

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra počítačů

Algoritmus pro řízení hybridních zdrojů elektrické energie s neurčitým požadavkem

Bc. Jitka Stoklasová

Školitel: doc. Ing. Přemysl Šůcha, Ph.D.

Obor: Software inženýrství

Květen 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stoklasová** Jméno: **Jitka** Osobní číslo: **457781**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra počítačů**
Studijní program: **Otevřená informatika**
Specializace: **Softwarové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Algoritmus pro řízení hybridních zdrojů elektrické energie s neurčitým požadavkem

Název diplomové práce anglicky:

Algorithm for control of hybrid sources of energy with uncertain demand

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je navrhnout a odzkoušet algoritmus pro řízení zdrojů elektrické energie doplněné zásobníkem elektrické energie. Specifikem této práce je, že není dopředu známo, jaké množství energie bude požadováno. Je pouze znám rozsah, ve kterém se bude odběr v čase pohybovat. Práce se skládá z těchto úkolů:

1. provedte rešerši existující literatury,
2. seznamte se vlastnostmi podpůrných služeb v energetice,
3. navrhnete algoritmus pro řízení zdrojů energie s neurčitým požadovaným výkonem,
4. algoritmus otestujte na reálných datech.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Juan I. Pérez-Díaz et al., Medium-term scheduling of a hydropower plant participating as a price-maker in the automatic frequency restoration reserve market, Electric Power Systems Research, Volume 185, 2020.
[2] H. Firoozi et al., Optimized Operation of Local Energy Community Providing Frequency Restoration Reserve, IEEE Access, Volume 8, page 180558-180575, 2020.
[3] P. Šůcha et al., Nash equilibrium solutions in multi-agent project scheduling with milestones, European Journal of Operational Research, Volume 294, Issue 1, 2021, Pages 29-41.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Přemysl Šůcha, Ph.D. katedra řídicí techniky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **15.09.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **10.01.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2024**

doc. Ing. Přemysl Šůcha, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Přemyslu Šúchovi, Ph.D. za vedení práce, trpělivost a pomoc při analýzách dat. Bc. Petrovi Stejskalovi děkuji za provedení technickými parametry a psychickou podporu. Nakonec děkuji Ing. Martinu Henychovi za procházení psané verze diplomové práce a připomínky k textu.

Prohlášení

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

V Praze, 25. května 2023

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá analýzou, vývojem a testováním algoritmu operativního řízení zdrojů elektrické energie doplněné o zásobník elektrické energie. V první části se práce zabývá existujícími algoritmy určených k řízení zdrojů elektrické energie a seznámením se s vlastnostmi podpůrných služeb v energetice. V druhé části je navržen algoritmus využívající MILP pro řízení zdrojů elektrické energie se zásobníkem elektrické energie a analýzou robustnosti řízení. V poslední části jsou řídicí algoritmus a robustní řízení testovány na datech inspirovaných reálnými daty z probíhajícího výzkumu.

Klíčová slova: optimalizace, ILP, MILP, řízení, hybridní zdroj energie, aFRR, robustnost

Školitel: doc. Ing. Přemysl Šůcha,
Ph.D.
Český institut informatiky, robotiky a
kybernetiky,
Jugoslávských partyzánů 1580,
Praha 6

Abstract

The diploma theses is focused on the analysis, development and testing of the algorithm for operational control of electrical energy sources supplemented by the battery. The first part of the thesis is focused on existing algorithms designed to control electricity sources and familiarization with the rules of Frequency Restoration Reserve services in the energy industry. The second part describes designed algorithm for control of electrical energy sources supplemented by the battery using MILP and analyse robustness of control of electrical energy sources. The last part is testing of control algorithm and the analysis of the robustness of control on data similar to real data from ENEST project.

Keywords: optimization, ILP, MILP, control, hybrid source of energy, aFRR, robustness

Title translation: Algorithm for control of hybrid sources of energy with uncertain demand

Obsah

Zadání práce	iii
1 Úvod	1
1.1 Motivace	1
1.2 Související práce	2
1.3 Přínos práce	5
2 Úvod do problematiky	7
2.1 Podpůrné služby	7
2.2 ENEST	8
3 Popis problému	11
4 Popis MILP s předpokladem budoucná	15
4.1 Zavedení proměnných	15
4.2 Kriteriaální funkce	18
4.3 Podmínky MILP	18
5 Analýza robustnosti	23
5.1 Zavedení proměnných	23
5.2 Pseudokód algoritmu analýzy robustnosti	28
5.3 Analýza diagramů z algoritmu ..	32
5.3.1 Jednoduché scénáře se 3 turbínami	33
5.3.2 Komplexní scénáře se 6 turbínami	41
5.3.3 Zhodnocení výsledků	49
6 Robustní řízení	51
6.1 Callback	51
7 Experimenty	53
7.1 Popis testovacího prostředí	53
7.2 MILP	53
7.3 Robustní řízení	55
7.4 Porovnání ceny MILP a robustního řízení	55
7.4.1 Různý počet turbín	60
7.4.2 Různá iniciální energie v baterii	60
7.4.3 Různý výkon baterie	61
7.4.4 Celkové zhodnocení	61
8 Závěr	65
Literatura	67
A Seznam použitých zkratk	71
B Elektronické přílohy	73

Obrázky

2.1 Ukázka požadavku na aFRR, odezva systému a meze pro splnění požadavku [21]	8
2.2 Schéma základní koncepce hybridního zdroje pro poskytování podpůrných služeb [22]	9
3.1 Stavový diagram turbíny	11
5.1 Graf: Výkon baterie přesáhl maximální technický výkon baterie	35
5.2 Graf: Přifázování a odfázování turbíny, vybíjecí výkon baterie	36
5.3 Graf: Nedostatek energie v baterii	37
5.4 Graf: Nedostatek energie v baterii	39
5.5 Graf: Vybití baterie	40
5.6 Graf: Výkon baterie přesáhl maximální technický výkon baterie	42
5.7 Graf: Přifázování a odfázování turbín	43
5.8 Graf: Přesah maximálního výkonu baterie	44
5.9 Graf: Nedostatek energie v baterii	46
5.10 Graf: Přifázování a odfázování turbín	47
5.11 Graf: Nedostatek energie v baterii	48
7.1 Graf: Experiment MILP jednoduchý scénář	57
7.2 Graf: Experiment MILP jednoduchý scénář	58
7.3 Graf: Průběh P^{REQ} v čase pro tři turbíny	59

Tabulky

3.1 Obecné parametry algoritmu ...	12
3.2 Parametry turbíny	12
3.3 Parametry turbíny	13
3.4 Parametry baterie	13
4.1 Proměnné MILP	16
4.2 Parametry MILP	18
5.1 Parametry k analýze robustnosti	24
5.2 Parametry MILP	25
5.3 Parametry MILP	26
5.4 Parametry MILP	28
7.1 Různý počet turbín MILP a robustního řízení	62
7.2 Různá energie v baterii MILP a robustního řízení	63
7.3 Různý výkon baterie MILP a robustního řízení	64

Kapitola 1

Úvod

V dnešní době je elektrická energie běžnou součástí života většiny lidí. V mnoha odvětvích je elektrická energie nepostradatelná a přerušením jejích dodávek by mělo velké následky. To vyvíjí tlak na stabilní dodávání energie do elektrické sítě. Dalším tlakem na výrobu energie je produkovat minimální uhlíkovou stopu. Proto jsou využívány na výrobu energie elektrárny fungující na principu výroby energie z obnovitelných zdrojů. Solární elektrárny jsou ovšem používány i spousty lidmi kvůli finančním výhodám zvláště v poslední době, kdy byla cena za energie vysoká i díky vnějším vlivům.

Stoupá tedy počet elektráren fungujících na principu výroby energie z obnovitelných zdrojů. A to sebou nese výhody v šetření finančních prostředků a životního prostředí, taktéž to nese své nevýhody ve špatné predikci výroby této energie. Určitou pomocí ve stabilitě je využití baterie, tím se dostane z elektráren méně přebytečné energie do sítě. Také se oddálí doba, kdy je potřeba energii ze sítě spotřebovat pokud mluvíme o domácích elektrárnách. Nebo se oddálí nutnost vyrovnávání energie v síti jinými způsoby, protože časové intervaly, kdy energie není vyráběna, může energie být dodávána z baterie.

Ovšem, ať už deficit energie, tak i přebytek energie, je potřeba v elektrické síti vyrovnat. S novými technologiemi tak vznikla možnost vyrovnávání energie pomocí distribuovaných zdrojů energie tvořících virtuálně jeden zdroj. Nebo zdroje energie mohou mít více rozdílných vektorů výroby tvářící se jako jedna celistvá elektrárna a tím se dostáváme k termínu hybridní zdroj energie. Každý tento vektor výroby může mít odlišné charakteristiky chování, to může vytvářet potřebu koordinovat jejich spolupráci. A zde nastává potřeba řízení, které dokáže optimálně rozdělit výrobu energie na samostatné zdroje v rámci hybridního zdroje.

1.1 Motivace

Cílem této diplomové práce je návrh a vývoj řídicího algoritmu, který zajistí optimální rozložení výroby elektrické energie na zdrojích v rámci hybridního zdroje energie. V hybridním zdroji uvažujeme zapojení plynových turbín a vysokokapacitní baterie.

Cílem řídicího algoritmu je minimalizace nákladů na provoz plynových

turbín při splnění technických podmínek turbín a baterie. K tomu je využito kombinované celočíselné lineární programování (MILP).

Dále pak analýza robustnosti řídicího algoritmu, pro kterou byl navrhnut a vytvořen algoritmus vracející stavy, ve kterých hybridní zdroj není schopen plnit požadavky na aktivaci podpůrných služeb. A nakonec, po následné analýze těchto nesplnitelných požadavků na aktivaci podpůrných služeb, vytvoření robustního řízení. A to využitím původního MILP s přidáním funkcí callback pro testování stavů, kde by mohlo dojít k neschopnosti plnit požadavky na aktivaci podpůrných služeb.

Celá tato práce tedy dává vhled a vysvětlení problematiky optimálního řízení za zadaných podmínek hybridního zdroje.

1.2 Související práce

V této kapitole se podíváme na již zpracované články ohledně témat řešících optimalizaci zdrojů elektrické energie a tepla.

Články jsou rozděleny podle časového horizontu, na který se zaměřuje, do tří kategorií. Těmi jsou dlouhodobý, střednědobý a krátkodobý horizont. Články jsou popisovány postupně dle data vydání a časového horizontu řízení.

Dlouhodobý horizont

První popisovaný časový horizont je dlouhodobý s typicky ročním obdobím. Článek [1] popisuje kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie. Byl vytvořen matematický model celočíselného lineárního programování (ILP) z historických dat teplárny v Brně. Autoři se zabývali výrobou tepla na denní bázi pro vyrovnání zátěže na samostatných kotlích a pro stanovení produkovaného elektrického výkonu na samostatných turbínách. Výsledkem je optimalizace výroby tepla a vygenerovaný elektrický výkon rozdělené dle ročního období.

Práce [2] představuje optimalizaci se zacílením na ekonomické cíle a environmentální dopad. Autoři vytvořili model ILP s cílem maximalizovat roční zisk a minimalizovat emise skleníkových plynů vytvářených parními elektrárnami. Data jsou zaměřena na technologie parních elektráren a jejich dopad na životní prostředí. Model ILP, který se zaměřuje na minimalizaci nákladů a minimalizaci emisí, se také zabývá článek [3]. V něm je matematickým modelem MILP, který zohledňuje náklady na zemní plyn a biomasy při výrobě elektrické energie, a také skleníkové plyny vytvářené při tomto procesu. Autoři rozebírají integraci zdrojů biomasy do výroby tepla a elektrické energie. Článek [4] se zabývá optimalizací sítě energetických uzlů se zaměřením na finanční životaschopnost a potenciál snížení emisí skleníkových plynů. Výsledkem této studie je ekonomický přínos, snížení emisí a snížení spotřeby zemního plynu v případě energetické interakce mezi alespoň třemi energetickými uzly.

S článkem [5] se dostáváme k obchodním modelům v elektrické energii, které pomocí načasování mají zajistit flexibilitu sítě. Autoři se zaměřují na rovnováhu mezi nabídkou a poptávkou na trhu s energiemi, kde flexibilitu

sítě rozhazuje výroba elektrické energie pomocí solárních panelů a větrných elektráren. Zkoumají čtyři časově založené modely s granularitou dat ve dnech. Článek [6] se zabývá energetickou krizí v Pákistánu. Proto byl navržen model ILP s cílem minimalizovat náklady na výrobu elektrické energie a zkoumá optimální podíl výroby z každého dostupného zdroje energie. Granularitu dat mají v maximálních možných podílech výroby energie dle druhu výroby elektrické energie.

■ Střednědobý horizont

Přesuneme se na další časový horizont, v těchto člancích je časový horizont zaměřen na dny. Článek [7] se zabývá případem, kdy se obnovitelný zdroj energie a říditelný zdroj energie na trhu s energiemi tváří jako jeden subjekt. Problém je formulován jako model ILP, který zahrnuje týdenní tržní ceny na trhu s energiemi. Cílem je maximalizace zisku virtuální elektrárny. Autoři článku [7] dále napsali článek [8], kde se zaměřují na nepředvídatelné generování elektrické energie pomocí obnovitelných zdrojů energie. Cílem autorů bylo zajištění stabilního generování energie při minimalizaci nákladů konvenční elektrárny. Pro tento článek použili virtuální elektrárnu složenou z jednoho obnovitelného a jednoho říditelného zdroje energie.

Ve článku [9] se pomocí modelu ILP autoři zabývají optimalizací plánu akumulace energie v baterii pro řízení špičkového odběru elektrické energie a minimalizace poplatků za spotřebu v systému skladování energie ve fotovoltaických bateriích připojených k síti. Výsledek optimalizace je porovnán s plány, kde se nabíjí baterie mimo špičku a vybíjí ve špičce odběru energie s výsledkem životaschopnosti lithio-iontových baterií. Se článkem [10] se dostáváme k aplikaci systému řízení energie v moderních energetických sítích. Je představen vylepšený programovatelný genetický algoritmus a metoda založená na modelu MILP pro plánování generování a odesílání jednotek energie v mikrosíti. Také byl představen model chování stárnutí lithium-iontové baterie založené na událostech. Následující článek [11] se zabývá výrobou elektrické energie na elektrárnách využívajících přílivu a odlivu, kde přílivy a odlivy lze předpovídat na základě dat. Autoři uvažují zapojení těchto elektráren s použitím baterie a ověřují funkčnost existujícího algoritmu modifikovaného modelu ILP s více cíli zaměřených na ekonomiku a environmentální dopad v mikrosíti alokované v Japonsku.

Ve článku [12] se uvažuje životnost baterie, které se během vybíjecích a nabíjecích cyklů snižuje životaschopnost. Zaměřují se na optimální správu energie komunitní mikrosítě pomocí metody optimalizace roje částic, kde náklady zahrnují degradaci baterie a dynamickou penalizaci k ukázce skutečných provozních nákladů. Na návrh modelu optimalizace pro plánování peer-to-peer transakcí prostřednictvím místního trhu s elektřinou, transakcí energie na maloobchodním trhu a řízení baterie s ohledem na fotovoltaickou výrobu elektrické energie domácností se zaměřuje článek [13]. Kde spotřebitel/dodavatel energie má možnost obchodovat s maloobchodníkem nebo jiným spotřebitelem/dodavatelem energie v jejich komunitě. Problém je sepsán jako model MILP a cílem je úspora nákladů členů této komunity.

Následující prací je kniha [14], která se zabývá optimalizací provozu energetického systému. Popisuje metody optimalizace technologií a aplikací na energetické systémy, včetně aplikací obnovitelných zdrojů a analýzy nejistoty v energetických systémech. Kniha je seznam ucelené literatury o optimalizačních metodách k roku 2015.

■ Krátkodobý horizont

Nakonec se dostáváme na krátkodobý horizont, kde jsou články zabývající se časovým horizontem v hodinách, minutách, nebo sekundách. Článek [15] popisuje návrh a implementaci dvouvrstvých hierarchických řídicích strategií pro distribuované pole solárních panelů. Jedna vrstva je implementována jako ILP, která má provozní omezení a zároveň maximalizuje zisk z prodeje vyrobené energie. Spodní vrstva pak bere vygenerovaný výstup horní vrstvou a slouží ke sledování provozu bez ohledu na poruchy ovlivňující řízení.

Práce ilustrující strategii řízení v reálném čase je práce [16]. Kde autoři, při rozdělování výkonu mezi distribuované zdroje energie s ohledem na kolísání či přerušování výroby energie z větru, optimalizovali průměrné výrobní náklady virtuální elektrárny pomocí ILP. Následně pro získání výsledků testovali v simulačních modelech. Článek [17] představuje popis adaptivního genetického algoritmu pro řešení problémů optimálního nastavení automatické aktivace a rychlosti regulátorů v distribuované síti turbínových generátorů elektrické energie pracujících v železničních elektrických soustavách. Cílem bylo zajištění stability a požadovanou rezervu energie v elektrické soustavě pro vlaky a další odběratele energie.

Se článkem [18] se dostáváme k převedení ILP problému aktivací na nepřetržitě úpravy nastavených hodnot generátorů s pomocí automatického řízení generování. Kde správnou koordinací automatického řízení a nepřetržitých úprav hodnot generátorů, lze dosáhnout účinné frekvence řízení systému při nepřetržitém provozu systému s optimálními výsledky. A ve článku [19] představují model ILP, postavený na principech stochastických závazků plnění manuálně aktivovaných regulačních záloh mFRR. Autoři využívají scénáře prognóz k navrhování harmonogramů aktivace, které minimalizují očekávané náklady na aktivaci.

Shrnutím je, že většina článků se zaměřuje na velký časový horizont, toto platí pro články s dlouhodobým a střednědobým časovým horizontem. Také se převážně zaměřují na minimalizaci nákladů a minimalizaci dopadů na životní prostředí, nebo na vyšší úroveň řízení, kde se neřídí samostatné turbíny generující energii. Pokud tam jsou již použity technologie více elektráren, které se mají tvářit jako jeden blok generující energii, převážně jsou použity virtuální elektrárny. Nakonec i články s krátkodobým časovým horizontem jsou zaměřeny na maximalizaci zisků při použití distribuovaných polí solárních panelů nebo kolísající větrné energie, distribuci elektrické energie v síti pro vlaky, úpravy ILP pro nepřetržitý provoz nebo prognózy harmonogramů aktivace mFRR.

1.3 Přínos práce

Oproti článkům, rozebraným v předchozí kapitole, se tato práce zaměřuje na operativní řízení hybridního zdroje elektrické energie s časovým horizontem v minutách a granularitou dat po sekundách.

Tato práce se zabývá operativním řízením, tedy prvně si vysvětlíme druhy řízení. Druhy řízení jsou tři, taktický, strategický a operativní. Taktické řízení je používané pro časový horizont v letech, k tomu byla snaha najít články v sekci Dlouhodobý horizont. Strategické řízení oproti taktickému je používané na časový horizont měsíců, k němu byly nalezeny články v sekci Střednědobý horizont. Nakonec operativní řízení, které rozhoduje na časový horizont hodin a méně, protože rozhoduje o operacích na stroji, k tomu byly nalezeny články v sekci Krátkodobý horizont.

Za použití operativního řízení se v této práci dozvíme jak plnit službu aFRR s minimálními náklady na výrobu energie plynovými turbínami za použití vysokokapacitní baterie.

Představíme si model MILP, který má předpoklad znalosti budoucna, kdy cílem je minimalizace nákladů plynových turbín. Dále pak analýzu robustnosti a nakonec operativní řízení povelů turbín pomocí vyvinutého robustního řízení, pro teoretické porozumění konceptu operativního řízení turbín a baterie.

Práce vznikla ve spolupráci s Bc. Petrem Stejskalem, který vytvářel simulátor hybridního zdroje energie na plnění požadavků na aktivaci podpůrných služeb. Pro zadávání přímých povelů pro turbíny vytvořil dvě možnosti. Jedna je ruční zadávání a druhá napojení řízení pro automatické výpočty povelů turbín. Práce bude k nalezení na DSpace Českého vysokého učení technického v Praze, odkaz na DSpace naleznete zde [23].

Kapitola 2

Úvod do problematiky

V předchozí kapitole byla zmíněno plnění požadavků na aktivaci podpůrných služeb. V této kapitole si vysvětlíme, co jsou zmíněné podpůrné služby v rozvodné síti. A následně pak bude vysvětlen koncept projektu Energy nest (ENEST).

