



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

PŘENOSOVÁ SOUSTAVA ČR PO ROCE 2040

TRANSMISSION SYSTEM OF THE CZECH REPUBLIC AFTER 2040

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Dominik Gabrys

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

BRNO 2020

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Dominik Gabrys

ID: 183229

Ročník: 2

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Přenosová soustava ČR po roce 2040

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Práce se zabývá výhledem přenosové soustavy ČR po roce 2040, kdy se očekává odpojení některých velkých elektráren. Práce se bude zabývat změny toků výkonů (činných, jalových) přes uzly sítě. Bude provedena rešerše dostupných open source SW řešení. Výsledkem by měla být ucelená představa o chování sítě při běžných odběrových stavech s vysokým začleněním intermitentních zdrojů místo centrálních.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 1.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku vývoje přenosové sítě v České republice, změnu zdrojové základny a možnostmi simulací těchto sítí v tzv. open source software solutions. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. První teoretická část obsahuje přehled o současných trendech v elektrizační soustavě České republiky a řešerši na veřejně dostupné programy. Praktická část je zaměřena na simulaci přenosové soustavy ČR, kde jsou zkoumány různé scénáře a upltaňena myšlenka open source.

KLÍČOVÁ SLOVA

přenosová síť, zdrojová základna, open source software solution, pandapower, Clean energy for all europeans

ABSTRACT

This master thesis is focused on issue transimission system of Czech republic after 2040. Thesis is divided in two parts, teoretical and practical. Teoretical part contains present trends of transmission sytem and the most probably changes in the future decade. Practical part contains simulation of Czech transmission system and various scenarios with idea of open source.

KEYWORDS

transmission system, open source software solutions, pandapower, Clean energy for all europeans

GABRYS, Dominik. *Přenosová soustava ČR po roce 2040*. Brno, 2020, 55 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce: Ing. Lukáš Radil, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Přenosová soustava ČR po roce 2040“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Lukáši Radilovi, PhD. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	1
1 Změny promítnuté do české energetiky	2
1.1 Evropská energetická politika	2
1.2 Odklon od uhlí	3
1.3 Potenciál v obnovitelných zdrojích energie	5
1.4 Rozvoj PS	7
1.4.1 Rozvoj zdrojové základny	9
1.5 Česká republika jako součást ENTSO-E	9
1.5.1 Network Development Plan 2018	11
2 Free and Open Source Software	13
2.1 Požadavky	13
2.2 Nabídka trhu	13
2.3 Pandapower	17
2.3.1 Základní programové bloky	19
2.3.2 Základní funkce programu	22
3 Praktická část studentské práce	31
3.1 Vytvoření praktického modelu	31
3.2 Zpracování	33
3.3 Přenosová soustava pro scénář roku 2026	35
3.3.1 Scénář roku 2026	35
3.3.2 Scénář roku 2036	37
3.3.3 Scénář roku 2040	38
3.4 Řízení napětí v soustavě	39
3.5 Shrnutí	41
Závěr	44
Literatura	45
Seznam příloh	48
A Kód pro ukázkou powerflow	49
B Kód pro N-1 kritérium	51
C Kód pro Time-series Calculation	52

Seznam obrázků

1.1	Výhledový phase out uhelných bloků	3
1.2	Instalovaný výkon v krajích ČR	4
1.3	Rozdělení instalovaného výkonu podle místa připojení	7
1.4	Čára trvání výkonu	8
1.5	Výhledový rozvoj zdrojové základny	9
1.6	Hlavní dělení ENTSO-E	10
1.7	Výhledové bilanční scénáře ENTSO-E	11
2.1	Projekt Evropa 2014	15
2.2	Srovnání programu Pandapower	19
2.3	Vstupní schéma pro řešení OPF.	23
2.4	Základní grafické vykreslení	27
2.5	Powerflow grafické vykreslení	28
2.6	Ukázka výsledku Time-series calculation	29
2.7	N-1 kritérium	30
3.1	Názorné schéma vytvořeného modelu	33
3.2	Scénář roku 2026	36
3.3	Scénář roku 2036	38
3.4	Scénář roku 2040	39
D.1	Rozvojové schéma přenosové sítě	55

Seznam tabulek

1.1	Přehled studií zabývajících se výhledem zdrojové základny pro ČR.	5
1.2	Instalovaný výkon OZE v realistickém scénáři dle [9].	6
1.3	Potenciál OZE a proměna zdrojové základny pro ČR rok 2030 dle [6].	6
2.1	Rešerše FOSS programů	16
2.2	Možnost srovnání licencí vybraných programů	17
2.3	Srovnání elementů napříč vybranými programy s Pandapower dle[3]	18
3.1	Tabulka zatížení	33
3.2	Napěťové poměry scénáře 2026	36
3.3	Napěťové poměry v roce 2036	37
3.4	Napěťové poměry v roce 2040	38
3.5	Zdrojová základna	40
3.6	Vedení z hlediska nejvyššího využití dle ČEPS srovnané ve veškerých scénářích.	41

Úvod

Energetický sektor je nyní v přerodu do nové budoucí kapitoly. Pojmy jako decentralizace, smartgrid, decomissioning, elektromobilita, emisní povolenky aj. se staly součástí běžného života a určují nový směr této infrastruktury. Stále více pozornosti je nutné věnovat přenosovým sítím, které začínají plnit zcela nové úkoly. Operátor české přenosové soustavy(dále PPS), aktivní člen ENTSO-E, musí brát přenosovou soustavu již jako část celkové evropské sítě, kdy přeshraniční kapacity otevírají nové možnosti, jak obchodní tak nápomocné. PPS musí sledovat nové trendy nařízení Evropské unie a splňovat její požadavky. Kontrakty jako Pařížská dohoda, New green deal, Clean energy package for all slibují především bezemisní energetiku a také zvýšení energetické bezpečnosti, rozšíření trhů a snižování celkového dopadu na životní prostředí. Česká republika obecně se nyní musí soustředit na možnosti zachování energetické soběstačnosti jako jedním z hlavních bodů k setrvání v stabilní ekonomice. Na závěr shrňme, že česká energetika má před sebou velmi důležité úkoly a to: stanovit jasný plán na odklon od uhelné energetiky, nahrazení nebo rozvoj jaderné energetiky, uplatnění potenciálu OZE a zajištění energetické soběstačnosti.

Práce je rozdělena na dvě hlavní části. První teoretickou, která shrnuje poznatky ohledně zdrojové přiměřenosti ČR, vývoj přenosové soustavy a nové praktiky v oblasti provozování PS. Další kapitola, silně spjatá s praktickou částí, se zabývá rešerší dostupných free and open source software solutions(FOSS) prostředími, které dokáží simulovat jak přenosové tak distribuční sítě. Jsou popsány výhody a rozdíly mezi těmito FOSS a shrnuto který konkrétní program je vybrán. Druhá praktická část se zaměřuje na popsání vybraného programu a vytvoření modelu přenosové soustavy České republiky. Tento model je dále podroben několik scénářům a porovnáván s veřejně dostupnými studiemi.

1 Změny promítnuté do české energetiky

Následující kapitola se soustředí na důležité body v oblasti proměny české energetiky. Obsahově je vytvořena tak, aby dokládala veškeré informace k vytvořenému modelu v praktické části. Samozřejmostí je absence některých podstatných změn jako např. propojení trhů na vnitrodenní a denní bázi, vývoj ceny emisních povolenek aj.

1.1 Evropská energetická politika

Více než interní inovace a nařízení ovlivňuje domácí chod energetického sektoru právě kritéria Evropské unie. Je nutné zmínit hlavně Clean Energy Package for All European (dále jen CEP) přijatý v roce 2019, který nastavuje legitimní rámec pro transformaci energetického sektoru v duchu Pařížské dohody. ČEPS zavazuje k posílení zejména v těchto čtyřech dimenzích, a to:

1. energetická bezpečnost,
2. vnitřní trh s energií,
3. výzkum, inovace a konkurenceschopnost,
4. energetická účinnost.

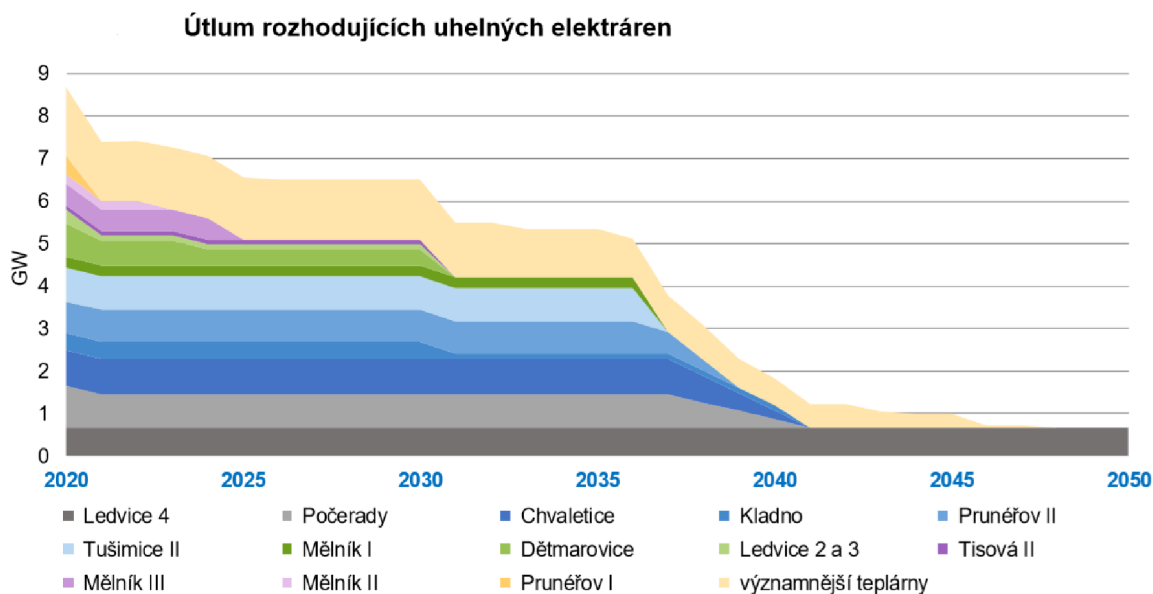
Konkrétně se jedná o: alespoň čtyřicetiprocentní snížení emisí skleníkových plynů, alespoň třicetidvouprocentní podíl energie z OZE a **nejméně patnáctiprocentní propojení ES (interconnection)**.

ENTSO-E se primárně snaží dosáhnout optimálního řízení a rozvoje evropských elektroenergetických přenosových soustav (PS) a dotvoření a fungování vnitřního trhu s elektřinou, který je kritický pro naplnění cílů EU. Např. ČEPS jako součásti regionu CORE pracuje na zavedení společných postupů týkajících se přeshraničním obchodováním a provozu propojených PS dle evropských síťových nařízení (Guideline Code on electricity transmission system operator, Network code on electricity emergency and restoration)[1]. Proto je nutné sledovat vývoj evropského prostředí a implementovat tyto změny do české elektrizační soustavy.

Nové nařízení se konkrétně promítnou do: změny zdrojové základny (odstavení uhelných bloků), navýšení přeshraničních kapacit, implementování nových zdrojů připojených primárně do DS a podobně[1].

1.2 Odklon od uhlí

Následky transformace české energetiky jsou z největší části stanovené tzv. phase outem uhelných bloků. Zastoupení těchto výroben je na tuzemském trhu markantní a přináší největší otázky ohledně odstavení a nahrazení těchto zdrojů. Proto je nutné mít o uhelných zdrojích přesné informace, ať již o možných kapacitách zdrojů nebo jejich plánovaném odstavení. Česká vláda sestavila pro tento úkol Uhelnou komisi, která již řeší výchozí

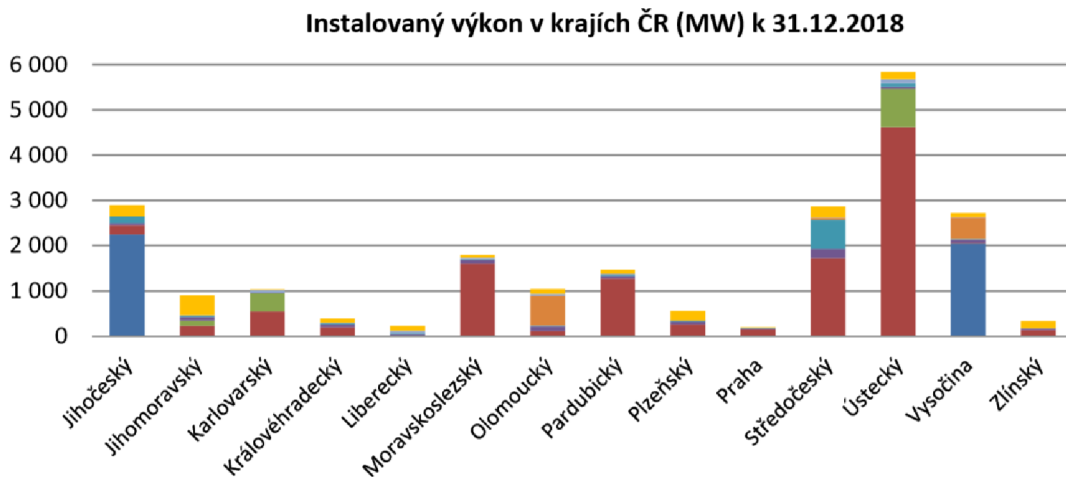


Obr. 1.1: Výhledový phase out uhelných bloků [16]

stanovisko. Rozhodnutí této komise musí být vysoce citlivostní, jelikož se dotkne jak ekonomické tak i sociální struktury. Česká republika ale není prvním uplatnitelem těchto změn a může čerpat nebo se inspirovat z okolních států, které jsou v této otázce dál, jako např. Kanada, Slovensko, Velká Británie nebo Německo. Pro současný statistický vývoj v Evropě doporučuji tento zdroj [14]. Každá země má pro podobu phase outu svůj specifický přístup, ale výstup je jednotný. Legální ukončení uhelných bloků s co nejmenšími dopady. Samotná analýza o odstavení uhelných elektráren je silně závislá na emisních povolenkách a toto téma by bylo z větší části ekonomické. Práce se tímto dále nezabývá a pracuje pouze s technickými fakty o dosavadních výkonových kapacitách. Jako příklad důležitého zastoupení fosilní palivy dodejme pouze, že v roce 2018 bylo vyrobeno 37,7 TWh v hnědém uhlí, které se podílí na celkové výrobě 43 %. Z této části je vyrobeno 21 TWh v Ústeckém kraji a 2,8 TWh v Karlovarském kraji[11]. Dále 3 TWh v Moravskoslezském kraji z Dětmárovice a okolních tepláren, které nesmíme opomenout.

V otázce phase outu zmiňme alespoň pár faktů:

1. Elektrárna **Ledvice 4** bude nadále neomezeně v provozu i v horizontu roku 2050.
2. Elektrárny **Tušimice II**, **Pruněrov II**, **Chvaletice** a **Počerady** čeká střednědobý výhled životnosti. U elektrárny Počerad budoucí provoz závisí na nutné modernizaci elektráren pro plnění nejnovější ekologické legislativy. V opačném případě by svůj provoz měla ukončit kolem roku 2023.
3. Dva ze současných čtyř bloků **Chvaletic** jsou již nyní připraveny plnit současné normy a očekává se investice do zbylých dvou. Elektrárna Chvaletice, alespoň její část, by měla setrvat v soustavě do roku 2040.
4. Při současném trendu se provoz elektrárny **Dětmarovice** předpokládá v roce 2023
5. Další atypický blok elektrárny **Mělník** by měl ukončit svoji činnost roku 2036 (důležitá dodávka tepelné energie pro Prahu).
6. Poslední neznámá je u elektráren **Tušimice II** a **Pruněrov II**, které jsou retro fitovány. Současný odhad roku odstavení je 2030.



Obr. 1.2: Grafické znázornění instalovaného výkonu v ČR z důvodu zvýšené pozornosti na Ústecký, Středočeský a Moravskoslezský kraj. Pro podrobnosti viz. [11]

Severo-západní oblast České republiky se z hlediska zdrojové základny značně promění. V současnosti, oblast s vysokým výrobním potenciálem, dojde k značné míře odstavování, které změní charakter PS ČR. Právě z tohoto důvodu je kapitola zmíněna a sepsaný přehled je nutný k scénářovým modelům. Jeden z vytvořených scénářů souvisí právě s odstavením uhelných kapacit a zkoumá tak přerozdělení toků výkonu v soustavě[11][16].

1.3 Potenciál v obnovitelných zdrojích energie

Obnovitelným zdrojům energie (dále jen OZE) je stále kladen vyšší důraz a pozornost. Jak tyto nové prostředky k výrobě energie pro ČR ve vyšší míře obstojí, ukáže právě následující dekáda. Zkušenosti z hlediska návrhu, instalací a řízení jsou dostatečné ale nastává další milník v oblasti životnosti těchto zdrojů. Orientančí dobu života uvedme mezi dvaceti až třiceti lety a právě "repowering", tedy obnovení dožívajících OZE, bude další důležitá otázka. Repowering je stále nejistý a to z důvodu finanční podpory OZE a zvyšujícími se náklady na strojovou obnovu. Mimo faktoru decentrálního charakteru OZE nezastupuje zdroje základního zatížení a z důvodu okamžité rovnováhy mezi spotřebou a výrobou musí být zálohovány. V oblasti českého potenciálu jsou výsledky známé, nyní je nutné se zaměřit na schopnost řízení elektrizační soustavy s těmito zdroji a reálný podíl na kterém se můžou podílet na každodenní spotřebě. Uvedme pro příklad dny maxima a minima zatížení roku 2018 kde se OZE podílely na výrobě v jednotkách procent. Dny minima

Tab. 1.1: Přehled studií zabývajících se výhledem zdrojové základny pro ČR.

