

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Virtuální uzle a jejich aplikace v EU

Bc. Jiří Kanda

Vedoucí: Prof. Ing. Oldřich Starý, Csc
Specializace: Elektrotechnika a management
Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Květen 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kanda** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **491922**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Management energetiky a elektrotechniky**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Virtuální uzle a jejich aplikace v EU

Název diplomové práce anglicky:

Virtual hubs and their applications in the EU

Pokyny pro vypracování:

- Popište teorie virtuálních uzlů a její přínosy.
- Stanovte ceny ve virtuálním uzlu.
- Analýza Flow-based alokace přenosových kapacit a virtuálního uzlu pro evropský trh s elektřinou.
- Nasimulujte virtuální uzel pro region Core.

Seznam doporučené literatury:

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_1591
<https://www.acer.europa.eu/public-events/acer-workshop-further-development-eu-electricity-forward-market>
https://www.acer.europa.eu/Position%20Papers/Electricity_Forward_Market_PolicyPaper.pdf

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Oldřich Starý, CSc. katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **08.02.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **21.09.2025**

prof. Ing. Oldřich Starý, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen 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 studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval své rodině za jejich neustálou podporu a lásku během psaní této diplomové práce. Děkuji také svým kamarádům a kolegům v práci, zejména Ing. Martinu Palkovskému a Ing. Karlovi Šebestovi za jejich povzbuzení a trpělivost.

Velké poděkování patří také mému vedoucímu práce, panu prof. Ing. Oldřichu Starému, CSc., za jeho odborné vedení a cenné rady.

Prohlášení

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

V Praze dne 24.5.2024

Bc. Jiří Kanda

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá analýzou virtuálních uzlů v energetickém sektoru, zejména v kontextu reformy energetického trhu. Cílem je prozkoumat vliv těchto inovací na trhy s elektřinou, zajištění udržitelnosti, konkurenceschopnosti a bezpečnosti dodávek. Práce zahrnuje teoretické základy a praktické aplikace virtuálních uzlů, včetně jejich simulací a korelačních analýz. Výsledky ukazují, že nejefektivnější metodou pro výpočet ceny virtuálního uzlu je aritmetický průměr. Studie také naznačuje, že umístění virtuálního uzlu nemá vliv na flow-based alokaci kapacit, avšak změny v topologii sítě mohou ovlivnit výpočet PTDF matice. Doporučuje se zvýšení frekvence aukcí pro zlepšení tržní stability.

Klíčová slova: Virtuální uzel, reforma energetického trhu, cenový index, dlouhodobý produkt, elektřina

Abstract

The thesis deals with the analysis of virtual hubs in the energy sector, especially in the context of energy market reform. The aim is to explore the impact of these innovations on electricity markets, ensuring sustainability, competitiveness and security of supply. The work covers the theoretical foundations and practical applications of virtual hubs, including their simulations and correlation analyses. The results show that the most efficient method for calculating the price of a virtual hub is the arithmetic average. The study also suggests that the location of the virtual hub does not affect the flow-based capacity allocation, but changes in the network topology may affect the calculation of the PTDF matrix. It is recommended to increase the frequency of auctions to improve market stability.

Keywords: Virtual hub, energy market reform, price index, long-term product, electricity

Obsah

Úvod	1
1 Rešerše	3
1.1 Reforma energetického trhu	3
1.2 Virtuální uzel	4
1.2.1 Teorie virtuálních uzlů	5
1.2.2 Existující virtuální uzly	5
1.2.2.1 V plynárenství	5
1.2.2.2 V elektroenergetice	7
1.2.3 Podobnost virtuálních uzlů v plynárenství a elektroenergetice	7
2 Vlastnosti a problémy virtuálního uzlu	9
2.1 Kalkulace ceny virtuálního uzlu	9
2.2 Přenosová práva	10
2.3 Co je produktem	10
2.4 Výpočet přeshraničních kapacit	10
2.5 Geografická umístění uzlu	11
2.6 Párování nabídek mezi zónami	12
2.7 Role TSOs při párování nabídek	12
2.8 Doba splatnosti LTTRs	12
2.9 Četnost aukcí a typ obchodování	12
2.10 Kde se virtuální uzel obchoduje?	13
2.11 Clearing house	13
2.12 Možnost Hedgingu	14
2.13 Příjmy z přetížení	15
2.14 Výpočet ekonomického welferu	15

2.15 Sekundární trh	15
3 Definice problému	17
3.1 Metodologie	17
3.1.1 Lineární programování	17
3.1.2 Matematická formulace algoritmů dlouhodobé alokace	18
3.1.3 Výpočet faktorů distribuce přenosu energie a referenčních toků	19
3.2 Předpoklady	21
3.3 Návrhy opatření proti očekávaným problémům	22
3.3.1 Stanovení ceny virtuálního uzlu	22
3.3.2 Korelační analýza virtuálního uzlu	22
3.3.3 Analýza Flow-based výpočtu alokace kapacit pro virtuální uzel	23
3.4 Četnost aukcí	24
4 Výsledky	25
4.1 Korelační analýza	25
4.1.1 Korelační analýza virtuálního uzlu	25
4.1.2 Korelační analýza fyzických uzlů	27
4.1.3 Korelace virtuálního uzlu v průběhu roku 2023	30
4.2 Citlivostní analýza	32
4.3 Výsledky simulace flow-based alokace kapacit	37
4.4 Analýza četnosti aukcí	39
5 Závěr	41
Literatura	43
Obrázky	47
Tabulky	49



Úvod


Diplomová práce se věnuje rozboru aktuálních změn a výzev v energetickém sektoru, zejména v kontextu reformy energetického trhu a implementace virtuálních uzlů. Cílem je analyzovat, jak tyto inovace ovlivňují tradiční energetické trhy a přinášejí nové možnosti pro zajištění udržitelnosti, konkurenceschopnosti a bezpečnosti dodávek.

První kapitola poskytuje ucelený přehled o reformě energetického trhu v Evropě, se zaměřením na nedávný návrh reformy trhu s elektřinou, známý jako "The Electricity Market Design Reform proposal"(EMDR). Rozbor zahrnuje diskusi o problémech současného tržního designu, jako jsou nedostatečná likvidita, transparentnost a strukturální nedostatky. V práci je zmíněn zkoumá dopad rekordních cen elektřiny v roce 2022 a následné reakce regulátorů, včetně představení konkrétních opatření zaměřených na zlepšení dlouhodobých tržních podmínek, ochranu spotřebitelů a zajištění flexibility poptávky. Konkrétně je práce zaměřena na zkoumání virtuálního uzlu jako možného prvku moderního energetického trhu. Analýza se zaměřuje na jeho potenciál přispět k řešení problémů flexibility a zabezpečení dodávek energie, a na to, jak by virtuální uzel mohl ovlivnit cenovou stabilitu a konkurenceschopnost na trzích. Diskutovány jsou teoretické základy virtuálních uzlů, jejich existující aplikace jak v elektroenergetice, tak v plynárenství, a srovnání mezi těmito dvěma sektory. Zároveň práce reflektuje, jak mohou být principy virtuálních uzlů aplikovány pro vylepšení celkové efektivity trhu a managementu rizik.

Druhá kapitola se zaměřuje na podrobnou analýzu virtuálních uzlů v elektroenergetice, která zahrnuje jak teoretické aspekty, tak praktické dopady jejich implementace na energetické trhy. Představuje klíčové výzvy spojené s kalkulací ceny virtuálního uzlu, managementem přenosových práv a určením geografického umístění těchto uzlů. Vysvětluje také, jak virtuální uzly ovlivňují obchodní strategie a operace na trzích s elektrickou energií. Jsou rozebrány klíčová témata zahrnující různé přístupy k výpočtu ceny uzlu, podoba produktu, výpočet přeshraničních kapacit, diskuse o přenosových právech, která jsou zásadní pro správu přeshraničních kapacit, a o různých typech aukcí, které mohou ovlivnit likviditu a cenovou stabilitu trhů.

Ve třetí kapitole se definuje problém spojený s virtuálním uzlem v energetickém sektoru, zaměřením se na jeho cenovou kalkulaci, porovnání s fyzickými uzly a dopady flow-based metody alokace kapacit. Metodologická část obsahuje teorii k potřebnému lineární programování a matematické modelování pro analýzu a simulaci virtuálního uzlu. Kapitola zahrnuje předpoklady pro analýzu a stanovení ceny uzlu. Cílem simulování flow-based alokace kapacit je ověření, jak geografická poloha ovlivňuje funkčnost uzlu a jeho přínosy pro trh.

Čtvrtá kapitola se zabývá korelačními analýzami mezi vytvořenými indexy virtuálního uzlu a tržními cenami v nabídkových zónách pro léta 2019 až 2023. Zkoumání, jak moc jsou



jednotlivé korelace blízké jedné naznačuje atraktivitu takto vytvořeného produktu virtuálního uzlu pro účastníky trhu v jednotlivých zónách. Analýzy se zaměřují na srovnání virtuálního uzlu vytvořeného pomocí aritmetického, váženého a klouzavého průměru, s cílem identifikovat nejvhodnější metodu pro jeho stanovení. Dále se zkoumají sezónní korelace a potenciální existující fyzické uzly, které by mohly virtuální uzel zastoupit, jako jsou zóny DE, FR, CZ a HU. Analýzou dále posuzujeme, zda je vytváření nového indexu nutné a jak se virtuální uzel chová během různých období roku. Citlivostní analýza se pak zabývá porovnáním atraktivity virtuálního uzlu oproti fyzickým uzlům, s důrazem na identifikaci nejefektivnějších metod pro jeho výpočet a zobrazení vývoje trhu a cenové korelace mezi různými zónami.

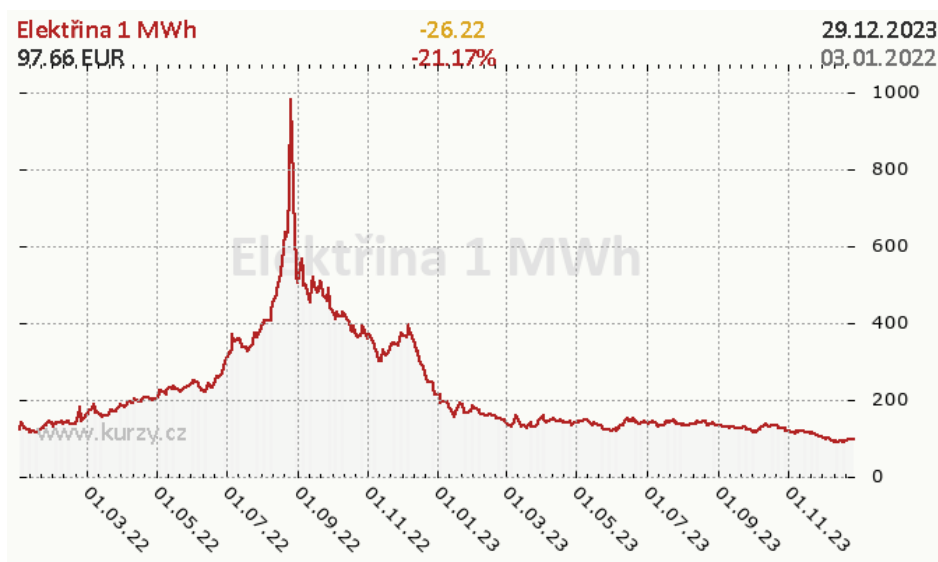
V závěru jsou shrnuty klíčové poznatky diplomové práce, která se zaměřovala na analýzu a aplikaci virtuálních uzlů na trhu s elektřinou v regionu Core. Práce odhalila, že nejefektivnější metodou pro výpočet ceny virtuálního uzlu je využití aritmetického průměru. Dále bylo zjištěno, že obchodování virtuálního uzlu jako FTR-obligace umožňuje lepší zajištění pozic. Výsledky naznačují, že umístění virtuálního uzlu nemá vliv na flow-based alokaci kapacit, avšak potenciální změna topologie sítě by mohla ovlivnit výpočet PTDF matice, což by znamenalo, že po přesunutí virtuálního uzlu existuje možnost, že nedostaneme PTDF matici s posunem pouze o konstantu a poloha uzlu by tak měla vliv na alokaci kapacit. Práce dále doporučuje vyšší frekvenci aukcí pro zvýšení tržní stability a konkurenceschopnosti. Závěrem kapitola navrhuje další zkoumání virtuálních uzlů, zlepšení regulace a transparentnosti aukcí a posílení spolupráce mezi národními regulátory pro harmonizaci tržních podmínek.

Kapitola 1

Rešerše

1.1 Reforma energetického trhu

Budoucnost a rozvoj dlouhodobého trhu s elektrickou energií je jednou z věcí, kterou agentura Evropské unie pro spolupráci energetických regulačních orgánů (ACER) aktivně projednává. Na základě samotných jednání vychází do popředí mnoho otázek jako jsou: nedostatečná likvidita, konkurence, transparentnost a nevhodná struktura dlouhodobého trhu s elektřinou [1].



Obrázek 1.1: Vývoj cen elektrické energie v letech 2022-2023 [2]

V reakci na rekordní ceny v srpnu roku 2022, kdy se cena za 1 MWh vyšplhala až na 984 EUR, jak je patrné z grafu [1.1] vyšlo v září 2022 prohlášení od tehdejší prezidentky ACERu, ve kterém říká, že: „Současný design trhu s elektřinou již nepřináší spravedlnost spotřebitelům a vyhlásila hlubokou a komplexní reformu trhu s elektřinou.“ Dne 14. března 2023, přesně šest měsíců po tomto projevu, navrhla komise 5. reformu trhu s elektřinou: „The Electricity Market Design Reform proposal“ (EMDR) [3]. Reforma rozebírá tři zásadní body: konkurenceschopnost, udržitelnost a bezpečnost dodávek. K těmto bodům byla poté navržena následující opatření:

1. Zlepšení dlouhodobých/budoucích trhů:

Nestabilní ceny na krátkodobých trzích ukázala nedávná krize viz graf [1.1]. Ukázalo se

tak, že nestabilita neprospívá jak producentům, tak i spotřebitelům. Řešením by mělo být zvýšení jistoty na dlouhodobých trzích s elektřinou, což by mělo snížit i nestabilitu na trhu krátkodobém. K dosažení tohoto cíle navrhuje reforma dvě opatření. Prvním z nich je zavedení stabilních dlouhodobých kontraktů a druhým je zlepšení likvidity na forwardových trzích. Nejinovativnějším řešením by mělo být zvýšení likvidity na forwardových trzích pomocí tzv. virtuálního uzlu (virtual hub), který by měl vzniknout sloučením nabídkových oblastí s cílem zvýšit velikost a likviditu takto vytvořeného trhu. Provozovatelé přenosových soustav (TSOs - Transmission System Operators) jsou tedy dle EMDR povinni přidělit přenosová práva na období delší než jeden rok [1].

2. Ochrana spotřebitelů před vysokými cenami:

Reforma chce spotřebitelům poskytnout možnost stát se „aktivními“ účastníky trhu. Pod pojmem aktivní si v tomto kontextu můžeme představit nejen možnost volby typu smlouvy, ale i participaci na trhu. Reforma má přinést dva typy smluv, s pevnou a dynamickou cenou. Poskytovatelé těchto smluv mají za povinnost poskytnout jasnější informace ohledně jejich výhod a rizik. Dalším bodem je zavedení komunitní energetiky, kdy budou spotřebitelé schopni sdílet energii mezi svými sousedy, tedy sdílení od spotřebitele ke spotřebiteli, využitím energie, kterou vyrobí jejich solární panely nebo za použití baterií v jejich elektrických vozidlech. Další dva body navazují na zlepšení dlouhodobých trhů, kdy se průmyslová odvětví mohou chránit před vysokými krátkodobými cenami méně rizikovými dlouhodobými kontrakty a zvýšenou likviditou. Poslední bod hovoří o krizových situacích, ve kterých členské státy musí zasáhnout a stanovit maloobchodní ceny s pobídkou k úspoře a to jak pro domácnosti, tak i malé a střední podniky [1].

3. Řešení výzev flexibility:

Pro zajištění bezpečnosti dodávek a udržení nízkých velkoobchodních cen je klíčová flexibilita poptávky. Tato reforma navrhuje kroky ke zlepšení možnosti odpovědi na poptávku ze strany spotřebitelů a podporuje provozovatele soustav, aby využívali nové způsoby správy poptávky, jako je využívání elektromobilů a tepelných čerpadel připojených do sítě s cílem snížit špičkovou poptávku [4].

Porovnáme-li krátkodobé trhy s dlouhodobými zjistíme, že problémy na krátkodobých trzích byly částečně vyřešeny, a to zejména pomocí propojení trhů, takzvaného market couplingu, kdy se nabídky a poptávky v různých nabídkových zónách (největší zeměpisná oblast, ve které si účastníci trhu mohou vyměňovat energii bez přidělování kapacity, zkratkou BZ) [5] vyrovnávají za pomoci přeshraničních kapacit. Dalším krokem v rámci market couplingu bylo integrování denních a vnitrodenních trhů s elektřinou a vznik jednotného Evropského trhu s názvem SIDC, kde mohou jednotlivé členské státy obchodovat nepřetržitě v rámci celé Evropy. [6] Ačkoliv přidělování přeshraničních kapacit je do určité míry integrováno do forwardových trhů, tak je dle ACERu v tomto ohledu velký prostor pro další zlepšení [1].

1.2 Virtuální uzel

Diplomová práce je zaměřená na podrobnou studii konceptu virtuálního uzlu v souvislosti s aktuálními výzvami v energetickém sektoru, které byly nastíněny v předchozím textu. Budou řešeny otázky, jak může virtuální uzel přispět k řešení problémů flexibility a zabezpečení dodávek energie, a jakým způsobem může ovlivnit cenovou stabilitu a konkurenceschopnost na

tržích. Cílem práce bude poskytnout hlubší porozumění tomuto prvku moderních energetických systémů a přinést nové poznatky, užitečné pro budoucí vývoj a regulaci energetických trhů.

1.2.1 Teorie virtuálních uzlů

V současné době slouží Německo jako hlavní evropské (fyzické) obchodní centrum (hub) s elektřinou. Je tak používáno pro zajišťování rizika účastníky trhu z celého kontinentu. Reforma však zavádí myšlenku virtuálního uzlu, což by byl kompozitní cenový index, který by sloužil jako podkladové aktivum finančních derivátů, především však forwardových kontraktů. Ve studii od neon.energy [7] také rozlišují mezi zřízením virtuálního uzlu a jeho užíváním. Pokud bude uzel zaveden, tak by měl být definován jako vážený průměr spotových cen, kdy by jednotlivé váhy měly být stabilní po dobu několika let a měly by odrážet dlouhodobou průměrnou spotřebu elektřiny. Příkladem pro virtuální uzly v elektroenergetice může být již používaný virtuální uzel v plynárenství.

