

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra Elektroenergetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Úroveň velikosti napětí a bilance jalového výkonu v okolí malých
OZE**


Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2016/631 ze dne 14. dubna 2016 (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A32016R0631>)
2. Noháč, K., Bělík, M., Raková L., Mužik, V. – Zjištění vlivu rozptýlené výroby z obnovitelných zdrojů na úhlovou stabilitu. ČEPS a.s., 2019
3. Příručka zvoleného nástroje pro modelování

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 9. října 2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Štěpán ŽUREK**
Osobní číslo: **E19N0022K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Úroveň velikosti napětí a bilance jalového výkonu v okolí malých OZE**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

Nejen frekvence napětí a rovnováha činného výkonu jsou důležité parametry spolehlivé dodávky elektrické energie. Zvláště z lokálního úhlu pohledu stejně klíčové udržovat stabilní úroveň jalového výkonu a velikosti napětí.

1. Rozeberte teoretické souvislosti vztahu výkonové bilance výroby a spotřeby činného a jalového výkonu ve vztahu k frekvenci a velikosti napětí se soustředěním na poměry v blízkosti malých výrobních bloků pracujících do distribuční soustavy.
2. Shrňte důsledky „Nařízení komise (EU) 2016/631“, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě, pro provozování malých nesynchronních výrobních bloků OZE.
3. Realizujete zjednodušený model případové studie nesynchronního bloku malé OZE ve vhodném nástroji (PSCAD, Simscape Electrical, DYNAST, nebo OpenModelica).
4. Analyzujte chování malého nesynchronního výrobního bloku OZE simulací prudkých změn činného výkonu a sledujte dopady a nerovnováhu jalového výkonu a stabilitu velikosti napětí.
5. Formulujte doporučení pro provoz malých nesynchronních OZE s ohledem na poměry jalového výkonu a velikosti napětí.

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku stability napětí a bilance jalového výkonu v blízkosti malých obnovitelných zdrojů. Úvodní část práce je zaměřena na legislativu a technické požadavky, které musí solární elektrárna splňovat. Následuje teoretická část zaměřena na výpočet ustálených stavů sítě a výkonové bilance. Končí simulací malé solární elektrárny v prostředí GridCal. Simulace jsou prováděny pro jednotlivá roční období a v každém období je pozorována stabilita napětí v jednom dni a jednom týdnu. Současně s reálnými výstupními hodnotami solární elektrárny je schéma distribuční sítě v prostředí GridCal zatíženo reálnými odběrateli, které zastupují zákazníci Třidy TDD2 jejichž odběr byl vypočten na základě údajů operátora trhu s elektřinou.

Klíčová slova

Fotovoltaická elektrárna, výkonová bilance, napětí, stabilita sítě, odpor, proud, ...

Abstract

The diploma thesis is focused on the topic of voltage stability and reactive power balance situated near small renewable sources. First part of the thesis is focused on legislation and technical requirements for solar power plant. Theoretical part is focused on the calculation load flow method. The end part of diploma thesis is about the simulations. Simulation is divided in four seasons. Serial power flow is simulated in every season by simulation program called GridCal and a time sample of simulation is one week and one day from every season. Output power of solar power plant is real measurement value and value for load is also real Type of load is TDD2 value from website OTE.

Key words

Photovoltaic power plant, power balance, voltage, resistance, current,.....

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 27.5.2021

Jméno příjmení

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Karlu Noháčovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Seznam symbolů a zkratek

DC.....	Direct Current
s_2	Statika
P.....	Positive (kladný)
N.....	Negative (záporný)
x_0	Odhadovaná hodnota
\bar{p}	Převod
\bar{U}_i	Neznámé napětí
ε	Požadovaná přesnost
TDD.....	Typový diagram

Seznam obrázků

Obrázek 1 Princip solárního panelu	9
Obrázek 2 Schéma popisující schopnost odezvy činného výkonu u výrobních modulů v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci [2]	15
Obrázek 3 Snižování maximálního výkonu s klesající frekvencí [2]	16
Obrázek 4 π -článek	21
Obrázek 5 Detail sítě	22
Obrázek 6 Detail s jedním dvouvinutovým transformátorem [4]	24
Obrázek 7 Přepočítání hvězdy na trojúhelník [5]	25
Obrázek 8 Náhradní schéma transformátoru (π -článek) [4]	25
Obrázek 9 Náhradní schéma transformátoru (T-článek) [4]	25
Obrázek 10 Divergence numerického výpočtu [4]	27
Obrázek 11 Konvergence numerického výpočtu [4]	27
Obrázek 12 Vývojový diagram Gauss - Seidelovy metody [4]	29
Obrázek 13 Popis Newton - Raphsonovy metody [4]	30
Obrázek 14 Newton - Raphsonova metoda (vysvětlení principu dle vzorce (3.39))	32
Obrázek 15 Vývojový diagram Newton – Raphsonovy metody	36
Obrázek 16 Chod 3 - uzlové soustavy	37
Obrázek 17 Schéma společné úlohy PSAT	41
Obrázek 18 Výsledky simulace PSAT v poměrných jednotkách	41
Obrázek 19 Výsledky simulace PSAT	41
Obrázek 20 Schéma v programu GridCal	42
Obrázek 21 Úhly jednotlivých napětí v programu GridCal	42
Obrázek 22 Výsledné velikosti napětí v programu GridCal	42
Obrázek 23 Statická charakteristika zátěže [8]	45
Obrázek 24 Statická napěťová charakteristika (generátorů, synchronních komparátorů a motorů) [8]	46
Obrázek 25 Statická napěťová charakteristika (kondenzátorů a vedení VVN) [8]	46
Obrázek 26 Statická napěťová charakteristika zahrnující statické rotační zdroje a výsledná součtová charakteristika zdrojů [6]	47
Obrázek 27 Statické napěťové charakteristiky zatížení a) Transformátory a motory b) vedení	48
Obrázek 28 Stabilita elektrické soustavy	48

Obrázek 29 Stabilita	49
Obrázek 30 Statické charakteristiky zdrojů jsou dány primárně pomocí regulátorů otáček turbín	50
Obrázek 31 Statické charakteristiky zatížení	51
Obrázek 32 Výpadek zdroje (levý) přírůstek zdroje (pravý)	53
Obrázek 33 Nárůst zatížení (vlevo) a pokles zatížení (vpravo)	53
Obrázek 34 Vliv samoregulačního efektu elektrické soustavy	54
Obrázek 35 Propojení soustav	54
Obrázek 36 Frekvenční statická charakteristika primární regulace	55
Obrázek 37 Frekvenční statická charakteristika sekundární regulace	55
Obrázek 38 Regulátor	56
Obrázek 39 Regulace frekvence	57
Obrázek 40 Graf zátěže typu C třídy TDD2 v zimním období (jeden týden)	61
Obrázek 41 Graf výstupního AC výkonu ke dni 7.8.2020	62
Obrázek 42 Schéma distribuční sítě obsahující transformátory	64
Obrázek 43 Schéma distribuční soustavy v poměrných hodnotách přepočtené na stranu nízkého napětí	65
Obrázek 44 Náhradní schéma transformátoru [20]	66
Obrázek 45 Transformátor v prostředí GridCal	69
Obrázek 46 Hodnoty zadané do prostředí GridCal	69
Obrázek 47 Nastavení frekvence a vztažné hodnoty výkonu	70
Obrázek 48 Poměrné hodnoty transformátoru v GridCalu	71
Obrázek 49 Prostředí programu GridCal	72
Obrázek 50 Panel obsahující údaje o vedení v poměrných jednotkách	73
Obrázek 51 Parametry vedení vztažené k jednomu kilometru	74
Obrázek 52 Výsledný graf (serial power flow, ustálený stav napětí v čase) simulace generovaná programem GridCal	79
Obrázek 53 Graf změn úhlu napětí	80
Obrázek 54 Ustálená hodnota napětí v uzlech sítě během 01.02.2021	80
Obrázek 55 Hodnota napětí v uzlech sítě 1-7.2.2021	81
Obrázek 56 Výstupní výkon solární elektrárny v období 1-7.2.2021	81
Obrázek 57 Hodnota napětí v uzlech sítě 1.5.2019	82
Obrázek 58 Výstup solární elektrárny	82
Obrázek 59 Hodnota napětí v prvcích sítě 1-7.5.2020	83

Obrázek 60 Výstupní výkon solární elektrárny	83
Obrázek 61 Napěťové poměry v síti 1.8.2020	84
Obrázek 62 Výkon dodávaný solární elektrárnou dne 1.8.2020	84
Obrázek 63 Napěťové poměry v distribuční soustavě od 1-7.8.2020	85
Obrázek 64 Výkon a zátěž jednoho odběratele dodávaného do distribuční sítě od 1-7.8.2020	86
Obrázek 65 Napěťové poměry v síti dne 1.11.2020	87
Obrázek 66 Výstupní výkon a zátěž 1.11.2020	88
Obrázek 67 Napěťové poměry v distribuční soustavě od 1-7.11.2020	88
Obrázek 68 Výstupní výkon a zátěž 1-7.11.2020	89
Obrázek 69 Napěťové poměry v distribuční síti dne 1.8.2020	90
Obrázek 70 Q(U) charakteristika společnosti ČEZ [23]	91
Obrázek 71 Jalový výkon procházející distribuční soustavou dne 1.8.2020	91
Obrázek 72 Napěťové poměry v distribuční síti dne 1.8.2020 za použití Q(U) regulace	92
Obrázek 73 Schéma obsahující pouliční osvětlení podél hlavní komunikace	92
Obrázek 74 Napětí v uzlech hlavní napájecí větve	93
Obrázek 75 Graf vyhodnocení intenzity záření a výstupního výkonu dne 1.8.2020	93
Obrázek 76 Intenzita záření a výstupní výkon v jednotlivých měsících roku 2020	94

Seznam tabulek

Tabulka 1 Nařízení komise EU 231/2016 [2]	11
Tabulka 2 Minimální doby, které musí být modul provozuschopný a připojen k soustavě při odchylce frekvence od jmenovité hodnoty [2]	13
Tabulka 3 Výpočet pomocí Gauss - Seidelovy metody	40
Tabulka 4 Vybrané týdny v jednotlivých ročních obdobích, které jsou součástí simulace	61
Tabulka 5 Přibližné parametry venkovního vedení [16]	62
Tabulka 6 Zvolené parametry venkovního vedení vn (22 kV) při teplotě 20 °C [16]	62
Tabulka 7 Parametry vedení nízkého napětí při 20 °C [17]	62
Tabulka 8 Parametry transformátorů [19]	63
Tabulka 9 Vedení nn použité v simulaci	76
Tabulka 10 Vedení vn užitá v simulaci	76
Tabulka 11 Normalizované hodnoty zákazníka třídy TDD2	77
Tabulka 12 Lineárně proložená zátěž v pětiminutových intervalech	77
Tabulka 13 Huawei SUN2000-33KTL-A, hodnoty výkonů pro jeden vybraný den	78
Tabulka 14 Změřené hodnoty výkonů v pětiminutových intervalech	79

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	1
SEZNAM OBRÁZKŮ	2
SEZNAM TABULEK	5
ÚVOD	8
1 PRINCIP SOLÁRNÍ ELEKTRÁRNY	9
1.1 SOLÁRNÍ PANEL.....	9
1.2 REGULÁTOR DC/DC MĚNIČ	10
1.3 STRÍDAČ.....	10
2 PODMÍNKY PRO PŘIPOJENÍ VÝROBNY K ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ 11	
2.1 URČENÍ VÝZNAMNOSTI	11
2.2 OBECNÉ POŽADAVKY NA VÝROBNÍ MODULY	12
3 VÝPOČTY CHODU SÍTĚ	18
3.1 METODA UZLOVÝCH NAPĚTÍ	19
3.1.1 Rozdělení uzlů.....	19
3.2 DEFINICE IMPEDANČNÍ A ADMITANČNÍ MATICE	20
3.3 NUMERICKÉ METODY	26
3.3.1 Gauss - Seidlova metoda (G - Sp)	27
3.3.2 Newton - Raphsonova metoda (N - R).....	30
4 POROVNÁNÍ GAUSS – SEIDLOVI VÝPOČETNÍ METODY VÝPOČET V PROGRAMU GRIDCAL A PSAT	37
4.1 ŘEŠENÍ GAUSS – SEIDLOVOU METODOU	39
4.2 ŘEŠENÍ PROGRAMEM PSAT	41
4.3 ŘEŠENÍ PROGRAMEM GRIDCAL	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
5 STABILITA ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY	43
5.1 VÝKONOVÁ BILANCE	43
5.2 STATICKÉ CHARAKTERISTIKY.....	45
5.2.1 Statická charakteristika napětí.....	45
5.2.2 Frekvenční statické charakteristiky.....	50

6	REALIZACE ZJEDNODUŠENÉHO MODELU MALÉ SOLÁRNÍ ELEKTRÁRNY	58
6.1	ZÁTĚŽE	58
6.1.1	Typové diagramy	59
6.1.2	Výpočet spotřeby pro zákazníka k danému období.....	60
6.2	SOLÁRNÍ ELEKTRÁRNA.....	61
6.3	ÚDAJE O DISTRIBUČNÍ SÍTI.....	62
6.3.1	Distribuční soustava v okolí malého OZE s transformátory.....	63
6.3.2	Distribuční soustava v okolí malého OZE vypočtené pomocí poměrných hodnot (bez transformátorů).....	65
6.4	SIMULACE V PROSTŘEDÍ GRIDCAL S REÁLNÝMI HODNOTAMI	72
6.4.1	Důležité upozornění před užitím programu GridCal	72
6.4.2	Detailní porovnání jednoho dne v každém ročním období.....	75
6.4.3	Vliv solární elektrárny v zimní období	79
6.4.4	Vliv solární elektrárny v jarním období	82
6.4.5	Vliv solární elektrárny v letním období	84
6.4.6	Vliv solární elektrárny v podzimním období	87
6.4.7	Simulace prudkých změn činného výkonu v okolí malého nesynchronního výrobního bloku	89
6.4.8	Souhrn informací získaných ze simulací.....	94
7	ZÁVĚR	95
8	CITOVANÁ LITERATURA	96
9	PŘÍLOHY	99
9.1	PŘÍKLAD ŘEŠENÍ - GAUSS - SEIDLOVA METODA (G-SP).....	99
9.2	PŘÍKLAD ŘEŠENÍ NEWTON - RAPHSONOVA METODA.....	100

Úvod

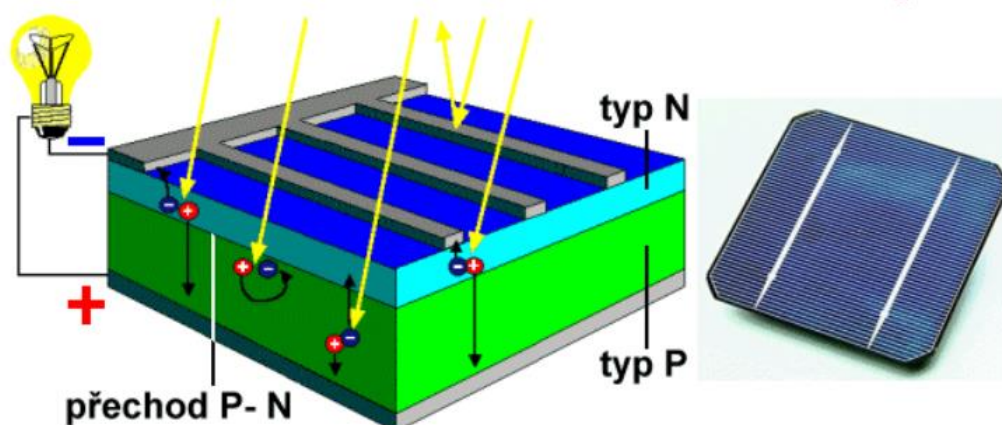
Předkládaná práce je zaměřena na malou solární elektrárnu, která je připojena do distribuční sítě. Solární elektrárny spadají do takzvaných obnovitelných zdrojů energie a využívají nevyčerpatelný zdroj energie sluneční záření. Při výrobě elektrické energie neprodukují žádné emise. Za zmínku rovněž stojí jejich uplatnění v oblasti vesmírného bádání a jejich využití ve sdělovací technice, kde slouží k napájení satelitů obíhajících kolem Země. V této práci jsou využity údaje z reálné solární elektrárny a rovněž údaje ze stránek OTE, které zahrnují reálné denní spotřeby.

1 Princip solární elektrárny

Solární elektrárna se skládá z Fotovoltaických panelů, které přeměňují solární energii na stejnosměrnou elektrickou, kterou propojovacími vodiči přivádíme do DC/DC měniče a z něj přivádíme energii do střídače, který přemění na střídavou a propojovacími vodiči přivede na transformátor ten ji transformuje na požadovanou hodnotu napětí a připojí k distribuční nebo přenosové síti.

1.1 Solární panel

Základem solární elektrárny je fotovoltaický článek. Principiálně se jedná o polovodičovou diodu. Polovodičová dioda se skládá z polovodičů typu P, které obsahují přebytek kladných nábojů (děr) a polovodiče typu N obsahujících přebytek záporných nábojů elektronů. Na tenkou křemíkovou destičku typu P se nanese tenká vrstva typu N. Spojením těchto dvou materiálů s různou koncentrací nosičů náboje se vytvoří vyčerpaná oblast (přechod), která obsahuje pouze menšinové nosiče náboje. Osvětlením článku vzniká uvnitř polovodiče fotoelektrický jev, který vede k uvolnění elektronů z krystalové mřížky. Na přechodu se vytvoří elektrické napětí dosahující přibližně 0,5 V. Takto dochází k přeměně energie dopadajícího světla na energii elektrickou. Uzavřeme-li článek přes spotřebič začnou se náboje vyrovnávat a dojde k průchodu proudu. Články se zapojují do sérioparalelních kombinací, čímž dojde k navýšení napětí a proudu. Spojováním článků vytvoříme solární panel. Sérioparalelním spojováním panelů vytváříme fotovoltaickou elektrárnu. [1]



Obrázek 1 Princip solárního panelu

1.2 Regulátor DC/DC měnič

Proměnná výroba solární energie vede ke kolísání výstupního napětí, které je potřeba regulovat. K regulaci mohou být použity DC/DC měniče jejichž účinnost se pohybuje kolem 95 až 98 %. Ve srovnání s klasickými regulátory jsou několikanásobně dražší. [1]

1.3 Střídač

Slouží k přeměně stejnosměrného napětí na střídavé. Použitý typ střídače je Power AC (Huawei SUN2000-33KTL-A), který má rozsah na fázi do 33 kW (power range 33kW).

Podrobné informace o střídači jsou součástí přílohy (9). [1]

2 Podmínky pro připojení výroby k elektrizační soustavě

Výrobní připojované do distribuční sítě mění napěťové a energetické poměry v této síti, tato změna je nejpatrnější v blízkosti místa připojení výroby. Provozovatel distribuční soustavy musí prodiskutovat všechny plány na připojení výroben k distribuční síti, protože změny poměrů vedou ke změnám zkratových výkonů, které musí být v případě poruchy vypnuty.

Pro zajištění bezpečnosti dodávek energie a zdravého trhu se musí výrobní řídit Nařízením komise EU 631/2016, který stanovuje harmonická pravidla pro připojování výrobních modulů k elektrizační soustavě, které usnadní integraci obnovitelných zdrojů. Tyto pravidla se nevztahují na již existující výrobní. Musíme koordinovat výrobní moduly na úrovni přenosových a distribučních sítí, tyto obnovitelné zdroje musí být dostatečně robustní, aby pomohly čelit narušením a usnadnili obnovu soustavy po jejím kolapsu. Výrobní moduly a soustavy jsou chápány jako jeden funkční celek, proto je bezpečný provoz možný jen při úzké spolupráci vlastníků výrobních modulů a provozovateli soustav. [2]

2.1 Určení významnosti

Určování výrobních modulů se provádí na základě vlivu na celou soustavu a velikosti výroby. Výrobní moduly se dělí na čtyři základní typy. Velikostí výroby se míní její maximální kapacita, rovněž se přihlíží na napěťovou hladinu v místě připojení. [2]

Tabulka 1 Nařízení komise EU 231/2016 [2]

Limit prahové hodnoty od které je výrobní modul modulem A	0,8 kW	napěťové hladiny v místě připojení A	méně než 110 kV
Limit prahové hodnoty od které je výrobní modul modulem B	1 MW	napěťové hladiny v místě připojení B	méně než 110 kV
Limit prahové hodnoty od které je výrobní modul modulem C	50 MW	napěťové hladiny v místě připojení C	méně než 110 kV
Limit prahové hodnoty od které je výrobní modul modulem D	75 MW	napěťové hladiny v místě připojení D	110 kV nebo vyšší

2.2 Obecné požadavky na výrobní moduly

Výrobní moduly typu A musí splňovat následující požadavky týkající se frekvenční stability:

- **Požadavky týkající se frekvenčních rozsahů**

Výrobní modul musí být schopen zůstat připojen k soustavě po požadovanou dobu v daném frekvenčním rozsahu dle Tabulka 2. Provozovatel soustavy se může po dohodě s majitelem výrobní elektrárny dohodnout na širším rozsahu a delších minimálních dobách provozu v těchto frekvencích nebo na specifických požadavcích, na kombinované odchylky frekvence a napětí, aby mohli být, co nejlépe využívány technické charakteristiky výrobního modulu, pokud je to nezbytné pro zachování, či obnovu bezpečnosti provozu soustavy. [2]

Vlastník výrobního modulu (výrobní) nesmí bezdůvodně odmítnout provoz v širších rozsazích frekvencí nebo delších minimálních dobách provozu, je-li zohledněna jejich technická i ekonomická proveditelnost. [2]

- **S přihlédnutím na schopnost zdroje setrvat v provozu při dané změně rychlosti a na ochranu při odpojení sítě (LOM – loss of mains)**

Je třeba přihlédnout na schopnost zdroje setrvat v připojeném stavu při dané rychlosti změny frekvence. Modul musí být schopen setrvat v připojení k soustavě až po hodnotu rychlosti změny frekvence určenou provozovatelem přenosové soustavy, pokud odepnutí od sítě nebylo vyvoláno příslušnou ochranou, při odpojení sítě (LOM – loss of mains), která reagovala následkem rychlosti změny frekvence. Příslušný provozovatel soustavy ve spolupráci s příslušným provozovatelem přenosové soustavy, tuto ochranu při odpojení sítě, která účinkuje v důsledku změny frekvence, stanoví. [2]

Tabulka 2 Minimální doby, které musí být modul provozuschopný a připojen k soustavě při odchylce frekvence od jmenovité hodnoty [2]

Synchronně propojená oblast	Rozsah frekvence	Doba provozu
Kontinentální Evropa	47,5 Hz – 48,5 Hz	Bude stanovena jednotlivými provozovateli přenosových soustav, avšak nejméně 30 minut
	48,5 Hz – 49 Hz	Bude stanovena jednotlivými provozovateli přenosových soustav, avšak nejméně jako pro rozsah 47,5 – 48,5 Hz
	49 Hz – 51 Hz	neomezená
	51 Hz – 51,5 Hz	30 minut

Pokud se jedná o omezený frekvenčně závislý režim při nadfrekvenci, platí níže uvedené body, které pro svou regulační oblast určí příslušný provozovatel přenosové soustavy v koordinaci s provozovateli přenosových soustav téže synchronně propojené oblasti, aby byl zajištěn minimální dopad na sousední oblasti:

- ***Schopnost poskytování frekvenční odezvy činného výkonu***

Výrobní modul má povinnost poskytovat frekvenční odezvu činného výkonu dle schématu na Obrázek 2 při prahové hodnotě frekvence a při stanovení statiky, která je stanovena příslušným provozovatelem přenosové soustavy.

- ***Automatické odpojování a opětovné připojování výrobních modulů***

Namísto výše uvedené schopnosti poskytování frekvenční odezvy činného výkonu lze použít automatické odpojení výrobních modulů typu A a opětovné připojení. Tento způsob je dán provozovatelem přenosové soustavy v rámci jeho regulační oblasti. Frekvence, při kterých dochází k automatickému odpojení a připojení jsou ideálně distribuovány nad prahovou hodnotu frekvence rovnoměrně. Je-li provozovatel přenosové soustavy ve spolupráci s majiteli výroben schopen příslušnému regulačnímu orgánu prokázat, že má tento způsob regulace omezený přeshraniční dopad a ve všech stavech soustavy zůstává totožná úroveň bezpečnosti provozu. [2]

Vysvětlení pojmů:

- ***Prahová hodnota frekvence***

Prahová hodnota frekvence musí být mezi 50,2 Hz a 50,5Hz včetně

- ***Hodnota statiky***

Hodnotu statiky určí provozovatel přenosové soustavy každé výrobně a musí být stanovena mezi 2 % až 12 %.

- ***Rychlost aktivace frekvenční odezvy***

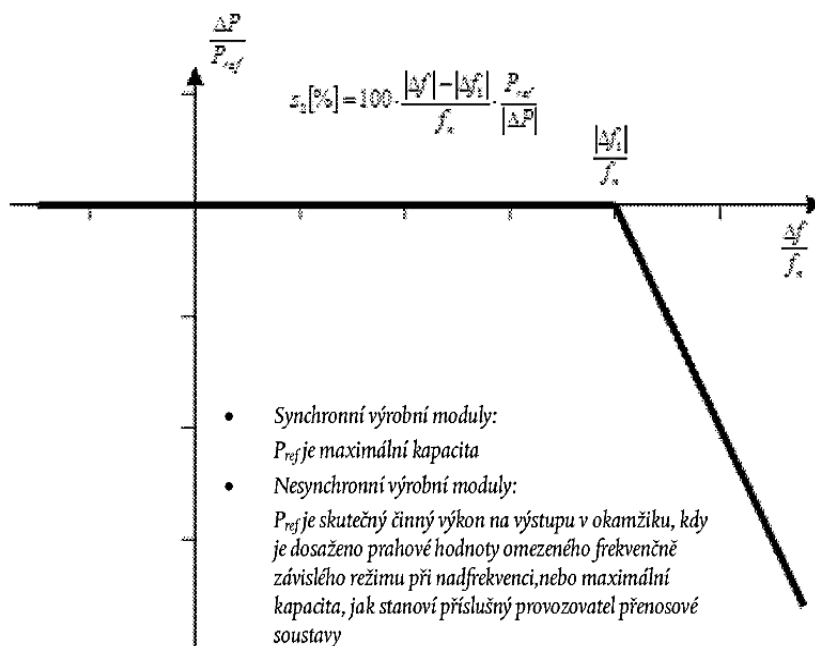
Výrobní modul musí aktivovat frekvenční odezvu s co nejkratší možnou časovou prodlevou, která by neměla přesáhnout 2 s, je-li delší musí vlastník elektřiny tuto prodlevu zdůvodnit a příslušnému provozovateli přenosové soustavy poskytnout technické údaje.

- ***Dosažení minimální regulační úrovně***

Po dosažení minimální regulační úrovně, může být příslušným provozovatelem přenosové soustavy vyžádáno, aby výrobní modul buď pokračoval v provozu na této úrovni nebo dále snižoval činný výkon na výstupu.

- ***Schopnost stabilního provozu***

Výrobní modul musí být při nadfrekvenci (v omezeném frekvenčně závislém režimu) schopen stabilního provozu. Je-li omezený frekvenčně závislý režim při nadfrekvenci aktivní, daná hodnota omezeného frekvenčně závislého režimu bude mít přednost před všemi ostatními zadanými hodnotami činného výkonu. [2]



Obrázek 2 Schéma popisující schopnost odezvy činného výkonu u výrobních modulů v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci [2]

Kde P_{ref} je referenční činný výkon, ke kterému je vztaženo ΔP , pro synchronní výrobní moduly může být stanoven různě.

ΔP je změna činného výkonu na výstupu výrobního modulu.

f_n je jmenovitá frekvence 50 Hz

Δf je odchylka frekvence v soustavě

s_2 statika

Při nadfrekvencích, kdy Δf je vyšší, než-li Δf_1 musí být výrobní modul schopen snížit činný výkon na výstupu v souladu se statistikou s_2 .

Bez ohledu na změny frekvence musí být výrobní modul schopen udržet konstantní výkon na své cílové hodnotě činného výkonu, mimo případů, kdy je výkon nutné upravit v důsledku změn stanovených v předchozích tvrzeních o nadfrekvenci a následujících tvrzeních týkajících se klesající frekvence.