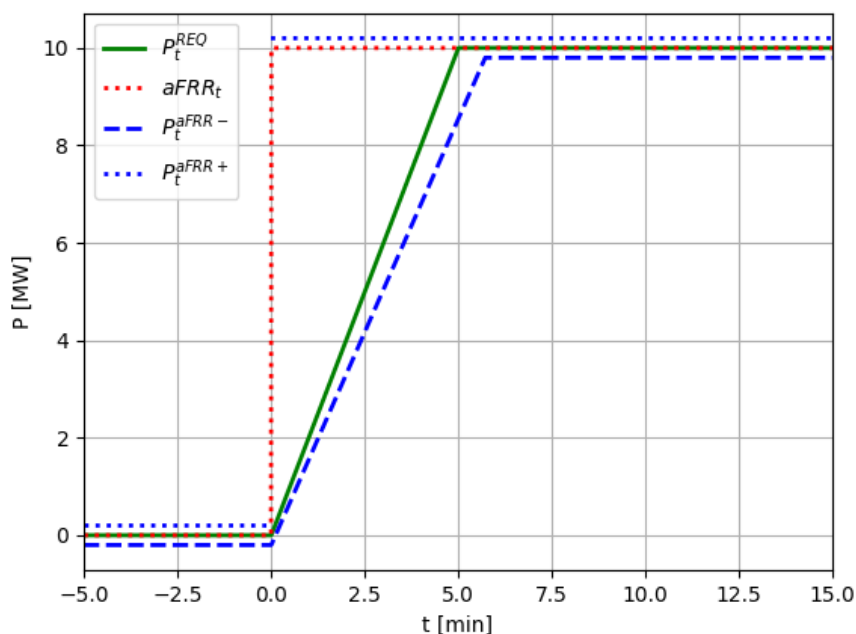
2.1 Podpůrné služby

Nejprve si vysvětlíme podpůrné služby. V České republice máme společnost ČEPS a.s., která je provozovatelem přenosové soustavy. Což zahrnuje i zajištění stability v elektrické síti. Pro její zajištění se používají podpůrné služby. Podpůrné služby jsou dle kodexu ČEPSu rozděleny na dvě kategorie, těmi jsou: Služby výkonové rovnováhy a Ostatní podpůrné služby. Ostatní podpůrné služby jsou používány pro sekundární regulaci zařízení připojených do přenosové soustavy, schopnost ostrovního provozu předcházejícího a řešícího stav nouze a schopnost startu po částečném či úplném výpadku elektrické energie.

V této práci se ale zaměříme na služby výkonové rovnováhy. Tyto služby se vztahují na rezervované časové intervaly a množství výkonu, které je v rezervovaném intervalu nutné mít k dispozici, takzvané regulační zálohy. Do těchto služeb patří:

- FCR - zálohy s automatickou regulací frekvence,
- aFRR - automaticky aktivované zálohy s regulací výkonové rovnováhy,
- mFRR - manuálně aktivované zálohy s regulací výkonové rovnováhy,
- RR - zálohy pro náhradu.

Hlavní z těchto záloh pro tuto práci je aFRR, pro kterou bylo vytvářené robustní řízení turbín a ILP řízení. U aFRR probíhá automatická aktivace služby na základě požadavků regulátoru frekvence. Poskytovatel elektrické energie je zavázán tuto službu realizovat do 5 minut od požadavku regulátoru, tento časový interval je nazýván dobou plné aktivace.



Obrázek 2.1: Ukázka požadavku na aFRR, odezva systému a meze pro splnění požadavku [21]

Na obrázku 2.1 můžeme vidět průběh aktivace požadavku na plnění aFRR. Kde modré čáry zobrazují meze pro splnění požadavku a červená čára zobrazuje příchozí požadavek na aFRR. Zelená čára zobrazuje průběh plnění aFRR, který odpovídá:

$$\min \left(|B| \cdot P_{max}, (t - t_1 - 1) \cdot \frac{|B| \cdot P_{max} - P_{t_1+1}^{REW}}{5 \cdot 60} + P_{t_1+1}^{REQ} \right), \quad (2.1)$$

kde $|B|$ je počet turbín a $t \in T$ je čas, který procházíme v časové periodě. t_1 je čas označující příchod požadavku na aFRR, P_{max} maximální technický výkon turbíny a P^{REQ} je požadovaný výkon v následující vteřině po příchodu požadavku na aFRR.

Pro více informací k tématu podpůrných služeb doporučujeme Kodex přenosové soustavy druhou část [20], nebo diplomová práce Ing. Martina Henycha [21].

2.2 ENEST

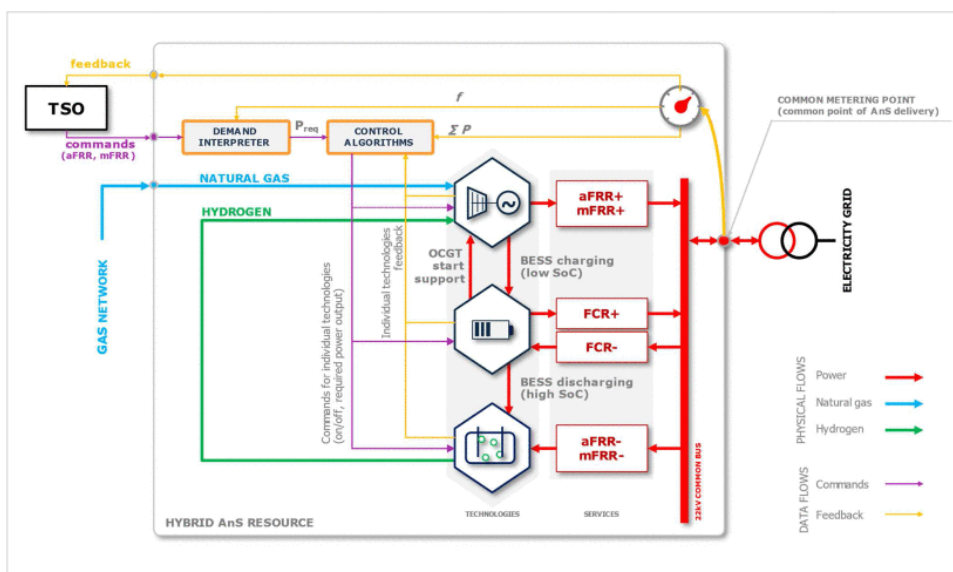
Projekt vznikl s potřebou podpůrných služeb při zvyšující se dekarbonizaci, která vede ke ztrátě elektráren poskytujících tyto služby. V projektu je představen koncept hybridní elektrárny kombinující malé generátory a bateriový systém skladování energie. Tato elektrárna je připravena ke spuštění v žádaném čase, ale ke spuštění nedojde, pokud požadavek na podpůrné služby není

aktivován. Projekt ENEST si klade za cíl navrhnout vhodné optimalizační metody a architekturu řídicích algoritmů.

Zmíněné malé generátory jsou plynové turbíny. Turbíny mají své technické parametry. Pro povahu této diplomové práce není potřeba uvádět přímo číselné hodnoty daných parametrů. Parametry jsou označeny a popsány v následující kapitole, kde jsou uvedeny i parametry pro baterii využitou v zapojení hybridního zdroje.

Pro plynové turbíny v této práci jsou hlavní dva stavy turbín, těmito stavy jsou *ready* a *power*. Přechody mezi stavy turbín jsou časově náročné na využití pro FCR a mFRR, proto je v zapojení baterie. Baterie má omezenou kapacitu a výkon z toho plyne, že s baterií nelze dodávat energii do sítě plnicí celkový požadavek při aktivaci podpůrných služeb.

Koncepci hybridního zdroje pro poskytování podpůrných služeb je zobrazena v obrázku 2.2. Kde TSO je provozovatel elektrické sítě a v případě, že vyšle požadavek na aktivaci aFRR, nebo mFRR, požadavek přijme demand interpreter. Demand interpreter přeloží požadavek na čitelná data pro řídicí algoritmus, která obsahují požadavek na výkon. Řídicí algoritmus poté rozloží dodávání výkonu na jednotlivé turbíny. Než se turbíny aktivují, je využit výkon baterie na dodávání požadovaného výkonu do sítě. Po aktivaci turbíny dokáže rychle navýšit svůj výkon a tím převzít plnění dodávaného výkonu do sítě. Při nízké hladině uložené v baterii je baterie nabíjena pomocí turbín. Pokud common metering point zjistí výkyvy v síti může také vyslat požadavek na FCR v tom případě požadavek rovnou přijme demand interpreter, který data přeloží pro řídicí algoritmus. Řídicí algoritmus pak předá požadovaný výkon baterii, která dodá potřebný výkon do sítě. Nebo v opačném případě při přebytku energie v elektrické síti se začne nabíjet. Požadavek na spotřebování energie může přijít i jako aFRR, nebo mFRR v tom případě je také tato energie použita na nabití baterie. Pokud by baterie byla plná, nebo by požadavek na spotřebu energie převyšil příkon baterie, je přebytečná energie mařena pomocí takzvaného mařiče energie.



Obrázek 2.2: Schéma základní koncepce hybridního zdroje pro poskytování podpůrných služeb [22]

Projekt Enest uvažuje s konceptem hydrolizéru, pro tuto diplomovou práci tento hydrolizér neuvažujeme. Ovšem koncept hydrolizéru je akumulace energie ve vodíku při aktivaci služeb s negativním požadavkem a využití akumulovaného vodíku při kladném požadavku na generování elektrické energie.

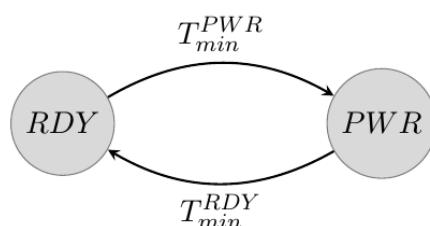
Jelikož jsou tyto informace jen základními informacemi o projektu ENEST, tak pro více informací odkážeme čtenáře na článek [22].

Kapitola 3

Popis problému

V této kapitole se zaměříme na popis problému. Uvažujeme hybridní zdroj energie popsany v předešlé kapitole, složený z několika identických plynových turbín a vysokokapacitní baterie. Následující parametry je dobré znát k porozumění popisu MILP.

Pro tuto práci uvažujeme pro turbíny dva stavy *ready* a *power*. Turbína se ve stavu *ready* nachází v případě, že je připravena k přifázování do sítě, a ve stavu *power*, pokud již k síti přifázována je a generuje elektrickou energii. Ze stavu *ready* do stavu *power* se turbína dostane po čase označeném T_{min}^{PWR} a naopak ze stavu *power* se turbína do stavu *ready* dostane po čase označeném T_{min}^{RDY} . Tyto přechody stavů i s časy jsou zobrazeny na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Stavový diagram turbíny

Dále uvažujeme množinu turbín B a časový interval T , který je vzorkován po 1 sekundě. Shrnutí těchto obecných parametrů naleznete v tabulce 3.1.

Následuje popis parametrů turbín. Turbína má dva stavy a těmi jsou stav *power*, tento stav má turbína dodávající výkon do sítě, a stav *ready*, tento stav má turbína připravená na povel k přifázování do sítě. Turbína má maximální technický výkon označený P_{max} a minimální technický výkon označený P_{min} , ve kterých je potřeba turbínu udržovat jestliže je ve stavu *power*. Dále turbína může měnit výkon a maximální změna výkonu je označena G_{max} , nazýváme rampování turbíny. S tím se pojí možná maximální změna výkonu turbíny, kdy v první sekundě turbína rampuje nahoru a hned v druhé sekundě turbína rampuje dolů, či přesně naopak, nazváno jako maximální změna gradientu turbíny a označena P_{23} , shrnuto v tabulce 3.2.

Turbína má svůj potřebný čas k přifázování k elektrické síti označený T_{min}^{PWR} , který odpovídá přechodu turbíny ze stavu *ready* do stavu *power*. Naopak

Parametr	Popis
B	Množina turbín.
b	Samostatná turbína.
T	Časová perioda, po kterou běží vyvinutý algoritmus.
t	Časový index.

Tabulka 3.1: Obecné parametry algoritmu

Parametr	Popis
$power$	Stav turbíny, která dodává výkon do sítě.
$ready$	Stav turbíny, která je připravena na povel k přifázování.
P_{max}	Maximální technický výkon turbíny.
P_{min}	Minimální technický výkon turbíny.
G_{max}	Maximální změna výkonu turbíny, takzvaná rampa turbíny.
P_{23}	Maximální změna výkonu turbíny ve dvou po sobě následujících sekundách, ve kterých má turbína prvně rampuje nahoru a hned po té rampuje dolu či obráceně, takzvaný gradient turbíny.

Tabulka 3.2: Parametry turbíny

čas potřebný k odfázování turbíny a přípravě na další povel k přifázování označen T_{min}^{RDY} odpovídající přechodu ze stavu $power$ do stavu $ready$. Turbína má náklady na provoz, ve stavu $power$ má fixní náklady N_{fix}^{PWR} a lineární náklady N_{lin}^{PWR} . Turbína ve stavu $ready$ má fixní náklady označené N_{fix}^{RDY} . Náklady na přifázování turbíny k elektrické síti jsou N_{tran}^{PWR} a náklady na odfázování od elektrické sítě jsou N_{tran}^{RDY} , shrnutí je k nalezení v tabulce 3.3.

Dále uvedeme parametry pro vysokokapacitní baterii. Energii uloženou v baterii je potřeba udržovat v intervalu $\langle E_{min}, E_{max} \rangle$, kde E_{min} je minimum energie v baterii a E_{max} je maximum energie v baterii. Baterie může být nabíjena či dodávat energii do sítě o maximálním technickém výkonu baterie značený P_{max}^{BAT} . Dále účinnost nabíjení baterie je označena η_{ch} a účinnost vybíjení baterii je označena η_d . Parametry baterie jsou shrnuty v tabulce 3.4.

Parametr	Popis
T_{min}^{PWR}	Čas potřebný k přifázování turbíny.
T_{min}^{RDY}	Čas potřebný po odfázování turbíny, než je připravena na povel k přifázování.
N_{fix}^{RDY}	Fixní náklady turbíny ve stavu <i>ready</i> .
N_{fix}^{PWR}	Fixní náklady turbíny ve stavu <i>power</i> .
N_{lin}^{PWR}	Lineární náklady turbíny ve stavu <i>power</i> .
N_{tran}^{PWR}	Náklady na přifázování turbíny k elektrické síti.
N_{tran}^{RDY}	Náklady na odfázování turbíny od elektrické sítě.

Tabulka 3.3: Parametry turbíny

Parametr	Popis
E_{max}	Maximální množství energie uložené v baterii.
E_{min}	Minimální množství energie uložené v baterii.
P_{max}^{BAT}	Maximální technický výkon při nabíjení/vybíjení baterie.
η_{ch}	Účinnost nabíjení baterie.
η_d	Účinnost vybíjení baterie.

Tabulka 3.4: Parametry baterie

Kapitola 4

Popis MILP s předpokladem budoucna

V této kapitole si popíšeme MILP s předpokladem budoucna. Jako první si popíšeme proměnné využívané v MILP.

4.1 Zavedení proměnných

Pro výpočet je potřeba proměnná, která ukládá výkon turbíny označená $P_{b,t}$ splňující, že její výkon je v intervalu:

$$P_{b,t} \in \langle 0, P_{max} \rangle, \quad \forall b \in B, \forall t \in T. \quad (4.1)$$

Dále jsou používány čtyři binární proměnné, první značí stav turbíny *power* a je označena $R_{b,t}^{PWR}$ a platí, že pokud je turbína ve stavu *power*:

$$R_{b,t}^{PWR} = 1, \quad \forall b \in B, \forall t \in T, \quad (4.2)$$

jinak

$$R_{b,t}^{PWR} = 0, \quad \forall b \in B, \forall t \in T. \quad (4.3)$$

Druhá proměnná značí stav turbíny *ready*, je označena $R_{b,t}^{RDY}$ a podobně jako u předchozí proměnné pro ni platí, že pokud je turbína ve stavu *ready*:

$$R_{b,t}^{RDY} = 1, \quad \forall b \in B, \forall t \in T, \quad (4.4)$$

jinak

$$R_{b,t}^{RDY} = 0, \quad \forall b \in B, \forall t \in T. \quad (4.5)$$

Další binární proměnnou je $S_{b,t}^{PWR}$ a značí povel na přiřazování turbíny k síti, pro ni platí, že pokud byl vydán povel na přiřazování turbíny k síti:

$$S_{b,t}^{PWR} = 1, \quad \forall b \in B, \forall t \in T, \quad (4.6)$$

jinak

$$S_{b,t}^{PWR} = 0, \quad \forall b \in B, \forall t \in T. \quad (4.7)$$

Podobně pak poslední binární proměnná $S_{b,t}^{RDY}$ značí povel k odřazování turbíny od sítě a platí, že pokud byl vydán povel na odřazování turbíny od sítě:

$$S_{b,t}^{RDY} = 1, \quad \forall b \in B, \forall t \in T, \quad (4.8)$$

jinak

$$S_{b,t}^{RDY} = 0, \quad \forall b \in B, \forall t \in T. \quad (4.9)$$

Dále je potřeba ukládat výkon uložený na baterii, pro který existuje proměnná E_t a je udržován v intervalu:

$$\langle E_{min}, E_{max} \rangle, \quad \forall b \in B, \forall t \in T. \quad (4.10)$$

S tím je spojena proměnná značící nabíjecí výkon baterie označena P_t^{CH} a pro ni platí, že se nachází v intervalu:

$$P_t^{CH} \in \langle 0, P_{max}^{BAT} \rangle, \quad \forall t \in T. \quad (4.11)$$

Podobně pak proměnná značící vybíjecí výkon baterie označena P_t^D , pro kterou platí, že se též nachází v intervalu:

$$P_t^D \in \langle 0, P_{max}^{BAT} \rangle, \quad \forall t \in T. \quad (4.12)$$

A nakonec binární proměnná, značící jestli je baterie nabíjena nebo vybíjena, označena CH_t a platí, že pokud je baterie nabíjena:

$$CH_t = 1, \quad \forall t \in T, \quad (4.13)$$

jinak

$$CH_t = 0, \quad \forall t \in T. \quad (4.14)$$

Shrnutí proměnných použitých v MILP je v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1: Proměnné MILP

Proměnná	Popis	Podmínka
$P_{b,t}$	Výkon turbíny b v čase t .	Pro $\forall b \in B$ a $\forall t \in T$ platí, že $P_{b,t} \in \langle 0, P_{max} \rangle$
$R_{b,t}^{PWR}$	Binární proměnná značící stav turbíny <i>power</i> .	Pro $\forall b \in B$ a $\forall t \in T$ platí, že proměnná je rovna 1 pokud je turbína ve stavu <i>power</i> , jinak rovna 0.
$R_{b,t}^{RDY}$	Binární proměnná značící stav turbíny <i>ready</i> .	Pro $\forall b \in B$ a $\forall t \in T$ platí, že proměnná je rovna 1 pokud je turbína ve stavu <i>ready</i> , jinak rovna 0.

Tabulka 4.1 – Pokračování tabulky s proměnnými MILP

Proměnná	Popis	Podmínka
$S_{b,t}^{PWR}$	Binární proměnná značící povel na přifázování turbíny k síti.	Pro $\forall b \in B$ a $\forall t \in T$ platí, že proměnná je rovna 1 pokud byl vydán povel na přifázování turbíny k síti, jinak rovna 0.
$S_{b,t}^{RDY}$	Binární proměnná značící povel k odfázování turbíny od sítě.	Pro $\forall b \in B$ a $\forall t \in T$ platí, že proměnná je rovna 1 pokud byl vydán povel na odfázování turbíny od sítě, jinak rovna 0.
E_t	Energie uložená na baterii.	Pro $\forall t \in T$ platí, že $E_t \in \langle E_{min}, E_{max} \rangle$
P_t^{CH}	Nabíjecí výkon baterie v čase t .	Pro $\forall t \in T$ platí, že $P_{b,t} \in \langle 0, P_{max}^{BAT} \rangle$
P_t^D	Vybíjecí výkon baterie v čase t .	Pro $\forall t \in T$ platí, že $P_{b,t} \in \langle 0, P_{max}^{BAT} \rangle$
CH_t	Binární proměnná značící nabíjení/vybíjení baterie.	Pro $\forall t \in T$ platí, že proměnná je rovna 1 pokud je baterie nabíjena, rovna 0 pokud je vybíjena.