EU vyžaduje po TSOs, aby vydávali dlouhodobá přenosová práva (LTTRs). Tyto smlouvy nejsou přímo o přenosu energie a nejsou pouze právy, LTTRs jsou finančními deriváty, kde je podkladovým aktivem rozdíl mezi dvěma spotovými cenami. LTTRs se ve své podstatě neliší od konvenčních FTR-opcí a FTR-obligací (Financial Transmission Rights) a můžeme je tedy nazvat „spread opce“ a „spread futures“. V souvislosti s virtuálním uzlem pak musí být definovány LTTRs jako Zone-to-Hub, jako rozdíl ceny mezi nabídkovou zónou a virtuálním uzlem, případně naopak pro produkt Hub-to-Zone. Teorie virtuálních uzlů je koncepce uspořádání trhu, jejímž cílem je zvýšit likviditu na tržích s energií tím, že se nabídka a poptávka z více nabídkových zón spojí do jednoho virtuálního uzlu. Toto spojení je vyjádřeno jako cenový index. Virtuální uzel by měl fungovat jako centrální obchodní místo pro energetické kontrakty a měl by účastníkům trhu přinést větší množství nabízených dlouhodobých produktů. Tento koncept souvisí se sdružováním likvidity, protože umožňuje účastníkům trhu přístup k většímu množství prostředků, což může vést k efektivnějšímu zajišťování cen a řízení rizik [7].

1.2.2 Existující virtuální uzly

Na světě existuje několik virtuálních uzlů, kde většina funguje v plynárenství, příkladem může být „Title Transfer Facility“ (TTF) nebo „Henry Hub“. Předlohou tohoto oceňovacího produktu v elektroenergetice jsou tzv. EPADs (Electricity Price Area Differentials), které jsou používány v severských zemích, [8] kde je obchodování na principu virtuálních uzlů provozováno již několik let. Dalšími případy tohoto typu obchodování jsou Midwest ISO, PJM Western HUB, ISO New England a PJM Interconnection.

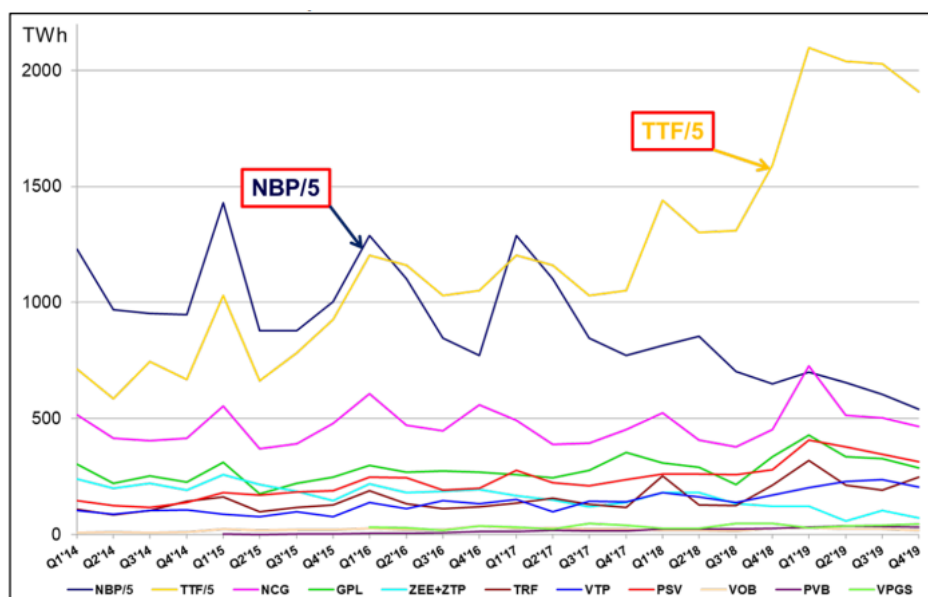
1.2.2.1 V plynárenství

Pohled do teorie virtuálních uzlů nám však nabízí nejen trh s elektřinou, ale především trh se zemním plynem. Funkčním mimoevropským virtuálním uzlem je Henry Hub, který se nachází

v Erathu ve státu Louisiana a slouží jako hlavní místo dodávek pro futures kontrakty na newyorské komoditní burze (NYMEX) [9].

Na území Evropy pak existují dva významnější obchodní uzly, kterými jsou TTF v Nizozemí a National Balancing Point (NBP) ve Spojeném Království. Na obrázku [1.2] pak můžeme vidět vývoj obchodovaného objemu evropských uzlů mezi lety 2014 - 2019, kde TTF a NBP jsou v grafu vyděleny pěti, toto škálování bylo použito pro lepší přehlednost. Je tedy patrné, že některé uzly jsou likvidnější, ale některé problémy s likviditou úplně nevyřeší.

TTF je virtuální uzel v Nizozemí, přepravci a kupující zde obchodují s futures plynu. TTF byl založen v roce 2003 a jeho význam narůstal s liberalizací energetického sektoru. Dnes je klíčovým referenčním bodem pro sledování a pochopení trhu s plynem v Evropě. Uzel funguje jako spojovací článek pro národní i mezinárodní subjekty zapojené do plynárenského průmyslu. Jednotlivými účastníky jsou výrobci, provozovatelé podzemních zásobníků plynu i provozovatelé distribučních a přepravních plynových soustav. Dříve byl referenčním bodem britský National Balance Point (NBD), kde hlavním důvodem přesunu referenčního bodu byl vzrůstající počet LNG terminálů v Evropě [10]. V TTF je také zobchodováno nejvíce výrobků, jak do počtu, tak do největšího zobchodovaného objemu, díky tomu je jeden z předních ukazatelů a je tak používán jako rizikový uzel (slouží k řízení rizika) [11].



Obrázek 1.2: Vývoj obchodovaného objemu: 2014-2019 [12]

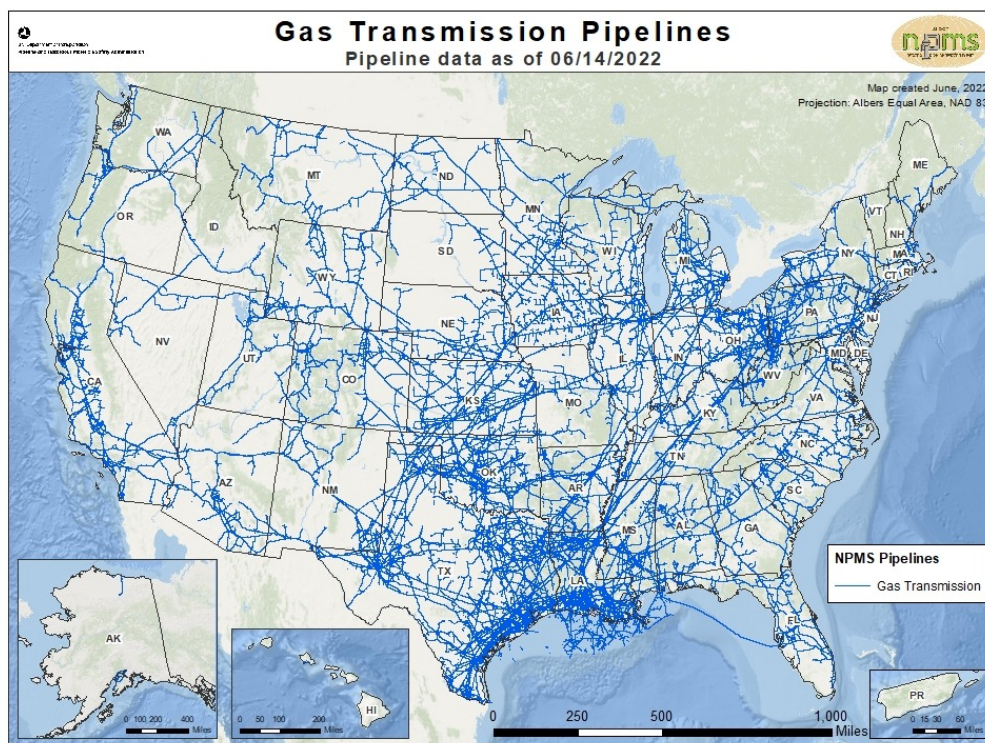
Dalším příkladem existujícího virtuálního uzlu je Henry hub, což je jeden z nejznámějších obchodních uzlů se zemním plynem na jižním pobřeží Severní Ameriky. Nachází se v blízkosti města Erath v Louisiana a přepravuje se zde plyn z celého pobřeží Mexického zálivu a to jak mezistátními, tak vnitrostátními plynovody, které se v uzlu setkávají. Díky velké likviditě v tomto uzlu se stal Henry hub standardním místem dodávek pro futures kontrakty na zemní plyn na burze NYMEX v USA. Obchod s tímto kontraktem začal v roce 1990, obchoduje se s ním na 18 měsíců dopředu a slouží tak jako hlavní nástroj finančního zajištění [13].

1.2.2.2 V elektroenergetice

Na severských a baltských trzích využívají systém křížových derivátů, který je nezávislý a oddělený jak od spread produktů, tak od LTTRs. Jedná se o EPADs, produkty obchodované na energetické burze a stejně jako LTTRs se jedná o finanční termínované kontrakty, odkazující na rozdíly cen. Rozdílem mezi spread produkty a EPADs je, že zatímco spread produkty odkazují na rozdíl cen mezi dvěma nabídkovými zónami, tak EPADs odkazují na rozdílnou cenu mezi systémovou cenou Nordics a nabídkovou zónou. Systémová cena Nordic je pak vypočítána jako hypotetická cena v severské oblasti pro každou hodinu za předpokladu, že by neexistovala síťová omezení. Jedná se tedy o virtuální obchodní uzel, kde největším rozdílem oproti uvažovanému celoevropskému uzlu je fakt, že švédský TSO Svenska Kraftnät poskytuje likviditu tím, že jednotlivé EPADs prodává nebo nakupuje v rámci celého regionu Nordic. Oproti evropskému trhu se EPADs používají také jako přeshraniční právo, ať už fyzické nebo finanční [8].

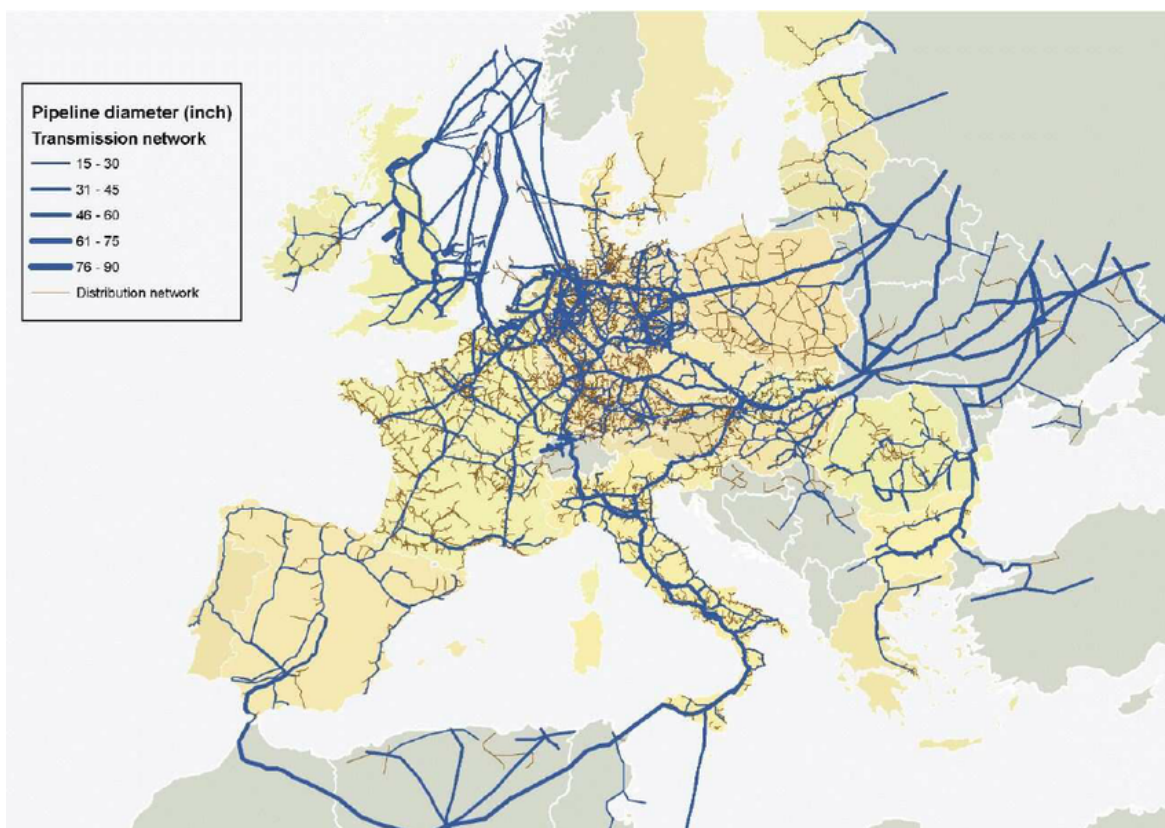
1.2.3 Podobnost virtuálních uzlů v plynárenství a elektroenergetice

Na obrázku [1.3] je zobrazena plynová přepravní soustava USA. Největší koncentrace plynodů je právě v oblasti Mexického zálivu, konkrétně v Louisianě a Texasu. Pro virtuální uzly, kde probíhá obchod s plynem, je zřejmé, že umístění takového uzlu bude významné zejména v místech s vysokou koncentrací dostupných přenosových kapacit.



Obrázek 1.3: Schéma přepravní plynové soustavy USA [14]

Stejný závěr lze vyvodit i z obrázku [1.4], na kterém je zobrazena největší koncentrace přenosových kapacit v okolí Severního moře. Kromě přenosových kapacit je zde i velké množství LNG terminálů a spojení těchto faktorů dělá tyto uzly likvidními. Největší rozdíl mezi virtuálními uzly v elektroenergetice a plynárenství je fyzikální podstata obchodované komodity, kdy plynu může být, a také je, v konkrétním místě větší množství a postupně ze soustavy ubývá se vzdáleností od zdroje. Rozdílná situace však nastává pro soustavu elektrizační, kde je nezbytně nutné udržovat velikost napětí, frekvenci, sinusový průběh a symetrie mezi jednotlivými fázemi v celé evropské elektrizační soustavě. Také je nutné držet kvalitu elektrické energie stejnou v celé síti a to při jakémkoliv odběru nebo dodávce, což se pak projeví na jednotlivých prvcích soustavy a obchodovaných přeshraničních kapacitách. Na rozdíl od plynu se směr odkud kam elektrina teče může měnit mnohem dynamičtěji, což přináší otázky umístění virtuálního uzlu pro elektrickou energii a také otázku, zda je v případě důležitosti umístění uzlu doopravdy virtuální?



Obrázek 1.4: Schéma přepravní plynové soustavy EU [15]

Kapitola 2

Vlastnosti a problémy virtuálního uzlu

Práce se věnuje detailnímu pohledu na problematiku virtuálních uzlů v elektroenergetice. Budou zde rozebrány nejvýznamnější problémy a možnosti řešení, se kterými se v teorii virtuálních uzlů můžeme setkat. Zároveň bude snaha o vysvětlení potenciálních přínosů a rizik jednotlivých možností a návrzích řešení případných problémů.

2.1 Kalkulace ceny virtuálního uzlu

Zmíním několik variant o výpočtu ceny uzlu pomocí průměru. Je však otázkou, z jakých dat bude tento průměr tvořen. Není jasné, zda k výpočtu budou sloužit ceny z denního nebo vnitrodenního trhu. Souvisí s tím i rozdíl, budou-li ceny virtuálního uzlu známy ex-post, nebo ex-ante [1].

Lze definovat následující čtyři metodiky výpočtu cen virtuálního uzlu:

1. Fixní průměr, tento typ výpočtu ceny virtuálního uzlu počítá s fixním průměrem cen z určitého časového období. Výhodou fixního průměru je jeho jednoduchost a předvídatelnost, nevyžaduje složité výpočty nebo vážení dat.
2. Klouzavý průměr, ten bere v úvahu určitý počet předchozích cenových hodnot a vytváří z nich průměr. Jeho výhodou je vyhlazení cenových dat a identifikace trendů na trhu [16].
3. Vážený průměr, zohledňující váhy, které jsou nastaveny ve chvíli vydání kontraktů a zůstávají statické. Váha každé cenové hodnoty je určena podle podílu ceny na celkové poptávce. Tento typ průměru je také statický a předvídatelný, což usnadňuje obchodování, ale může vést k tomu, že obchodníci v likvidních zónách budou preferovat konečný produkt před virtuálním uzlem.
4. Systémová cena, je cena, odvozená z cenových dat a systémových faktorů jak je psáno v [1.2.2.2]. Tento typ ceny může být výsledkem ex-post nebo ex-ante aukce, což závisí na tom, zda je aukce vyhodnocena před samotnou dodávkou produktu nebo až po jejím skončení [8].

2.2 Přenosová práva

Dlouhodobá přenosová práva (LTTR) jsou přeshraniční deriváty, které vydávají provozovatelé přenosových soustav a jsou povinni je poskytovat ve spojení s pokyny pro přidělování forwardové kapacity. Ti mají možnost volby mezi třemi typy smluv: fyzická přenosová práva (PTR - physical transmission rights) s podmínkou „Use-It-or-Sell-It“ (Use It or Sell It je zásada, která stanoví, že pokud účastník trhu nenominuje svá dlouhodobá přenosová práva, JAO prodá příslušnou přenosovou kapacitu v příslušné denní aukci [17]), spread opce (FTR - opce) nebo spread futures (FTR - obligace). FTR obligace se dnes nepoužívají na žádných hranicích nabídkových zón mimo implicitní přidělování prostřednictvím market couplingu. FTR produkty jsou však preferovány pouze ve chvíli, kdy je mezi trhy dostatečná koordinace a likvidita, což by měl být hlavní cíl virtuálního uzlu. FTR obligace by tedy měly být při správném nasazení virtuálního uzlu preferovaným produktem pro transakce s přenosovými právy [18]. Výhodou FTR obligací oproti FTR opcím je jejich možnost plného finančního zajištění.

2.3 Co je produktem

Vlastním produktem je virtuální uzel, de facto cenový index se dvěma variantami, první „Zone-to-Hub“ a druhou „Zone-to-Zone“ .