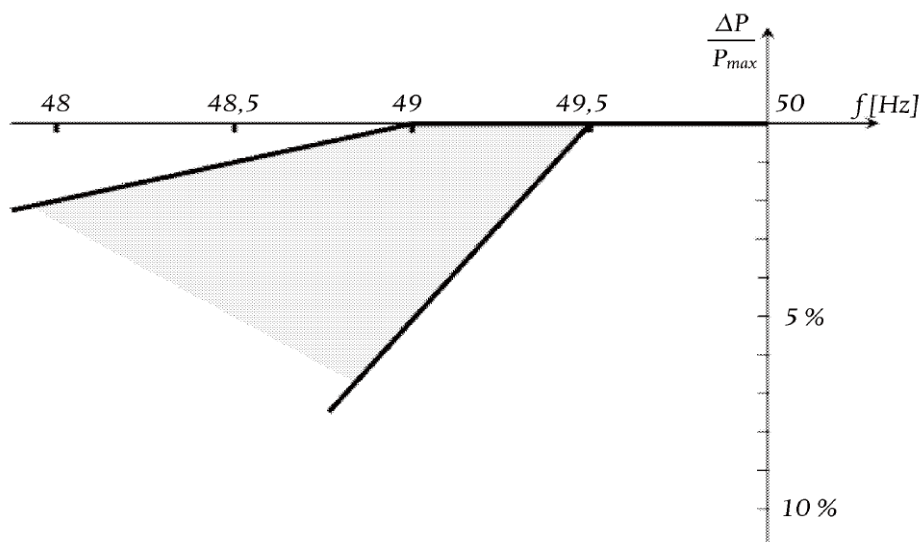
V regulační oblasti provozovatele přenosové soustavy je stanoveno přípustné snížení činného z maximálního výkonu s klesající frekvencí jakožto míru snižování nacházející se v mezích, které jsou na Obrázek 3 znázorněny plnými čarami:

- **Pod 49 Hz klesá o 2 % maximální kapacity při 50 Hz na každý pokles frekvence o 1 Hz**

- *Pod 49,5 Hz klesá o 10 % maximální kapacity při 50 Hz na každý pokles frekvence o 1 Hz*

Při stanovení přípustného snížení činného výkonu z maxima výkonu musí být:

- *jasně stanoveny použitelné podmínky okolního prostředí*
- *zohledněny technické charakteristiky výrobních modelů*



Obrázek 3 Snížení maximálního výkonu s klesající frekvencí [2]

Výrobní modul musí být vybaven logickým rozhraním (vstupním portem), aby do 5 sekund od obdržení pokynu na vstupním portu bylo možné přerušit dodávku činného výkonu na výstupu. Příslušný provozovatel soustavy má právo stanovit požadavky na vybavení umožňující dálkové ovládání tohoto zařízení. [2]

Příslušný provozovatel přenosové soustavy určuje podmínky, při kterých je výrobní modul schopen se automaticky připojit k soustavě. Tyto podmínky jsou:

- rozsahy frekvencí ve kterých je automatické připojení přípustné a odpovídající době prodlevy
- maximální přípustný gradient růstu činného výkonu na výstupu

Automatické připojení se smí uskutečnit, pokud příslušný provozovatel soustavy v koordinaci s příslušným provozovatelem přenosové soustavy nenařídí jinak.

Dodávka elektrické energie s nízkým napětím. Je dána normou ČSN EN 50160. [3]

Všeobecné informace:

- ***Spojité jevy***

Jedná se o odchylky od jmenovitých hodnot, které se vyskytují v průběhu času. Tento jev je způsoben změnami zatížení nebo nelineárními zatíženími.

- ***Napět'ové události***

Náhlé a závažné odchylky od normálního nebo požadovaného tvaru vlny. Napět'ové události jsou typicky způsobeny neočekávanými událostmi (poruchy) nebo vnějšími vlivy (počasí, cizí zavinění).

Požadavky na dodávku elektrické energie s nízkým napětím:

- ***Jmenovité napětí***

Jmenovité napětí U_n pro veřejnou síť je 230 V, pro čtyř-vodičové trojfázové soustavy se nachází 230 V mezi fází a uzlem.

- ***tolerance***

Mezi průběžné jevy patří odchylky napájecího napětí, které jsou za normálních provozních podmínek $\pm 10\%$ jmenovitého napětí U_n .

Za normálních provozních podmínek musí být během každého týdne 95 % průměrných hodnot napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut v rozsahu $U_n \pm 10\%$.

Všechny průměrné efektivní hodnoty napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut musí být v rozsahu $U_n +10\% / -15\%$.

3 Výpočty chodu sítě

V anglické literatuře se výpočet chodu sítě označuje “load flow“ nebo “power flow“. Load flow se míní přenos zátěže směrem ke zdrojům, power flow vyjadřuje tok energie v síti, což zní výstižněji. Známe aktuální výkony zdrojů (jejich výkonové možnosti). Známe jsou rovněž hodnoty zátěže nebo principy jakými se zátěž řídí. Z těchto známých informací lze určit napěťové poměry a následně i toky výkonu v jednotlivých větvích. [4]

Výpočet chodu sítě zahrnuje:

- ***Výpočet napěťových a výkonových poměrů***

Nesmí být překročeny limitní meze dané normou. Jedná se o klíčový parametr distribuční soustavy. Výkonové toky jsou podstatné pro přenosovou soustavu nesmí dojít k přetížení důležitých linek. Výpočtová analýza může být dobrým vodítkem, jak rekonfigurací výkony přenést jinudy ať běžnou manipulací nebo použitím fázi posouvajících transformátorů.

- ***Výpočet celkových činných a jalových ztrát.***

Počítám různé varianty chodu sítě a zjišťuji varianty, které jsou ekonomicky nejvýhodnější, čili ztráty jsou nejnižší.

- ***Vhodné nastavení převodů transformátorů s přepínači odboček***

Jedna z možností rekonfigurace.

- ***Vhodné nastavení generovaného činného výkonu elektrárenských bloků pro minimální výrobní náklady.***

V dnešní době velmi potlačená možnost optimalizace výrobních nákladů. Z důvodů mnoha vlastníků zdrojů a především obnovitelných zdrojů, které nelze omezit (tedy z pohledu minimalizace výrobních nákladů). Jedná se o OPF nebo-li optimalizované power flow.

- ***Plánování budoucího rozvoje elektrizační soustavy***

Řeší se v případě rozvoje obnovitelných zdrojů. Vytvoří se studie pro poměry napěťových a proudových poměrů po připojení nového zdroje a můžeme s ohledem na zkratové výkony odhadnout, jak se situace vyvine po připojení nové zátěže nebo po připojení nového zdroje.

- *Analýzu poruchových stavů*

Je podstatné spočítat nadproudy, popřípadě důsledky pro souběžná zařízení.

3.1 Metoda uzlových napětí

Výhody užití metody uzlových napětí:

- *jednoduchá příprava uzlových rovnic a vstupních dat*

Metoda uzlových napětí se využívá, protože vedení se přepočítává na π články, stejně jako transformátory. Metoda uzlových napětí je snazší v porovnání s užitím smyčkových proudů.

- *Příčné prvky nezvyšují počet neznámých a rovnic popisující procházející větvové proudy.*
- *Snadné změny u regulačních transformátorů*
- *Uzlová napětí jsou dána řešením, větvové proudy se snadno dopočtou jako rozdíl napětí vynásobený uzlovou admitancí*

3.1.1 Rozdělení uzlů

V každém uzlu počítáme napětí v ustáleném stavu nebo v určitém okamžiku, nikoli v rozsahu časového vývoje. Každé napětí se počítá jakožto fázor (má velikost a fázi). Pro výpočet daného napětí se užívá symbolicko - komplexní metody. Pro uzly je stanovena znaménková dohoda, kde kladné znaménko představuje výrobu a záporné spotřebu výkonu. Z činného a jalového výkonu lze stanovit proudovou hodnotu.

Musí platit 1. Kirchhoffův zákon čili celkový proud jež vtéká do uzlu, musí z uzlu rovněž vytékat.

$$\bar{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\sqrt{3} \cdot \bar{U}_i} \quad (3.1)$$

Druhy uzlů:

- **PQ uzel (takzvaný odběrový uzel)**

Jedná se o uzel, u kterého je znám činný i jalový výkon. Výrobní jednotky mají nasmlouvaný určitý výkon, se kterým lze kalkulovat (pokud se nejedná o závislé elektrárny na slunečním svitu nebo větru).

- **PU uzel (tzv. elektrárenský)**

V anglické literatuře označován jako PV. Dodává určitý činný výkon a udržuje konstantní napětí. Nachází se u elektráren velkého výkonu, které se starají o regulaci turbíny čímž udržují žádané P a regulací buzení udržují konstantní napětí. U fotovoltaických a větrných elektráren musí střídač nastavovat velikost a fázi proudu, tak aby udržoval činný výkon a napětí.

- **Referenční uzel**

V anglické literatuře je pojmenován jako “slack bus“, znám jak velikost napětí, tak jeho úhel, dodává chybějící energii distribuční síti a naopak má schopnost i odebírat energii v případě jejího přebytku, lze si ho představit jako místo spojení s nadřazenou přenosovou sítí. Podstatné je, že v tomto uzlu je pevně dáno napětí jak velikostí, tak fázovým posunem (je zvykem, že fázový posun je roven 0). Fáze ostatních uzlů se vztahují k fázi referenčního uzlu.

3.2 Definice impedanční a admitanční matice

Venkovní vedení tvoří síť, která je vnímána ve formě π -članků. Uzlová napětí jsou počítána jakožto sdružená pomocí Ohmova zákona, který je závislý na impedanční matici, psát přímo impedanční matici je komplikované v místech, kde nejsou uzly propojeny vznikají nekonečné hodnoty, proto je počítána nejdříve admitanční matice.

$$\sqrt{3} \cdot \bar{I} = \bar{A} \cdot \bar{U} \quad (3.2)$$

$$\bar{U} = \sqrt{3} \bar{Z} \cdot \bar{I} \quad (3.3)$$

Kde \bar{Z} je impedanční matice

\bar{A} je admitanční matice

$$\bar{Z}_{ik} = R_{ik} + jX_{ik} \quad (3.4)$$

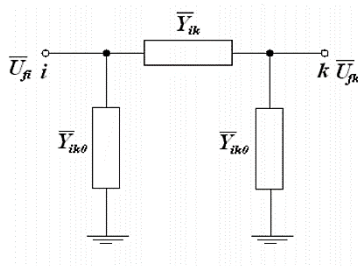
$$\bar{Z}_{ik} = R_{ik} \cdot l_{ik} + jX_{ik} \cdot l_{ik} \quad (3.5)$$

Kde \bar{Z}_{ik} je podélná impedance vedení

R_{ik} je odpor vedení, podélné větve π -článku (Ω/km)

jX_{ik} je reaktance vedení, podélné větve π -článku (Ω/km)

l_{ik} je délka vedení (km)



Obrázek 4 π -článek

$$\bar{Y}_{ik} = \frac{1}{Z_{ik}} = \frac{1}{R_{ik} + jX_{ik}} = \frac{R_{ik}}{R_{ik}^2 + jX_{ik}^2} - j \frac{X_{ik}}{R_{ik}^2 + jX_{ik}^2} = G_{ik} + jB_{ik} \quad (3.6)$$

Kde \bar{Y}_{ik} je podélná hodnota admittance (S)

G_{ik} je podélná hodnota svodu (S)

jB_{ik} je susceptance podélné větve (S)

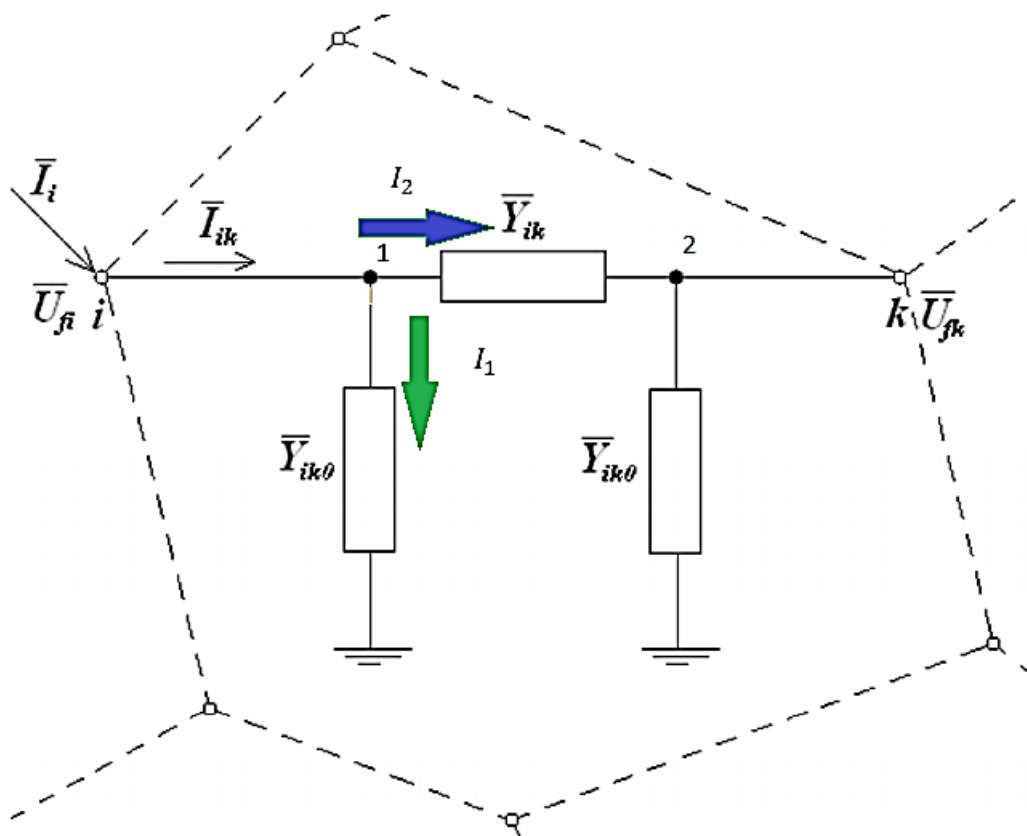
$$\bar{Y}_{ik0} = G_{ik0} + jB_{ik0} = G_{ik0} \cdot \frac{l_{ik}}{2} + jB_{ik0} \cdot \frac{l_{ik}}{2} \quad (3.7)$$

Kde \bar{Y}_{ik0} je admittance příčné větve (S)

l_{ik} (km) je délka vedení

G_{ik0} je svod, konduktance příčné větve (S/km)

jB_{ik0} je susceptance příčné větve (S/km)



Obrázek 5 Detail sítě

Z prvního Kirchhoffova zákona je dán vzorec pro uzel 1.

$$\bar{I}_{ik} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 \quad (3.8)$$

$$\bar{I}_{ik} = \bar{U}_{fi} \cdot \bar{Y}_{ik0} + (\bar{U}_{fi} - \bar{U}_{fk}) \cdot \bar{Y}_{ik} = \bar{U}_{fi} \cdot (\bar{Y}_{ik0} + \bar{Y}_{ik}) - \bar{U}_{fk} \cdot \bar{Y}_{ik} \quad (3.9)$$

Uzel 1 je spojen s dalšími větvemi o n počtu. Proud vstupující do uzlu 1 je \bar{I}_i , který se dělí na proudy \bar{I}_{ik} , které z uzlu 1 vystupují.

$$\bar{I}_i = \sum_{k=1}^n \bar{I}_{ik} = \bar{U}_{fi} \cdot \sum_{k=1}^n (\bar{Y}_{ik0} + \bar{Y}_{ik}) - \sum_{k=1}^n (\bar{U}_{fk} \cdot \bar{Y}_{ik}) \quad (3.10)$$

$$\bar{I}_i = \bar{A}_{i1} \cdot \bar{U}_{f1} + \bar{A}_{i2} \cdot \bar{U}_{f2} + \dots + \bar{A}_{ii} \cdot \bar{U}_{fi} + \bar{A}_{ik} \cdot \bar{U}_{fk} + \dots + \bar{A}_{in} \cdot \bar{U}_{fn} \quad (3.11)$$

$$\bar{A}_{ii} = \sum_{k=1}^n (\bar{Y}_{ik0} + \bar{Y}_{ik}) \quad (3.12)$$

$$\bar{A}_{ik} = -\bar{Y}_{ik} \quad (3.13)$$

Kde \bar{A}_{ii} je diagonála admitanční matice sčítám proti zemi i mezi uzly admitance.

\bar{A}_{ik} je pouze admitance mezi uzly

Složení matice pomocí známých vzorců. Ze vzorečku (3.1) odvodíme tvar matice.

$$\sqrt{3} \cdot \bar{I} = \bar{A} \times \bar{U} \quad (3.14)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{P - jQ_1}{\bar{U}_1^*} \\ \vdots \\ \frac{P - jQ_i}{\bar{U}_i^*} \\ \vdots \\ \frac{P - jQ_n}{\bar{U}_n^*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \cdots & \bar{A}_{1i} & \cdots & \bar{A}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{A}_{i1} & \cdots & \bar{A}_{ii} & \cdots & \bar{A}_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{A}_{n1} & \cdots & \bar{A}_{ni} & \cdots & \bar{A}_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \vdots \\ \bar{U}_i \\ \vdots \\ \bar{U}_n \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Kde U^* je komplexně sdružený napětí.

P je výkon v daném uzlu

Q je výkon v daném uzlu

$$\frac{P - jQ_n}{\bar{U}_n^*} = \sqrt{3} \cdot \bar{I} \quad (3.16)$$

V matici na levé straně rovnice jsou komplexně sdružená napětí (komplexně sdružené znamená s opačným znamínkem v imaginární složce), na pravé straně jsou sdružená napětí. Vynásobením matice napětími, které jsou ve jmenovateli na levé straně dojde k umocnění napětí na pravé straně, z toho vyplývá, že se jedná o soustavu nelineárních rovnic.

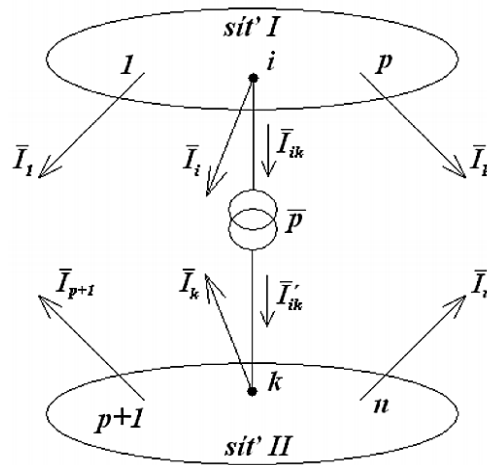
$$P_i - jQ_i = \bar{A}_{i1} \cdot \bar{U}_1 \times \bar{U}_i^* + \cdots + \bar{A}_{ii} \cdot \bar{U}_i^2 + \cdots + \bar{A}_{in} \cdot \bar{U}_n \cdot \bar{U}_i^* \quad (3.17)$$

Výpočtem stanovíme velikosti a úhly napětí sítě. Analytický postup lze realizovat jen pro velmi malé sítě.

Do impedanční matice sítě musí být rovněž zařazeny transformátory, které lze přepočítat na určitou hladinu napětí a poté je lze vnímat rovněž jako π -článek. Je zde i možnost počítat s převodem, který může zahrnovat nejenom změnu velikosti napětí, ale i fázový posun napětí primárního vinutí vůči sekundárnímu, nebo-li hodinové číslo, které může být proměnné u některých transformátorů.

Na Obrázek 6 jsou znázorněny dvě napěťové hladiny propojené transformátorem.

Transformátor je spojen se sítí I přes uzel i a se sítí II přes uzel k . Proud \vec{I}_{ik} vytéká z uzlu i proto jej píšeme se záporným znaménkem, naopak do uzlu k vtéká proud \vec{I}_{ik}



Obrázek 6 Detail s jedním dvouvinutovým transformátorem [4]

Matice pro uzel i

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \vdots \\ \bar{I} - \bar{I}_{1k} \\ \vdots \\ \bar{I}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \cdots & \bar{A}_{1i} & \cdots & \bar{A}_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{A}_{i1} & \cdots & \bar{A}_{ii} & \cdots & \bar{A}_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{A}_{n1} & \cdots & \bar{A}_{ni} & \cdots & \bar{A}_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_{f1} \\ \vdots \\ \bar{U}_{fi} \\ \vdots \\ \bar{U}_{fn} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

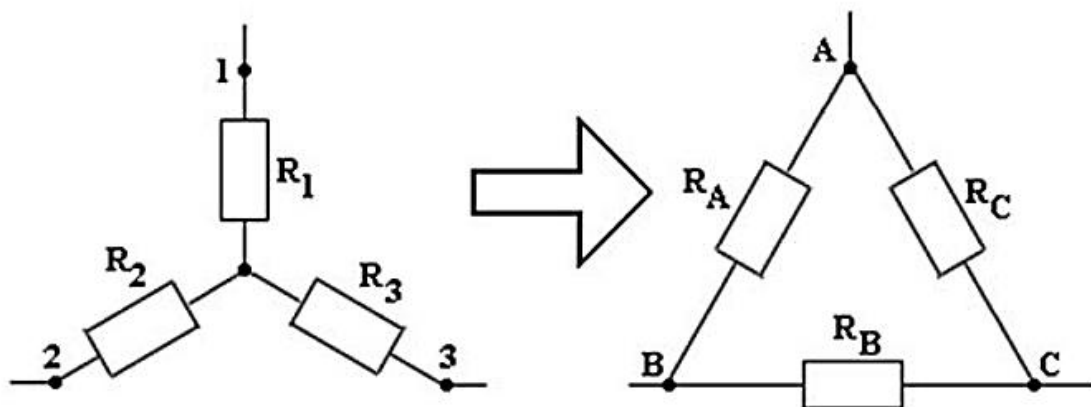
Matice pro uzel k

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{p+1} \\ \vdots \\ \bar{I}_k + \bar{I}_{ik} \\ \vdots \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{p+1,p+1} & \cdots & \bar{A}_{p+1,k} & \cdots & \bar{A}_{p+1,n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{A}_{k,p+1} & \cdots & \bar{A}_{kk} & \cdots & \bar{A}_{kn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{A}_{n,p+1} & \cdots & \bar{A}_{nk} & \cdots & \bar{A}_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_{fp+1} \\ \vdots \\ \bar{U}_{fk} \\ \vdots \\ \bar{U}_{fn} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Ve výše uvedeném textu je již zmíněno, že transformátor je vnímán jakožto π -článek.

Náhradní schéma transformátoru představuje T-článek a je třeba jej přepočítat, což znamená provést přepočet hvězdy na trojúhelník.

Přepočet hvězdy na trojúhelník (přepočet T-článu na π -článek).



Obrázek 7 Přepočít hvězdy na trojúhelník [5]

Stanovením odporu mezi uzly A a B pro trojúhelník a odporu mezi uzly 1 a 2 pro hvězdu lze určit vzoreček pro transfiguraci obvodu. Za předpokladu, že odpor mezi uzly 1, 2 a A, B je shodný.

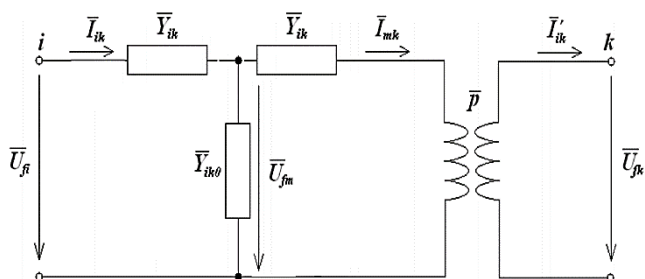
$$R_1 + R_2 = \frac{R_A \cdot (R_C + R_B)}{R_A + R_B + R_C} \quad (3.20)$$

$$R_2 + R_3 = \frac{R_B \cdot (R_A + R_C)}{R_A + R_C + R_B} \quad (3.21)$$

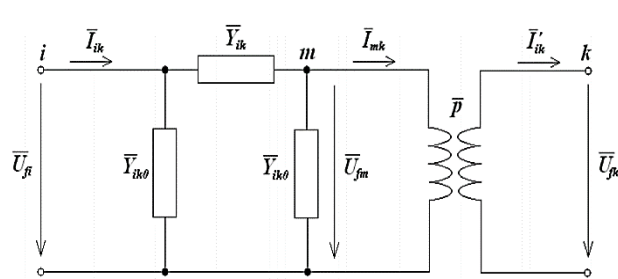
$$R_1 + R_3 = \frac{R_C \cdot (R_A + R_B)}{R_A + R_B + R_C} \quad (3.22)$$

Stanovení odporu R_A :

$$R_A = R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3} \quad (3.23)$$



Obrázek 9 Náhradní schéma transformátoru (T-článek) [4]



Obrázek 8 Náhradní schéma transformátoru (π -článek) [4]

Přepočítání admittance z T-článku na π -článek je dán vzorcem (3.23). Transfigurací se ze schématu na Obrázek 9 vypočítají příčné a podélné prvky nacházející se na Obrázek 8. Matice získána z e schématu na Obrázek 7

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{ik} \\ \bar{I}_{ik} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{ik} + \bar{Y}_{ik0} & -\bar{p} \bar{Y}_{ik} \\ \bar{p}^* \bar{Y}_{ik} & -|\bar{p}|^2 (\bar{Y}_{ik} + \bar{Y}_{ik0}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{U}_{fi} \\ \bar{U}_{fk} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

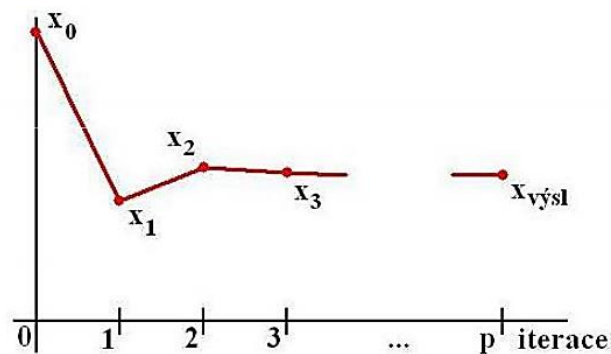
Matice je uspořádána dle výše popsaných principů kdy podélný prvek je umístěn mimo diagonálu a kombinace příčných a podélných prvků se nachází na diagonále. Převod je vyjádřen pomocí \bar{p} , který představuje komplexní převod. Komplexně sdružený převod je značen \bar{p}^* . Násobením komplexního a komplexně sdružené převodu získám převod ve tvaru $-|\bar{p}|^2$.

Zařazením transformátoru se propojí matice uzlů i a k z obrázku. 4, tímto propojením se přelévá energie dvou sítí o odlišných napěťových hladinách.

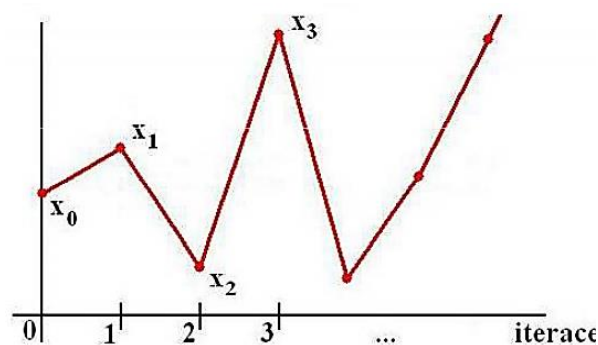
$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \vdots \\ \bar{I}_i \\ \vdots \\ \bar{I}_p \\ \bar{I}_{p+1} \\ \vdots \\ \bar{I}_k \\ \vdots \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \dots & \bar{A}_{1i} & \dots & \bar{A}_{1p} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{A}_{i1} & \dots & \bar{A}_{ii} + \bar{Y}_{ik} + \bar{Y}_{ik0} & \dots & \bar{A}_{ip} & 0 & \dots & -\bar{p} \bar{Y}_{ik} & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{A}_{p1} & \dots & \bar{A}_{pi} & \dots & \bar{A}_{pp} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \bar{A}_{p+1,p+1} & \dots & \bar{A}_{p+1,k} & \dots & \bar{A}_{p+1,n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & -\bar{p}^* \bar{Y}_{ik} & \dots & 0 & \bar{A}_{k1} & \dots & \bar{A}_{kk} + |\bar{p}|^2 (\bar{Y}_{ik} + \bar{Y}_{ik0}) & \dots & \bar{A}_{kn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \bar{A}_{u,p+1} & \dots & \bar{A}_{uk} & \dots & \bar{A}_{un} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{U}_{f1} \\ \vdots \\ \bar{U}_{fi} \\ \vdots \\ \bar{U}_{fp} \\ \bar{U}_{fp} + 1 \\ \vdots \\ \bar{U}_{fk} \\ \vdots \\ \bar{U}_{fn} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

3.3 Numerické metody

Pro užití admitanční matice musí být nejprve stanovené napětí. Ke stanovení napětí se užívá numerických metod. Úkolem numerické metody je konvergovat k určité hodnotě. Prvním krokem numerické metody je odhadnutí očekávané hodnoty x_0 . Následně se odhadovaná hodnota vloží do rovnice příslušné metody a sleduje se výsledek (kořen rovnice) po každé iteraci (iterace, výsledek po vypočtení rovnice se užije jako nová počáteční hodnota). Výsledky rovnic se po každém výpočtu k sobě hodnotami přibližují (konvergují k určité hodnotě). Při únosné odchylce se může prohlásit výsledek za dostatečný. Může nastat situace, kdy se výsledky s každým provedeným výpočtem od sebe vzdalují (divergují).



Obrázek 11 Konvergence numerického výpočtu [4]



Obrázek 10 Divergence numerického výpočtu [4]

Základními numerickými metodami jsou:

3.3.1 Gauss - Seidlova metoda (G-Sp)

Vyniká vysokou spolehlivostí, což znamená, že téměř vždy konverguje. Využívá se pro řešení malých sítí do 50 uzlů. Při modelování velkých sítí je pomalá. Její rychlost souvisí s velkým počtem iterací.

Matematické vysvětlení je součástí přílohy 9.1.

