z grafu lze taky poznat, jak se vyvíjí celoroční spotřeba. V letních měsících červen, červenec a srpen se kogenerační jednotka používá pouze pro ohřívání teplé vody a fotovoltaická elektrárna nemá dostatečný výkon pro snížení odebíraného výkonu. Proto jsou rezervované výkony v tyto měsíce nejvyšší. Opačný případ lze vidět v měsíce duben, květen, září a říjen, kdy kogenerační jednotka vyrábí na plný výkon, výroba elektřiny z fotovoltaické elektrárny se zvyšuje oproti zimním měsícům a spotřeba elektrické energie na vytápění klesá z důvodu vyšších teplot okolí. Stejná simulace byly provedeny i pro další dvě velikosti baterie viz tabulky 3.1, 3.2 a 3.3.



Obrázek 3.6: Grafy po použití metody load-shiftingu

Měsíc	Rezervovaný příkon bez baterie (kW)	Rezervovaný příkon s baterií (kW)	Rozdíl rezervovaného příkonu (kW)
Leden	1100	950	150
Únor	1200	1050	150
Březen	1150	1000	150
Duben	950	750	200
Květen	1050	850	200
Červen	1350	1150	200
Červenec	1350	1100	250
Srpen	1450	1250	200
Září	1100	900	200
Říjen	850	700	150
Listopad	950	800	150
Prosinec	1000	800	200

Tabulka 3.1: Rezervovaný příkon pro baterii 340 kWh

Měsíc	Rezervovaný příkon bez baterie (kW)	Rezervovaný příkon s baterií (kW)	Rozdíl rezervovaného příkonu (kW)
Leden	1100	900	200
Únor	1200	950	250
Březen	1150	950	200
Duben	950	700	250
Květen	1050	750	300
Červen	1350	1100	250
Červenec	1350	1100	250
Srpen	1450	1200	250
Září	1100	850	250
Říjen	850	650	200
Listopad	950	750	200
Prosinec	1000	750	250

Tabulka 3.2: Rezervovaný příkon pro baterii 672 kWh

Měsíc	Rezervovaný příkon bez baterie (kW)	Rezervovaný příkon s baterií (kW)	Rozdíl rezervovaného příkonu (kW)
Leden	1100	850	250
Únor	1200	900	300
Březen	1150	900	250
Duben	950	650	300
Květen	1050	750	300
Červen	1350	1050	300
Červenec	1350	1000	350
Srpen	1450	1150	300
Září	1100	800	300
Říjen	850	650	200
Listopad	950	700	250
Prosinec	1000	700	300

Tabulka 3.3: Rezervovaný příkon pro baterii 1008 kWh

Další tabulka 3.4 porovnává jednotlivé baterie. Všechny simulace vycházely z předpokladu, že výroba kogenerační jednotky a fotovoltaické elektrárny jsou stejné. Stejně jsou také režimy bateriového úložiště během dne i týdne. Tato rozhodnutí byla zvolena především z důvodu objektivního posouzení jednotlivých variant bateriových úložišť.

Baterie (kWh)	340	672	1008
Spotřeba bez baterie (kWh)	2 900 957,49		
Dodávka do sítě bez baterie (kWh)	53 380,64		
Spotřeba s baterií (kWh)	2 875 169,65	2 868 103,75	2 868 694,83
Dodávka do sítě s baterií (kWh)	21 209,28	9 019,89	4 930,45
Rozdíl spotřeby bez a s baterií (kWh)	25 787,84	32 853,77	32 262,66
Rozdíl dodávek do sítě bez a s baterií (kWh)	32 171,36	44 360,75	48 450,19
Počet cyklů (-)	152	141	132
Průměrný snížený měsíční rezervovaný příkon (kW)	200	250	300

Tabulka 3.4: Vliv jednotlivých baterií na spotřebu

3.4 Zhodnocení modelu

Z dat simulací lze poznat, že metody peak-shavingu a load-shiftingu bylo úspěšně docíleno. Tento postup není prediktivní a jedná se tedy o vyhodnocení historických dat. Pro predikci reziduálního diagramu a s tím i podmínek provozu by bylo potřeba použití technologie neuronových sítí. Pomocí této technologie by bylo možné částečně predikovat spotřebu a upravit tím tak provoz baterie.