Jednotlivá přenosová práva pro první a druhou variantu vypadají následovně:

$$LTTR_{ZONE \rightarrow HUB} = (ZoneForward_{1year}) - (HubForward_{1year}) \quad (2.1)$$

$$LTTR_{ZONE \rightarrow ZONE} = (ZoneForward_{1year}) - (ZoneForward_{1year}) \quad (2.2)$$

Větší smysl dává dlouhodobé přenosové právo Zone-to-Hub, jelikož při složení dvou těchto práv můžeme implicitně dostat právo Zone-to-Zone. Má-li tedy produkt být co nejjednodušší, tak zvolíme $LTTR_{ZONE \rightarrow HUB}$. Příklad složení práva Zone-to-Zone ze dvou produktů Zone-to-Hub a Hub-to-Zone:

$$\begin{aligned} LTTR_{A \rightarrow B} &= [(AForward_{1year}) - (HubForward_{1year})] \\ &\quad - [(BForward_{1year}) - (HubForward_{1year})] \\ &= (AForward_{1year}) - (BForward_{1year}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

2.4 Výpočet přeshraničních kapacit

Možností přístupu pro výpočet přeshraničních kapacit je mnoho, ale nejpředpokládanější je flow-based metoda přidělování kapacit. Pro ní jsou možné dva obvyklé přístupy:

1. **Statistical flow-based:** Tento přístup využívá historická data o tocích energie a statistické metody pro predikci kapacit, které by měly být k dispozici pro přeshraniční obchodování. Model není dynamický, ale spoléhá na průměrné hodnoty a pravděpodobnosti, což může vést k méně přesným výsledkům v situacích, kdy se mění provozní podmínky nebo dochází k nečekaným událostem v síti.
2. **Scenario flow-based:** Přístup, který obsahuje různé možné budoucí scénáře používané při modelování, včetně odhadů poptávky, nabídky a různých provozních stavů sítě. Tím se zvyšuje přesnost výpočtů kapacit, jelikož model zohledňuje širší spektrum možných situací a je schopen adaptovat se na změny v síti. Tento model je časově a výpočetně náročnější, ale poskytuje robustnější a spolehlivější výsledky.

Kromě flow-based je dalším možným přístupem výpočet pomocí „Net Expected Energy“. Tento přístup je navrhován jako inovativní řešení pro alokaci kapacit. Spoléhá na predikci očekávané čisté spotřeby energie v různých oblastech na základě dlouhodobých dat a trendů v poptávce a nabídce energie. K aplikaci této metody by však bylo potřeba znát cílovou funkci. Jelikož aktuálně není metodologie zabývající se virtuálním uzlem, tak tuto funkci nemáme k dispozici.

Posledním přístupem je NTC (Net Transfer Capacity) výpočet kapacit, což je přístup používaný pro stanovení maximálního množství elektrické energie, které může být bezpečně přeneseno mezi dvěma oblastmi bez ohrožení stability sítě. Tento přístup je využíván na dlouhodobých trzích dnes. Jelikož se tento přístup zaměřuje na konkrétní hranice a uzel by měl být virtuální, není pro něj vhodný.

Z výše uvedeného vyplývá, že při simulaci bude nejvhodnější využít flow-based výpočet, který při alokaci zahrne všechny prvky v síti [19].

2.5 Geografická umístění uzlu

Vlastností virtuálního uzlu je jeho geografické umístění. Pokud však má být uzel doopravdy virtuální, mělo by být jedno, kde se bude nacházet, což je jedna z věcí, kterou budu ověřovat v praktické části této práce. Stále se však nabízí otázka, jestli bude virtuální uzel jeden pro region Core, Evropu, nebo by měl být rozdělen na více menších uzlů. Region Core se skládá z těchto obchodních zón: Francie, Belgie, Nizozemsko, Německo (obchodně spojené s Lucemburskem), Česko, Rakousko, Polsko, Slovensko, Maďarsko, Slovinsko, Chorvatsko a Rumunsko.

Mají-li virtuální uzly sloužit jako nástroj pro sdružování likvidity, měl by jich být pro jeden region co možná nejmenší počet, ideálně jeden. Ve chvíli, kdy například rozdělíme virtuální uzel na dva, pro východní a západní část regionu Core, bylo by pro západní země výhodnější obchodovat přímo německý spread, protože to je nejlikvidnější zóna v celém regionu Core. Případné rozdělení by se odvíjelo od korelační analýzy virtuálního uzlu a jednotlivých zón, ze kterých by se virtuální uzel počítal.

2.6 Párování nabídek mezi zónami

Pro párování nabídek mezi jednotlivými zónami jsou možné dva přístupy. První z nich je prosté párování mezi sousedními nabídkovými zónami. Druhou možností je párování dvou nabídkových zón za pomoci virtuálního uzlu. Vzhledem k výhodnosti produktu ve tvaru Zone-to-Hub je druhá varianta pravděpodobnější. Toto párování by bylo složitější při výpočtu přeshraničních kapacit pomocí výpočtu NTC, jelikož by záleželo na geografickém umístění uzlu, který by ovšem v ten moment přestal být „virtuální“ a v případě použití NTC výpočtu kapacit bychom museli mít dané jasné umístění tohoto uzlu.

2.7 Role TSOs při párování nabídek

Provozovatelé přenosových soustav mohou zaujmout dvě pozice při párování nabídek. Za prvé mohou vystupovat jako aktivní protistrana při párování nabídek ve virtuálním uzlu, mohou přispívat svými vlastními nabídkami nebo poptávkami na trhu a tím napomoci k efektivnímu párování nabídek a optimalizaci výsledného ekonomického welfaru. Druhou pozici, kterou mohou TSOs zaujmout je pozice pasivní, kde vstupují pouze nabízením kapacit skrze LTTRs, což bude rozhodně preferovanější variantou, protože TSOs nikterak netěží z účasti na trhu s ostatními tržními subjekty.

2.8 Doba splatnosti LTTRs

Jak bylo zmíněno v kapitole 1.1 je potřeba zlepšení dlouhodobých trhů a TSOs musí přidělovat přenosová práva na období delší než jeden rok a tudíž by i splatnosti produktů byly delší než jeden rok. Neznamena to, že by nemohl být produkt obchodován i na bázi kratší, tedy přichází v úvahu produkt na měsíc dopředu „one month a-head“ (1MA), produkt na čtvrtletí dopředu (1QA), produkt na rok (1YA), produkt na dva roky (2YA) a případně i tři roky dopředu (3YA). Otázkou je, kolik procent kapacit by se pro jednotlivé roky mělo alokovat, což je však otázkou zaváděné metodologie. Další variantou je zachování měsíčních a čtvrtletních produktů a obchodování 1YA produktů pro každý rok zvlášť. Doba splatnosti je závislá na tom, jaké produkty TSOs vypíší. Samotný výpis je jejich právo a pokud mají být produkty delší než jeden rok, dá se očekávat, že vypíší dvouleté produkty, ovšem u tříletých už taková jistota není, jelikož musí brát ohledy na technická omezení soustavy a byly by tím pádem náročnější na predikci.

2.9 Četnost aukcí a typ obchodování

Aukce a průběžné obchodování jsou dva základní mechanismy obchodování na trzích s elektrickou energií. Každý z těchto přístupů má své výhody, nevýhody a vlastní charakteristiku.

Aukce jsou časově ohraničené události, během kterých jednotlivé subjekty podávají nabídky a poptávky. Pro zlepšení likvidity a nejstabilnější produkt je vhodné mít aukce co nejčastější. Uvažuje se tedy mezi denními, týdenními a měsíčními aukcemi. Výhodou aukcí je jejich transparentnost, efektivita a jednoduchost. V návaznosti na aukce je důležité, aby jednotlivé subjekty uzavíraly svoji pozici na trhu. K tomu slouží průběžné obchodování, kdy na rozdíl od aukcí, které se uzavírají pouze v určitém čase, je nutné mít možnost uzavřít zobchodovanou pozici z aukce v reálném čase.

Pro ocenění LTTRs v primárních aukcích uvažujeme dvě možnosti:

1. Ocenění marginální cenou: Marginální cena je cena posledního přijatého (nebo odmítnutého) příspěvku v aukci, která určuje cenu pro všechny účastníky. Výhodou ocenění pomocí marginální ceny je, že odráží aktuální nabídku a poptávku na trhu, což může vést k efektivnímu využití zdrojů. Naopak nevýhodou je, že tato cena může být ovlivněna extrémními nabídkami nebo poptávkou, což může vést k nestabilitě cen.
2. Ocenění „Pay as Bid“: Pay as Bid je cena, za kterou byla konkrétní nabídka přijata v aukci. Každá přijatá nabídka je placena za cenu, kterou nabídka požadovala, bez ohledu na marginální cenu. Výhodou Pay as Bid je, že účastníci dostanou cenu, kterou požadovali, což může vést k větší spokojenosti s výsledky aukce. Nevýhodou je riziko, že toto ocenění povede k neefektivnímu využití zdrojů, pokud se požadované ceny liší od ceny marginální, což může vést k cenovým anomáliím a nespravedlivým podmínkám na trhu [20].

2.10 Kde se virtuální uzel obchoduje?

Virtuální uzel bude nejspíše obchodován na energetických burzách jako je EEX nebo Nasdaq, ale také u brokerů a platforem jako je Trayport, Enmacc nebo Svensk Kraftmäkling. Další možností je, že produkt bude obchodován přímo u TSOs, nebo jmenují vlastní subjekt, například jednotnou alokační platformu JAO a tam se produkt bude obchodovat. Je pravděpodobnější, že obchod bude prováděn na již existujících trzích, které k tomu jsou jak právně, tak finančně připraveny, což nemůžeme říct v případě TSOs [7].

2.11 Clearing house

Povinnost zúčtovacího centra (clearing house) je „clearing“, neboli zúčtování, což obnáší finalizaci obchodů, vypořádání obchodních účtů, výběr maržových plateb, regulace a dodávka aktiv jejich novým vlastníkům a vykazování obchodních údajů. Tato střediska vstupují jako třetí strana pro futures a opční kontrakty, jako prodávají pro každého kupujícího člena a jako kupující pro každého prodávajícího člena zúčtovacího centra [21]. Je tedy důležité si uvědomit, že při obchodování FTR obligací je nezbytné počítat s maržovými požadavky a k dodatečnému doplácení pro zajištění pozice. Protože platby mohou směřovat oběma směry, je vždy nutné zajistit dostatečnou likviditu na straně protistrany. Namísto provozovatelů přenosových soustav tedy bude nutné spoléhat na jedno ze zúčtovacích center v Evropě, jelikož

TSOs nejsou na zúčtování subjektů připraveni jak z hlediska právního, tak peněžního. Je tedy jen pár variant, kdo by mohl dělat zúčtování tohoto produktu. Nejpravděpodobněji bude tuto činnost provozovat ECC, jakožto přední evropské komoditní zúčtovací středisko v EU [22]. Další možností je Nasdaq Clearing nebo JAO.

2.12 Možnost Hedgingu

Požadavky na zajištění (hedging) ze strany průmyslu a domácností na straně poptávky se liší od požadavků obnovitelných a konvenčních výrobců na straně nabídky. Pochopení těchto zajišťovacích potřeb je v dalších částech zásadní pro stanovení splatnosti a objemů přeshraničních produktů. Pokud by provozovatelé přenosových soustav nabízeli objemy s dostatečným předstihem před zajišťovacími potřebami účastníků trhu, riskovali by, že budou tyto přeshraniční produkty prodávat s výraznou slevou („moc levně“) kvůli nedostatku přirozené poptávky, což by nutilo obchodníky s komoditami tato množství přijmout se slevou [7].

Je důležité nezaměňovat zajišťování s fyzickým nákupem nebo prodejem elektřiny. Podstata cenového zajišťování spočívá v minimalizaci rizika, spojeného s nepředvídanými změnami cen, které by mohly ovlivnit peněžní toky společnosti. Tato strategie je známá jako „proxy hedging“. V oblasti elektroenergetiky může proxy hedging zahrnovat geografické strategie (například uzavření forwardového kontraktu v nabídkové zóně jiné, než je vlastní), přístup založený na časovém hledisku (využití forwardů s blízkou dodávkou k zajištění budoucí výroby) nebo metody založené na komoditách (například obchodování se zemním plynem nebo povolenkami na emise oxidu uhličitého namísto elektřiny) [7]. Proxy hedging je sice užitečný, ale ze své podstaty zahrnuje základní riziko. To znamená, že proxy hedging není bezchybný a možnost, že se cena proxy odchýlí od skutečného produktu, je rizikem, které přebírá subjekt, který proxy hedging používá. Přeshraniční proxy hedging může chránit před cenovými výkyvy, které ovlivňují více trhů současně, ale nechrání před výkyvy cenových rozdílů mezi těmito trhy.

V případě, že by pro virtuální uzel byly využívány FTR obligace, byl by možný tzv.: *Perfect hedge*, neboli dokonalé zajištění, což je strategie určená k úplné kompenzaci cenových rizik spojených s poplatky za přenos mezi různými tržními zónami. Při využití FTR obligací zaručují držitelé pevnou platbu za každou jednotku elektřiny přenesenou mezi konkrétními body bez ohledu na skutečné tržní ceny přenosu. Toto uspořádání zajišťuje, že držitel FTR obligací je plně chráněn před výkyvy v nákladech na přenos. Tím, že držitel obdrží pevné platby, může dokonale zajistit svou expozici vůči riziku změn cen na trhu s elektřinou, čímž se jeho finanční výsledky stanou předvídatelnými a stabilními. Na rozdíl od FTR opcí, které poskytují pouze právo, nikoliv však povinnost inkasovat platby, FTR obligace zajišťují povinnou finanční ochranu proti kolísání cen a nabízejí spolehlivou metodu řízení finančních rizik při obchodování s elektřinou pomocí virtuálního uzlu.

■ 2.13 Příjmy z přetížení

Provozovatelé přenosových soustav (PPS) získávají příjmy z přetížení (Congestion Income, CI) z různých tržních činností. V rámci metodologie CACM (EU) 2015/1222 [23] vznikají příjmy z přetížení především z procesů propojení denních trhů a v rámci obchodů na trhu vnitrodenním. Tento příjem vzniká proto, že se v těchto procesech provádí optimalizace párování nabídek v různých nabídkových zónách, čímž se maximalizuje celková efektivita a minimalizuje přetížení. Na rozdíl od propojení trhů NTC, kde jsou výpočty příjmů specifické pro jednotlivé hranice a zahrnují vynásobení cenových rozpětí obchodními toky, přístup založený na tocích používaný v CACM nepřiděluje příjmy z přetížení na základě jednotlivých hranic, ale agreguje čisté pozice napříč nabídkovými zónami a považuje příjmy z přetížení za regionální, nikoli místní jev. Výsledný příjem z přetížení se pak rozděluje mezi provozovatele přenosových soustav podle předem stanovených klíčů, což je v souladu s evropskými regulačními předpisy, jejichž cílem je harmonizovaný trh s energií [23]. Pro výpočet příjmu z přetížení v rámci virtuálního uzlu je použita metodologie CID-FCA (Congestion income distribution - forward capacity allocation), která se zabývá takzvaným „Long-Term Congestion Income“, neboli dlouhodobým příjmem z přetížení, jelikož virtuální uzel je produktem dlouhodobým. Pro každou příslušnou tržní časovou jednotku v rámci aukčního produktového období se příjem z přetížení generovaný na hranici nabídkové zóny ve směru využití vypočítá vynásobením mezní ceny příslušné aukce celkovými dlouhodobými přenosovými právy v MW přidělenými pro danou tržní časovou jednotku, s přihlédnutím k případnému období snížení. Provozovatelé přenosových soustav na obou stranách hranice nabídkové zóny obdrží každý 50 % příjmů z dlouhodobého přetížení [24]. Existenci příjmů z přetížení je sice důležité zmínit, avšak tento problém se týká více dlouhodobé flow-based alokace kapacit (LTFBCA) a nebudu se jím v práci dále zabývat.

■ 2.14 Výpočet ekonomického welferu

Ekonomický welfare se zabývá tím, jak alokace zdrojů a zboží ovlivňuje blahobyt společnosti. Přímo souvisí se studiem ekonomické efektivnosti a rozdělování příjmů a s tím, jak tyto prvky ovlivňují celkový blahobyt jednotlivců v rámci ekonomiky. V souvislosti s virtuálním uzlem je důležité si položit otázku, zda máme příjmy z přetížení počítat do „congestion income“ nebo ne. Tento problém je však závislý na vznikající metodologii a dopady se bez odpovídajících dat nedají stanovit [25]. Samotný ekonomický welfare je výstupem flow-based alokace kapacit, kde je maximalizace ekonomického welfaru účelovou funkcí.

■ 2.15 Sekundární trh

Zavedení virtuálního uzlu by mohlo významně ovlivnit sekundární trh včetně mimoburzovních platforem, JAO a energetických burz. Uvažované dopady na sekundární trh jsou následující:

1. Zvýšená likvidita: Virtuální uzel by mohl centralizovat obchodování, což by mělo díky agregaci nákupních a prodejních nabídek v širší geografické oblasti za následek zvýšení

likvidity a mohlo by pozitivně ovlivnit volatilitu cen.

2. Cenová transparentnost: S využitím centralizovaného obchodního místa by se mohla zvýšit cenová transparentnost, což by vedlo k efektivnějšímu zjišťování cen na primárních i sekundárních trzích.
3. Harmonizace cen: Virtuální uzel by mohl vést k větší harmonizaci cen v různých regionech a snížení často existujících rozdílů na decentralizovaných trzích.
4. Snížení transakčních nákladů: Zvýšená likvidita a transparentnost by mohly snížit transakční náklady, čímž by se obchodování stalo efektivnějším a dostupnějším.
5. Dopad na existující smlouvy: Existující smlouvy by mohly být ovlivněny zavedením nových cenových indexů nebo referenčních hodnot stanovených virtuálním uzlem, což by mohlo vést k úpravám smluvních podmínek nebo jejich ocenění.

Celkově by zavedení virtuálního uzlu mohlo změnit dynamiku obchodování na sekundárním trhu a podpořit integrovanější a efektivnější tržní prostředí.

Kapitola 3

Definice problému

V praktické části diplomové práce ověřím několik klíčových myšlenek fungování virtuálního uzlu. V první řadě vytvořím cenový virtuální uzel pro region Core různými metodami výpočtu a následně jeho varianty porovnam s přirozenými evropskými fyzickými uzly, jako jsou například Německo, Francie, Maďarsko nebo Česko. Fyzický uzel nahrazuje vytvářený virtuální uzel, tedy budeme-li uvažovat německou obchodní zónu za fyzický uzel, srovnáváme všechny ceny v ostatních zemích vůči ceně německé. Jako další bude v práci analyzován dopad flow-based metody přidělování kapacit na virtuální uzel, kde budu sledovat, jestli změna polohy virtuálního uzlu jakkoliv ovlivní chování uzlu, nebo zda na jeho poloze nezáleží. V poslední řadě provedu srovnání přínosů pro obchodování s aktuálně používaným systémem dlouhodobého obchodování.

3.1 Metodologie

V následujících bodech je popsána veškeré metodologie potřebná k analýze a simulaci virtuálního uzlu.