Užití Gauss - Seidelovy metody pro výpočet napětí ze vzorce (3.15) je vyjádřena rovnice (3.33).

$$\frac{P_1 - jQ_1}{\bar{U}_1^*} = \bar{A}_{i1} \cdot \bar{U}_1 + \dots + \bar{A}_{ii} \cdot \bar{U}_i + \dots + \bar{A}_{in} \cdot \bar{U}_n \quad (3.26)$$

Úprava rovnice musí vést k vyjádření neznámého napětí \bar{U}_i

$$\frac{P_1 - jQ_1}{\bar{U}_1^*} - \bar{A}_{i1} \cdot \bar{U}_1 - \dots - \bar{A}_{in} \cdot \bar{U}_n = \bar{A}_{ii} \cdot \bar{U}_i \quad (3.27)$$

$$\frac{1}{\bar{A}_{ii}} \cdot \left(\frac{P_1 - jQ_1}{\bar{U}_1^*} - \bar{A}_{i1} \cdot \bar{U}_1 - \dots - \bar{A}_{in} \cdot \bar{U}_n \right) = \bar{U}_i \quad (3.28)$$

U P, Q uzlů známe výkony známe již i admitance neznámé pro nás jsou napětí, které jsou na pravé i levé straně rovnice, ale díky odhadované hodnotě napětí na počátku výpočtu lze přiřadit námi odhadovanou hodnotu \bar{U}_i . Z počátku je použita odhadovaná hodnota následně se použije hodnota poslední iterace.

Gauss- Seidelův iterační algoritmus lze vyjádřit rovnicí (3.36)

$$U_i^{(p+1)} = \frac{1}{\bar{A}_{ii}} \cdot \left(\frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_i^{(p)*}} - \sum_{k=1}^{i-1} \bar{A}_{ik} \cdot \bar{U}_k^{(p+1)} - \sum_{k=i+1}^n \bar{A}_{ik} \cdot \bar{U}_k^{(p)} \right) \quad (3.29)$$

Kde nová hodnota napětí $\bar{U}_k^{(p+1)}$ hodnota napětí právě probíhající iterace, která je určena u $i-1$ počtu uzlů

$$\sum_{k=1}^{i-1} \bar{A}_{ik} \cdot \bar{U}_k^{(p+1)}$$

Kde stará hodnota napětí $\bar{U}_k^{(p)}$, představuje hodnotu napětí předchozí iterace, která je určena od $i+1$ počtu uzlů až do konečného počtu počítaných uzlů n .

$$\sum_{k=i+1}^n \bar{A}_{ik} \cdot \bar{U}_k^{(p)}$$

Postupně jsou spočteny všechny uzly celé matice a následně se započne opět s výpočtem od prvního do posledního uzlu, dokud nejsou výsledné hodnoty po sobě jdoucích výpočtů téměř totožné.

Shrnutí:

Každý typ uzlu obnáší jiný postup výpočtu u PQ uzlů jsou známy výkony a je nutno určit velikost napětí a fázi. Jejich výpočet je nejsložitější. Je nutno užit odvozený vzorec (3.29). V případě PU uzlů je známa velikost napětí a neznámá fáze určí se pomocí vzorců (3.30) a (3.32). Lze použít i vzoreček (3.29).

Vzoreček pro určení napětí PQ uzlu.

$$U_i^{(p+1)} = \frac{1}{\bar{A}_{ii}} \cdot \left(\frac{P_i - jQ_i}{\bar{U}_1^{(p)*}} - \sum_{k=1}^{i-1} \bar{A}_{ik} \cdot \bar{U}_k^{(p+1)} - \sum_{k=i+1}^n \bar{A}_{ik} \cdot \bar{U}_k^{(p)} \right) \quad (3.30)$$

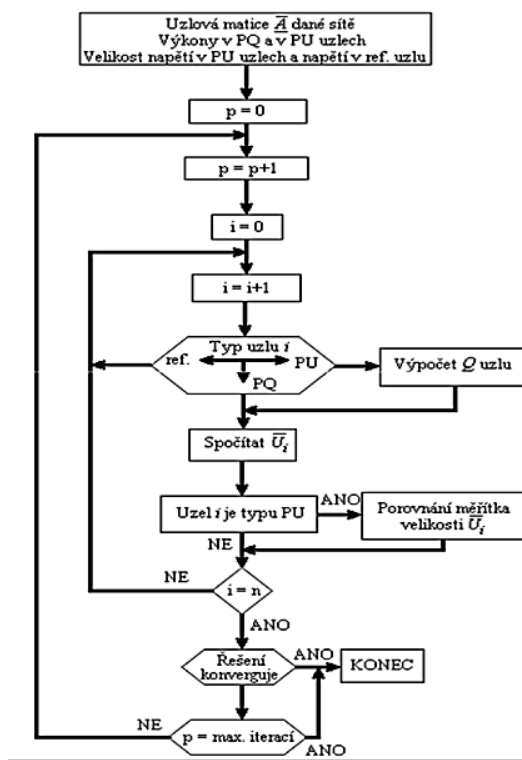
Vzoreček pro určení fáze pro napětí PU (PV) uzlu.

$$Q_i^{(p+1)} = \text{Im} \left\{ U_i^{(p)} \cdot \left[\sum_{k=1}^{i-1} A_{ik}^* \cdot \bar{U}_k^{(p+1)*} - \sum_{k=i+1}^n A_{ik}^* \cdot \bar{U}_k^{(p)*} \right] \right\} \quad (3.31)$$

$$\bar{U}_i^{(p+1)} = \frac{\bar{U}_i^{(p+1)}}{|\bar{U}_i^{(p+1)}|} \cdot \bar{U}_{set} \quad (3.32)$$

Zlomek ve vzorci (3.32) představuje 1 (úhel) a \bar{U}_{set} je známá velikost napětí, $\bar{U}_i^{(p+1)}$ je spočtená velikost napětí.

Referenční uzel nevyžaduje žádné výpočty známé je napětí jak velikostí, tak úhlem. Jedná se o vztahný bod proti kterému se soustava počítá.



Obrázek 12 Vývojový diagram Gauss - Seidelovy metody [4]

Vývojový diagram popisuje shrnutí Gauss - Seidelovy metody, kde na počátku se určí admitanční matice, následně se provede odhad počátečních hodnot. V dalším kroku se dle typu uzlu určí výpočet. Pro referenční uzel dojde k přesunutí do bloku $[i = n]$ dalším blokem je [řešení konverguje] a následuje blok [konec]. Z uzlu PU se spočte jalový výkon a následně se určí napětí \bar{U}_i . Napětí se porovná s předchozí iterací a přejde se do bloku $[i = n]$, kde se zjistí, zdali byly započítány všechny uzly matice s novými (přepočítanými hodnotami), pokud ne dochází ke stanovení výpočtu následujícího uzlu, pokud ano řešení se dostane do bloku konvergence, kde se porovná s předchozím řešením a dle kritérií o konvergenci se rozhodne, zdali řešení konverguje. Když ano následuje blok [konec] a řešení je stanoveno, pokud ne porovná se iterace s maximálním počtem iterací a pokračuje ve výpočtu s novými vstupními hodnotami z právě provedeného řešení, k tomu dojde za předpokladu, že maximální počet řešení není překročen (není maximální počet iterací překročen). Pokud úloha je neřešitelná, pak musíme zadat nový odhad počátečních hodnot. K tomu dojde, pokud úloha diverguje nebo pokud řešení nekonverguje dostatečně rychle nebo pokud řešení neustále kmitá kolem výsledné hodnoty.

Podmínky konvergence:

- Mezikrokový rozdíl velikosti napětí v porovnání s velikostí napětí

$$\frac{|U_i^{(p+1)} - U_i^{(p)}|}{U_i^{(p)}} \leq \varepsilon \quad (3.33)$$

Kde ε je potřebná přesnost, je-li mezikrokový rozdíl menší nebo roven minimální požadované přesnosti, je splněna podmínka konvergence pro velikost napětí.

- Rozdíl fází (úhlů) představuje rozdíl úhlů po sobě jdoucích iterací

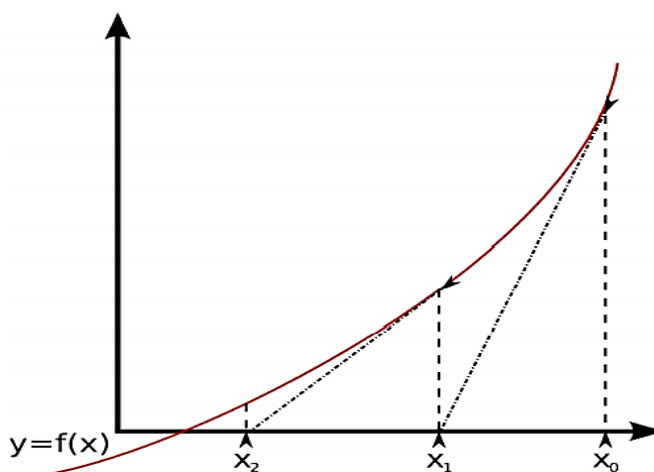
$$|\theta_i^{(p+1)} - \theta_i^{(p)}| \leq \varepsilon \quad (3.34)$$

Kde ε je potřebná přesnost, která je rovna maximálnímu rozdílu úhlů po sobě jdoucích iteracích nebo je větší než rozdíl úhlů po sobě jdoucích iteracích.

Jsou-li splněny obě podmínky konvergence. Lze prohlásit, že jsme našli řešení pro daný uzel.

3.3.2 Newton - Raphsonova metoda (N-R)

Je rovněž nazývána metodou tečen. Využívá nelineárních rovnic o jedné neznámé. Funkce se musí převést na jednu stranu. Snaha o nalezení bodu, ve kterém funkce protíná 0. Výchozí hodnotou je x_0 , v tomto bodě je funkce nahrazena tečnou (přímkou), která protíná osu x. V bodě protnutí osy x je stanoven nový odhad (x_1), který slouží místo původního bodu x_0 ke stanovení nové tečny a určení nového průsečíku s osou x.



Obrázek 13 Popis Newton - Raphsonovy metody [4]

$$f(x) = 0 \quad (3.35)$$

$$f(x^{(0)} + \Delta x) \approx f(x^{(0)}) + \Delta x \frac{df}{dx} = 0 \quad (3.36)$$

Kde $\frac{df}{dx}$ je sklonem tečny (přímky)

Δx je posuvem v ose x

$x^{(0)}$ je hodnota funkce v bodě x_0

Ze vzorce (3.42) je možné explicitně vyjádřit Δx

$$\Delta x^{p+1} = \frac{0 - f(x^{(p)})}{\left(\frac{df(x^{(p)})}{dx}\right)} \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 0 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ 0 - f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \\ \vdots \\ 0 - f_n(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \end{bmatrix} = \\ & = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_1^0} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Big|_{x_2=x_2^0} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Big|_{x_n=x_n^0} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_1^0} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Big|_{x_2=x_2^0} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \Big|_{x_n=x_n^0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_1^0} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \Big|_{x_2=x_2^0} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Big|_{x_n=x_n^0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.38)$$

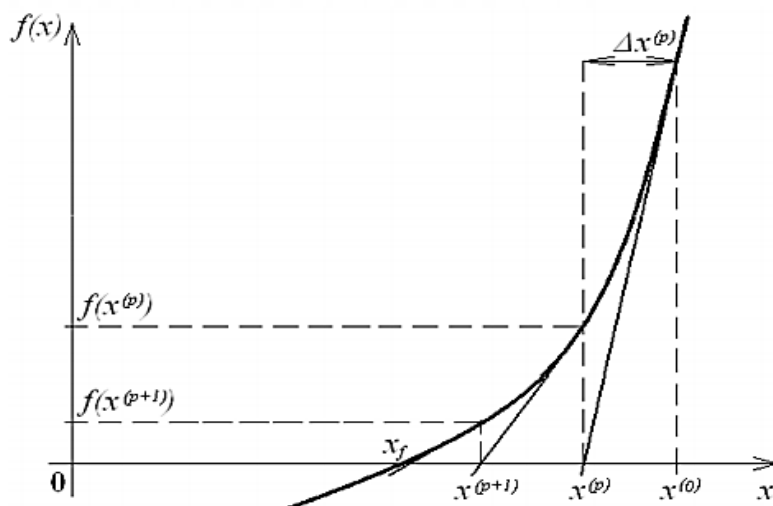
Kde Δx_n je neznámá změna hledaných veličin do nového kroku

$\frac{df}{dx}$ ze vzorce (3.36) byla nahrazena maticí křížových derivací (jedná se o citlivost na hledané parametry)

$f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$ je funkce v bodech mimo bod x_0

Vzorec (3.38) je poté vynásoben invertovanou Jacobiho maticí, čímž se osamostatní matice neznámých Δx_n , vzorec je upraven do tvaru (3.39).

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1^{(p+1)} \\ \Delta x_2^{(p+1)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(p+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_1^{(p)}} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Big|_{x_2=x_2^{(p)}} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Big|_{x_n=x_n^{(p)}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_1^{(p)}} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Big|_{x_2=x_2^{(p)}} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \Big|_{x_n=x_n^{(p)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_1^{(p)}} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \Big|_{x_2=x_2^{(p)}} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Big|_{x_n=x_n^{(p)}} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 - f_1(x_1^{(p)}, x_2^{(p)}, \dots, x_n^{(p)}) \\ 0 - f_2(x_1^{(p)}, x_2^{(p)}, \dots, x_n^{(p)}) \\ \vdots \\ 0 - f_n(x_1^{(p)}, x_2^{(p)}, \dots, x_n^{(p)}) \end{bmatrix} \quad (3.39)$$



Obrázek 14 Newton - Raphsonova metoda (vysvětlení principu dle vzorce (3.39))

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1^{(p+1)} \\ \Delta x_2^{(p+1)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(p+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_1^{(p)}} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \Big|_{x_2=x_2^{(p)}} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Big|_{x_n=x_n^{(p)}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_1^{(p)}} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \Big|_{x_2=x_2^{(p)}} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \Big|_{x_n=x_n^{(p)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Big|_{x_1=x_1^{(p)}} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} \Big|_{x_2=x_2^{(p)}} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \Big|_{x_n=x_n^{(p)}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} b_1 - f_1(x_1^{(p)}, x_2^{(p)}, \dots, x_n^{(p)}) \\ b_2 - f_2(x_1^{(p)}, x_2^{(p)}, \dots, x_n^{(p)}) \\ \vdots \\ b_n - f_n(x_1^{(p)}, x_2^{(p)}, \dots, x_n^{(p)}) \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Kde b_1 je počáteční nebo předchozí hodnota v ose x

$$\begin{bmatrix} x_1^{(p+1)} \\ x_2^{(p+1)} \\ \vdots \\ x_n^{(p+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^{(p)} \\ x_2^{(p)} \\ \vdots \\ x_n^{(p)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(p+1)} \\ \Delta x_2^{(p+1)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(p+1)} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Kde $x_1^{(p)}$ je počáteční hodnota nebo hodnota z předchozí iterace

$\Delta x_1^{(p+1)}$ je posuv po ose x (rozdíl spočtený dle vzorce ((3.40))).

$x_1^{(p+1)}$ je nová hodnota v ose x, která se neustále přibližuje průsečíku.

Podmínky konvergence:

$$\begin{bmatrix} b_1 - f_1(x_1^{(p)}, x_2^{(p)}, \dots, x_n^{(p)}) \\ b_2 - f_2(x_1^{(p)}, x_2^{(p)}, \dots, x_n^{(p)}) \\ \vdots \\ b_n - f_n(x_1^{(p)}, x_2^{(p)}, \dots, x_n^{(p)}) \end{bmatrix} \leq \varepsilon \quad (3.42)$$

Pokud pro všechny veličiny platí, že rozdíl iterací je téměř zanedbatelný, tak se funkce blíží průsečíku s osou x a podmínka konvergence je splněna. Rozdíl je menší nebo roven požadované přesnosti ε .

Matematické vysvětlení je součástí přílohy 9.2.

Základní iterační algoritmus Newton - Raphsonovy metody.

Výpočet se provádí pouze s reálnými čísly. Reálná a imaginární část výpočtu se počítá zvlášť. Iterační algoritmus obsahuje dvě rovnice pro každý uzel PQ a jednu rovnici pro uzel PU.

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(p-1)} \\ \Delta Q^{(p-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{(p-1)} & N^{(p-1)} \\ J^{(p-1)} & L^{(p-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta^{(p)} \\ \frac{\Delta U^{(p)}}{U^{(p-1)}} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Kde $\Delta \theta^{(p)}$ je rozdíl fází

$\frac{\Delta U^{(p)}}{U^{(p-1)}}$ je rozdíl napětí v poměrných hodnotách a lze jej značit jako $|\Delta u^{(p)}|$

$H_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k}$ je část Jacobiho citlivostní matice v níž se počítají činné výkony

v závislosti na úhlu.

$N_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial U_k}$ je část Jacobiho citlivostní matice v níž se počítají činné výkony

v závislosti na velikosti.

$J_{ik} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k}$ je část Jacobiho citlivostní matice v níž se počítají jalové výkony v závislosti

na úhlu.

$L_{ik} = \frac{\partial Q_i}{\partial U_k}$ je část Jacobiho citlivostní matice v níž se počítají jalové výkony

v závislosti na velikosti.

ΔP_i představuje samostatnou část činného výkonu a nahrazuje spolu s ΔQ_i levou část vzorce (3.26), kde $\frac{P-jQ_1}{\bar{U}^*}$ tvoří komplexně sdružené číslo, kdežto ΔP_i a ΔQ_i jsou čísla reálnými.

$$\Delta P_i = P_i - U_i \sum_{k=1}^n U_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (3.44)$$

$$\Delta Q_i = Q_i - U_i \sum_{k=1}^n U_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (3.45)$$

Rovnice (3.44), (3.45) lze napsat ve tvaru:

$$\Delta P_i = P_i - U_i \sum_{k=1}^n A_{ik} U_k \cos(\theta_{ik} - \varphi_{ik}) \quad (3.46)$$

$$\Delta Q_i = Q_i - U_i \sum_{k=1}^n A_{ik} U_k \sin(\theta_{ik} - \varphi_{ik}) \quad (3.47)$$

Kde $\theta_{ik} = \theta_i - \theta_k$

Výpočet prvků Jacobiho matice.

$$H_{ii} = -Q_i - B_{ii} U_i^2 \quad (3.48)$$

Kde $B_{ii} U_i = jI \rightarrow B_{ii} U_i^2 = U_i jI \rightarrow H_{ii} = -Q_i - Q$

Ze vzorce (3.44) lze vyjádřit P_i a následně jej dosadit do vztahu $H_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k}$

$$P_i = \Delta P_i + U_i U_k (G_{ik} \cos(\theta_{ik}) + B_{ik} \sin(\theta_{ik})) \quad (3.49)$$

$$H_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} = U_i U_k (G_{ik} \sin(\theta_{ik}) - B_{ik} \cos(\theta_{ik})) \quad (3.50)$$

$$J_{ii} = P_i - G_{ii} U_i^2 \quad (3.51)$$

Ze vzorce (3.45) lze vyjádřit Q_i a následně jej dosadit do vztahu $J_{ik} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k}$

$$Q_i = \Delta Q_i + U_i U_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (3.52)$$

$$J_{ik} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} = -U_i U_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (3.53)$$

$$N_{ii} = P_i + G_{ii} U_i^2 \quad (3.54)$$

Vzorec (3.49), kde je vyjádřen výkon P_i lze dosadit do vztahu $N_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial U_k}$

$$N_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial U_k} = U_i U_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (3.55)$$

$$L_{ii} = Q_i - B_{ii} U_i^2 \quad (3.56)$$

Vzorec(3.52), kde je vyjádřen výkon Q_i lze dosadit do vztahu $L_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial U_k}$

$$L_{ik} = \frac{\partial Q_i}{\partial U_k} = U_i U_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (3.57)$$

Podmínky konvergence (pokud rozdíly mezi hodnot P a Q mezi iteracemi jsou velmi malé, pak funkce konvergují)

$$\max \left| \frac{\Delta P}{\Delta Q} \right| \leq \varepsilon \quad (3.58)$$

Výpočet Iteračního algoritmu pro uzly PU:

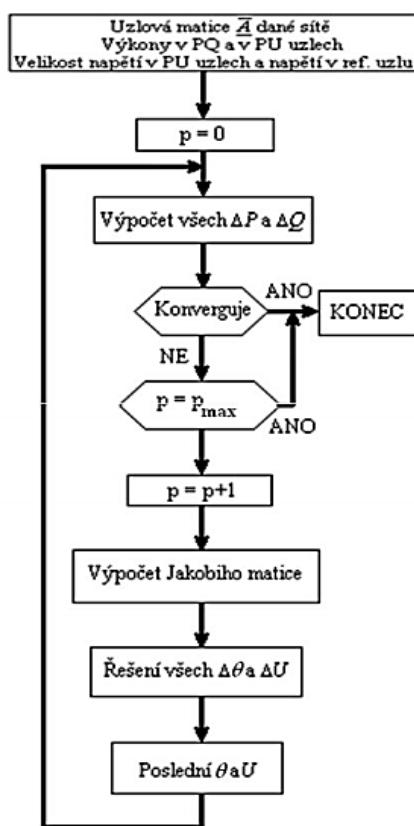
$$Q_i^{(p-1)} = U_i \sum_{k=1}^n U_k (G_{ik} \sin \theta_{ik}^{(p-1)} - B_{ik} \cos \theta_{ik}^{(p-1)}) \quad (3.59)$$

$$\theta_i^{(p)} = \theta_i^{(p-1)} + \Delta \theta_i^{(p)} \quad (3.60)$$

$$U_i^{(p)} = U_i^{(p-1)} + \frac{\Delta U_i^p}{U_i^{(p-1)}} U_i^{(p-1)} \quad (3.61)$$

Kde $\frac{\Delta U_i^p}{U_i^{(p-1)}}$ je úhel

Pro výpočet PU počítáme pouze s jalovým výkonem. Známa je velikost napětí a neznámá fáze.



Obrázek 15 Vývojový diagram Newton – Raphsonovy metody

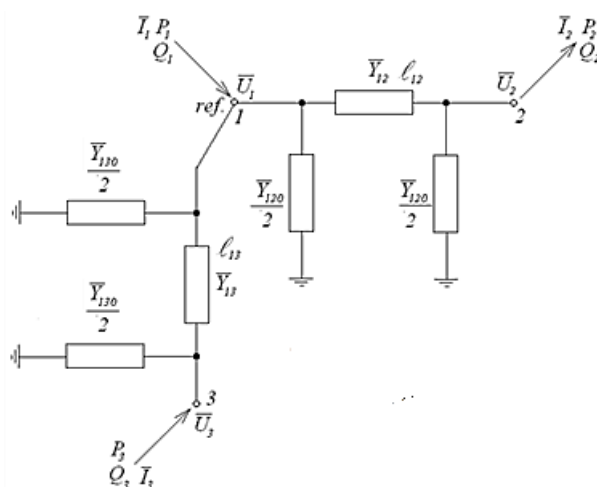
Nejprve se stanoví výpočet ΔP_i , ΔQ_i dle vztahů (3.44), (3.45) nebo (3.46),(3.47) s využitím očekávaných hodnot U , θ (vstupní hodnoty jsou odhadnuty). Porovná se kritérium konvergence a následně se přejde k výpočtu Jacobiho matice. V tomto bodě se nacházíme ve tvaru výpočtu dle vzorce (3.43), následuje invertování Jacobiho matice, čímž ji převedeme na levou stranu výpočtu, do všech proměnných se dosadí známé ΔP , ΔQ a vypočte se $\Delta \theta$ a ΔU a ty se přičtou k původním odhadovaným hodnotám U , θ . Opět se vypočte ΔP_i , ΔQ_i a zkontroluje se kritérium konvergence.

Výpočet Jacobiho matice a následné invertování není třeba provádět po každé iteraci, protože náklon tečny se v blízkosti správného řešení (průsečíku funkce s osou x) příliš nemění.

Splněním konvergenčního kritéria je (3.58) je stanovena jak velikost, tak fáze napětí pro uzel PQ.

4 Porovnání Gauss – Seidelovi výpočetní metody výpočet v programu GridCal a PSAT

Uzel \bar{U}_1 je uzlem referenčním a jeho fázový posuv vnímáme jako 0. Úkolem této úlohy je dopočítat napětí \bar{U}_2 a \bar{U}_3 , které lze stanovit na základě údajů o vedení (π -članků). Z údajů o vedení lze odvodit impedanci vedení ze které se stanoví admitanční matice. Pomocí admitanční matice a numerické metody lze dopočítat požadovaná napětí. Je třeba si uvědomit, že se jedná o PQ uzly.



Obrázek 16 Chod 3 - uzlové soustavy

Zadané hodnoty:

$$\bar{U}_1 = 110000 e^{j0^\circ} V$$

$$P_2 = 50 \text{ MW}, Q_2 = 10 \text{ MVar}$$

$$P_3 = 100 \text{ MW}, Q_3 = 10 \text{ MVar}$$

$$X = 0,4 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$B = 3 \text{ } \mu\text{S}/\text{km}$$

$$l_{12} = 100 \text{ km}, l_{13} = 50 \text{ km}$$

$$U_2, \theta_2, U_3, \theta_3 = ?$$

Stanovení impedanční matice:

$$\bar{Z}_{12} = jx \cdot l_{12} = j0,4 \cdot 50 = j20 \text{ } \Omega \quad (4.1)$$

$$\bar{Y}_{120} = -j0,000003 \cdot 50 = j0,00015 \text{ S} \quad (4.2)$$

$$\bar{Z}_{13} = jx \cdot l_{13} = 0,4 \cdot 100 = j40 \text{ } \Omega \quad (4.3)$$

$$\bar{Y}_{130} = 0,000003 \cdot 100 = -0,0003 \text{ S} \quad (4.4)$$

$$\bar{Y}_{12} = \frac{1}{\bar{Z}_{12}} = \frac{1}{20} = -j0,05 \text{ S} \quad (4.5)$$

$$\bar{Y}_{13} = \frac{1}{\bar{Z}_{12}} = \frac{1}{40} = -j0,025 \text{ S} \quad (4.6)$$

$$\frac{\bar{Y}_{120}}{2} = \frac{-j0,00015}{2} = j0,000075 \text{ S} \quad (4.7)$$

$$\frac{\bar{Y}_{130}}{2} = j0,00015 \text{ S} \quad (4.8)$$

Dle vztahu (3.12) a (3.13) lze seskládat admitanční matici

$$\bar{A}_{11} = \sum_{k=1}^n (\bar{Y}_{ik0} + \bar{Y}_{ik}) = \frac{\bar{Y}_{120}}{2} + \bar{Y}_{12} + \frac{\bar{Y}_{130}}{2} + \bar{Y}_{13} \quad (4.9)$$

$$\bar{A}_{11} = j0,000075 + (-j0,05) + 0,00015 + (-j0,025) = -j0,074775 \text{ S} \quad (4.10)$$

$$\bar{A}_{12} = -\bar{Y}_{ik} = 0,025 \text{ S} \quad (4.11)$$

$$\bar{A}_{21} = \bar{A}_{12} \quad (4.12)$$

Pro určení \bar{A}_{22} je nutno hledět na schéma z pozice druhého uzlu (výpočet věst zprava do leva).

$$\bar{A}_{22} = \sum_{k=1}^n (\bar{Y}_{ik0} + \bar{Y}_{ik}) = \frac{\bar{Y}_{120}}{2} + \bar{Y}_{12} \quad (4.13)$$

$$\bar{A}_{22} = j0,00015 + (-j0,025) = -j0,02485 \quad (4.14)$$

$$\bar{A}_{13} = -\bar{Y}_{ik} = 0,05 \text{ S} \quad (4.15)$$

$$\bar{A}_{31} = \bar{A}_{13} \quad (4.16)$$

Pro určení \bar{A}_{33} je nutno hledět na schéma z pozice třetího uzlu (výpočet věst zdola nahoru).

$$\bar{A}_{33} = \sum_{k=1}^n (\bar{Y}_{ik0} + \bar{Y}_{ik}) = \frac{\bar{Y}_{130}}{2} + \bar{Y}_{13} \quad (4.17)$$

$$\bar{A}_{33} = j0,000075 + (-j0,05) = -j0,049925 \text{ A} \quad (4.18)$$

$$A = j \begin{bmatrix} -0,074775 & 0,025 & 0,05 \\ 0,025 & -0,02485 & 0 \\ 0,05 & 0 & -0,049925 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

4.1 Řešení Gauss – Seidelovou metodou

Pomocí vzorce (3.36) lze stanovit iterační algoritmus pro určení napětí v uzlech 2,3.

$$U_2^{(p+1)} = \frac{1}{\bar{A}_{22}} \cdot \left(\frac{P_2 - jQ_2}{\bar{U}_2^{(p)*}} - \bar{A}_{21} \cdot \bar{U}_1 - \bar{A}_{23} \cdot U_3^{(p)} \right) \quad (4.20)$$

$$U_3^{(p)} = \frac{1}{\bar{A}_{33}} \cdot \left(\frac{P_3 - jQ_3}{\bar{U}_3^{(p)*}} - \bar{A}_{31} \cdot \bar{U}_1 - \bar{A}_{32} \cdot U_2^{(p)} \right) \quad (4.21)$$

