



KATEDRA APLIKOVANEJ INFORMATIKY
FACULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY
UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE

VÝVOJ CENTRALIZOVANÉHO SYSTÉMU NA OPTIMALIZÁCIU VYUŽITIA PREBYTOČNEJ SOLÁRNEJ ENERGIE V INTELIGENTNÝCH DOMÁCNOSTIACH

(Diplomová práca)

BC. TOMÁŠ HRUŠKOVIC

Študijný program: Aplikovaná informatika
Študijný odbor: 9.2.1 Aplikovaná informatika
Školiace pracovisko: Katedra aplikovanej informatiky
Školiteľ: prof. RNDr. Roman Ďurikovič, PhD.

Bratislava, 2026



ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

- Meno a priezvisko študenta:** Bc. Tomáš Hruškovíc
Študijný program: aplikovaná informatika (Jednoodborové štúdium, magisterský II. st., denná forma)
Študijný odbor: informatika
Typ záverečnej práce: diplomová
Jazyk záverečnej práce: slovenský
Sekundárny jazyk: anglický
- Názov:** Vývoj centralizovaného systému na optimalizáciu využitia prebytočnej solárnej energie v inteligentných domácnostiach
Development of a Centralized System for Optimizing Surplus Solar Energy Utilization in Smart Homes
- Anotácia:** Práca sa zaoberá vývojom centralizovaného systému na optimalizáciu využitia prebytočnej energie zo solárnych panelov v domácnosti. Systém monitoruje výrobu a spotrebu elektrickej energie, vypočítava prebytok a na základe stanovených priorít ho distribuuje do rôznych zariadení, ako sú batérie, boiler alebo nabíjačka na elektromobil.
- Cieľ:**
1. ****Vývoj centralizovaného systému**:** Navrhnuť a implementovať systém, ktorý dokáže monitorovať výrobu a spotrebu elektrickej energie v domácnosti, vypočítať prebytočnú energiu zo solárneho invertora a efektívne ju distribuovať na základe stanovených priorít.
 2. ****Optimalizácia distribúcie energie**:** Maximalizovať využitie prebytočnej energie prostredníctvom algoritmov zohľadňujúcich spotovú cenu elektriny a predikciu počasia.
 3. ****Integrácia používateľských preferencií**:** Umožniť dynamické riadenie nabíjania zariadení, ako sú batérie, elektromobily a ďalšie spotrebiče, s dôrazom na individuálne potreby používateľov.
 4. ****Plánovanie nabíjania**:** Vytvoriť systém plánovania nabíjania založený na dostupnosti lacnej energie a minimalizácii opotrebovania batérií, čím sa zvýši ich životnosť a znížia náklady na prevádzku.
- Literatúra:** Ikram, A., et al. (2021). "Optimizing Energy Consumption in Smart Homes: Load Scheduling Approaches." Published in IET Power Electronics.
Fiorini, F., & Aiello, M. (2020). "Automatic Optimal Multi-Energy Management of Smart Homes." Published in Energy Informatics,
Vera, Y. E. G., et al. (2019). "Energy Management in Microgrids with Renewable Energy Sources: A Literature Review." Published in Applied Sciences,
Alnaser, S. W., et al. (2023). "Residential Prosumer Energy Management System with Renewable Integration Considering Multi-Energy Storage." Published in Energies,
- Kľúčové slová:** Centralizovaný systém, Optimalizácia solárnej energie



Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

Vedúci: prof. RNDr. Roman Ďurikovič, PhD.
Konzultant: Ing. Peter Zverbík
Katedra: FMFI.KAI - Katedra aplikovanej informatiky
Vedúci katedry: doc. RNDr. Tatiana Jajcayová, PhD.

Spôsob sprístupnenia elektronickej verzie práce:
bez obmedzenia

Dátum zadania: 28.11.2024

Dátum schválenia: 28.11.2024

prof. RNDr. Roman Ďurikovič, PhD.
garant študijného programu

.....
študent

.....
vedúci práce

Čestne prehlasujem, že som túto prácu vypracoval samostatne s použitím citovaných zdrojov.

.....

Pod'akovanie

Chcel by som pod'akovať školiteľovi ...

Abstrakt

Zhrnutie práce v slovenskom jazyku.

Kľúčové slová:

Abstract

Summary of the thesis in English.