Název	Autor	Rok	Ref.	Web
Czech power grid without electricity from coal	Frank Bold	2018	[7]	Link
Czech power grid–sensitivity analysis	Frank Bold	2018	[6]	Link
Rozvoj obnovitelných zdrojů	Deloitte	2019	[9]	Link
Očekávaná rovnováha elektřiny a plynu	OTE	2018	[8]	Link
Hodnocení zdrojové přiměřenosti 2040	ČEPS	2019	[10]	Link
Hodnocení přiměřenosti kapacit 2030	ČEPS	2018	[17]	Link
Roční zpráva o provozu ES ČR 2018	ERÚ	2019	[11]	Link
Rozvoj podporovaných zdrojů energie do roku 2030	MPO	2019	[13]	Link
Clean energy for all european	EU	2019	[1]	Link
Network development plan	ENTSO-E	2018	[12]	Link
Výhled do roku 2060–prezentační materiál	OTE	2019	[16]	Link
Potenciál OZE v ČR	Komora OZE	2015	[19]	Link

a maxima zatížení jsou vhodné ukázky pro absenci výroby energie z OZE a nastává otázka k jejich zálohování. I zde proto vzniká vyšší náročnost na členitost a rozsáhlost simulačního prostředí kvůli méně stabilním proměnným. Právě z důvodů mnohých neznámých uvádím pouze výčet těch nejvhodnějších studií pro ČR s kterými by se měl čtenář seznámit pokud chce nabýt přehled o zdrojové základně České republiky, jejího vývoje a proměny v budoucnu (tabulka 1.1). Stručně se dají zdroje k vývoji OZE charakterizovat takto:

Z [11] čtenář získá přehled o aktuálních datech výroby elektřiny z OZE i celkový přehled ES. [10] se zabývá výhledem ES do roku 2040 a je zde popsán reálný přístup k novým zdrojům OZE, proměny přenosové soustavy a budoucí cíle ES ČR. Doplnující informace

Tab. 1.2: Instalovaný výkon OZE v realistickém scénáři dle [9].

Zdroj	2020 (MW)	2025 (MW)	2030 (MW)
Fotovoltaické elektrárny	2158,0	5112,5	9000,0
Větrné elektrárny	319,8	585,4	1400
Vodní elektrárny	1091,9	1100,4	1100,4
Bioplynové stanice–Energetika	392,7	362,8	224,2
Biplynové stanice–KVET	0,0	0,0	0,0
Biomasa	438,0	438,0	438,0
Biomasa	43,6	51,8	70,2
Biologicky roz. část TKO	35,4	110,7	120,8
Geotermál. elektrárny	9,0	9,0	23,9
Celkem	4488,3	7770,6	12377,6

může ještě poskytnout [8][16], které pro Českou republiku uvádí jak možný vývoj OZE, tak proměnu zdrojové základny, i jako jedna z mála vývoj plynové energetiky. Závěrem zmiňme komerční studie jako [7],[9], [19]. Právě těmito komerčním studiím může FOSS konkurovat a rychle si přizpůsobit situaci než zadané dlouhodobé projekty neschopné akceptovat rychlou proměnu energetického prostředí. I přesto, že práce se zabývá primárně přenosovou sítí je nutné vzít v potaz i zdrojovou základnu a možné budoucí transformace. Toto téma je

Tab. 1.3: Potenciál OZE a proměna zdrojové základny pro ČR rok 2030 dle [6].

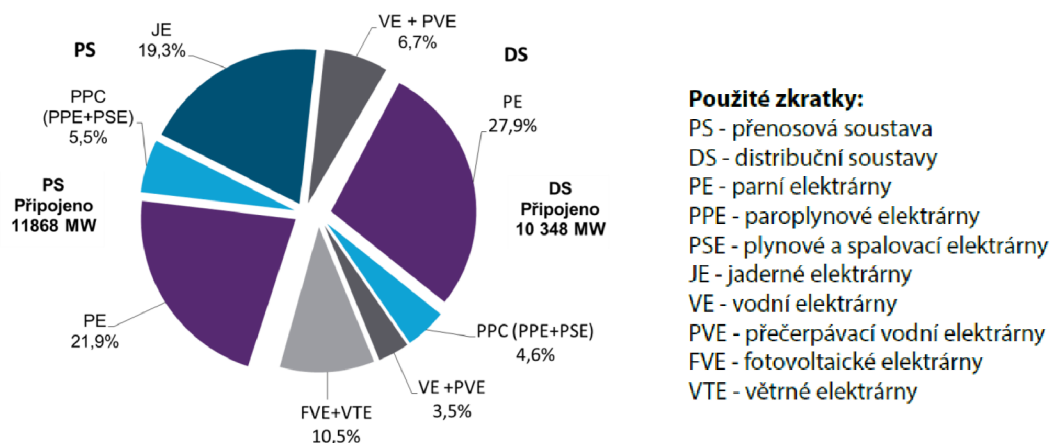
Zdroj	2017 (MWe)	2030 (MWe)
JE EDU	2040	2040
JE ETE	2250	2250
Zdroje na hnědé uhlí	8707	1825
Zdroje na černé uhlí	1496	696
Zdroje na zemní plyn s kombinovaným cyklem	1043	1646
Zdroje na zemní plyn s plynovou turbínou	170	170
Malé kogenerační zdroje na zemní plyn	220	980
Vodní elektrárny	1090	1142
Přečerpávací vodní elektrárny	1130	1175
Větrné elektrárny	278	2050
Fotovoltaické elektrárny	2100	5500
Zdroje na biomasu	426	900
Zdroje na bioplyn	332	485
Geotermální elektrárny	0	50

silně ovlivněno evropskou energetickou situací a proto je zatížena mírou nejistoty, která

je závislá na faktorech jako právě výše podpory OZE, odstavení či podpora JE, nárůst elektromobility či tepelných čerpadel aj. Z tohoto důvodu je přínosné provádět výpočty s různými scénáři, porovnávat výsledky s předchozími lety a analyzovat tak nároky na PS v méně očekávaných stavech. Jak můžeme vidět přední studie pro výhled OZE a proměnu zdrojové základny se liší ve většině predikovaných odhadech. Jedinou podstatnou shodu lze uvést u elektráren vodních. Na těchto příkladech práce jasně poukazuje na rozdílnost pohledu ve většině studiích. K tomuto stanovisku nejistot je výhodné se postavit s opensourcesoftware řešením a aplikovat tak rychle proběhlé změny a korigovat výhledy.

1.4 Rozvoj PS

Samotná inovace přenosové soustavy probíhá od prvotních myšlenek do realizace v řádu let i desetiletí a každá z nich je klíčová pro celkové parametry soustavy. Výchozí model použitý v programu Pandapower je sestaven pro rok 2026. K výchozímu stavu se budou porovnávat jednotlivé změny v zdrojové základně a nebo v přenosové soustavě. Změny v přenosové soustavě jsou zjednodušeny na dva stěžejní body. Zvýšení napěťové hladiny všech 220 kV vedení na 400 kV a zdvojení určitých vedení. Konfigurace zdrojové základny je možné přizpůsobit jakýmkoliv scénářům a je primárně cílena na odstavení uhelných bloků. Tyto změny by měly být adekvátní k podobnosti soustavy v roce 2040. Práce svým



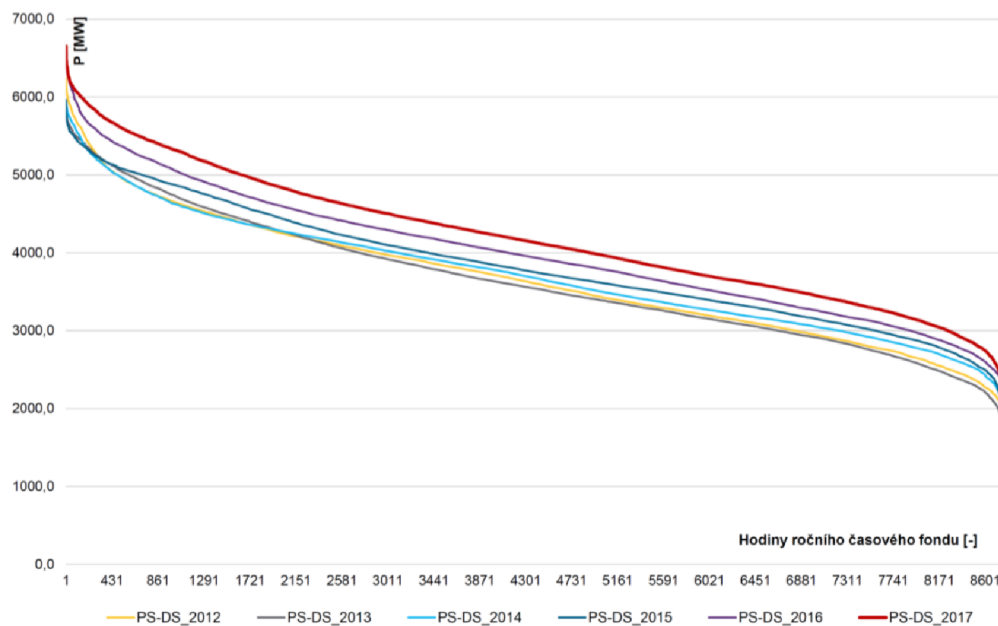
Obr. 1.3: Přehled instalovaného výkonu připojeného do PS a DS v ČR k 31.12.2017. Detailnější hodnoty se nachází v [11].

rozsahem se nemůže zabývat veškerými změnami, které jsou uvedené v Plánu rozvoje PS ČR a je klíčové zaměřit se pouze na segmenty pro modelaci soustavy v PP. S nástupem menších zdrojů a hlavně OZE se hovoří o tzv. decentralizaci. Z pohledu řízení přenosové soustavy nastává otázka, jak moc se může klasická koncepce změnit a stále být udržitelná. Pojmem klasickou koncepcí rozumíme přenést elektrickou energii z větších výkonových

bloků vyvedenou do přenosové sítě přes distribuční až ke koncovému spotřebiteli. Nyní se stále více instalovaného výkonu připojuje již do DS a je jen otázkou do jaké míry se tato vazba bude měnit (hovoříme o využití transformační vazby mezi PS a DS na obrázku 1.4). Zesilující trend podpoří právě odstavení elektráren s vysokou setrvačností připojených do PS. Tato změna navýší nedostatek regulačního výkonu i zhorší udržení napětí v zadaných mezích (menší zdroje mají horší regulační schopnosti a nedostatečnou komunikaci nebo řízení s PPS). Řízení napětí má v budoucnu napomáhat nové laditelné tlumivky o celkovém výkonu pětikrát 60-120 MVA a třikrát 45 MVA. Doplní tak současný stav tlumivek o celkovém výkonu 14krát 45 MVA. Kompenzace jalového výkonu je nutná z důvodu:

1. změna charakteru zátěže v DS, vyšší míra kabelizace,
2. navýšena kapacita nových vedení při malém zatížení má za důsledek zvýšení jalového výkonu.

Forma klasické koncepce se dá interpretovat transformační vazbou z PS do DS. I přes očekávané a již probíhající změny je tato vazba stále více využívána a momentálně decentralizace nenarušuje stabilní chod PS. Můžou za to i lokální limity ES dané PPS pro maximální výkon decentrálních zdrojů připojených v jednotlivých distribučních lokalitách ale především stále vyšší míra využití přeshraničních toků na úrovni PS[15].



Obr. 1.4: Čára trvání výkonu tekoucího z PS do DS pro roky 2012 – 2017. [15]

1.4.1 Rozvoj zdrojové základny

Mimo dostatečnou kapacitu sítě PPS zkoumá s předstihem rozvoj zdrojové základny. Operátor musí adekvátně reagovat na změny instalovaného výkonu a garantovat připojení zdroje do PS (záleží na velikosti zdroje, vyhláška stanovuje povinnost operátoru PS připojit zdroj na vlastní náklady, tento trend je u států různý a výrazně se promítá do rentability). Z dotazníkového šetření vyplývá, že PPS se nepřipravuje na připojení nového zdroje do roku 2030 a veškerý rozvoj lze předpokládat na decentrální úrovni. Operátor přenosové soustavy očekává čtyři základní pilíře změn:

1. Modernizace a rozvoj zdrojů v severozápadních Čechách a zároveň také jejich phase out,
2. výstavba nového jaderného zdroje ETE3,4 a EDU 5,6,
3. připojení OZE v oblasti Chomutovska 140 MW do PS a 100 MW do DS na Karlovarsku,
4. zvýšení transformačního výkonu v oblasti Ostravska, tedy nárůst spotřeby.

Veškeré tyto změny jsou detailně popisovány v Plánu rozvoje Přenosové soustavy ČR.

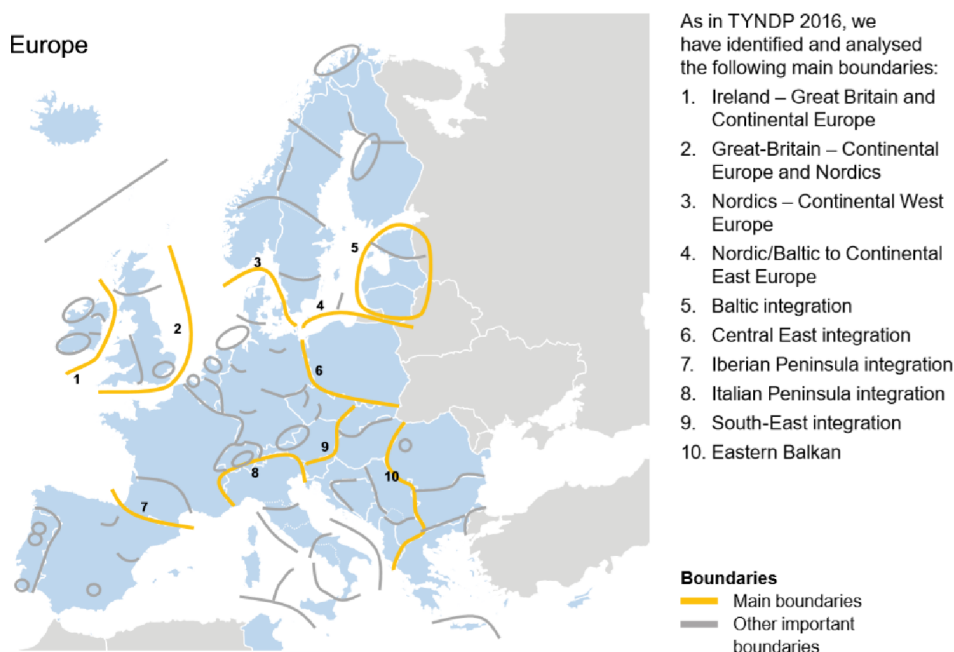
druh primární energie primary energy source	2018	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
hnědé uhlí brown coal	8 919	8 745	6 914	6 712	6 044	2 896	1 184	1 092
černé uhlí hard coal	1 432	1 331	854	854	448	448	461	461
zemní plyn natural gas	1 889	1 953	1 925	2 072	2 632	5 528	6 091	6 163
topné oleje fuel oil	64	64	62	74	73	72	71	71
biomasa biomass	466	506	606	706	806	906	1 354	1 454
bioplyn biogas	419	434	470	507	544	581	617	654
technologické plyny by-product gas	185	185	188	184	184	176	176	176
BRKO BDMW	33	33	46	61	76	91	106	121
ostatní komunální odpady other municipal waste	22	22	60	70	80	90	100	110
jaderná energie nuclear	4 290	4 290	4 290	4 290	4 290	4 650	7 050	7 050
vodní energie (bez PVE) hydro (excluding PSHPP)	1 109	1 111	1 116	1 121	1 126	1 131	1 136	1 141
větrná energie wind	350	520	701	789	949	1 109	1 120	1 130
sluneční energie solar	2 050	2 051	3 100	3 513	4 562	5 610	5 660	5 710
geotermální energie geothermal	0	0	5	10	15	20	25	30
zdroje pro akumulaci (včetně PVE) accumulation (incl. PSHPP)	1 170	1 170	1 235	1 301	1 563	1 813	1 841	1 870
ES ČR celkem total	22 398	22 413	21 571	22 263	23 390	25 120	26 992	27 233

Obr. 1.5: Instalovaný výkon (MW) dle primární energie v koncepční případové studii dle [8]. V porovnání s 1.2 a 1.3 je vidět zcela rozdílný pohled na zdrojovou základnu v budoucnu.