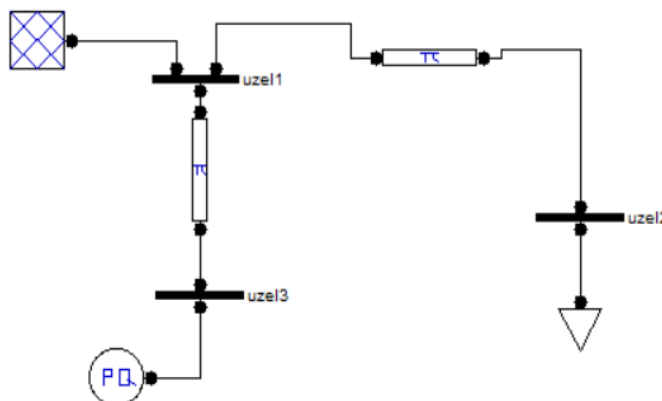
$$\begin{aligned} U_3^{(p+1)} &= \frac{1}{-j0,049925} \cdot \left(\frac{100 \cdot 10^6 - j10 \cdot 10^6}{110000} \right) - j0,05 \cdot 110000 = \\ &= j20,03 \cdot (909,09 - j5590,9) = 111985,9091 + j18209,091 \quad (4.22) \\ &= 113456,6749 \angle 9,118^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_2^{(p+1)} &= \frac{1}{-j0,02485} \cdot \left(\frac{50 \cdot 10^6 - j10 \cdot 10^6}{110000} \right) - (-j0,025) \cdot 110000 \\ &= j40,24144869 \cdot (454,5454545 - j90,90909091 - 2750j) \\ &= 114322,2974 + j18291,56 = 108557,8 \angle 9,09^\circ \quad (4.23) \end{aligned}$$

Tabulka 3 Výpočet pomocí Gauss - Seidelovy metody

iterace	napětí	Komplexní číslo	velikost	úhel
1	U2	-107005,6703+18291,5675i	108557,8	-9,7002
	U3	111986,161+18209,1318i	113456,9	9,2402
2	U2	-103887,065+17644,9712i	105374,9	-9,5532
	U3	109074,3856+17708,8028i	110502,6	9,2265
3	U2	-103701,6691+18185,3494i	105284,1	-9,8601
	U3	109049,5849+18182,5223i	110555	9,471
4	U2	-103598,2997+18163,4540i	105178,5	-9,8581
	U3	108972,6037+18168,9754i	110476,9	9,4706
5	U2	-103591,8474+18181,9394i	105175,3	-9,8686
	U3	108971,8754+18181,8373i	110478,3	9,4772
6	U2	-103588,2947+18181,1863i	105171,7	-9,8685
	U3	108969,7829+18181,4688i	110476,1	9,4772
7	U2	-103588,0725+18181,8227i	105171,6	-9,8689
	U3	108969,76306+18181,8187i	110476,2	9,4774
8	U2	-103587,9503+18181,79643i	105171,5	-9,8689
	U3	108969,7061+18181,8086i	110476,1	9,4774
9	U2	-103587,9427+18181,8183i	105171,5	-9,868
	U3	108969,7056+18181,8182i	110476,1	9,477
10	U2	-103587,9385+18181,8174i	105171,5	-9,868
	U3	108969,7040+18181,8179i	110476,1	9,4774
11	U2	-103587,9382+18181,8182i	105171,5	-9,868
	U3	108969,7040+18181,818i	110476,1	9,4774
12	U2	-103587,938+18181,8181i	105171,5	-9,868
	U3	108969,704+18181,8181i	110476,1	9,4774

4.2 Řešení programem PSAT



Obrázek 17 Schéma společné úlohy PSAT

Bus	Vm [p.u.]	Va [rad]	P [p.u.]	Q [p.u.]
[1]-Bus1	1	0	-0.5	0.20577
[2]-Bus2	0.9561	-0.17375	-0.5	-0.1
[3]-Bus3	1.0043	0.16532	1	0.1

Obrázek 18 Výsledky simulace PSAT v poměrných jednotkách

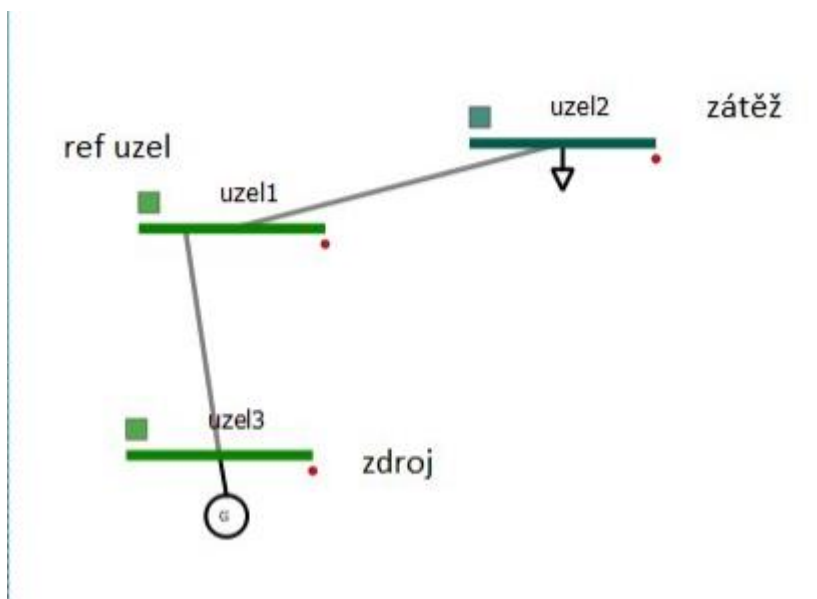
V této simulaci šlo o stanovení napětí v jednotlivých uzlech. Výsledky simulace jsou v poměrných hodnotách, ale PSAT na rozdíl od GridCalu, lze převést na jednotky jednotlivých veličin.

Bus	Vm [kV]	Va [deg]	P [MW]	Q [MVar]
[1]-Bus1	110	0	-50	20.5769
[2]-Bus2	105.1715	-9.9552	-50	-10
[3]-Bus3	110.4762	9.4724	100	10

Obrázek 19 Výsledky simulace PSAT

Z výsledků simulace na Obrázek 18 a Obrázek 19 je patrné, že se výsledky s Gauss-Sedelovou metodou řešenou v excelu shodují.

4.3 Řešení programem GridCal



Obrázek 20 Schéma v programu GridCal

Bus voltage angle	
uzel3	9.470650
uzel1	0
uzel2	-9.944110

Obrázek 21 Úhly jednotlivých napětí v programu GridCal

Bus voltage module	
uzel3	1.004513
uzel1	1.000000
uzel2	0.956431

Obrázek 22 Výsledné velikosti napětí v programu GridCal

Výsledná velikosti napětí i jejich příslušné úhly se shodují s výsledky v programu PSAT na Obrázek 18 a odpovídají tedy hodnotám veličin na Obrázek 19, které odpovídají výsledkům v excelu **Tabulka 3**.

5 Stabilita elektrizační soustavy

Paralelně spojené elektrárny spolu s přenosovými a rozvodnými sítěmi se spotřebiči představují přenosovou soustavu. Pro zajištění provozu je důležité znát fyzikální zákonitosti elektrické soustavy (provoz je optimálně spolehlivá, hospodárná dodávka pro zajištění kvalitní energie). Hlavními parametry sítě, jejichž vztahy budou dále rozebírány, jsou frekvence a napětí. Frekvence je globálním parametrem, zatímco napětí je parametrem lokálním.

Činný výkon je svázán především se změnami frekvence, zatímco jalový výkon je svázán se změnami napětí. Z tohoto poznatku vyplývá, že pro udržení frekvenční stability je nutné zajistit v soustavě stabilitu mezi činnými výkony zdrojů a spotřebičů. Změnou dodávaného nebo odebíraného výkonu dojde k nerovnováze v soustavě, která vede ke změně frekvence. Změnou dodávaného a odebíraného jalového výkonu je dána změna velikosti napětí.

[6]

5.1 Výkonová bilance

Výkonová bilance je nezbytnou podmínkou pro udržení spolehlivosti, bezpečnosti a kvality dodávky elektrické energie. Zvětšením či zmenšením toku činného nebo jalového výkonu na straně dodávky nebo odběru, dojde k porušení výkonové bilance, která vede ke změně napětí a frekvence.

$$\vec{S}_v(t) = \vec{S}_s(t) + \vec{S}_z(t) + \vec{S}_a(t) \quad 5.1$$

Kde \vec{S}_v je vyrobený zdánlivý výkon

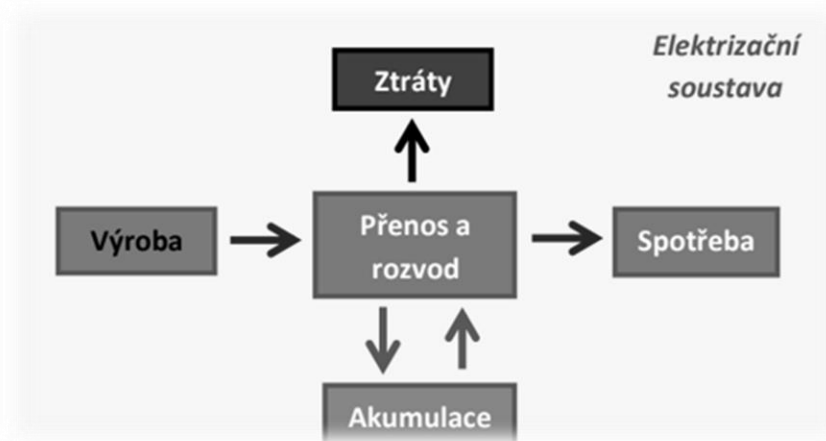
\vec{S}_s je spotřebovaný zdánlivý výkon

\vec{S}_z je ztracený zdánlivý výkon

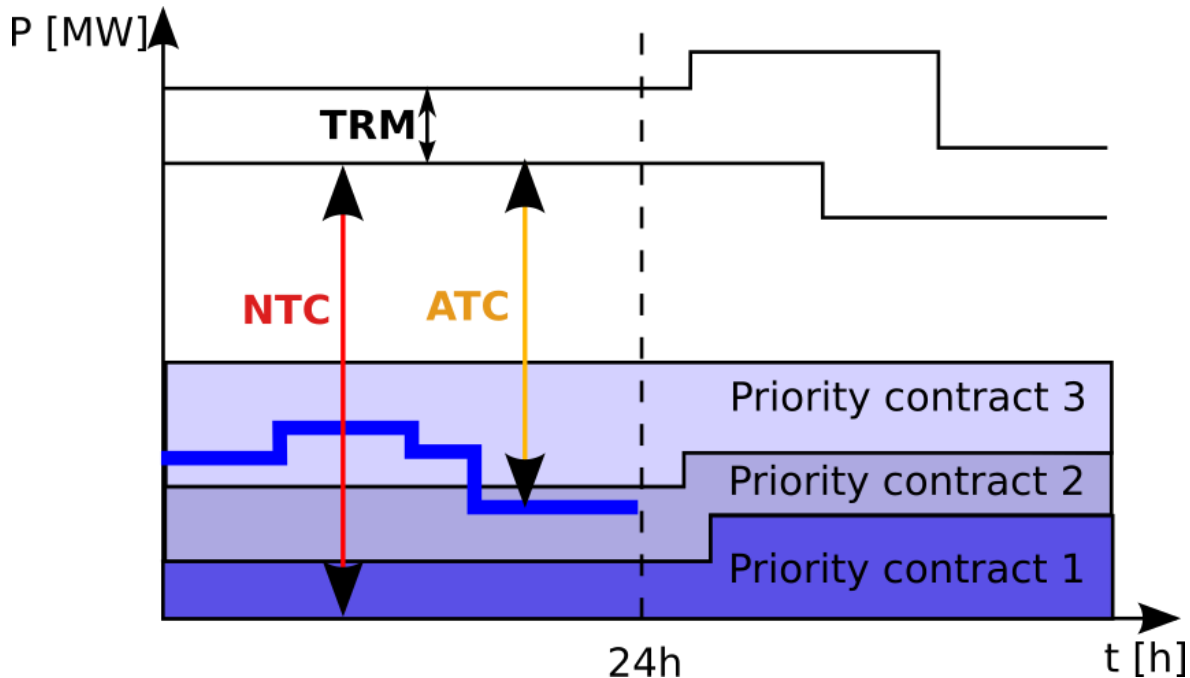
\vec{S}_a je zdánlivý výkon akumulčních zařízení

Ke změnám dodávaného i odebíraného výkonu dochází neustále, proto musí být zdroje i zátěže regulovány a musí docházet k neustálému vyvažování soustavy. Dostatečné množství regulačního výkonu je podmínkou pro správnou regulaci. Spotřeba je regulována mnohými prostředky, mezi nimiž je hromadné dálkové ovládání (HDO), akumulční zařízení, ekonomické nástroje v podobě tarifů nebo denní trh (hodinové obchodování s elektřinou pro 24 hodin následujícího dne) v české Republice se průměrně přenáší kolem

12000MW, přibližně jedna čtvrtina elektrické energie je obchodována na denním trhu. Množství obchodované elektřiny je dáno nabídkou, poptávkou a také dostupnou přenosovou kapacitou vedení, která se značí z anglického availability transfer capacity (ATC). [7] [8]. K udržení výkonové bilance napomáhá i mezinárodní obchod, Česko, Slovensko, Maďarsko a Rumunsko jsou propojené pomocí zprostředkovatele obchodu OTE a navzájem si napomáhají k udržení stability sítě.



Obrázek 23 Výkonová bilance elektrizační soustavy [8]



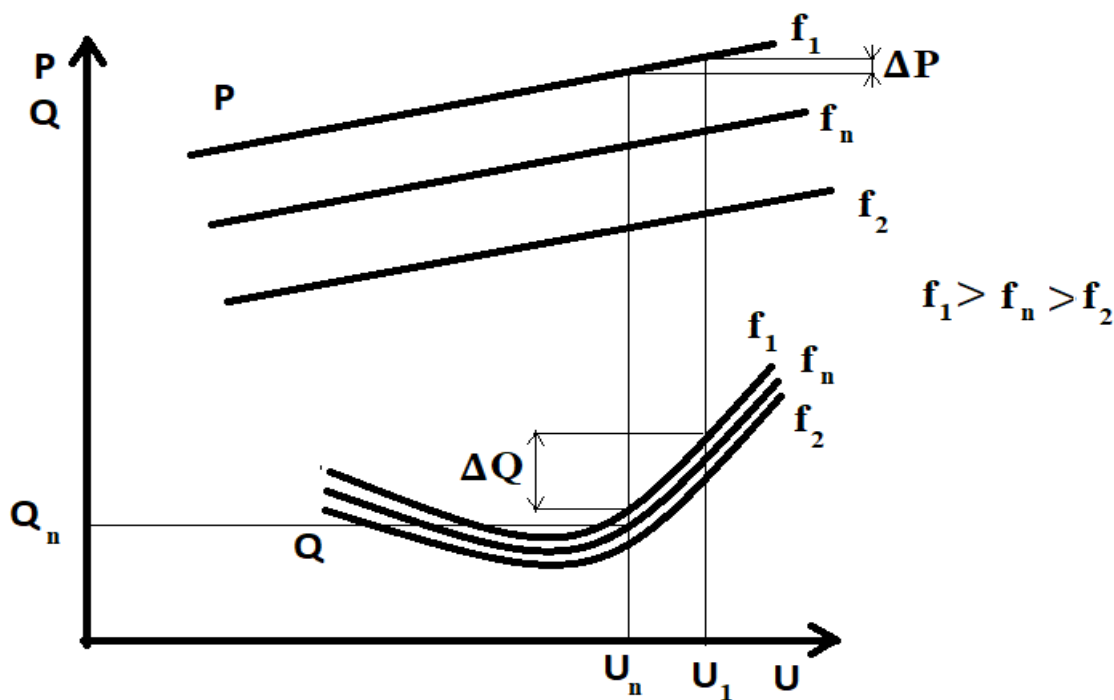
Obrázek 24 Rozdělení kapacity sítě [7]

5.2 Statické charakteristiky

Statické charakteristiky se dělí na napěťové a frekvenční.

Statické charakteristiky slouží jako charakteristiky neregulovaných soustav, na kterých je zřetelně ukázán vliv změn činného a jalového výkonu v ustálených stavech soustavy.

Rozlišujeme statické charakteristiky zdrojů, zátěže a elektrizační soustavy.



Obrázek 23 Statická charakteristika zátěže [8]

5.2.1 Statická charakteristika napětí

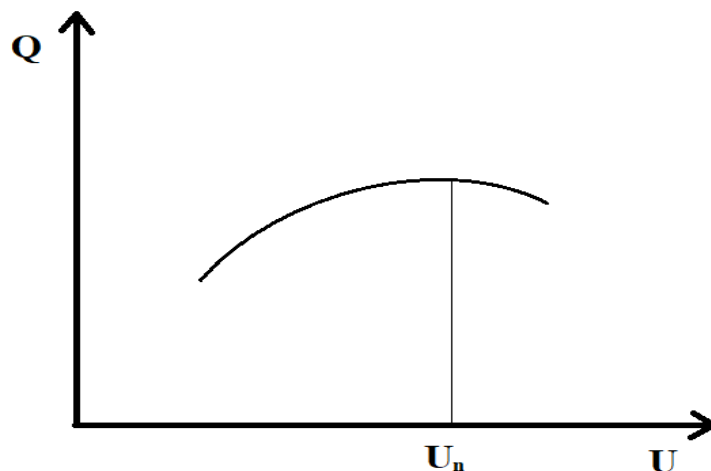
V jednotlivých částech elektrizační soustavy je regulace napětí stanovena rovnováhou mezi dodávanou a odebíranou jalovou energií. Pro udržení správné funkce a životnosti spotřebičů je důležité udržovat velikost napětí v předepsaných mezích. Jalový výkon se samovolně přenáší z míst s vyšším napětím k místům s nižším napětím. Jeho přesuny mohou vést k navýšení Joulových ztrát, popřípadě přetížení linek. V případě neregulovaných zdrojů soustavy je změna dodávaného nebo spotřebovaného výkonu spojena se změnou velikosti napětí dle charakteristik zátěží a zdrojů. [6]

- **Statická napěťová charakteristika zdrojů**

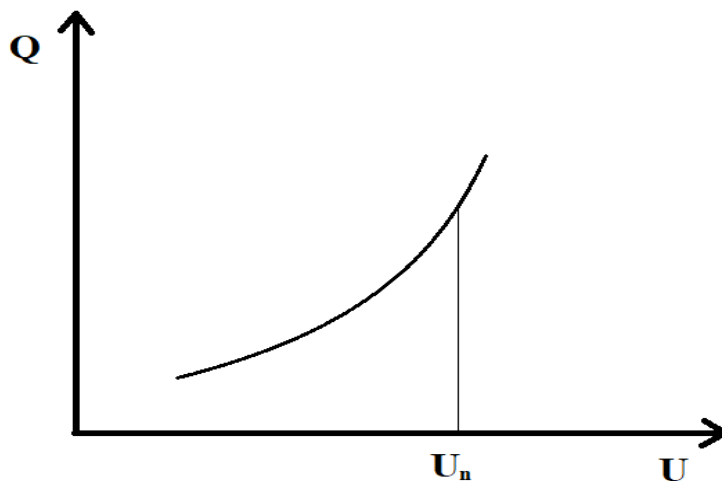
Synchronní generátory, kondenzátorové baterie, synchronní kompenzátory, synchronní motory (v přebuzeném stavu) a vedení VVN tvoří hlavní zdroje jalového výkonu.

Převažujícími zdroji elektrické energie jsou generátory, proto se výsledná charakteristika zdrojů, která je tvořena součtem charakteristik všech zdrojů blíží jejich charakteristice. [6]

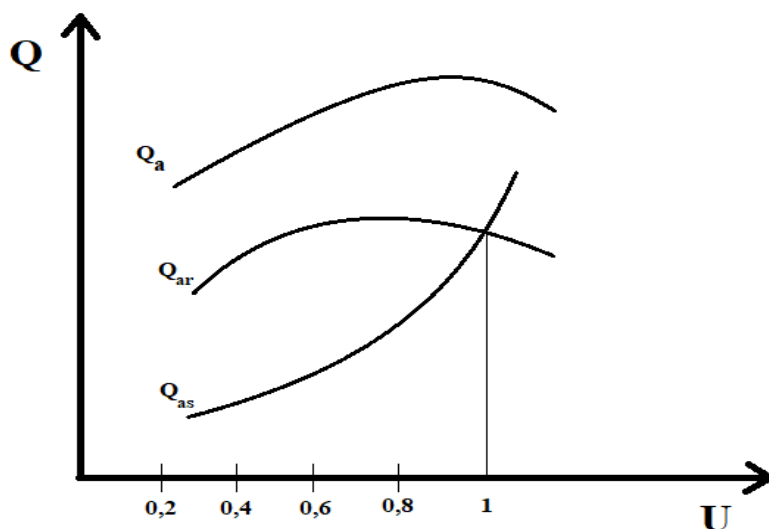
[8]



Obrázek 24 Statická napěťová charakteristika (generátorů, synchronních komparátorů a motorů) [8]



Obrázek 25 Statická napěťová charakteristika (kondenzátorů a vedení VVN) [8]

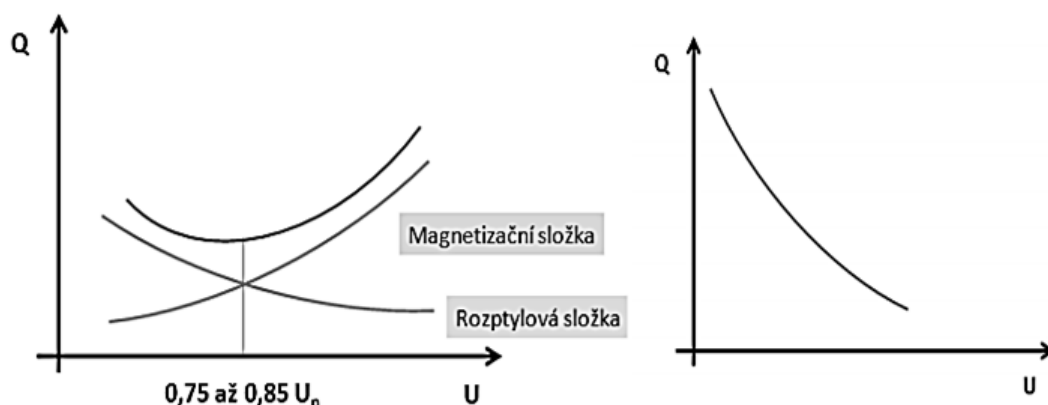


Obrázek 26 Statická napěťová charakteristika zahrnující statické rotační zdroje a výsledná součtová charakteristika zdrojů [6]

- *Statické napěťové charakteristiky zátěžení*

Hlavními spotřebiteli jalového výkonu jsou transformátory, které představují 60 % až 70 % spotřeby. Zbývající spotřeba se dělí mezi asynchronní motory, kompenzační tlumivky a vysokonapěťové vedení. Vytvoření magnetického pole (magnetizace) představuje největší část odebraného jalového výkonu, která je využívána u transformátorů a asynchronních motorů, zbývající část odpovídá ztrátám v rozptylech. Odebíraný výkon je součtem složky magnetizační a složky rozptylové, toto je důvodem, že výsledná statická charakteristika má minimum při (75 až 85) % . [8]

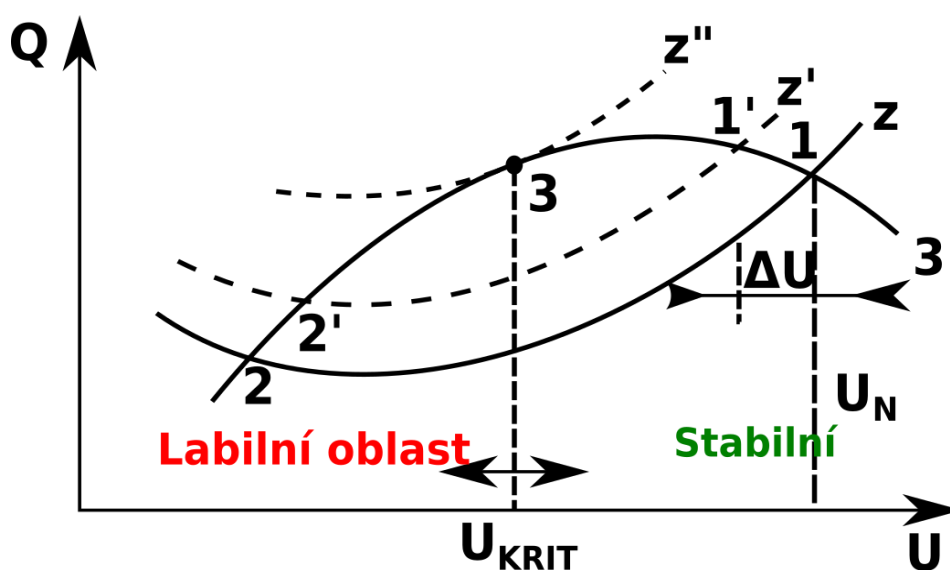
Při poklesu napětí rostou jalové ztráty na vedení. Součtem magnetizační a rozptylové charakteristiky je dána celková charakteristika zátěže.



Obrázek 27 Statické napěťové charakteristiky zatížení a) Transformátory a motory
b) vedení

- **Statické napěťové charakteristiky neregulované elektrizační soustavy**

Průsečík statické napěťové charakteristiky zátěže a zdrojů představuje ustálený provozní stav. Pokud dojde ke zvýšení zátěže dojde k poklesu napětí a nárustu odběru jalového výkonu (posun z bodu 1 do bodu 1'). V bodě, kdy charakteristika zátěže již neprotne charakteristiku zdrojů (napětí padá a není již odkud brát jalový výkon), tento bod se nazývá U_{krit} , při jeho překročení dojde v dané oblasti ke zhroutilí napětí (lavina napětí). Pokud poklesne napětí a charakteristika se nachází v nestabilní oblasti, dochází k deficitu jalového výkonu na straně zdrojů. [8]



Obrázek 28 Stabilita elektrické soustavy

- **Statické napěťové charakteristiky regulované elektrizační soustavy**

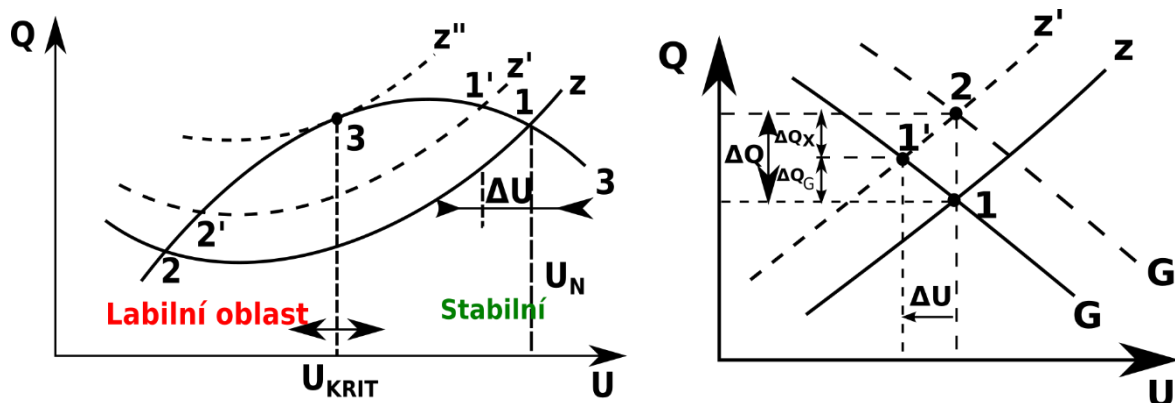
V neregulované soustavě dochází vlivem změny jalového výkonu ke kolísání velikosti napětí. Regulaci velikosti jalového výkonu lze provádět:

- **Změnou buzení synchronních strojů**
- **Nasazování statických kondenzátorů a baterií**
- **Změnou odboček transformátorů (pouze přerozdělení, které nevytváří jalový výkon) [6]**

Napětí je možné regulovat změnou:

- **Impedance sítě (sériové kondenzátory, tlumivky)**
- **Jalového výkonu (kompenzačním zařízením, viz regulace jalového výkonu)**
- **Hladinou napětí (generátory, regulační transformátory)**

Velikost jalového výkonu je ovlivněna rovněž mírou zatížení vedení vzhledem k jejich přirozenému přenášenému výkonu. Regulace napětí je na rozdíl od frekvence decentralizovaná a vztahuje se k místnímu charakteru sítě. [6] [8]



Obrázek 29 Stabilita

Pokud se navýší jalové zatížení o ΔQ z charakteristiky Z na Z' dojde ke snížení velikosti napětí o ΔU , zároveň dojde ke snížení požadavku jalové zátěže ΔQ_Z a zároveň vzroste výkon zdrojů o ΔQ_G . Má-li být rozdíl napětí zcela vyrovnán, je nutné přejít na charakteristiku G' a navýšit dodávaný jalový výkon a tím navýšit i velikost napětí.

Realizace navýšení jalového výkonu se liší u napěťových hladin:

- **Sítě vn (22 kV)**

Regulují napětí změnou odboček transformátorů 110 kV/22 kV.