I tak je možno vidět, že zapojení bateriového úložiště má pozitivní dopady. V kapitole 4.3 je

poté zhodnocení jednotlivých variant především po stránce délky návratnosti. Zatím co snižování rezervovaného příkonu je téměř lineární k velikosti bateriového úložiště, akumulace přebytků energie má spíše exponenciální charakteristiku. Zvolené rezervované příkony byly zaokrouhleny na násobky padesáti pro vytvoření určité rezervy. V letních měsících je poznat, že kogenerační jednotka vyrábí omezeně. Zvolilo-li by se zvětšení fotovoltaické elektrárny, nastal by problém především s měsíci duben a květen, kdy by vznikly velké přebytky energie. Takové přebytky by ani bateriové úložiště o kapacitě 1008 kWh nedokázalo akumulovat.

4 Vyhodnocení provozu

4.1 Hledisko technické

4.1.1 Parametry navrhovaného řešení

Informace o bateriích (technické i ekonomické) byly převzaty z bakalářské práce Bc. Jakuba Okurky. [33]

Technická data	
C-rate	1C
Články	Lithium NMC prismatic (Samsung SDI)
Cyklická životnost* (23°C, 1C/1C, 100% DoD)	6000
Cyklická životnost* (23°C, 0.5C/0.5C 100% DoD)	8000
Kalendářní životnost	30 let
Efektivita (baterie)	<98%
Napětí (V DC)	627–930
Samostatná kapacita systému (Ah)	94
Teplotní podmínky	-20°C/45°C
Kontejner 20ft/40ft	
Délka (m)	6,06/12,19
Šířka (m)	2,44
Výška (m)	2,9
Maximální počet úložných systémů (-)	12/24
Maximální kapacita (kWh)	864/1728

* 30% ztráta kapacity

Tabulka 4.1: Parametry úložiště TPS od TESVOLT [33]

Následující tabulky 4.2, 4.3, 4.4 uvádí technické parametry jednotlivých baterií použitých v simulacích. Je zde uvedena kapacita a výkon bateriového úložiště, potřebná velikost kontejneru a typ měniče. V simulacích se stav nabití bateriového úložiště pohyboval mezi 30 % a 90 % kapacity. Tyto meze byly zvoleny, aby nedocházelo ke zkrácení životnosti lithiových baterií.

Produkt	TPS 500
Měnič	SMA SCS 500
Výkon (kVA)	500
Počet bateriových systémů (-)	5
Kapacita bateriového systému (kWh)	67,2
Celková kapacita bateriového úložiště (kWh)	336
Kontejner	20ft

Tabulka 4.2: Parametry úložiště TPS 336 kWh [33]

Toto bateriové úložiště dokázalo snížit průměrný rezervovaný příkon o 200 kW. Dále dokázalo akumulovat 60 % přebytků energie a následně využilo 80 % této energie pro snížení roční spotřeby. Úložiště dosáhlo 152 cyklů za rok, z čehož lze vypočítat životnost 39 let. Tato životnost přesahuje kalendářní i cyklickou životnost udávanou výrobcem viz tabulka 4.1.

Produkt	TPS 650
Měnič	SMA SCS 720
Výkon (kVA)	720
Počet bateriových systémů (-)	10
Kapacita bateriového systému (kWh)	67,2
Celková kapacita bateriového úložiště (kWh)	672
Kontejner	20ft

Tabulka 4.3: Parametry úložiště TPS 672 kWh [33]

Toto bateriové úložiště dokázalo snížit průměrný rezervovaný příkon o 250 kW. Dále dokázalo akumulovat 83 % přebytků energie a následně využilo 74 % této energie pro snížení roční spotřeby. Úložiště dosáhlo 141 cyklů za rok, z čehož lze vypočítat životnost 43 let. Tato životnost přesahuje kalendářní i cyklickou životnost udávanou výrobcem viz tabulka 4.1.