1.5 Česká republika jako součást ENTSO-E

Mezi další část patří propojenost ES ČR se sousedními státy. Tento přenos probíhá výhradně na poli PS. ČEPS je již nyní silně implementován do ENTSO-E, kde také musí sledovat nové trendy a rozvoj okolních soustav. Propojenost ES je také jeden z bodů jak

vyřešit budoucí změnu energetiky a z části importovat potřebné množství elektrické energie. Samozřejmě odkázání se ve větší míře na okolní státy nesplňuje kritérium strategické infrastruktury ale i přesto nyní sousedící přenosové soustavy si dokáží silně vypomoct a je nutné v této oblasti také uvažovat a rozhodovat o budoucích proměnách současné PS. Rozdělení jednotlivých lokalit EU lze nalézt v dokumentu TYNDP. Tato kapitola je

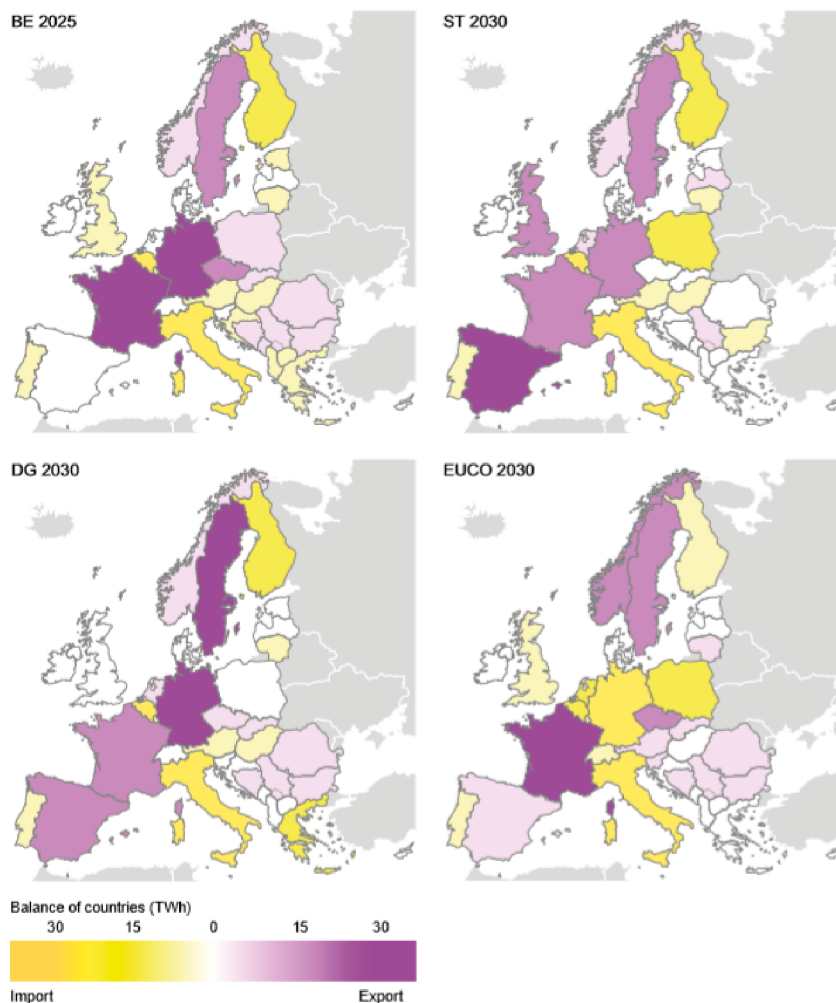


Obr. 1.6: Analýza TYNDP 2018 hlavních hranic podle charakteru daných lokalit

primárně zmíněna aby čtenář si uvědomil fungování české přenosové soustavy jako části evropské sítě. Z hlediska ENTSO-E je ČEPS zařazen do regionu Central Europe a typická je pro PS tranzitní vlastnost energie ze severního Německa do jižních částí regionu Central East (tedy Rakouska a Slovenska). Česká přenosová soustava zde tedy slouží jako transportní země a musí se tímto charakterem vyrovnat. Simulace můžou odpovědět na otázky jaká je míra přenášeného výkonu tak, aby přebytečný výkon byl transportován a zároveň byl zabezpečen chod české ES. Mimo řešení aktuálních stavů je zde i ta výhoda, že při sledování změn zdrojové základy v okolních státech může model odhalit nejrizikovější místa přenosu, popř. říct, kde je nedostatečná kapacita vedení, navýšení transformačního výkonu aj. Při opensoftwaresolution je až žádoucí spolupráce regionů nebo států na vytvoření detailního kódu a zkoumání změn soustavy. Je to krok, který velmi přispěje k fungování Evropské unie jako takové.

1.5.1 Network Development Plan 2018

Zpráva Vývoje evropské sítě[12] je z hlediska změn přenosových soustav a zdrojových základů je detailnějším materiálem než CEP. Dokument můžeme dělit do dvou částí, první s všeobecným přehledem o ENTSO-E a druhým, zabývajícím se konkrétně částí Central East. Obě studie co do rozsahu se fokusují na sestavení plánu jak rozšířit a propojit současné členské země EU a dosáhnout tak potřebných parametrů k bezproblémovému chodu „zelené“ energetiky. Obecně TYNDP odpovídá na otázku změny v evropské ener-



Obr. 1.7: Jednotlivé balance států podle scénáře TYNDP. BE 2025–scénář současného vývoje ENTSO-E, ST 2030–výhled maximálně využitých dotací, optimalizace průmyslu dle aktuální výroby a stálý trend emisních povolenek, DG2030–primárně počítá s rozvojem baterií a malovýroben na úrovni DS, EUCO 2030–scénář vytvořený Evropskou komisí pro splnění cílů uzavřených v roce 2014, např. splnění energetické účinnosti 30 %.

getice. Bere v úvahu několik scénářů a pro jednotlivé regiony detailně stanovuje postupy a progres. Předpovídá saldo jednotlivých států. Přeshraniční kapacita jednotlivých soustav

na úrovni států má vzrůstající charakter a předpokládá se větší obchodní zájem ale také potlačení rozdílnosti cen napříč zeměmi. To vše také z důvodu charakteru obnovitelných zdrojů a potřeby přenést aktuální výkony. TYNDP rovněž počítá s vyšším využitím a zastoupením přečerpávacích elektráren a jiných akumulčních zdrojů. Dokument se také zabývá setrváním soustavy v současném stavu a popisuje dopady neprovedených změn (tzv. cost of no action). Důležitou myšlenku kterou studie uvádí je nemožnost provozovat efektivně OZE s nedostatečným propojením, tedy schopností transportovat tyto výkony.

2 Free and Open Source Software

Pojem FOSS zažívá nevídaný rozmach a pomalu dokazuje konkurenceschopnosti ke komerčním programům. Již nyní jsou náznaky menší oblíbenosti programů jako Matlab náhradou za univerzální free kódovací prostředí (zejména python).

2.1 Požadavky

Změna paradigmatu v energetických systémech k větší složitosti zejména kvůli distribuované výrobě a rostoucímu stupni automatizace zvyšuje náročnost provozu, analýz a plánování. Výzvy se nyní tvoří výhradně v distribučních sítích, kde začíná dominovat podíl instalovaného výkonu. Proto je stále vyšší poptávka po dostatečně rozšířených systémech, které umožňují programovat a simulovat náročnější prvky s různým charakterem. Open-Source řešení nabízí bezplatnou a transparentní alternativu k komerčním programům za účelu využití ať již v edukačním smyslu nebo vědeckých pracích.

2.2 Nabídka trhu

Trh nabízí několik výpočetních nástrojů s odlišnými funkcemi a prioritami. Většina pokročilejších dostupných FOSS jsou odvozeny z platform Matlab nebo Delphi (Pascal) a ačkoliv samotné balíčky jsou veřejně dostupné a bezplatné, závisí na komerčních prostředích.

MATPOWER Velmi využívané rozšíření MATPOWER je tzv. open source tool, tedy balíček m.filů, pracující na základě programu MATLAB. Hlavní určení balíčku je řešení power flow a optimal power flow, tedy zkoumání toků výkonů v sítích i s cenovou závislostí a jejich optimalizace. K tomuto balíčku je také možno přidat m.file MOST–Matpower Optimal Scheduling Tool, který dokáže rozšířit pole působnosti i na problematiku plánování a odstávek. V těchto nástrojích je možné si povšimnout určité podobnosti mezi MATPOWER a PANDAPOWER, která vznikla na PYPOWER toolu jenž je odvozen od MATPOWER. Alternativou k placeným programům může být software jako GNU Octave. Octave ale nemůže zaručit stoprocentní funkčnost. V prostředí MATLAB se dále vyvinul MATDYN tool doplňující MATPOWER s řešením dynamických stavů elektrické sítě. Celkově MATLAB tedy zvládá řešení ustáleného chodu, postupné rovnoměrné přetěžování a přechodné děje. Řešení ustáleného chodu je pouze na jednofázové bázi. MATPOWER slouží primárně k edukačním záměrům. Nástroj je veřejně dostupný a zdarma (ovšem opět závislý na MATLAB).

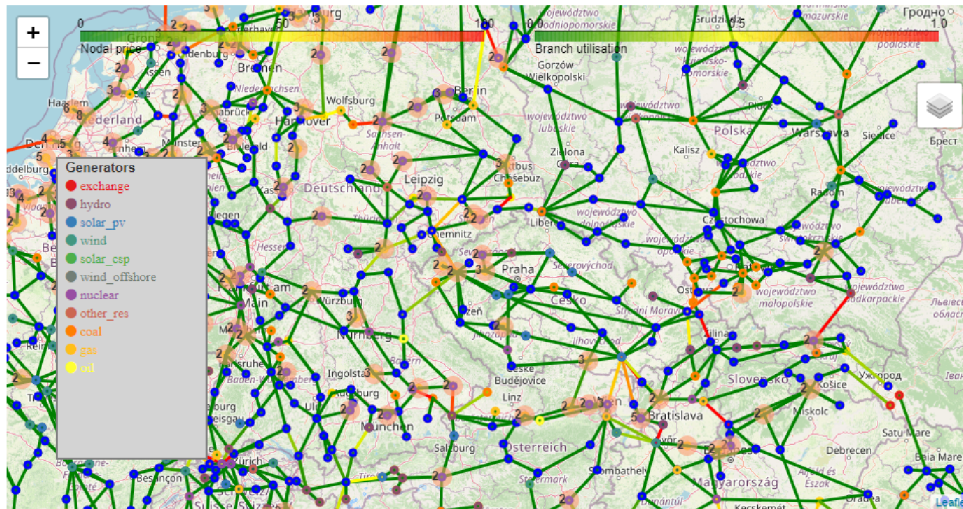
PYPOWER je analogií balíčku MATPOWER odlišující se stoprocentní free dostupností bez závislosti na jiných komerčních prostředích. Tento nástroj již není aktivní a dále vyvíjen, ale i přesto je možné shlédnout kódy a postupy dostupné na úložišti GITHUB–největší knihovna skriptů simulací sítě. PYPOWER se tedy stejně jako MATPOWER zabývá power flow a optimal power flow využívající jazyk PYTHON. Navíc PYPOWER zvládá i třífázové řešení ustáleného chodu ES. Autoři se vývojem programu MATLAB nechali plně inspirovat a také po vzoru PYPOWER vytvořili jeho rozšíření pro řešení dynamických dějů PYPOWER-dynamics.

PSAT Zkratkou Power Systems Analysis Toolbox je tento nástroj řazen k dalším balíčkům využívající MATLAB a vyvinut Fredericem Milanem k řešení energetických systémů a simulací. Autor uvádí i kompatibilitu s GNU OCTAVE softwarem. Funkce zahrnují power flow, optimal power flow, řešení stability a přechodných dějů. Dále také modely větrných turbín, kompletní grafické rozhraní a propojení s programy GAMS a UWPFLOW. Funkce PSAT dokážou řešit ustálený chod ES (jednofázově), analýzu napěťové stability, optimalizaci dodávaných výkonů, stabilitu malých kyvů a přechodné děje. Mezi další benefity patří bohatá knihovna síťových prvků, které lze uživatelsky modifikovat.

PyPSA Free nástroj Python for Power System Analysis slouží k optimalizaci energetických systémů, modelaci intermitentních zdrojů a využití úložišť. PyPSA se zabývá řešením power flow, optimal power flow, investičním vyhodnocením nových projektů a propojením mezi AC a DC soustavama. Je založena na Python prostředí a obsahuje širokou škálu elektrických prvků včetně kompatibility s pandapower a powerdynamics knihovnama. Benefitem jsou rozsáhlé demonstrace na Jupyter notebook stránkách, kde se nachází skripty se slovními komentáři. Využívající balíčky Python PyPSA využívá zejména pandas (úložiště dat), numpy a scipy ke kalkulacím a řešením matic a plotly a matplotlib pro grafické rozhraní.

GridCal Software cílí k vytvoření kompletní platformy pro elektrizační soustavy. Obdobně založen na Python prostředí a plně kompatibilní s Linux, Windows a OSX. Některé nástroje jsou kompatibilní s DigiSilent, MATPOWER nebo PSS. Program se zabývá power flow (Newton-Rhapson metoda s rozšířením iwamoto–totožné s PANDAPOWER), optimal power flow, časové simulace, počítání třífázového zkratu, blackout „kaskádu“ simulaci včetně metody step by step aj. Samozřejmostí je příručka na GITHUB s popisem a dostupností skriptů. GridCal se také pyšní jedním z nejobsáhlejších katalogů (knihovny), kde se nachází řádově stovky reálných prvků jako kabely, vedení, transformátory apod.

POWERGAMA Power Grid and Market Analysis je open source python balíček pro řešení energetických soustav a tržních alazých. Hlavním přínosem je simulační nástroj pro



Obr. 2.1: Ukázka projektu Evropa 2014 v programu GridCal[22]

implementování obnovitelných zdrojů do větších soustav k optimalizaci výrobní přiměřenosti. Systém založený na řešení power flow zohledňující cenu charakter daných zdrojů s možností simulace pro zvolené časové období. V současnosti se vývojáři soustředí na optimální chod výroben s akumulací energie (přečerpávací elektrárny, termální úložiště) a k určení nejvýhodnější struktury komplexu. Jako většina nástrojů v jazyce Python i POWERGAMA má podrobné ukázky v JupyterNotebook s různými scénáři ale také simulaci evropské přenosové sítě v roce 2014 dostupné na [Link].

OpenDSS Veřejně dostupný program Distribution system simulator vytvořený EPRI institutem se zabývá distribuční úrovní sítí k vytvořením analýz soustav, efektivitu modernizace apod. Zabývá se řešením power flow, zkratů–přechodnými ději obecně a time series calculation, tedy simulaci časového rozmezí. OpenDSS se využívá jako staticky simulační prostředí k řešení toků výkonů rozsáhlých distribučních sítí. Využívající jazyk Delphi má nevýhodu nefunkčnosti v systémech Linux.

Další programy Jeden z výraznějších programů na trhu je systém OpenModelica, který pokrývá širokou škálu průmyslových odvětví, právě proto ale není tak detailní na jednotlivé problémy a náročnější na zpracování vstupních hodnot. Pro pokrytí celého trhu možností v oblasti open source software solution existují méně používané ale přesto plně funkční další programy/nástroje. Jen krátce zmiňme jejich výčet a hlavní funkce. Program Dome (python), který je napodobeninou PSAT. Voltage Stability Toolbox (VST) se zabývá stabilitou sítí a mj. bifurcation analysis (provedení jedné malé změny), The Internet Technology-based Open-source Power system simulation system (InterPSS) je software k řešení elektrizačních soustav v Java rozhraní, AMES a DCOPFJ balíčky pro Java jazyk,

Tab. 2.1: Přehled vybraných programů dle [5]. Tento zdroj uvádí srovnání vybraných programů. Tuto tabulku doplňuje dále 2.3. Klasifikace typů je F (framework), M (model), D (data project).

Název	Typ	Popis	Prostředí	Spuštěno
Balmorel	F	Energy system model of fra- mework	GAMS	2001
Calliope	F	Energy system model of fra- mework	Python	2013
deeco	F	Operational optimisation model framework	C++	2004
GridCal	F	Power system model framework based on PYPOWER	Python	2016
oemof	F	Energy system model framework	Python	2015
oedb	D	Database for energy model input and output data	Python	2016
OPSD	D	Power system data platform	PHP	2016
OSeMOSYS	F	Energy system model framework	GAMS	2009
pandapower	F	Power system model framework based od PYPOWER	Python	2016
PYPOWER	F	Power system model framework	Python	2011
PyPsa	F	Power system model framework inspired by PYPOWER	Python	2016
Renewables- .ninja	D	Platform for PV and wind gene- ration data and models	Python	2015
renpass	M	Power system simulation model	R	2014
renpassGIS	M	German electricity market model	Python	2016
SciGRID	M	Transmission grid model	Python	2015
TEMOA	F	Energy system model framework	Python	2010
UKTM	M	UK energy system model based on TIMES	GAMS	–

V USA byl také vytvořen program GridLab–tool sloužící obdobně k řešení elektrizačních soustav vytvořený ústavem pro energii. Poslední Pylon pro python (Pypower)[5].

V porovnání doby vzniku programů je vidět stále vyšší obliba Python prostředí, které zastupuje nejrozšířenější FOSS programy. Jednoduchost s možností veřejně otestovat jednotlivé softwary dává FOSS markantní výhodu oproti komerčním programům a také dynamiku změn reagující na aktuální trendy. Tabulka 2.3 srovnává nejhodnotnější pro-

gramy. Není náhodou, že nejnovější a nejrozšířenější PANDAPOWÉR vzešel po několika krocích právě z prvotní myšlenky MATPOWERU. Navíc je možné řešit ustálený chod sítě pro třífázové soustavy. Tabulka 2.1 shrnuje další zástupce FOSS a dokazuje, že trh je opravdu široký.

Je otázkou jaké bude následné zastoupení mezi FOSS a komerčními programy. Porovnání je náročnější proces, ať již z finančního hlediska (ně každý program disponuje demo verzí) nebo časovou náročností a školením v daném programu. Obecně se každý program soustředí na jinou problematiku a věrohodně porovnat tyto programy musí provádět kvalifikovaný pracovník s dostatečnou praxí. Napomocť tomuto úskalí můžou např. IEEE (nebo CIGRE) testovací soustavy které by urychlily porovnání mezi jednotlivými programy. U open source probíhá přirozená selekce, kdy samotní uživatelé hodnotí a vyzdvihují jednotlivé programy. Další možnosti srovnání nabízí tato práce[18], která se zaměřuje na porovnání určitých programů (ale i komerčních). V České republice je také populární program MODES a E-VLIVY (oba komerční). Tyto rozhraní jsou ovšem omezené a neumožňují implementaci komponent do knihovny a licenční politika dále omezuje šíření výsledků analýz. Tyto nedostatky FOSS postrádají[23][5][24].

Tab. 2.2: Práce[18] se zabývá porovnáním vybraných programů. Ukázka možnosti srovnání programů dle licence.