Ostatní transformátory jsou nastaveny pevně pro udržení napětí v mezích daných normou.

- **Sítě vvn (110 kV)**

Jedná se o síť distribuční, ale již obsahují významnější zdroje, z toho vyplývá, že hlavním regulačním nástrojem je změna dodávaného jalového výkonu elektrárnami a doplňující možností je změna odboček transformátoru 400 kV/110 kV, případně 220 kV/110 kV.

- **Sítě vvn 400 kV a 220 kV**

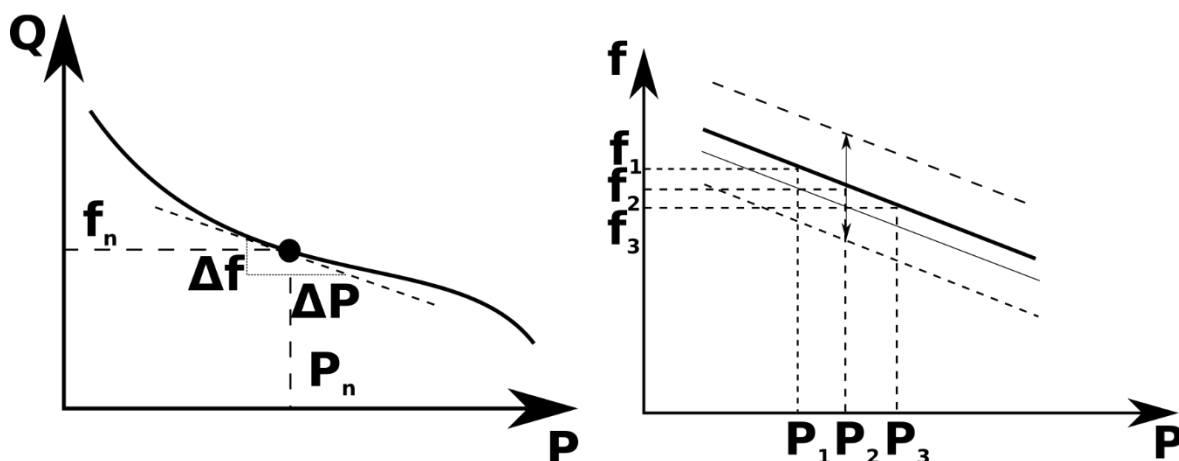
Jedná se o přenosové síť, regulačními nástroji jsou změna výkonů elektráren a případných kompenzátorů v terciálních vinutí transformátorů, které mají udržet stabilitu soustavy.

Kromě stability sítě je cílem regulace napětí optimalizovat přenos energie co nejehospodárněji. Vyrobený jalový výkon je regulován dle diagramu nebo dle udržování velikosti napětí ve vybraných uzlech soustavy. [6]

5.2.2 Frekvenční statické charakteristiky

V případě neregulované soustavy se opět projeví změna zatížení nebo velikosti zdrojů, kterou doprovází změna frekvence. Stejně jako je tomu u napětíových charakteristik, také u frekvenčních statických charakteristik platí, že součet charakteristik zdrojů a zátěží tvoří výslednou charakteristiku soustavy.

- **Frekvenční statické charakteristiky zdrojů**



Obrázek 30 Statické charakteristiky zdrojů jsou dány primárně pomocí regulátorů otáček turbín

Statické charakteristiky zdrojů jsou dány primárně pomocí regulátorů otáček turbín. Pomocí „součtu“ jednotlivých výroben je dána charakteristika soustavy. Jejich průběh

kvůli různému poměrnému zatížení, necitlivosti a nelinearitě dílčích regulátorů lze získat pouze exponenciálně.

Výkonové číslo zdrojů lze definovat po linearizaci v pracovním bodě.

Výpočet výkonového čísla zdrojů:

$$K_A = -\frac{\Delta P_T}{\Delta f} \left[\frac{MW}{Hz} \right] \quad 5.2$$

Kde K_A je výkonové číslo soustavy, které představuje velikost změny výkonu zdrojů, která způsobí změnu frekvence o 1 Hz

Výpočet součinitel statismu zdrojů (statika)

$$s_T = \frac{\Delta f}{\Delta p_T} = \frac{\frac{\Delta f}{f_N}}{\frac{\Delta P}{P_{TN}}} = \frac{\Delta f}{P_{TN}} \cdot \frac{P_{TN}}{f_n} \quad 5.3$$

Kde s_T je výkonový součinitel zdrojů, který představuje směrnici přímky definující poměrnou změnu (zdrojů) na poměrné změně frekvence v blízkosti jmenovitého kmitočtu

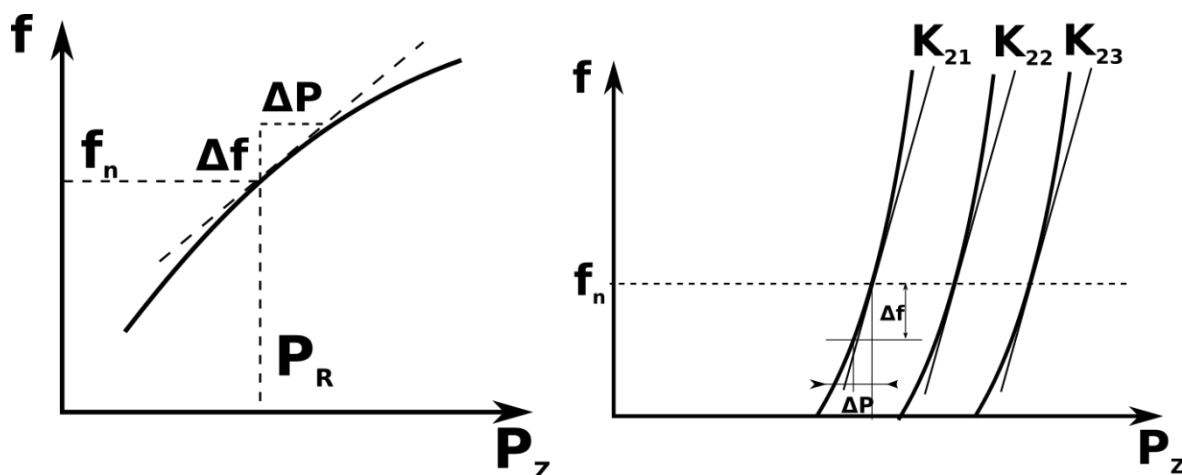
Výpočet výkonového čísla v poměrné hodnotě:

$$k_A = -\frac{\Delta p_T}{\Delta f} = -\frac{1}{s_T} \quad 5.4$$

Výpočet výkonového čísla z poměrné hodnoty:

$$K_A = k_A \cdot \frac{P_{TN}}{f_N} = -\frac{P_{TN}}{f_N \cdot s_T} \quad 5.5$$

• *Frekvenční statická charakteristika zatížení*



Obrázek 31 Statické charakteristiky zatížení

Výsledná charakteristika zátěže je „součtem“ dílčích charakteristik jednotlivých zátěží.

Zátěže jsou tvořeny:

- 20 až 25 % topnými zařízeními a osvětlením (odporovou zátěží)
- 50 až 70 % pohony (motorická zátěž)
- 10 až 12 % zvláštní zatížení a ztráty

Výkonové číslo zátěže lze definovat po linearizace v pracovním bodě.

Výpočet výkonového čísla zátěže:

$$K_z = \frac{\Delta P_z}{\Delta f} \quad 5.6$$

Kde K_z je výkonové číslo soustavy, které představuje velikost změny výkonu zátěže, která způsobí změnu frekvence o 1 Hz

Výpočet součinitel statismu zdrojů (statika)

$$s_z = \frac{\Delta f}{\Delta p_z} = \frac{\frac{\Delta f}{f_N}}{\frac{\Delta P_z}{P_{ZN}}} = \frac{\Delta f}{\Delta P_z} \cdot \frac{P_{ZN}}{f_N} \quad 5.7$$

Kde s_z je výkonový součinitel zátěže, který představuje směrnici přímky definující poměrnou změnu (zátěži) na poměrné změně frekvence v blízkosti jmenovitého kmitočtu

Výpočet výkonového čísla v poměrné hodnotě:

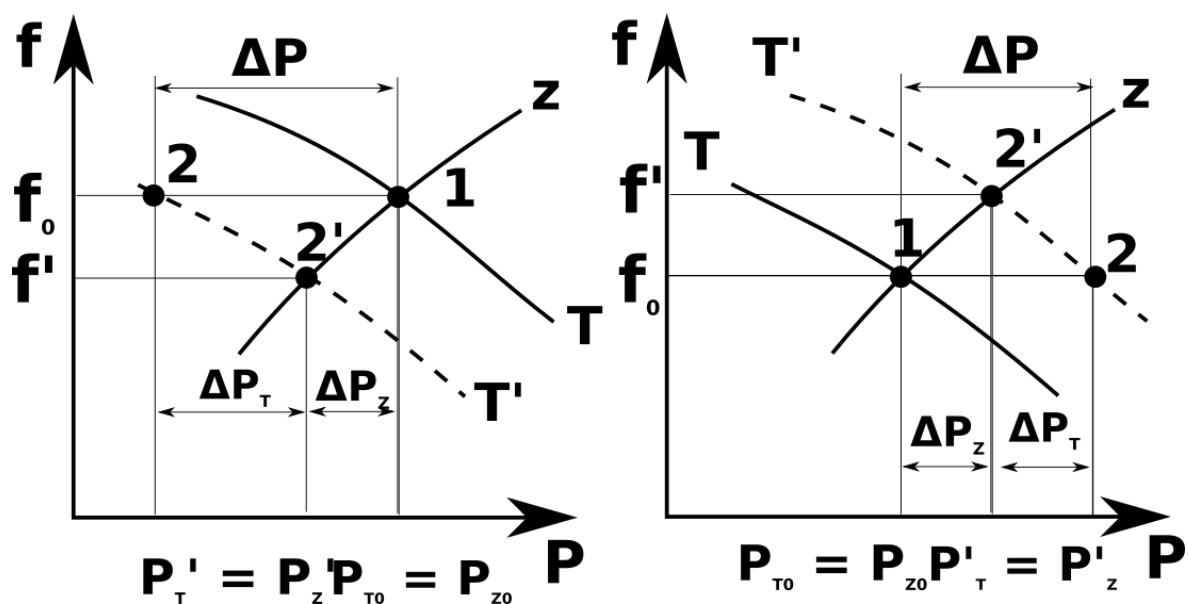
$$k_z = \frac{\Delta p_z}{\Delta f} = \frac{1}{s_z} \quad 5.8$$

Výpočet výkonového čísla z poměrné hodnoty:

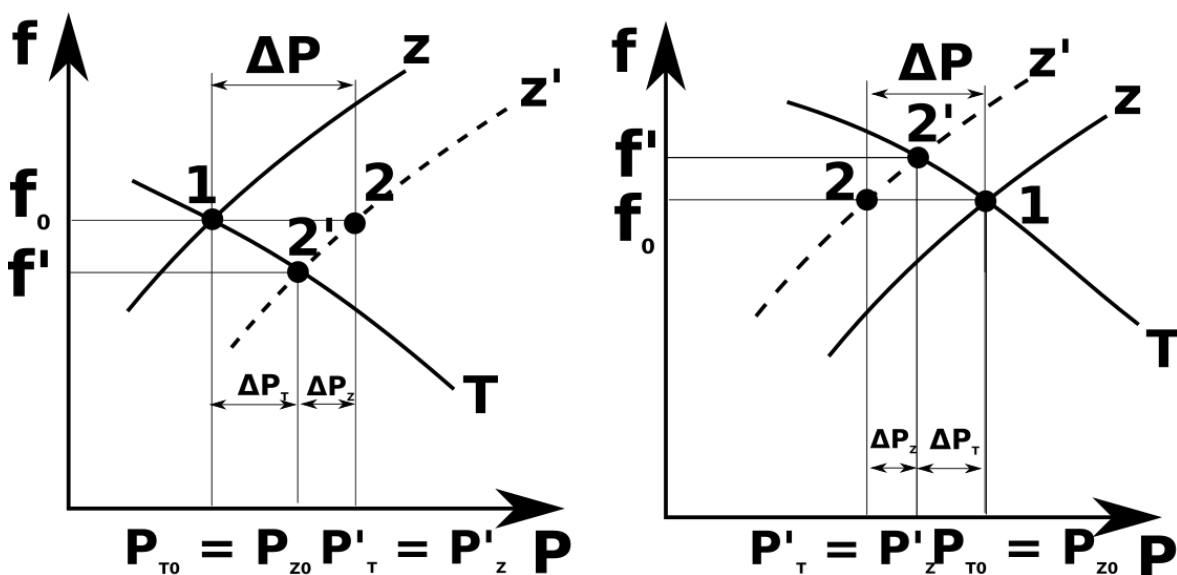
$$K_z = k_z \cdot \frac{P_{ZN}}{f_N} = - \frac{P_{ZN}}{f_N \cdot s_z} \quad 5.9$$

- **Frekvenční statická charakteristika neregulované soustavy**

K posuvu pracovního bodu dochází, při změnách frekvence, které byly způsobeny změnami velikosti zdrojů a spotřebičů, jelikož pracovní bod vyplývá z charakteristik zdrojů a zátěže.



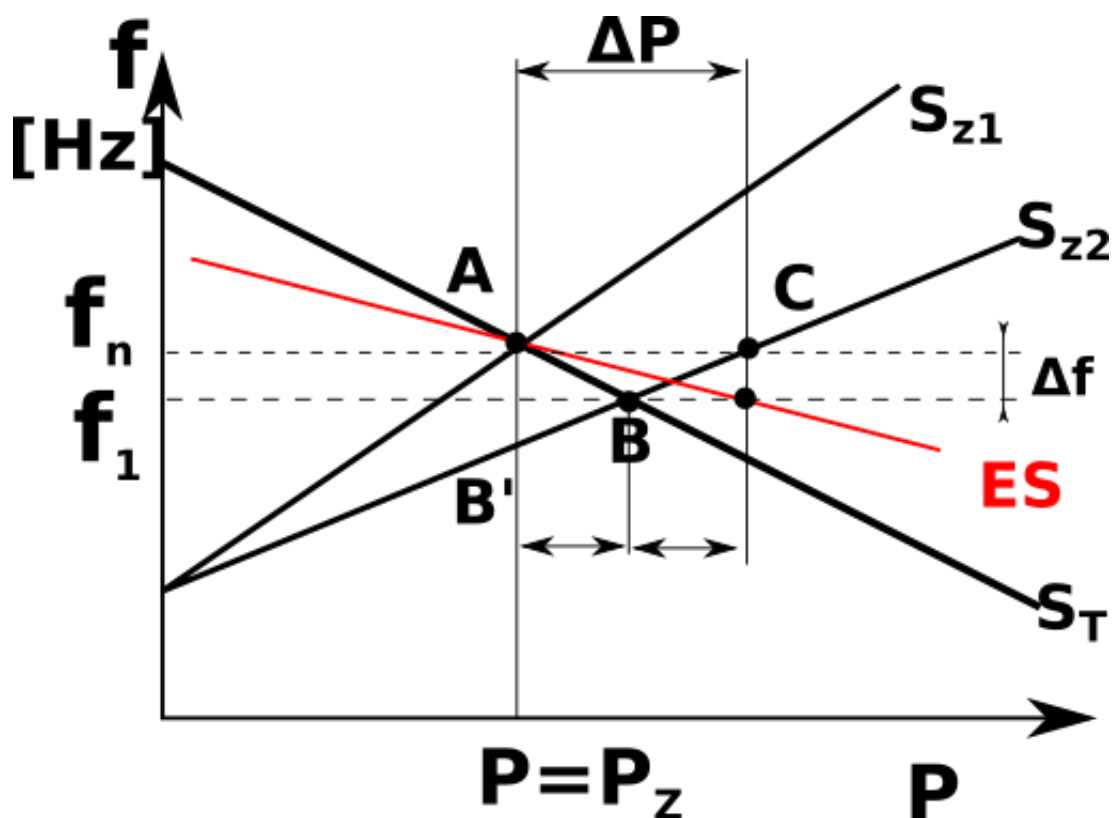
Obrázek 32 Výpadek zdroje (vlevo) přírůstek zdroje (vpravo)



Obrázek 33 Nárůst zatížení (vlevo) a pokles zatížení (vpravo)

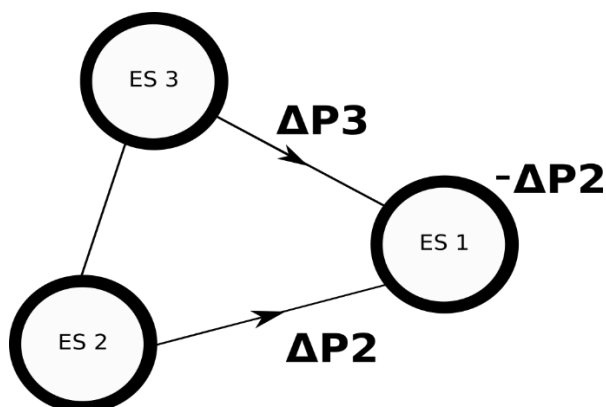
Pokud dojde ke zvýšení zatížení o hodnotu ΔP , dochází ke zvýšení výkonu zdrojů o ΔP_T , pak snížením hodnoty zátěže o ΔP_Z je nahrazen nedostatek při snížení kmitočtu. Tomuto procesu se říká samoregulační efekt elektrizační soustavy.

Kombinovaná charakteristika soustavy



Obrázek 34 Vliv samoregulačního efektu elektrické soustavy

Zde nedochází k žádné regulaci, stav sítě se sám ustálil na nižší frekvenci, ale pokud by se jednalo o propojené elektrizační soustavy, podílely by se na deficitu výkonu všechny soustavy podle svých charakteristik (frekvence je globálním parametrem).

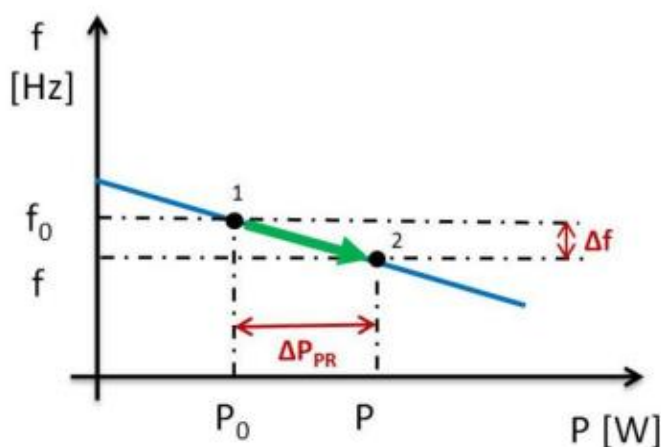


Obrázek 35 Propojení soustav a hrazení deficitů

Frekvenci je možné regulovat změnou:

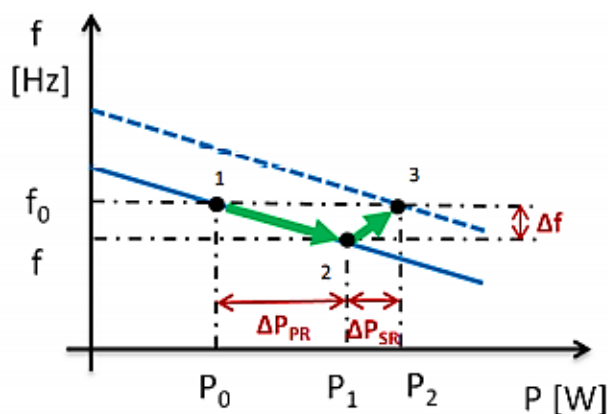
- **Primární (vyrovnání výkonové bilance)**
- **Sekundární (vyrovnání frekvence na jmenovitou hodnotu 50 Hz)**
- **Terciální (obnovení regulačního pásma pro primární a sekundární regulaci)**

Průběh primární regulace je popsán na Obrázek 36 zahrnuje posun z bodu 1 do bodu 2. Při primární regulaci došlo k navýšení činného výkonu, primární regulace zabránila velkému poklesu frekvence v bodě 1. Primární regulací byl činný výkon navýšen o hodnotu ΔP_{PR} . V síti stále zůstává odchylka frekvence Δf , která může být odstraněna sekundární regulací nebo snížením zatížení na původní hodnotu.

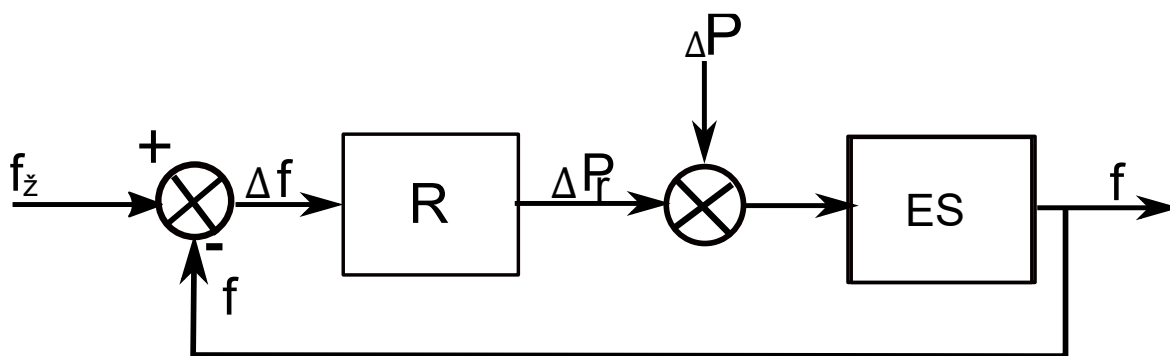


Obrázek 36 Frekvenční statická charakteristika primární regulace

Sekundární regulace je zaměřena na zbývající odchylku frekvence a napětí, kterou nevyřešilo navýšení činného výkonu primární regulací. Jedná se o automatickou regulaci vybraných regulačních elektráren.



Obrázek 37 Frekvenční statická charakteristika sekundární regulace



Obrázek 38 Regulátor

Regulace slouží k rozdělení zatížení mezi zdroje při zachování salda a s přihlédnutím na regulační možnosti zdrojů.

Metodou statických charakteristik je určeno pro každý zdroj:

$$\Delta P_{Ri} = -K_{Ri} \cdot \Delta f \quad 5.10$$

Kde K_{Ri} je výkonové číslo regulátoru

$$\Delta f = f_{\check{z}} - f \quad 5.11$$

Kde $f_{\check{z}}$ je žádaná hodnota

f je hodnota naměřená v soustavě

$$\Delta P_{Ri} = P_{Ri} - P_{R\check{z}i} \quad 5.12$$

Žádaná hodnota výkonu bude měněna regulátorem, dokud nebude platit:

$$\Delta f + \frac{1}{K_{Ri}} \cdot \Delta P_{Ri} = 0 \quad 5.13$$

Kde K_{Ri} je výkonové číslo regulátoru

Δf je rozdíl mezi žádanou a měřenou frekvencí

ΔP_{Ri} výkon dodávaný regulátorem

Vzorec 5.13 lze napsat vztahem:

$$\Delta f + S_{RI} \cdot \Delta P_{Ri} = 0 \quad 5.14$$

Kde S_{RI} je výkonový součinitel regulace (změna výkonu na změnu frekvence)

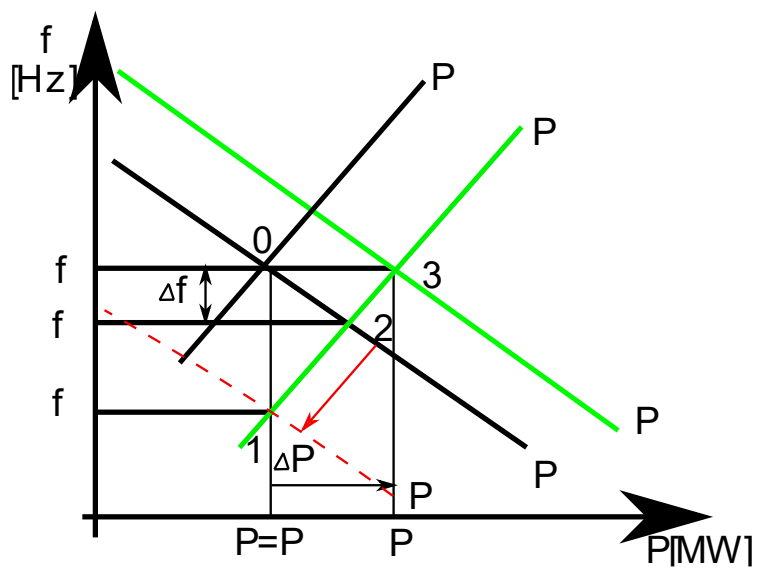
Rozdělení výkonů je vyjádřeno v poměru:

$$P_{R1} : P_{R2} : \dots : P_{Rn} = \frac{1}{S_{R1}} : \frac{1}{S_{R2}} : \dots : \frac{1}{S_{Rn}} \quad 5.15$$

Z toho plyne, že rozdělení výkonů je dáno součinitelem statismu a je závislé na frekvenci.

Součinitel statismu se u elektráren volí:

- *Základní elektrárny (4 až 6 %)*
- *Regulační elektrárny (0,5 až 1,5 %)*



Obrázek 39 Regulace frekvence

6 Realizace zjednodušeného modelu malé solární elektrárny

Zjednodušená distribuční síť, která bude v této kapitole probrána, jejíž součástí je reálný výstup solární elektrárny změřený ve stejném čase jakožto hodnoty reálné zátěže. Na modelu budou pozorovány napěťové poměry sítě v blízkosti malé solární elektrárny, které jsou zobrazeny v ustálených stavech a vychází z naměřených pětiminutových intervalů reálné solární elektrárny. Simulace jsou prováděny opakovaně se zaměřením na porovnání vlivu elektrárny v jednotlivých ročních obdobích součástí simulací je i grafický vyobrazení dopadající sluneční energie v porovnání s výstupním výkonem. Simulace budou provedeny v programu GridCal.

Program GridCal byl zvolen na základě možnosti nahrání tabulek a funkce serial power flow, která umožňuje sledování změn poměrů v síti v dlouhém časovém horizontu. Jedná se o volně stažitelný software.

6.1 Zátěže

Odběratelé se dělí na čtyři základní typy zákazníků:

- **Základní typ A**

Patří mezi velkoodběratele, jsou připojeni k distribuční nebo přenosové soustavě k napětí vyššímu než 52 kV, u hladiny VVN (obvykle 110kV). Spotřebovávají elektřinu především k tvorbě Hrubého domácího produktu (HDP).

Tito zákazníci jsou měřeni průběhovým měřením, které zahrnuje dálkový denní přenos údajů a průběžný záznam střední hodnoty výkonu za měřicí interval (základní měřicí interval čtvrt hodiny), je prováděno samotným měřicím zařízením.

Základním intervalem pro zpracování a přenos naměřených údajů je 1 kalendářní den.

[9] [10] [11]

- **Základní typ B**

Rovněž patří mezi velkoodběratele, jsou připojeni na vysokých parametrech odběru VN (obvykle 22 kV), což znamená, že jsou odběrateli z distribuční soustavy na napěťové hladině od 1 kV do 52 kV a jejich rezervovaný příkon je do 250 kW. Využívají elektřinu především k tvorbě HDP. Měření je opět průběžové s dálkovým přenosem údajů, který je jiný než jednodenní. Průběžný záznam střední hodnoty činného a jalového výkonu je

prováděn měřicím přístrojem. Interval měřicího přístroje je taktéž čtvrt hodiny. Základní interval pro zpracování a přenesení údajů je jeden měsíc. Stává se, že není možné uskutečnit dálkový přenos informací z technických důvodů, pak jej musíme dopravit jiným způsobem (fyzicky). [9] [10] [11]

- **Zákazníci typu C**

Patří mezi maloodběratele. Jsou připojeni na nízkém napětí, využívají elektřinu rovněž především pro tvorbu HDP jedná se o firmy. Ve vyhlášce č. 408/2015 Sb jsou odběratelé kategorie C - odběrateli, kteří nejsou odběrateli kategorie A, B nebo D. Dělí se dle způsobu měření na čtyři základní kategorie. Kategorie C1 až C3 je založena na průběhovém měření s intervalem 15 minut. Kategorie C4 jejíž měření může být rovněž průběhové, ale nemusí být, ke zpracování a přenosu údajů dochází jednou za rok. Kategorie C4 je využívána u odběrných míst s odběrem elektřiny z distribuční soustavy, ve kterých není připojena výrobní elektřiny, kde není technicky nebo ekonomicky možné instalovat měřicí zařízení. [9]

- **Zákazníci typu D**

Připojeni na nízkém napětí. Využívají elektřinu za účelem osobních potřeb. Jedná se o fyzické osoby. Odběrné místo je připojeno k distribuční soustavě se sdruženým napětím do 1 kV. Odběratelem typu D může být i právnická osoba v rozsahu odběru elektřiny pouze pro potřeby správy a provozu společných částí domu sloužících pouze pro společné užívání vlastníků nebo uživatelům bytů. Neprůběžné měření, jedná se o integrální měření. [9] [10]

6.1.1 Typové diagramy

Metoda typových diagramů dodávky elektřiny slouží jakožto náhradní postup, který má za účel stanovit pro oprávněné zákazníky typu C velikosti hodinových odběrů. To znamená, že nahrazuje průběhové měření, pro odběratele bez průběhového měření. Využívá se při zúčtování za odběr skupiny zákazníků náležících k příslušnému TDD a při zúčtování odchylek subjektu. Metoda typových diagramů je vhodná pro delší časový interval a také pro počet odběrných míst konečných zákazníků v dané skupině vyšší než cca 1000 pro dosažení požadované celostátní nebo regionální (u TDD5) chyby, která nepřevyšuje 10 %. Úroveň chyby je hodnota určující rozsah, ve kterém se může sledovaná

veličina vyskytovat vzhledem ke své střední hodnotě.