Následuje popis parametrů, které jsou použité jen v MILP s předpokladem budoucna. Jelikož je počítáno s budoucnem je zaveden parametr, ve kterém je uložen požadovaný výkon provozovatelem elektrické sítě, označen P_t^{REQ} . Iniciální parametry jsou použity na iniciální nalití proměnných a jsou potřeba k určení stavu, ze kterého začíná výpočet MILP a na který má být navázáno výpočtem. Iniciální parametry máme 4, prvním, který ukládá počáteční výkon turbín, je parametr označený $P_{b,init}$. Dále počáteční množství energie uložené na baterii je v parametru E_{init} . Na začátku je též potřeba vědět počáteční stav turbín, pro turbíny ve stavu *power* máme parametr s iniciálními hodnotami $R_{b,init}^{PWR}$ a pro turbíny ve stavu *ready* pak máme parametr $R_{b,init}^{RDY}$. Aby energie uložená v baterii na začátku nebyla brána jako energie zdarma jsou zavedeny parametry pro maximální množství energie v baterii na konci počítané periody E_{max}^{END} a minimální množství energie v baterii na konci počítané periody E_{min}^{END} . Parametry jsou shrnuty v tabulce 4.2.

Parametr	Popis
P_t^{REQ}	Požadovaný výkon provozovatelem elektrické sítě.
$P_{b,init}$	Počáteční výkon turbíny.
E_{init}	Počáteční množství energie uložené v baterii.
E_{max}^{END}	Konečné maximální množství energie uložené v baterii.
E_{min}^{END}	Konečné minimální množství energie uložené v baterii.
$R_{b,init}^{PWR}$	Počáteční nastavení pro stav <i>power</i> . Roven 1 pokud je turbína ve stavu <i>power</i> , jinak roven 0.
$R_{b,init}^{RDY}$	Počáteční nastavení pro stav <i>ready</i> . Roven 1 pokud je turbína ve stavu <i>ready</i> , jinak roven 0.

Tabulka 4.2: Parametry MILP

4.2 Kriteriaální funkce

Popis MILP začneme hlavním cílem MILP, který má zajistit minimalizaci nákladů. Proto do kriteriaální funkce spadají náklady na provoz jednotlivých turbín, kde aproximujeme skutečné nákladové charakteristiky lineárními funkcemi a připočítáváme cenu za přifázování a odfázování turbín. Tato kriteriaální funkce pro MILP je ve tvaru 4.15.

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{b \in B} \left(N_{fix}^{RDY} \cdot R_{b,t}^{RDY} + N_{fix}^{PWR} \cdot R_{b,t}^{PWR} + N_{lin}^{PWR} \cdot R_{b,t}^{PWR} + N_{trans}^{RDY} \cdot R_{b,t}^{RDY} \right), \quad \forall t \in T, \forall b \in B. \quad (4.15)$$

4.3 Podmínky MILP

Dostáváme se k podmínkám MILP. Kde je potřeba zajistit takové podmínky, které vystihují technické parametry turbín, jejich stavy a energie ve vysokokapacitní baterie. Také je nutné zajistit správně dodávanou celkovou energii do sítě.

Co se týká technických parametrů turbín tak následující dvě podmínky zajišťují pro každou turbínu b ve stavu *power*, že její výkon nebude menší než minimální technický výkon turbíny a nebude větší než maximální technický výkon turbíny v každém čase t z počítané časové periody T :

$$P_{min} \cdot R_{b,t}^{PWR} \leq P_{b,t}, \quad \forall b \in B, \forall t \in T, \quad (4.16)$$

$$P_{b,t} \leq P_{max} \cdot R_{b,t}^{PWR}, \quad \forall b \in B, \forall t \in T. \quad (4.17)$$

Dále je potřeba dodržet pro každou turbínu b ve stavu *power*, že v čase t nepřesáhla změnou svého výkonu maximální rampování výkonu turbíny. Což zajistíme následujícími dvěma podmínkami:

$$P_{b,t-1} - P_{b,t} \leq G_{max} + M \cdot (2 - R_{b,t}^{RDY} - R_{b,t}^{PWR}), \quad \forall b \in B, \forall t \in T \setminus \{0\}, \quad (4.18)$$

$$P_{b,t} - P_{b,t-1} \leq G_{max} + M \cdot (2 - R_{b,t}^{RDY} - R_{b,t}^{PWR}), \quad \forall b \in B, \forall t \in T \setminus \{0\}. \quad (4.19)$$

Podobně pak následující podmínky zajišťují pro každou turbínu b , že výkonem v čase t nepřekročí maximální změnu gradientu.

$$(P_{b,t-1} - P_{b,t-2}) - (P_{b,t} - P_{b,t-1}) \leq P_{23}, \quad \forall b \in B, \forall t \in T \setminus \{0, 1\}, \quad (4.20)$$

$$(P_{b,t} - P_{b,t-1}) - (P_{b,t-1} - P_{b,t-2}) \leq P_{23}, \quad \forall b \in B, \forall t \in T \setminus \{0, 1\}. \quad (4.21)$$

Po technických parametrech je důležité, aby turbíny splňovali podmínky stavů. Podmínka zajišťující pro každou turbínu b , že nemůže být ve stavu *power* a *ready* zároveň. Může být jen v jednom z těchto stavů, nebo v žádném stavu pokud je právě v přechodu mezi stavy:

$$R_{b,t}^{RDY} + R_{b,t}^{PWR} \leq 1, \quad \forall b \in B, \forall t \in T. \quad (4.22)$$

Stav turbíny b v čase t musí navazovat na stav v předchozí vteřině. Následující čtyři podmínky zajišťují, že turbína b v čase $t - 1$ ve stavu *power* bude v následující vteřině znovu ve stavu *power* pokud v čase $t - 1$ nepřišel povel pro odfázování této turbíny, nebo v případě že byla ve stavu *ready* a přišel povel na přífázování turbíny v čase $t - T_{min}^{PWR}$, pak se do stavu *power* v čase t dostane. Podobně to platí pro stav *ready* v druhé podmínce, jen povel na odfázování turbíny musel přijít v čase $t - T_{min}^{RDY}$:

$$R_{b,t-1}^{PWR} - S_{b,t-1}^{RDY} \leq R_{b,t}^{PWR}, \quad \forall b \in B, \forall t \in T \setminus \{0, 1, \dots, T_{min}^{PWR}\}, \quad (4.23)$$

$$R_{b,t-1}^{PWR} + S_{b,t-T_{min}^{PWR}}^{PWR} - S_{b,t-1}^{RDY} \leq R_{b,t}^{PWR}, \quad \forall b \in B, \forall t \in T \setminus \{1, \dots, T_{min}^{PWR}\}, \quad (4.24)$$

$$R_{b,t-1}^{RDY} - S_{b,t-1}^{PWR} \leq R_{b,t}^{RDY}, \quad \forall b \in B, \forall t \in T \setminus \{0, 1, \dots, T_{min}^{RDY}\}, \quad (4.25)$$

$$R_{b,t-1}^{RDY} + S_{b,t-T_{min}^{RDY}}^{RDY} - S_{b,t-1}^{PWR} \leq R_{b,t}^{RDY}, \quad \forall b \in B, \forall t \in T \setminus \{1, \dots, T_{min}^{RDY}\}. \quad (4.26)$$

Další dvě podmínky zajišťují pro každou turbínu b , že při odfázování turbíny od elektrické sítě v čase t musí být její výkon na minimálním technickém výkonu. Také zajišťuje, že při přífázování turbíny k elektrické síti v čase t začne turbína generovat minimální technický výkon:

$$P_{b,t} \leq P_{min} \cdot S_{b,t}^{RDY} + M \cdot (1 - S_{b,t}^{RDY}), \quad \forall b \in B, \forall t \in T \setminus \{0, 1, \dots, T_{min}^{PWR}\}, \quad (4.27)$$

$$P_{b,t} \leq P_{min} \cdot (S_{b,t}^{RDY} + S_{b,t-T_{min}^{PWR}}^{PWR}) + M \cdot (1 - S_{b,t}^{RDY} - S_{b,t-T_{min}^{PWR}}^{PWR}), \quad (4.28)$$

$$\forall b \in B, \forall t \in T \setminus \{0, 1, \dots, T_{min}^{PWR}\}.$$

Pro přechody mezi stavy je potřeba dodržovat časový rozestup mezi vydanými povely na přífázování či odfázování turbíny. To zajišťují následující dvě podmínky, které nedovolí vydat pro turbínu b v čase t povel na odfázování

a přechod do stavu *ready*, pokud během uplynulého časového úseku $t - T_{min}^{PWR}$ až t přišel povel na přifázování turbíny. Totéž i naopak jen časový úsek je $t - T_{min}^{RDY}$ až t :

$$1 - \sum_{t' \in \{\max(t - T_{min}^{PWR}), \dots, t\}} S_{b,t'}^{PWR} \geq S_{b,t}^{RDY}, \quad \forall b \in B, \forall t \in T, \quad (4.29)$$

$$1 - \sum_{t' \in \{\max(t - T_{min}^{RDY}), \dots, t\}} S_{b,t'}^{RDY} \geq S_{b,t}^{PWR}, \quad \forall b \in B, \forall t \in T. \quad (4.30)$$

Podobně pro přechody mezi stavy je potřeba dodržet časový rozestup od vydání povelu a samotným přechodem do stavu. Od vydání povelu na přifázování turbíny trvá turbíně přechod do stavu *power* $t - T_{min}^{PWR}$ sekund. Podobně od vydání povelu na odfázování turbíny trvá turbíně přechod do stavu *ready* $t - T_{min}^{RDY}$ sekund:

$$1 - \sum_{t' \in \{t - T_{min}^{PWR} + 1, \dots, t\}} S_{b,t'}^{PWR} \geq R_{b,t}^{PWR}, \quad \forall b \in B, \forall t \in T, \quad (4.31)$$

$$1 - \sum_{t' \in \{t - T_{min}^{RDY} + 1, \dots, t\}} S_{b,t'}^{RDY} \geq R_{b,t}^{RDY}, \quad \forall b \in B, \forall t \in T. \quad (4.32)$$

Dalšími podmínkami jsou podmínky zajišťující správné fungování velkokapacitního bateriového úložiště. Následující dvě podmínky zajišťují, že se nebude baterie vybíjet i nabíjet zároveň v žádném čase t :

$$P_t^{CH} \leq charging_t \cdot P_{max}^{BAT}, \quad \forall t \in T, \quad (4.33)$$

$$P_t^D \leq (1 - charging_t) \cdot P_{max}^{BAT}, \quad \forall t \in T. \quad (4.34)$$

Podmínka zajišťující bilanci baterie v čase t v závislosti na jejím nabíjení či vybíjení v předchozí vteřině vypadá následovně:

$$E_t = E_{t-1} + \eta_{ch} \cdot P_t^{CH} - \frac{1}{\eta_d} \cdot P_t^D, \quad \forall t \in T \setminus \{0\}. \quad (4.35)$$

Následující podmínka zajišťuje, že celková energie dodávaná do sítě splňuje výkonové požadavky provozovatele elektrické sítě:

$$\sum_{b \in B} P_{b,t} - P_t^{CH} + P_t^D = P_t^{REQ}, \quad \forall t \in T. \quad (4.36)$$

Na konci počítané periody označené pro podmínku jako $t_{end} \in T$ je množství energie uložené v baterii ošetřeno dvěma podmínkami. Ty zajišťují pro energii uložené v baterii z inicializace, že není brána jako energie zdarma, ale má také svou hodnotu. Zmíněné dvě podmínky vypadají následovně:

$$E_{t_{end}} \leq E_{max}^{END}, \quad (4.37)$$

$$E_{t_{end}} \geq E_{min}^{END}. \quad (4.38)$$

Poslední důležitou věcí je nastavení iniciálních hodnot proměnných. První podmínka inicializuje výkony všech turbín b z parametru $P_0(b)$, druhá podmínka pak energii na baterii z parametru E_0 . Následující dvě podmínky nastavují stavy turbín b na stav *power* nebo *ready*:

$$P_{b,0} = P_{b,init}, \quad \forall t \in T, \quad (4.39)$$

$$E_0 = E_{init}, \quad (4.40)$$

$$R_{b,0}^{PWR} = R_{b,init}^{PWR}, \quad \forall t \in T, \quad (4.41)$$

$$R_{b,0}^{RDY} = R_{b,init}^{RDY}, \quad \forall t \in T, \quad (4.42)$$

Tím jsme si vyjmenovali a popsali všechny podmínky pro MILP.

Kapitola 5

Analýza robustnosti

V předešlé kapitole jsme si definovali MILP, pro který v této kapitole zanalyzujeme robustnost. Pro analýzu robustnosti jsme zvolili vytvoření algoritmu generující stavy, ve kterých nebudeme schopni plnit požadavky na aktivaci aFRR.

Algoritmus má generovat povely na aktivaci aFRR od provozovatele sítě. Následně se bude postupně adaptovat na plnění aFRR, přičemž zajistí správné technické chování turbín a baterie. Pokud bude nalezen povel na aFRR, který nebude schopen v jakémkoliv čase t z počítané periody T plnit povel, tak se toto řešení označí jako nevalidní. Všechna taková nevalidní řešení jsou na konci vykreslena v grafech, který zobrazuje průběh povelů na aktivaci aFRR, nastavení turbín pro plnění těchto povelů a energie na baterii.

Nejprve je třeba zavést parametry a proměnné používané v tomto algoritmu.

5.1 Zavedení proměnných

V algoritmu je nabíjení baterie pomocí turbín zajištěno do doby, dokud nemá baterie větší množství energie než určené parametrem E_{TRH} . Pro tento parametr platí vztah:

$$E_{min} < E_{TRH} < E_{max}. \quad (5.1)$$

Pokud je potřeba baterii nabíjet, tedy množství energie uložené na baterii je menší než E_{TRH} , pak je zajištěno dodávání energie z turbín do baterie parametrem $P_{min_chrg}^{power}$. Pro parametr $P_{min_chrg}^{power}$ platí:

$$0 < P_{min_chrg}^{power} < P_{max}^{BAT}. \quad (5.2)$$

Turbíny ve stavu *power* pracují efektivně tehdy, pokud vyrábí energii alespoň v množství daném parametrem P_{ON_MIN} . Pro tento parametr platí vztah:

$$P_{min} < P_{ON_MIN} < P_{max}, \quad (5.3)$$

kde

$$P_{ON_MIN} = \frac{P_{max}}{2} \quad (5.4)$$

Dále máme uvažované povely pro generování následujících stavů pro algoritmus uložené v parametru P^{aFRR} a samostatná hodnota tohoto pole hodnot

je podle kapitoly 2.1 v intervalu:

$$\langle 0, aFRR \rangle. \quad (5.5)$$

Následně je potřeba doba pro splnění povelu aFRR, kdy tuto časovou periodu označujeme T^{aFRR} a platí pro ni vztah:

$$T^{aFRR} = 5 \text{ minut}. \quad (5.6)$$

Za plnění povelu považujeme i hodnoty, které jsou v zanedbatelné odchylce označené ϵ , která se přibližně rovná:

$$\epsilon = 0.0002\% \cdot P_{max}. \quad (5.7)$$

Nakonec zavedeme parametr přírůsteku pro stav turbíny za 1 sekundu označený Δ , který je dán rovnicí:

$$\Delta = \frac{100}{T_{min}^{PWR} + T_{min}^{RDY}}. \quad (5.8)$$

Shrnutí parametrů k algoritmu v analýze robustnosti je k nalezení v tabulce 5.1.

Parametr	Popis	Podmínka
E_{TRH}	Úroveň nabití baterie, kdy lze začít odpojovat turbíny.	$E_{min} < E_{TRH} < E_{max}$
P_{ON_MIN}	Minimální pracovní výkon turbíny ve stavu <i>power</i> .	$P_{min} < P_{ON_MIN} < P_{max}$
Δ	Přírůstek za 1s pro proměnnou <i>turbine_state</i>	$\Delta = \frac{100\%}{T_{min}^{PWR} + T_{min}^{RDY}}$
P^{aFRR}	Uvažované povelu aFRR.	$P^{aFRR} \in \langle 0, aFRR \rangle$
T^{aFRR}	Doba pro splnění povelu na aFRR.	$T^{aFRR} = 5min$
$P_{min_chrg}^{BAT}$	Minimální výkon, který musí zbýt k nabíjení baterie.	$P_{min_chrg}^{BAT} < P_{max}^{BAT}$
ϵ	Zanedbatelná odchylka u dodávaného povelu do elektrické sítě.	$\epsilon = 0.02\% \text{ z } P_{max}$

Tabulka 5.1: Parametry k analýze robustnosti

Následně si zavedeme proměnné použité v algoritmu, hlavní je pro nás stav označený s . Jeho seskupením podle času t a hodnoty povelu p je množina:

$$s_{t,p} \in S, \quad \forall t \in T, \forall p \in P^{aFRR}. \quad (5.9)$$

Z těchto stavů jsou generovány následující stavy, v čase $t + 1$. Kde povel p je hodnota z uvažovaných povelů P^{aFRR} a t je časová jednotka z T . Shrnutí ke stavům naleznete v tabulce 5.2.

Parametr	Popis	Podmínka
S	Množina seskupující stavy pro uvažované povely p vydané v čase $t-1$	
s	Samostatný stav, který označuje unit commitment.	$s \in S_{t,p}$ právě tehdy, když $s.t = t$ & $s.p = p$

Tabulka 5.2: Parametry MILP

Stav s v sobě obsahuje informace o čase platnosti stavu t . Dále stav obsahuje pole p_state , ve kterém jsou uloženy stavy turbín v %, kde 0 značí odfázovanou turbínu a 100 značí turbínu ve stavu *power*. Energie uložená v baterii je ve stavu označena E a je udržována v intervalu:

$$E \in \langle E_{min}, E_{max} \rangle. \quad (5.10)$$

Stav si ukládá celkový výkon všech turbín v proměnné PB , spočtený rovnicí:

$$PB = \sum_{b \in B} P(b), \quad \forall b \in B. \quad (5.11)$$

Ve stavu uložen výkon dodávaný k nabíjení baterie P_{chrg} , pro který platí:

$$P_{chrg} \leq P_{max}^{BAT}, \quad (5.12)$$

a podobně výkon dodávaný baterií do elektrické sítě P_{dsch} , pro který platí:

$$P_{dsch} \leq P_{max}^{BAT}. \quad (5.13)$$

Následně stav obsahuje celkový výkon dodávaný do elektrické sítě spočtený rovnicí:

$$P_{out} = \sum_{b \in B} P(b) - P_{chrg} + P_{dsch}, \quad \forall b \in B. \quad (5.14)$$

Stav v sobě nese informace o stavech turbín pomocí množin. Množina turbín ve stavu *power* je označena B^{PWR} . Tato množina je složena sjednocením množin:

$$B^{PWR} = B_{UP}^{PWR} \cup B_{ON}^{PWR} \cup B_{DOWN}^{PWR} \quad (5.15)$$

a zároveň platí vztah:

$$p_state_b = 100, \quad \forall b \in B^{PWR}. \quad (5.16)$$

Kde ve sjednocení množin B^{PWR} je množina B_{UP}^{PWR} obsahující turbíny zvyšující výkon maximální rampou na P_{ON_MIN} , B_{ON}^{PWR} je množina turbín

operujících nad výkonem P_{ON_MIN} a B_{DOWN}^{PWR} je množina turbín snižujících výkon maximální rampou na P_{min} . Množina turbín ve stavu *ready* je označena B^{RDY} , pro tuto množinu platí:

$$p_state_b = \frac{T_{min}^{RDY}}{T_{min}^{PWR} + T_{min}^{RDY}}, \quad \forall b \in B^{RDY}. \quad (5.17)$$

Množina turbín přecházejících ze stavu *ready* do stavu *power* je označena $B^{RDY \rightarrow PWR}$ a pro tuto množinu platí:

$$p_state_b \in \left\langle \frac{T_{min}^{RDY}}{T_{min}^{PWR} + T_{min}^{RDY}}, 100 \right\rangle, \quad \forall b \in B^{RDY \rightarrow PWR}. \quad (5.18)$$

A obdobně množina turbín přecházejících ze stavu *power* do stavu *ready* je označena $B^{PWR \rightarrow RDY}$ a platí pro ni:

$$p_state_b \in \left\langle 0, \frac{T_{min}^{RDY}}{T_{min}^{PWR} + T_{min}^{RDY}} \right\rangle, \quad \forall b \in B^{PWR \rightarrow RDY}. \quad (5.19)$$

Sjednocení všech turbín je v množině nazvané B , která je sjednocením množin včetně podmnožin:

$$B = B^{PWR} \cup B^{RDY} \cup B^{RDY \rightarrow PWR} \cup B^{PWR \rightarrow RDY}. \quad (5.20)$$

Nakonec v sobě stav obsahuje počet turbín potřebných k plnění požadavku na aFRR označeném *count* a samotný požadavek na aFRR uložený v proměnné s názvem *req*. Shrnutí parametrů MILP naleznete v tabulce 5.3.