Keywords:

Obsah

1	Úvod do problematiky	3
1.1	Spotové ceny	4
1.2	Prebytky energie a ich využitie	5
1.3	Riadiace algoritmy	6
1.3.1	Pravidlové systémy	7
1.3.2	Optimalizačné systémy	7
1.4	Hlavný cieľ práce	10
2	Analýza súčasného stavu	11
3	Výskum	12
4	Návrh riešenia	13
5	Záver	16

Zoznam obrázkov

- 1.1 Príklad vývoja spotovej ceny elektriny na dennom trhu dňa 4.8. 2025.
Graf ilustruje typické nižšie nočné ceny, mierne vyššie ráno, minimum okolo obeda (vysoký podiel FV v sieti) a výraznú špičku vo večerných hodinách, keď je spotreba vysoká a výroba FV klesá. S cenami: Min: 0.66€/MWh o 14:00, Max: 175.34€/MWh o 20:00 a priemernou cenou 78.25€/MWh

4

Zoznam tabuliek

Úvod

Obnoviteľné zdroje energie, najmä solárne fotovoltické systémy, zaznamenali v posledných rokoch masívny nárast inštalovaného výkonu. Tento trend však so sebou prináša nové výzvy v riadení elektrických sietí aj lokálnych energetických systémov. Nadbytočná energia z fotovoltických zdrojov počas slnečných dní často prevyšuje aktuálnu spotrebu, čo môže viesť k plytvaniu nevyužitou energiou alebo dokonca spôsobovať negatívne ceny elektriny na spotovom trhu[1]. Klesajúce alebo dokonca záporné ceny elektriny ukazujú, že energetický trh potrebuje viac flexibility na strane odberateľov, napríklad vo forme akumulátorových úložísk, alebo posunu spotreby do časov prebytku výroby. Z pohľadu prevádzkovateľov fotovoltických elektrární a inteligentných budov je preto kľúčové maximalizovať využitie vyrobenej solárnej energie a minimalizovať náklady na nákup elektriny zo siete.

V tradičných inštaláciách sa prebytočná solárna energia často buď dodáva do distribučnej siete za minimálnu výkupnú cenu, alebo sa nevyužije vôbec ak odberné miesto má zakazaný export do siete. Riešením je lokálna akumulácia typicky batériové úložisko, ktoré umožňuje prebytočnú elektrinu uskladniť a neskôr využiť počas nedostatku slnečného svitu či v čase vysokých cien elektriny. Samotná prítomnosť batérie však nezaručuje optimálne hospodárenie s energiou. Mnohé systémy využívajú len jednoduché pravidlá. Napríklad okamžité vybíjanie na spotreby z batérie pri jej dostatočnom nabití a zároveň okamžité nabíjanie pri akejkoľvek prebytku z fotovoltiky. Takéto decentralizované, reaktívne riadenie však nemusí zohľadňovať budúci vývoj spotreby a cien. Pokročilejšie systémy preto využívajú napríklad časové rozvrhovanie spotrebičov podľa predikcií a cien [5] alebo centrálnu optimalizáciu celého energetického hospodárstva domácnosti či prevádzky [2].

Táto diplomová práca sa zaoberá návrhom a implementáciou centralizovaného riadiaceho systému pre inteligentné energetické hospodárstvo v reálnej prevádzke s fotovoltickou elektrárnou, batériovým úložiskom a časovo premenlivými spotovými cenami elektriny. Cieľom je vyvinúť systém, ktorý dokáže monitorovať výrobu a spotrebu, predvídať energetické prebytky či nedostatky a optimálne riadiť tok energie: rozhodovať, kedy ukladať prebytky do batérie, kedy z nej čerpať pre pokrytie spotreby a kedy (ak vôbec) importovať elektrinu zo siete či dodávať do siete. Riadenie zohľadňuje spotové ceny na trhu s elektrinou, čím sa systém snaží minimalizovať náklady. Napríklad lacno nakupovať elektrinu v čase nízkych cien a naopak zabrániť nákupom v časoch vysokých cien tým, že využije energiu z batérie. Novonavrhnutý systém nahrádza pôvodný jednoduchý pravidlový algoritmus typu IF-THEN, ktorý v riadenej prevádzke dočasne fungoval. Pôvodný algoritmus vyhodnocoval spotové ceny len veľmi zjednodušene, na-

príklad na základe priemeru niekoľkých najnižších denných cien a podľa toho ručne nastavoval intervaly nabíjania a vybíjania batérie. Takýto prístup síce do istej miery využil cenové výkyvy, avšak nebol schopný globálne optimálnosť ani efektívne zohľadniť obmedzenia systému (výkonové limity batérie, úplné využitie prebytočnej solárnej energie atď.). Preto vznikla potreba komplexnejšieho centralizovaného riešenia.

Kapitola 1

Úvod do problematiky

Inteligentné energetické systémy v budovách a priemyselných prevádzkach naberajú na význame v súvislosti s rozvojom decentralizovaných obnoviteľných zdrojov a so zavádzaním konceptu aktívneho odberateľa, ktorý inportuje ale aj exportuje.