Typové diagramy se dělí na 8 tříd TDD. TDD8 představuje osvětlení. Třídy TDD č. 1, 2, 3, 4, 6,7 jsou zpracovány celostátní statickou metodou stanovenou ze 128 vzorků pro každou třídu, vzorky jsou rovnoměrně rozloženy na každou regionální rozvodnou energetickou společnost. Třída TDD5 je jako jediná rozdělena do jednotlivých krajů. [11] [10]

6.1.2 Výpočet spotřeby pro zákazníka k danému období

Období, které jsem ve své diplomové práci zvolil je jeden týden v každém ročním období a v uplynulých dvou letech. Ke stanovení jsem využil údajů ze stránek OTE ([12]).

Stanovení odběru elektřiny v jednotlivých hodinách:

$$O_h = O_r \cdot \frac{r_h}{\sum_{h=1}^{8760} r_h} \quad 6.1$$

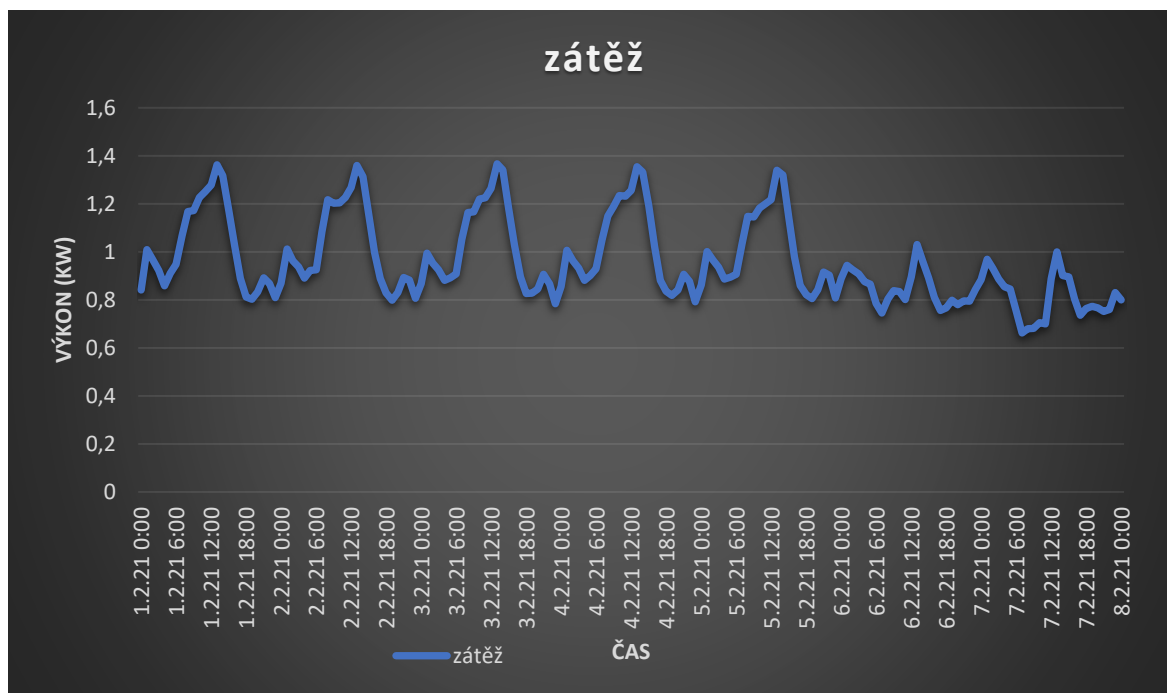
Kde O_h je velikost spotřeby v konkrétní hodině

O_r je celková roční spotřeba odběrového místa

r_h je relativní hodnota normalizovaného typového diagramu příslušné třídy v dané hodině h

$\sum_{h=1}^{8760} r_h$ je součet všech relativních hodnot normalizovaného typového diagramu příslušné třídy dané za celý uplynulý kalendářní rok, což je v podstatě roční doba využití maxima

Součtem odběru každé hodiny v určeném období lze určit spotřebu dané třídy pro určené období. Údaje, které jsou použity z naměřených dat solární elektrárny jsou v pětiminutových intervalech, proto naopak nejsnazším způsobem (lineárně) jsou hodinové intervaly zátěže rozděleny na pětiminutové, aby bylo možné provést simulace. [12] [13] [11]



Obrázek 40 Graf zátěže typu C třídy TDD2 v zimním období (jeden týden)

6.2 Solární elektrárna

Výstup solární elektrárny obsahuje mnoho údajů, klíčové informace pro účel stanovení napěťových poměrů jsou výstupní výkony. Výstupní výkon je měřený v pětiminutových intervalech, elektrárna dodává pouze činný výkon.

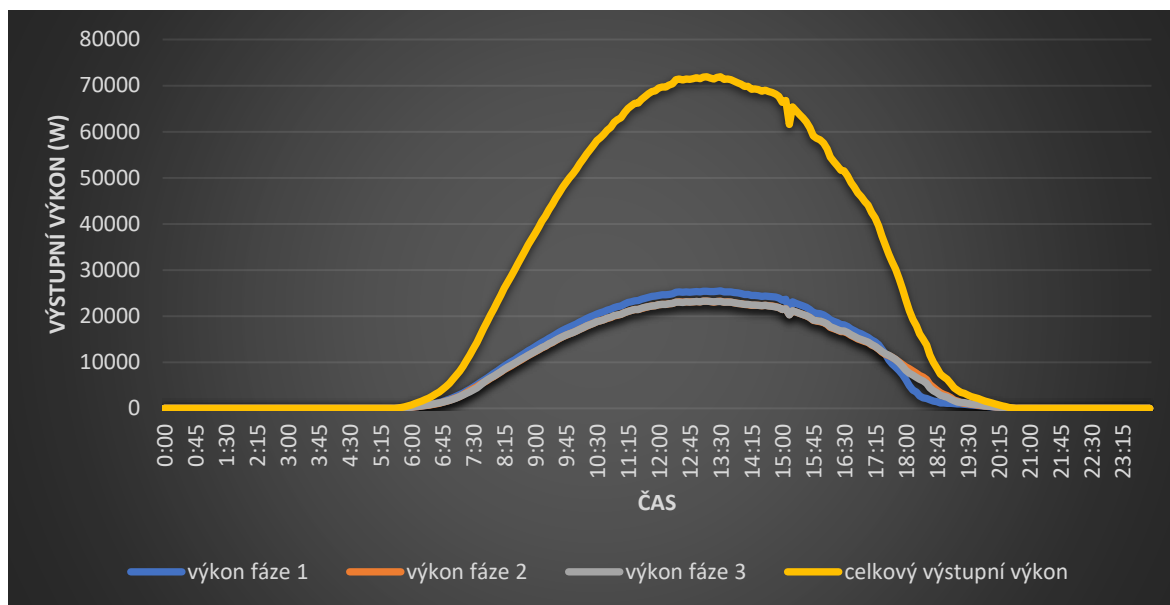
Období, které jsem ve své diplomové práci zvolil je jeden týden v každém ročním období a první den každého zvoleného týdne. Nominální výstupní hodnota je 99,9 kWp.

Tabulka 4 Vybrané týdny v jednotlivých ročních obdobích, které jsou součástí simulace

Jarní týden	Letní týden	Podzimní týden	Zimní týden
1-7.05.2019	1-7.08.2019	1-7.11.2019	1-7.2.2020
1-7.05.2020	1-7.08.2020	1-7.11.2020	1-7.2.2021

[14]

V každém ročním období bude rovněž vyhodnocena energie dopadajícího záření. Údaje o teplotě jsou získány ze stránek OTE. Rovněž bude údaj o účinnosti elektrárny získán měřením osvětlení / výkonu.


Obrázek 41 Graf výstupního AC výkonu ke dni 7.8.2020

6.3 Údaje o distribuční síti

Solární elektrárna je připojena přes zvyšovací napěťový transformátor ze 400 V na 22 kV. Část distribuční soustavy se nachází na hladině 22 kV a část na nízkém napětí (spotřeba).

Tabulka 5 Přibližné parametry venkovního vedení [16]

U_n [kV]/S[mm ²]	R_p [Ω/km]	L_p [mH/km]	X_p [Ω/km]	C_p [Nf/km]	B_p [μS/km]	G_p [Ns/km]
22/50 -150	0,7-0,2	1,1 – 1,3	0,35 – 0,4	9	2,8	0

Tabulka 6 Zvolené parametry venkovního vedení vn (22 kV) při teplotě 20 °C [16]

U_n [kV]/S[mm ²]	$R_{20°C}$ [Ω/km]	X_p [Ω/km]	B_p [μS/km]	G_p [Ns/km]	I_z [A]
22/120	0,28	0,38	2,9	0	440

Distribuční síť na nízkém napětí je řešena závěsným kabelem AYKY 4x16 pro jeden odběr a pro více odběrů a hlavní větve je použit kabel AYKY 4x25. Pro nízké napětí bude uvažován pouze činný odpor [15].

Tabulka 7 Parametry vedení nízkého napětí při 20 °C [17]

Závěsný kabel (počet žil x průřez jádra [mm ²])	R / km [Ω/km]	I_z [A]
AYKY 4 x 16	1,91	61
AYKY 4 x 25	1.2	81

K jednotlivým ročním obdobím patří i změny venkovní teploty. Záznamy o teplotě jsou přejaty ze stránek OTE [17]. GridCal umí pracovat s údaji o teplotách.

Vzorec pro výpočet teplotně závislých parametrů vedení:

$$R_p = R_{SS} \cdot k_{\vartheta} \cdot k_S \cdot k_e \cdot k_p \quad 6.2$$

Kde R_p je provozní činný odpor

R_{SS} je náhradní provozní činný odpor dle vzorce 6.3

k_{ϑ} je vliv teploty (rozdíl +20 °C odpovídá přibližně 1,08, výpočet dle vzorce 6.4)

k_S je vliv skinefektu (jeho hodnota u krátkého vedení o frekvenci 50 Hz je malá a v této práci je zanedbán)

k_e je kroucení vodičů vliv kroucení vodičů je rovněž zanedbán

k_p je vliv průhybu vodiče, který je rovněž zanedbán

$$R_{SS} = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad 6.3$$

Kde ρ je rezistivita při 20 °C

l je délka vedení

S je průřez

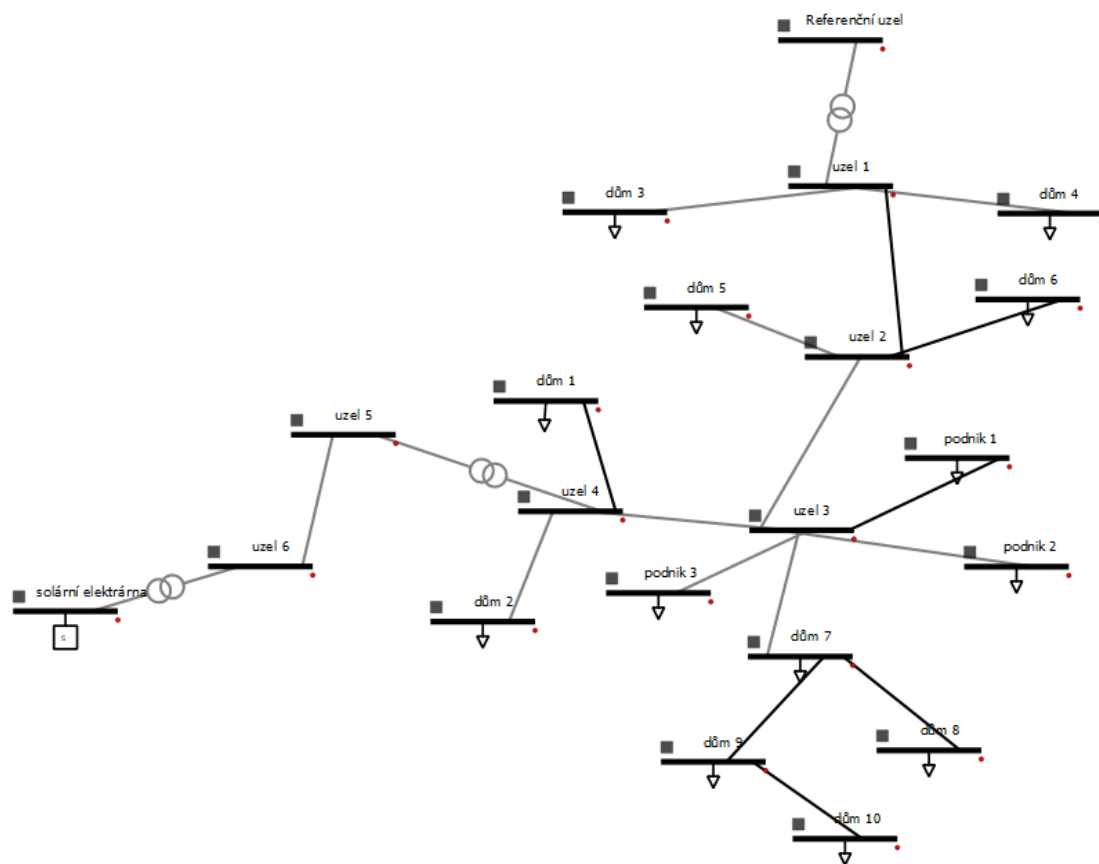
$$k_{\vartheta} = 1 + \alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_{20}) + \beta \cdot (\vartheta - \vartheta_{20})^2 \quad 6.4$$

6.3.1 Distribuční soustava v okolí malého OZE s transformátory

Tabulka 8 Parametry transformátorů [19]

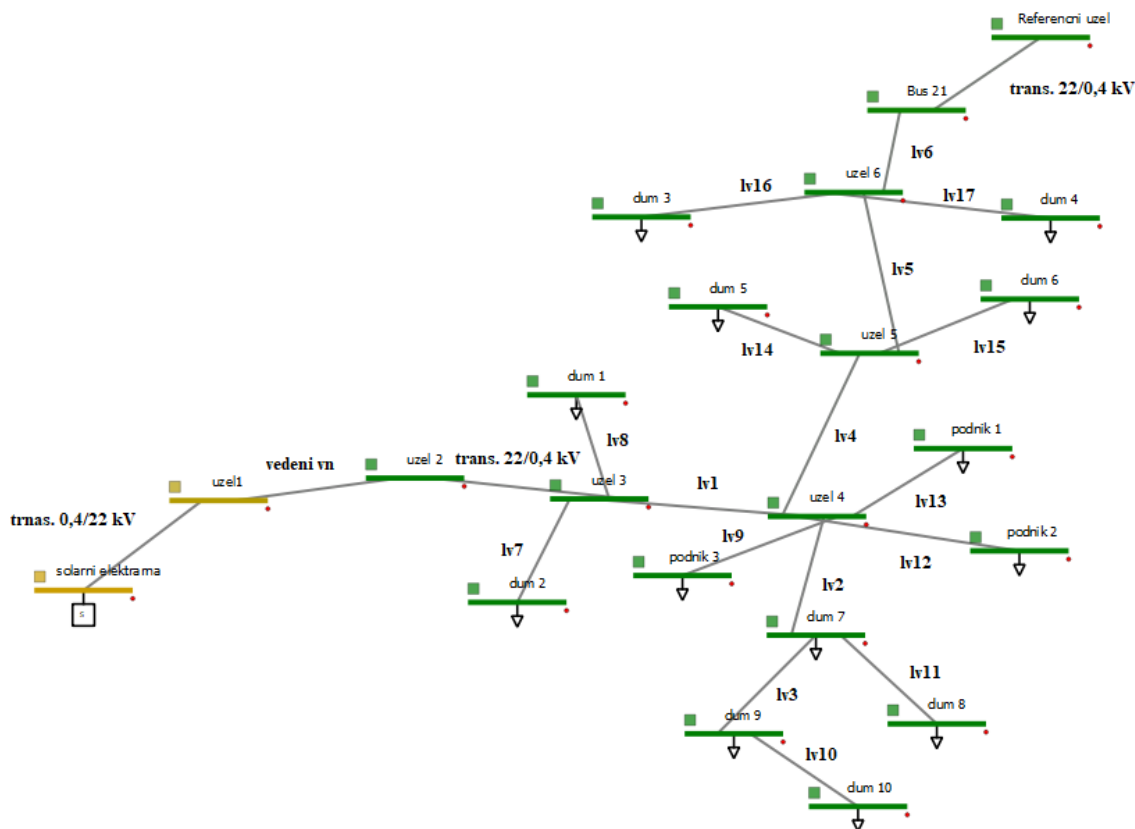
transformátor	I_0 [%]	U_k [%]	S_n [kVA]	P_{fe} [kW]	P_{cu} [kW]
Transf. 1 (20/0,4)	2,9	4	100	0,8	1,7

Transformátor o jmenovitém výkonu 0,1 MW převádí napětí z hladiny 0,4 kV na 22 kV.



Obrázek 42 Schéma distribuční sítě obsahující transformátory

6.3.2 Distribuční soustava v okolí malého OZE vypočtené pomocí poměrných hodnot (bez transformátorů)



Obrázek 43 Schéma distribuční soustavy v poměrných hodnotách přepočtené na stranu nízkého napětí

Program GridCal rovněž počítá s poměrnými hodnotami.

Nejdříve se musí přepočítat parametry vedení dle následujících vzorců:

- **Přepočet odporu vedení**

Odvození vztahu, musíme použít pomocný odpor (vztažný odpor), který si sami zvolíme.

$$Z_n = \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{U_n^2}{U_n \cdot I} = \frac{U_n}{I} \quad (6.5)$$

$$R_v = R_{V/km} \cdot l \quad (6.6)$$

$$r_v = \frac{R_v}{Z_n} \quad (6.7)$$

Výsledný vztah:

$$r_v = R_{V/km} \cdot l \cdot \frac{S_V}{U_S^2} \quad (6.8)$$

Kde R_V je odpor vedení

$R_{V/km}$ je odpor vedení dlouhého 1 km

l je délka vedení

S_V je vztažený výkon

U_S^2 je sdružená hodnota napěťové hladiny na kterou jsou impedance přepočítávány

• **Přepočet reaktance vedení**

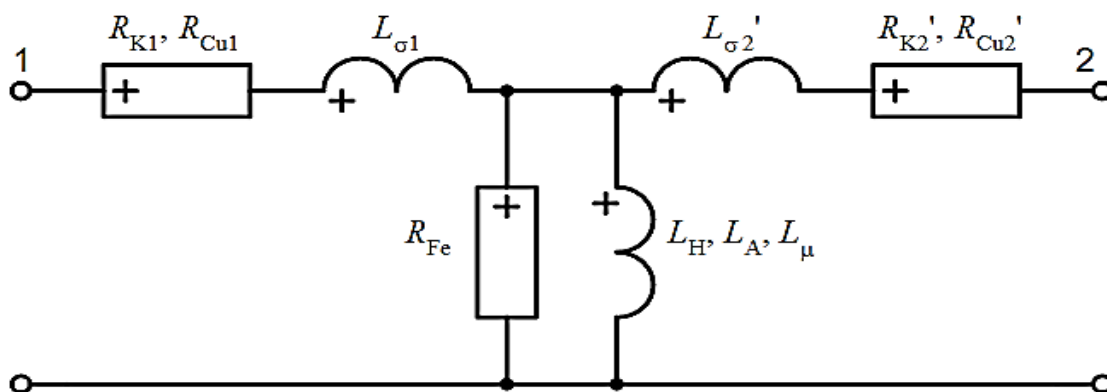
$$x_v = X_{v/km} \cdot l_v \cdot \frac{S_V}{U_S^2} \quad (6.9)$$

Kde x_v je reaktance vedení

l_v je délka vedení

U_S^2 je sdružená hodnota napěťové hladiny na kterou jsou impedance přepočítávány

• **Přepočet transformátorových hodnot**



Obrázek 44 Náhradní schéma transformátoru [20]

Výpočet náhradního schéma transformátoru:

$$z_k = \frac{u_{k\%}}{100} \quad (6.10)$$

$$r_k = \frac{\Delta p_{k\%}}{100} \quad (6.11)$$

$$x_\sigma = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} \quad (6.12)$$

$$g_{Fe} = \frac{\Delta p_{0\%}}{100} \quad (6.13)$$

$$r_{Fe} = \frac{1}{g_{Fe}} \quad (6.14)$$

$$y_G = \frac{i_0}{100} \quad (6.15)$$

$$x_h = \frac{1}{\sqrt{y_G^2 - G_{Fe}^2}} \quad (6.16)$$

$$r_{k1} = r_{k2} = \frac{r_k}{2} \quad (6.17)$$

$$x_{\sigma 1} = x_{\sigma 2} = \frac{x_\sigma}{2} \quad (6.18)$$

Získání poměrných hodnot transformátoru pro GridCal:

$$Z_k = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (6.19)$$

Kde Z_k je impedance nakrátko

$u_{k\%}$ je napětí nakrátko (napětí, při kterém prochází transformátorem jmenovitý proud ve stavu nakrátko) vyjádřeno v procentech v poměru k jmenovitému napětí

U_n^2 je jmenovité napětí na vyšší straně (nebo nižší straně podle hladiny na jaké je síť počítána)

S_n je jmenovitý výkon transformátoru

$$R_k = \frac{p_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (6.20)$$

Kde R_k je odpor vinutí transformátoru

$p_{k\%}$ jsou ztráty nakrátko v procentuální hodnotě (mohou se nazývat rovněž ztráty v mědi)

U_n^2 je jmenovité napětí

$$X_\sigma = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (6.21)$$

Kde X_σ je rozptylová reaktance vnutí trať

Z_k^2 je impedance nakrátko

R_k^2 je odpor vinutí

Podélná část náhradního schématu představuje převažující část impedance transformátoru

$$G_{FE} = \frac{\Delta p_{0\%}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (6.22)$$

G_{FE} je převrácená hodnota odporu (reluktance) příčné větve, která reprezentuje ztráty v magnetickém obvodu

$\Delta p_{0\%}$ jsou ztráty naprázdno

S_n je jmenovitá hodnota výkonu

Vztah mezi primárním a sekundárním vinutím je dán vzorcem:

$$Z_1 = Z'_2 = p^2 \cdot Z_2 \quad (6.23)$$

Kde p^2 je převod transformátoru

Z_1 je impedance primárního vinutí

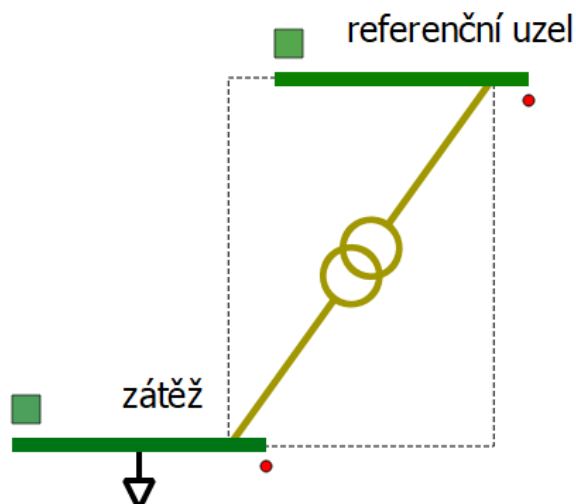
Z'_2 je impedance sekundárního vinutí přepočteného na primární stranu

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (6.24)$$

- **Zpracování přepočtených hodnot v prostředí GridCal**

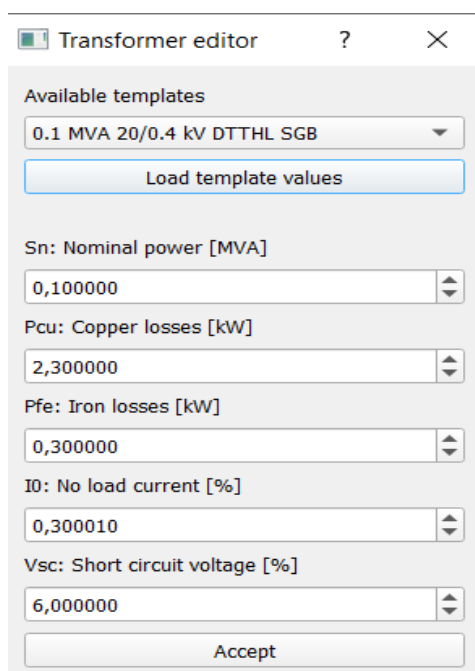
Program GridCal obsahuje knihovny, ve kterých si lze vybrat konkrétní komponenty.

Jejich napěťové hladiny jsou ovšem odlišné od českých, proto jsou zde popsány principy zadávání hodnot a výpočty transformátoru připojeného na 0,4 a 20 kV. Tato napěťová hladina se užívá například v Polsku.



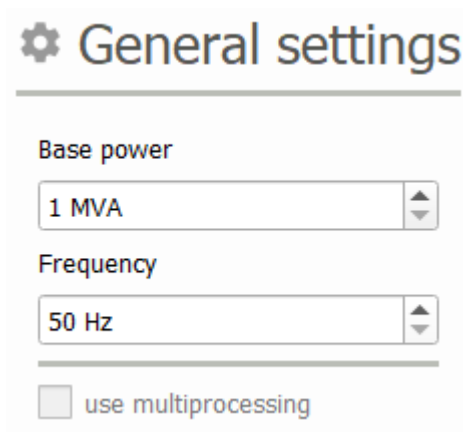
Obrázek 45 Transformátor v prostředí GridCal

Transformátory se v prostředí GridCal generují automaticky (pokud mají spojené uzly odlišnou napěťovou hladinu)



Obrázek 46 Hodnoty zadané do prostředí GridCal

GridCal provádí své výpočty pomocí poměrných hodnot, které jsou přepočítávány přes vztažné hodnoty, jejichž hodnoty lze zvolit:



Obrázek 47 Nastavení frekvence a vztažné hodnoty výkonu

Pomocí vztažné hodnoty výkonu lze dopočítat vztažné poměrné hodnoty transformátoru a sítě:

$$Z_k = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{6}{100} \cdot \frac{20000^2}{100000} = 240 \, \Omega \quad (6.25)$$

$$R_k = \frac{p_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{2,3}{100} \cdot \frac{20000^2}{100000} = 92 \, \Omega \quad (6.26)$$

Kde $p_{k\%}$ jsou ztráty nakrátko

$$P_{k\%} = \frac{P_{cu}}{S_n} \cdot 100 = \frac{2300}{100000} = 2,3\% \quad (6.27)$$

$$r_k = R_k \cdot \frac{S_v}{U_n^2} = 92 \cdot \frac{1000000}{20000^2} = 0,23 \quad (6.28)$$

Kde r_k je poměrná hodnota

S_v je vztažný výkon, který se udává v GridCalu jako base power z obrázku 26

U_n je napětí na vyšší straně transformátoru

$$X_\sigma = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{240^2 - 92^2} = 221,67 \, \Omega \quad (6.29)$$

$$x_\sigma = X_\sigma \cdot \frac{S_v}{U_n^2} = 221,67 \cdot \frac{1000000}{20000^2} = 0,554175 \quad (6.30)$$

Ztráty naprázdno jsou především v magnetickém obvodu

$$G_{FE} = \frac{\Delta p_{0\%}}{100} \cdot \frac{S_n}{U_n^2} = \frac{0,3}{100} \cdot \frac{100000}{20000^2} = 7,5 \cdot 10^{-7} S \quad (6.31)$$

$$g_{FE} = G_{FE} \cdot \frac{U_n^2}{S_v} = 7,5 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{20000^2}{1000000} = 0,0003 \quad (6.32)$$

Kde $\Delta p_{0\%}$ jsou ztráty naprázdno v procentech

$$\Delta P_{0\%} = \frac{P_{fe}}{S_n} = \frac{300}{100000} \cdot 100 = 0,3 \% \quad (6.33)$$

$$B = \frac{I_{0\%}}{100} \cdot \frac{S_n}{U_n^2} = \frac{0,30001}{100} \cdot \frac{100000}{20000^2} = 7,50025 \cdot 10^{-7} S \quad (6.34)$$

$$b = B \cdot \frac{U_n^2}{S_v} = 7,50025 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{20000^2}{1000000} = 0,00030001 \quad (6.35)$$

R [p.u.]	0.23
X [p.u.]	0.554166
G [p.u.]	1e-06
B [p.u.]	1e-06

Obrázek 48 Poměrné hodnoty transformátoru v GridCalu

Podélné hodnoty transformátorů určil program GridCal v souladu s uvedenými výpočty, ovšem u příčných prvků se liší. Přenastavením prostředí GridCalu (výpočetních metod, počtu iterací ani desetinnými místy) se nepodařilo tento problém vyřešit. Proto se v této práci přistoupilo k přepočtu všech hodnot vedení na poměrné hodnoty, s nimiž neměl GridCal sebemenší problémy a které jsou ve všech cvičných příkladech.