Produkt	TPS 1000
Měnič	SMA SCS 1000
Výkon (kVA)	1000
Počet bateriových systémů (-)	14
Kapacita bateriového systému (kWh)	72
Celková kapacita bateriového úložiště (kWh)	1008
Kontejner	40ft

Tabulka 4.4: Parametry úložiště TPS 1008 kWh [33]

Toto bateriové úložiště dokázalo snížit průměrný rezervovaný příkon o 300 kW. Dále dokázalo akumulovat 91 % přebytků energie a následně využilo 67 % této energie pro snížení roční spotřeby. Úložiště dosáhlo 132 cyklů za rok, z čehož lze vypočítat životnost 46 let. Tato životnost

přesahuje kalendářní i cyklickou životnost udávanou výrobcem viz tabulka 4.1. Toto úložiště má také dvojnásobné nároky na potřebnou plochu pro výstavbu oproti předchozím dvou modelům.

4.2 Hledisko ekologické

Před zapojením výroby v objektu byla veškerá energie dodávaná ze sítě. U této energie je Ministerstvem průmyslu a obchodu vydávaná každoroční zpráva o hodnotách emisního faktoru CO_2 . Hodnoty pro každý rok lze vidět v tabulce 4.5. [34]

Rok	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
$t \frac{CO_2}{MWh}$	0,554	0,541	0,506	0,477	0,480	0,493	0,499	0,472	0,466	0,428	0,384	0,394*

* odhadovaná hodnota pro rok 2021

Tabulka 4.5: Hodnoty emisního faktoru CO_2 pro vyrobenou elektřinu v ČR [34]

Jsou-li tedy nainstalované zdroje elektrické energie s nižším emisním faktorem, musí být výsledný emisní faktor nižší. Emise kogenerační jednotky TEDOM, vhodné pro použití této práce, jsou $0,3 t \frac{CO_2}{MWh}$. Energie vyrobená z fotovoltaických panelů je považována jako bezemisní. Příklad výpočtu nového emisního faktoru CO_2 pro rok 2021 je možno vidět ve vzorci 4.1: [35]

$$\begin{aligned}
 \text{Emisni faktor} &= \frac{(\text{Spoteba} + \text{Dodavka}) \cdot \text{Emise}_{MPO} + \text{vyroba}_{KGJ} \cdot \text{Emise}_{KGJ}}{\text{Celkova}_{\text{spotreba}}} \\
 &= \frac{(2900957,49 + 53380,64) \cdot 0,394 + 5306391,61 \cdot 0,3}{8247908,75} = 0,334 \quad \left(t \frac{CO_2}{MWh}\right).
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

4.3 Hledisko ekonomické

4.3.1 Cena elektrické energie

Ceny spotřebované energie byly stanoveny podle ceníku SPOT pro podnikatele společnosti ČEZ pro rok 2021. Ta udává cenu silové elektřiny dle denního trhu s elektřinou a k této ceně připočítává 195 Kč/MWh. Dále byla připočtena cena za distribuci, kterou každý rok udává OTE, cena za systémové služby (Sys) a cena za podporu výkupu elektřiny z obnovitelných zdrojů (POZE). Ceníky, z kterých bylo vycházeno, jsou obecné, a tím pádem by výsledná cena za spotřebu mohla být nižší. Celý výpočet lze vidět ve vzorci 4.2: [36], [37]

$$C_{spotreba} = C_{OTE_{DT}} \cdot kurz_{CNB_{CZK/EUR}} + 195 + C_{Distribuce} + C_{SyS} + C_{POZE} \quad (CZK/MWh). \quad (4.2)$$

Dále byly stanoveny ceny vykoupené elektřiny dle ceníku pro výkup elektřiny z decentralizovaných zdrojů společnosti ČEZ pro rok 2021. Výpočet lze vidět ve vzorci 4.3: [38]

$$C_{vyroba} = C_{OTE_{DT}} \cdot kurz_{CNB_{CZK/EUR}} - 500 \quad (CZK/MWh). \quad (4.3)$$