Prosumer je subjekt, ktorý nielen energiu odoberá, ale ju aj vyrába a môže prebytky dodávať do siete. Efektívne hospodárenie s energiou na úrovni prosumera vyžaduje pokročilé riadiace stratégie energetický manažment, ktoré dokážu koordinovať výrobu, spotrebu, akumuláciu a prípadnú výmenu energie so sieťou. Cieľom je typicky minimalizovať ekonomické náklady (alebo maximalizovať zisky) pri súčasnom zabezpečení pokrytia energetických potrieb užívateľov a zohľadnení technických obmedzení.

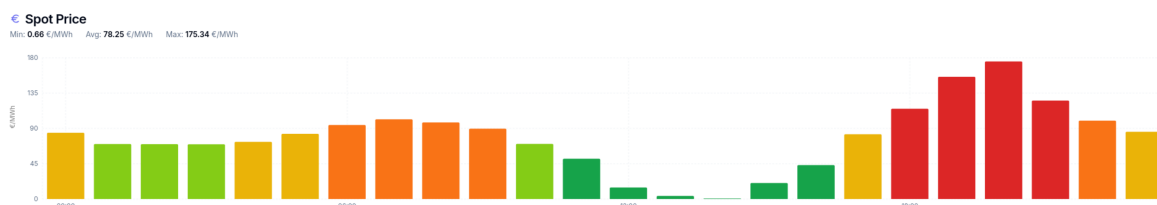
Spotové ceny elektriny zavádzajú do tejto úlohy dynamický prvok. Na rozdiel od fixných taríf alebo jednoduchých časovo diferencovaných taríf (denný/nočný prúd) predstavujú spotové ceny časovo premenlivú veľkoobchodnú cenu elektriny na krátkodobom trhu, ktorá sa mení každú hodinu (príp. 15 minút) na základe ponuky a dopytu. Pre koncového prosumera, ktorý má prístup na tento trh (napr. cez agregátora alebo v rámci tarify naviazanej na spot), to znamená, že cena odoberanej aj dodávanej elektriny sa neustále mení. V čase nadbytku výroby v sieti (napr. veterné a slnečné špičky) cena klesá, v extrémoch až do záporných hodnôt; naopak, v čase špičkovej spotreby a nedostatku výroby cena rastie vysoko. Tento cenový signál vytvára incentívy pre flexibilných odberateľov, aby posúvali svoju spotrebu do lacnejších období a naopak v drahých špičkách odľahčili sieť (či už útlmom spotreby alebo dodávkou z vlastných zdrojov). Negatívne ceny dávajú jasný signál na využitie prebytkovej energie, ak je odberateľ schopný energiu odoberať alebo akumulovať v čase záporných cien, fakticky je mu platené

1.1 Spotové ceny

Spotové ceny elektriny zavádzajú do tejto úlohy dynamický prvok. Môže ísť o ceny na dennom pred trhu (day-ahead market), kde sa obchoduje na nasledujúci deň s rozlíšením po hodinách alebo minútach, prípadne na vnútrodennej burze (intra-day), kde sa obchoduje v ešte kratšom predstihu. Od roku 2023–2025 došlo v Európe k významnej zmene, pre zvýšenie presnosti cenových signálov a integrácie obnoviteľných zdrojov. Preto sa prechádza z hodinového obchodného intervalu na štvrťhodinový interval. Na Slovensku bol prechod na 15 minútové ceny na dennom trhu uskutočnený 1. Októbra 2025 [8]. V praxi to znamená, že sú ceny na deň dopredu stanovené pre každú 15-minútovú periódu zvlášť. 96 rôznych cien za deň namiesto pôvodných 24 hodnôt pre každú hodinu. Toto zvýšenie časového rozlíšenia umožňuje jemnejšie reagovať na zmeny ponuky a dopytu, no zároveň kladie vyššie nároky na riadiace systémy, ktoré musia spracovať 4-násobné množstvo dát a flexibilne prispôbovať plány.

Spotová cena elektriny je výsledkom stretu ponuky a dopytu na daný interval. V časoch vysokej výroby, môžu ceny energie klesať k nule alebo až k záporu. Tento stav môže nastať, v prípade prebytku energie na sieti z fotovoltických panelov, alebo počas víkendov, kedy je nízky odber zo siete. Producenti sú ochotní zaplatiť za to, že môžu dodať elektrinu, ak majú dotácie alebo ak je pre nich odstavenie zdroja nákladné. Naopak, počas špičkových odberov v pracovných dňoch a večer, môžu ceny prudko stúpať desiatky centov za kWh, resp. stovky eur za MWh.

Obrázok 1.1 znázorňuje príklad vývoja 60-minútových spotových cien počas jedného dňa ide o reálne dáta z OKTE, slovenskej dennej burzy. Vidíme výrazný rozdiel nočného a obedňajšieho minimá vs. večerný vrchol.