Software/Licence	Free	student	demo	placená	placené rozšíření
PWS	✓	✓	-	✓	✓
MATPOWER	✓	-	-	-	-
PSAT	✓	-	-	-	-
E-vlivy/Dncalc	-	-	✓	-	-
PyPSA	✓	-	-	-	-
ETAP	-	-	✓	✓	✓
EasyPower	-	-	✓	✓	✓

2.3 Pandapower

Program Pandapower je nástroj pro analýzu a výpočet energetických systémů (statické a kvazistacionární děje), optimalizaci energetických stavů, výpočty toků výkonů (i pro třífázové systémy), odhad chybných stavů, topologii a řešení zkratů dle IEC 60909. Základní početní rozhraní je založeno na Newtonově-Rhaponově metodě. Pro pochopení výpočetní techniky a rozdílů mezi algoritmy je možno využít tuto literaturu [2]. Nově využívaný program PandaPower byl stvořen s myšlenkou uzavřít mezeru mezi komerčními a opensource programy. Vývojáři FOSS shledávali největší nedostatek v detailnosti

Tab. 2.3: Srovnání elementů napříč vybranými programy s Pandapower dle[3]

	MATPOWER 6.0	PYPOWER 5.1.2	PSAT 2.1.10	OPENDSS 7.6.5	PyPSA 0.10	GridCal	GridLAB-D 3.2	pandapower 2.2.0
ZIP-load			✓	✓		✓	✓	✓
Line	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2-winding transformer(π)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2-winding transformer(T)				✓	✓		✓	✓
DC line			✓	✓			✓	✓
Ideal switches								✓
Volt. control Generator	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Static Load	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Shunt	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Asymmetrical Impedance								✓
Ward Equivalents								✓
Storage Units				✓	✓		✓	✓

používaných prvků a knihoven. Na druhou stranu opensource dokáží pohotově a rychle reagovat na vyvíjející se změny v oblasti energetiky. Aby program pokryl největší zmíněnou slabinu založil svůj systém na rozšířených knihovnách. Program byl vybrán kvůli dobré kompatibilitě se všemi operačními systémy, snadnou instalací a univerzálním prostředím Python. Splňuje tak základní kritéria pro spolupráci v mezinárodních skupinách a je také vybrán pro ukázání nové možnosti české veřejnosti. Dalším benefitem je využití jednoho z prvků smartgrid. Tak jako ČEPS využívá aktuálních dat o teplotě k přesnějšímu zatížení vedení i tato funkce je dostupná v programu (`consider_line_temperature=True`). Tato zpřesňující funkce vyžaduje vstupní soubor hodnot s aktuální teplotou. V neposlední řadě je dostupná funkce N-1. Základ prostředí je postaven na široké škále prvků jako transformátory (ať už dvou nebo tří), vedení nebo spínače a vznikl jako sloučením několika knihoven z prostředí python (PyPower). Všechny tyto prvky jsou nahrazeny ekvivaletním modelem a požadují vstupní data dle využívané funkce. Dalším pozitivem je právě dobře strukturovaná typizovaná knihovna s množstvím již definovaných prvků. Program také umožňuje vytvoření vlastní knihovny, která urychlí kolektivní práci a zamezí syntaktickým chybám. K testování programu velmi přispěly typové schémata sítí, které mohou být porovnávány v rámci různých programů a jsou veřejně známy jejich výsledky. Díky těmto

modelům je možnost FOSS porovnávat jak v rychlosti tak robustnosti prostředí. Modely byly vytvořeny např. spolkem IEEE nebo CIGRE[3] [4]. Samotní vývojáři Pandapower porovnávají funkčnost programu s DigSilent PowerFactory a PSS Sincal[5][3].

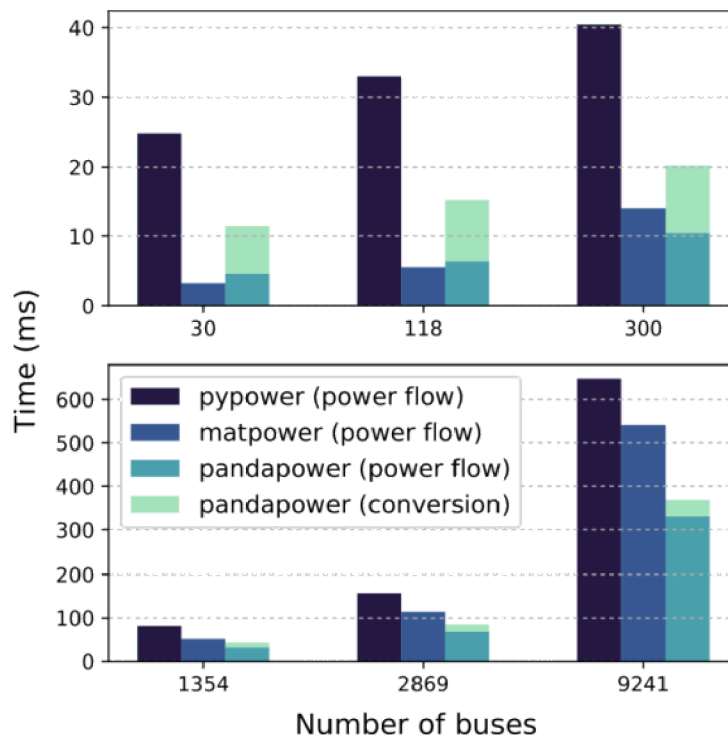
2.3.1 Základní programové bloky

Každý program zahrnující určité funkce je dále posuzován podle jednotlivých elementů a jejich škálou možností. Program Pandapower je založen na užíváním prvků, které tvoří základní strukturu elektrických komponent.

Veškeré tyto prvky které pro elektrické zastoupení jsou nahrazeny ekvivalentními modely nabízí jednu z nejšířších knihoven. Dále je důkladně ověřeno, že opensource pandapower elementy nabízí mnohem větší výběr oproti komerčním programům. Modelování se stává rychlejším a přehlednějším.

Bus

Prvek `Bus` reprezentuje uzly sítě. Jsou definovány napětím daného uzlu `bus.vn_kv`, což je referenční údaj pro poměrný systém (per unit-pu). Výsledkem nebo výstupem pro daný uzel může být velikost napětí `res_bus.vm_pu` a úhel `res_bus.va_degree`.



Obr. 2.2: Porovnání rychlosti řešení v závislosti na počtu uzlů. Pandapower pracuje na základě PyPower solveru. V grafu můžeme vidět srovnání pro PP, PyPower a MatPower. [3]

Load

Element Load neboli zátěž je použit k vytvoření elektrické spotřeby. Prvek je definován spotřebou činného výkonu `load.p_kw` a spotřebou jalového výkonu `load.q_kvar`. K prvkům spotřeby řadíme dále element ZIP-load, který nám dovoluje zátěž reprezentovat složením konstantní činného výkonu, konstantního proudu nebo neměnné impedance. Je doporučeno zadané hodnoty charakterizující zátěž volit kladně. V případě potřeby modelování konstantní výroby, né spotřeby, volíme prvek **Static Generator**. Příkaz `load.const_i_percent` a `load.const_z_percent` definují jaká část zátěže je konstantní (konstantní výkon, konstantní proud a konstantní impedance). Obecně prvek zátěže zahrnuje „měřítkový“ faktor `load.scaling` který umožňuje stupňovat zátěž.

Static generator

Static generator se používá k vytvoření konstantního výkonu charakterizujícího podle činné složky `sgen.p_kw` a jalové složky `gen.q_kvar`. Pokud systém požaduje generátor ovládaný napětím používá se prvek **Generator**. **Static generator** také zahrnuje scale funkci jako Load.

Generator

Prvek Generator umožňuje vytvořit konstantní výrobu činného výkonu `gen.p_kw` v závislosti zatížení na proměnlivém napětí `gen.vm_pu`.

External grid

Externí síť reprezentuje napěťový zdroj s napěťovým rozsahem `ext_grid.vm_pu` a odpovídajícím úhlem `ext_grid.va_degree`.

Shunt

Prvek shunt se používá k vytvoření reaktoru. Shunt je definován jalovým výkonem `shunt.q_kvar` a činným výkonem `shunt.p_kw`, který reprezentuje ztráty.

Line

Vedení jsou modelovány pí článkem. Parametry se vypočítávají dle délky vedení a jejich měrných hodnot. Podélná impedance je definována rezistancí `line.r_ohm_per_km` a reaktancí `line.x_ohm_per_km`. Příčná admitance je definována kapacitou `line.c_nf_per_km`. Zatížitelnost vedení `res_line.loading_percent` je dána jako podíl aktuálního proudu `res_line.i_ka` k maximálnímu proudu vedení `line.max_i_ka`. Takzvaný derating factor `line.df` se definuje k situacím, kdy určité linky nemůžou být maximálně využity. Element Line také nabízí možnost `line.parallel` k definování paralelních linek.

Two-winding Transformer

Dvouvinutový transformátor je běžně nahrazen T článkem. Pandapower nabízí pro kompletní pokrytí také pí článek. Transformátor je charakterizován napětím nakrátko `trafo.v_sc_percent` a taky reálnou částí této hodnoty (real part of relative short-circuit voltage) `trafo.v_scr_percent`. Reálnou část impedance tvoří jouelovy ztráty ve vinutí. Příčná admittance zastupuje ztráty v železném jádře. `Trafo.pfe_kW` definuje ztráty v železe. Dále určujeme stranu vyššího napětí a nižšího napětí `trafo_hv_kv` a `trafo_lv_kv`, které definují převod transformátoru. Hodnoty se nemusí rovnat napětím uzlů. Hodi- nový úhel se určuje `trafo.shift_percent`. Je možné také zadefinovat odbočky trans- formátoru s jednotlivými kroky `trafo.tp_pos`. Také je možné definovat posun fáze na odbočku `trafo.tp_degree_percent` k vytvoření phase shift transformátorů. Odbočky můžou být přiřazeny buď k vyššínebo nižší straně napětí transformátoru. Zatížitelnost prvku `res_trafo.loading_percent` je počítán jako maximální zátěž strany s vyšším na- pětím tak strany s nižším napětím. Reference se může také zvolit jako nominální výkon trafa `trafo.sn_kva` nebo k nominálnímu proudu. Stejně jako vedení se dají transformá- tory řadit paralelně `trafo.parallel`.

Pandapower umí také Tří vinutový transformátor, který je modelován třemi dvouvinuto- vými transformátory do hvězdy (wye connection).

Switch

Switch prvek umožňuje vytvoření ideálních vypínačů. Element spojuje bus–bus větev. Dále může také být vyveden k vedení nebo k transformátoru. Parametr `switch.closed` signalizuje otevřenou nebo zavřenou větev. Uzavřená bus–bus větev se Switchem je gal- vanicky spojená bez úbytku napětí. V počítání powerflow, tedy toků výkonů, v rozlehlých sítí je tento prvek klíčový. Pokud je nahrazen obyčejným Switch prvkem s malou im- pedancí, která způsobí malý úbytek napětí, vytváří to problémy s konvergencí daného výpočtu. Proto právě Pandapower sází na „ideal“ Switch.

DC Transmission Line

DC vedení přenáší činný výkon mezi bus–bus spojením. Přenášený výkon `dcline.p_kw` je snížen o ztráty `dcline.p_loss_kw` absolutní nebo relativní `dcline.p_loss_percent`. DC vedení je modelováno dvěma generátory každým v daném bus elementu.

Impedance

Prvek impedance propojuje dva bus elementy v poměrném per unit systému k dané im- pedanci `impedance.sn_kva`. Impedance nemusí být symetrická, což znamená, že matice náhradního modelu vytváří nesymetrické články.

Ward Equivalentents

Prvek `Ward` je kombinací konstantního odběru s konstantní impedanční zátěží. Zatížení s impedancí je dáno činným a jalovým výkonem `ward.pz_kw` a `ward.qz_kvar` k napětí připojeného uzlu. Odběr se definuje `ward.ps_kw` a `ward.qs_kvar`. Nadstavba prvku `Extended Ward` zahrnuje navíc napěťový zdroj s vnitřní impedancí. Napěťový zdroj je modelován jako generátor bez složky činného výkonu. Vnitřní impedance se definuje parametry `xward.r_ohm` a `xward.x_ohm`.

2.3.2 Základní funkce programu

Program nabízí širokou škálu možností, mezi hlavní ale uvedme: power flow, optimal power flow, state estimation, short circuit calculations a time-series calculation. Jelikož není předmětem práce popsat funkčnost celého programu zaměříme se prakticky pouze na power flow a optimal power s ukázkou, aby čtenář získal přehled o možnosti zadání vstupních dat, výstupu apod. V příloze také uvedeme ukázkou k time-series calculation jako důkaz, že Pandapower je plnohodnotným programem pro řešení elektrizačních soustav.

Před jakýmkoliv projektem a výběrem programu je doporučeno položit si pár základních otázek. Postup jsem zformuloval takto:

1. Zadání projektu a jeho charakter (přechodný děj nebo statický).
2. Požadavek na výstup projektu (požadované hodnoty, např. uzlové úhly v síti).
3. Přehled o dostupných datech projektu a datech nutných k výpočtu (možnost urychlení načíst data např. z .csv souboru).
4. Dostupnost doplňků programu k danému řešení (např. je nutné instalovat extra balíček k dané funkci–dostupnost).
5. Podpora programu vývojaři a veřejnosti (odezva na atypický problém).

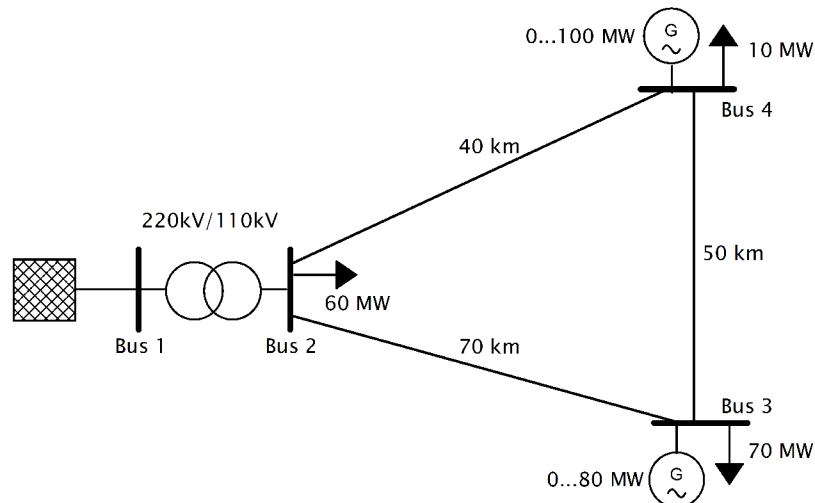
Optimal Power Flow

Pandapower dokáže řešit AC i DC sítě funkcí `optimal power flow` pomocí `PYPOWER` rozhraní. Funkce řeší optimalizaci sítě na základě cenových nákladů. Celé síti se definují ceny a rozsahy daných prvků (flexibilita), kde program následně spočítá nejlepší variantu. Pro následující ukázkou jsem se inspiroval od vývojářů Pandapower.

Ukázka vytvoření kódu Optimal Power Flow Nyní si zadefinujeme do systému použitou soustavu:

```
import pandapower as pp
```

–importování balíčku včetně zkratky



Obr. 2.3: Vstupní schéma pro řešení OPF.

`net = pp.create_empty_network()`–definování prázdné sítě, druhá možnost je importovat již vytvořené sítě od IEEE nebo CIGRE nebo MV Oberrhein, zadáno jako: `pandapower.networks.mv_oberrhein`

`bus1 = pp.create_bus(net, vn_kv=220.)`

`bus1 = pp.create_bus(net, vn_kv=110.)`

`bus1 = pp.create_bus(net, vn_kv=110.)`

`bus4 = pp.create_bus(net, vn_kv=110.)`–vytvoření uzlu, které síti náleží, napěťová hladina. Dále je možnost vložit informace o souřadnicích(ukázáno v Powerflow) , maximum a minimumu napětí, jestli je zařízení v provozu apod.

`pp.create_transformer(net, bus1, bus2, std_type='100 MVA 220/110 kv')`–vytvoření transformátoru. První možnost, jako zde, použít vytvořené trafo z knihovny s definovanými parametry. Druhá možnost je vytvoření libovolného trafo(ukázáno v powerflow).Pozor na pořadí napěťových hladin a správné seřazení.

`pp.create_line(net, bus2, bus3, length_km=70., std_type='149-AL1/24-ST1A 110.0')`

`pp.create_line(net, bus3, bus4, length_km=50., std_type='149-AL1/24-ST1A 110.0')`

`pp.create_line(net, bus2, bus2, length_km=40., std_type='149-AL1/24-ST1A 110.0')`–vytvoření vedení, také obě možnosti vytvoření, vlastní nebo z knihovny.

`pp.create_load(net, bus2, p_mw=60, controllable=False)`

`pp.create_load(net, bus3, p_mw=70, controllable=False)`

`pp.create_load(net, bus4, p_mw=10, controllable=False)`–vytvoření zátěže. Dá se nadefinovat jak činný tak jalový výkon nebo power factor. Opět, zařazen síti `net`, připojen do uzlu `bus2`. `Controllabe` zajišťuje flexibilitu prvku pro OPF.

`eg = pp.create_ext_grid(net, bus1, min_p_mw=-1000, max_p_mw=1000)`–vytvoření externí sítě, zařazení a definován výkonový rozsah.


```
g0 = pp.create_gen(net, bus3, p_mw=80, min_p_mw=0, max_p_mw=80, vm_pu=1.01,
controllable=True)
g1 = pp.create_gen(net, bus4, p_mw=100, min_p_mw=0, max_p_mw=100, vm_pu=1.01,
controllable=True)
```

–vytvoření generátoru, zařazení, stanovení výkonového rozsahu, poměrně stanoveno maximum napětí podle připojeného uzlu. True- příkaz pro respektování rozsahu výkonu a napětí uzlu.

```
costeg = pp.create_poly_cost(net, 0, 'ext_grid', cp1_eur_per_mw=10)
costgen1 = pp.create_poly_cost(net, 0, 'gen', cp1_eur_per_mw=10)
costgen2 = pp.create_poly_cost(net, 1, 'gen', cp1_eur_per_mw=10)
```

–Nyní stanovíme cenu za jednu vyrobenou megawatthodinu. Jelikož jsou ceny nastaveny stejně, algoritmus bude řešit soustavu jenom jako powerflow a zohlední pouze ztráty na vedeních.

IN:`net.res_ext_grid`–Vyvolání výsledku dodávaného výkonu do soustavy v uzlu kde je síť připojena.

OUT:

	p_mw	q_mvar
0	56.530584	1.974564

IN:`net.res_gen` Vyvolání výsledku dodávaného výkonu do soustavy v uzlu pro generátory.

OUT:

	p_mw	q_mvar	va_degree	vm_pu
0	71.309225	-1.969681	-3.713031	1.000008
1	12.303443	-1.451180	-3.712735	1.000010

Nyní si představme, že máme, tak jako v realitě, rozdílnou cenu za vyrobenou kWh a změníme tedy cenu. V tomto případě je výpočet pro jeden okamžik. Cena je uvedena v eurech za megawatt.