Tyto ceny pak byly přenásobeny spotřebou nebo dodávkou za hodinu z reziduálního diagramu. Výsledkem pak byly dvě částky, kolik objekt zaplatí za elektřinu a kolik mu bude zapláceno za dodanou elektřinu do sítě. Úspory, které vznikly akumulováním přebytků energie do sítě jsou v tabulce 4.6 označeny jako výnosy load-shiftingem. Výnosy peak-shavingem reprezentují ušetřený rezervovaný příkon. Dle ceníku společnosti ČEZ z roku 2021 je cena rezervovaného příkonu 198,281 Kč/kW. V tomto ceníku jsou vyčísleny i pokuty za překročení tohoto příkonu. Cena je stanovena na 861 Kč/kW/měsíc. Nastane-li situace, že bude aplikována metoda peak-shavingu špatně, může se stát, že celoroční snaha o snížení rezervovaného příkonu přijde vniveč během pár okamžiků. [39]

Do ceny bateriového úložiště musí být dále zahrnuty provozní náklady. Fixní provozní náklady jsou lineárně závislé na kapacitě úložiště a byly kalkulovány cenou 355 Kč/kWh. Variabilní provozní náklady jsou lineárně závislé na množství energie, které proteče přes bateriové úložiště za 30 let a byly kalkulovány cenou 45,156 Kč/MWh. [33]

Baterie (kWh)	336	672	1008
Cena za spotřebu bez baterie (Kč)	17 372 479,73		
Cena za dodávku do sítě bez baterie (Kč)	75 810,24		
Cena za spotřebu s baterií (Kč)	17 190 239,88	17 109 377,59	17 078 164,45
Cena za dodávku do sítě s baterií (Kč)	24 969,37	8 859,83	4 247,26
Rozdíl spotřeby (Kč)	182 239,85	263 102,14	294 315,28
Rozdíl dodávky do sítě (Kč)	50 840,87	66 950,41	71 562,98
Výnosy load-shiftingem (Kč)	131 398,98	254 242,31	290 068,02
Výnosy peak-shavingem (Kč)	436 218,20	565 100,85	674 155,40
Cena baterie (Kč)	7 000 000,00	14 000 000,00	20 000 000,00
Fixní provozní náklady (Kč)	119 280,00	238 560,00	357 840,00
Variabilní provozní náklady (Kč)	69 186,22	128 358,64	180 248,30
Návratnost (rok)	12,66	17,53	21,30

Tabulka 4.6: Vliv jednotlivých baterií na spotřebu objektu

Z tabulky 4.6 lze poznat, že nejkratší návratnost má bateriové úložiště o kapacitě 336 kWh.

Důvodem je především cena bateriového úložiště. Pro bateriové úložiště o kapacitě 672 kWh, které je dvojnásobně větší než 336kWh úložiště, jsou výnosy z peak-shavingu a load-shiftingu pouze 1,5 násobné. Podobně to platí i pro 1008kWh úložiště.

Návratnost bateriových úložišť je delší a s vysokou pravděpodobností by takovou investici podnik nerealizoval. Je zde ale možnost čerpat dotace na bateriové úložiště z programu Fotovoltaické systémy s/bez akumulace (součást Národního plánu obnovy). Z tohoto programu může být poskytnuto až 50 % investičních nákladů na akumulární zařízení a fotovoltaickou elektrárnu. Při provozu kogenerační jednotky přispívá stát 353 Kč/MWh po dobu 3000 provozních hodin. Tato cena byla zjištěna z Energetického regulačního věstníku pro rok 2021 vydávaného Energetickým regulačním úřadem. Pokud by byly využity zmíněné dotace, stal by se celý projekt investice zajímavý a mohl by být realizován.

5 Závěr

S rostoucím instalovaným výkonem obnovitelných zdrojů může v budoucnosti dojít k problému udržení frekvence sítě na jmenovité hodnotě. Připravit energetickou síť na takový provoz je jeden z hlavních úkolů vědeckých pracovníků a společností, starajících se o stabilitu sítě. Jde především o možnost rychle reagovat změnou výkonu, začne-li nebo přestane-li svítit slunce nebo foukat vítr. Je tedy potřeba vylepšovat technologie toho schopné a systematicky je nasazovat. Tyto technologie jsou popsány v první kapitole této práce. Je zde zjednodušeně vysvětlen princip, uvedeny typické parametry a reálná použití ve světě i v ČR.