Obr. 1.1: Príklad vývoja spotovej ceny elektriny na dennom trhu dňa 4.8. 2025. Graf ilustruje typické nižšie nočné ceny, mierne vyššie ráno, minimum okolo obeda (vysoký podiel FV v sieti) a výraznú špičku vo večerných hodinách, keď je spotreba vysoká a výroba FV klesá. S cenami: Min: 0.66€/MWh o 14:00, Max: 175.34€/MWh o 20:00 a priemernou cenou 78.25€/MWh

Pre odberateľov elektriny, ktorí nakupujú za spotové ceny, či už priamo na burze alebo prostredníctvom dodávateľa, toto prináša možnosť demand response správania

teda prispôbiť svoju spotrebu cenám. Aktuálne v domácnostiach sú takéto tarify zatiaľ raritné, ale pre podniky sú dostupné a rastie o ne záujem, pretože môžu priniesť úspory, ak dokážu odber prispôbiť. Jedným z nástrojov je práve batériové úložisko: umožňuje časový posun odberu po anglicky "peak shifting" alebo "load shifting". Batéria môže byť nabíjaná počas lacných intervalov a dodávať energiu v čase vysokej ceny, čím znižuje nákup v drahých hodinách. Toto správanie je v podstate arbitráž kde sa zisk generuje na základe cenových rozdielov.

S dynamickými cenami je však spojené aj riziko. Vysoká volatilita trhu znamená, že nesprávne rozhodnutie môže viesť k vyšším nákladom. Naše riešenie pracuje práve s 15-minútovými cenami a predpokladá, že denný profil cien na nasledujúci deň je známy po uzavretí denného trhu. Obvykle v popoludňajších hodinách o 14:00 predchádzajúceho dňa. Tento cenový profil je jeden z kľúčových vstupov do optimalizátora. Okrem denného trhu existuje aj vnútrodenný trh, kde ceny môžu byť ešte bližšie k reálnemu času, avšak v tejto práci sa zameriavame na plánovanie deň vopred. Krátkodobé odchýlky by sa riešili operatívne napr. pravidelnou aktualizáciou plánu. Riešenie tohto problému bude nadväzovať na túto prácu, avšak aktuálne presahuje rámec našej témy.

1.2 Prebytky energie a ich využitie

Pojmom prebytok energie sa označuje situácia, keď výroba elektriny prevyšuje momentálnu spotrebu objektu. V takom prípade je prebytočná energia k dispozícii a musí sa zužitkovaná.

- Okamžitá samospotreba je ideálny prípad. Ak existuje nejaká flexibilná záťaž, ktorú možno zapnúť a využiť prebytočnú energiu priamo. V domácnostiach to môže byť napríklad ohrev teplej vody, v podnikoch napr. spustenie výrobného procesu, nabíjanie vysokozdvížných vozíkov a pod. Takéto riešenie vyžaduje manažment dopytu *demand-side management*, ten aktívne presúvanie spotrebu do momentu prebytku. Praktická realizácia môže byť obmedzená, pretože nie vždy máme vhodnú záťaž, ktorú možno ľubovoľne zapínať.
- Akumulácia do batérie, za predpokladu že je k dispozícii batéria a má voľnú kapacitu, prebytok je možné akumulovať.
- Export do distribučnej siete. Prebytočný výkon môže prejsť cez elektromer do vonkajšej siete. Toto je v podstate dodávka elektriny obchodovateľná na trhu. Pokiaľ má prevádzka zmluvné podmienky na predaj, môže za túto energiu dostať zaplatené, podľa trhovej ceny mínus poplatky. V niektorých prípadoch však malí

výrobcovia nemajú možnosť flexibilného predaja a sú odkázaní na fixné výkupné ceny alebo vôbec nemajú právo dodávať.

- Obmedzenie výroby. V krajnom prípade, ak ani jedna z vyššie uvedených možností nie je dostupná alebo ekonomicky zmysluplná, prebytok sa zahodí spôsobom kedy sa odstaví časť FV generácie. Moderné meniče to umožňujú znížením výstupného výkonu panelov. Je to však nežiaduce, lebo prichádzame o energiu zadarmo. Napriek tomu existujú scenáre, kde je to nutné.

Prebytky energie sú úzko späté s pojmom samospotreba (*self-consumption*) TODO. Miera samospotreby sa definuje ako podiel vyrobenej energie, ktorý bol spotrebovaný lokálne. Pre prevádzku s FV a batériou je cieľom maximalizovať samospotrebu, pretože za vlastnú energiu sa neplatia distribučné a iné poplatky. V literatúre sa uvádzajú rôzne spôsoby zvýšenia samospotreby, okrem batérie aj spomínané riadenie záťaže [7]. Z pohľadu ekonomiky prebytky predstavujú stratu. Každá nevyužitá kWh z FV znamená, že sa musí nakúpiť zo siete za trhovú cenu a distribučné poplatky. Preto nevyužitú energiu možno vnímať ako náklad.