6.4 Simulace v prostředí GridCal s reálnými hodnotami

Doposud byly v kapitole 6 rozebírány vstupní hodnoty teoreticky a v předchozích kapitolách byla rozebrán teoreticky princip solární elektrárny, její vliv na síť a normy stanovující hranice napětí a frekvence, výpočty ustáleného stavu pomocí numerických metod, které používá GridCal a mezi nimiž můžeme volit. V této části se diplomová práce zaměřuje na vytvoření simulací za užití všech teoretických znalostí, které jsou popsány výše.

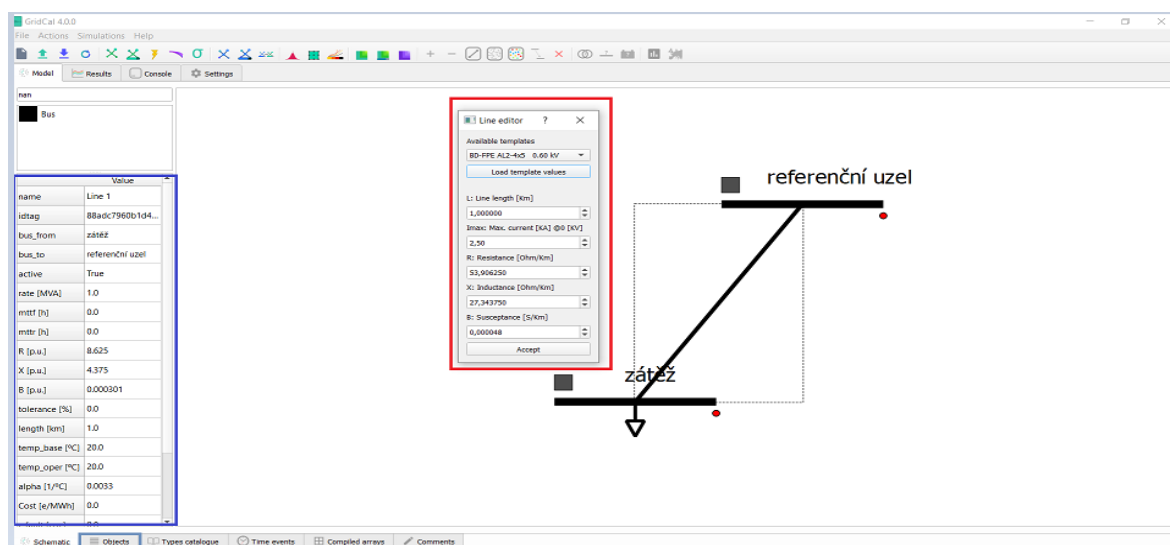
6.4.1 Důležité upozornění před užitím programu GridCal

Program GridCal je zdarma a neustále vycházejí nové verze, které nejen, že nabízejí nové funkce, ale především v nich dochází k opravě chyb. Jak bylo zjištěno v podkapitole (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**), kde se porovnal program PSAT a program GridCal, jejichž výsledky jsou totožné. Z toho vyplývá, že program GridCal pracuje správně, jen je potřeba vyvarovat se chybných částí, které obsahuje. Pro odhalení chybných částí je zapotřebí výpočtu určité části sítě. Pro tuto ukázkou je vybrána síť vn o délce 2000 m a parametry sítě jsou dány dle Tabulka 6. [26]

Výpočet sítě na níž jsou chybné části objasněny:

$$r_v = R_{v/km} \cdot l \cdot \frac{S_V}{U_v^2} = 0,69 \cdot 2 \cdot \frac{1000000}{400^2} = 8,625 \quad (6.36)$$

$$x_v = X_{v/km} \cdot l_v \cdot \frac{S_V}{U_v^2} = 0,35 \cdot 2 \cdot \frac{1000000}{400^2} = 4,375 \quad (6.37)$$



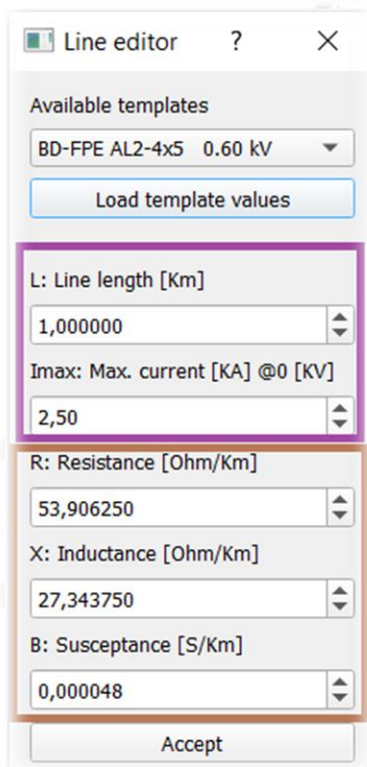
Obrázek 49 Prostředí programu GridCal

Value	
name	Line 1
idtag	88adc7960b1d4...
bus_from	zátěž
bus_to	referenční uzel
active	True
rate [MVA]	1.0
mttf [h]	0.0
mtrr [h]	0.0
R [p.u.]	8.625
X [p.u.]	4.375
B [p.u.]	0.000301
tolerance [%]	0.0
length [km]	1.0
temp_base [°C]	20.0
temp_oper [°C]	20.0
alpha [1/°C]	0.0033
Cost [e/MWh]	0.0
r_fault [p.u.]	0.0

Obrázek 50 Panel obsahující údaje o vedení v poměrných jednotkách

Tento panel vychází z Obrázek 49 nacházejícího se v modrém rámečku. Do tohoto panelu se musí zadat poměrné hodnoty vypočtené ve vzorci (6.40) a (6.41), které se dosadí do zeleného rámečku. Poměrné hodnoty je důležité zadat tímto způsobem a pouze do těchto buněk nebo je zadat tabulkovou formou v položce objects, který se nachází v šedivém obdélníku.

Žlutý rámeček obsahující délku vedení není podstatný a výpočet nikterak neovlivňuje.



Obrázek 51 Parametry vedení vztažené k jednomu kilometru

Na výše uvedeném Obrázek 51 je tabulka line editor, kterou lze vyvolat dvojklikem na úsečku vedení. Hodnoty v hnědém zarámování jsou parametry vedení na kilometr. Tyto hodnoty se nikdy nesmí zadávat do tohoto pole, protože jsou spjaté s hodnotami na Obrázek 50 a mezi nimi probíhá chybný výpočet dle vzorců (6.38) a (6.39), který vede k nesmyslným výsledkům. Hodnoty ve fialovém zarámování představují délku vedení, kterou v tomto poli rovněž nelze uvádět (vede k chybě) a maximální provozní proud, který lze doplnit a který ovlivňuje zbarvení úseček představující linky po provedení výpočtů.

Chybné výpočty GridCalu, které znemožňují užití tabulky na Obrázek 51

$$r_k = R_k \cdot \frac{U_n^2}{S_v} = 53,9062 \cdot \frac{1000000}{22000^2} = 8,624992 \quad (6.38)$$

$$x_\sigma = X_\sigma \cdot \frac{U_n^2}{S_v} = 27,34375 \cdot \frac{1000000}{22000^2} = 4,375 \quad (6.39)$$

6.4.2 Detailní porovnání jednoho dne v každém ročním období

Neměnnými parametry užitými při každé simulaci jsou poměrné hodnoty transformátorů a vedení:

- **Přepočtený transformátor**

Tabulka 8 obsahuje údaje transformátoru, které se přepočtou na poměrné hodnoty vztažené k $S_v = 1000000 \text{ VA}$ (dle Obrázek 47):

$$Z_k = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{4}{100} \cdot \frac{400^2}{100000} = 0,064 \Omega \quad (6.40)$$

$$R_k = \frac{p_k\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{1,7}{100} \cdot \frac{400^2}{100000} = 0,0272 \Omega \quad (6.41)$$

$$X_\sigma = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{193,6^2 - 82,28^2} = 0,05793237437 \Omega \quad (6.42)$$

$$B = \frac{I_{0\%}}{100} \cdot \frac{S_n}{U_n^2} = \frac{2,9}{100} \cdot \frac{100000}{400^2} = 0,018125 \text{ S} \quad (6.43)$$

$$r_k = R_k \cdot \frac{S_v}{U_n^2} = 0,0272 \cdot \frac{1000000}{400^2} = 0,17 \quad (6.44)$$

$$x_\sigma = X_\sigma \cdot \frac{S_v}{U_n^2} = 0,05793237437 \cdot \frac{1000000}{400^2} = 0,36208 \quad (6.45)$$

$$b = B \cdot \frac{U_n^2}{S_v} = 0,018125 \cdot \frac{400^2}{1000000} = 0,0029 \quad (6.46)$$

Transformátor je nahrazen prvkem vedení, u kterého se v GridCalu zanedbává svod (reluktance).

- **Přepočtené vedení v poměrných hodnotách**

Dle vzorců (6.8), (6.9) jsou stanoveny poměrné hodnoty vztažené k $S_v = 1000000 \text{ VA}$ (dle Obrázek 47), pro vedení vn (22 kV) je počítáno pouze s podélnými prvky, na hladině nn je počítáno pouze s činnými odpory vedení. Parametry vedení jsou dány tabulkami (Tabulka 7 a Tabulka 6).

$$r_v = R_{v/km} \cdot l \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,28 \cdot 0,5 \cdot \frac{1000000}{400^2} = 0,875 \quad (6.47)$$

$$x_v = X_{v/km} \cdot l_v \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,38 \cdot 0,5 \cdot \frac{1000000}{400^2} = 1,1875 \quad (6.48)$$

Tabulka 9 Vedení nn použité v simulaci

označení	délka vedení (m)	impedance (Ω)	poměrná hodnota
lv1	150	0,18	0,1125
lv2	105	0,126	0,07875
lv3	102	0,1224	0,0765
lv4	102	0,1224	0,0765
lv5	107	0,1284	0,08025
lv6	200	0,24	0,15
lv7	190	0,361	0,225625
lv8	30	0,057	0,035625
lv9	45	0,0855	0,0534375
lv10	30	0,057	0,035625
lv11	28	0,0532	0,03325
lv12	36	0,0684	0,04275
lv13	42	0,0798	0,049875
lv14	30	0,057	0,035625
lv15	30	0,057	0,035625
lv16	20	0,038	0,02375
lv17	25	0,0475	0,0296875

Tabulka 10 Vedení vn užitá v simulaci

délka vedení [m]	R	XL	poměrná hodnota R	poměrná hodnota XL
500	0,28	0,38	0,875	1,1875

- **Zátěže užitě v simulaci**

Zátěž se získává z typových diagramů ze stránek OTE. [11]

Výpočet zátěže se provádí dle vzorce (6.1).

$$O_h = O_r \cdot \frac{r_h}{\sum_{h=1}^{8760} r_h} = 6811 \cdot \frac{0,58735}{4755,06} = 0,8413kWh \quad (6.49)$$

Tabulka 11 Normalizované hodnoty zákazníka třídy TDD2

datum	hodina dne	hodina v roce	TDD2	výkon (kWh)
01.02.2021	1	745	0,58735	0,84130183
01.02.2021	2	746	0,70459	1,009232752

Tabulka 12 Lineárně proložená zátěž v pětiminutových intervalech

datum	výkon (kWh)
01.02.2021 0:00	0,855296
01.02.2021 0:05	0,86929
01.02.2021 0:10	0,883285
01.02.2021 0:15	0,897279
01.02.2021 0:20	0,911273
01.02.2021 0:25	0,925267
01.02.2021 0:30	0,939262
01.02.2021 0:35	0,953256
01.02.2021 0:40	0,96725
01.02.2021 0:45	0,981244
01.02.2021 0:50	0,995239
01.02.2021 0:55	1,009233
01.02.2021 1:00	1,005726

Zátěže v pětiminutových intervalech jsou využity k výpočtům serial power flow pro jeden den. Napěťové hodnoty vyjádřené v období jednoho týdne jsou v hodinovém intervalu. Pro výpočet jsou využity typové normalizované diagramy. Pro velkou změnu zátěže byla vybrána zátěž třídy TDD8, která představuje pouliční osvětlení. Pouliční osvětlení má více možností spínání, které je buď řízené časem nebo z monitoringu reálných úrovní denního osvětlení. Z typových diagramů máme přesné údaje o časech spínání osvětlení, které spíná postupně, právě kvůli jeho vlivu na síť a z údajů ze solární elektrárny je vidět, jaké bylo osvětlení v okamžiku sepnutí pouličních lamp a jaký byl výstupní výkon elektrárny v okamžiku sepnutí osvětlení.

- *Údaje solární elektrárny užitá v simulaci*

Především nás zajímá výstupní výkon střídače, který je ryze činný.

K dispozici pro tuto práci jsou výstupní výkony měřené průběžným měřením v pětiminutových intervalech a týdenní výstupní údaje měřené v hodinových intervalech. V příloze jsou přidány mnohé údaje solární elektrárny, které jsou spíše zajímavostí a této práci se přímo netýkají.

Tabulka 13 Huawei SUN2000-33KTL-A, hodnoty výkonů pro jeden vybraný den

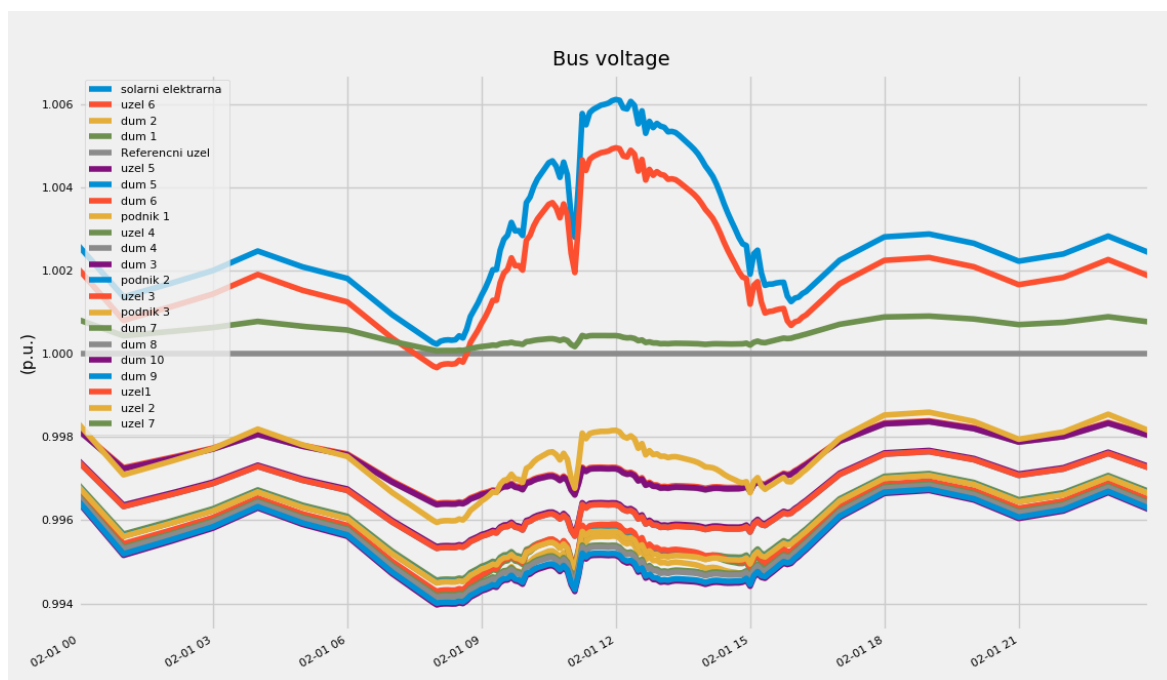
Date	Power AC [W]	Power AC [W]	Power AC [W]	celkový výkon
26.01.2021 0:00	0	0	0	0
26.01.2021 1:00	0	0	0	0
26.01.2021 2:00	0	0	0	0
26.01.2021 3:00	0	0	0	0
26.01.2021 4:00	0	0	0	0
26.01.2021 5:00	0	0	0	0
26.01.2021 6:00	0	0	0	0
26.01.2021 7:00	0	0	0	0
26.01.2021 8:00	67,73	85,92	99,15	252,8
26.01.2021 9:00	1436,63	1434,63	1473,07	4344,33
26.01.2021 10:00	3963,68	3567,18	3734,85	11265,71
26.01.2021 11:00	2629,52	2602,69	2664,93	7897,14
26.01.2021 12:00	1074,42	1151,97	1196,13	3422,52
26.01.2021 13:00	779,95	886,77	923,43	2590,15
26.01.2021 14:00	768,33	893,16	921,52	2583,01
26.01.2021 15:00	427,32	545,61	570,17	1543,1
26.01.2021 16:00	163,27	238,03	261,64	662,94
26.01.2021 17:00	0,15	200	17,63	217,78
26.01.2021 18:00	0	0	0	0
26.01.2021 19:00	0	0	0	0
26.01.2021 20:00	0	0	0	0
26.01.2021 21:00	0	0	0	0
26.01.2021 22:00	0	0	0	0
26.01.2021 23:00	0	0	0	0
27.01.2021 0:00	0	0	0	0

Tabulka 14 Změřené hodnoty výkonů v pětiminutových intervalech

čas	AC power 1	AC power 2	AC power 3	
10:00	99,56	165,75	165,09	430,40
10:05	95,15	159,60	163,40	418,15
10:10	149,45	218,14	218,18	585,77
10:15	190,50	265,24	259,59	715,33
10:20	119,03	186,83	186,89	492,75
10:25	176,21	250,20	246,09	672,50
10:30	133,23	203,57	202,72	539,52
10:35	92,53	157,80	158,79	409,12
10:40	210,32	285,90	279,22	775,44
10:45	365,99	461,70	439,65	1267,34
10:50	263,62	349,53	336,51	949,66
10:55	243,65	324,15	315,96	883,76

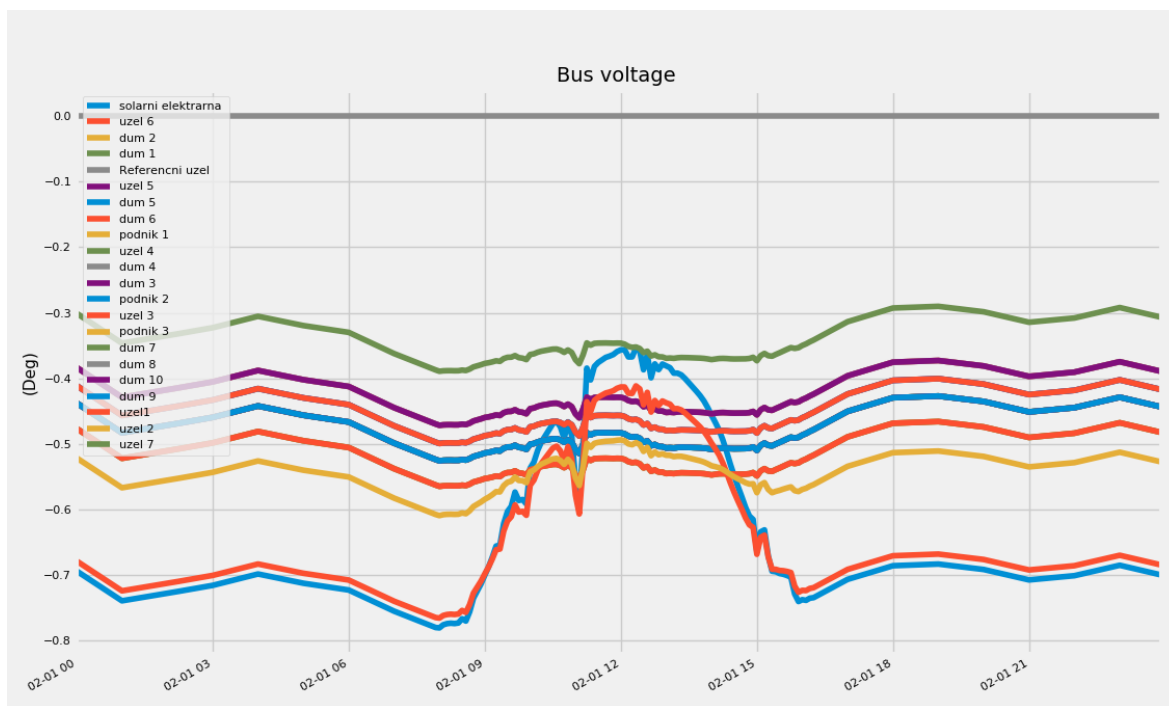
6.4.3 Vliv solární elektrárny v zimní období

Týden, který jsem zvolil je od 1.2.2021 do 7.2.2021, z tohoto týdne je nejdříve podrobně popsán první den.



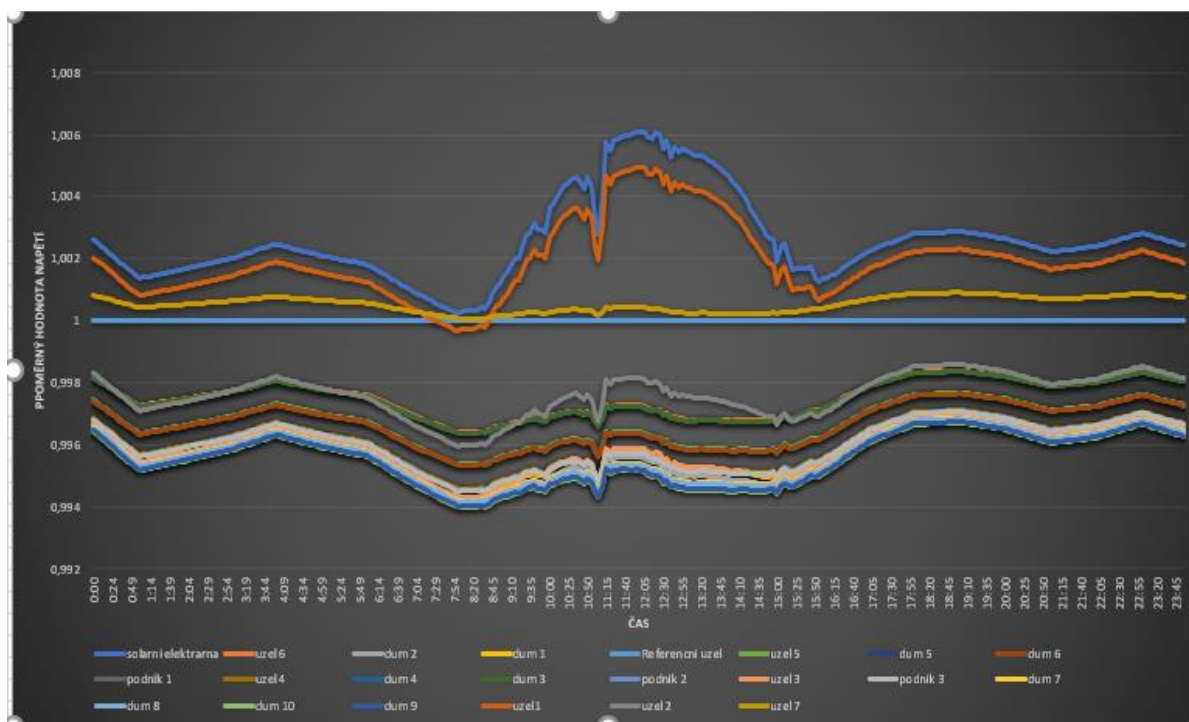
Obrázek 52 Výsledný graf (serial power flow, ustálený stav napětí v čase) simulace generovaná programem GridCal

Graf je nepřehledný pro přehlednost grafů budou následující grafy vypracovány v programu excel.



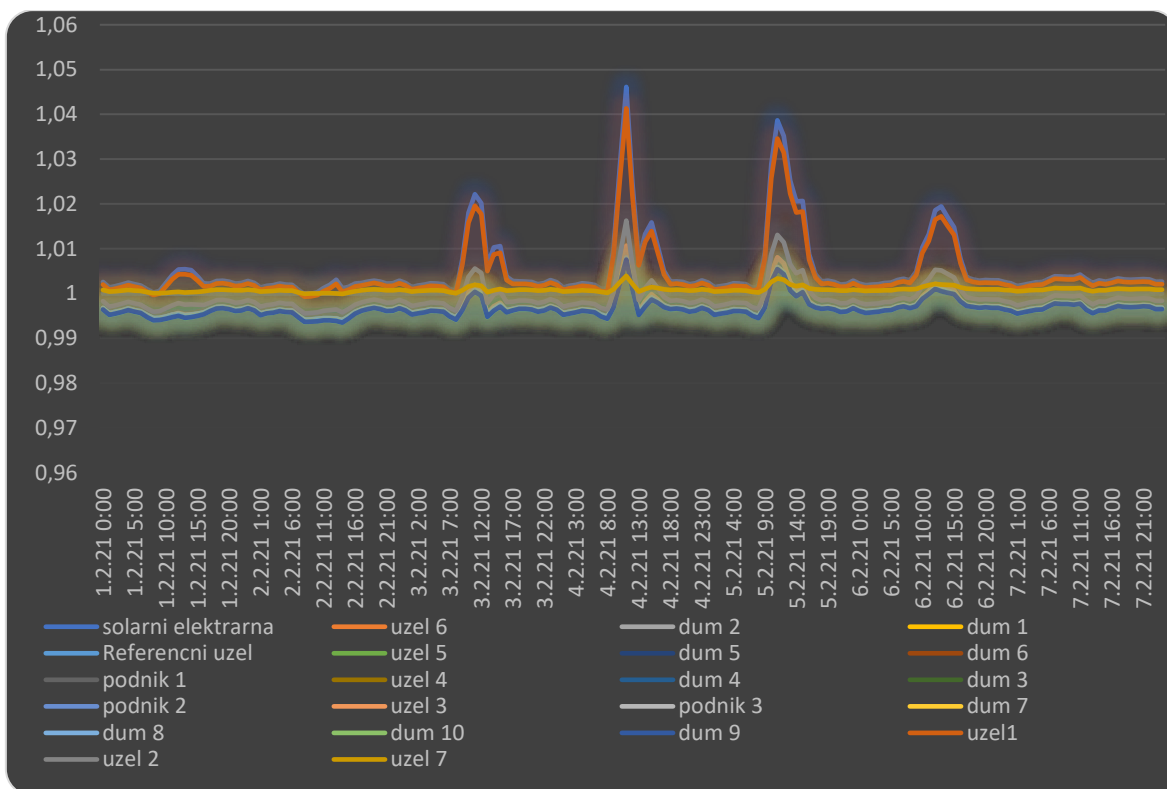
Obrázek 53 Graf změn úhlu napětí

Výše uvedený graf znázorňuje informaci o úhlu napětí v jednotlivých uzlech sítě.



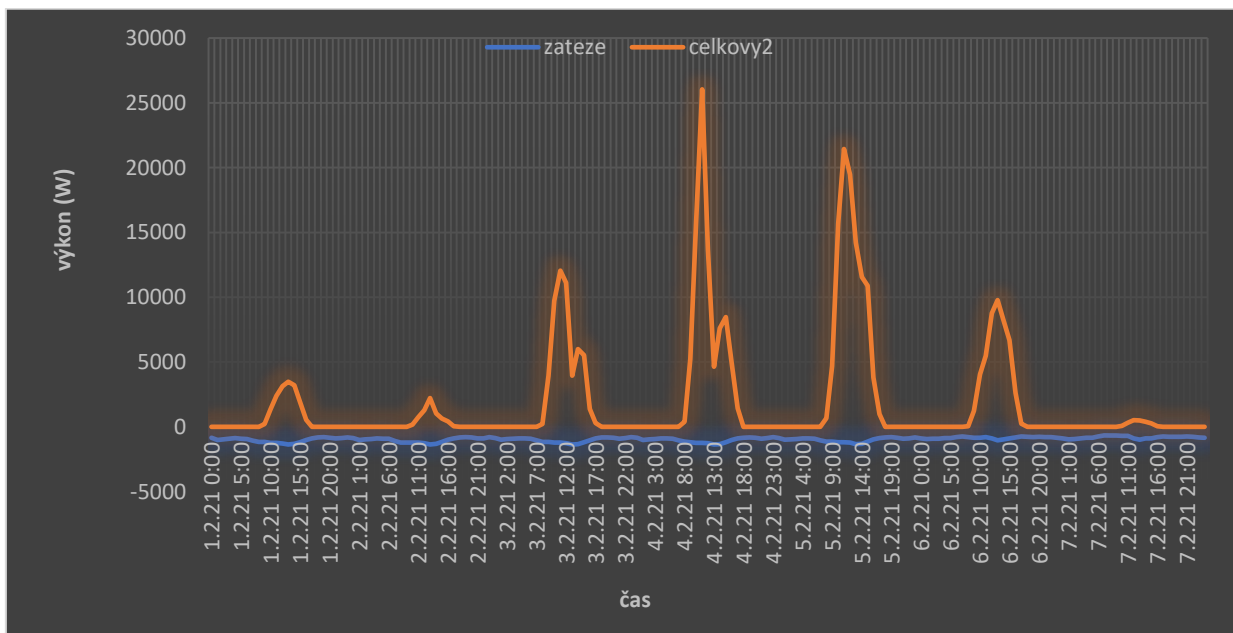
Obrázek 54 Ustálená hodnota napětí v uzlech sítě během 01.02.2021

Z grafu lze vidět, že v daný den byly splněny podmínky normy ČSN EN 50160, které stanovují stálou hodnotu napětí v mezích $U_n \pm 10\%$.