3.1.1 Lineární programování

Obvykle je vhodné vyjádřit lineární program v určitém speciálním formátu, který povoluje pouze určité typy omezení. Pro takové formulace se často vyžadují algoritmy určené k jejich řešení. Jeden z těchto speciálních formátů je takový, kde minimalizujeme (nikoliv maximalizujeme) a povolujeme pouze omezení ve formě \geq (větší nebo rovno).

$$\min\{\mathbf{c}^T \mathbf{x} \mid \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \mathbf{Ax} \geq \mathbf{b}\}, \quad (3.1)$$

kde $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^m$, $\mathbf{c} \in \mathbb{R}^n$. Zápis $\mathbf{Ax} \geq \mathbf{b}$ značí, že pro každé $i = 1, \dots, m$ není i -tá složka vektoru \mathbf{Ax} menší než i -tá složka vektoru \mathbf{b} .

Každý lineární program lze snadno převést na tento tvar pomocí následujících úprav:

- Maximalizaci funkce $\mathbf{c}^T \mathbf{x}$ nahradíme minimalizací funkce $-\mathbf{c}^T \mathbf{x}$.
- Nerovnost $\mathbf{a}^T \mathbf{x} \leq b$ nahradíme nerovností $-\mathbf{a}^T \mathbf{x} \geq -b$.

- Rovnost $\mathbf{a}^T \mathbf{x} = b$ nahradíme dvěma nerovnostmi $\mathbf{a}^T \mathbf{x} \geq b$, $-\mathbf{a}^T \mathbf{x} \geq -b$.

Další často používaný speciální tvar je tzv. rovnicový tvar, ve kterém jsou všechna omezení rovnosti a zároveň jsou všechny proměnné nezáporné. To se zapisuje jako:

$$\min\{\mathbf{c}^T \mathbf{x} \mid \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}, \mathbf{x} \geq 0\}. \quad (3.2)$$

Tvar (3.1) lze převést na tento tvar pomocí dvou úprav, při kterých jsou definovány nové proměnné:

- Nerovnost $\mathbf{a}^T \mathbf{x} \geq b$ je nahrazena dvěma omezeními $\mathbf{a}^T \mathbf{x} - \mathbf{u} = b$, $\mathbf{u} \geq 0$. Pomocné proměnné \mathbf{u} se nazývají slackové proměnné.
- Neomezená proměnná $x \in \mathbb{R}$ je rozdělena na dvě nezáporné proměnné $x_+ \geq 0$, $x_- \geq 0$ přidáním podmínky $x = x_+ - x_-$.

Úloha, která vznikne z původní úlohy pomocí těchto úprav má stejnou hodnotu optimálního řešení jako původní úloha. To znamená, že obě úlohy mají stejné optimální hodnoty a lze snadno a rychle získat argument optimálního řešení původní úlohy z argumentu optimálního řešení nové úlohy [26].

3.1.2 Matematická formulace algoritmů dlouhodobé alokace

Cílové funkce pro dlouhodobý algoritmus Flow-based alokace jsou vyjádřeny v matematickém zápisu jako následující problémy lineárního programování (LP): [27]:

Účelová funkce:

$$\max \left\{ \sum_{x,y,cnec} [p_b(x, y, b) \cdot d_a(x, y, b)] \right\} \quad (3.3)$$

Omezení množství přijatých nabídek:

$$0 \leq d_a(x, y, b) \leq d_r(x, y, b) \quad (3.4)$$

Kde:

x : nabídková zóna zdroje pro nabídku b

y : nabídková zóna pro nabídku b

b : nabídka b v rámci dlouhodobé aukce

$p_b(x, y, b)$: nabídková cena pro nabídku b [EUR/MW]

$d_r(x, y, b)$: požadované množství pro nabídku b [MW]

$d_a(x, y, b)$: přijaté množství pro nabídku b [MW].

Základní omezení přenosové kapacity:

$$\sum (PTDF_{x,y,b} \cdot d_a(x, y, b)) \leq RAM_{cnec} \quad (3.5)$$

$$PTDF_{x,y,cnec}^+ = \max(0, PTDF_{x,y,cnec}) \quad (3.6)$$

Kde:

RAM_{cnec} : Zbývající dostupná rezerva CNEC [MW]

$PTDF_{x,y,cnec}$: zónový PTDF nabídkových zón x a y u CNEC

$PTDF_{x,y,cnec}^+$: kladný zónový PTDF nabídkových zón x a y u CNEC

Složená hraniční omezení (externí omezení) pro \forall orientovanou složenou hranici mezi skupinou nabídkových zón xx a skupinou nabídkových zón yy :

$$\sum_{x,y,b} da(xx, yy, b) \leq EC_{xx \rightarrow yy} \quad (3.7)$$

Kde:

xx : zdrojová skupina nabídkových zón nabídky b ,

yy : cílová skupina nabídkových zón nabídky b ,

$da(xx, yy, b)$: přijaté množství pro nabídku b

$EC_{xx \rightarrow yy}$: externí omezení, tj. společná dostupná přenosová kapacita pro složenou hranici a směr mezi skupinami nabídkových zón xx a yy [MW]

Omezení skupin CNEC pro \forall skupinu CNEC, tj. \forall skupinový síťový prvek s omezeními (gnec):

$$\sum_{x,y,b} (PTDF_{x,y,cnec}^+ \cdot da(x, y, b)) \leq RAM_{cnec} \quad (3.8)$$

Kde:

RAM_{cnec} : Zbývající dostupná rezerva omezení GNEC [MW]

$PTDF_{x,y,cnec}$: zónový PTDF nabídkových zón x a y u omezení GNEC

$PTDF_{x,y,cnec}^+$: kladný zónový PTDF nabídkových zón x a y u omezení GNEC

Výpočet zúčtovací ceny

$$cp(x, y)_{MTU} = \sum_{cnec} PTDF_{x,y,cnec}^+ \cdot SP_{cnec} \quad (3.9)$$

Kde:

$cp(x, y)_{MTU}$: Clearingová cena na hranici $x \rightarrow y$, na tržní časovou jednotku (EUR)

■ 3.1.3 Výpočet faktorů distribuce přenosu energie a referenčních toků

1. Flow-based výpočet je centralizovaný výpočet, který poskytuje dvě hlavní třídy parametrů potřebných pro definici flow-based domény: faktory distribuce přenosu energie (PTDFs) a zbývající dostupné marže (RAMs).

2. V souladu s článkem 29(3)(a) [28] Nařízení o společném trhu s elektřinou (CACM), CCC vypočítá dopad změny čisté pozice obchodních zón na přenos energie na každém kritickém prvku sítě (CNEC). Tento vliv se nazývá zone-to-slack PTDF. Tento výpočet se provádí z obecného modelu sítě (CGM) a klíče pro posun při generování (GSK) podle metodologie o výpočtu day-ahead kapacity pro region Core dle článku 9.

3. Faktory zone-to-slack PTDF jsou vypočítány nejprve výpočtem faktorů node-to-slack PTDF pro každý bod definovaný v GSK. Tyto bodové PTDF jsou odvozeny změnou příkonu příslušného bodu v CGM a zaznamenáním rozdílu v přenosu energie na každém CNEC (vyjádřený jako procentuální změna příkonu). Tyto node-to-slack PTDFs jsou převedeny na faktory zone-to-slack PTDF násobením podílu každého bodu v GSK odpovídajícím bodovým PTDF a sečtením těchto součinů. Tento výpočet je matematicky popsán následovně:

$$PTDF_{zone-to-slack} = PTDF_{node-to-slack} \times GSK_{node-to-zone} \quad (3.10)$$

kde:

$PTDF_{zone-to-slack}$ matice faktorů zone-to-slack PTDF (sloupce: obchodní zóny; řádky: CNECs)

$PTDF_{node-to-slack}$ matice bodových faktorů zone-to-slack PTDF (sloupce: body; řádky: CNECs)

$GSK_{node-to-zone}$ matice obsahující GSKs všech obchodních zón (sloupce: obchodní zóny; řádky: body; součet každého sloupce roven jedné)

4. Faktory zone-to-slack PTDF, jak jsou vypočítány výše, lze také vyjádřit jako faktory zone-to-zone PTDF. Faktor zone-to-slack PTDF A_t představuje vliv změny čisté pozice obchodní zóny A na CNEC_{*i*} a předpokládá obchodní výměnu mezi obchodní zónou a volným uzlem. Faktor zone-to-zone PTDF AB_t představuje vliv změny komerční výměny z obchodní zóny A do obchodní zóny B na CNEC_{*i*}. Faktor zone-to-zone PTDF AB_t lze odvodit z faktorů zone-to-slack PTDF následovně:

$$PTDF_{A \rightarrow B, t} = PTDF_{A, t} - PTDF_{B, t} \quad (3.11)$$

5. Maximální faktor zone-to-zone PTDF pro CNEC ($TDF_{z2zmax, t}$) je maximální vliv, který má jakákoliv výměna v Core na příslušný CNEC, včetně výměn přes přímé stejnosměrné interkonektory, které jsou integrovány podle článku 12:

$$PTDF_{z2zmax, t} = \max\left(\max_{A \in BZ}(PTDF_{A, t}) - \min_{A \in BZ}(PTDF_{A, t}), \max_{B \in HVDC}(PTDF_{B, t})\right) \quad (3.12)$$

Kde:

$PTDF_{A,I}$ faktor zone-to-slack PTDF obchodní zóny A na CNEC

HVDC - sada HVDC interkonektorů

BZ sada všech obchodních zón

$\max_{A \in BZ}(PTDF_{A,I})$ A BZ maximální faktor zone-to-slack PTDF Core na CNEC_i

$\min_{A \in BZ}(PTDF_{A,I})$ A BZ minimální faktor zone-to-slack PTDF Core na CNEC_i

6. Referenční tok (F_{ref}) je tok činného výkonu na CNECu založený na CGM. V případě CNEC bez nepředvídatelných událostí se F_{ref} simuluje přímým provedením výpočtu zátěže stejnosměrného proudu na CGM, zatímco v případě CNEC s nepředvídatelnou událostí se F_{ref} simuluje nejprve uplatní zadaná nepředvídatelná událost a poté se provede výpočet stejnosměrného toku zátěže [28].

7. Očekávaný tok F_i v komerční situaci i je tok činného výkonu CNEC založený na toku F_{ref} a odchylce mezi komerční situací zvažovanou v CGM (referenční obchodní situace) a obchodní situací i :

$$\vec{F}_i = \vec{F}_{ref} + PTDF(\vec{N}P_i - \vec{N}P_{ref}) \quad (3.13)$$

Kde:

F_i - očekávaný proud na CNEC v obchodní situaci i

F_{ref} - proud na CNEC v CGM (referenční proud)

PTDF matice faktorů distribuce přenosu energie

$\vec{N}P_i$ - čistá pozice Core na obchodní zónu v obchodní situaci i

$\vec{N}P_{ref}$ - čistá pozice Core na obchodní zónu v referenční obchodní situaci

3.2 Předpoklady

Přestože by bylo vhodné prozkoumat v práci všechny vlastnosti virtuálního uzlu, některé z vlastností existují pouze v teoretické rovině, kdy ani sami provozovatelé přenosových soustav a účastníci trhu netuší, v jaké podobě budou všechny vlastnosti definované. Příkladem takovéto vlastnosti může být kalkulace ceny virtuálního uzlu pomocí systémové ceny, kdy by takováto cena musela vycházet z dosud neexistující, nově vytvořené metodiky a tak se nebudu touto cenou dále zabývat. Naopak k výpočtu cen pomocí jednotlivých průměrů stačí tržní data dostupná z ENTSO-E [29] v sekci Transmission → Day-ahead prices. Vstupní data pro zobchodovaného množství jsou dostupná na entso-e Transparency platform [29] v sekci Load → Total Load - Day Ahead / Actual. V práci byla použita tato data z let 2019 - 2023.

Dalším předpokladem je, že virtuální uzel bude obchodován jako obligace namísto opcí. Důvodem je návrh ACERu na přechod z FTR-options na FTR-obligations, kde výhodou obligací je možnost plného finančního zajištění (full financial firmness) [1].

Výpočet přeshraničních kapacit provedu pomocí flow-based statistické metody. Důvodem je dostupnost dat pro simulaci a fakt, že má-li být uzel doopravdy virtuální, tak by při použití výpočtu NTC byly jiné ceny v závislosti na naší poloze od virtuálního uzlu, protože virtuální uzel by musel být reálně umístěn do regionu Core a jeho hranice nějak ocenit. Poté

by pro propojení mezi uzlem a zónou musely být zaplacený všechny kapacity na přecházených hranicích, jak ze zóny A do uzlu, tak i z uzlu do jiné obchodní zóny.

Pro ověření závislosti „geografické polohy“ virtuálního uzlu na výpočet kapacit budou použita data pro rok 2023, jelikož pro jiný celý rok nejsou data dostupná, protože alokace pomocí flow-based začala být v regionu Core aplikována až v polovině roku 2022 [30].

3.3 Návrhy opatření proti očekávaným problémům

Simulacemi a analýzou dat chci ověřit maximum zmíněných vlastností virtuálního uzlu, především však korelaci ceny virtuálního uzlu s jednotlivými zeměmi v regionu Core, následně prozkoumám jednotlivé korelace mezi likvidnějšími zónami (které by potenciálně mohly být náhradou za cenu virtuálního uzlu) a ostatními zónami v regionu Core. Pro jeden z roků zobrazím sezónní korelace, následně prozkoumám, jestli záleží na geografické poloze virtuálního uzlu, tedy je-li jeho vliv závislý na charakteru sítě nebo ne a na závěr ukáži na příkladu důvody, proč by měly být aukce pravidelnější než jedou za rok.

3.3.1 Stanovení ceny virtuálního uzlu

Pro vytvoření cenového indexu „virtuální uzel“ je nutné znát ceny z denního trhu pro jednotlivé státy z regionu Core a společně s nimi množství zobchodované energie pro vytvoření váženého průměru. Z dat následně vytvořím index virtuálního uzlu pro tři průměry (aritmetický, vážený a klouzavý). Jako váhy beru množství zobchodovaných MW a u výpočtu klouzavého průměru pro jednotlivé dny použiji k průměrování cen krok čtyři, tedy udělám průměr ze čtyř za sebou jdoucích dní. Hodnoty pro jednotlivé dny budou dostupné v příloženém modelu, kde budou nejdůležitějším výstupem korelační analýzy.

3.3.2 Korelační analýza virtuálního uzlu

Má-li zavedení virtuálního uzlu pomoci problému s likviditou, je důležité, aby takto vytvořený produkt byl atraktivní pro obchodníky z jednotlivých zón. Pro intuitivní porovnání těchto hodnot bude vhodné je graficky zobrazit. Za tímto účelem využiji korelační analýzy s cílem přiblížit jednotlivé korelace co nejlépe jedné s následným ujištěním, že hodnoty jsou statisticky významné. Korelace lze zkoumat v několika rovinách. První rovinou je porovnání jednotlivých korelačních matic, kde budu srovnávat korelace indexu mezi jednotlivými zeměmi a následně vyberu čtyři obchodní zóny (DE, HU, FR a CZ, jakožto potenciálně nejlikvidnější zóny), nahradím jimi náš index a znovu budu sledovat korelaci cen uvnitř jednotlivých států, jakoby byla zóna virtuálním uzlem. Jelikož je vytvořený cenový index průměr všech cen jednotlivých zemí, dá se očekávat vysoká korelace mezi cenami a indexem. Ověřím tedy, kolik zemí mělo v jednotlivých letech korelaci, silnou (60 % - 79 %) a velmi silnou korelaci (> 80 %) dle Pearsova rozdělení korelačních koeficientů [31]. Tento přehled pro jednotlivé virtuální i fyzické uzly ukáží na citlivostních analýzách, kde bude názorně vidět, nakolik jednotlivé indexy korelují s cenami v nabídkových zónách. Očekávám-li kladnou korelaci u všech výstupů,

bude korelační analýza naznačovat, jak moc je vytvořený produkt atraktivní pro jednotlivé obchodní zóny regionu Core, kdy při příliš nízké korelaci jednotlivých zemí s indexem by mohlo být výhodnější nakoupit jiný produkt. Pomocí citlivostní analýzy budu zkoumat počty zemí, co korelují s indexem a určím nejlépe zvolenou metodu výpočtu ceny virtuálního uzlu.

Korelační analýzu následně provedu pro vypočítané průměry pouze v rámci jednoho roku, abych prozkoumal sezónní charakter indexu. Chtěl bych, aby index napříč rokem koreloval co možná nejvíce, jelikož koupíme-li roční, dvouletý nebo až tříletý produkt, tak bychom chtěli vědět, nakolik náš index koreluje napříč jednotlivými roky i celým obdobím s aktuálními cenami na denním trhu.

■ 3.3.3 Analýza Flow-based výpočtu alokace kapacit pro virtuální uzel

Prvním důležitým krokem je formulace úlohy flow-based alokace kapacit pro virtuální uzel jakožto úlohy lineárního programování, účelová funkce a omezující podmínky mají následující tvar:

Účelová funkce:

$$\max \left\{ \sum [p_b(x, VH, b) \cdot d_a(x, VH, b)] \right\} \quad (3.14)$$

První omezující podmínka:

$$\sum (PTDF_{x,VH,b} \cdot d_a(x, VH, b)) \leq RAM_{cnec} \quad (3.15)$$

Druhá omezující podmínka:

$$PTDF_{x,VH,cnec}^+ = \max(0, PTDF_{x,VH,cnec}) \quad (3.16)$$

Třetí omezující podmínka:

$$\sum_{x,VH,b} (d_a(x, VH, b)) = 0 \quad (3.17)$$

Při zpětném pohledu na omezující podmínky v metodologii [3.1.2] si lze všimnout nutnosti přidat třetí omezující podmínku, která definuje, že součet veškerého přijatého množství pro nabídku b musí být nula. Všechny toky, které vtečou do virtuálního uzlu z něj musí vytéct ven, protože takovýto bod v realitě neexistuje, zatímco toky jsou reálné a zmizet nemohou.