1.3 Riadiace algoritmy

Riadiace algoritmy v takomto prostredí nadobúdajú značnú komplexitu. Jednoduché pravidlá, ktoré majú implementované bežné inventory, vždy ako prvé využijú akumulator a až potom sieť, alebo vždy nabíjať batériu pri prebytku. Takéto riadenie nemusí viesť k optimálnemu výsledku z hľadiska nákladov, pretože nezohľadňujú budúci vývoj cien ani obmedzenú kapacitu batérie. Napríklad, ak je v noci relatívne lacná elektrina a očakáva sa drahá špička nasledujúce ráno, môže byť výhodné batériu v noci naplniť a nabiť zo siete a ušetriť drahú energiu počas špičky. Naopak, ak cez deň očakávame veľký prebytok z fotovoltiky a záporné ceny, možno sa oplatí batériu predpoludním trochu vybiť, aby mala kapacitu prijať lacnú solárnu energiu napoludnie. Takéto úvahy naznačujú potrebu prediktívneho, optimalizačného riadenia, ktoré rozhoduje aj s budúciimi cenami a počasím. Prístup ku riešeniu takéhoto problému vieme rozdeliť na dve kategórie:

- Pravidlové systémy
- Optimalizačné systémy

1.3.1 Pravidlové systémy

Pravidlové systémy pracujú na základe vopred definovaných logických pravidiel, ktoré reagujú na okamžité stavy systému. Ide o explicitne špecifikované podmienky typu: „Ak je cena elektriny nižšia než X a batéria nie je plná, nabíjaj batériu zo siete. Ak je cena vyššia než Y a batéria nie je prázdna, vybíjaj batériu.“ Podobne možno implementovať aj logiku súvisiacu s fotovoltikou: „Ak výroba z PV preyšuje spotrebu o Z kW, spusti nabíjanie batérie.“

Tieto pravidlá môžu byť rozšírené o hysteréziu a kombinované pomocou logických operátorov AND/OR do zložitejších rozhodovacích schém. Napriek tomu však vždy ide o explicitne formulované pokyny, ktoré systém vykonáva bez širšieho zohľadnenia budúceho vývoja.

Výhodou pravidlových systémov je ich jednoduchosť, transparentnosť a nízke nároky na výpočtový výkon. Sú dobre implementovateľné priamo na úrovni PLC, pričom ich robustnosť voči drobným odchýlkam v meraniach alebo predikciách z nich robí stabilné riešenie pre základné aplikácie. Nevýhodou je, že takéto riadenie spravidla nevedie k globálne optimálnemu výsledku, keďže ignoruje budúce ceny elektriny, očakávanú výrobu a kapacitné obmedzenia akumulácie.

Ako ukazuje literatúra, pravidlové HEMS (TODO SKRATKA) systémy môžu dosahovať uspokojivé výsledky v jednoduchších scenároch, avšak z ekonomického hľadiska spravidla zaostávajú za pokročilejšími optimalizačnými metódami. Napríklad Samarakoon (2019) porovnával optimalizačný a pravidlový EMS pre domácnosť s batériovým úložiskom a preukázal, že dobre navrhnutý rule-based systém siete môže fungovať efektívne v menej náročných podmienkach, no optimalizačný prístup má potenciál dosiahnuť nižšie prevádzkové náklady, za cenu vyšších výpočtových nárokov [4].

1.3.2 Optimalizačné systémy

Optimalizačné systémy predstavujú prístup založený na matematickej optimalizácii, ktorá na základe definovaného cieľa (typicky minimalizácia nákladov alebo maximalizácia vlastnej spotreby) a zadaných obmedzení vypočítava optimálny plán riadenia. Na rozdiel od pravidlových systémov nepracujú s explicitne určenými reakciami, ale hľadajú riešenie, ktoré je vzhľadom na dostupné dáta a predikcie globálne najvýhodnejšie.

Najčastejšie sa v literatúre využívajú nasledujúce typy optimalizačných formulácií:

- **Lineárne programovanie (LP)** a **zmiešané celočíselné lineárne programovanie (MILP)** – vhodné v prípadoch, keď možno systém modelovať lineárnymi vzťahmi. MILP umožňuje zahrnúť binárne rozhodovacie premenné (napr.

zapnutie/vypnutie zariadenia, výber režimu) [9]. Mnohé štúdie používajú MILP na plánovanie využitia batériových systémov a obnoviteľných zdrojov v domácnostiach aj v priemysle, často s cieľom minimalizovať prevádzkové náklady, emisie alebo ich kombináciu [10][11]. Výhodou MILP je schopnosť nájsť globálne optimálne riešenie, avšak pri rozsiahlejších úlohách (napríklad pri jemnej časovej diskretizácii alebo pri veľkom počte premenných) môže byť výpočtovo náročné.