Následující kapitola popisuje legislativní požadavky a způsob vyrovnávání výkonové bilance na území ČR. Je zde porovnáno i použití jednotlivých technologií pro služby zajišťující výkonovou bilanci. Elektrochemická, setrvačnicková, superkapacitorová a supravodivá úložiště se především hodí pro zlepšení regulovatelnosti velkých a starých zdrojů elektrické energie. Výroba syntetického paliva nebyla doposud silně prosazována především kvůli nízké ceně zemního plynu. Geopolitický vývoj v posledním roce by mohl pomoci této technologii v prosazení. Vzrůstající cena zemního plynu a snaha Evropy přestat odebírat ruské nerostné suroviny této technologii přímo nahrávají.

V praktické části byla simulována integrace kogenerační jednotky, fotovoltaické elektrárny a bateriového úložiště do obecného objektu. Zdroje elektrické energie byly zvoleny tak, aby co nejvíce omezily roční spotřebu, a přitom vytvořily přebytky energie tak vysoké, aby je bateriové úložiště bylo schopné akumulovat. Poté byly vytvořeny tři simulace různých velikostí těchto úložišť. Jejich úkolem nebylo pouze akumulovat co nejvíce přebytků energie, ale i omezit rezervovaný příkon objektu. Těchto úkolů bylo úspěšně docíleno. I přesto lze poznat podle počtů cyklů, že bateriová úložiště nejsou naplno využita. Mohlo by tedy sloužit i k vyhlazování reziduálního diagramu a tím tak zvýšit kvalitu odebírané elektrické energie.

Jednotlivé varianty úložišť byly porovnány i z ekonomického hlediska. Nejkratší návratnosti 12,55 let dosahovalo nejmenší bateriové úložiště o kapacitě 336 kWh. Nejdelší návratnost 21,12 let mělo naopak největší bateriové úložiště o kapacitě 1008 kWh. Investice o takové délce návratnosti jsou téměř nerealizovatelné. Pro takové investice je však možné čerpat dotace, které mohou zkrátit návratnost až o polovinu.

Je-li pak porovnána spotřebovaná energie areálu před a po integraci výrobních a akumulačních zařízení, lze zde vidět pokles emisního faktoru CO_2 . Toto řešení je tak výhodné i z environmentální stránky.

Tento simulační model byl použit na data spotřebované energie, která by se dala přirovnat k jednosměrnému provozu výrobního podniku. Použil-li by se model na jiný typ provozu, například třísměrný provoz nebo provoz nerozdělující všední dny a víkendy, dosáhlo by se většího využití bateriového úložiště a z ekonomické stránky by pak model mohl docílit kratší návratnosti.

V následujících letech budeme moci vidět značný vývoj v oblasti akumulace elektrické energie a postupnou přípravu legislativy pro nasazení takových zařízení. Aktuálně jsou však podmínky světové politiky a ekonomiky značně nejisté.