IN: `net.poly_cost.cp1_eur_per_mw.at[costeg] = 10`

`net.poly_cost.cp1_eur_per_mw.at[costgen1] = 15`

`net.poly_cost.cp1_eur_per_mw.at[costgen2] = 12`

`pp.runopp(net)`–spuštění Optimal power flow

`net.res_ext_grid` – Opět si necháme vyvolat výkon dodávaný externí sítí. Vidíme, že po úpravě ceny se hodnota zvýšila z 56,53 MW na 144,55 MW.

OUT: Tabulka výsledku dodávaného výkonu pro externí síť

	p_mw	q_mvar
0	144.559166	9.193021

IN: `net.res_gen` Proběhla změna u dodávky externí sítě a proto se změni i poměry u generátorů.

OUT:

	<code>p_mw</code>	<code>q_mvar</code>	<code>va_degree</code>	<code>vm_pu</code>
0	0.000079	8.601766	-16.426835	0.967619
1	0.000225	10.594623	-13.481007	0.989756

Nyní je možné v dané konfiguraci zobrazit celkovou cenu pro pokrytí potřeb v daném okamžiku.

IN: `net.res_cost`

OUT: 1445.5955

Pandapower nabízí široké možnosti a síť detailně konfigurovat. Na druhou stranu tento benefit je nutné kontrolovat. Zkontrolujeme například zatížení transformátoru.

IN: `net.res_trafo.loading_percent`

OUT: 144.85– Téměř 150 % zatížení. Nastavíme omezení na 50%

IN: `net.trafo['max_loading_percent'] = 50`

IN: `pp.runopp(net)`

IN: `net.res_trafo.loading_percent`

OUT: 49.999136 Vidíme, že omezení platí a daný transformátor je zatěžován pouze na 50 %.

IN: `net.res_ext_grid`

OUT:

	<code>p_mw</code>	<code>q_mvar</code>
0	49.953012	-2.147126

IN: `net.res_gen`

OUT:

	<code>p_mw</code>	<code>q_mvar</code>	<code>va_degree</code>	<code>vm_pu</code>
0	0.000598	2.992989	-6.232710	0.985230
1	93.304317	3.453173	-1.237784	1.025709

IN: `net.res_cost`

OUT: 1619.1908981–Pro takto změněnou konfiguraci se cena liší z 1445 € na 1619 €.

Analogický postup by byl i pro vedení. Omezení se dají nastavit hned při vytváření prvku.

Poslední kontrola bude pro uzlová napětí. IN: `net.res_bus`

OUT:

	vm_pu	va_degree	p_mw	q_mvar
0	1.000000	0.000000	-49.787584	4.603451
1	1.006024	-3.408832	60.000000	0.000000
2	0.993015	-5.815440	60.863554	-2.430957
3	1.028887	-1.511326	-73.592614	-4.853496

IN: `net.bus['min_vm_pu'] = 1.0`–Nastavení limitů uzlů

`net.bus['max_vm_pu'] = 1.02`

`pp.runopp(net)`

`net.res_bus`

OUT:

	vm_pu	va_degree	p_mw	q_mvar
0	1.000000	0.000000	-49.906839	3,050610
1	1.004168	-3.421014	60.000000	0.000000
2	1.000000	-5.976093	59.278168	-14.859011
3	1.020000	-1.366891	-71.863462	9.172781

Zjistíme změnu dodávky z generátorů a sítě.

IN: `net.res_ext_grid`

OUT:

	p_mw	q_mvar
0	49.906839	-3.05061

IN: `net.res_gen`

OUT:

	p_mw	q_mvar	va_degree	vm_pu
0	10.721832	14.859011	-5.976093	1.00
1	81.863462	-9.172781	-1.366891	1.02

V poslední řadě zjistíme cenový rozdíl.

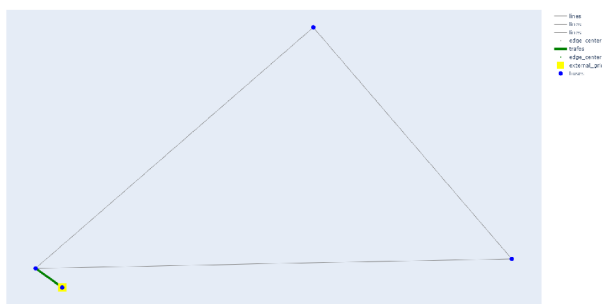
IN: `net.res_cost`

OUT: 1642.25741 Na této ukázce je možné sledovat jak změnu powerflow tak i rozdílné náklady na provoz.

Grafický výstup Program nabízí opravdu velký výběr možností s kvalitním zpracováním. Jako zajímavost zmiňme funkčnost s platformou mapbox (Link), kdy je možné model opřený o GPS souřadnice usadit do pozadí reálné mapy. A i zde je na výběr z velkého množství až už satelitních snímků nebo klasických kartografických pozadí. Pro toto použití je samozřejmá nadstavba jako např. aktivní účet Mapboxu. Zde si předvedeme v krátkosti na předchozím kódu jednoduché vykreslení a powerflow vykreslení, které se dále používá v modelu PS ČR.

IN: `pp.plotting.simple_plotly(net,use_line_geodata=False,aspectratio=(2,1),figsize=2,)` – voláme funkci `plotting` a dále v závorce: `net` – síť kterou voláme, `use_line_geodata` – pokud zadáte i přesné GPS souřadnice vedení včetně zakřivení řeknete programu ať použije `line_geodata=True`, v našem případě je tato funkce negována, program využil GPS souřadnice bus prvků a vedení nahradil přímými čarami, `aspectratio` – poměr, `figsize` – velikost pro vykreslení v html prohlížeči.

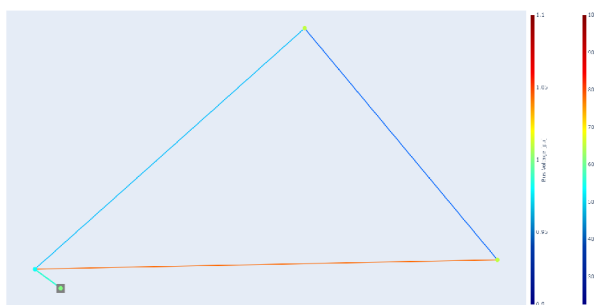
OUT:



Obr. 2.4: Jednoduchý graf vykreslený dle GPS souřadnic. Na rozdíl od png souboru html výstup z PP po najetí kurzoru ukazuje veškeré informace – tekoucí výkony, název, procentuální zatížení aj. V základním grafu se dá barevně oddělit napěťové hladiny, zvýraznit důležité uzly apod.

IN: `pp.plotting.plotly.pf_res_plotly(net,use_line_geodata=False,aspectratio=(2,1),figsize=2, projection="epsg:31467", filename='zkouška_powerflow.html')` – voláme powerflow graf, kde se volí GPS projekce podle které budou data převedeny do výstupního režimu. Jako další možnost uvádím hnedp pojmenování grafu, která se využije při drobných změnách v kódu a okamžitého vykreslení.

OUT:



Obr. 2.5: Ukázka powerflow grafu, kde podle zatížení výstup je znázorněn dle barevného rozdělení.

Tato ukázka je demonstrací toho, jak může daná problematika vypadat. Nadstavba toku výkonů pomocí nákladů je jen další nástroj PP, který s uživatelsky přijatelným grafickým výstupem jen potvrzuje využitelnost tohoto programu. Tyto funkce se dobře využijí k hodnocení skupinového chodu transformátorů v trafostanici nebo porovnání ztrát při různých průřezech apod.

Power Flow

V oblastí řešení toků výkonů PP nabízí tři možnosti:

1. flat start,
2. DC power flow,
3. voltage vector of a previous calculation.

Mimo základního solveru Newton-Rhapson je do PP implementován také Iwamoto varianta of Newton-Rhapson metody s tlumícím faktorem, který může pomoci konvergovat v nevyrovnaných soustavách. Také je možné použít fast decoupled variantu tak jako Gauss-Seidelovu. Kód nalezneme na stránce 49.

State Estimation

Cituji[2]: „Aby bylo možné zjistit aktuální provozní stav systému, usnadňuje odhad stavu přesné a efektivní sledování omezení provozních veličin jako jsou zatížení vedení nebo velikost napětí v uzlech. Dále poskytuje spolehlivou databázi systému v reálném čase, včetně stávajícího stavu, na jehož základě lze spolehlivě nasazovat funkce posuzování bezpečnosti, aby bylo možné analyzovat nepředvídané situace a určit veškerá požadovaná nápravná opatření.“

V PP state estimation, volně přeloženo odhad stavů, je proces k eliminování chyb a nepřesností z vstupních dat. Může se stát, že jediné čidlo nebo měřící prvek zaznamenává falešné hodnoty a znemožňuje tak celý výstup kódu. Právě proto PP nabízí také funkci

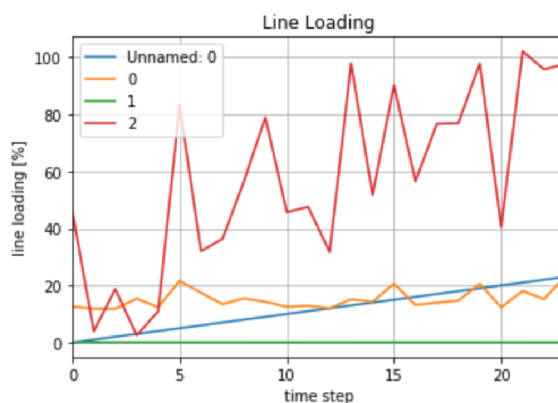
state estimation, která odhaluje nepřesnosti, např. z napěťových poměrů uzlů a jejich fázových posuvů.

Short Circuit calculation

Mezi další část se řadí výpočty zkratů. PP umožňuje spočítat třífázový, dvoufázový a jednofázový zkrat dle normy IEC 60909. V knihovně je také implementována možnost modelování výkonových měničů pro fotovoltaické elektrárny nebo větrné parky.

Time-series calculation

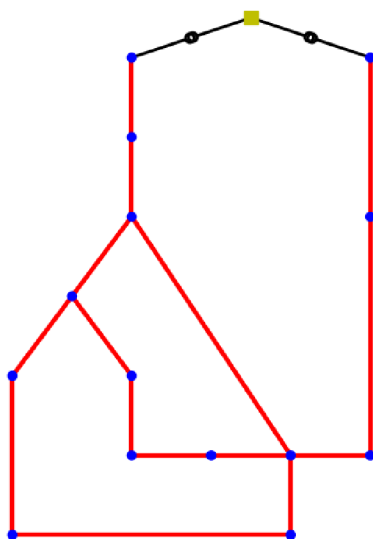
V nabídce nalezneme i řešení simulací pro zvolené časové období. Jako příklad je uveden jednoduchý model o radiální topologii s čtyřmi uzly propojenými vedením. V uzlech je postupně připojena externí síť, zátěž a generátor. Dva uzly jsou propojeny transformátorem. Pro časové simulace je nutné načíst csv soubor s vstupními údaji. Pro lepší ukázkou je definován tento "dataframe" náhodně přímo v kódu pro jednodušší použití. Opět tedy vytvoříme síť, zadefinujeme dataframe, časové okno a časový krok. Zvolíme si dále jak chceme výstup zobrazit např. pomocí funkce plotly nebo matplotlib. Kód nalezneme na stránce 52.



Obr. 2.6: Ukázka výsledku time-series calculation–zatížení vedení

N-1 kritérium

Pandapower má dostatečně vyhraněné a přímočaré prostředí pro efektivní a hlavně přehledné vytváření sítí. Je nutno dodat, že stále se nacházíme v Python prostředí, které dovoluje vytvořit jakékoliv usnadnění nebo výpočty. Uvádím zde jen krátký příklad uplatnění kódu (kód naleznete v příloze) pro vytvoření N-1 analýzy. Použijeme vytvořenou síť z OPF příkladu a odstraníme omezení zatížení transformátorů a vedení na 50 %. Zvolíme který prvek chceme vyřadit jednoduchým `in_service = False` a necháme si graficky vykreslit soustavu. Kód naleznete na stránce 51.



Obr. 2.7: Možnost vykreslení N-1 kritéria

3 Praktická část studentské práce

Závěrečná kapitola této práce uvádí praktický model a zkoumání toku výkonů v soustavě při možných budoucích změnách. Tato část je dělena do dvou sekcí, kdy první se zabývá ukázkou vytvoření modelu tak, aby čtenář získal přehled o detailnosti zadávání parametrů. Část druhá se zabývá výsledky a změnami v modelu.

3.1 Vytvoření praktického modelu

Zmíněný model je vytvořen podle aktuálních dat k roku 2017 a je rozšířen podle plánů[15] a výhledů[10] na rok 2026. Rok 2026 je tedy fiktivně vytvořený model vytvořený podle veřejně dostupných dat.

Při práci s takto rozšířenou problematikou je největší úskalí v těchto bodech:

1. Neznalost charakteru a velikosti zatížení soustavy.
2. Neschopnost predikovat phase out jednotlivých zdrojů a rozvoj zdrojové základny.
3. Dostupnost dat kritické infrastruktury.

Obecně veškeré komerční studie se potýkají s nedostatky dat a vytvořením tak dostatečně věrohodného modelu. Primárně jsou to data o aktuálním zatížení celé soustavy a následně jednotlivými parametry elementů. Dále pokud si nyní představíme evropský aktuální trend o uzavírání uhelných bloků bude v dalších desetiletích odpojeno z přenosové soustavy většina výkonu. V provozu zůstane pouze elektrárna Temelín, současný stav elektrárny Dukovan, elektrárna Ledvice a pravděpodobně modernizovaná elektrárna Počerady. Tento výhled je z důvodu nejasnosti navyšování instalovaných kapacit nových zdrojů zavádějící. Další bod je určení aktuálního výkonu jednotlivých generátorů elektráren. Můžou se zde nacházet velké nepřesnosti a to kvůli poruchám, odstávkám a jiným faktorům, např. kolik generátorů je v JE (capacity factor 75%) celkově v provozu, jakou mírou přispívají vodní elektrárny, ostatně i klasické bloky. Tento poznatek uvádím jenom jako další krok k možnému zpřesnění modelu. I přesto, že znalost těchto všech údajů je nemožná je reálné dobře odvodit dostatečně přesné výroby těchto bloků. Přesto bez znalosti aktuálních odběrů je velmi těžké hodnotit dané výsledky. Při odhadování zatížení soustavy je další úskalí v oblasti buzení generátorů v pilotních uzlech (přebuzený nebo podbuzený stav). Můžeme například předpokládat, že uzel Slavětice je regulován na účinník $\cos \phi$ 0,99 kapacitního charakteru ale dispečer dokáže tuto hodnotu měnit dle potřeby až k $\cos \phi$ 0,99 induktivní. Dalším bodem je vyčlenění ČEPS z ENTSO-E. Jak již bylo zmíněno ČEPS je již nyní silně implementován v rámci ENTSO-E a pro výpočty modelu sítě PS ČR je nutné vyjmout pouze ČR. V tomto ohledu se nabízí další neznámé ohledně propojení těchto přeshraničních soustav. Ve většině případech se na konci přeshraničního

vedení vytvoří Load prvek (nebo taky injection) a zvolí se zatížení. Pro počítání přechodných dějů se samotná soustava PS ČR rozšiřuje o dvě nejbližší okružní vedení kolem celého obvodu. V neposlední řadě pokud autor simulace čerpá pouze z veřejně dostupných dat je dalším mezním bodem určení správné spotřeby a výroby v daných lokalitách. Vzhledem k vzrůstajícímu trendu instalovaného výkonu do DS a její rozmanitostí je tento bod velice zásadní. Jako jeden z posledních bodů zmiňme právě napěťové hladiny přenosové soustavy. Páteřní linky o napěťové hladině 400 kV doplněny o stejně důležité 220 kV vedení přenáší výkon do částí s nižším napětím. Zpřesnění celého modelu PS ČR tedy také silně závisí na transformačním výkonu daného uzlu, kde většina probíhá na 110 kV napěťové úrovni. Z celkového transformačního výkonu 22 700 MVA, kterým disponuje ČEPS, je 20 700 MVA přeneseno právě na 110 kV. Proto je nutné znát polohu, počet i jmenovitý výkon všech transformátorů, aby bylo možné správně určit zatížení daných uzlů.

Je nutné říct, že přesností skutečného stavu je těžko dosáhnout, ale i to by nemělo bránit dosahovat reálným výsledkům sloužícím k různým doporučením. Po výčtu několika omezení shrňme, že na model je dobré nahlížet jako na nejjednodušší schéma výroby, přenosu a spotřeby. Použitý model v této kapitole dosahuje vysoké přesnosti v oblasti přenosu. Oblast výroby až na drobné odchylky je také reálně využitelný a přibližuje se k reálnému stavu. Nejkritičtější oblastí se stále stává sekce zatížení. Tyto hodnoty odvozují studie různě, např. dle konstanty určité spotřeby na obyvatele[6]. Některé studie neuvádí tento údaj vůbec. Dochází tedy k obrovským nepřesnostem a dle mého názoru je adekvátnější využít těchto dvou postupů:

1. Podle údajů ČEPS mapy lze dohledat počet transformátorů v dané rozvodně a odhadnout tak transformační výkon daného uzlu (odkaz mapy Link ES ČR).
2. Vycházet z údajů ERÚ a využít hodnotu o bilanci fyzikálních toků mezi PS a DS (profitující informace i o aktuální dodávce elektřiny od výrobců).