Analýza flow-based alokace kapacit pro virtuální uzel odhalí, jestli záleží na jeho poloze nebo ne. Polohu virtuálního uzlu udává rovnice (3.10) a chci ověřit jestli:

$$\sum_{x,VH,b} (PTDF_{x,y,b} \cdot d_a(x, y, b)) \leq RAM_{cnec} \quad (3.18)$$

Bude mít stejné výsledky flow-based alokace jako následující rovnice, kde κ je přičítaná konstanta:

$$\sum_{x,VH,b} ((PTDF_{x,y,b} + \kappa) \cdot d_a(x, y, b)) \leq RAM_{cnec} \quad (3.19)$$

Matematický důkaz:

$$\sum_{x,VH,b} ((PTDF_{x,VH,b} + \kappa) \cdot d_a(x, VH, b)) = \sum_{x,VH,b} (PTDF_{x,VH,b} \cdot d_a(x, VH, b)) \quad (3.20)$$

$$\sum_{x,VH,b} (PTDF_{x,VH,b} \cdot d_a(x, VH, b)) + \sum_{x,VH,b} (\kappa \cdot d_a(x, VH, b)) = \sum_{x,VH,b} (PTDF_{x,VH,b} \cdot d_a(x, VH, b)) \quad (3.21)$$

$$\sum_{x,VH,b} (PTDF_{x,VH,b} \cdot d_a(x, VH, b)) + \kappa \cdot \sum_{x,VH,b} (d_a(x, VH, b)) = \sum_{x,VH,b} (PTDF_{x,VH,b} \cdot d_a(x, VH, b)) \quad (3.22)$$

Z rovnic (3.17) a (3.22) je vidět, že oba výrazy se rovnají, protože po vynásobení libovolného čísla nulou, nám vyjde nula. Toto tvrzení ověřím simulací, kde k výpočtu úlohy lineárního programování využiji programem v Pythonu za pomoci solveru textitGurobi optimizer [32]. Pro zřetelnou vizualizaci výsledku předpokládám, že cena v jedné zóně je nulová a ve všech ostatních zónách je cena rovna jedné, kapacita v celém regionu je omezena na 20 000 MW, jakožto hrubý odhad dostupné kapacity a konstanta κ je rovna hodnotě 0,3.

3.4 Četnost aukcí

Analýzou obchodovaných call opcí obchodovaných v regionu Core, jakožto obdobného dlouhodobého produktu, se pokusím objasnit problémy týkající se četnosti aukcí. Na trzích s energiemi hraje četnost aukcí, kde se obchoduje s finančními nástroji, jako jsou FTR nebo opce, zásadní roli při určování dostupnosti zajišťovacích produktů. Sporadický či nepravidelný harmonogram aukcí může vést k omezenému výběru dostupných možností zajištění. Pro obchodníky se tento nedostatek promítá do menšího počtu příležitostí najít produkt, který odpovídá jejich potřebám k zajištění vlastní rizikové pozice. Pravidelnější četnost aukcí by měla zajišťovat rovnováhu mezi poskytováním dostatečného množství příležitostí k obchodování a nezahlcením trhu příliš častými aukcemi, které by mohly oslabit význam jednotlivých událostí. Fakt, jestli se obchodníci budou nebo nebudou zajišťovat, má kritický význam pro celé fungování takto spojeného trhu.

Rozhodnutí nezajistit se z důvodu nedostatečných možností zajištění má širší dopady na dynamiku trhu, zejména na likviditu. Když se obchodníci nebudou pravidelně zajišťovat, tak se celková účast na trhu sníží, což následně vede ke snížení likvidity. Likvidita má pro zdravý trh zásadní význam, protože usnadňuje snadnější a efektivnější obchodování, aniž by způsobovala výrazné změny cen. Nižší likvidita může mít za následek zvýšenou volatilitu, která zase snižuje atraktivitu trhu pro potenciální účastníky, což vytváří začarovaný kruh snižující se tržní aktivity. Je důležité správně nastavit četnost aukcí tak, aby vyhovovala všem účastníkům trhu.

Kapitola 4

Výsledky

4.1 Korelační analýza

Prvním krokem pro zkoumání korelačních analýz bylo vytvoření indexu virtuálního uzlu a to pomocí aritmetického, váženého a klouzavého průměru. Následně jsem pro ceny v letech 2019 až 2023 provedl korelaci mezi vytvořenými indexy a cenami v jednotlivých nabídkových zónách. Přes předpoklad, že tržní ceny by měly být na trhu korelovány, byl pro každý krok proveden jednostranný párový t-test na hladině významnosti $\alpha = 5\%$, kterým prošly všechny korelace, kdy p-hodnoty ani v jednom případě nepřesáhly hodnotu 0,001 a bylo tím potvrzeno, že sledované korelace jsou statisticky významné. Postupně nyní popíši jednotlivé korelační tabulky pro různé výpočty průměrů, jaké nabídkové zóny korelují nejvíce a potenciální dopad na účastníky trhu v jednotlivých zónách. Sledováním korelací tohoto indexu chci ukázat, jak atraktivní je produkt pro účastníky trhu v jednotlivých nabídkových zónách. Atraktivitou je zde myšlena stálost a předvídatelnost produktu, kterou následně lépe demonstruji na korelačních analýzách, stejně jako vyšší četnost aukcí a možnost perfektního zajištění.

V druhé části korelačních analýz ověřuji, jestli je vytváření nového indexu vůbec nutné a zda již na dnešním trhu neexistuje nabídková zóna resp. dále fyzický uzel, který by mohl zastat roli virtuálního uzlu. Za fyzické uzly byly vybrány obchodní zóny (DE, FR, CZ a HU), jakožto přirozeně likvidní obchodní zóny regionu Core [33].

4.1.1 Korelační analýza virtuálního uzlu

První vyhotovenou korelační analýzou je korelace mezi virtuálním uzlem spočteným jako aritmetický průměr cen s cenami v jednotlivých nabídkových zónách. Pro lepší orientaci jsou data vynesena v teplotních mapách, kde jsou červeně korelace s nejmenší hodnotou a tmavě zeleně s hodnotou největší. Tabulka [4.1] ukazuje, že v letech 2019 až 2023 je ve většině nabídkových zón a téměř ve všech zemích zvyšující se korelační trend, kdy nejbližší jedné je korelace v letech 2021 a 2022. Maximálně korelovanou nabídkovou zónou v regionu Core je při výpočtu indexu pomocí aritmetického průměru Rakousko.

Arithmetické průměry	AT	BE	CZ	HR	FR	DE-LU	HU	NL	PL	RO	SK	SI
2019	0,81	0,64	0,85	0,78	0,77	0,83	0,87	0,74	0,72	0,83	0,85	0,84
2020	0,96	0,92	0,97	0,89	0,94	0,91	0,92	0,91	0,78	0,91	0,96	0,93
2021	0,99	0,97	0,97	0,96	0,97	0,97	0,98	0,97	0,88	0,95	0,97	0,98
2022	0,99	0,97	0,97	0,96	0,97	0,97	0,98	0,97	0,88	0,95	0,97	0,98
2023	0,98	0,93	0,97	0,93	0,92	0,96	0,95	0,91	0,84	0,86	0,97	0,98

Obrázek 4.1: Teplotní mapa s korelacemi mezi virtuálním uzlem (vypočteným aritmetickým průměrem) a cenami v jednotlivých nabídkových zónách

Tabulka [4.2] zobrazuje korelace mezi virtuálním uzlem vypočteným pomocí váženého průměru a cenami v jednotlivých zónách. Nejvýznamněji stále koreluje Rakousko. Po zvážení indexu celkovým zatížením na denním trhu se v letech zlepšila korelace hlavně v Německu a Francii, což se dalo očekávat, jelikož mají nejvyšší váhy ve váženém průměru, kdežto ve všech ostatních zemích se v letech korelace zhoršila. Příklad znormovaných vah pro rok 2023 jsou vidět v tabulce [4.1].

Vážené průměry	AT	BE	CZ	HR	FR	DE-LU	HU	NL	PL	RO	SK	SI
2019	0,82	0,67	0,84	0,84	0,79	0,71	0,76	0,73	0,74	0,73	0,81	0,72
2020	0,95	0,92	0,95	0,87	0,95	0,93	0,91	0,90	0,78	0,89	0,94	0,94
2021	0,99	0,97	0,95	0,94	0,98	0,98	0,97	0,96	0,86	0,94	0,95	0,98
2022	0,99	0,97	0,95	0,94	0,98	0,98	0,97	0,96	0,86	0,94	0,95	0,98
2023	0,97	0,94	0,96	0,92	0,94	0,96	0,94	0,91	0,84	0,84	0,96	0,97

Obrázek 4.2: Teplotní mapa s korelacemi mezi virtuálním uzlem (vypočteným váženým průměrem) a cenami v jednotlivých nabídkových zónách

Země	AT	BE	CZ	DE-LU	FR	HR	HU	NL	PL	RO	SK	SI
Váhy_norm	0,10	0,15	0,11	1,00	0,92	0,01	0,07	0,22	0,34	0,09	0,03	0,00

Tabulka 4.1: Váhy pro jednotlivé ceny váženého průměru pro rok 2023

Posledním vytvářeným indexem byl virtuální uzel počítaný pomocí klouzavého průměru s krokem čtyř dnů do minulosti, výsledky korelační analýzy jsou zobrazeny v tabulce [4.3]. Opět nastává převážně rostoucí trend ve všech nabídkových zónách a nejvyšší korelace je v letech 2021 a 2022.

Klouzavé průměry	AT	BE	CZ	HR	FR	DE-LU	HU	NL	PL	RO	SK	SI
2019	0,74	0,59	0,78	0,71	0,74	0,76	0,79	0,66	0,70	0,75	0,77	0,77
2020	0,90	0,87	0,91	0,83	0,91	0,85	0,86	0,84	0,74	0,83	0,91	0,87
2021	0,97	0,95	0,94	0,93	0,96	0,95	0,95	0,94	0,85	0,92	0,94	0,96
2022	0,97	0,95	0,94	0,93	0,96	0,95	0,95	0,94	0,85	0,92	0,94	0,96
2023	0,90	0,89	0,88	0,85	0,90	0,86	0,84	0,84	0,76	0,74	0,87	0,89

Obrázek 4.3: Teplotní mapa s korelacemi mezi virtuálním uzlem (vypočteným klouzavým průměrem) a cenami v jednotlivých nabídkových zónách

V případě zobrazení teplotní mapy s korelační analýzou pro všechny tři průměry dostanu tabulku [4.4]. V tomto případě pak lze sledovat, jaká metoda výpočtu ceny by byla pro virtuální uzel nejvíce korelována, to v tabulce znázorňují zeleně vybarvená pole, kde nejvýznamnější

korelace je pro virtuální uzel počítaný aritmetickým průměrem. Tyto závěry budou lépe patrné z citlivostních analýz, kde bude sledován počet nekorelovaných hodnot pro jednotlivé průměry. Z celkového přehledu je patrné, že od roku 2019 se zlepšila celková dynamika trhu, kde byly ceny korelovány v některých zemích *jen silně*, ale ve většině zemí byla korelace velmi silná.

Arithmetické průměry	AT	BE	CZ	HR	FR	DE-LU	HU	NL	PL	RO	SK	SI
2019	0,81	0,64	0,85	0,78	0,77	0,83	0,87	0,74	0,72	0,83	0,85	0,84
2020	0,96	0,92	0,97	0,89	0,94	0,91	0,92	0,91	0,78	0,91	0,96	0,93
2021	0,99	0,97	0,97	0,96	0,97	0,97	0,98	0,97	0,88	0,95	0,97	0,98
2022	0,99	0,97	0,97	0,96	0,97	0,97	0,98	0,97	0,88	0,95	0,97	0,98
2023	0,98	0,93	0,97	0,93	0,92	0,96	0,95	0,91	0,84	0,86	0,97	0,98
Vážené průměry	AT	BE	CZ	HR	FR	DE-LU	HU	NL	PL	RO	SK	SI
2019	0,82	0,67	0,84	0,84	0,79	0,71	0,76	0,73	0,74	0,73	0,81	0,72
2020	0,95	0,92	0,95	0,87	0,95	0,93	0,91	0,90	0,78	0,89	0,94	0,94
2021	0,99	0,97	0,95	0,94	0,98	0,98	0,97	0,96	0,86	0,94	0,95	0,98
2022	0,99	0,97	0,95	0,94	0,98	0,98	0,97	0,96	0,86	0,94	0,95	0,98
2023	0,97	0,94	0,96	0,92	0,94	0,96	0,94	0,91	0,84	0,84	0,96	0,97
Klouzavé průměry	AT	BE	CZ	HR	FR	DE-LU	HU	NL	PL	RO	SK	SI
2019	0,74	0,59	0,78	0,71	0,74	0,76	0,79	0,66	0,70	0,75	0,77	0,77
2020	0,90	0,87	0,91	0,83	0,91	0,85	0,86	0,84	0,74	0,83	0,91	0,87
2021	0,97	0,95	0,94	0,93	0,96	0,95	0,95	0,94	0,85	0,92	0,94	0,96
2022	0,97	0,95	0,94	0,93	0,96	0,95	0,95	0,94	0,85	0,92	0,94	0,96
2023	0,90	0,89	0,88	0,85	0,90	0,86	0,84	0,84	0,76	0,74	0,87	0,89

Obrázek 4.4: Teplotní mapa s korelacemi mezi virtuálním uzlem a cenami zón nad všemi průměry

Dále je vidět, že Polská obchodní zóna nekoreluje tak dobře jako zóny ostatní. Je to způsobeno alokačním omezením kapacit na polských hranicích. Toto opatření je výjimka, která slouží k zachování přenosové soustavy v mezích provozní bezpečnosti a polský trh si tak uměle chrání (ovlivňuje) cenu v polské nabídkové zóně.

4.1.2 Korelační analýza fyzických uzlů

Tabulka [4.5] zobrazuje korelaci mezi cenou v zóně DE-LU a ostatními zónami, což je patrné z informace, že korelace mezi DE-LU a DE-LU je rovna jedné. Je vidět, že rok 2019 je s německými cenami korelován mnohem méně než v ostatních letech, stejně tak v případě polské obchodní zóny, což je však způsobeno intervencemi alokačních omezení kapacit na polských hranicích. Překvapivá je skoro stoprocentní korelace se slovinskými cenami, ze které se dá očekávat, že slovinští obchodníci budou využívat spíše proxy hedgingu pomocí cenového spreadu mezi slovinskou a německou zónou [34]. Podobně vysoké korelace jsou patrné i u Rakouska, Maďarska a v posledních letech Slovenska.

4. Výsledky

DE = HUB	AT	BE	CZ	HR	FR	DE-LU	HU	NL	PL	RO	SK	SI
2019	0,64	0,45	0,68	0,55	0,61	1,00	0,88	0,56	0,43	0,83	0,69	0,97
2020	0,84	0,76	0,85	0,71	0,80	1,00	0,92	0,77	0,66	0,90	0,86	0,98
2021	0,96	0,92	0,92	0,90	0,93	1,00	0,97	0,92	0,82	0,94	0,92	1,00
2022	0,96	0,88	0,94	0,89	0,90	1,00	0,98	0,87	0,67	0,96	0,97	0,99
2023	0,94	0,83	0,92	0,83	0,83	1,00	0,97	0,82	0,78	0,91	0,96	0,96

Obrázek 4.5: Teplotní mapa s korelacemi mezi fyzickým uzlem (DE) a cenami v jednotlivých nabídkových zónách

V případě, kdy je fyzickým uzlem maďarská zóna, jsou patrné obdobné korelační vztahy jako u německého fyzického uzlu. Rozdílem mezi nimi je zvýšená korelace pro rumunskou a slovenskou zónu, kdežto korelace u slovinské zóny se zhoršila. Korelace v ostatních státech se změnila převážně o setinu procenta a atraktivita produktu by tedy byla velmi podobná.

HU = HUB	AT	BE	CZ	HR	FR	DE-LU	HU	NL	PL	RO	SK	SI
2019	0,67	0,50	0,73	0,59	0,66	0,88	1,00	0,62	0,46	0,93	0,76	0,88
2020	0,83	0,75	0,88	0,71	0,78	0,92	1,00	0,77	0,67	0,97	0,89	0,92
2021	0,96	0,92	0,93	0,90	0,92	0,97	1,00	0,92	0,83	0,98	0,94	0,97
2022	0,96	0,88	0,95	0,90	0,89	0,98	1,00	0,87	0,69	0,97	0,99	0,98
2023	0,93	0,82	0,90	0,81	0,81	0,97	1,00	0,81	0,78	0,90	0,96	0,96

Obrázek 4.6: Teplotní mapa s korelacemi mezi fyzickým uzlem (HU) a cenami v jednotlivých nabídkových zónách

Výsledky, kdy je fyzickým uzlem francouzská zóna, jsou na první pohled velmi ovlivněny nižší korelací mezi FR a PL v roce 2019, kde vidíme slabou korelaci rovnou 0,25. V tomto případě je vidět, jak moc jsou v polské zóně schopni ovlivnit cenu elektřiny. Nejvyšší korelaci vidíme v cenách pro rok 2021, kdy mělo nejvíce zemí korelace velmi blízké hodnotě jedna.

FR = HUB	AT	BE	CZ	HR	FR	DE-LU	HU	NL	PL	RO	SK	SI
2019	0,87	0,77	0,82	0,77	1,00	0,61	0,66	0,82	0,25	0,61	0,79	0,63
2020	0,93	0,94	0,89	0,88	1,00	0,80	0,78	0,90	0,74	0,76	0,89	0,82
2021	0,97	0,97	0,92	0,91	1,00	0,93	0,92	0,95	0,81	0,89	0,91	0,94
2022	0,92	0,87	0,88	0,86	1,00	0,90	0,89	0,85	0,61	0,85	0,89	0,91
2023	0,89	0,97	0,89	0,88	1,00	0,83	0,81	0,88	0,74	0,69	0,86	0,88

Obrázek 4.7: Teplotní mapa s korelacemi mezi fyzickým uzlem (FR) a cenami v jednotlivých nabídkových zónách

Posledním případem je volba české obchodní zóny jakožto fyzického uzlu, kde nejvyšší korelaci lze sledovat mezi tímto fyzickým uzlem a rakouskou a slovenskou obchodní zónou, což se dalo očekávat, neboť to jsou naši sousedé. Naopak polská zóna je díky alokačním omezením opět méně korelována než zbytek obchodních zón.

CZ = HUB	AT	BE	CZ	HR	FR	DE-LU	HU	NL	PL	RO	SK	SI
2019	0,89	0,68	1,00	0,84	0,82	0,68	0,73	0,77	0,38	0,69	0,94	0,69
2020	0,94	0,87	1,00	0,86	0,89	0,85	0,88	0,87	0,75	0,86	0,99	0,87
2021	0,96	0,93	1,00	0,97	0,92	0,92	0,93	0,93	0,88	0,90	0,98	0,92
2022	0,96	0,93	1,00	0,97	0,88	0,94	0,95	0,93	0,72	0,91	0,96	0,95
2023	0,96	0,90	1,00	0,90	0,89	0,92	0,90	0,87	0,82	0,80	0,96	0,95

Obrázek 4.8: Teplotní mapa s korelacemi mezi fyzickým uzlem (CZ) a cenami v jednotlivých nabídkových zónách

Pro lepší srovnání jednotlivých fyzických uzlů slouží tabulka [4.9], kde je teplotní mapa vytvořena přes všechny uzly najednou a lze tak provést srovnání a vybrat, který z fyzických uzlů by mohl být nejlepší. Po vizuálním ověření přidám tyto fyzické uzly do citlivostní analýzy k uzlům virtuálním a budu sledovat, jaký z těchto sedmi vytvořených *indexů* vychází nejlépe. V tabulce je zřejmé, že francouzská zóna má korelace větší než 0,93 převážně jen v roce 2021, kdežto ostatní tři uzly mají takto vysoké korelace jak napříč lety, tak i ve více zemích. Kdybych vzal pouze absolutní součet všech korelačních koeficientů (všechny jsou kladné a jako nový index by měly mít stejnou váhu), vyšla by pro německý fyzický uzel hodnota 51,3, maďarský 51,72, francouzský 50,84 a český 52,97. Tedy nejvíce korelované hodnoty jsou v případě použití české obchodní zóny jakožto fyzického uzlu.