Tabulka 5.3: Parametry MILP

Proměnná	Popis	Podmínka
t	Čas platnosti stavu	$t \in T$
p_state	Je pole určující stav turbín v %.	Rovno 0 pokud byla turbína právě odfázována, rovno 100 pokud je turbína ve stavu <i>power</i>
E	Energie uložená v baterii.	Platí, že $E_t \in \langle E_{min}, E_{max} \rangle$
PB	Celkový výkon všech turbín.	Pro $\forall b \in B$ platí, že $\sum_{b \in B} P(b)$
P^{CH}	Výkon dodávaný k nabíjení baterie.	$P^{CH} < P_{max}^{BAT}$
P^D	Výkon dodávaný baterií do elektrické sítě.	$P^D < P_{max}^{BAT}$

Tabulka 5.3 – Pokračování tabulky s parametry MILP

Proměnná	Popis	Podmínka
P_{out}	Celkový výkon dodávaný do elektrické sítě.	Pro $\forall b \in B$ platí, že $\sum_{b \in B} P(b) - P_{chrg} + P_{dsch}$
B_{ON}^{PWR}	Množina turbín, které operují nad výkonem P_{ON_MIN} .	Pro $\forall b \in B_{ON}^{PWR}$ platí, že $P(b) \geq P_{ON_MIN}$
B_{UP}^{PWR}	Množina turbín zvyšujících výkon maximální rampou na P_{ON_MIN} .	Pro $\forall b \in B_{UP}^{PWR}$ platí, že $P_{min} \leq P(b) \leq P_{ON_MIN}$
B_{DOWN}^{PWR}	Množina turbín snižujících výkon maximální rampou na P_{min} .	Pro $\forall b \in B_{DOWN}^{PWR}$ platí, že $P_{min} \leq P(b)$
B^{PWR}	Množina turbín ve stavu <i>power</i> .	$B^{PWR} = B_{UP}^{PWR} \cup B_{ON}^{PWR} \cup B_{DOWN}^{PWR}$ & pro $\forall b \in B^{PWR}$ platí, že $p_state_b = 100$
B^{RDY}	Množina turbín ve stavu <i>ready</i> .	Pro $\forall b \in B^{RDY}$ platí, že $p_state_b = \frac{T_{min}^{RDY}}{T_{min}^{PWR} + T_{min}^{RDY}}$
$B^{RDY \rightarrow PWR}$	Množina turbín přecházející ze stavu <i>ready</i> do stavu <i>power</i> .	Pro $\forall b \in B^{RDY \rightarrow PWR}$ platí, že $p_state_b \in \langle \frac{T_{min}^{RDY}}{T_{min}^{PWR} + T_{min}^{RDY}}, 100 \rangle$
$B^{PWR \rightarrow RDY}$	Množina turbín přecházející ze stavu <i>power</i> do stavu <i>ready</i> .	Pro $\forall b \in B^{PWR \rightarrow RDY}$ platí, že $p_state_b \in \langle 0, \frac{T_{min}^{RDY}}{T_{min}^{PWR} + T_{min}^{RDY}} \rangle$
B	Množina všech turbín.	$B = B^{PWR} \cup B^{RDY} \cup B^{RDY \rightarrow PWR} \cup B^{PWR \rightarrow RDY}$
$count$	Počet turbín potřebných k plnění požadavku na aFRR.	
req	Požadavek na aFRR.	

Požadavek, ale nemusí přijít proto proměnná req je vlastně struktura obsahující tři proměnné. A to čas t povelu aFRR, výkon daný povelu p a gradient rampy povelu označený $p_increment$. Shrnutí těchto proměnných struktury req naleznete v tabulce 5.4.

V tuto chvíli se můžeme podívat na algoritmus pro analýzu robustnosti.

Proměnná	Popis	Podmínka
t	Čas povelu.	$t \in T$
p	Výkon daný povelem	
$p_increment$	Gradient rampy povelu.	

Tabulka 5.4: Parametry MILP

5.2 Pseudokód algoritmu analýzy robustnosti

Pseudokód k algoritmu funguje na principu prohledávání stavového prostoru a vybírání nejhorších výsledků 1.

Algorithm 1 Analýza robustnosti

```

for  $t \in T$  do
  for  $p \in P^{aFRR}$  do
     $S'(t, p) = \text{dominate}(S_{t,p})$ 
    for  $i \in S'(t, p)$  do
      for  $pp \in P^{aFRR}$  do
         $S_{t+1,pp}.\text{add}(\text{createChild}(i, t, pp))$ 
      end for
    end for
  end for
end for

```

Kde *dominate* znamená výběr nejhorších prvků v množině prvků $S_{t,p}$, k dominanci prvků vypadá pseudokód následovně 2.

Algorithm 2 Dominate

```

 $S_{t,p} = S_{t,p}.\text{sort}(i.E)$ 
for  $s \in S'_{t,p}$  do
  if  $|i.B^{PWR}| \neq |s.B^{PWR}|$  then
     $S'(t, p).\text{add}(i)$ 
  else if  $|i.B^{RDY}| \neq |s.B^{RDY}|$  then
     $S'(t, p).\text{add}(i)$ 
  else if  $|i.B^{RDY \rightarrow PWR}| \neq |s.B^{RDY \rightarrow PWR}|$  then
     $S'(t, p).\text{add}(i)$ 
  end if
end for

```

Dále je potřeba vytvoření potomka nazvané *createChild*, který si rozdělíme pro lepší pochopení na menší celky. Jako první je zpracování příchozího povelu 3.

Algorithm 3 Zpracování povelu

```

if  $pp < 0$  or  $pp! = i.req.p$  then
     $i'.t = t + 1$ 
     $i'.req.pp = pp$ 
     $i'.req.t = t$ 
     $i'.count = \frac{pp + P_{min\_chrg}^{BAT}}{P_{max}}$ 
     $i'.p\_increment = \frac{pp - item.P_{out}}{TaFRR}$ 
else
     $i'.t = t + 1$ 
     $i'.req.pp = i.req.p$ 
     $i'.req.t = i.req.t$ 
     $i'.count = i.count$ 
    if  $i.req.p \leq i.P_{out} + \epsilon$  and  $i.req.p \geq i.P_{out} - \epsilon$  then
         $i'.p\_increment = 0$ 
    else
         $i'.p\_increment = i.p\_increment$ 
    end if
end if

```

Následuje přidávání turbín a odebrání turbín podle počtu potřebných turbín k plnění požadavku na aktivaci aFRR 4.

Algorithm 4 Přidávání turbín a odebrání turbín

```

1:  $i'.B = i.B$ 
2:  $i'.B^{PWR} = i.B^{PWR}$ 
3:  $i'.B^{RDY} = i.B^{RDY}$ 
4:  $i'.B^{RDY \rightarrow PWR} = i.B^{RDY \rightarrow PWR}$ 
5:  $i'.B^{PWR \rightarrow RDY} = i.B^{PWR \rightarrow RDY}$ 
6: if  $i'.count > |i.B^{PWR}| + |i.B^{RDY \rightarrow PWR}|$  then
7:     move  $\min(|i.B^{RDY}|, i'.count - |i.B^{PWR}| - |i.B^{RDY \rightarrow PWR}|)$  turbines
       from  $i'.B^{RDY}$  to  $i'.B^{RDY \rightarrow PWR}$ 
8: end if

```

```

9: if  $i'.count < |i.B_{UP}^{PWR}| + |i.B_{ON}^{PWR}|$  then
10:   move  $max(0, |i.B_{UP}^{PWR}| + |i.B_{ON}^{PWR}| - i'.count)$  turbines from  $i'.B_{UP}^{PWR} \cup$ 
    $i'.B_{ON}^{PWR}$  to  $i'.B_{DOWN}^{PWR}$ 
11: end if

```

Jako další je přesun turbín mezi množinami za splnění podmínek k přesunu 5.

Algorithm 5 Přesun turbín mezi množinami

```

 $i'.p\_state = i.p\_state$ 
2:  $i'.P(b) = i.P(b)$ 
   for  $b \in i.B_{DOWN}^{PWR}$  do
4:   if  $i.P_b = P_{min}$  then
        $i'.P_b = 0$ 
6:    $i'.p\_state_b = 0$ 
        $i'.B_{DOWN}^{PWR} = i'.B_{DOWN}^{PWR} \setminus b$ 
8:    $i'.B^{PWR \rightarrow RDY} = i'.B^{PWR \rightarrow RDY} \cup b$ 
   end if
10: end for
   for  $b \in i.B^{PWR \rightarrow RDY}$  do
12:   if  $i.p\_state_b \geq \frac{T^{RDY} \cdot 100}{T_{min}^{RDY} + T_{min}^{PWR}}$  then
        $i'.B^{PWR \rightarrow RDY} = i'.B^{PWR \rightarrow RDY} \setminus b$ 
14:    $i'.B^{RDY} = i'.B^{RDY} \cup b$ 
   end if
16: end for
   for  $b \in i.B^{RDY \rightarrow PWR}$  do
18:   if  $item.p\_state_b \geq 100$  then
        $i'.P_b = P_{min}$ 
20:    $i'.p\_state_b = 100$ 
        $i'.B^{RDY \rightarrow PWR} = i'.B^{RDY \rightarrow PWR} \setminus b$ 

```

```

22:      $i'.B^{PWR} = i'.B^{PWR} \cup b$ 
        $i'.B_{UP}^{PWR} = i'.B_{UP}^{PWR} \cup b$ 
24:   end if
       end for
26: for  $b \in i.B_{UP}^{PWR}$  do
       if  $i.P_b \geq P_{ONMIN}^{PWR}$  then
28:      $i'.B_{UP}^{PWR} = i'.B_{UP}^{PWR} \setminus b$ 
        $i'.B_{ON}^{PWR} = i'.B_{ON}^{PWR} \cup b$ 
30:   end if
       end for

```

A jako poslední větší blok následují úpravy výkonů turbín, výstupní energie a stavu turbín. Tady začneme právě aktualizací stavů turbín 6.

Algorithm 6 Aktualizace stavů turbín

```

for  $b \in i.B^{PWR \rightarrow RDY}$  do
   $i'.p\_state_b = i.p\_state_b + \Delta$ 
end for
for  $b \in i.B^{RDY \rightarrow PWR}$  do
   $i'.p\_state_b = i.p\_state_b + \Delta$ 
end for

```

Následuje tedy úprava výkonů turbín a výstupního výkonu 7.

Algorithm 7 Úprava výkonů turbín a výstupního výkonu

```

for  $b \in i.B_{UP}^{PWR}$  do
   $i'.P_b = i.P_b + G_{max}$ 
3: end for
for  $b \in i.B_{DOWN}^{PWR}$  do
   $i'.P_b = \max(i.P_b - G_{max}, P_{min})$ 
6: end for

```

```

req = i.Pout + i'.req.p_increment + PminchrgBAT - ∑b∈B i'.Pb
for b ∈ i.BONPWR do
9:   if req > 0 then
       i'.Pb = min(i.Pb + req, Pmax, i.Pb + Gmax)
       req = req - (i'.Pb - i.Pb)
12:  else if req < 0 then
       i'.Pb = max(i.Pb - req, PONMIN, i.Pb - Gmax)
       req = req + (i'.Pb - i.Pb)
15:  else
       break
     end if
18: end for
i'.Pout = i.Pout + i'.req.p_increment

```

Dostáváme se k poslední podstatné části a to je úprava energie v baterii. Tato úprava je následně testována, jestli splňuje technické parametry baterie. Pokud by byly technické parametry baterie porušeny, je nalezen stav, ve kterém nelze plnit požadavek na aFRR. Tento stav je následně vykreslován do grafu 8.

Algorithm 8 Úprava energie v baterii

```

if i.Pout ≤ item.PB then
       i'.E = i.E + nchrg · |i.PB - i.Pout|
else
       i'.E = i.E + 1/ndsch · |i.PB - i.Pout|
end if
if i'.E < Emin or i'.E > Emax or |i.PB - i.Pout| > PmaxBAT then
       draw graph
end if

```

5.3 Analýza diagramů z algoritmu

V této kapitole se podíváme na některé grafy z algoritmu k analýze robustnosti a vyhodnotíme jejich výstup. Při analýze grafů se scénáře opakovaly, proto jsou vybrány 4 scénáře a jsou rozděleny na jednoduché scénáře obsahující 3 turbíny a komplexní scénáře, které obsahují turbín 6.

Grafů se z algoritmu vždy vygeneruje více. Jsou vybrány scénáře, ve kterých

se výsledky z grafů shodují. Těmi jsou vybitá baterie a přesah maximálního technického výkonu baterie.

Obsah některých nastavení parametrů je připodobněním reálných dat a je pro všechny scénáře stejné, těmi parametry jsou:

$$\begin{aligned}
 P_{max} &= 4209 [kW], \\
 P_{min} &= 120 [kW], \\
 P_{MIN}^{ON} &= 200 [kW], \\
 G_{max} &= 60 [kW], \\
 T^{aFRR} &= 300 [s], \\
 \eta_d &= 92 [\%], \\
 \eta_{ch} &= 95 [\%], \\
 P_{min_chrg}^{BAT} &= 1 [MW], \\
 t &= 0 [s], \\
 req.t &= 0 [s].
 \end{aligned}$$

5.3.1 Jednoduché scénáře se 3 turbínami

Jednoduché scénáře jsou dva a oba mají tyto shodně nastavené parametry:

$$P^{aFRR} = \{-1, 0, P_{max} \cdot 1.5, P_{max} \cdot 3\},$$

kde -1 znamená, že nepřišel nový povel na aktivaci aFRR.

Zbývající parametry jsou nastaveny pro každý scénář různě. Začneme scénářem, kde výkon baterie přesáhl maximální technický výkon baterie. Zde jsou nastaveny zbývající parametry tímto způsobem:

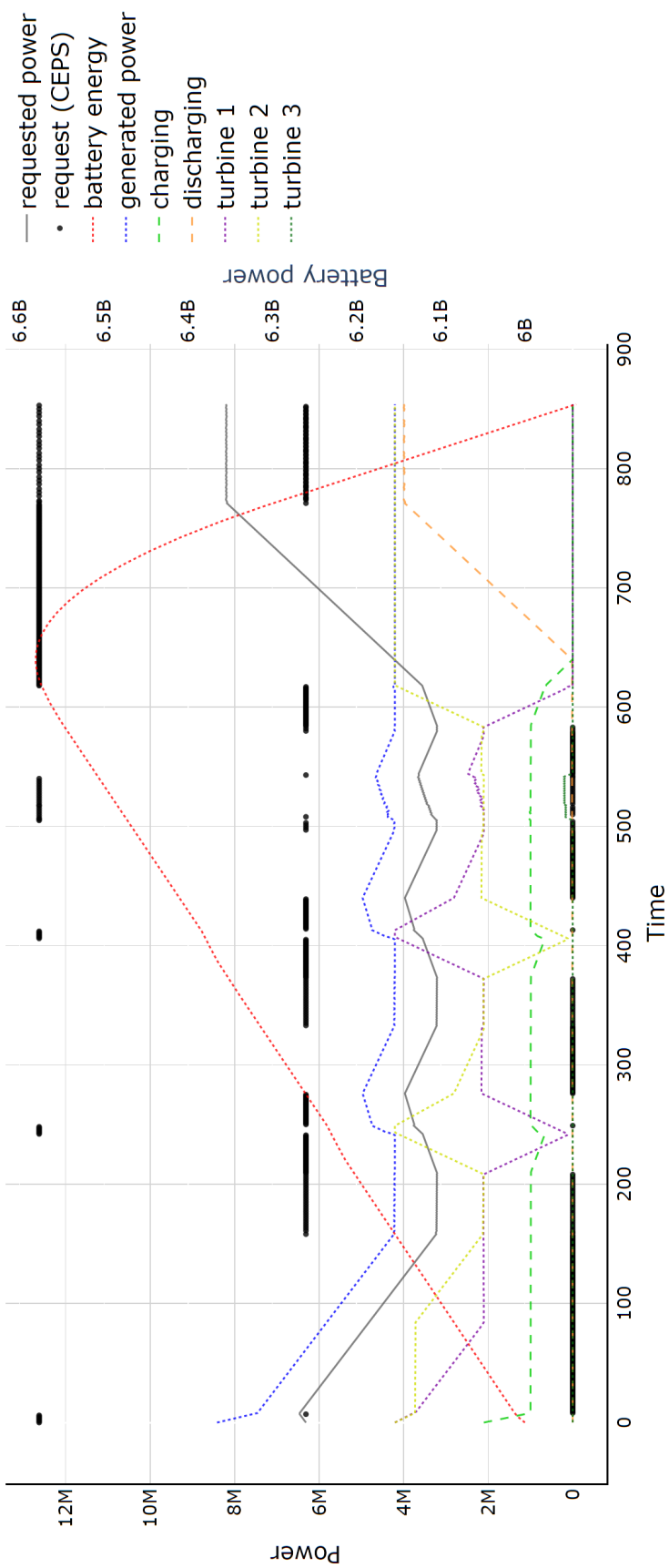
$$\begin{aligned}
 P_{max}^{BAT} &= 40 [MW], \\
 T_{min}^{PWR} &= 100 [s], \\
 T_{min}^{RDY} &= 300 [s], \\
 E_{max} &= 3 [MWh], \\
 E_{min} &= 0.3 [MWh], \\
 E_{TRH} &= 1.5 [MWh], \\
 req.p &= P_{max} \cdot 1.5, \\
 P_{out} &= P_{max} \cdot 1.5, \\
 B_{ON}^{PWR} &= \{b_1, b_2\}, \\
 B^{PWR \rightarrow RDY} &= \{b_3\}, \\
 p_state &= \{100, 100, 0\},
 \end{aligned}$$

$$E = 1.67[MWh].$$

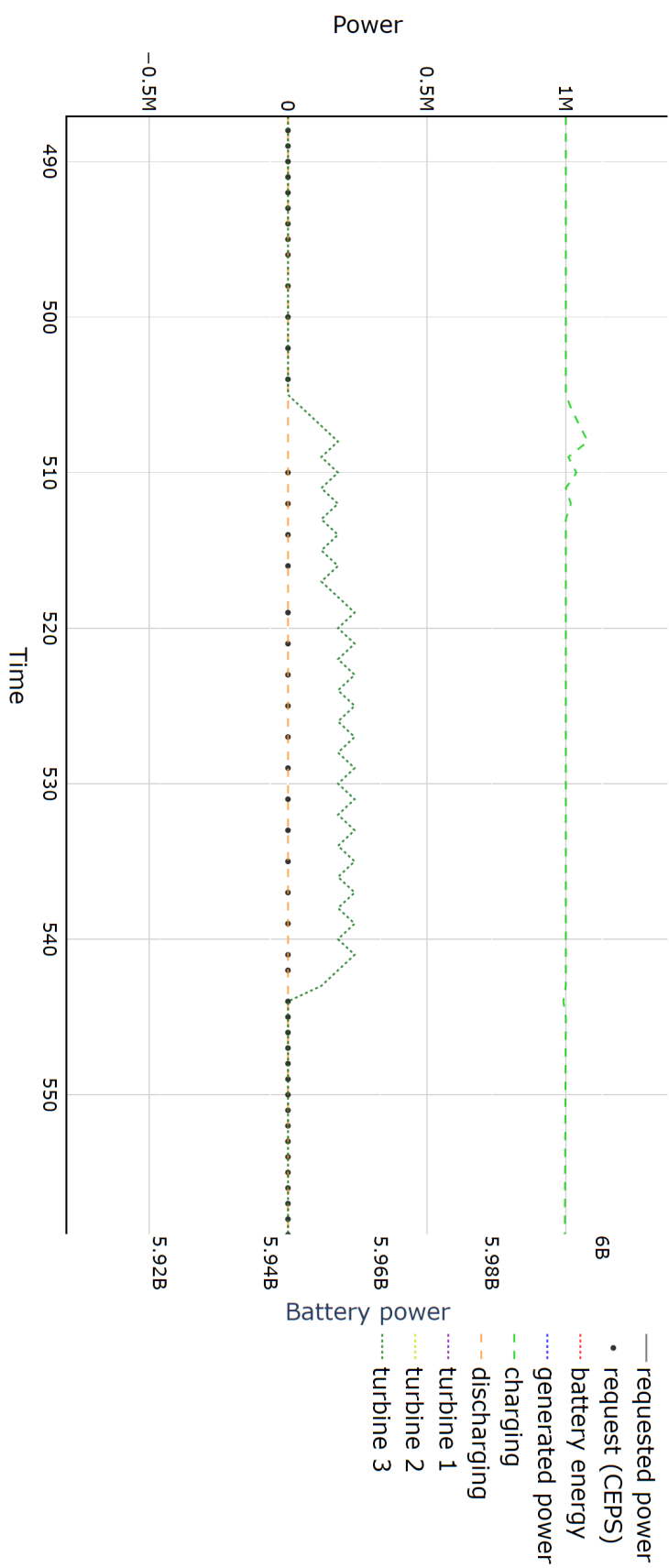
V grafu na obrázku 5.1 jsou černé tečky, které ukazují požadovaný výkon z požadavku na aFRR. Šedá čára zobrazuje výkon dodávaný do sítě. Červená tečkovaná čára zobrazuje energii uloženou v baterii, zelená čárkovaná čára v grafu zobrazuje výkon nabíjející baterii a oranžová čára zobrazuje výkon baterie dodávaný do sítě. Modrá tečkovaná čára pak zobrazuje celkový výkon generovaný turbínami. V ose x je čas, na ose y vlevo je výkon a na ose y vpravo je energie uložená v baterii.