Seznam použité literatury

- [1] K. Máslo, *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. [Praha]: Asociace energetických manažerů, 2013, ISBN: isbn978-80-260-4461-1.
- [2] V. Mužík, „Optimalizace spotřeby energie včetně netradičních přeměn energie,“ Disertační, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2019. URL: <http://hdl.handle.net/11025/37401> (cit. 09.05.2022).
- [3] *What does Peak shaving mean?* Cologne(Germany). URL: <https://www.next-kraftwerke.com/knowledge/what-is-peak-shaving> (cit. 09.05.2022).
- [4] *What is peak shaving and how does it work?* York, USA. URL: <https://www.shipleyenergy.com/resources/commercial/peak-shaving> (cit. 09.05.2022).
- [5] *A Comparison of the Environmental Effects of Open-Loop and Closed-Loop Pumped Storage Hydropower*, Washington, DC, 2020. URL: <https://www.energy.gov/eere/water/downloads/comparison-environmental-effects-open-loop-and-closed-loop-pumped-storage> (cit. 09.05.2022).
- [6] *The World's Largest Battery Isn't What You Think*, 2022. URL: <https://undecidedmf.com/episodes/the-worlds-largest-battery-isnt-what-you-think> (cit. 09.05.2022).
- [7] X. Luo, J. Wang, M. Dooner a J. Clarke, „Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation,“ *Applied Energy*, roč. 137, s. 511–536, 2015, ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914010290>.
- [8] J. Budín, *Přečerpávací vodní elektrárna - princip a uspořádání*, cs. URL: <https://oenergetice.cz/elektrina/precerpavaci-vodni-elektrarna-princip-usporadani-2> (cit. 31.10.2021).
- [9] *State Grid of China unveils plans for 100GW battery fleet*, 2022. URL: <https://www.pv-magazine.com/2022/02/25/state-grid-of-china-unveils-plans-for-100gw-battery-fleet/> (cit. 09.05.2022).
- [10] G. Venkataramani, R. Velraj a K. Viswanathan, „Harnessing Free Energy From Nature For Efficient Operation of Compressed Air Energy Storage System and Unlocking the Potential of Renewable Power Generation,“ *Scientific Reports*, roč. 8, čvc. 2018. DOI: [10.1038/s41598-018-28025-5](https://doi.org/10.1038/s41598-018-28025-5).
- [11] G. Venkataramani, V. Ramalingam a K. Viswanathan, „Harnessing Free Energy From Nature For Efficient Operation of Compressed Air Energy Storage System and Unlocking the Potential of Renewable Power Generation,“ *Scientific Reports*, roč. 8, č. 1, 2018, ISSN: 2045-2322. DOI: [10.1038/s41598-018-28025-5](https://doi.org/10.1038/s41598-018-28025-5). URL: <http://www.nature.com/articles/s41598-018-28025-5> (cit. 25.02.2022).

-
- [12] *World's First 100MW Advanced Compressed Air Energy Storage System Expander Completes Integration Test*, Beijing, 2020. URL: <http://en.cnesa.org/latest-news/2020/8/3/worlds-first-100mw-advanced-compressed-air-energy-storage-system-expander-completes-integration-test> (cit. 14.02.2022).
- [13] *Setrvačnický se točí, svět ale nedobyly. Zatím*, cs. URL: https://www.technickydenik.cz/rubriky/energetika-teplo/setrvacniky-se-toci-svet-ale-nedobyly-zatim_53055.html (cit. 01.11.2021).
- [14] *MECHANICAL ENERGY STORAGE*, en. URL: <https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/mechanical-energy-storage/> (cit. 01.11.2021).
- [15] *How Gas Turbine Power Plants Work*. URL: <https://www.energy.gov/fecm/how-gas-turbine-power-plants-work> (cit. 01.04.2022).
- [16] *Gas Turbine Power Plant*, 2020. URL: <https://www.electrical4u.com/gas-turbine-power-plant/> (cit. 09.04.2022).
- [17] R. Shanthini, „Thermodynamics for Beginners - Chapter 12 THERMODYNAMIC ANALYSES OF POWER PLANTS,“ s. 273–304, URL: https://www.researchgate.net/publication/326607333_Thermodynamics_for_Beginners_-_Chapter_12_THERMODYNAMIC_ANALYSES_OF_POWER_PLANTS (cit. 13.03.2022).
- [18] *V TEMELÍNĚ TESTOVALI DŮLEŽITÝ BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉM*, cs. URL: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/v-temeline-testovali-dulezity-bezpecnostni-system-43939> (cit. 04.11.2021).
- [19] *Olověné akumulátory*, 2019. URL: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/20053-olovene-akumulatory> (cit. 09.05.2022).
- [20] ‘Minimal downtime’: Yunicos swaps out lead-acid for lithium at Texas’ Notrees wind farm, 2017. URL: <https://www.energy-storage.news/minimal-downtime-yunicos-swaps-out-lead-acid-for-lithium-at-texas-notrees-wind-farm/>.
- [21] *Lithiové akumulátory*, 2019. URL: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory> (cit. 09.05.2022).
- [22] *Velkokapacitní baterie v elektrárně Tušimice pracuje téměř na 100 procent*, 2021. URL: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/velkokapacitni-baterie-v-elektrarne-tusimice-pracuje-temer-na-100-procent> (cit. 09.05.2022).
- [23] *UAE integrates 648MWh of sodium sulfur batteries in one swoop*, 2019. URL: <https://www.energy-storage.news/uae-integrates-648mwh-of-sodium-sulfur-batteries-in-one-swoop/> (cit. 09.05.2022).
- [24] *Dalian-UET / Rongke Power – Battery Energy Storage System, China*, 2021. URL: <https://www.power-technology.com/marketdata/dalian-uet-rongke-power-battery-energy-storage-system-china/> (cit. 09.05.2022).
- [25] *Energy Storage Grand Challenge Energy Storage Market Report 2020*, 2020. URL: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/12/f81/Energy%20Storage%20Market%20Report%202020_0.pdf (cit. 10.05.2022).