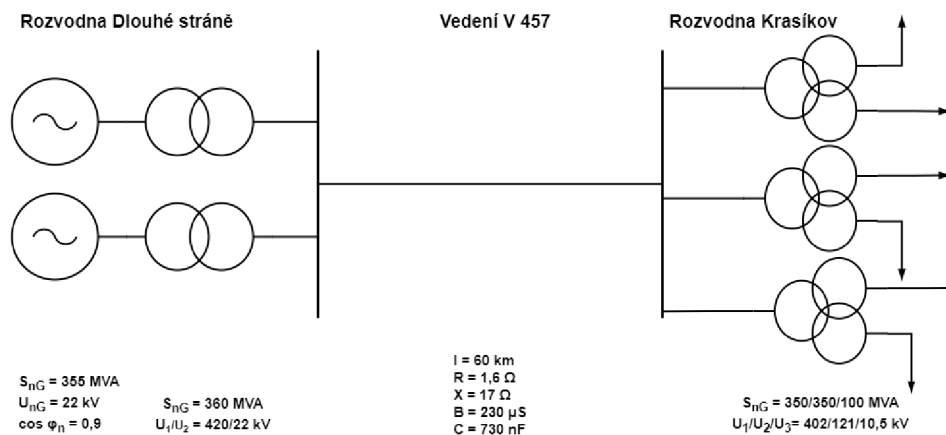
Zatížení uzlů v modelu vychází z hodnoty 3661 GWh dodaných z PS do DS za leden 2018. Průměrný výkon je 4,881 GW. Tento výkon byl následně rozdělen mezi kraje a příslušící rozvodny (přizpůsobeno dle [11] a transformačního výkonu rozveden dle map ČEPS). Leden byl vybrán pro vyšší hodnotu dodávky elektřiny do DS. Reprezentační hodnoty odběrů pro Moravskoslezský kraj je uveden v ukázce kódu.

Tab. 3.1: Tabulka zatížení pro jednotlivé kraje. Následující hodnoty jsou rozděleny do uzlů rozveden jako zatížení. Dále je také nutné posoudit jednotlivé uzly z hlediska dodávky nebo spotřeby jalového výkonu (změna buzení generátorů v pilotních uzlech–Slavětice, Krasíkov a Kočín např.).

Kraj	Odběr (MW)	Odběr (MVAr)
Jihočeský	276,124	133,6441
Jihomoravský	475,1559	229,9754
Karlovarský	111,1563	53,79964
Královehradecký	299,8676	145,1359
Liberecký	221,4353	107,1747
Moravskoslezský	555,3428	268,7859
Olomoucký	281,6193	136,3038
Pardubický	214,329	103,7352
Plzeňský	269,6855	130,5278
Praha	530,7751	256,8952
Středočeský	648,3386	313,7959
Ústecký	498,4048	241,2279
Vysočina	239,7712	116,0493
Zlínský	258,3704	125,0513

3.2 Zpracování

Samotný model je koncipován jako generátor, blokový transformátor, vedení do příslušející rozvodny a propojení rozveden. Zátěž je vytvořena v každém uzlu pomocí prvku Load. Mimo schématického zobrazení se prvky pro model PS ČR tvořily takto:



Obr. 3.1: Názorné schéma vytvořeného modelu

```

import pandapower as pp
net = pp.create_empty_network()
b6 = pp.create_bus(net, vn_kv=420., name="Krasíkov", geodata=(16.6688622,
49.8588528))
b7 = pp.create_bus(net, vn_kv=420., name="Dl_stráně22kV",geodata=(17.1802090,
50.0875257))
b8 = pp.create_bus(net, vn_kv=420.,name="Dl_stráně420kV",geodata=(17.1802089,
50.0875256))
g2 = pp.create_gen(net, bus=b7, vn_kv=22,scaling=1.0,p_mw=325, sn_mva=355,
vm_pu=1.01, cos_phi=0.9, controllable=True, in_service=True)
pp.create_transformer_from_parameters(net, hv_bus=b8, lv_bus=b7,sn_mva=360,
vn_hv_kv=420, vn_lv_kv=22, vkr_percent=0.208, vk_percent=14., i0_percent=0.04,
pfe_kw=120, shift_degree=30, parallel=2,index="xx")
pp.create_line_from_parameters(net, from_bus=b8, to_bus=b9, length_km=1,
r_ohm_per_km=1.55, x_ohm_per_km=17.1, c_nf_per_km=732.11, g_us_per_km=230,
max_i_ka=0.847, df=1, max_loading_percent=100, name="V000", index="V000",
in_service=True,)
pp.create_transformer3w_from_parameters(net, hv_bus=b9, mv_bus=b18, lv_bus=b19,
vn_hv_kv=400, vn_mv_kv=230, vn_lv_kv=34, sn_hv_mva=350, sn_mv_mva=350,
sn_lv_mva=110, vk_hv_percent=11.82, vk_mv_percent=55.65, vk_lv_percent=40.8,
vkr_hv_percent=0.28, vkr_mv_percent=0.34, vkr_lv_percent=0.38, pfe_kw=280,
i0_percent=0.03, in_service=True, index="3wrozvodna", max_loading_percent=100,)
Ukázka zatížení pro Moravskoslezský kraj
pp.create_load(net, bus=b11, p_mw=166.603, q_mvar=80.635, name="Nošovice",
controllable=False)
pp.create_load(net, bus=b12, p_mw=166.603, q_mvar=80.635, name="Albrechtice",
controllable=False)
pp.create_load(net, bus=b45, p_mw=55.534, q_mvar=26.879, name="Lískovec",
controllable=False)
pp.create_load(net, bus=b9, p_mw=83.301, q_mvar=40.317, name="H.Životice",
controllable=False)
pp.create_load(net, bus=b10, p_mw=83.301, q_mvar=40.317, name="Kletné",
controllable=False)

```

Ne zcela běžný parametr, který se zde vyskytuje, je **real part of relative short-circuit voltage**. Tato ukázka dává pohled na strukturu přenosové sítě vytvořené pro výpočty powerflow. Pro tento model je i možné provést časovou simulaci, je ovšem nutné znát veškeré hodnoty výroby a spotřeby uzlů v daném časovém rozmezí.

3.3 Přenosová soustava pro scénář roku 2026

Výchozí model prvního scénáře je vytvořen pro rok 2026 dle [15]. Dochází k postupnému nahrazení 220 kV úrovně 400kV úrovní, zdvojení určitých vedení a vytvoření nových rozvodů. Konkrétně jde o:

1. Výstavba nové smyčky v oblasti rozvodny Mírovka spočívá ve vytvoření smyčky ze stávajícího vedení Řeporyje–Prosenice na nové dvě vedení V416 a V413 do Prosenic a Řeporyjí a nové dvojité vedení z rozvodny Kočín do rozvodny Mírovka. Zásadní důvod pro tuto modernizaci je usměrnění toků výkonu v přenosové soustavě a zajištění zvýšení spolehlivosti dodávek elektrické energie do krajů Vysočina a přispěje k zvýšení spolehlivosti vyvedení výkonu stávajících a plánovaných bloků JE Temelín. Tato realizace také zvýší stabilitu, bezpečnost a efektivitu provozu soustavy v rozložení tranzitních toků přes PS ČR.
2. Přestavba vedení V221 z Přeštic do Vítkova na vyšší napěťovou hladinu 400 kV z důvodu bezpečného vyvedení výkonu z plánovaných obnovitelných zdrojů energie na Karlovarsku. Dále umožní přípravu na celkový útlum 220 kV úrovně a zefektivní provoz v této lokalitě.
3. Zdvojení stávajícího vedení 400 kV Babylon–Bezděčín (V451,V448).
4. Zdvojení stávajícího vedení 400 kV Chodov–Čechy Střed (V415,V495).
5. Zdvojení stávajícího vedení 400 kV Výškov–Babylon (V450,V428).
6. Přestavba dvojitého vedení 220 kV Hradec–Vítkov na dvojité vedení 400 kV Verněřov–Vítkov (V488).
7. Zdvojení stávajícího vedení 400 kV Prosenice–Nošovice (V403).

Veškeré tyto změny reagují na vyšší zastoupení obnovitelných zdrojů energie v zdrojové základně a také stálý trend tranzitní země ze severozápadu na jihovýchod.

3.3.1 Scénář roku 2026

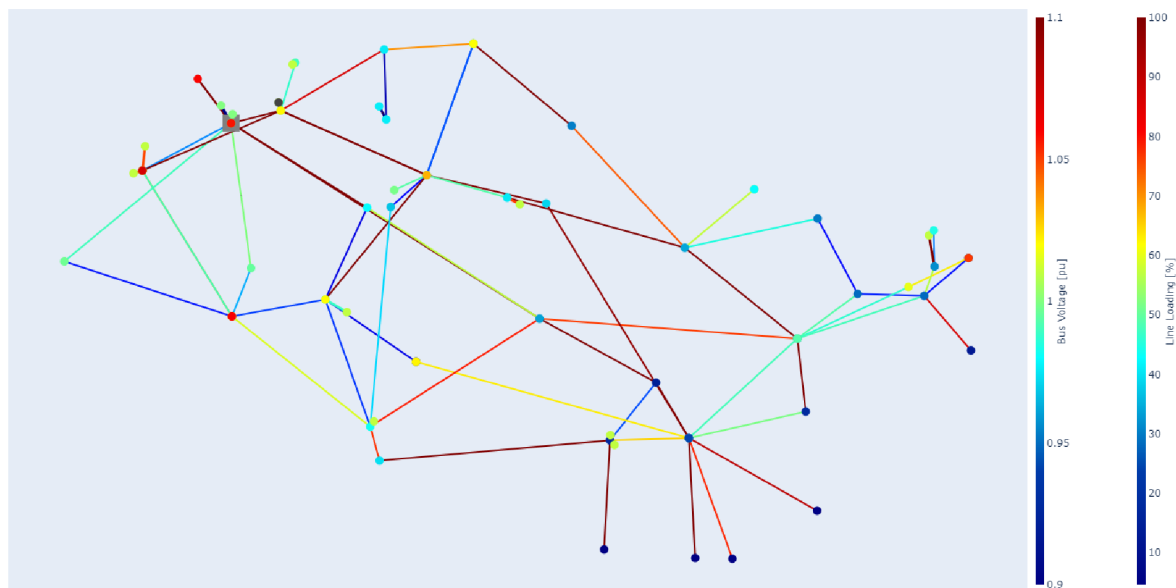
V roce 2026 se může objevit rozsáhlé odstavení některých uhelných elektráren. Pro tento scénář byly odstaveny veškeré uhelné bloky těchto elektráren: Dětmárovice, Mělník, Průněřov a Tušimice. Výhled je porovnáván se scénářem ČEPS A 2030, kde se předpokládá neprodloužení životnosti elektrárny Dukovan bloků 3 a 4. V tomto scénáři jsou tyto bloky také odstaveny. Zároveň je připojen nový zdroj větrného parku o výkonu 140 MW do rozvodny Vítkov.

Tuto skutečnost dokazuje tabulka pro scénář ČEPS A 2030[15] která hodnotí kritéria vedení. Dále je možné porovnat hladiny napětí v daných uzlech pro rok 2026. Pro přeshraniční toky byla zvolena standardní situace a to import z německé a polské sítě a dále export do rakouské a slovenské soustavy. Číselně se jedná o: Německo–50HzT +1726 MW, Tennet -20 MW, Polsko +249 MW, Rakousko -1249 MW, Slovensko -1351 MW. Veš-

Tab. 3.2: Napětí rozveden v soustavě roku 2026 ve srovnání s materiálem ČEPS[15] (také pro rok 2026).

Rozvodna	U (p.u.)	U (kV)	ČEPS (kV)	Rozvodna	U (p.u.)	U (kV)	ČEPS (kV)
Albrechtice	1,0153	426,426	417,1	Krasíkov	1,01	424,200	424
Babylon	0,9984	419,338	422,6	Mělník	0,999	419,979	-
Bezděčín	0,9981	419,205	422,1	Milín	1,0017	420,750	418,5
Čebín	1,0202	428,50	415,6	Mírovka	1,012	425,304	418,5
Čechy střed	0,9979	419,14	422,3	Neznášov	1,0179	427,543	421,7
Dasný	0,9979	419,120	414,9	Nošovice	1,0208	428,776	417,2
DLS	1,0192	428,105	-	Otrokovice	1,01915	428,045	415,7
H.Životice	1,0198	428,321	423,6	Prosenice	1,0207	428,732	414,6
Hradec	1,0062	422,635	417,3	Přeštice	0,9999	419,991	420,3
Chodov	1,0009	420,418	420,3	Řeporyje	1,0012	420,504	419,4
Chotějovice	0,9999	419,982	420,1	Slavětice	1,0119	425,0337	412
Chrást	1,0205	428,49	419,9	Sokolnice	1,0144	426,066	415,6
Kletné	1,0216	429,087	422,8	Týnec	1,009	423,897	420,5
Kočín	1,0052	422,214	414,7	Výškov	1,0089	423,765	420,2

keré tyto údaje o přeshraničních bilancích lze dohledat na stránkách ČEPS v položce data (Link). U tohoto scénáře se prokázala schopnost několika vedení jako nedostatečná a lze



Obr. 3.2: Česká přenosová soustava v roce 2026.

chod soustavy charakterizovat takto: Nejvyšší přetížení se prokázalo u vedení propojující

koridor Hradec, Čechy střed, Mírovka, Čebín a Slavětice. Tento přenos charakteristický pro PS ČR ve směru severozápad–jihovýchod se podílí na mezinárodních přenosech elektrické energie. Výhledově tento trend může pozitivně odstavit snížení výrobní kapacity z uhelných bloků na severu Čech s prognózou rovnoměrnějšího rozprostření nových zdrojů v rámci celé republiky. I nadále jsou očekávány příležitostné přetoky z německé strany.

3.3.2 Scénář roku 2036

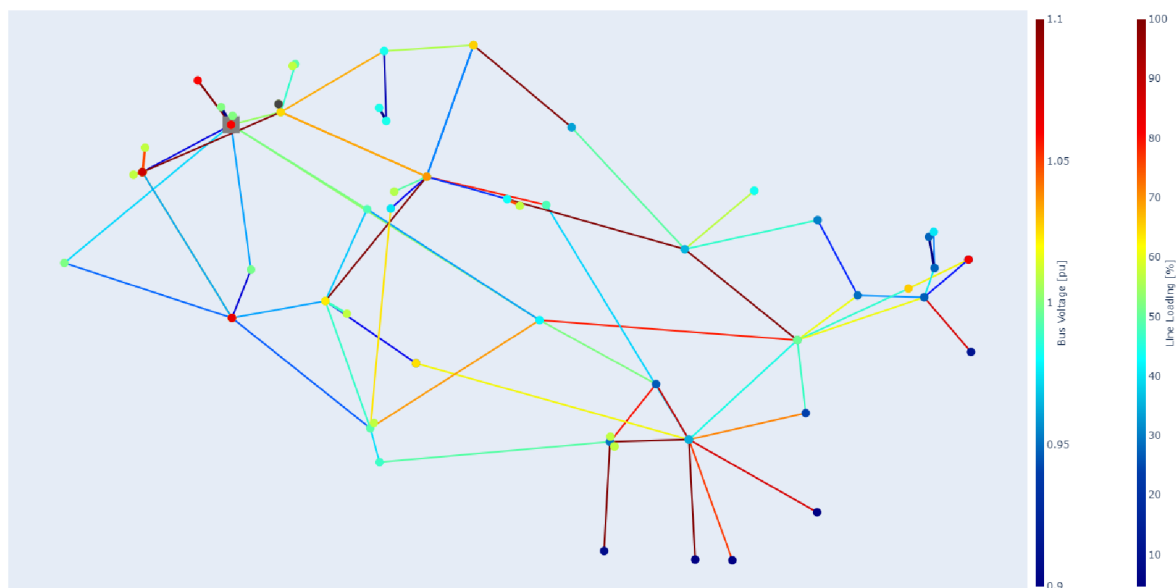
Výhled roku 2036 předpokládá primárně připojení nového zdroje Dukovan 1200 MW k současným stávajícím blokům. Předpokládá se odstavení uhelných elektráren Dětmarovice, Prunéřov, Mělník, Tušimice a také Tisová. Dále zdvojení určitých vedení (V416, V430, V432).

Z těchto změn je patrné odlehčení severních Čech a vyšší využití elektrické energie vyrobené v elektrárně Temelín pro Středočeský kraj včetně Prahy. V oblasti nově připojeného zdroje Dukovan dochází k přetížení většiny vedení v oblasti Slavětice, Čebína a Sokolnic. Při chodu stávajících bloků a spuštění nové zdroje v Dukovan bude nutné

Tab. 3.3: Uzlová napětí soustavy ve scénáři roku 2036 s vybranými vedeními v blízkosti nového zdroje Dukovan.

Rozvodna	U(p.u.)	U(kV)	Rozvodna	U(p.u.)	U(kV)	Vedení	zatížení (%)
Albrechtice	0,9529	400,221	Krasíkov	1,01	424,2	V243/44	185
Babylon	0,9749	409,47	Mělník	0,9826	412,723	V435	139
Bezděčín	0,9606	403,463	Milín	0,9937	417,374	V437	101
Čebín	0,9513	399,568	Mírovka	0,9887	415,259	V423	93
Čechy střed	0,9749	409,476	Neznášov	0,9647	405,183	V424	92
Dasný	0,9745	409,331	Nošovice	0,9479	398,137	V434	90
DLS	0,9538	400,635	Otrokovice	0,9460	397,349	V497	85
H.Životice	0,9503	399,131	Prosenice	0,9317	391,345	V417	77
Hradec	0,9981	419,218	Přeštice	1,061	445,62	V207	64
Chodov	0,9919	416,637	Řeporyje	0,98	411,6	V433	45
Chotějovice	0,99	415,8	Slavětice	0,993	417,133		
Chrást	0,995	417,9	Sokolnice	0,978	411,038		
Kletné	0,9466	397,606	Týnec	0,994	417,820		
Kočín	0,9807	411,959	Výškov	0,997	419,008		

navýšit kapacitu těchto vedení. I při současném exportním charakteru do zemí Rakouska a Slovenska je nutné pro tento zdroj základního zatížení provést opatření a zajistit tak bezpečnost provozu.