Zbytek barevných tečkovaných čar označují průběhy výkonu turbín. Čeho je důležité na tomto grafu si všimnout, že v čase $t = 505$ přifází turbína b_3 a následně kvůli požadavku na aFRR na nedodávání výkonu do sítě se v čase $t = 544$ odfází od sítě. V grafu na obrázku 5.2 je turbína b_3 vyznačena tmavě zelenou tečkovanou čarou.

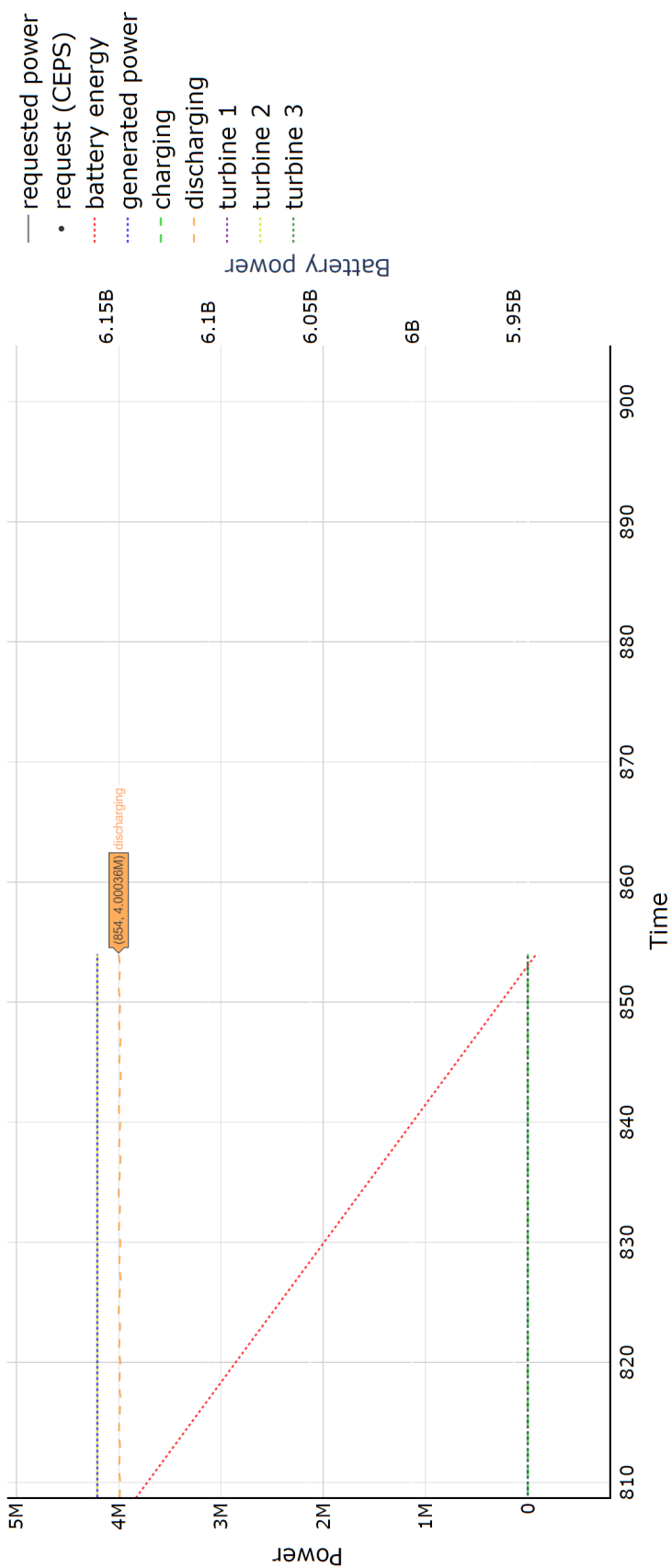
Jelikož je poté v požadavku na aFRR požadovaný maximální výkon, nebo polovina maximální dodávaného výkonu, a nestihne se turbína b_3 znovu přifázovat, tak baterie v čase $t = 864$ přesáhne maximální technický výkon baterie. V grafu na obrázku 5.3 je průběh vybíjecího výkonu vyznačen oranžovou čárkovanou čarou.



Obrázek 5.1: Graf: Výkon baterie přesáhl maximální technický výkon baterie



Obrázek 5.2: Graf: Přifázování a odřazování turbíny, vybíjecí výkon baterie



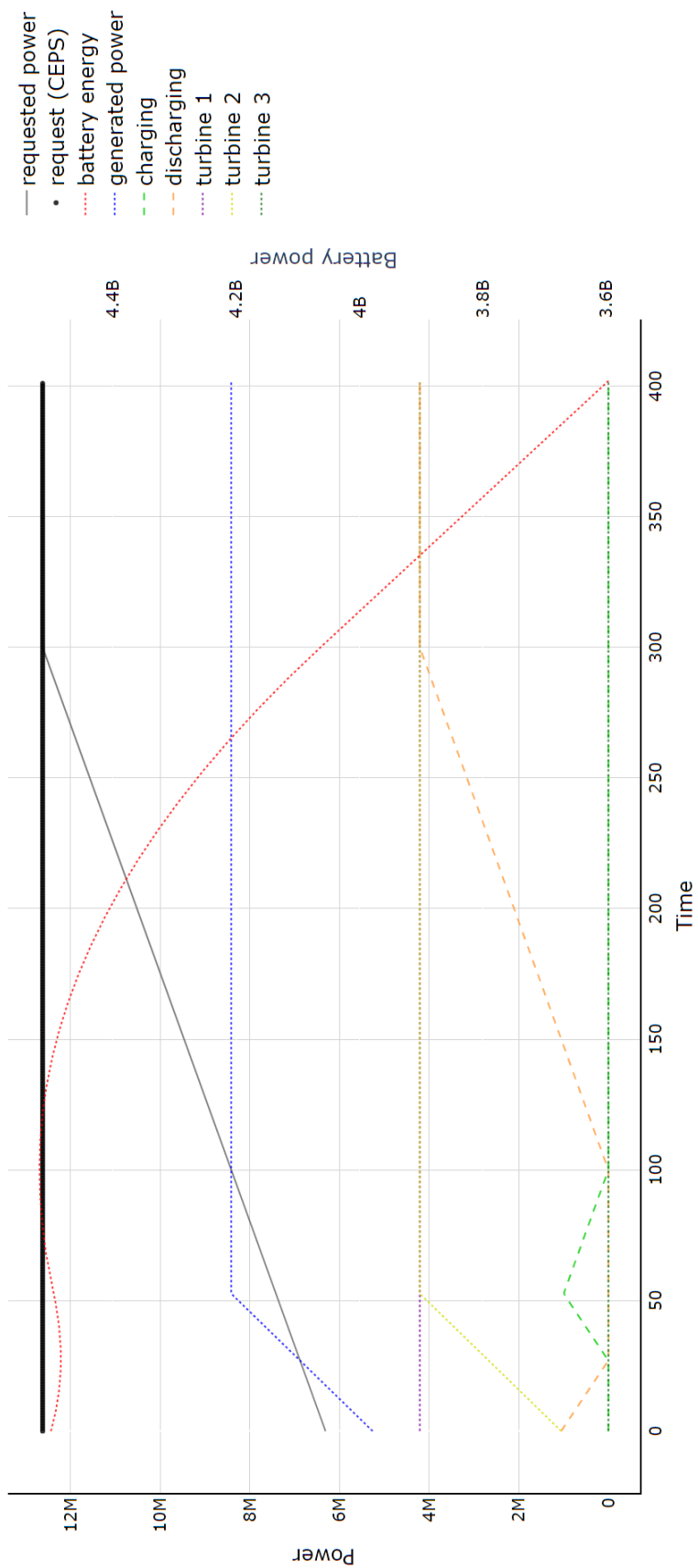
Obrázek 5.3: Graf: Nedostatek energie v baterii

Druhý scénář je v parametrech, které se liší, nastaven následovně:

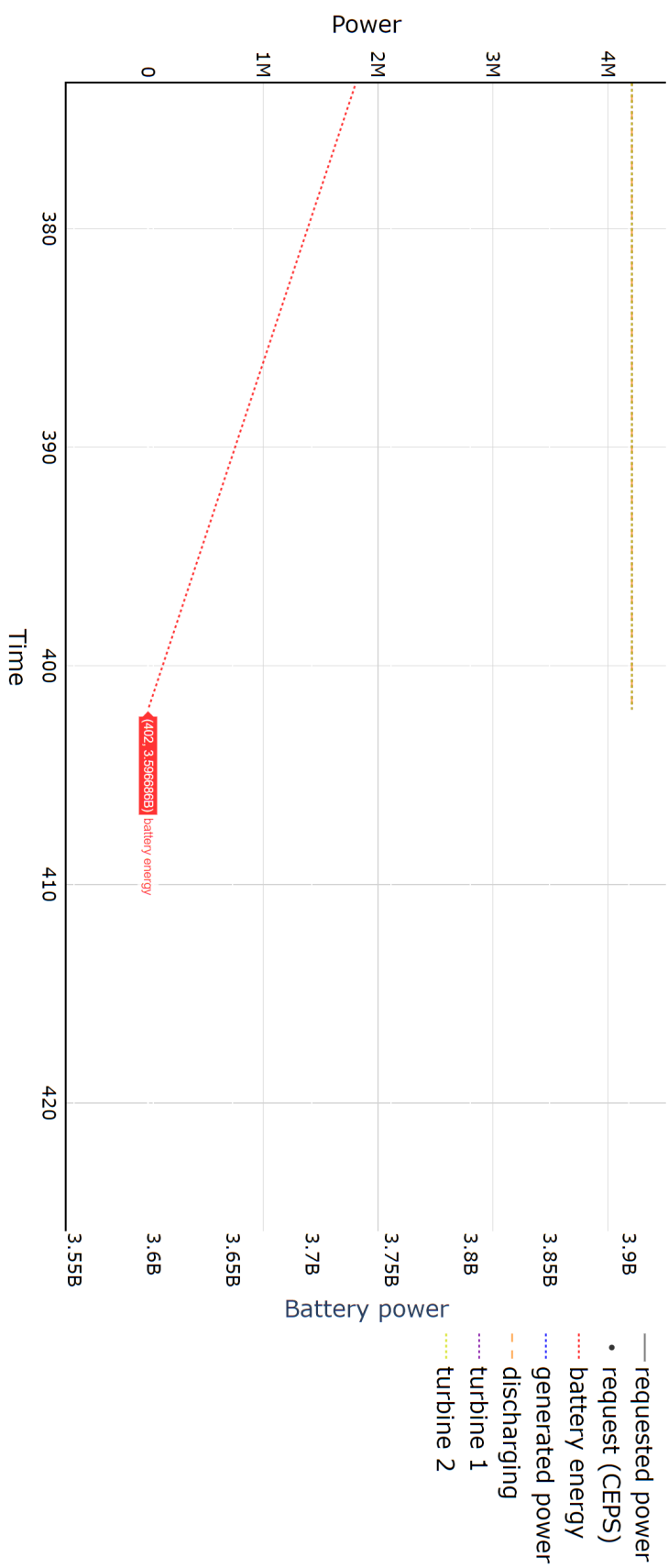
$$\begin{aligned}
 P_{max}^{BAT} &= 5 [MW], \\
 T_{min}^{PWR} &= 120 [s], \\
 T_{min}^{RDY} &= 400 [s], \\
 E_{max} &= 6 [MWh], \\
 E_{min} &= 1 [MWh], \\
 E_{TRH} &= 3 [MWh], \\
 req.p &= P_{max} \cdot 1.5, \\
 P_{out} &= P_{max} \cdot 1.5, \\
 B_{ON}^{PWR} &= \{b_1\}, \\
 B_{UP}^{PWR} &= \{b_2\}, \\
 B^{PWR \rightarrow RDY} &= \{b_3\}, \\
 p_state &= \{100, 100, 0\}, \\
 E &= 1.67 [MWh].
 \end{aligned}$$

V grafu na obrázku 5.4 jsou čáry totožných barev jako v grafu předchozím. Je z grafu viditelné, že jsou zapnuty dvě turbíny, b_1 vyznačená fialovou tečkovanou čarou a b_2 vyznačená žlutou tečkovanou čarou. Turbína b_2 byla nejspíše před začátkem grafu zapnuta, protože teprve nabíhá její výkon maximální rampou nahoru. Turbína b_3 byla odfazována a snaží se dostat do stavu *ready*. Bohužel je to časově náročné a kvůli nízké hladině energie v baterii se stihne baterie před přifázováním turbíny b_3 plně vybit.

Průběh konce vybití baterie v grafu na obrázku 5.5 je vyznačen červenou tečkovanou čarou a pod technické minimum se dostane v čase $t = 402$.



Obrázek 5.4: Graf: Nedostatek energie v baterii



Obrázek 5.5: Graf: Vybití baterie

5.3.2 Komplexní scénáře se 6 turbínami

Komplexní scénáře mají také několik parametrů, které mají stejné hodnoty. Těmi jsou:

$$\begin{aligned} P^{aFRR} &= \{-1, 0, P_{max} \cdot 3, P_{max} \cdot 6\}, \\ E_{max} &= 6 [MWh], \\ E_{min} &= 1 [MWh], \\ E_{TRH} &= 3 [MWh]. \end{aligned}$$

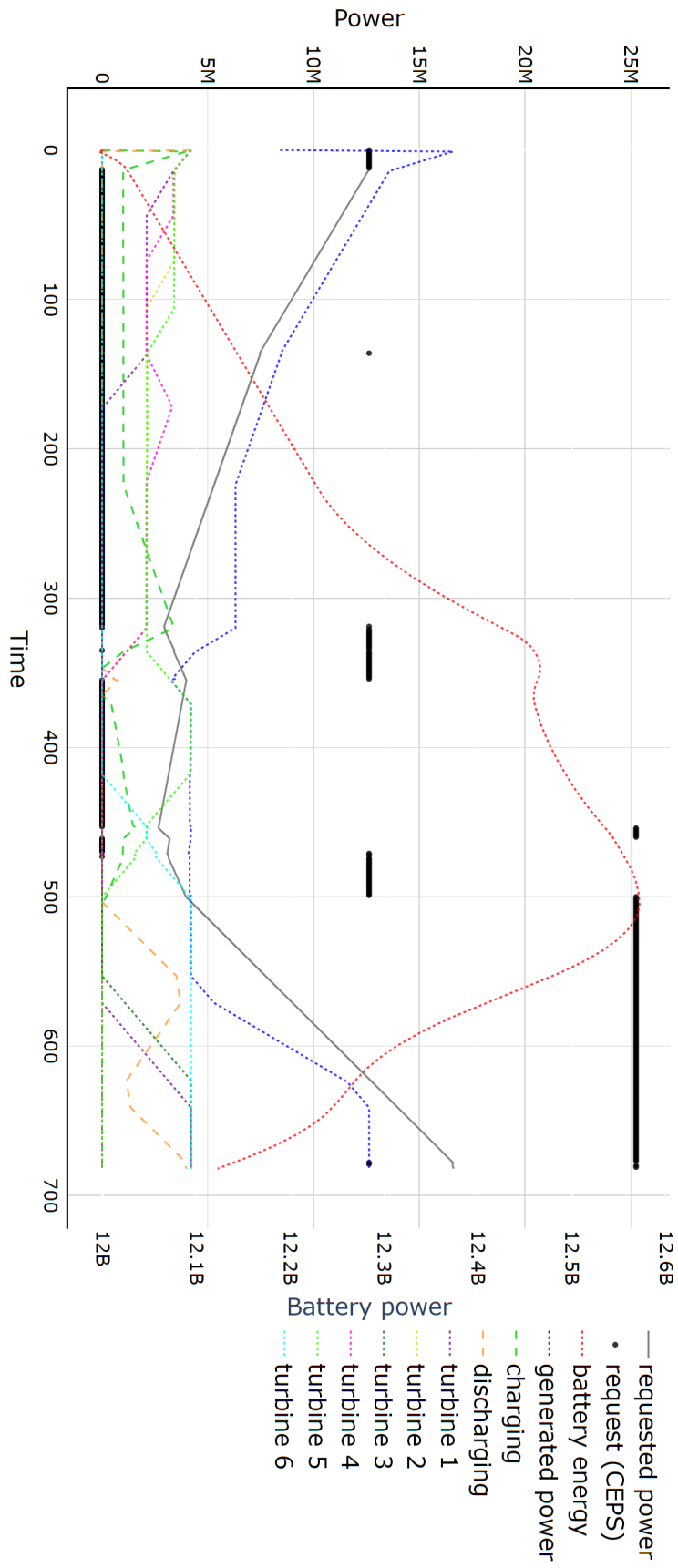
V prvním scénáři se podíváme na přesah maximálního technického výkonu baterie. Zbývající parametry pro tento scénář jsou nastaveny:

$$\begin{aligned} req.p &= P_{max} \cdot 3, \\ P_{out} &= P_{max} \cdot 3, \\ B_{ON}^{PWR} &= \{b_1, b_2, b_4, b_5\}, \\ B^{PWR \rightarrow RDY} &= \{b_3\}, \\ B^{RDY} &= \{b_6\}, \\ p_state &= \left\{ 100, 100, 0, 100, 100, \frac{T_{min}^{RDY}}{T_{min}^{PWR} + T_{min}^{RDY}} \right\}, \\ E &= 3.33 [MWh], \\ P_{max}^{BAT} &= 4 [MW], \\ T_{min}^{PWR} &= 100 [s], \\ T_{min}^{RDY} &= 300 [s]. \end{aligned}$$

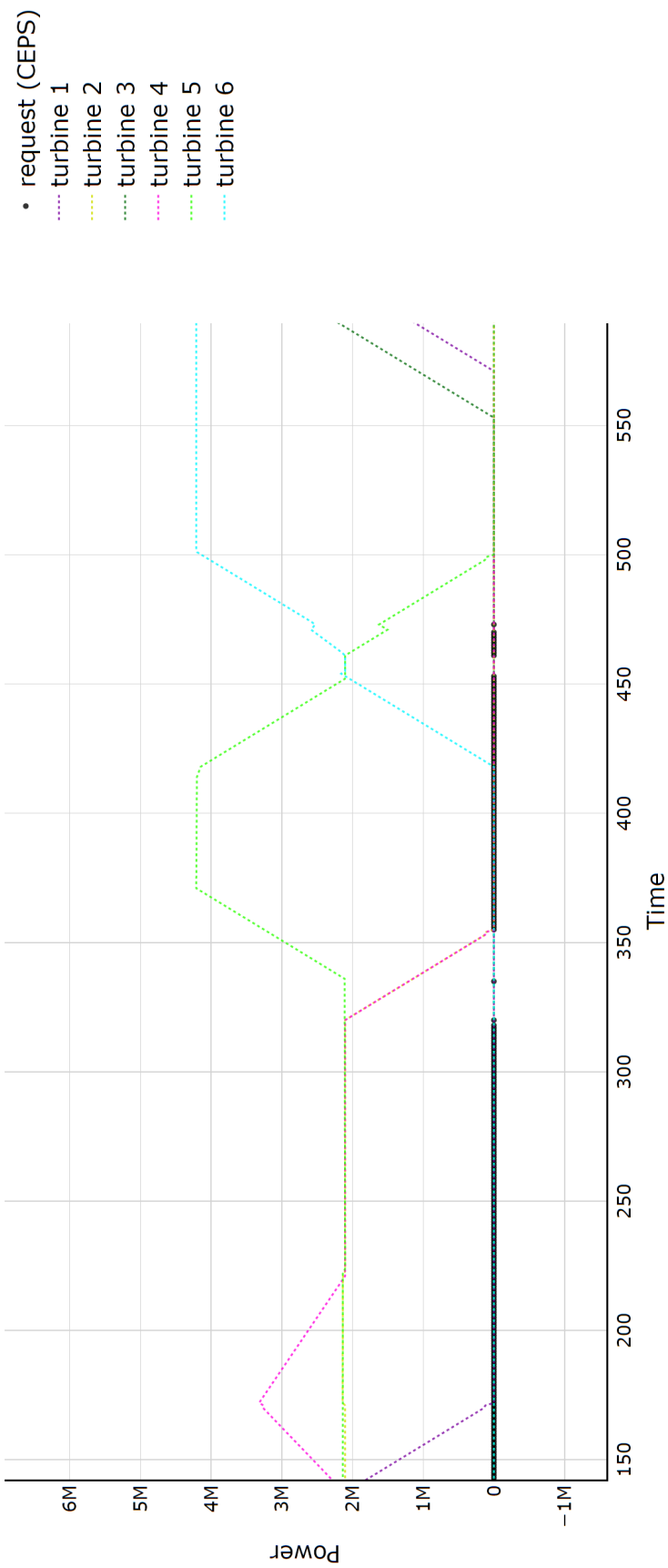
Barevné schéma grafu je totožné jako v předchozích dvou. Na tomto grafu se stane, že je skoro na začátku odfázovaná turbína b_1 , vyznačena tmavě fialovou tečkovanou čarou, kvůli nízkým požadavkům na aFRR 5.6.