- [26] *Superconducting Magnetic Energy Storage*. URL: <http://www.eseslab.com/ESsensePages/SMES-page> (cit. 10.05.2022).
- [27] *Power-to-gas: Fix for all problems or simply too expensive?* 2018. URL: <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/power-gas-fix-all-problems-or-simply-too-expensive> (cit. 11.05.2022).
- [28] *Thermal Energy Storage*. URL: <http://www.eseslab.com/ESsensePages/TES-page> (cit. 11.05.2022).
- [29] „Natural Gas Power Plants.“ (2013), URL: <http://www.jasonmunster.com/natural-gas-power-plants/> (cit. 25.03.2022).
- [30] „The Life Expectancy of Your Diesel Generator.“ (2020), URL: <https://www.reactpower.com/blog/the-life-expectancy-of-your-diesel-generator/> (cit. 28.03.2022).
- [31] „Kodex PS.“ (2021), URL: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps> (cit. 01.02.2022).
- [32] *Supporting Document for the Network Code on Load-Frequency Control and Reserves*, en. URL: https://documents.acer.europa.eu/Official_documents/Acts_of_the_Agency/Annexes/ENTSO-E%20%99s%20supporting%20document%20to%20the%20submitted%20Network%20Code%20on%20Load-Frequency%20Control%20and%20Reserves.pdf (cit. 22.01.2022).
- [33] J. Vokurka, *Využití aktuálních technologií akumulace elektrické energie provozovatelem distribučních sítí*, Bakalářská práce, Plzeň, 2021. URL: <http://hdl.handle.net/11025/44489> (cit. 17.05.2022).
- [34] *Emisní faktor CO₂ z výroby elektřiny za léta 2010–2021*, 2021. URL: https://www.mpo.cz/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/hodnota-emisniho-faktoru-co2-z-vyroby-elektriny-za-leta-2010_2020--260559/ (cit. 20.05.2022).
- [35] *Kogenerační jednotky TEDOM*. URL: <https://www.tedom.com/cs/kogeneracni-jednotky/zemni-plyn> (cit. 20.05.2022).
- [36] *Ceník elektřiny na dobu neurčitou SPOT*. URL: <https://www.cezesco.cz/cs/produkty/elektrina/ceniky> (cit. 21.05.2022).
- [37] *Energetický regulační VĚSTNÍK*, 2020. URL: <https://www.eru.cz/sites/default/files/obsah/prilohy/erv92020.pdf> (cit. 21.05.2022).
- [38] *VÝKUP ELEKTRĚINY V TRŽNÍM REŽIMU*, 2021. URL: <https://www.cez.cz/edee/content/file/produkty-a-sluzby/obcane-a-domacnosti/elektrina-2021/mop/20210419-vykup-elektriny-v-trznim-rezimu-mop.pdf> (cit. 21.05.2022).
- [39] *REGULOVANÉ CENY PŘI PŘEKROČENÍ REZERVOVANÉHO PŘÍKONU A VÝKONU*, 2021. URL: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/pro-zakazniky/potrebuji-vyresit/ceny-a-podminky/ceny-pri-prekroceni-rezervovaneho-prikonu-a-vykonu> (cit. 22.05.2022).