Obr. 3.3: Scénář roku 2036

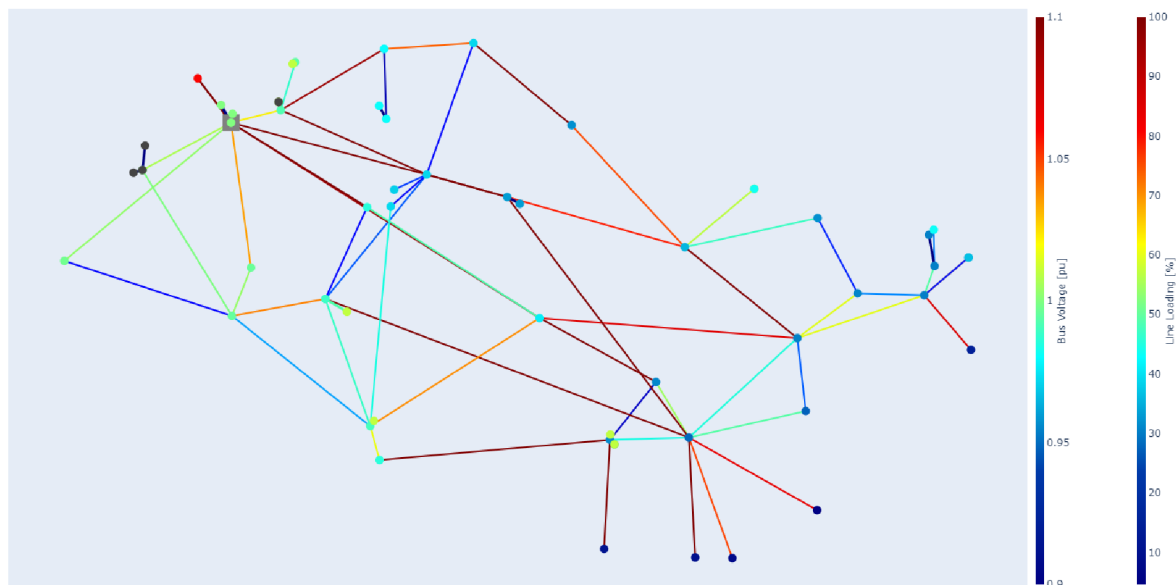
3.3.3 Scénář roku 2040

Rok 2040 je spojen s odklonem od uhlí a sjednocení napěťové úrovně PS na 400 kV. Změny se týkají odstavením všech uhelných bloků mimo elektrárny Ledvice a Počerad (přestavba na plyn), dále odstavením elektrárny Dukovany (mimo nový blok 1200 MW) a zrušení

Tab. 3.4: Uzlová napětí soustavy v roce 2040.

Rozvodna	U (p.u.)	U (kV)	Rozvodna	U (p.u.)	U (kV)
Albrechtice	1,017439	427,32438	Krasíkov	1,01	424,2
Babylon	0,99974	419,8908	Mělník	1,0009	420,378
Bezděčín	0,999736	419,88912	Milín	1,002164	420,9089
Čebín	1,022106	429,28452	Mírovka	1,014676	426,1639
Čechy střed	0,999774	419,90508	Neznášov	1,019722	428,2832
Dasný	0,999668	419,86056	Nošovice	1,023056	429,6835
DLS	1,021333	428,95986	Otrokovice	1,021228	428,9158
H.Životice	1,021934	429,21228	Prosenice	1,022985	429,6537
Hradec	1,007436	423,12312	Přeštice	0,999979	419,9912
Chodov	1,00142	420,5964	Řeporyje	1	420
Chotějovice	0,999965	419,9853	Slavětice	1,013927	425,8493
Chrást	1,022076	429,27192	Sokolnice	1,016651	426,9934
Kletné	1,023799	429,99558	Týnec	1,014107	425,9249
Kočín	1,007337	423,08154	Výškov	1,010617	424,4591

vedení V221, V223, V254 a V209 a nahrazení 220 kV hladiny na 400 kV. Spotřeba se předpokládá vyšší ale současně s vyšší decentralizací trend zatížení PS zůstane pro tento scénář neměnný. Soustava mimo tranzitní koridor jeví lepší rozložení zátěže. Tabulka 3.4 uvádí napěťové poměry v rozvodnách.



Obr. 3.4: Scénář roku 2040.

3.4 Řízení napětí v soustavě

Cituji [25]: „Regulace napětí je určena rovnováhou mezi dodávaným a spotřebovaným jalovým výkonem v jednotlivých místech elektrizační soustavy. Udržení velikosti napětí v předepsaných mezích (5%) je nutné pro zachování správné funkce a životnosti spotřebičů (nepřetěžování asynchronních pohonů, neomezení výkonu tepelných spotřebičů, životnost osvětlovacích soustav) a udržení stability přenosu výkonu v soustavě. Jalový výkon se samovolně šíří od míst s vyšším k nižším napětím, s tím že jeho přerozdělování chceme maximálně omezit aby nedocházelo k případnému navýšení jouelových ztrát popř. přetížení linek. U neregulované soustavy je změna jalového zatížení nebo velikosti jalových zdrojů spojena se změnou velikosti napětí podle charakteristik zátěží a zdrojů.“

Z pohledu přenosové soustavy zdroji jalového výkonu jsou synchronní kompenzátory, synchronní alternátory, nezátížená vedení a kondenzátorové baterie. V České republice se vyskytují kompenzátory pouze v rozvodně Krasíkov, každý o 100 MVA. Cílem této regulace je zajištění napětí v předepsaném rozsahu, dodržet toky jalového výkonu v přeshraničních vedeních v určitých mezích a minimalizovat ztráty v přenosové soustavě. Tyto

požadavky jsou plněny pomocí změny buzení generátorů v pilotních uzlech, změnou odboček transformátorů, využitím tlumivek, vypínáním málo zatížených vedení a kompenzačním provozem přečerpávacích elektráren. PPS napomáhá řízení soustavy určením tzv.

Tab. 3.5: Zdrojová základna s parametry zdánlivého výkonu a jmenovitého účinníku stroje. Pro každý rok je popsán účinník stroje–kap jako kapacitní, tedy v přebuzeném stavu. Dále zkratka ON–v provozu, OFF–vyřazen. Zkratka CF–capacity factor (%) je uplatněna u veškerých výkonových hodnot, to znamená udává jak velká část je využita z instalovaného výkonu zdroje.

Název				Rok 2026		Rok 2036		Rok 2040	
	Sn (MVA)	cos f_n	CF	cos f_i	Stav	cos f_i	Stav	cos f_i	Stav
Dukovany nové	1 x 1250	0,9	0,75	-	-	1 kap	ON	1 kap	ON
Temelín	2 x 1250	0,9	0,75	1 kap	ON	1 kap	ON	1 kap	ON
Dlouhé Stráně	2 x 355	0,9	0,15	0,9 ind	ON	0,9 ind	ON	0,9 ind	ON
Ledvice	1 x 776	0,85	0,8	0,9 ind	ON	0,9 ind	ON	0,9 ind	ON
Orlík	4 x 100	0,91	0,3	0,9 ind	ON	0,9 ind	ON	0,9 ind	ON
Počerady	1 x 335	0,85	0,8	0,9 kap	ON	0,9 kap	ON	0,9 kap	ON
Dalešice	4 x 133	0,9	0,15	0,9 ind	ON	0,9 ind	ON	0,9 ind	ON
Počerady	2 x 235	0,85	0,8	0,9ind	ON	0,9ind	ON	0,9ind	ON
Dukovany	8 x 300	0,85	0,75	1 kap	ON	1 kap	ON	1 kap	OFF
Tušimice	4 x 235	0,85	0,8	0,9 kap	OFF	0,9 kap	OFF	0,9 kap	OFF
Průněřov	5 x 294	0,85	0,8	0,9 ind	OFF	0,9 ind	OFF	0,9 ind	OFF
Mělník	1 x 588	0,85	0,8	0,9 ind	OFF	0,9 ind	OFF	0,9 ind	OFF
Tisová	3 x 125	0,8	0,8	0,9 ind	ON	0,9 ind	OFF	0,9 ind	OFF
Vřesová	2 x 247	0,8	0,8	0,9 ind	ON	0,9 ind	ON	0,9 ind	OFF
Chvaletice	4 x 235	0,85	0,8	0,9 ind	ON	0,9 ind	ON	0,9 ind	OFF
Dětmarovice	2 x 250	0,8	0,8	0,9ind	OFF	0,9ind	OFF	0,9ind	OFF
Krasíkov	2 x 100	0	-	-	ON	-	ON	-	ON

pilotních uzlů (Hradec, Výškov, Vítkov, Kočín, Krasíkov, Slavětice, Týnec, Mělník) podle kterých řídí dodávku jalového výkonu. Ve vytvořeném modelu je primárně možná změna buzení generátorů, možnost využití synchronních kompenzátorů a samozřejmě vypínání nezatížených vedení. Jelikož dodávka jalového výkonu je silně spjata s celkovým odběrem výkonu z přenosové soustavy jsou tyto hodnoty také odhadovány a odvozovány z veřejně dostupných zdrojů. Pomocí studií se podařilo dohledat fakt, že rozvodny Hradec, Kočín, Slavětice a Výškov jsou provozovány v přebuzeném stavu. Předpokládá se buzení generátorů na kapacitní účinník o velikosti 1 v blízkosti těchto rozveden (viz tabulka). I tento stav se samozřejmě může změnit a dispečerské řízení má možnost volby pro každý pilotní

uzel z přebuzeného a podbuzeného stavu a tím řídit bilanci jalového výkonu. Pilotní uzel využívá hierarchické uspořádání a stanovuje tak rozdělení jalového výkonu na jednotlivé stroje, tak aby na všech blocích byla udržována vždy stejná rezerva jalového výkonu. Predikcí jalového výkonu se zabývá i studie [7] a zdůvodňuje nemožnost přesného určení jalového výkonu v daných uzlech požadavkem na režimy řízení jednotlivých elektráren a neznalost charakteru odběru. Charakter zdrojů pro jednotlivé scénáře je uveden v tabulce 3.5. Doplňme, že v přenosové soustavě se udává citlivostí koeficient, který stanovuje potřebnou změnu dodávky jalového výkonu v pilotním uzlu pro změnu napětí o o jeden kilovolt (30-50 MVar/kV pro 400 kV, 10-25 MVar/kV pro 220 kV)[25][26][27][28].

3.5 Shrnutí

Jedním z cílů práce je porovnání dosaženého výsledku s různými studii. Nejvěrohodnější zdroj je Rozvoj přenosové soustavy ČR[15] který operuje s reálnými daty a výsledky. Podle této literatury je možné posuzovat své hodnoty. Určitá nejistota v porovnávání vždy je a to z nezveřejnění veškerých dat. I přesto tento materiál je možné použít k přesným údajům o nadcházejících investičních plánech. Hodnoty napětí v rozvodnách byly srovnány se scénářem 2026 a dále byly porovnány nejvíce zatěžované linky.

Další možností je studii porovnat s [6]. Práce detailně popisuje změny ve zdrojové zá-

Tab. 3.6: Vedení z hlediska nejvyššího využití dle ČEPS srovnané ve veškerých scénářích.

	ČEPS A 2030 (%)	Scénář 2026 (%)	Scénář 2036 (%)	Scénář 2040 (%)
V251	80 - 100	44	37	38
V252	81 - 100	44	37	38
V404	82 - 100	92	92	92
V417	83 - 100	52	77	45
V420	84 - 100	105	52	96
V422	85 - 100	164	50	102
V442	86 - 100	15	22	12
V444	87 - 100	65	14	25
V445	88 - 100	135	134	134
V446	89 - 100	135	134	134
V243	> 100	188	183	179
V244	> 100	188	183	179
V253	> 100	40	39	-
V254	> 100	40	39	-
V443	> 100	25	24	25

kladně v několika scénářích ale dochází k nesrovnalostem v ohledu modelování přenosové soustavy. Cituji [6]: „*With detailed data not available, the Czech model had to be developed based on publicly available data as as the map given in*“. I přesto, že jsou popsány parametry, které byly použity, práce nenabízí výsledky zatížení vedení nebo lokalizaci nových zdrojů. Výstup se primárně zaměřuje na pokrytí spotřeby energie s novou zdrojovou základnou ale neuvádí limity daných kapacit. Jedinou uvedenou informací je, že vedení při normálním zatížení budou zatíženy mezi patnácti až třicetipěti procenty a splní i kritérium N-1. Detailnější výsledky chybí a jsou v rozporu s analýzou ČEPS. I přesto je možné využít část studie o zdrojové základně, implemtnovat ji do kódu Pandapower a porovnat výsledky. Ostatní studie se zabývají at již finančním dopadem[9] proměny energetiky nebo obecným potenciálem geografických podmínek[19] České republiky. Je zde opět prostor pro vyčlenění dosažených výsledků těchto studií, vložení do současnému modelu a analýzy i na elektrizační síť České republiky.

Na těchto čtyřech různých scénářích je možné vidět rychlé provedení změn v přenosové soustavě ČR. Mezi jednotlivými scénáři došlo k úpravě přibližně dvaceti řádků kódu. Mimo přehledné grafické vykreslení je samozřejmostí také detailní numerický výstup pro přesné stanovení rozdílů mezi scénáři. Ať již zatížení uzlů nebo pokles napětí v určitých bodech je možné sledovat další hodnoty pomocí jednoduchých příkazů, jako např.:

```
net.res.trafo['p_hv_mw', 'p_lv_mw', 'q_hv_mvar', 'q_lv_mvar', 'i_hv_ka',  
'i_lv_ka', 'loading percent'].
```

Je tedy možné vybrat si jakýkoliv prvek v dané soustavě a nechat si vypsát vybrané hodnoty.

Možné výsledky daného prvku jsou ovlivněny rozsahem zadávaných hodnot a je doporučeno před výpočtem zkontrolovat které vstupní hodnoty jsou potřebné pro chtěný výstup. Připomeňme, že je možné tento kód využít pro time-series calculation přidáním dataframe, tedy souboru s obsahem vstupních hodnot pro všechny daná zařízení. Zpřesnění výsledků je možné dosáhnout buď zjištěním aktuálních hodnot od PPS nebo pokračovat v dalším odvozování z veřejně dostupných dat. V oblasti spotřeby jsou hodnoty pro dané kraje ERÚ známé a je tedy nutné jít dále do detailnosti v oblasti výroby v distribuční úrovni. Může se veřejně dohledat výroby např. od 50 MW a přizpusobit tomu bilanci PS/DS uzlu v daném kraji. Dalším krokem je určení pilotních uzlů a jejich charakteru pro dané zatížení. Doporučuji pro výpočty powerflow využít obdobných situací jako dny minima a maxima zatížení, kde odpadá nejistá predikce v oblasti OZE a data jsou lépe čitelná.

Česká republika svou polohou a proměnou charakteru hlavně decentralizace může plánovat vyšší využití k přeshraničním tokům a primárně vybudovat úložiště ve formě baterií a přečerpávacích elektráren tak, aby bylo možné urychlit přechod na nízkoemisní energetiku akumulací energie. Mohou vzniknout pilotní projekty, kde jejich využití se dá posoudit programem PandaPower. Celý region ENTSO-E má v posledních letech deficitní

charakter. Tato situace se s uzavřením uhelných a jaderných (převážně v Německu) bloků výrazně zhorší. Dovoz elektřiny do tuzemska je vysoce rizikový a vhodný jen pro řešení krizových situací. Základním atributem rozvoje ES ČR musí být trvalá soběstačnost ve výrobě elektřiny a udržení ES v komfortně provozovatelné konfiguraci. Nové technologie (akumulace) samy o sobě nezajistí dekarbonizaci české energetiky ale i přesto je jejich integrace nutnou podmínkou pro vysoký podíl OZE.

Závěr

Diplomová práce poukazuje na nové možnosti simulací v oblasti energetického sektoru za pomoci free and open source software prostředí. Liberalizace energetiky a vyšší transparentnost již nyní vyžaduje postupy a výsledky studií v takové formě, aby byly hodnotitelné a zpětně kontrolovatelné. V tomto případě je zde prostor pro potenciál FOSS který splňuje zmíněná kritéria.

Práce na začátku shrnuje opatření vedoucí k největším změnám. Hlavními body jsou decentralizace a nízkoemerní výroba elektrické energie. Čtenář se seznámí s aktuálním stavem zdrojové základny a možnými výhledy do budoucna dle různých studií. I zde se vnořuje myšlenka free and open source software, a to kvůli nedostatečně podrobným a zároveň málo pružným studiím, kde FOSS poskytuje tu výhodu, jako veřejně dostupný a navíc s možností v širším okruhu uživatelů, připomínkovat tyto navrhované změny. V neposlední řadě FOSS může napomoci budoucí spolupráci nejen na akademické půdě ale také na lepším plánování jako menších evropských celků.

Přechodem mezi teoretickou a praktickou částí tvoří rešerše k dostupným FOSS programům. Jelikož je nabídka pestrá a samotné popsání určitého programu obtížné, jsou programy krátce shrnuty a uvedeny odkazy k podrobnějším studiím a návodům. Na doporučení nejuzší výběr probíhal mezi OpenModelicou, OpenDSS a PandaPower, avšak stále častěji využívané prostředí Python se stalo jasnou podmínkou. Tento atribut splňuje Pandapower a zároveň budila dojem nejrychleji se vyvíjejícího prostředí s jasnou myšlenkou opensource. Závěrečná část teoretické části je úvodem k programu Pandapower a možným funkcím. Jsou uvedeny krátké příklady včetně kódů (v příloze) k rychlejšímu porozumění.

V poslední části práce je vytvořen výchozí model přenosové soustavy České republiky předpokládány v roce 2026. K tomuto modelu byly vytvořeny a porovnávány čtyři scénáře, které mohou s nejvyšší pravděpodobností ovlivnit budoucnost přenosové soustavy. Výsledky zkoumají změnu toků výkonů činného a jalového výkonu. Primární myšlenka vytvoření detailního modelu přenosové soustavy má úskalí v neznalosti přenosných dat o aktuálním zatížení soustavy. I přesto práce ukazuje, že přenosová soustava České republiky v roce 2040 nebude přetížena a bude moci plnit bezpečně svůj chod a práce si udržuje myšlenku, že jakákoliv budoucí provedená změna je možná rychle implementovat s aktuálními výsledky. Další cíl práce byl splněn a to ten, že představila FOSS jako jeden z možných a s vysokou pravděpodobností budoucích řešení analýz těchto soustav.