V čase $t = 355$ jsou pak odfázovány turbíny b_2 a b_4 , vyznačené žlutou a růžovou tečkovanou čarou. Také se tak děje kvůli nízkým požadavkům na aFRR. Následně je přifázována turbína b_6 v čase $t = 418$, vyznačena světle modrou tečkovanou čarou. Což zapříčiní, že při požadavku na aFRR s polovičním technickým výkonem, je odfázována turbína b_5 v čase $t = 500$. A pak při požadavku na aFRR na maximální výkon, jsou přifázovány turbíny b_3 , vyznačená tmavě zelenou tečkovanou čarou, v čase $t = 554$ a b_1 v čase $t = 572$. Ostatní turbíny se nestihly dostat do stavu *ready*, proto nemohl být vydán povel na jejich přifázování. Průběh přifázování a odfázování turbín je vyznačen v grafu na obrázku 5.7.

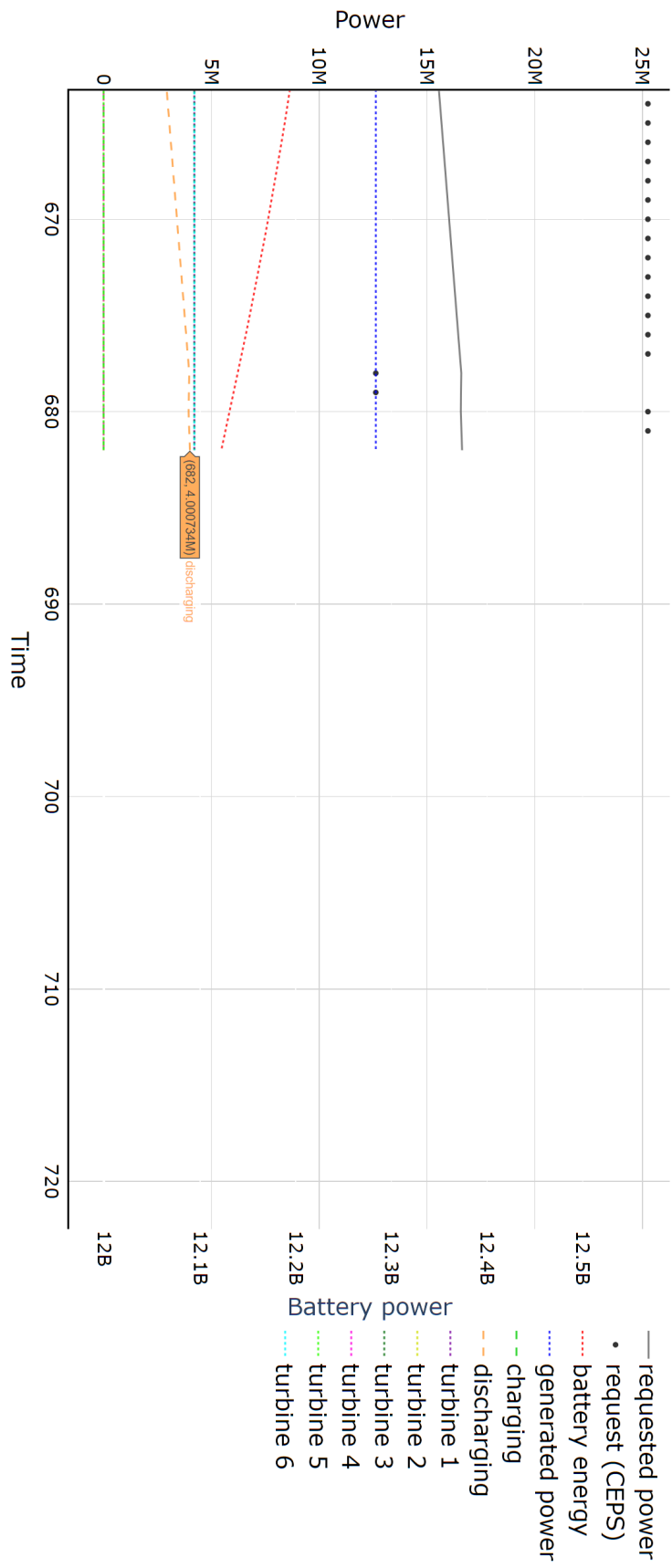
To má za následek, že se nestihne žádná z odfázovaných turbín znovu přifázovat a proto v čase $t = 682$ baterie přesáhne svůj maximální technický výkon. V grafu na obrázku 5.9 je průběh vybíjecího výkonu vyznačen oranžovou čárkovanou čarou.



Obrázek 5.6: Graf: Výkon baterie přesáhl maximální technický výkon baterie



Obrázek 5.7: Graf. Přifázování a odfázování turbín



Obrázek 5.8: Graf: Přesah maximálního výkonu baterie

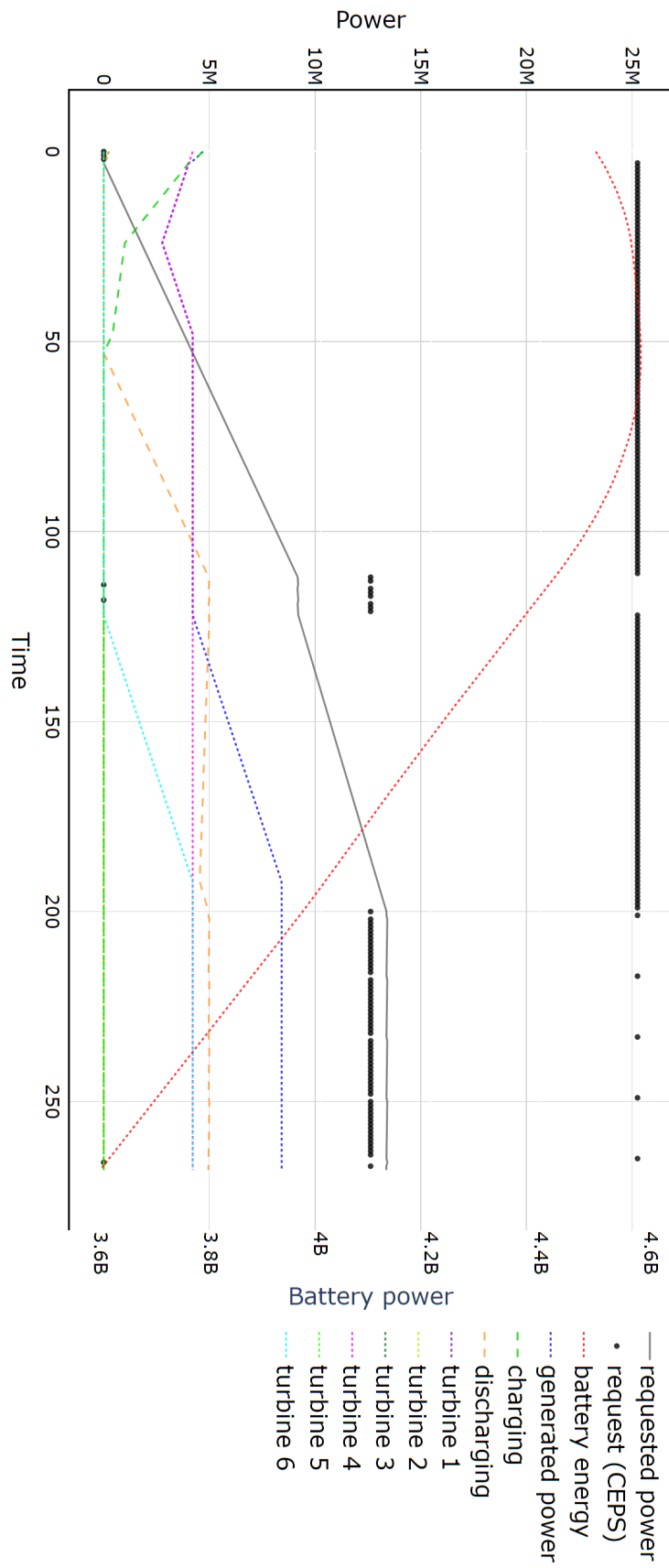
Druhý komplexní scénář má rozdílné parametry nastaveny takto:

$$\begin{aligned}
 req.p &= P_{max} \cdot 3, \\
 P_{out} &= P_{max} \cdot 3, \\
 B_{ON}^{PWR} &= \{b_1, b_2, b_4, b_5\}, \\
 B^{PWR \rightarrow RDY} &= \{b_3\}, \\
 B^{RDY} &= \{b_6\}, \\
 p_state &= \left\{ 100, 100, 0, 100, 100, \frac{T_{min}^{RDY}}{T_{min}^{PWR} + T_{min}^{RDY}} \right\}, \\
 E &= 1.39 [MWh], \\
 P_{max}^{BAT} &= 5 [MW], \\
 T_{min}^{PWR} &= 120 [s], \\
 T_{min}^{RDY} &= 400 [s].
 \end{aligned}$$

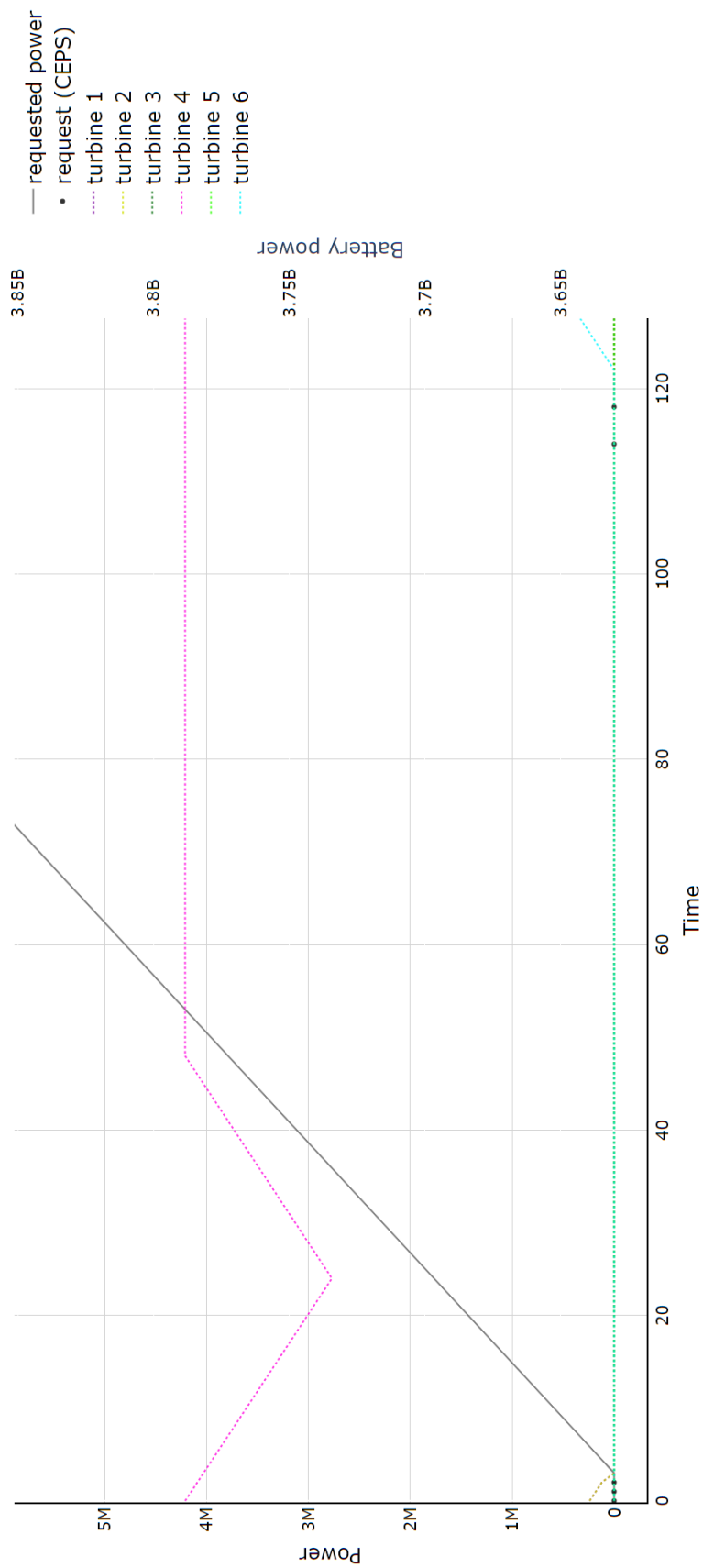
V grafu na obrázku 5.9 jsou viditelné na počátku požadavky na aFRR na nedodávání výkonu. To je příčinou proč zůstala přifázovaná turbína b_4 vyobrazena růžovou tečkovanou čarou, ale hned ze začátku byly odfázovány turbíny b_1 znázorněna fialovou tečkovanou čarou a b_2 znázorněna žlutou tečkovanou čarou.

K jejich odfázování došlo v čase $t = 3$, jak je možné vidět v grafu na obrázku 5.10. Jelikož následně byl požadavek na aFRR na maximum a rychle rostl požadovaný výkon, tak se v čase $t = 122$ přifázovala turbína b_6 vyobrazena světle modrou tečkovanou čarou.

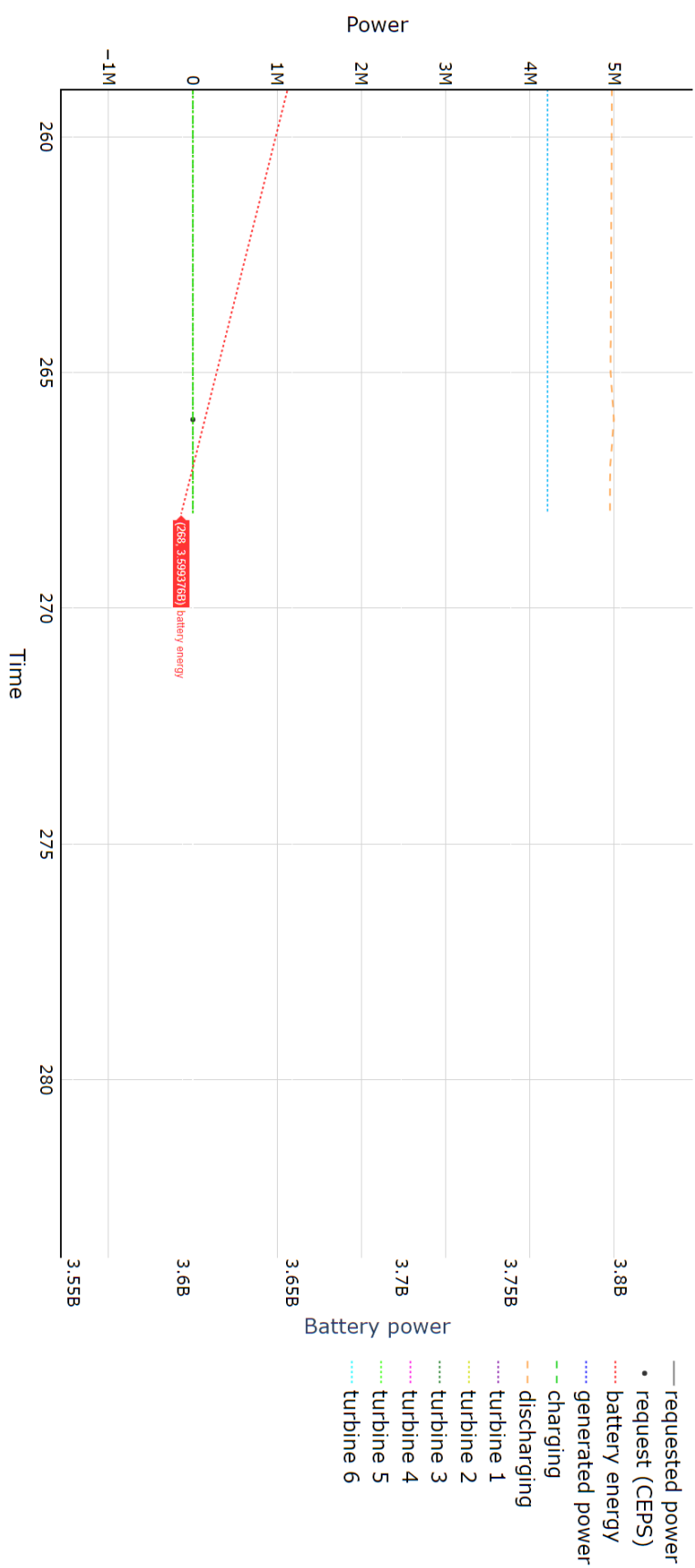
Následkem nedostupnosti ostatních turbín se baterie v čase $t = 268$ dostane pod své technické minimum energie uložené v baterii. Průběh konce vybití baterie je v grafu na obrázku 5.11 vyobrazen červenou tečkovanou čarou.



Obrázek 5.9: Graf: Nedostatek energie v baterii



Obrázek 5.10: Graf: Přifázování a odfázování turbín



Obrázek 5.11: Graf: Nedostatek energie v baterii

■ 5.3.3 Zhodnocení výsledků

Z grafů je viditelné, že problémem je vybití baterie nebo přesah maximálního technického výkonu baterie. Příčinou je nedostatek přiřazených turbín. Turbíny nemohou být přiřazené, jelikož se nestihly dostat do stavu *ready*.

Celkovou příčinou je, že je turbínám povoleno odřazování i v případě, že po té nelze plnit požadavek na aFRR s maximálním výkonem. Vzniku tohoto scénáře je možné zamezit v případě otestování, že lze turbínu odřazovat a stále plnit požadavek na aFRR s maximálním výkonem.

Kapitola 6

Robustní řízení

Na základě analýzy robustnosti z předešlé kapitoly, si můžeme popsat robustní řízení. Robustní řízení spočívá v tom, že je spuštěn MILP definovaný v kapitole 4 s callbackem. Kde je MILP spuštěn bez podmínek na energii uložené v baterii na konci počítané časové periody 4.37 a 4.38.

Callback je funkce volaná z MILP při nalezení možného výsledku. V rámci callback se dá do modelu přidat lazy constraint. To je podmínka, kterou lze do modelu přidat později. Bere se v úvahu při vyhodnocení optimálního výsledku, který tak může změnit.