DE = HUB	AT	BE	CZ	HR	FR	DE-LU	HU	NL	PL	RO	SK	SI
2019	0,64	0,45	0,68	0,55	0,61	1,00	0,88	0,56	0,43	0,83	0,69	0,97
2020	0,84	0,76	0,85	0,71	0,80	1,00	0,92	0,77	0,66	0,90	0,86	0,98
2021	0,96	0,92	0,92	0,90	0,93	1,00	0,97	0,92	0,82	0,94	0,92	1,00
2022	0,96	0,88	0,94	0,89	0,90	1,00	0,98	0,87	0,67	0,96	0,97	0,99
2023	0,94	0,83	0,92	0,83	0,83	1,00	0,97	0,82	0,78	0,91	0,96	0,96
HU = HUB	AT	BE	CZ	HR	FR	DE-LU	HU	NL	PL	RO	SK	SI
2019	0,67	0,50	0,73	0,59	0,66	0,88	1,00	0,62	0,46	0,93	0,76	0,88
2020	0,83	0,75	0,88	0,71	0,78	0,92	1,00	0,77	0,67	0,97	0,89	0,92
2021	0,96	0,92	0,93	0,90	0,92	0,97	1,00	0,92	0,83	0,98	0,94	0,97
2022	0,96	0,88	0,95	0,90	0,89	0,98	1,00	0,87	0,69	0,97	0,99	0,98
2023	0,93	0,82	0,90	0,81	0,81	0,97	1,00	0,81	0,78	0,90	0,96	0,96
FR = HUB	AT	BE	CZ	HR	FR	DE-LU	HU	NL	PL	RO	SK	SI
2019	0,87	0,77	0,82	0,77	1,00	0,61	0,66	0,82	0,25	0,61	0,79	0,63
2020	0,93	0,94	0,89	0,88	1,00	0,80	0,78	0,90	0,74	0,76	0,89	0,82
2021	0,97	0,97	0,92	0,91	1,00	0,93	0,92	0,95	0,81	0,89	0,91	0,94
2022	0,92	0,87	0,88	0,86	1,00	0,90	0,89	0,85	0,61	0,85	0,89	0,91
2023	0,89	0,97	0,89	0,88	1,00	0,83	0,81	0,88	0,74	0,69	0,86	0,88
CZ = HUB	AT	BE	CZ	HR	FR	DE-LU	HU	NL	PL	RO	SK	SI
2019	0,89	0,68	1,00	0,84	0,82	0,68	0,73	0,77	0,38	0,69	0,94	0,69
2020	0,94	0,87	1,00	0,86	0,89	0,85	0,88	0,87	0,75	0,86	0,99	0,87
2021	0,96	0,93	1,00	0,97	0,92	0,92	0,93	0,93	0,88	0,90	0,98	0,92
2022	0,96	0,93	1,00	0,97	0,88	0,94	0,95	0,93	0,72	0,91	0,96	0,95
2023	0,96	0,90	1,00	0,90	0,89	0,92	0,90	0,87	0,82	0,80	0,96	0,95

Obrázek 4.9: Teplotní mapa se všemi korelacemi fyzických uzlů a cenami v zónách dohromady

Tento fakt platí i pro na jednotlivé roky viz tabulka [4.2]. Česká zóna jako fyzický uzel vychází

ve čtyřech případech nejlépe, jen pro rok 2021 je součet všech korelačních koeficientů stejný jako v zóně maďarské.

Tabulka 4.2: Absolutní součty korelací pro fyzické uzly

Roky	2019	2020	2021	2022	2023	Součet
DE = HUB	8,29	10,03	11,20	11,02	10,75	51.30
HU = HUB	8,69	10,09	11,24	11,06	10,64	51.72
FR = HUB	8,62	10,34	11,13	10,44	10,32	50.84
CZ = HUB	9,13	10,64	11,24	11,10	10,86	52.97

4.1.3 Korelace virtuálního uzlu v průběhu roku 2023

Virtuální uzel by měl být co možná nejstabilnějším, jelikož je to dlouhodobý produkt kupovaný na jeden, dva nebo až tři roky dopředu. Cena produktu se bude měnit v závislosti na ročním období. Bylo by však žádoucí, aby byl produkt ideálně korelovaný celoročně. Srovnání provedu na virtuálním uzlu vypočítaném pomocí jednotlivých průměrů.

V tabulce [4.10] jsou v roce 2023 a 2022 patrné měsíce, kdy virtuální uzel vypočítaný pomocí aritmetického průměru koreluje více, než v ostatních měsících. Lepší korelace během roku 2023 jsou v měsících: květen, červen, srpen, září, listopad a prosinec, což odpovídá i pro korelace v roce 2022, kde jsou korelace sice o něco menší, ale červen, srpen, září, listopad i prosinec jsou také korelovány více než měsíce ostatní. Pozitivní fakt je, že se korelace ve sledovaném roce mění v jednotlivých měsících stejně. Větším problémem je nekonzistence indexu v rámci jednoho roku, protože produkt je kupován na roční bázi. Index tedy očekává změnu v dodávkách, které budou obchodníci nakupovat po celý rok a když bude v jednotlivých měsících cena různá, což se projeví na změně ceny indexu, tak si potenciální kupci indexu nebudou jisti, jaká cena je adekvátní, protože se v rámci roku bude měnit. Nejhorším případem by byla aukce produktu pouze jednou ročně, kdy by nebyla známa cena, za kterou férově nakoupit. Při více příležitostech nákupu se dá očekávat dynamičtější strategie nákupu indexu zejména co se týká množství. Atraktivnější variantou tedy je obchodování mít co nejčastěji, aby obchodníci mohli měnit svá zajištění.

	Měsíc	AT	BE	CZ	HR	FR	DE-LU	HU	NL	PL	RO	SK	SI
	Aritmetický průměr (2023)	Leden	0,95	0,88	0,95	0,84	0,88	0,86	0,90	0,89	0,85	0,69	0,92
Únor		0,97	0,90	0,94	0,83	0,83	0,97	0,94	0,86	0,83	0,89	0,94	0,98
Březen		0,97	0,90	0,96	0,93	0,91	0,97	0,97	0,90	0,77	0,89	0,97	0,98
Duben		0,97	0,92	0,95	0,92	0,95	0,98	0,97	0,82	0,78	0,79	0,98	0,98
Květen		0,98	0,93	0,98	0,96	0,92	0,98	0,97	0,90	0,66	0,95	0,98	0,98
Červen		0,99	0,98	0,99	0,99	0,97	0,99	0,99	0,97	0,82	0,80	0,99	1,00
Červenec		0,95	0,91	0,87	0,92	0,92	0,95	0,93	0,86	0,81	0,87	0,94	0,96
Srpen		0,97	0,89	0,96	0,94	0,89	0,97	0,93	0,91	0,90	0,88	0,99	0,98
Září		0,99	0,95	0,99	0,97	0,85	0,98	0,98	0,97	0,86	0,95	0,98	0,99
Říjen		0,97	0,92	0,98	0,93	0,90	0,96	0,94	0,91	0,84	0,91	0,95	0,96
Listopad		0,99	0,97	0,99	0,96	0,95	0,98	0,95	0,97	0,90	0,85	0,97	0,99
Prosinec		0,99	0,97	0,99	0,97	0,96	0,98	0,95	0,96	0,95	0,87	0,99	1,00
Aritmetický průměr (2022)	Leden	0,97	0,91	0,95	0,88	0,91	0,93	0,94	0,90	0,75	0,84	0,95	0,93
	Únor	0,92	0,83	0,90	0,82	0,85	0,86	0,87	0,82	0,76	0,78	0,89	0,86
	Březen	0,96	0,90	0,96	0,92	0,94	0,95	0,96	0,92	0,57	0,91	0,97	0,95
	Duben	0,96	0,78	0,90	0,82	0,52	0,95	0,94	0,73	0,71	0,81	0,93	0,95
	Květen	0,93	0,87	0,95	0,92	0,92	0,87	0,86	0,86	0,72	0,81	0,92	0,87
	Červen	0,98	0,94	0,98	0,97	0,91	0,95	0,97	0,92	0,75	0,93	0,97	0,95
	Červenec	0,96	0,83	0,94	0,89	0,82	0,95	0,95	0,82	0,66	0,92	0,95	0,96
	Srpen	0,97	0,93	0,99	0,96	0,96	0,98	0,98	0,92	0,70	0,97	0,98	0,98
	Září	0,96	0,92	0,98	0,93	0,92	0,97	0,97	0,92	0,62	0,92	0,97	0,96
	Říjen	0,94	0,87	0,96	0,89	0,88	0,96	0,95	0,84	0,61	0,89	0,95	0,95
	Listopad	0,96	0,95	0,97	0,95	0,95	0,94	0,95	0,94	0,80	0,92	0,96	0,96
	Prosinec	1,00	0,98	0,99	0,99	0,98	0,96	0,99	0,98	0,86	0,93	1,00	0,99

Obrázek 4.10: Sezónní teplotní mapa s korelacemi virtuálního uzlu (aritmetického) a cenami v jednotlivých zónách pro roky 2022 a 2023

Když si z pohledu sezónnosti porovnám pomocí jiných průměrů vypočítané virtuální uzly a nad vnesenými hodnotami udělám teplotní mapu, jak je vidět v tabulce [4.11], tak na první pohled vidím, že výpočet pomocí klouzavého průměru koreluje méně než pomocí aritmetického a váženého, které jsou si v rámci roku dosti podobné. Menší korelaci lze vidět u váženého průměru v měsíci dubnu, kde se dá předpokládat, že bylo nadprůměrné teplo a ceny energií tak byly nad očekávání nižší, což mohlo ovlivnit tuto konečnou slabší korelaci ve srovnání s ostatními měsíci.

	Měsíc	AT	BE	CZ	HR	FR	DE-LU	HU	NL	PL	RO	SK	SI
	Aritmetický průměr (2022)	Leden	0,97	0,91	0,95	0,88	0,91	0,93	0,94	0,90	0,75	0,84	0,95
Únor		0,92	0,83	0,90	0,82	0,85	0,86	0,87	0,82	0,76	0,78	0,89	0,86
Březen		0,96	0,90	0,96	0,92	0,94	0,95	0,96	0,92	0,57	0,91	0,97	0,95
Duben		0,96	0,78	0,90	0,82	0,52	0,95	0,94	0,73	0,71	0,81	0,93	0,95
Květen		0,93	0,87	0,95	0,92	0,92	0,87	0,86	0,86	0,72	0,81	0,92	0,87
Červen		0,98	0,94	0,98	0,97	0,91	0,95	0,97	0,92	0,75	0,93	0,97	0,95
Červenec		0,96	0,83	0,94	0,89	0,82	0,95	0,95	0,82	0,66	0,92	0,95	0,96
Srpen		0,97	0,93	0,99	0,96	0,96	0,98	0,98	0,92	0,70	0,97	0,98	0,98
Září		0,96	0,92	0,98	0,93	0,92	0,97	0,97	0,92	0,62	0,92	0,97	0,96
Říjen		0,94	0,87	0,96	0,89	0,88	0,96	0,95	0,84	0,61	0,89	0,95	0,95
Listopad		0,96	0,95	0,97	0,95	0,95	0,94	0,95	0,94	0,80	0,92	0,96	0,96
Prosinec		1,00	0,98	0,99	0,99	0,98	0,98	0,96	0,99	0,98	0,86	0,93	1,00
Vážený průměr (2022)	Měsíc	AT	BE	CZ	HR	FR	DE-LU	HU	NL	PL	RO	SK	SI
	Leden	0,94	0,90	0,91	0,81	0,96	0,96	0,92	0,89	0,69	0,83	0,92	0,96
	Únor	0,88	0,82	0,83	0,76	0,92	0,89	0,82	0,81	0,74	0,73	0,82	0,89
	Březen	0,96	0,88	0,92	0,87	0,97	0,98	0,95	0,89	0,54	0,89	0,95	0,98
	Duben	0,77	0,57	0,59	0,48	0,89	0,77	0,74	0,55	0,43	0,62	0,71	0,77
	Květen	0,90	0,82	0,94	0,87	0,94	0,92	0,85	0,80	0,72	0,80	0,92	0,92
	Červen	0,97	0,92	0,96	0,94	0,95	0,97	0,96	0,89	0,71	0,90	0,96	0,98
	Červenec	0,96	0,78	0,88	0,83	0,90	0,96	0,94	0,75	0,65	0,92	0,93	0,97
	Srpen	0,98	0,90	0,98	0,95	0,98	0,99	0,98	0,89	0,70	0,97	0,98	0,99
	Září	0,96	0,89	0,95	0,90	0,95	0,98	0,97	0,89	0,62	0,92	0,97	0,98
	Říjen	0,94	0,87	0,94	0,86	0,92	0,96	0,94	0,83	0,57	0,88	0,93	0,96
	Listopad	0,96	0,95	0,96	0,94	0,96	0,94	0,95	0,94	0,80	0,91	0,95	0,95
Prosinec	0,99	0,99	0,98	0,98	0,99	0,97	0,99	0,97	0,86	0,93	0,99	0,99	
Klouzavý průměr (2022)	Měsíc	AT	BE	CZ	HR	FR	DE-LU	HU	NL	PL	RO	SK	SI
	Leden	0,91	0,87	0,89	0,84	0,88	0,87	0,87	0,85	0,71	0,74	0,87	0,87
	Únor	0,83	0,77	0,78	0,75	0,83	0,75	0,73	0,73	0,70	0,62	0,76	0,75
	Březen	0,90	0,83	0,88	0,84	0,91	0,90	0,88	0,83	0,44	0,82	0,89	0,90
	Duben	0,86	0,72	0,83	0,75	0,35	0,83	0,82	0,67	0,62	0,68	0,82	0,83
	Květen	0,85	0,79	0,84	0,84	0,83	0,74	0,70	0,77	0,61	0,65	0,78	0,74
	Červen	0,93	0,89	0,90	0,90	0,89	0,90	0,89	0,86	0,69	0,83	0,89	0,90
	Červenec	0,90	0,75	0,87	0,83	0,79	0,88	0,87	0,75	0,58	0,85	0,87	0,88
	Srpen	0,93	0,88	0,94	0,91	0,93	0,93	0,92	0,87	0,61	0,91	0,92	0,93
	Září	0,85	0,81	0,87	0,84	0,87	0,85	0,85	0,82	0,50	0,77	0,86	0,85
	Říjen	0,82	0,79	0,80	0,78	0,83	0,78	0,76	0,76	0,47	0,69	0,76	0,78
	Listopad	0,92	0,92	0,92	0,91	0,93	0,86	0,88	0,90	0,76	0,83	0,90	0,89
Prosinec	0,97	0,97	0,96	0,97	0,97	0,92	0,96	0,95	0,84	0,88	0,97	0,97	

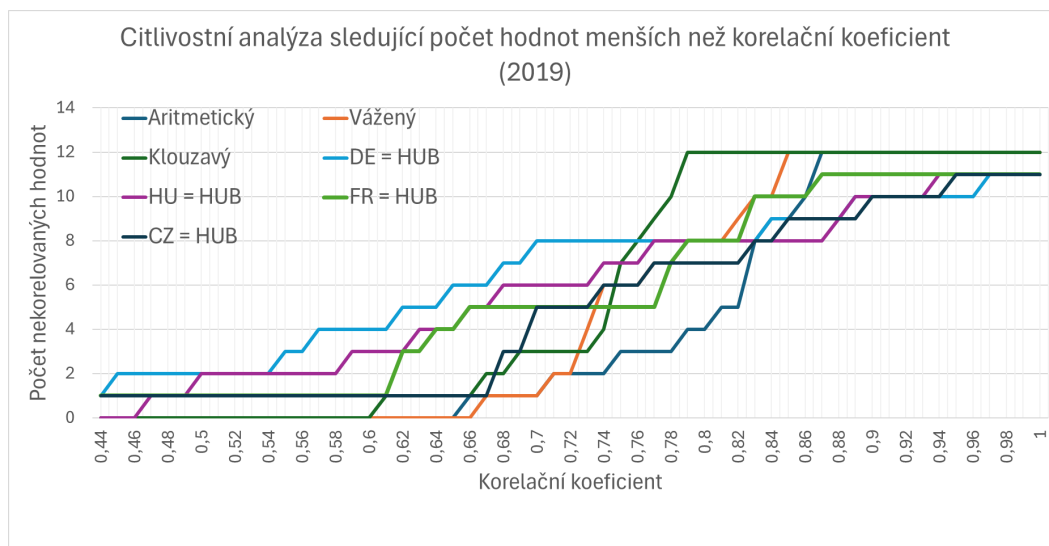
Obrázek 4.11: Sezónní teplotní mapa nad korelacemi virtuálního uzlu vypočteného pro všechny průměry na rok 2023

4.2 Citlivostní analýza

V citlivostních analýzách budu sledovat, kolik hodnot pro jednotlivé průměry vyhovuje podmínce, že hodnoty výsledných korelací jsou větší než měrná hodnota korelace, počet vyhovujících hodnot označím jako *atraktivní* a počet nevyhovujících jako *neatraktivní*. Tedy nastavíme-li cílovou hodnotu na korelaci rovnu jedné, dostaneme nazpět 60 (12 pro jednotlivé roky) hodnot, jelikož všechny hodnoty jsou menší než jedna pro virtuální uzel a 55 (11 pro jednotlivé roky) hodnot pro fyzické, protože ty mají samy se sebou korelaci rovnu jedné pro součet korelací všech let dohromady. Z jednotlivých grafů pak bude zřetelně vidět, jaký z virtuálních a fyzických uzlů nejčastěji během let koreluje s cenami jednotlivých zón, tedy jaký způsob vytváření nového cenového indexu je nejvíce atraktivní pro obchodníky.