Literatura

- [1] *Clean energy for all Europeans*. Directorate-General for Energy (European Commission). EU: EU publications, 2019. ISBN 978-92-79-99835-5.
- [2] ABUR, Ali a Antonio G-MEZ EXP-SITO. *Power System State Estimation: Theory and implementation*. New York: Marcel Dekker, 2004. ISBN 0-8247-5570-7.
- [3] Pandapower—An Open-Source Python Tool for Convenient Modeling, Analysis, and optimization of Electrical Systems. *IEEE Transaction on power systems*. 2018, **33**(6), 6510-6521.
- [4] MILANO, F. a L. VANFRETTI. State of the Art nad Future of OSS for Power Systems. *IEEE PES*. 2009, , 1-7.
- [5] Opening the black box of energy modelling: Strategies and lessons learned. *Science Direct: Energy Strategy reviews*. Elsevier, 2018, **19**, 63-71.
- [6] SCHIERHORN, Peter-Philipp. CZECH POWER GRID WITHOUT ELECTRICITY FROM COAL BY 2030:: Sensitivity Analysis. In: *Energynautics* [online]. Praha: Energynautics, 12. října 2018 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://frankbold.org/o-nas/publikace/grid-study-ii>
- [7] SCHIERHORN, Peter_Philipp. CZECH POWER GRID WITHOUT ELECTRICITY FROM COAL BY 2030: POSSIBILITES FOR INTEGRATION OF RENEWABLE RESOURCES AND TRANSITION INTO A SYSTEM BASED ON DECENTRALIZED SOURCES: Final Report. In: *Energynautics* [online]. Praha: Energynautics, 22.5.2018 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://frankbold.org/pro-media/tiskova-zprava/prelomova-studie-po-odstaveni-ceskych-uhelnych-elektraren-svetla-nezhasnou>
- [8] Zpráva o očekávané dlouhodobé rovnováze mezi nabídkou a poptávkou elektřiny a plynu: Expected electricity and gas balance report. In: *Www.ote-cr.cz* [online]. 2018 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/o-spolecnosti/vyrocnizpravy>
- [9] Rozvoj obnovitelných zdrojů do roku 2030: Analýza zpracována pro Svaz moderní energetiky. In: *Deloitte* [online]. Září 2019 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://www2.deloitte.com/cz/cs/pages/energy-and-resources/articles/rozvoj-obnovitelnych-zdroju-do-roku-2030.html>
- [10] Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040: MAF CZ. In: *Www.ceps.cz* [online]. Praha: ČEPS, 18.10.2019 [cit. 2020-03-22]. Dostupné

- z: <https://www.ceps.cz/cs/tiskove-zpravy/novinka/maf-cz-prinasi-hodnoceni-zdrojove-primerenosti-cr-do-roku-2040>
- [11] Roční zpráva o provozu ES ČR: 2018. In: *Energetický regulační úřad* [online]. 2019 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/cs/zpravy-o-provozu-elektrizacni-soustavy>
- [12] ENTSO-E 2025, 2030, 2040 Network Development Plan 2018: Final version after consultation and ACER opinion - October 2019. In: *ENTSO-E* [online]. [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://tyndp.entsoe.eu/tyndp2018/tyndp2018>
- [13] Rozvoj podporovaných zdrojů energie do roku 2030: podkladový dokument pro účely přípravy Vnitrostátního plánu v oblasti energetiky a klimatu. In: *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. Praha: MPO, 11.3.2019 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/elektroenergetika/obnovitelne-zdroje/rozvoj-podporovanych-zdroju-energie-do-roku-2030-podkladovy-dokument-nkep-244303/>
- [14] Coal exit tracker: Europe beyond. *Europe beyond coal* [online]. Climate Action Network Europe, 2017 [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://beyond-coal.eu/data/?dataset=g7&timeline=16&chart=7&type=charts>
- [15] *Desetiletý plán rozvoje přenosové soustavy České republiky: 2019 - 2028* [online]. In: . Praha: ČEPS, 11/2018, s. 162 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/rozvoj-ps>
- [16] *Očekávaná dlouhodobá rovnováha mezi nabídkou a poptávkou elektřiny a plynu: Výhled do roku 2060 - prezentační materiál*. Praha: OTE, 2019.
- [17] *Hodnocení výrobní přiměřenosti ES ČR do roku 2030*. Praha: ČEPS, 2018.
- [18] STEC, Tomáš. *Porovnání programů pro síťové výpočty*. ZČU, 2018. Bakalářská práce. Západočeská Univerzita v Plzni.
- [19] CHALUPA, Štěpán. *Potenciál OZE v ČR: Analýza větrné energetiky v ČR*. Praha: Komora OZE, 2015.
- [20] Jupyter nb viewer. *Jupyter notebook* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://nbviewer.jupyter.org/github/e2nIEE/pandapower/tree/develop/>
- [21] Rozvoj PS. *Česká přenosová soustava* [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/rozvoj-ps>
- [22] EIRIK, Rye a Lie ARNE. Power Gama Europe 2014 model. *Zenodo* [online]. 2016, Červen 2016 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://doi.org/10.5281/zenodo.54580>

- [23] Brown, T., Hörsch, J. and Schlachtberger, D., 2018. PyPSA: Python for Power System Analysis. *Journal of Open Research Software*, 6(1), p.4. DOI: <http://doi.org/10.5334/jors.188>
- [24] Power Systems Analysis Software. OpenElectrical [online]. MediaWiki, 2017 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: https://wiki.openelectrical.org/index.php?title=Power_Systems_Analysis_Software
- [25] Řízení elektrizační soustavy. Západočeská Univerzita v Plzni [online]. Plzeň: ZČU [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/nohac/E2/Elektrarny2-cast11-v1.pdf>
- [26] Citace v seznamu literatury: MÁŠLO, Karel. Řízení a stabilita elektrizační soustavy. Praha. Skriptum. IEEE.
- [27] PROKOP, Miroslav. Operativní řízení přenosové soustavy Dispečink ČEPS. Praha Bohdalec: ČEPS, 2011.
- [28] HELBICH, Jiří. Dispečerské řízení. Západočeská Univerzita v Plzni [online]. Plzeň: ČEPS [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/nohac/E2/Dispecerske_rizeni_CEPS_ZCU-ProStudenty.pdf

Seznam příloh

A	Kód pro ukázkou powerflow	49
B	Kód pro N-1 kritérium	51
C	Kód pro Time-series Calculation	52
D	Schéma přenosové soustavy	55

A Kód pro ukázkou powerflow

Veškeré kódy vznikly za pomoci [20].

```
# -*- coding: utf-8 -*-
```

```
Created on March 6 08:40:15 2020
```

```
@author: Dominik
```

```
import pandapower as pp
```

```
import numpy as np
```

```
import pandapower.plotting
```

```
net = pp.create_empty_network()
```

```
min_vm_pu=.99
```

```
max_vm_pu=1.02
```

```
#create buses
```

```
bus1 = pp.create_bus(net, vn_kv=220., name="Bod1", geodata=(16.1508411, 49.0865564))
```

```
bus2 = pp.create_bus(net, vn_kv=110., name="Bod2", geodata=(16.1184064, 49.1045728))
```

```
bus3 = pp.create_bus(net, vn_kv=110., name="Bod3", geodata=(16.4569831, 49.3308011))
```

```
bus4 = pp.create_bus(net, vn_kv=110., name="Bod4", geodata=(16.6990578, 49.1133497))
```

```
#create 220/110 kV transformer
```

```
pp.create_transformer(net, bus1, bus2, std_type="100 MVA 220/110 kV", name="trafo1-2",
```

```
max_loading_percent=50,)
```

```
#create 110 kV lines
```

```
#print(pp.available_std_types(net, "trafo")) #funkce pro předvolání předdefinovaných vodičů
```

```
pp.create_line(net, bus2, bus3, length_km=70., std_type='149-AL1/24-ST1A 110.0', max_loading_percent=50)
```

```
pp.create_line(net, bus3, bus4, length_km=50., std_type='149-AL1/24-ST1A 110.0', max_loading_percent=50)
```

```
pp.create_line(net, bus4, bus2, length_km=40., std_type='149-AL1/24-ST1A 110.0', max_loading_percent=50)
```

```
#create loads
```

```
pp.create_load(net, bus2, p_mw=60, controllable=False)
```

```
pp.create_load(net, bus3, p_mw=70, controllable=False)
```

```
pp.create_load(net, bus4, p_mw=10, controllable=False)
```

```
#create generators
```

```
eg = pp.create_ext_grid(net, bus1, min_p_mw=-1000, max_p_mw=1000)
```

```
g0 = pp.create_gen(net, bus3, p_mw=80, min_p_mw=0, max_p_mw=80, vm_pu=1.01, controllable=True)
```

```
g1 = pp.create_gen(net, bus4, p_mw=100, min_p_mw=0, max_p_mw=100, vm_pu=1.01,
```

```
controllable=True)
costeg = pp.create_poly_cost(net, 0, 'ext_grid', cp1_eur_per_mw=10,)
costgen1 = pp.create_poly_cost(net, 0, 'gen', cp1_eur_per_mw=15)
costgen2 = pp.create_poly_cost(net, 1, 'gen', cp1_eur_per_mw=12)
pp.runopp(net) #1
print(net.res_ext_grid) #1
print(net.res_gen) #1
# 2 jednoduchý graf
pp.plotting.simple_plotly(net,use_line_geodata=False,aspectratio=(2,1),figsize=2,) #2
# vytvoření powerflow grafu
pp.runpp(net) #3
pp.plotting.plotly.pf_res_plotly(net,use_line_geodata=False,aspectratio=(2,1),figsize=2,
projection="epsg:31467", filename='zkouška_powerflow.html')
```

B Kód pro N-1 kritérium

```
# -*- coding: utf-8 -*-
Created on Sat Nov 9 16:00:28 2019
@author: Dominik
import pandapower as pp
import pandapower.networks as nw
import pandapower.plotting as pplt
import matplotlib.pyplot as plt
net = nw.create_cigre_network_mv(with_der=False)
#print(net)
vmax= 1.05
vmin=.95
max_ll=100.
lines = net.line.index
critical = list()
for l in lines:
net.line.loc[l, "in service"] = False
pp.runpp(net)
if net.res_bus.vm_pu.max() > vmax or net.res_bus.vm_pu.min() < vmin or
net.res_line.loading_percent.max()
> max_ll:
critical.append(l)
net.line.loc[l, "in service"] = True
ax=pplt.simple_plot(net, show_plot = False)
clc = pplt.create_line_collection(net, critical, color="r", linewidth=3., use_bus_geodata=
True)
pplt.draw_collections([clc], ax=ax)
plt.draw()
#pp.plotting.simple_plotly(net,use_line_geodata=False,aspectratio=(2,1),figsize=2)
```

C Kód pro Time-series Calculation

```
import os
import numpy as np
import pandas as pd
import tempfile
import pandapower as pp
from pandapower.timeseries import DFData
from pandapower.timeseries import OutputWriter
from pandapower.timeseries.run_time_series import run_timeseries
from pandapower.control import ConstControl
def timeseries_example(output_dir):
    # 1. create test net
    net = simple_test_net()
    # 2. create (random) data source
    n_timesteps = 24
    profiles, ds = create_data_source(n_timesteps)
    # 3. create controllers (to control P values of the load and the sgen)
    create_controllers(net, ds)
    # time steps to be calculated. Could also be a list with non-consecutive time steps
    time_steps = range(0, n_timesteps)
    # 4. the output writer with the desired results to be stored to files.
    ow = create_output_writer(net, time_steps, output_dir=output_dir)
    # 5. the main time series function
    run_timeseries(net, time_steps)
def simple_test_net():
    net = pp.create_empty_network()
    pp.set_user_pf_options(net, init_vm_pu = "flat", init_va_degree = "dc", calculate_voltage_angles=True)
    b0 = pp.create_bus(net, 110)
    b1 = pp.create_bus(net, 110)
    b2 = pp.create_bus(net, 20)
    b3 = pp.create_bus(net, 20)
    b4 = pp.create_bus(net, 20)
    pp.create_ext_grid(net, b0)
    pp.create_line(net, b0, b1, 10, "149-AL1/24-ST1A 110.0")
    pp.create_transformer(net, b1, b2, "25 MVA 110/20 kV", name='tr1')
    pp.create_line(net, b2, b3, 10, "184-AL1/30-ST1A 20.0")
    pp.create_line(net, b2, b4, 10, "184-AL1/30-ST1A 20.0")
    pp.create_load(net, b2, p_mw=20., q_mvar=10., name='load1')
```

```

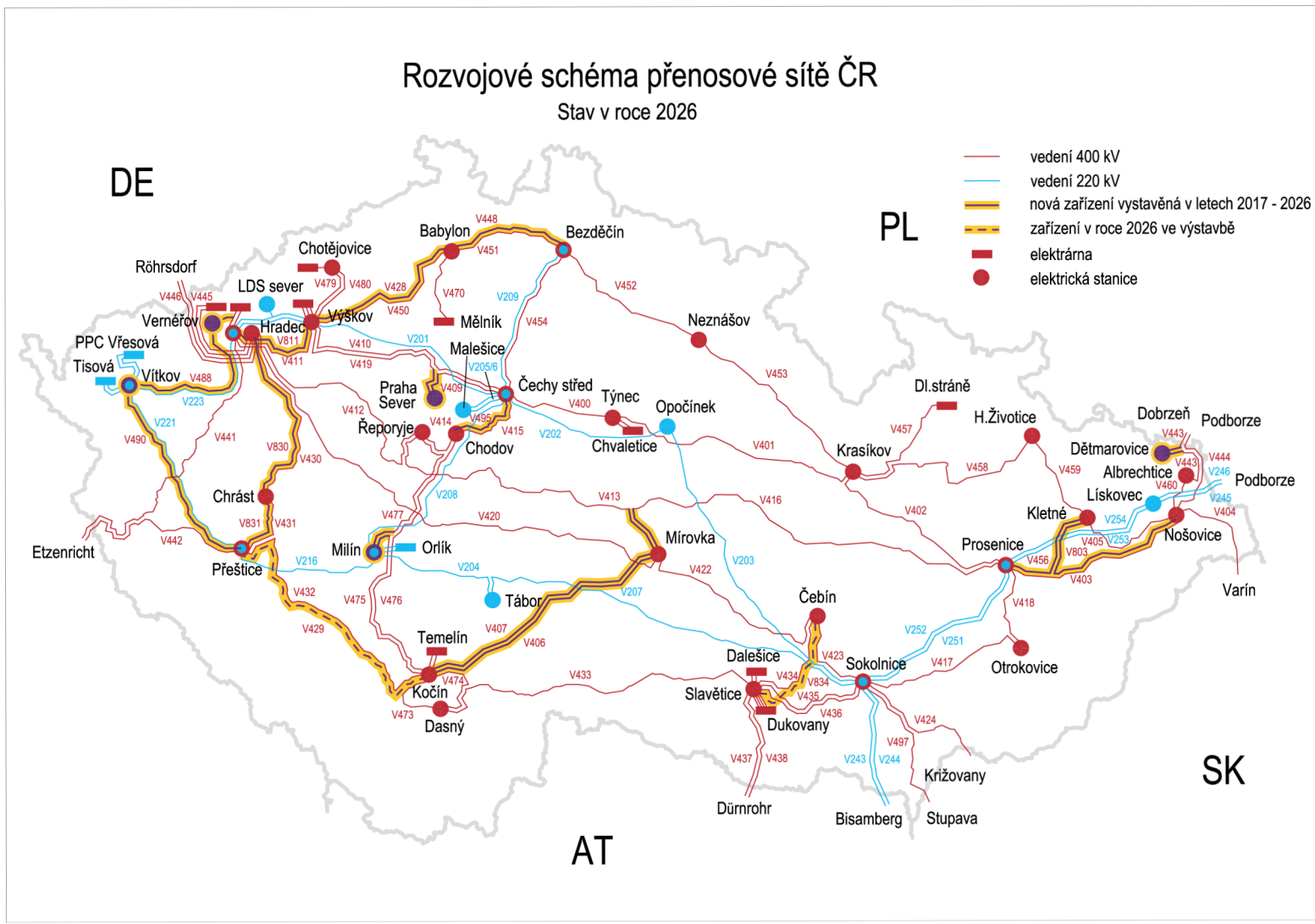
pp.create_sgen(net, b4, p_mw=20., q_mvar=0.15, name='sgen1')
return net
def create_data_source(n_timesteps=24):
profiles = pd.DataFrame()
profiles['load1_p'] = np.random.random(n_timesteps) * 20.
profiles['sgen1_p'] = np.random.random(n_timesteps) * 20.
ds = DFData(profiles)
return profiles, ds
def create_controllers(net, ds):
ConstControl(net, element='load', variable='p_mw', element_index=[0],
data_source=ds, profile_name=["load1_p"])
ConstControl(net, element='sgen', variable='p_mw', element_index=[0],
data_source=ds, profile_name=["sgen1_p"])
def create_output_writer(net, time_steps, output_dir):
ow = OutputWriter(net, time_steps, output_path=output_dir, output_file_type=".xls",
log_variables=list())
# these variables are saved to the harddisk after / during the time series loop
ow.log_variable('res_load', 'p_mw')
ow.log_variable('res_bus', 'vm_pu')
ow.log_variable('res_line', 'loading_percent')
ow.log_variable('res_line', 'i_ka')
return ow
output_dir = os.path.join(tempfile.gettempdir(), "time_series_example")
print("Results can be found in your local temp folder: {}".format(output_dir))
if not os.path.exists(output_dir):
os.mkdir(output_dir)
timeseries_example(output_dir)
import matplotlib.pyplot as plt

# voltage results
vm_pu_file = os.path.join(output_dir, "res_bus", "vm_pu.xls")
vm_pu = pd.read_excel(vm_pu_file)
vm_pu.plot(label="vm_pu")
plt.xlabel("time step")
plt.ylabel("voltage mag. [p.u.]")
plt.title("Voltage Magnitude")
plt.grid()
plt.show()
# line loading results ll_file = os.path.join(output_dir, "res_line", "loading_percent.xls")

```

```
line_loading = pd.read_excel(ll_file)
line_loading.plot(label="line_loading")
plt.xlabel("time step")
plt.ylabel("line loading [%]")
plt.title("Line Loading")
plt.grid()
plt.show()
# load results
load_file = os.path.join(output_dir, "res_load", "p_mw.xls")
load = pd.read_excel(load_file)
load.plot(label="load")
plt.xlabel("time step")
plt.ylabel("P [MW]")
plt.grid()
plt.show()
```

D Schéma přenosové soustavy



Obr. D.1.: Rozvojové schéma přenosové sítě [21].