Callback je vytvořen s poznatky s analýzy robustnosti. Tedy po zjištění problému, že se nestihne přifázovat turbína po jejím odfázování, pokud přijde povel na aktivaci aFRR, je potřeba v callbacku zjistit, jestli lze zajistit plnění aFRR po odfázování turbíny. V případě, že nelze zajistit plnění aFRR je přidána lazy constraint do modelu.

6.1 Callback

Plnění aFRR je v callbacku zajištěno tak, že callback najde všechny časové jednotky t , které mají vydán povel na odfázování turbíny:

$$S_{b,t}^{RDY} = 1, \quad \forall t \in T, \forall b \in B \quad (6.1)$$

Je potřeba zajistit, aby pro každý výsledek byla přidána jen jedna lazy constraint. Tedy hned pro první nalezený bod (b, t) je spuštěn model s podmínkami z kapitoly 4.3 bez kriteriální funkce. Proměnné jsou nastaveny tak, aby odpovídaly předchozímu průchodu do časové jednotky t a proměnná P_t^{REQ} je od časové jednotky $t + 1$ vedena funkcí 6.2 na maximální povel na aktivaci aFRR.

$$p_{t_1}^{REQ} = \min \left(|B| \cdot P_{max}, (t_1 - t - 1) \cdot \frac{|B| \cdot P_{max} - p_{t+1}^{REQ}}{300} + p_{t+1}^{REQ} \right), \quad (6.2)$$
$$\forall t_1 \in T \setminus 0, \dots, t.$$

Pro zajištění proměnných, aby odpovídaly předchozímu průchodu, je potřeba přidat podmínky. Kde v těchto podmínkách se proměnné rovnají již

nalezenému výsledku do času t . V následujících podmínkách jsou pro přehlednost výsledky z původního modelu z kapitoly 4 označeny $model_1$ a t je časová jednotka z nalezeného bodu (b, t) .

$$P_{b,t_1} = model_1.P_{b,t_1}, \quad \forall t_1 \in 0, \dots, t, \forall b \in B, \quad (6.3)$$

$$E_{t_1} = model_1.E_{t_1}, \quad \forall t_1 \in 0, \dots, t, \quad (6.4)$$

$$R_{b,t_1}^{PWR} = model_1.R_{b,t_1}^{PWR}, \quad \forall t_1 \in 0, \dots, t, \forall b \in B, \quad (6.5)$$

$$R_{b,t_1}^{RDY} = model_1.R_{b,t_1}^{RDY}, \quad \forall t_1 \in 0, \dots, t, \forall b \in B, \quad (6.6)$$

$$S_{b,t_1}^{PWR} = model_1.S_{b,t_1}^{PWR}, \quad \forall t_1 \in 0, \dots, t, \forall b \in B, \quad (6.7)$$

$$S_{b,t_1}^{RDY} = model_1.S_{b,t_1}^{RDY}, \quad \forall t_1 \in 0, \dots, t, \forall b \in B, \quad (6.8)$$

$$P_{t_1}^{CH} = model_1.P_{t_1}^{CH}, \quad \forall t_1 \in 0, \dots, t, \quad (6.9)$$

$$P_{t_1}^D = model_1.P_{t_1}^D, \quad \forall t_1 \in 0, \dots, t, \quad (6.10)$$

$$charging_{t_1} = model_1.charging_{t_1}, \quad \forall t_1 \in 0, \dots, t. \quad (6.11)$$

Pokud tento model je splnitelný, pak je nalezeno řešení. Jestliže je model nespílitelný je přidána lazy constraint do původního modelu s kriteriální funkcí z kapitoly 4.

Lazy constraint vynutí, aby turbína nebyla odřázována ještě v dalších sekundách definovaných v proměnné T^{lazy} . Pro tento účel jsme si definovali:

$$T^{lazy} = 30 \text{ sekund}. \quad (6.12)$$

Samotná lazy constraint zajiřtuje, že bude počet turbín v nalezeném čase $t + 1$ je o jednu více přřázovaných turbín po dobu T^{lazy} , než v původním $model_1$. Lazy constraint pak vypadá následovně:

$$\sum_{b \in B} \sum_{t_1 \in U} R_{b,t_1}^{PWR} \geq \left(\sum_{b \in B} \sum_{t_1 \in U} model_1.R_{b,t_1}^{PWR} \right) + \min(t + 1 + T^{lazy}, T) - (t + 1). \quad (6.13)$$

kde

$$U = \{t + 1, \dots, \min(t + T^{lazy}, T)\} \quad (6.14)$$

Výsledkem je model splňující podmínky a kriteriální funkci z kapitoly 4 i s možnými přřidanými lazy constraints 6.13.

Tím je zajiřtřeno, že řízení neodřazuje turbínu v přřpadě, že by nebylo možno plnit maximální aFRR, a tedy robustnost algoritmu řízení.

Kapitola 7

Experimenty

Testování MILP a robustního řízení probíhalo na syntetických parametrech, která byla inspirována reálnými parametry. Testovací data jsou syntetická, z důvodu nemožnosti sehnání reálných dat.

7.1 Popis testovacího prostředí

Prostředí na kterém se testovalo byl laptop značky Acer s operačním systémem Windows 11 Home. Laptop má procesor 12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-1255U s taktem 1.70 GHz a 8,0 GB paměti RAM.

K implementaci byl využit programovací jazyk Python verze 3.10. Jak pro implementaci, tak pro spouštění testovacích scénářů byl využit software PyCharm verze 22.3.1 od společnosti JetBrains. Pro MILP byla využita knihovna Gurobi verze 10.0.0.1.

7.2 MILP

V této kapitole se podíváme na experimenty s MILP. Kde první scénář je nad syntetickými jednoduchými daty k otestování, že lze nalézt optimum a turbíny se dokáží přifázovat a odfázovat.

Druhý scénář je spuštěn na komplexních datech se šesti turbínami.

Scénář pro MILP i pro robustní řízení je stejný, aby bylo možné porovnat rozdíly. Parametry pro tyto scénáře jsou nastaveny takto:

$$\eta_d = 80 [\%],$$

$$\eta_{ch} = 90 [\%],$$

$$P_{max} = 20 [W],$$

$$P_{min} = 3 [W],$$

$$G_{max} = 4 [W],$$

$$E_{max} = 250 [Ws],$$

$$E_{min} = 30 [Ws],$$

$$\begin{aligned}
E_{init} &= 100 [Ws], \\
E_{max}^{END} &= 105 [Ws], \\
E_{min}^{END} &= 95 [Ws], \\
P_{max}^{BAT} &= 20 [W], \\
T_{min}^{PWR} &= 1 [s], \\
T_{min}^{RDY} &= 5 [s], \\
P_{23} &= 4 [W], \\
N_{fix}^{RDY} &= 1, \\
N_{tran}^{RDY} &= 1, \\
N_{fix}^{PWR} &= 2, \\
N_{lin}^{PWR} &= 1, \\
N_{tran}^{PWR} &= 2, \\
T^{aFRR} &= 5 [s], \\
P_{b,init} &= \{P_{max}, P_{max}, P_{max}\}, \\
R_{b,init}^{RDY} &= \{0, 0, 0\}, \\
R_{b,init}^{PWR} &= \{1, 1, 1\}, \\
T &= \{0, \dots, 18\}.
\end{aligned}$$

P_t^{REQ} je určeno plnou zelenou čarou v grafu na obrázku 7.1.

Po spuštění scénáře se nalezne optimální chování turbín a baterie v grafu na obrázku 7.1. Kde hnědá tečkovaná čára zobrazuje průběh energie uložené v baterii, zelená plná čára zobrazuje požadovaný výkon. Červená tečkovaná čára je pak vybíjecí výkon baterie, naopak zelená tečkovaná čára je nabíjecí výkon baterie. Následně jsou tam tři turbíny oranžová, tyrkysová a fialová čárkované čáry. Na ose x je čas, na ose y vlevo je výkon a na ose y vpravo je energie v baterii.

V grafu na obrázku 7.1 je vidět, že je požadovaný výkon vede strmě dolů z maxima na nulu, kde vydrží 8 vteřin, a pak zpět strmě nahoru z nuly na maximum. To zapříčiní odfázování všech třech turbín, kde turbíny stihnou dojít do stavu *ready* a později v 11 a 12 vteřině, jsou turbíny znovu přifázovány. Je také poznat, že v 5 vteřině a také ve 13 vteřině byla baterie nabíjena. Po té od 17 vteřiny byla baterie vybíjena.

Tím je ověřeno, že na malých syntetických datech je nalezeno optimum a turbíny se dokáží odfázovat i přifázovat. Graf nezobrazuje porušení technických parametrů turbín, nebo baterie, tedy ukazuje funkčnost podmínek MILP.

7.3 Robustní řízení

Nastavení scénáře robustního řízení je totožné jako u jednoduchého scénáře, k nalezení v předešlé kapitole 7.2.

Hlavním rozdílem mezi grafem z testování MILP 7.1 a grafem po spuštění testovací robustního řízení 7.2 je, že je vypnuta pouze turbína b_3 . Ostatní dvě turbíny b_1 a b_2 zůstaly zapnuté. To je vynuceno přidáním lazy constraints.

7.4 Porovnání ceny MILP a robustního řízení

K porovnání ceny MILP a robustního řízení jsou vytvořeny tři tabulky. Každá tabulka obsahuje tři bloky, kde první blok obsahuje výsledky ze spouštění MILP s podmínkami na množství energie v baterii na konci počítaného cyklu 4.37 a 4.38. Druhý blok jsou výsledky z MILP bez podmínek 4.37 a 4.38 a třetí blok jsou výsledky MILP s použitím funkce callback tedy robustního řízení.

Důvodem k přidání druhého bloku výsledků je, že s podmínkami na množství energie v baterii na konci počítaného cyklu se časově prodlužuje výpočet a zvyšuje cena. To pak zapříčiní, že může vypadat robustní řízení, jako rychlejší a levnější. Robustní řízení neobsahuje podmínky 4.37 a 4.38, protože pak často přesáhne hranici maximální energie uložené v baterii, jelikož si vynucuje více zapnutých turbín. Tím pak dochází k nenalezení řešení. Proto je přidat pro porovnání ceny a času druhý blok výpočtu MILP bez podmínek 4.37 a 4.38.

Nastavení parametrů pro výpočet výsledků v tabulkách je následující:

$$\begin{aligned}\eta_d &= 92 \text{ [\%]}, \\ \eta_{ch} &= 95 \text{ [\%]}, \\ P_{max} &= 4209 \text{ [kW]}, \\ P_{min} &= 120 \text{ [W]}, \\ G_{max} &= 60 \text{ [W]}, \\ E_{max} &= 6 \text{ [MWh]}, \\ E_{min} &= 1 \text{ [MWh]}, \\ E_{max}^{END} &= E_{init} + 1 \text{ [MWh]}, \\ E_{min}^{END} &= E_{init} - 1 \text{ [MWh]}, \\ T_{min}^{PWR} &= 50 \text{ [s]}, \\ T_{min}^{RDY} &= 150 \text{ [s]}, \\ P_{23} &= 60 \text{ [kW]}, \\ N_{fix}^{RDY} &= 0.018333333333333333,\end{aligned}$$

$$N_{tran}^{RDY} = 153.53333333333333,$$

$$N_{fix}^{PWR} = 1.0875,$$

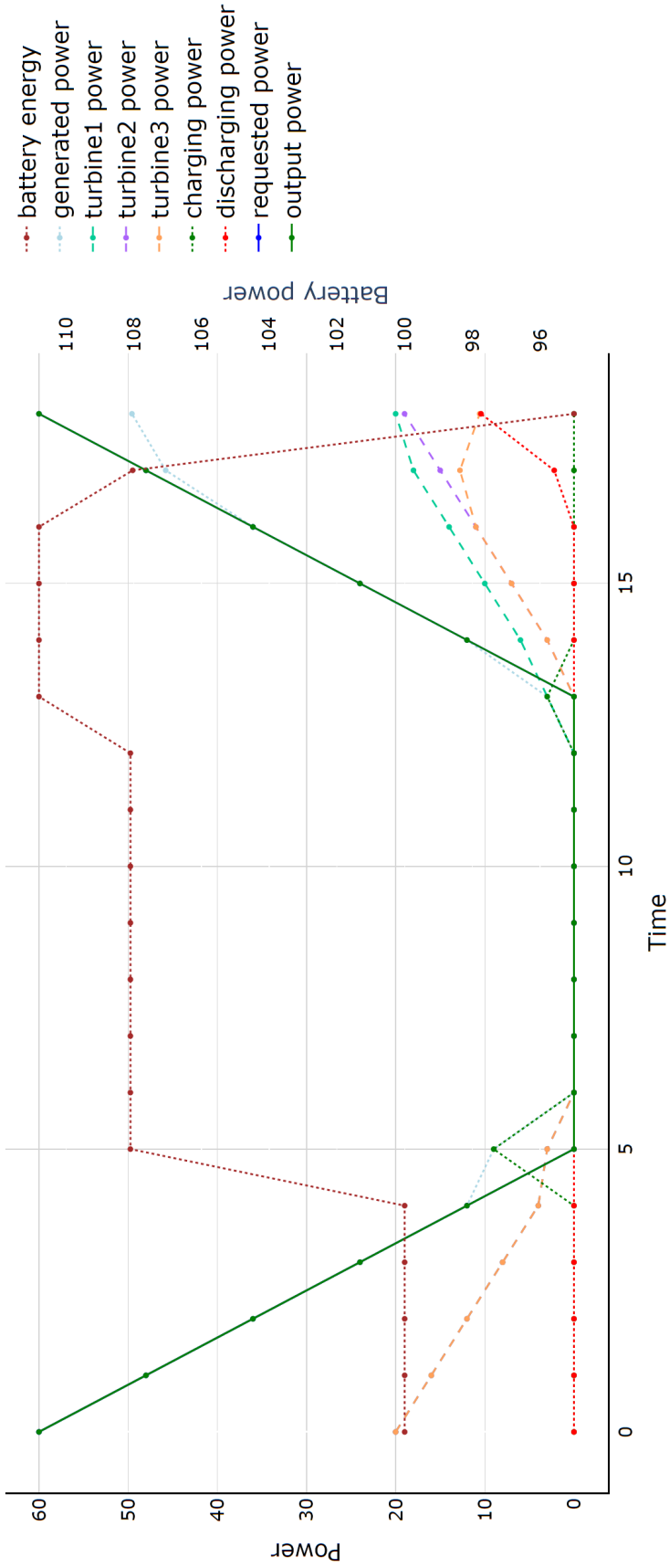
$$N_{lin}^{PWR} = 0.0016937,$$

$$N_{tran}^{PWR} = 43.56249999999999,$$

$$T^{aFRR} = 300 [s],$$

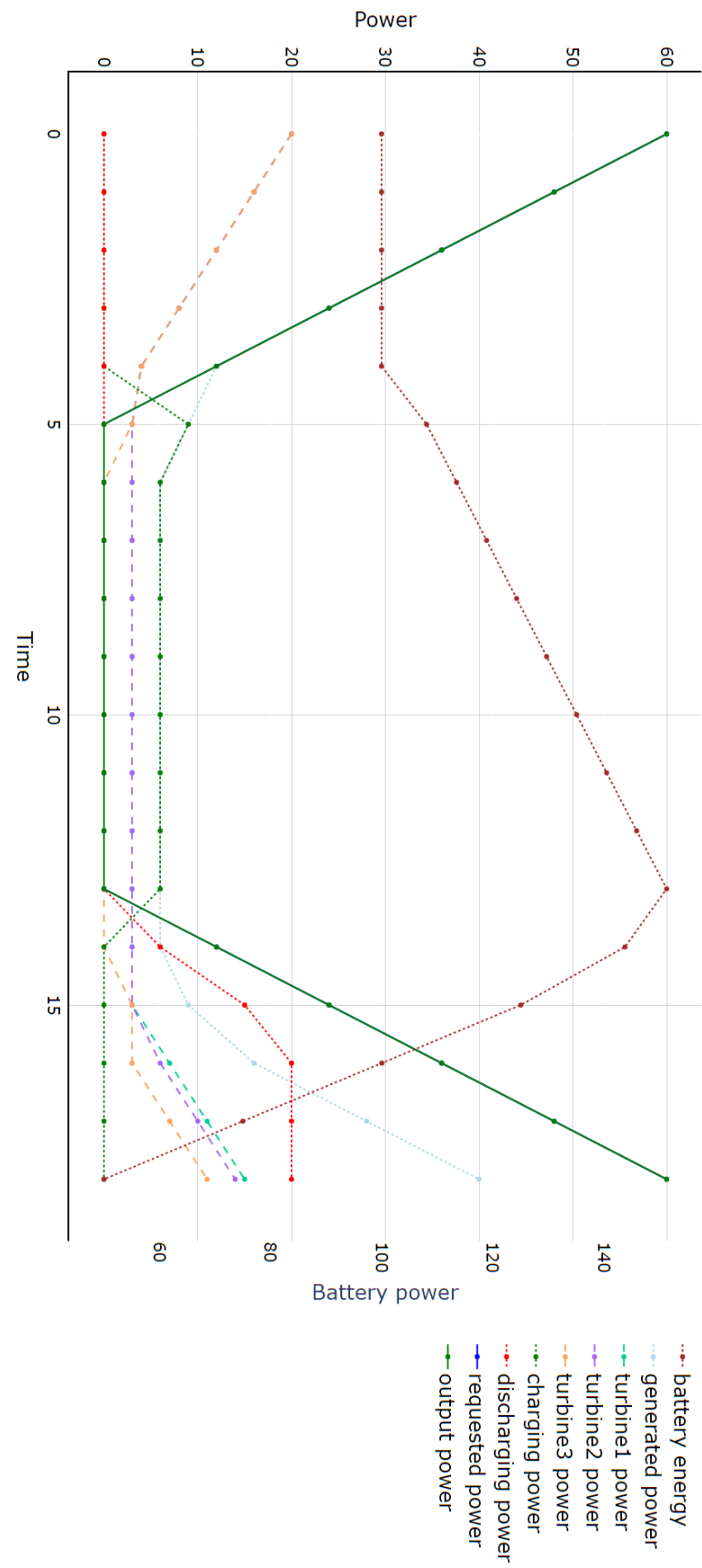
$$T = \{0, \dots, 1201\}.$$

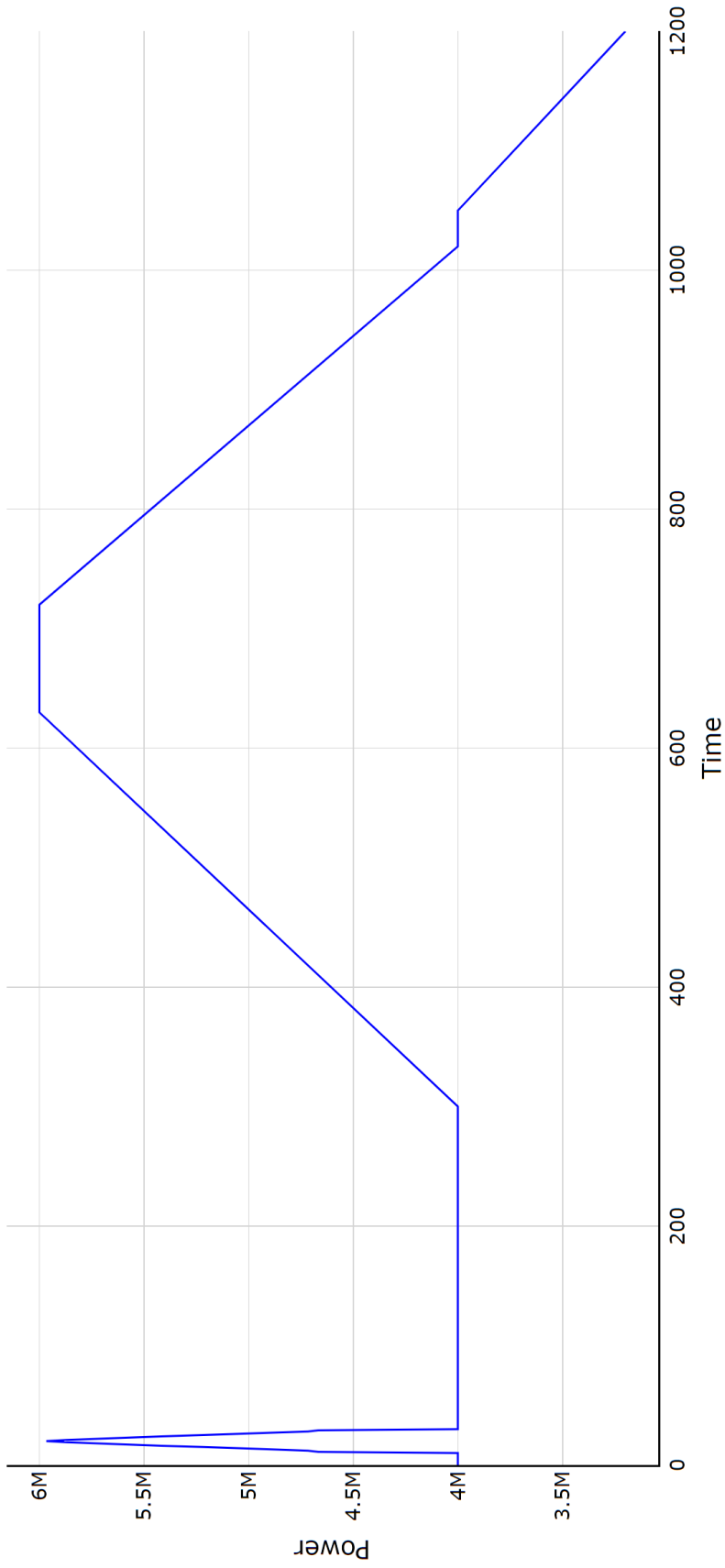
$PREQ$ jsou syntetická data, která byla inspirována reálným průběhem požadavku na aktivaci aFRR. Ovšem je to průběh pro 30 minut. Průběh $PREQ$ pro tři turbíny zobrazuje modrá čára v grafu na obrázku 7.3.