- **Dynamické programovanie, aproximované DP a heuristické metódy** – využívané v prípadoch, kde je množstvo stavov veľké alebo kde je nutné zohľadniť neistotu. Optimalizácia batérie pri účasti na energetickom trhu môže byť napríklad formulovaná ako stochastické dynamické programovanie, prípadne môže byť riešená metódami posilneného učenia (reinforcement learning), ktoré dokážu priamo pracovať s neistými a meniacimi sa podmienkami.
- **Model Predictive Control (MPC)** jeden z najrozšírenejších prístupov v akademickej literatúre pre riadenie energetických systémov [3]. MPC opakovane rieši optimalizačný problém na posuvnom časovom horizonte (napr. 24 hodín), pričom využíva aktuálne dostupné predikcie. V každom kroku sa aplikuje len prvá časť optimalizovaného plánu napríklad akcie na najbližší časový interval a následne sa horizont posúva a optimalizácia sa vykoná nanovo. Tento postup umožňuje pružne reagovať na odchýlky v predikciách aj na nové informácie. Saleem et al. (2022) napríklad navrhli stochastický MPC pre rezidenčný komplex s PV, batériami a nabíjačkami pre elektromobily, pričom v každom kroku zohľadňovali prognózu aj neistotu [9]. MPC však v jadre vyžaduje riešenie optimalizačnej úlohy (často založenej na MILP) a kladie nároky na presnosť predikcií a dostupný výpočtový výkon v reálnom čase.

Medzi uvedenými prístupmi sa nachádzajú aj hybridné riešenia. Typickým príkladom sú optimalizované pravidlá, známe aj ako optimized rule-based control, pri ktorých sa optimalizácia vykonáva offline a výsledkom sú nastavené optimálne prahové hodnoty pre pravidlový systém. Takýto prístup predstavuje kompromis v situácii, keď nasadenie plnohodnotnej optimalizácie v reálnom čase nie je možné z dôvodu obmedzení použitej hardvérovej alebo softvérovej platformy. V literatúre sa objavujú práce, ktoré využívajú evolučné algoritmy a metódy strojového učenia na doladenie pravidiel energetického manažérskeho systému.

Ďalšou skupinou riešení sú špecializované systémy pre **peak shaving**, teda znižovanie špičiek odberu. V priemyselnom prostredí je bežné, že významnú časť faktúry za elektrinu tvorí poplatok za rezervovanú kapacitu, ktorý závisí od najvyššieho dosiahnutého odoberaného výkonu v danom mesiaci. Batériové úložisko možno využiť na

orezanie týchto výkonových špičiek. Batéria sa v takom prípade vybíja práve v momentoch, keď by inak odber prekročil stanovený limit, čím sa špička zníži. Oudalov et al. už v roku 2007 predstavili metodiku dimenzovania batérie a stratégie jej riadenia s cieľom znížiť maximálne zaťaženie priemyselného odberateľa. Neskoršie štúdie, napríklad Tiemann et al. z roku 2020, analyzovali tisíce odberových profilov a ukázali, že peak shaving patrí k ekonomicky najatraktívnejším spôsobom využitia batérií v priemysle a často dosahuje krátke doby návratnosti investície [16]. Limitačným faktorom je, že pri odberových profiloch bez výrazných a pravidelných špičiek môže byť ekonomický prínos batérie nedostatočný. S poklesom cien technológií sa však situácia postupne zlepšuje a v mnohých nemeckých podnikoch je batériové úložisko určené na peak shaving už ziskové [6].

Všetky uvedené existujúce prístupy majú svoje **limity**. Pravidlové systémy majú tendenciu zlyhávať v neštandardných situáciách, napríklad pri extrémnych cenách alebo pri dlhších obdobiach výrazne odlišnej výroby, a nedokážu plne využiť synergiu všetkých dostupných informácií, pretože často reagujú len na obmedzený súbor parametrov. Optimalizačné systémy zasa vyžadujú kvalitné predikcie a dostatočný výpočtový výkon. Ich výsledky sú závislé od kvality vstupných dát. MILP modely môžu byť citlivé na veľkosť problému a pri pridávaní diskretných stavov, ako je napríklad režim tepelného čerpadla, dochádza ku kombinatorickému nárastu dimenzie úlohy. Mnohé akademické koncepty, najmä návrhy založené na MPC a stochastických metódach, nie sú priamo určené na nasadenie v prostredí PLC alebo v jednoduchých priemyselných počítačoch. V praktických realizáciách sa preto často uplatňuje kompromisný model, v ktorom centrálny server vykonáva optimalizáciu a lokálny regulátor vo forme PLC zabezpečuje predovšetkým bezpečnostné funkcie a jednoduché zásahy v prípade zlyhania komunikácie.