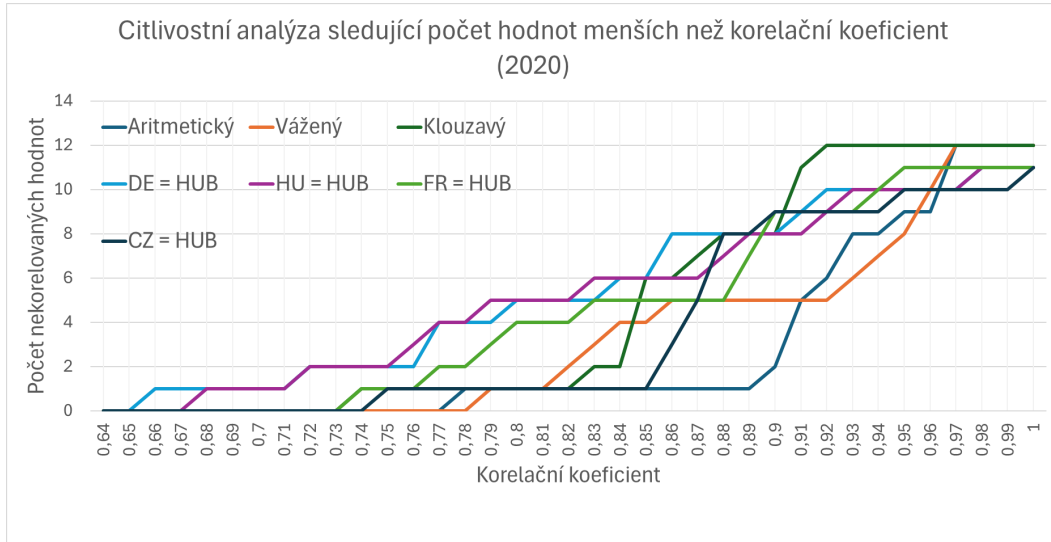
Nejprve se podívám na jednotlivé roky, jestli ve všech letech lze preferovat stejný způsob

výpočtu virtuálního uzlu nebo ne. V grafech mě tedy nejvíce zajímají průběhy, které jsou úplně nejnižší. V grafu [4.12] vidím, že nejméně nekorelujících hodnot při změně minima mají převážně fyzické uzly, kde úplně nejhůře je na tom výpočet pomocí klouzavého průměru, poté dle váženého a nejlepší z průměrů je aritmetický. Nejvíce korelujících hodnot větších než 0,83 má průměr aritmetický. Po hodnotě 0,83 jsou již lepší uzly fyzické. Pro zóny je tedy více atraktivní výpočet pomocí aritmetického průměru, jelikož jim takto vypočítaný index zajišťuje častější korelaci mezi cenou v jejich zóně a virtuálním uzlem.



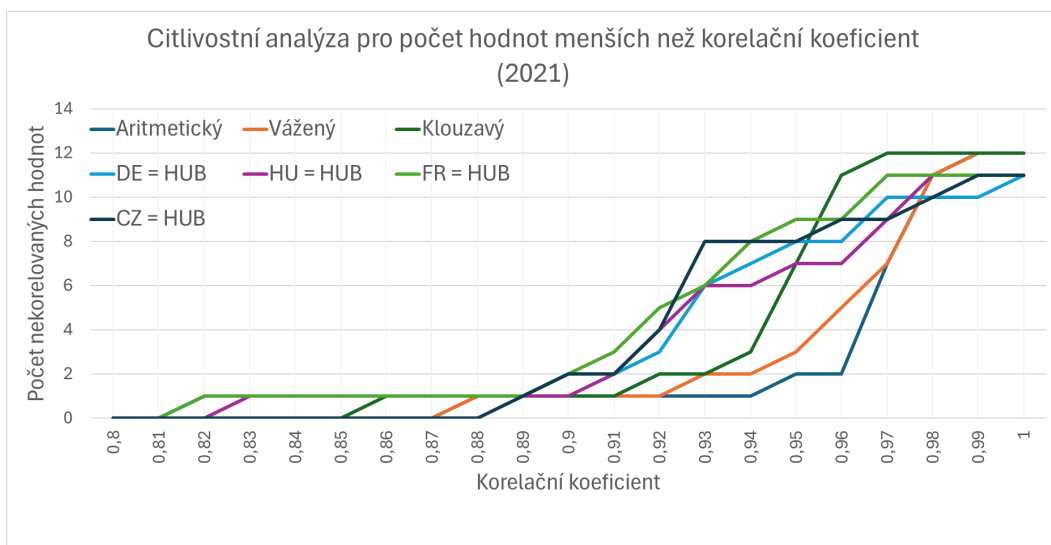
Obrázek 4.12: Citlivostní analýza virtuálních uzlů pro rok 2019

V grafu [4.13] je vidět, že nejlepšími jsou průměry aritmetický a vážený, které se pro vážený průměr vystřídají, kdy od 0,91 a od 0,96 korelace má lepší výsledky průměr vážený, v ostatních případech je lepší průměr aritmetický. Až do hodnoty 0,85 je aritmetický průměr srovnatelný s českým fyzickým uzlem.



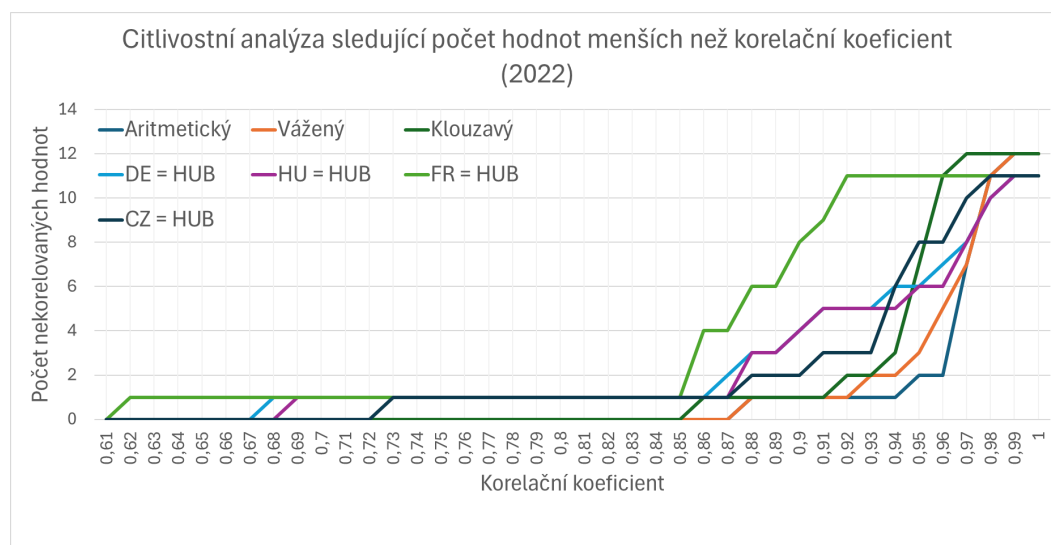
Obrázek 4.13: Citlivostní analýza virtuálních uzlů pro rok 2020

Pro ceny v roce 2021 [4.14] vychází nejlépe průměr aritmetický. Další věc, kterou v grafu vidím je, že hodnoty které nekorelují se objevují mnohem později, v tomto případě až při sledování, které hodnoty korelují méně než 0,82. První nekorelující hodnotu jsem dostal pro francouzský fyzický uzel, v porovnání s výpočtem pomocí aritmetického průměru, kdy se první nekorelující hodnota vyskytne až při 0,88, kdežto v letech 2019 už při korelaci 0,66 a v roce 2020 při korelaci 0,78. Bude-li se tento trend opakovat ve více letech, dá se očekávat, že energetické trhy jsou velmi dobře korelovány a lze říct, že spojení trhů v regionu Core funguje velmi dobře.



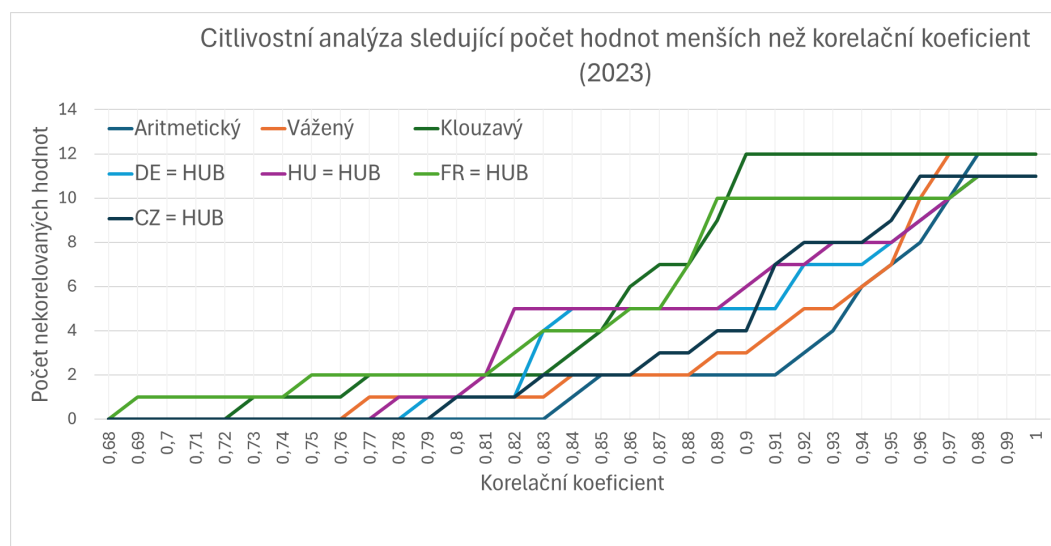
Obrázek 4.14: Citlivostní analýza virtuálních uzlů pro rok 2021

Co se průběhů v roce 2022 týče [4.15] vidím stejné pořadí, co se vypočítaného virtuálního uzlu pomocí průměrů týče, kdežto fyzické uzly se v letech občas prostřídají. Nejlepší průběh má stále virtuální uzel počítaný aritmetickým průměrem, kde první nekorelující hodnota je při hodnotě 0,88, což je signál naznačující vysokou korelaci cen na trzích s elektřinou.



Obrázek 4.15: Citlivostní analýza virtuálních uzlů pro rok 2022

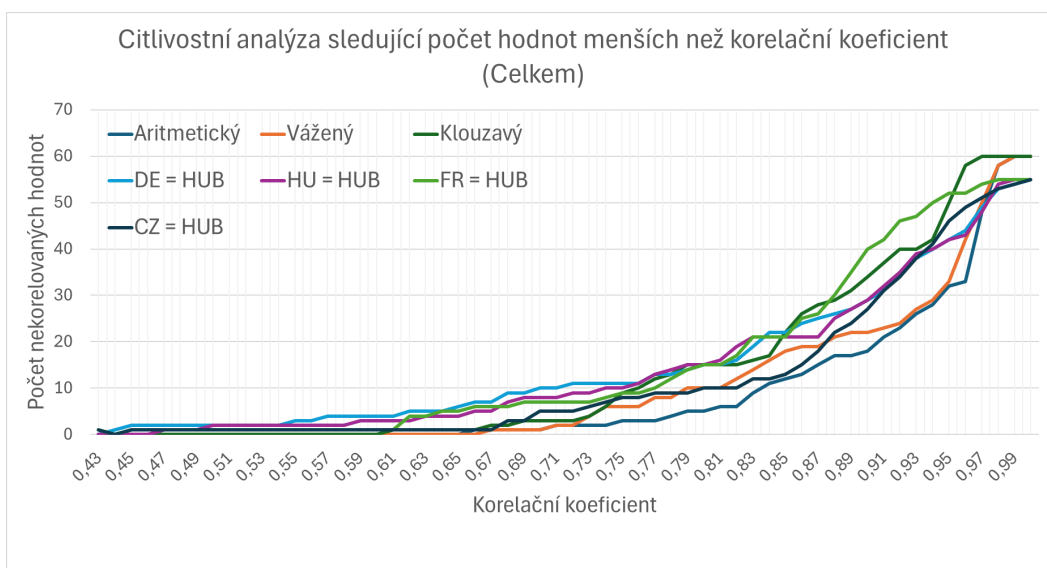
V roce 2023 se korelace na trhu o něco málo zhoršily, kdy první nekorelující hodnota je pro výpočet pomocí virtuálního uzlu aritmetickým průměrem při hodnotě 0,85, což je však stále velmi silná korelace a dalo by se očekávat, že takto vytvořený produkt by mohl být pro obchodníky atraktivní.



Obrázek 4.16: Citlivostní analýza virtuálních uzlů pro rok 2023

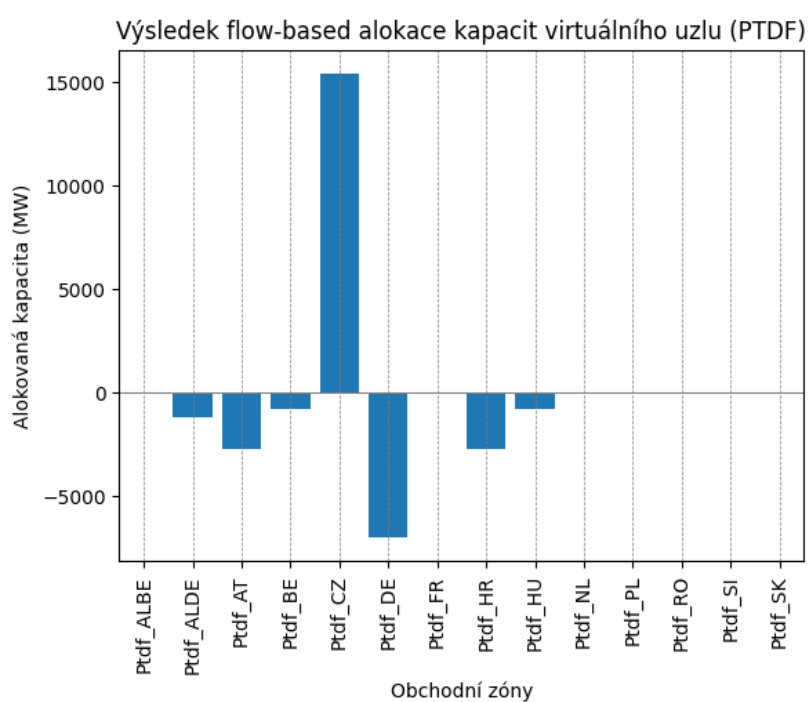
Udělán-li shrnutí všech nekorelovaných hodnot mezi lety 2019-2023 tak dostanu graf [4.17], na kterém lze udělat celkové vyhodnocení jednotlivých výpočtů pro virtuální uzel a udělat srovnání, jestli by takovýto uzel nemohl být zastoupen uzlem fyzickým.

Nejlepším způsobem vytvoření ceny virtuálního uzlu je výpočet pomocí aritmetického průměru cen z denního trhu. Tento fakt potvrzuje pohled na celkový graf, kdy při hodnotě korelace 0,90 ve všech letech nekorelovalo pouze 18 hodnot z 60, až do hodnot korelace 0,96, kdy nekorelovalo 34 hodnot z 60. Druhým nejlépe vycházejícím způsobem je výpočet pomocí váženého průměru, který pro srovnání s aritmetickým má při korelaci 0,90 nekorelujících hodnot 19 z 60 a při korelaci 0.96 je již nekorelujících hodnot 43. Nejlepším fyzickým uzlem by byl uzel český, který má nejméně nekorelujících hodnot v rozmezí 0,75 až 0,93 v porovnání s ostatními fyzickými uzly.



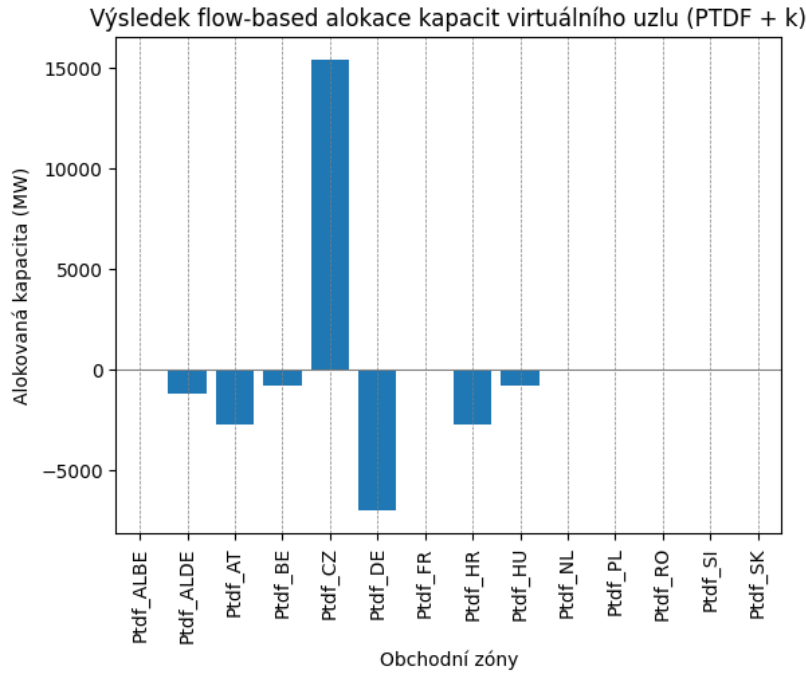
Obrázek 4.17: Citlivostní analýza virtuálních uzlů pro roky 2019-2023

4.3 Výsledky simulace flow-based alokace kapacit



Obrázek 4.18: Simulace flow-based alokace kapacit pro virtuální uzel s maticí PTDF

Po dokončení obou simulací vyšla hodnota účelové funkce rovna 15400,578. Shoda výsledku je patrná i ze sloupcových grafů [4.18] a [4.19], kde je vidět, kolik MW kapacity bylo alokováno z a do jaké země. Pro náš případ, kdy jsme cenu v ČR zvolili 0 a ve všech ostatních státech 1 je vidět, že pro maximalizaci ekonomického welfaru chtěli českou kapacitu všichni a kapacita se optimálně rozložila do ostatních zemí dle PTDF matice.