Obrázek 7.1: Graf: Experiment MILP, jednoduchý scénář

Obrázek 7.2: Graf: Experiment MILP jednoduchý scénář





Obrázek 7.3: Graf: Průběh P^{REQ} v čase pro tři turbíny

7.4.1 Různý počet turbín

První tabulka je vytvořena nad výpočty s různým počtem turbín. Kde P^{REQ} je definován pomocí následujícího vztahu:

$$P_t^{REQ} = \frac{init.P_t^{REQ} \cdot |B|}{3}, \quad \forall t \in T. \quad (7.1)$$

Kde $init.P_t^{REQ}$ je P^{REQ} z grafu 7.3, který je pro tři turbíny.

Nastavení zbývajících parametrů je následovné:

$$E_{init} = 3 [MWh],$$

$$P_{max}^{BAT} = 6 [MW].$$

Z tabulky 7.1 je viditelné, že zdánlivě by samotný MILP mohl být cenově dražší a v některých případech dokonce časově více náročný. Ale v porovnání MILP bez podmínek 4.37 a 4.38 a robustního řízení je viditelné, že callback je časově náročnější a cenově dražší než MILP.

V případě dvou turbín je robustní řízení dražší cca o 47 000 a čas je pak dvojnásobný. Na druhou stranu při šesti turbínách je cena dražší cca o 10 000, ale časová náročnost narostla pomalu 184,93 krát. Tam je pak viditelný velký rozdíl v běhu 26 sekund pro MILP a skoro 1 hodinu a 20 minut pro robustní řízení.

7.4.2 Různá iniciální energie v baterii

Výpočet pro tabulku 7.2 probíhal nad různými hodnotami E_{init} . Tento parametr byl v intervalu $\langle E_{min}, E_{max} \rangle$ a to postupným přičítáním hodnoty vypočtené ze vzorce:

$$\frac{E_{max} - E_{min}}{10}. \quad (7.2)$$

Z tohoto výpočtu pak vzniklo 11 hodnot v intervalu $\langle E_{min}, E_{max} \rangle$, nad kterými probíhal výpočet.

Nastavení zbývajících parametrů je následovné:

$$|B| = 3,$$

$$P_{max}^{BAT} = 6 [MW]$$

a P^{REQ} je dána průběhem modré čáry v grafu na obrázku 7.3.

Z tabulky 7.2 je viditelné, že při iniciální hodnotě energie v baterii rovné E_{min} , MILP ani robustní řízení nedokáže najít řešení. Ostatní případy ukazují již známou věc, že MILP s podmínkami 4.37 a 4.38 se zdá být dražší než robustní řízení. A při porovnání MILP bez podmínek 4.37 a 4.38 a robustního řízení, je robustní řízení cenově dražší a časově náročnější na výpočet. Jakmile ovšem měla baterie dostatek energie na počátku $E_{init} \geq 10\,800 [MW]$, se ceny MILP ani ceny robustního řízení už od sebe nelišily. Je to dáno tím, že P^{REQ} dokázal být pokryt baterií.

7.4.3 Různý výkon baterie

Pro vypočtení tabulky 7.3 byl měněn parametr P_{max}^{BAT} , který byl nastavován v intervalu $\langle 2 [MW], 20 [MW] \rangle$. Kde spodní hranice intervalu je cca polovina maximálního technického výkonu turbíny a ostatní hodnoty byly vytvořeny postupným zvyšováním výkonu P_{max}^{BAT} o 2 [MW].

Nastavení zbývajících parametrů:

$$|B| = 3,$$

$$E_{init} = 3 [MWh]$$

a P^{REQ} je též dána průběhem modré čáry v grafu na obrázku 7.3, podobně jako pro předešlou tabulku výsledků.

Ze vzniklé tabulky 7.3 je znovu viditelné, že MILP s podmínkami 4.37 a 4.38 je cenově dražší a časově náročnější než robustní řízení. Ovšem stejně jako v předešlých tabulkách je MILP bez podmínek 4.37 a 4.38 cenově levnější a časově méně náročný než robustní řízení. Také od hodnoty $P^{REQ} \geq 6 [MW]$ se ani pro MILP ani pro robustní řízení cena nemění.

7.4.4 Celkové zhodnocení

Za robustnost si tedy připlatíme cenou a časem výpočtu. Dále je viditelné, že hlavním důvodem časové náročnosti robustního řízení nemusí nutně být počet provolání funkce callback, ale spíše počet přidanych lazy constraints.

Dost zajímavé může být také, že časová náročnost robustního řízení je v některých případech větší pokud je lazy constraints vygenerováno méně. Je to dáno právě pak větším výběrem mezi optimálními řešeními, kdy samozřejmě hledáme nejnižší cenu.

Tabulka 7.1: Různý počet turbín MILLP a robustního řízení

$ B $	$Z_{ILP+E_{end}}$	P	$CPU.t [s]$	Z_{ILP}	P	$CPU.t [s]$	Z_{LC}	P	$CPU.t [s]$	$\#Callback$	$\#LazyConstr$
2	5057159,69	1	180,95	229457,11	1	4,27	691951,18	2	9,17	4	3
3	8201851,18	2	12,03	229479,57	1	5,96	925007,72	3	38,99	15	8
4	11377325,75	2	160,16	1375862,82	1	13,47	1854285,73	4	38,20	11	10
5	14571492,95	2	70,64	4540526,63	3	19,19	4562523,50	4	342,50	49	47
6	17762545,77	3	1410,17	7693500,38	2	25,65	7702315,83	5	4743,43	40	14

Tabulka 7.2: Různá energie na baterii MILP a robustního řízení

E_{init} [MWh]	$Z_{ILP+E_{end}}$	P	$CPU.t$ [s]	Z_{ILP}	P	$CPU.t$ [s]	Z_{LC}	P	$CPU.t$ [s]	$\#Callback$	$\#LazyConst$
1	infeasible			infeasible			infeasible				
1,5	7890210,38	1	19,13	6643562,76	1	220,81	6643647,18	1	593,26	5	3
2	7890210,38	1	30,74	3838374,31	1	613,78	3838786,91	1	436,25	14	1
2,5	7890210,38	1	25,12	1033176,24	1	367,97	1034112,78	1	125,76	10	8
3	7890210,38	1	83,66	229479,57	1	6,11	925007,72	3	38,42	15	8
3,5	7890210,38	1	22,64	229479,57	1	5,87	925007,72	3	23,66	13	12
4	7890210,38	1	21,72	229479,57	1	5,81	925007,72	3	35,65	15	14
4,5	7890210,38	1	51,09	229479,57	1	5,74	925007,72	3	41,19	15	8
5	7890210,38	1	15,31	229479,57	1	5,92	925007,72	3	49,49	25	24
5,5	7890210,38	1	42,26	229479,57	1	5,88	925007,72	3	133,15	17	5
6	7890210,38	1	40,42	229479,57	1	5,78	925007,72	3	19,81	9	8

Tabulka 7.3: Různý výkon baterie MILP a robustního řízení

P_{BAT}^{max} [MW]	$Z_{ILP+End}$	P	$CPU.t$ [s]	Z_{ILP}	P	$CPU.t$ [s]	Z_{LIC}	P	$CPU.t$ [s]	#Callback	#LazyConstr
2	7890210,38	1	13,46	1605977,65	1	11,49	5463486,22	3	79,57	21	14
4	7890210,38	1	12,49	229479,57	1	9,77	infeasible				
6	7890210,38	1	50,04	229479,57	1	6,08	925007,72	3	40,15	15	8
8	7890210,38	1	47,52	229479,57	1	6,15	925007,72	3	32,20	9	3
10	7890210,38	1	54,22	229479,57	1	5,96	925007,72	3	21,59	10	9
12	7890210,38	1	24,24	229479,57	1	6,06	925007,72	3	64,732	25	14
14	7890210,38	1	54,56	229479,57	1	6,29	925007,72	3	47,42	27	26
16	7890210,38	1	23,80	229479,57	1	6,13	925007,72	3	11,69	5	4
18	7890210,38	1	25,01	229479,57	1	6,27	925007,72	3	19,65	9	8
20	7890210,38	1	44,81	229479,57	1	5,99	925007,72	3	21,53	10	9

Kapitola 8

Závěr

Cílem této práce bylo najít řešení pro problém řízení hybridních zdrojů elektrické energie. Námi studovaný konkrétní typ zdroje byl složen z identických plynových turbín a bateriového úložiště. Výzvou pro řízení byl neznámý budoucí průběh žádaného výkonu plynoucí z požadavků na aktivaci podpůrných služeb.

V první části jsme se zabývali úlohou hledání optimálního řešení z hlediska ceny za provoz turbín při známém budoucím průběhu požadavků. Řešení jsme provedli sestavením modelu MILP s použitím knihovny gurobi. Výsledek poskytoval informace k řízení jednotlivých turbín a to kdy provést jejich přifázování, odfázování a jaký výkon turbínami poskytovat. Popis přístupu řízení MILP je k nalezení v kapitolách 3 a 4. Toto řešení nám poskytlo úvodní vhled do problematiky a dílčí přípravu na následující řešení.

V druhé části jsme se začali zabývat již přímo neurčitým požadavkem v rámci analýzy robustnosti řízení popsané v kapitole 5. Analýzu jsme provedli nad vygenerovanými požadavky na aktivaci aFRR, při které nebylo možné plnit. Pro generování takových požadavků byl vytvořen algoritmus prohledávající stavový prostor kombinací požadavků. Průběh požadavků, které hybridní zdroj nedokázal plnit, vykreslil algoritmus do grafu. Z grafů jsme zjistili, že příčinou je nedostatek přifázovaných turbín. Tyto turbíny, kvůli časové náročnosti procesu odfázování a přifázování turbíny, nebyly v potřebný čas k dispozici. Následkem toho nastalo vybití baterie na její technické minimum uložené energie, nebo přesah technického výkonu při vybíjení baterie.

Díky poznatkům z analýzy robustnosti jsme ve třetí části práce, v kapitole 6, vytvořili robustní řízení. Spočívá ve využití definovaného modelu MILP s použitím funkce callback, která zamezuje výskytu nemožnosti plnit požadavek. A to způsobem, kdy pomocí přidání lazy constraint zamezí vypnutí turbíny v případě, že by následně nebylo možné plnit požadavek na aktivaci aFRR na maximální výkon.

Na závěr v kapitole 7 nad MILP a robustním řízením byly provedeny experimenty s jednoduchými daty a daty připodobněnými k reálnému průběhu požadavků na aFRR. Tím bylo zajištěno otestování funkčnosti obou přístupů řízení a jejich srovnání z hlediska ceny a časové náročnosti výpočtu.

Z experimentů vyplynulo optimální chování turbín při cíli minimalizace jejich nákladů. Tím jsme získali i přehled o finanční stránce nákladů za provoz

turbín a vysokokapacitní baterie na vyrovnávání energie v síti. Optimalizace pomocí MILP je bohužel časově náročná a neběží v reálném čase. Řešení této práce nelze uvést do provozu, kde je zapotřebí daleko rychlejší odezvy algoritmu.

Proto tato práce slouží jako analýza a výzkum optimálního chování turbín a baterie. Poznatky z této práce dále poslouží k vývoji heuristického řízení s odezvou v reálném čase.



Literatura

- [1] Navratil, P. & Pekař, L. (2012). *Possible approach to creation and utilization of linear mathematical model of heat source for optimization of combined production of heat and electric energy*. In International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences. (Vol. 6, pp. 943-954). ©2008-2023 ResearchGate GmbH. [cit. 25.01.2023]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/297298492_Possible_approach_to_creation_and_utilization_of_linear_mathematical_model_of_heat_source_for_optimization_of_combined_production_of_heat_and_electric_energy
- [2] Gutiérrez-Arriaga, C. G., Serna-González, M., Ponce-Ortega, J. M., & El-Halwagi, M. M. (2012). *Multi-objective optimization of steam power plants for sustainable generation of electricity*. In Clean Technologies and Environmental Policy (Vol. 15, Issue 4, pp. 551–566). ©2023 Springer Science and Business Media LLC. [cit. 25.01.2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10098-012-0556-4>
- [3] Fazlollahi, S., & Maréchal, F. (2013). *Multi-objective, multi-period optimization of biomass conversion technologies using evolutionary algorithms and mixed integer linear programming (MILP)*. In Applied Thermal Engineering (Vol. 50, Issue 2, pp. 1504–1513). ©2023 Elsevier BV. [cit. 26.01.2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.035>
- [4] Maroufmashat, A., Elkamel, A., Fowler, M., Sattari, S., Roshandel, R., Hajimiragha, A., Walker, S., & Entchev, E. (2015). *Modeling and optimization of a network of energy hubs to improve economic and emission considerations*. In Energy (Vol. 93, pp. 2546–2558). ©2023 Elsevier BV. [cit. 28.01.2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.079>
- [5] Helms, T., Loock, M., & Bohnsack, R. (2016). *Timing-based business models for flexibility creation in the electric power sector*. In Energy Policy (Vol. 92, pp. 348–358). ©2023 Elsevier BV. [cit. 31.01.2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.02.036>

- [6] Zameer, H., & Wang, Y. (2018). *Energy production system optimization: Evidence from Pakistan*. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 82, pp. 886–893). ©2023 Elsevier BV. [cit. 1.02.2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.089>
- [7] Zdrilic, M., Pandzic, H., & Kuzle, I. (2011) *The mixed-integer linear optimization model of virtual power plant operation*. In 2011 8th International Conference on the European Energy Market (EEM). 2011 European Energy Market (EEM). ©2023 IEEE [cit. 1.02.2023] Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/eem.2011.5953056>
- [8] Kuzle, I., Zdrilic, M., & Pandzic, H. (2011). *Virtual power plant dispatch optimization using linear programming*. In 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering. 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). ©2023 IEEE [cit. 1.02.2023] Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/eeeic.2011.5874659>
- [9] Nottrott, A., Kleissl, J., & Washom, B. (2013). *Energy dispatch schedule optimization and cost benefit analysis for grid-connected, photovoltaic-battery storage systems*. In *Renewable Energy* (Vol. 55, pp. 230–240). ©2023 Elsevier BV. [cit. 3.02.2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.036>
- [10] Nemati, M., Braun, M., & Tenbohlen, S. (2018). *Optimization of unit commitment and economic dispatch in microgrids based on genetic algorithm and mixed integer linear programming*. In *Applied Energy* (Vol. 210, pp. 944–963). ©2023 Elsevier BV. [cit. 3.02.2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.007>
- [11] Javidsharifi, M., Niknam, T., Aghaei, J., & Mokryani, G. (2018). *Multi-objective short-term scheduling of a renewable-based microgrid in the presence of tidal resources and storage devices*. In *Applied Energy* (Vol. 216, pp. 367–381). ©2023 Elsevier BV. [cit. 3.02.2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.119>
- [12] Hossain, M. A., Pota, H. R., Squartini, S., Zaman, F., & Muttaqi, K. M. (2019). *Energy management of community microgrids considering degradation cost of battery*. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 22, pp. 257–269). ©2023 Elsevier BV. [cit. 3.02.2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.12.021>
- [13] Faia, R., Soares, J., Pinto, T., Lezama, F., Vale, Z., & Corchado, J. M. (2021). *Optimal Model for Local Energy Community Scheduling Considering Peer to Peer Electricity Transactions*. In *IEEE Access* (Vol. 9, pp. 12420–12430). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). ©2023 IEEE. [cit. 3.02.2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3051004>

- [14] Zhu, J. *Optimization of Power System Operation*. Wiley-IEEE Press (2015). ©2023 IEEE [cit. 1.02.2023] Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9781118887004.fmatter>
- [15] Cirre, C. M., Berenguel, M., Valenzuela, L., & Klempous, R. (2009). *Reference governor optimization and control of a distributed solar collector field*. In *European Journal of Operational Research* (Vol. 193, Issue 3, pp. 709–717). ©2023 Elsevier BV. [cit. 26.02.2023]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.056>
- [16] Yuan, Y., Wei, Z., Sun, G., Sun, Y., & Wang, D. (2014). *A real-time optimal generation cost control method for virtual power plant*. In *Neurocomputing* (Vol. 143, pp. 322–330). ©2023 Elsevier BV. [cit. 26.02.2023] Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.05.060>
- [17] Bulatov, N. Yu., & Kryukov, A. V. (2016). *Optimization of automatic regulator settings of the distributed generation plants on the basis of genetic algorithm*. In *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). ©2023 IEEE [cit. 1.02.2023] Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/icieam.2016.7911456>
- [18] Abass, Y. A., Al-Awami, A. T., & Jamal, T. (2016). *Integrating automatic generation control and economic dispatch for microgrid real-time optimization*. In *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*. ©2023 IEEE [cit. 26.02.2023] Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/pesgm.2016.7741833>
- [19] Haberg, M., & Doorman, G. (2017). *A stochastic mixed integer linear programming formulation for the balancing energy activation problem under uncertainty*. In *2017 IEEE Manchester PowerTech*. 2017 IEEE Manchester PowerTech. ©2023 IEEE [cit. 1.02.2023] Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ptc.2017.7980980>
- [20] *Kodex PS Část II*. (2022). ČEPS, a.s. [cit. 18.02.2023] Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>
- [21] Henych, M. (2022). *Návrh řízení zdrojů elektrické energie zohledňující nová pravidla na trhu s energiemi*. ©2016 České vysoké učení technické v Praze [cit. 3.03.2023] Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/100970/F3-DP-2022-Henych-Martin-Henych_Diplomova_Prace_2022_v_0_2.pdf
- [22] Mamula, O., & Hrycej, D. (2022). *Náhrada zdrojů pomocných služeb ztracených během dekarbonizace*. In *2022 14th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*. ©2023 IEEE [cit. 6.03.2023] Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/icumt57764.2022.9943491>

- [23] Stejskal, P. (2023). *Simulátor hybridního zdroje elektrické energie* ©2016 České vysoké učení technické v Praze [cit. 21.03.2023] Bude dostupné z: <https://dspace.cvut.cz>



Příloha A

Seznam použitých zkratk

- ILP - celočíselné lineární programování
- MILP - kombinované celočíselné lineární programování
- aFRR - automaticky aktivované zálohy s regulací výkonové rovnováhy
- FCR - zálohy s automatickou regulací frekvence
- mFRR - manuálně aktivované zálohy s regulací výkonové rovnováhy
- ENEST - Energy nest



Příloha B

Elektronické přílohy

F3_DP_Stoklasova_Jitka-priloha-milp_solver.py – soubor s algoritmem MILP

F3_DP_Stoklasova_Jitka-priloha-analysis_of_robustness.py – soubor s algoritmem pro analýzu robustnosti

F3_DP_Stoklasova_Jitka-priloha-robust_control.py – soubor s algoritmem robustního řízení