Z pohľadu **nasadenia v podnikových prevádzkach**, je motivácia pre využitie optimalizačných prístupov jednoznačná. Podniky zvyčajne odoberajú podstatne väčšie množstvo elektrickej energie než bežné domácnosti. Aj relatívne malá percentuálna úspora sa preto premieta do výraznej absolútnej finančnej úspory. Pri cenách elektriny v rokoch 2022 až 2023 počas energetickej krízy sa náklady pre podniky zvýšili niekoľkonásobne, čo významne zvýšilo tlak na efektívne hospodárenie s energiou. Okrem samotnej spotreby elektriny platia podniky často aj poplatky za jalovú energiu a rezervovanú kapacitu a podliehajú prísnejším zmluvným podmienkam. Optimalizáciou svojho odberového profilu dokážu znížiť aj tieto položky a dosiahnuť tak výraznejšie celkové úspory.

1.4 Hlavný cieľ práce

je navrhnuť a implementovať centralizovaný riadiaci systém pre fotovoltickú prevádzku s batériovým úložiskom, ktorý dokáže optimálne využiť prebytky energie vzhľadom na časovo premenlivé spotové ceny elektriny. Systém má pomocou optimalizačného modelu generovať plán nabíjania a vybíjania batérie na dopredu stanovený horizont napríklad 24 hodín, rozdelených na 15-minútové intervaly. Plán minimalizuje celkové náklady na elektrinu a rešpektuje pritom technické obmedzenia zariadení a obchodné podmienky akým je limitovaný maximálny odber alebo dodávku do siete.

Integrácia optimalizačného algoritmu do existujúcej infraštruktúry. Navrhnuť architektúru so samostatným optimalizačným backendom, komunikačným rozhraním a nasadením na serveri tak, aby bolo možné systém spoľahlivo prevádzkovať v reálnom čase.

Nasadiť PLC (TODO SKRATKA) ktoré bude ovládať inverter a batériu na základe informácii so backend servera.

Vytvorenie používateľského rozhrania pre vizualizáciu výsledkov a umožnenie dohľadu nad systémom (monitorovanie plánu, manuálne zásahy).

Kapitola 2

Analýza súčasného stavu

Riešenia zapojení systémov je vo väčšine prípadov rovnaká naprieč všetkým inštaláciam s malými zmenami pri meraní spotreby objektov. Ide hlavne o ON-Grid riešenie, čo v praxi znamená, pripojenie invertora k sieti. Pracuje spolu so sieťou. Pri takomto zapojení inverter dopomáha distribučnej sústave, neprechádza cez neho 100% spotreby objektu. Môže sa aj odpojiť a objekt bude stále mať elektrickú energiu. (TODO on-grid schema zabezpečenia, GRID => BUDOVA a ku tomu sa pripojí Inverter)

Jedna z prevádzok na ktorú sa zameriame je stredne veľký objekt vybavený fotovoltaickou elektrárnou a batériovým úložiskom. Okrem toho má firma vlastnú spotrebu elektriny, ktorá vykazuje denné aj týždenné kolísanie, počas pracovných dní sú denné odbery vyššie, počas nocí a víkendov je spotreba nižšia. Prevádzka je pripojená na distribučnú sieť a nakupuje elektrinu za spotové ceny na dennom trhu prostredníctvom svojho dodávateľa. Za dodávku prebytočnej elektriny do siete prevádzka taktiež dostáva odmenu založenú na týchto cenách. To znamená, že pre prevádzku je ekonomicky motivujúce riadiť tok energie v závislosti od aktuálnych cien využívať elektrinu zo siete hlavne v časoch, keď je lacná, a naopak minimalizovať odber v časoch drahej elektriny.

Fotovoltaická elektráreň v objekte má inštalovaný výkon približne $100kW_p$. Typicky dokáže počas slnečných poludní dodať výkon pokrývajúci malú časť spotreby objektu. Batériové úložisko je lítiovo-iónová batéria s kapacitou $215kWh$ a maximálnym výkonom nabíjania/vybíjania $50kW$. Batéria je pripojená cez striedač k vnútornému elektrickému rozvodu objektu, čo umožňuje obojsmerný tok. Batéria sa môže nabíjať z fotovoltaiky alebo zo sieťového prívodu a naopak môže dodávať výkon na pokrytie spotreby objektu alebo aj do distribučnej siete. Riadenie batérie je integrovateľné do systému Loxone. Objekt má nasadený Loxone miniserver, ktorý slúži ako PLC (SKRATKA: programovateľný logický kontrolér).