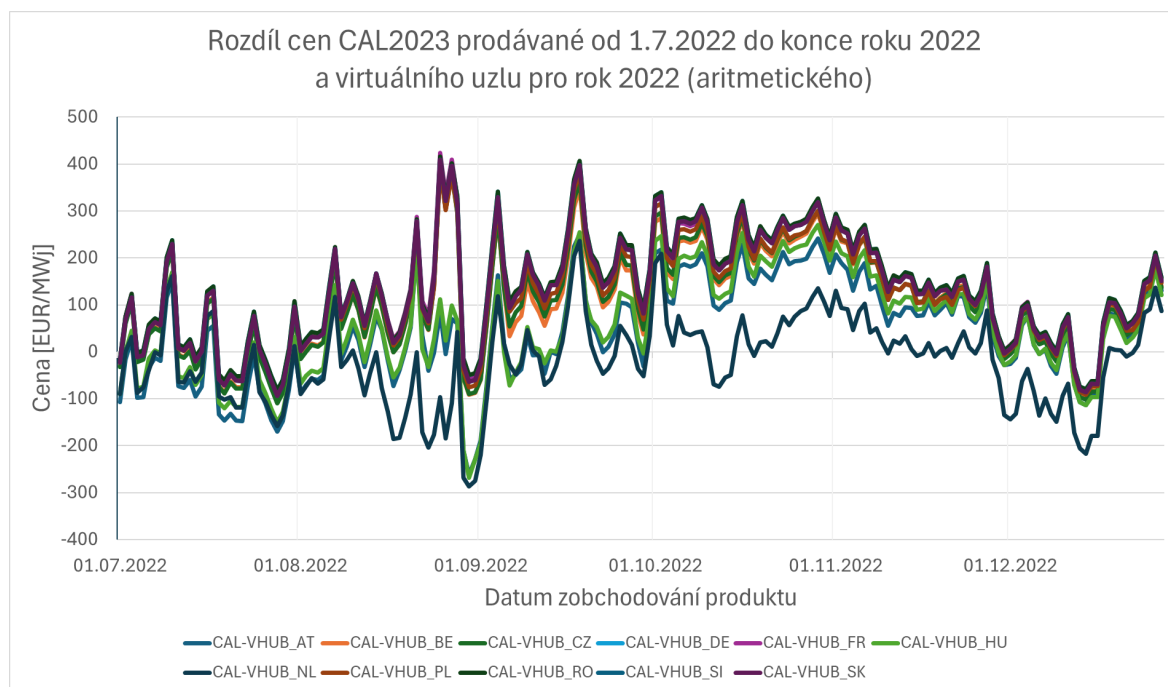


Obrázek 4.19: Simulace flow-based alokace kapacit pro virtuální uzel s maticí PTDF + κ

Přestože se důkaz i simulace zdají být na první pohled triviální a zbytečné k ověření, je k zamyšlení vlastní systém výpočtu PTDF matice a vyvstává otázka, jestli změna slack uzlu nemůže vést k jiné změně PTDF matice než je přičtení, či odečtení konstanty κ ? Z teoretického výpočtu by to nemělo být možné, ale není známo, k jakým zaokrouhlováním dochází v rámci výpočtů na reálném modelu sítě a tento případ nelze vyloučit. "Slack uzel by měl být zvolen tak, aby odrážel reálné provozní a tržní podmínky a měl by být strategicky umístěn tak, aby poskytoval užitečné informace pro efektivní řízení a provoz přenosové sítě [28]." Změna slack uzlu by mohla ovlivnit, kde a jak jsou distribuovány ztráty v síti. To by mělo přímý dopad na efektivitu a bezpečnost provozu sítě, jelikož rozdílné rozložení toků by znamenalo rozdílné míry ztrát na různých částech sítě. Tuto vlastnost virtuálního uzlu je tedy důležité dále prozkoumat, avšak data k modelu sítě nejsou veřejně dostupná. Další výzkum by se měl zaměřit na podrobnější analýzu, tedy jestli změna polohy virtuálního uzlu má vliv na flow-based alokaci kapacit, aby byly lépe pochopeny dopady při zavedení virtuálního uzlu.

4.4 Analýza četnosti aukcí

Pro upřesnění problémů spojených s prováděním nepravidelných aukcí pro virtuální energetické uzly, v našem případě při rozhodování na základě cen futures, které vykazují značné rozdíly mezi jednotlivými zeměmi, vyplývají z grafu 4.20 následující body:



Obrázek 4.20: Rozdíl cen mezi CAL23 a virtuálním uzlem (aritmetickým) od 1. 7. 2022 do konce roku 2022

1. Problém volatility cen a dynamiky cen dlouhodobého trhu, kdy ceny futures mohou být velmi volatilní a ovlivňuje je řada faktorů, jako jsou geopolitické události, změny politiky a výkyvy v nabídce a poptávce. Pokud se aukce konají nepravidelně (např. pouze jednou nebo dvakrát ročně), existuje značné riziko, že ceny používané v těchto aukcích nebudou přesně odrážet aktuální tržní podmínky v době dodávky energie. Na rozdílu cen futures a virtuálního uzlu ?? je vidět, že bude velmi záležet na výběru data aukce, hlavně z pohledu určení ceny, jelikož produkt je kupován až na tři roky dopředu. Největším problémem je, že jednotlivé ceny jsou rozdílné, zatímco virtuální uzel by představoval produkt společný všem, tedy akceptovatelná nákupní cena by byla velmi závislá na frekvenci uskutečňovaných aukcí, kdy je lepší obchodovat menší množství častěji než velké množství párkrát do roka.
2. Riziko nesouladu cen při nepravidelně se opakujících aukcích, kdy existuje značný časový odstup mezi okamžikem stanovení cen a okamžikem uskutečnění transakcí. To může vést k disproporcii mezi aukčními cenami a skutečnými tržními cenami v době dodávky, což může způsobit, že prodávající obdrží nižší než tržní sazbu, nebo kupující zaplatí více.
3. Rozdíly mezi jednotlivými trhy, kde se ceny energií mohou mezi jednotlivými regiony výrazně lišit v důsledku místní dynamiky nabídky a poptávky, regulačního prostředí a nákladů na přenos. Pokud jsou aukční ceny stanovovány zřídka, mohou tyto regionální

rozdíly prohloubit rizika nesouladu cen, protože ceny futures v jedné zemi nemusí být reprezentativní pro jinou zemi, což může vést k nespravedlivému stanovení cen nebo neefektivní alokaci zdrojů.

4. Strategické nabídky a manipulace s trhem, kdy při menším počtu aukcí má každá z nich větší váhu a může být předmětem strategických nabídkových praktik, kdy velcí hráči na trhu mohou ovlivňovat ceny snadněji než v systému častějších aukcí. To může vést k narušení trhu a manipulaci s ním.
5. Neefektivita při zajišťování a řízení rizik. Na volatilním trhu je pro výrobce i spotřebitele zásadní schopnost účinného zajištění. Sporadické aukce snižují možnosti těchto stran vhodně zajistit své pozice, což je potenciálně vystavuje většímu finančnímu riziku, pokud se podmínky na trhu neočekávaně změní.

Kapitola 5

Závěr

Diplomová práce představuje komplexní analýzu virtuálních uzlů a jejich aplikací na trhu s elektřinou v regionu Core. V úvodu práce je názorně vysvětlen rozdíl mezi nově vznikajícím indexem virtuální uzel v elektroenergetice a plynárenství. Pro potřeby plynu je index závislý na místě s největší koncentrací této komodity, což umožňuje ocenit indexem plyn ve „zdroji“ a se vzdáleností od tohoto zdroje uplatnit rostoucí náklady za přenos, kdežto v případě elektřiny tento přístup nelze použít, protože nás fyzikální podstata nutí udržovat v celé evropské přenosové soustavě stejnou frekvenci, napětí a sled fází, tedy vytvoření cenového indexu není tak intuitivní. Prostřednictvím teoretického základu a praktických simulací jsem zkoumal, jaké má virtuální uzel přínosy na zajištění pozice, likvidity a efektivity trhu s elektřinou.

Výsledky práce odhalily několik klíčových poznatků.

1. Výpočet ceny virtuálního indexu je nejvíce atraktivní pro obchodníky při použití aritmetického průměru.
2. Výpočet ceny jsem ověřil pomocí korelačních a citlivostních analýz, kde v rozmezí let 2019 - 2023 byla korelace menší než 0,9 pouze v 18 případech ze 60 (5 let * 12 obchodních zón), což v porovnání s váženým průměrem, kde případů bylo 19 je sice dosti podobné, avšak při posunu na korelace menší než 0,96 to bylo 34 z 60 pro aritmetický a 43 z 60 pro vážený virtuální uzel. Ostatní metody výpočtu už se rozcházejí dříve a nejsou pro obchodníky tak atraktivní.
3. Obchodování virtuálního uzlu jako FTR-obligace, z důvodu možnosti perfektního zajištění.
4. Simulace flow-based alokace kapacit dokázala, že nezáleží na geografické poloze virtuálního uzlu, avšak je otázkou, jestli výpočet PTDF matice nemůže být ovlivněn změnou topologie sítě.
5. Výsledky analýzy četnosti aukcí naznačují, že vyšší frekvence aukcí může přispět k lepší stabilitě cen a zvýšení konkurenceschopnosti mezi obchodníky zejména poté, bude-li produkt virtuální uzel obchodován až na tři roky dopředu.
6. Zvýšení likvidity by mělo být zajištěno z podstaty fungování virtuálního uzlu, který je schopný agregovat více nabídkových oblastí do jednoho cenového indexu, což zvyšuje likviditu a umožňuje efektivnější správu rizik.
7. Jestli bude virtuální uzel obchodován, tak s největší pravděpodobností na burze EEX, která je na tento typ obchodů připravena, na rozdíl od TSOs, s tím by se vázal i „clearing“, který by provozoval ECC jakožto největší clearingové místo v Evropě.

Doporučení vyplývající z diplomové práce:

1. Více prozkoumat jednotlivé vlastnosti virtuálního uzlu před zavedením do praxe a ujistit se, že dokáží být konzistentní i v horizontu jednotek až desítek let.
2. Zlepšení regulace a dohledu, zavedení jasnějších pravidel pro provoz virtuálních uzlů, včetně transparentnosti a frekvence aukcí, aby všichni účastníci trhu chápali pravidla stejně. Důležitá je také spolupráce s obchodníky na energetickém trhu, naslouchání a případná aplikace jejich potřeb a připomínek .
3. Posílení spolupráce mezi národními regulátory, aby byla možná harmonizace tržních podmínek a podpora spravedlivé konkurence.



Literatura

- [1] “Further development of the eu electricity forward market.” Dostupné z: <https://acer.europa.eu/Position%20Papers/ElectricityForwardMarketPolicyPaper.pdf>, 2023. [cit. 2024-05-04].
- [2] “Kurzycz.” Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/komodity/cena-elekriny-graf-vyvojeceny/>, 2024. [cit. 2024-05-04].
- [3] “European commission.” Dostupné z: <https://ec.europa.eu/commission/presscorner-detail/en/IP231591>, 2024. [cit. 2024-05-04].
- [4] “What i’ve learned about the latest eu electricity market design reform.” Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/what-ive-learned-latest-eu-electricity-market-jayaram-anandha/>, 2024. [cit. 2024-05-04].
- [5] “Acer biding zones configuration.” Dostupné z: <https://www.acer.europa.eu/news-and-events/news/acer-has-decided-alternative-electricity-bidding-zone-configurations>, 2022. [cit. 2024-05-04].
- [6] “Ote krátkodobé trhy.” Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/kratkodobe-trhy/propojenitrhu-2013-vnitrodenni-trh/sidc>, 2018. [cit. 2024-05-04].
- [7] “Cross-border forward markets.” Dostupné z: <https://neon.energy/Neon-Forward-Markets.pdf>, 2024. [cit. 2024-05-04].
- [8] “Electricity price area differentials (epads).” Dostupné z: <https://emissions-euets.com/internal-electricity-market-glossary/1473>, 2017. [cit. 2024-05-04].
- [9] “Investopedia what is henry hub?.” Dostupné z: <https://www.investopedia.com/henryhub>, 2022. [cit. 2024-05-04].
- [10] “Institute for energy economics and financial analysis.” Dostupné z: <https://ieefa.org/articles/europes-lng-capacity-buildout-outpaces-demand>, 2023. [cit. 2024-05-04].
- [11] “Euronews energy crisis.” Dostupné z: <https://www.euronews.com/my-europe/2022/08/30/energy-crisis-how-a-dutch-virtual-market-sets-gas-prices-for-the-whole-of-europe>, 2022. [cit. 2024-05-04].
- [12] “European traded gas hubs: the supremacy of ttf.” Dostupné z: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2020/05/European-Traded-gas-hubs-the-supremacy-of-TTF.pdf>, 2020. [cit. 2024-05-04].
- [13] “Henry hub gas price assessment.” Dostupné z: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/our-methodology/price-assessments/natural-gas/henry-hub-natural-gas-price-assessments>, 2024. [cit. 2024-05-04].

- [14] “Gas transmission pipelines.” Dostupné z: <https://pipeline101.org/topic/where-are-gas-pipelines-located/>, 2022. [cit. 2024-05-04].
- [15] “Researchgate.” Dostupné z: [Rhttps://www.researchgate.net/figure/Colour-online-European-gas-pipeline](https://www.researchgate.net/figure/Colour-online-European-gas-pipeline), 2024. [cit. 2024-05-04].
- [16] “Lynx.” Dostupné z: <https://www.lynxbroker.cz/investovani/trading/technicka-analyza/analyza-trendu/klouzavy-prumer-pomocnik-pro-urceni-trendu/>, 2024. [cit. 2024-05-04].
- [17] “Jao publication tool.” Dostupné z: <https://www.jao.eu/faq/809799>, 2024. [cit. 2024-05-04].
- [18] “Long-term transmission rights (lttrs).” Dostupné z: <https://emissions-euets.com/long-term-transmission-right>, 2014. [cit. 2024-05-04].
- [19] “Core ltcc methodology.” Dostupné z: <https://eepublicdownloads.entsoe.eu-CoreLTCCMethodology-ForNRASubmission.pdf>, 2020. [cit. 2024-05-04].
- [20] “Bidding and investment in wholesale electricity markets: Pay-as-bid versus uniform-price auctions.” Dostupné z: <https://www.tse-fr.eu/sites/default/files/TSE/documents/conf/2022/energy/you.pdf>, 2022. [cit. 2024-05-04].
- [21] “Investopedia clearinghouse.” Dostupné z: <https://www.investopedia.com/terms/c-clearinghouse.asp>, 2023. [cit. 2024-05-04].
- [22] “Ecc.” Dostupné z: <https://www.ecc.de/en/about-ecc/company>, 2024. [cit. 2024-05-04].
- [23] “Cacm methodology.” Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX3A32015R1222>, 2015. [cit. 2024-05-04].
- [24] “Cid methodology.” Dostupné z: <https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/nc-tasks/TSOs202nd20proposal.pdf>, 2024. [cit. 2024-05-04].
- [25] “Welfare economics explained.” Dostupné z: <https://www.investopedia.com/terms/w-welfareeconomics.asp>, 2023. [cit. 2024-05-04].
- [26] T. Werner, “Optimalizace.” Dostupné z: <https://cw.fel.cvut.cz/wiki/media/courses-b0b33opt/opt.pdf>, 2024. [cit. 2024-05-04].
- [27] “Requirements for the single allocation platform (sap).” Dostupné z: <https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/nc-tasks/SAP>, 2023. [cit. 2024-05-04].
- [28] “Day-ahead capacity calculation methodology of the core capacity calculation region.” Dostupné z: <https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/nc-tasks/CORE%20-%20ANNEX%20III.pdf>, 2019. [cit. 2024-05-04].
- [29] “Entso-e transparency platform.” Dostupné z: <https://transparency.entsoe.eu/dashboard-show>, 2024. [cit. 2024-05-04].
- [30] “Core fb mc.” Dostupné z: <https://www.jao.eu/core-fb-mc>, 2022. [cit. 2024-05-04].
- [31] “Math and stats support center.” Dostupné z: <https://mathstat.econ.muni.cz/media/12657-pearcor.pdf>, 2024. [cit. 2024-05-04].

- [32] “Gurobi optimization.” Dostupné z: <https://www.gurobi.com/>, 2024. [cit. 2024-05-04].
- [33] “Acer wholesale electricity market monitoring 2021.” Dostupné z: <https://www.acer.europa.eu/sites/default/files/documents/Publications-ProgressreportEuropeanwholesaleelectricity21.pdf>, 2024. [cit. 2024-05-04].
- [34] “Acer, liquidity and transaction costs.” Dostupné z: <https://www.acer.europa.eu/sites/default-files/documents/en/Electricity/MARKET-CODES/CAPACITY-ALLOCATION-AND-CONGESTION-MANAGEMENT/Documents/20040620DNV20GL20reportfinal.pdf>, 2023. [cit. 2024-05-04].



Obrázky

1.1 Vývoj cen elektrické energie v letech 2022-2023 [2]	3
1.2 Vývoj obchodovaného objemu: 2014-2019 [12]	6
1.3 Schéma přepravní plynové soustavy USA [14].....	7
1.4 Schéma přepravní plynové soustavy EU [15]	8
4.1 Teplotní mapa s korelacemi mezi virtuálním uzlem (vypočteným aritmetickým průměrem) a cenami v jednotlivých nabídkových zónách	26
4.2 Teplotní mapa s korelacemi mezi virtuálním uzlem (vypočteným váženým průměrem) a cenami v jednotlivých nabídkových zónách	26
4.3 Teplotní mapa s korelacemi mezi virtuálním uzlem (vypočteným klouzavým průměrem) a cenami v jednotlivých nabídkových zónách	26
4.4 Teplotní mapa s korelacemi mezi virtuálním uzlem a cenami zón nad všemi průměry	27
4.5 Teplotní mapa s korelacemi mezi fyzickým uzlem (DE) a cenami v jednotlivých nabídkových zónách	28
4.6 Teplotní mapa s korelacemi mezi fyzickým uzlem (HU) a cenami v jednotlivých nabídkových zónách	28
4.7 Teplotní mapa s korelacemi mezi fyzickým uzlem (FR) a cenami v jednotlivých nabídkových zónách	28
4.8 Teplotní mapa s korelacemi mezi fyzickým uzlem (CZ) a cenami v jednotlivých nabídkových zónách	29
4.9 Teplotní mapa se všemi korelacemi fyzických uzlů a cenami v zónách dohromady ..	29
4.10 Sezónní teplotní mapa s korelacemi virtuálního uzlu (aritmetického) a cenami v jednotlivých zónách pro roky 2022 a 2023	31
4.11 Sezónní teplotní mapa nad korelacemi virtuálního uzlu vypočteného pro všechny průměry na rok 2023	32

4.12 Citlivostní analýza virtuálních uzlů pro rok 2019	33
4.13 Citlivostní analýza virtuálních uzlů pro rok 2020	34
4.14 Citlivostní analýza virtuálních uzlů pro rok 2021	34
4.15 Citlivostní analýza virtuálních uzlů pro rok 2022	35
4.16 Citlivostní analýza virtuálních uzlů pro rok 2023	35
4.17 Citlivostní analýza virtuálních uzlů pro roky 2019-2023	36
4.18 Simulace flow-based alokace kapacit pro virtuální uzel s maticí PTDF	37
4.19 Simulace flow-based alokace kapacit pro virtuální uzel s maticí PTDF+ κ	38
4.20 Rozdíl cen mezi CAL23 a virtuálním uzlem (aritmetickým) od 1. 7. 2022 do konce roku 2022	39



Tabulky

4.1 Váhy pro jednotlivé ceny váženého průměru pro rok 2023	26
4.2 Absolutní součty korelací pro fyzické uzly	30