Kapitola 3

Výskum

Kapitola 4

Záver

Cieľom tejto diplomovej práce bolo navrhnúť a implementovať centralizovaný riadiaci systém pre optimalizáciu využitia prebytkov energie vo fotovoltických prevádzkach s dynamickými spotovými cenami elektriny a batériovým úložiskom. V úvode sme ukázali potrebu takéhoto systému. Stúpajúci podiel obnoviteľných zdrojov a zavádzanie 15-minútových cien prinášajú pre podnikové energetické hospodárstvo nové výzvy, ktoré nedokážu efektívne riešiť jednoduché heuristické regulátory. Pôvodný riadiaci modul v testovanej prevádzke nesplnil očakávania vedenia, bol krátkozraký a nedostatočne využíval potenciál batériového úložiska.

V teoretickom rozbere sme popísali vlastnosti relevantných prvkov: premenlivosť FV výroby, obmedzenia a degradáciu batérií, mechanizmus spotových cien a problém prebytkov. Z literatúry a prehľadu existujúcich EMS sme odvodili, že najperspektívnejším prístupom je prediktívna optimalizácia (MILP/MPC), ktorá dokáže spojiť viacero cieľov do jedného matematického modelu. Tiež sme vyzdvihli potrebu riešenia prispôbeného pre podniky.

Vlastným prínosom práce je návrh konkrétneho optimalizačného modelu a jeho úspešná implementácia v plnej prevádzke. Model sme zformulovali ako lineárny program (LP) s 15-minútovým časovým krokom, premennými reprezentujúcimi toky energie ako je nabíjanie/vybíjanie batérie, odber/dodávka zo siete a obmedzeniami pokrývajúcimi technické limity teda výkon meniča, kapacita batérie, limit odberu a exportu. Cieľovou funkciou je minimalizovať náklady na elektrinu, pričom sme do nej zahrnuli penalizácie, aby model uprednostnil využitie dostupného lacného soláru a obmedzili nabíjanie z drahej siete.

Implementačne sme zvolili kombináciu Pythonu (PuLP + HiGHS solver) pre samotnú optimalizáciu a NodeJS servera pre orchestráciu, komunikáciu a integráciu do existujúcej infraštruktúry. Systém získava vstupy predikcie spotreby, výroby, spotové ceny a generuje denný plán toku energie. Tento plán je následne distribuovaný do ria-

diaceho PLC a vykonávaný v reálnom čase. Zrealizovali sme aj jednoduché webové rozhranie, kde je možné plán sledovať. Celá architektúra bola navrhnutá modulárne a škálovateľne.

Literatúra

- [1] EM-Power Europe. Negative electricity spot prices - causes and solutions, 2025. Accessed: 2025-11-20.
- [2] L. Fiorini and M. Aiello. Automatic optimal multi-energy management of smart homes. *Energy Informatics*, 5(1):68, 2022. Open Access.
- [3] Maria C. Fotopoulou, Panagiotis Drosatos, Stefanos Petridis, Dimitrios Rakopoulos, Fotis Stergiopoulos, and Nikolaos Nikolopoulos. Model predictive control for the energy management in a district of buildings equipped with building integrated photovoltaic systems and batteries. *Energies*, 14(12), 2021.
- [4] Akila Herath, Supun Kodituwakku, Dinithi Dasanayake, Prabath Binduhewa, Janaka Ekanayake, and Kamalanath Samarakoon. Comparison of optimization- and rule-based ems for domestic pv-battery installation with time-varying local soc limits. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2019:1–14, 2019.
- [5] Arafat Ibne Ikram, Aasim Ullah, Durjoy Datta, Ashraful Islam, and Tanvir Ahmed. Optimizing energy consumption in smart homes: Load scheduling approaches. *IET Power Electronics*, 17(16):2656–2668, Jan 2024. Published Jan. 30, 2024.
- [6] Daniel Kucevic, Leo Semmelmann, Nils Collath, Andreas Jossen, and Holger Hesse. Peak shaving with battery energy storage systems in distribution grids: A novel approach to reduce local and global peak loads. *Electricity*, 2(4):573–589, 2021.
- [7] Rasmus Luthander, Joakim Widén, Daniel Nilsson, and Jenny Palm. Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. *Applied Energy*, 142:80–94, 2015.
- [8] a.s. OKTE. Zmena zverejňovania výsledkov na dennom trhu, 2025. <https://web.archive.org/web/20251211162537/https://www.okte.sk/sk/informacie/oznamy/2025-09-26-zmena-zverejnovania-vysledkov-na-dennom-trhu/>.
- [9] M. I. Saleem, S. Saha, U. Izhar, and L. Ang. A stochastic mpc-based energy management system for integrating solar pv, battery storage, and ev charging in residential complexes. *Energy and Buildings*, 325:114993, 2024.