Obrázek 55 Hodnota napětí v uzlech sítě 1-7.2.2021

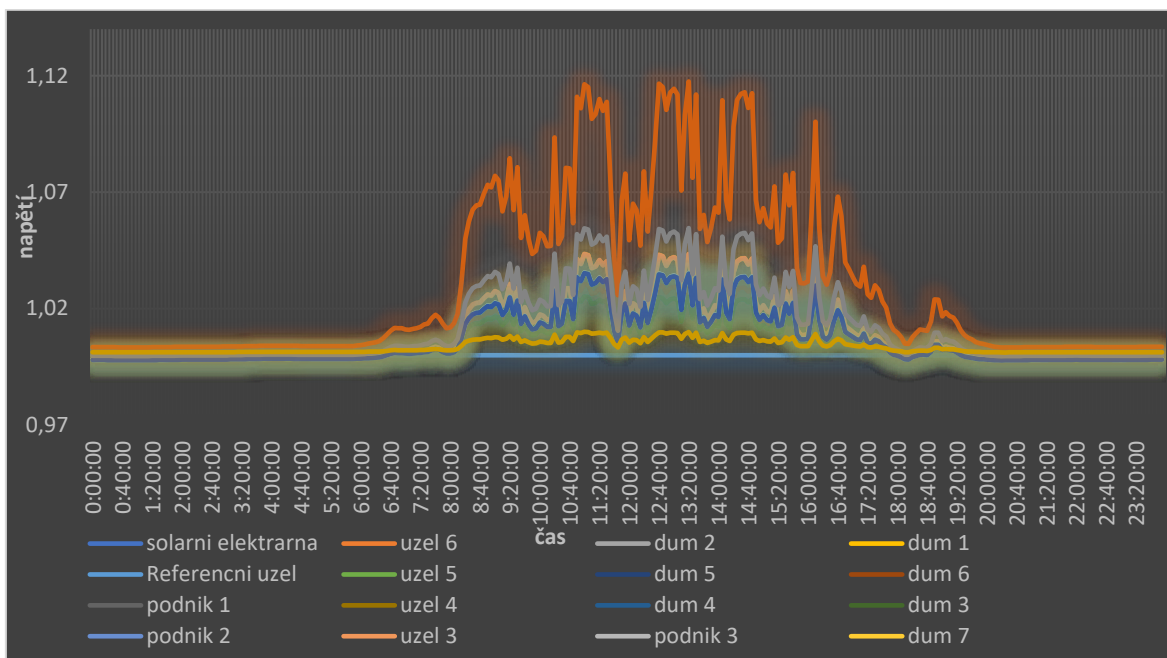
Na Obrázek 55 je graficky znázorněné napětí v závislosti na čase. Nejvyšší přepětí v síti vzniklo odpoledne 4.2.2021, kdy solární elektrárna dosahovala nejvyšší produktivity z celého týdne, jak je vidět z Obrázek 56.



Obrázek 56 Výstupní výkon solární elektrárny v období 1-7.2.2021

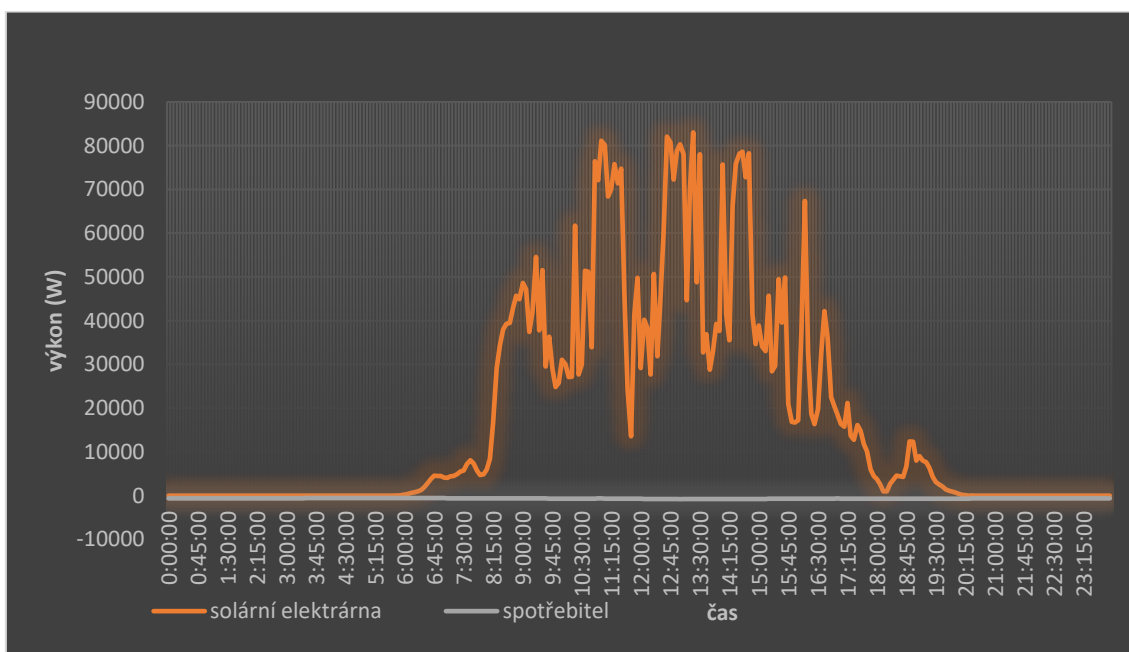
6.4.4 Vliv solární elektrárny v jarním období

Zvolený týden je od 1.5.2020 do 7.5.2020, z tohoto týdne je nejdříve podrobně popsán první den.



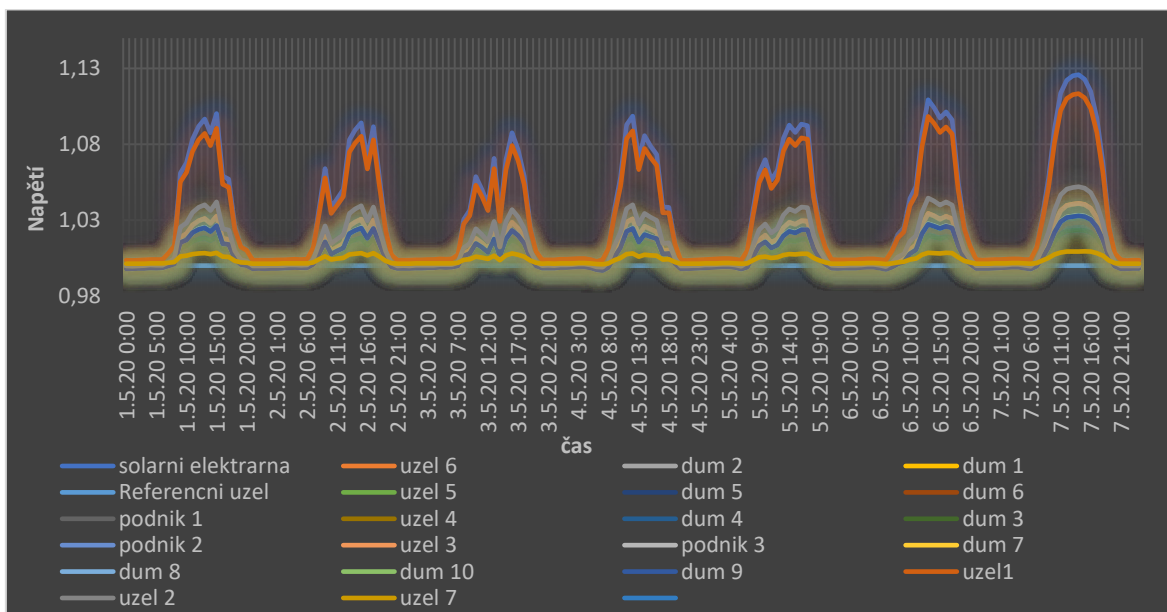
Obrázek 57 Hodnota napětí v uzlech sítě 1.5.2019

Napětí v blízkosti solární elektrárny se blíží maximálním hodnotám přepětí v rozmezí 10 až 15 hod. Pro stabilitu sítě a udržení napětí v patřičných mezích by napomohla schopnost střídače dodávat jalový výkon.



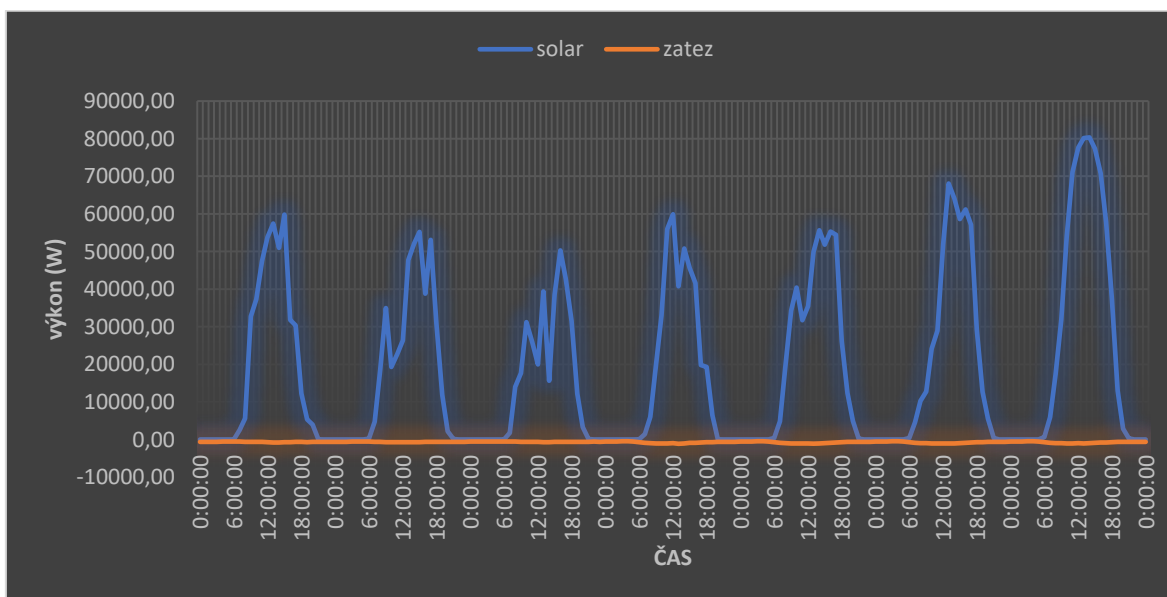
Obrázek 58 Výstup solární elektrárny

Výstup solární elektrárny je velice proměnlivý a tomu odpovídá její vliv na síť, dle Obrázek 57. Výkon solární elektrárny vzrostl, zatímco spotřeba spotřebitele třídy TDD2, který představuje jednotlivé spotřeby klesla (spotřebitel užívá hybridního vytápění, které v jarním období nevyužívá). Důsledkem čehož se síť nachází na hraničních hodnotách přepětí.



Obrázek 59 Hodnota napětí v prvkách sítě 1-7.5.2020

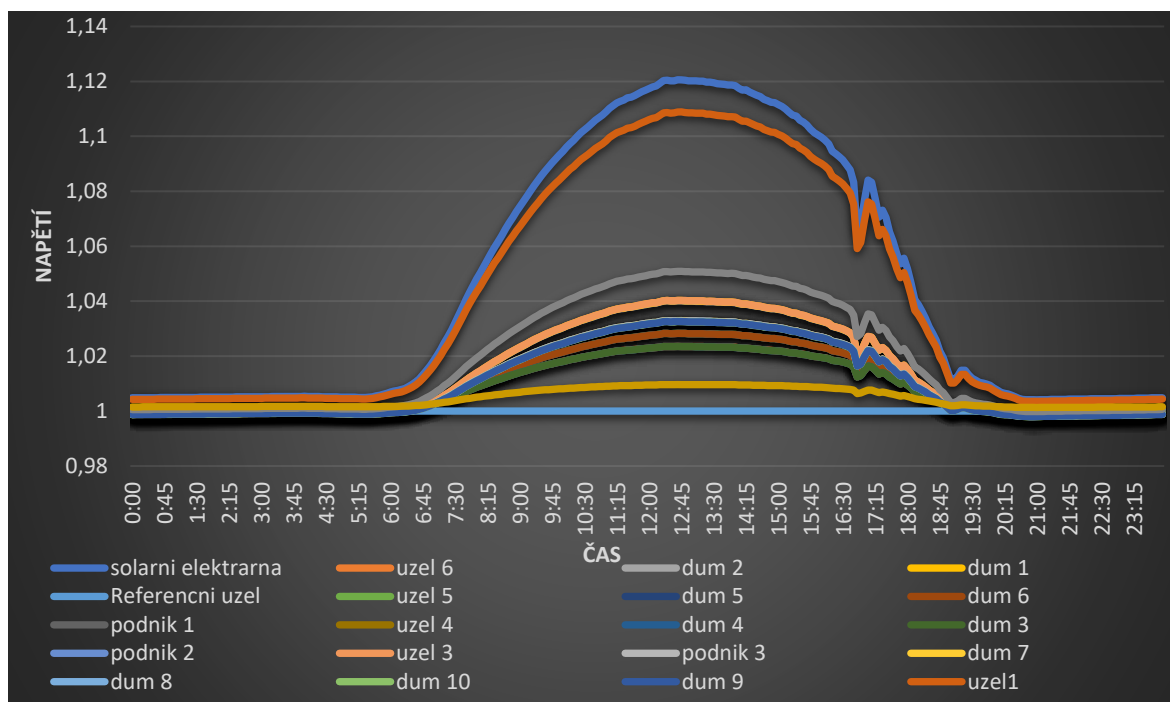
Z grafu znázorňujícího poměry v síti v jarním týdnu na Obrázek 60 je patrné, že k nejvyššímu přepětí došlo 7.5.2020 mezi 11 a 16 hodinou. Přibližně po dobu 2 hodin.



Obrázek 60 Výstupní výkon solární elektrárny

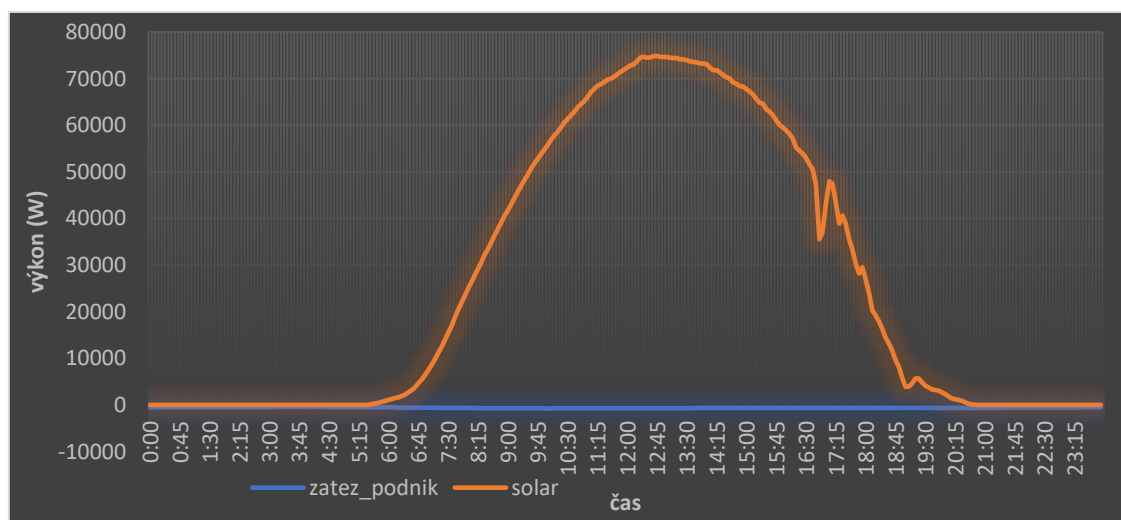
6.4.5 Vliv solární elektrárny v letním období

Týden, který jsem zvolil je od 1.8.2020 do 7.8.2020, v první části bude podrobně popsán první den.

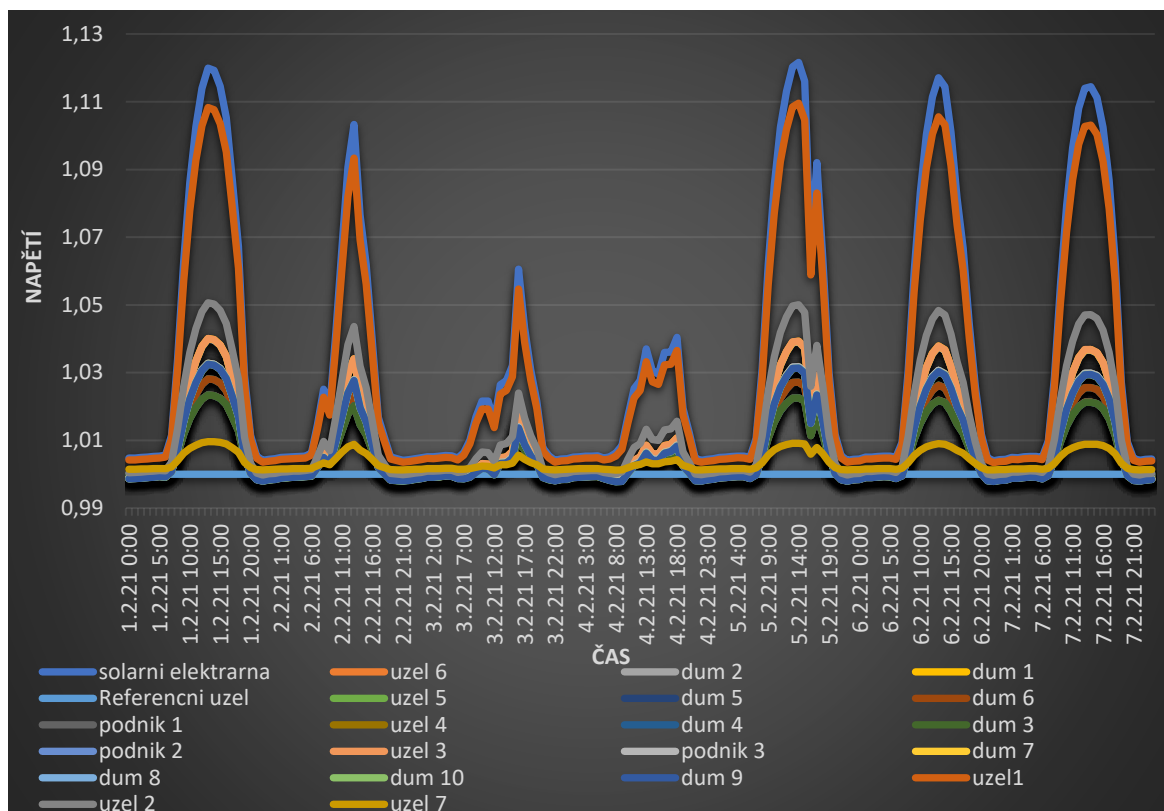


Obrázek 61 Napěťové poměry v síti 1.8.2020

Z Obrázek 61 je možné vidět, že v lokalitě solární elektrárny bylo po většinu dne počasí s nízkou oblačností, to lze usuzovat hladkým průběhem napětí a rovněž hladkým průběhem dodávaného výkonu dle Obrázek 62. Přepětí přesahující povolenou normu trvá od půl desáté do čtyř hodin odpoledne, je důležité si uvědomit, že toto přepětí se nachází v těsné blízkosti solární elektrárny a jeho vliv na samotné spotřebitele je v tolerančních mezích $\pm 10\%$.

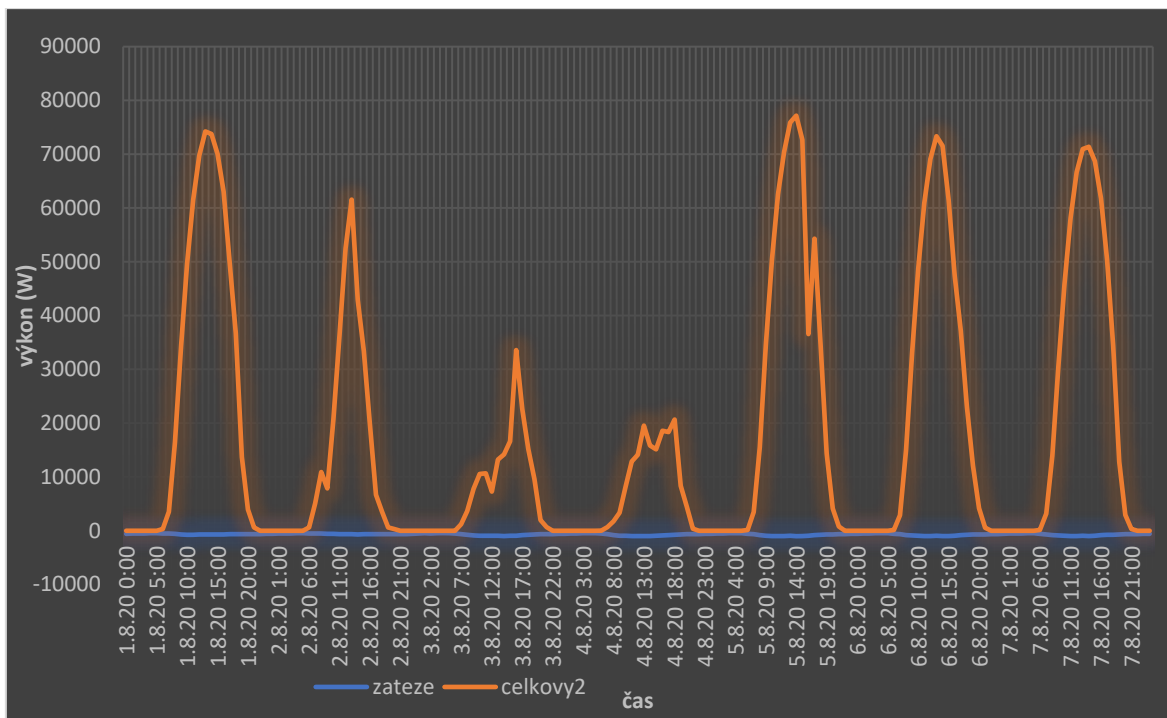


Obrázek 62 Výkon dodávaný solární elektrárnou dne 1.8.2020



Obrázek 63 Napět'ové poměry v distribuční soustavě od 1-7.8.2020

Na Obrázek 63 je patrné, že k přepětí dochází často v blízkosti solární elektrárny v letním období často, lze se s ním vyrovnat regulací výstupní energie nebo ukládáním energie, což se v širším měřítku děje v podobě přečerpávajících elektráren u přenosových sítí pro solární elektrárnu by bylo vhodné část energie uložit do bateriového systému. Je možné rovněž použít zdvojené vedení v blízkosti solární elektrárny nebo nahradit stávající 120 mm^2 průřez vedení za vedení s větším průřezem 150 mm^2 . Lze rovněž použít střídač, který dodává do sítě jalovou energii, a který by tímto způsobem reguloval efektivní hodnotu sdruženého napětí.

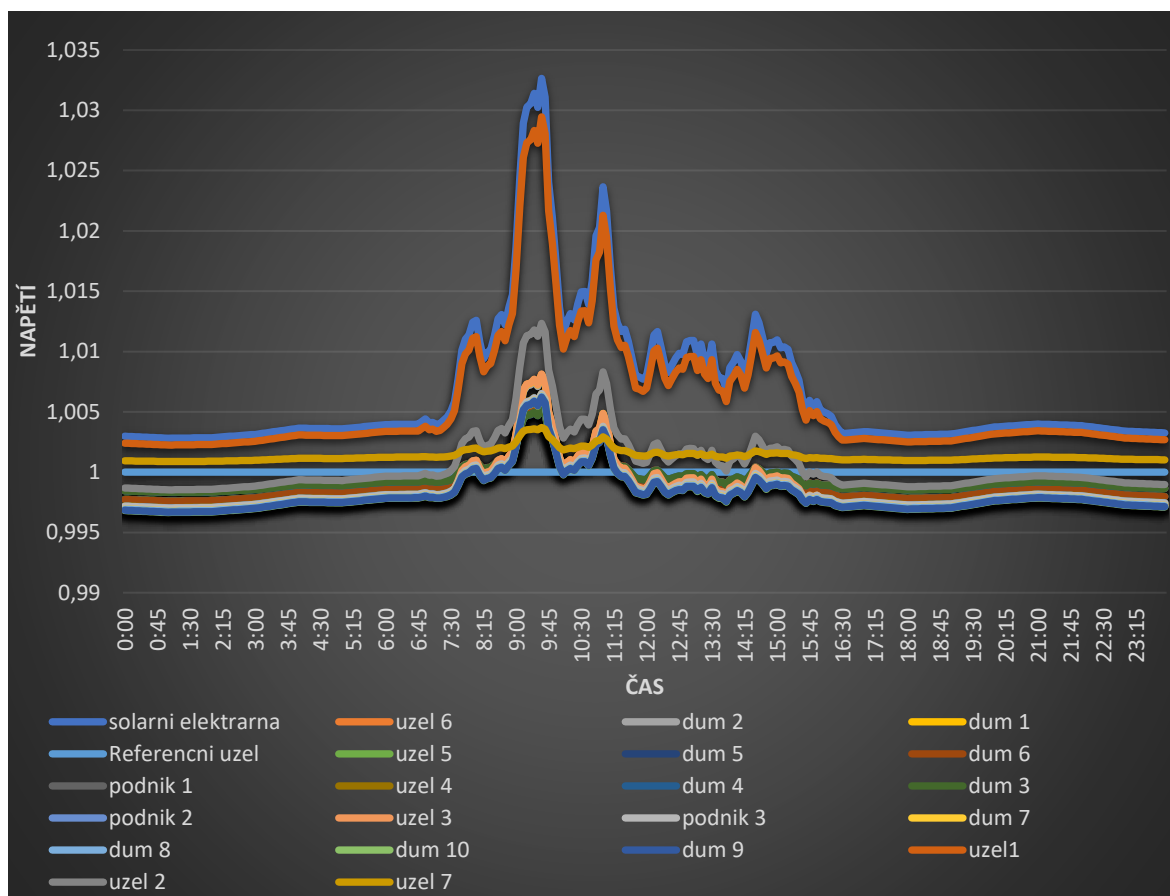


Obrázek 64 Výkon a zátěž jednoho odběratele dodávaného do distribuční sítě od 1-7.8.2020

Porovnáme-li maximální hodnotu výkonu dodávaného v letním období proti výkonu dodávanému v zimním období, kdy jeho maximální hodnota dosahovala 25000 W. Letní maximální výkon je téměř 3,2násobkem zimního.

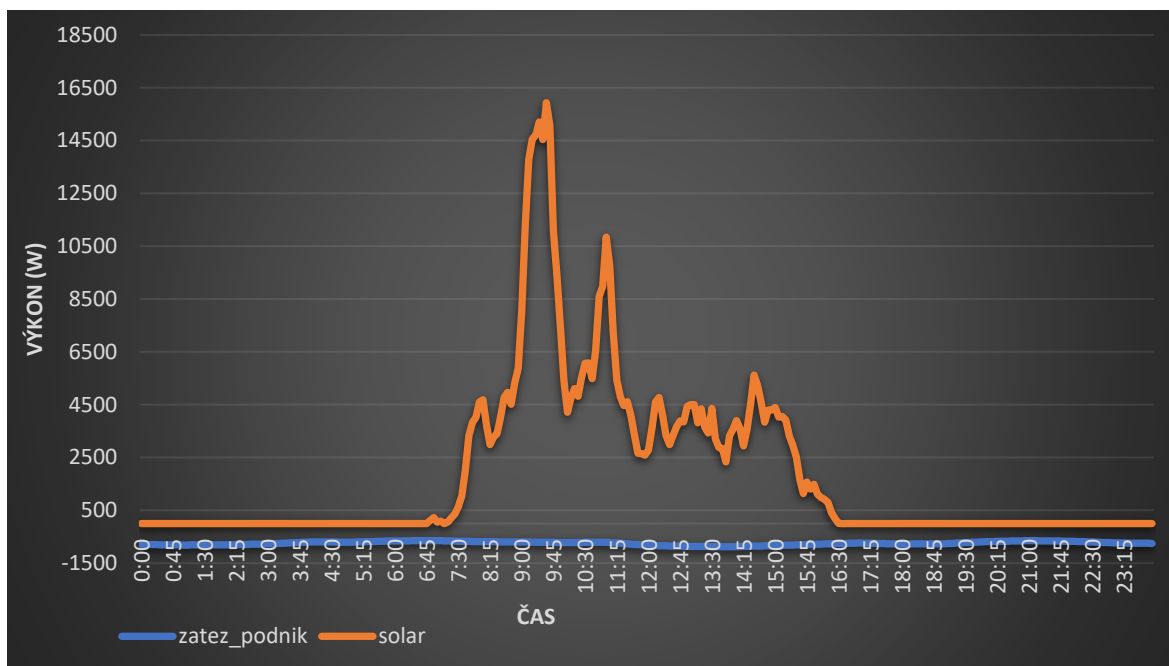
6.4.6 Vliv solární elektrárny v podzimním období

Pro toto období jsem zvolil týden od 1.11.2020 do 7.11.2020, z tohoto týdne nejdříve podrobně popíši první den (1.11.2020).



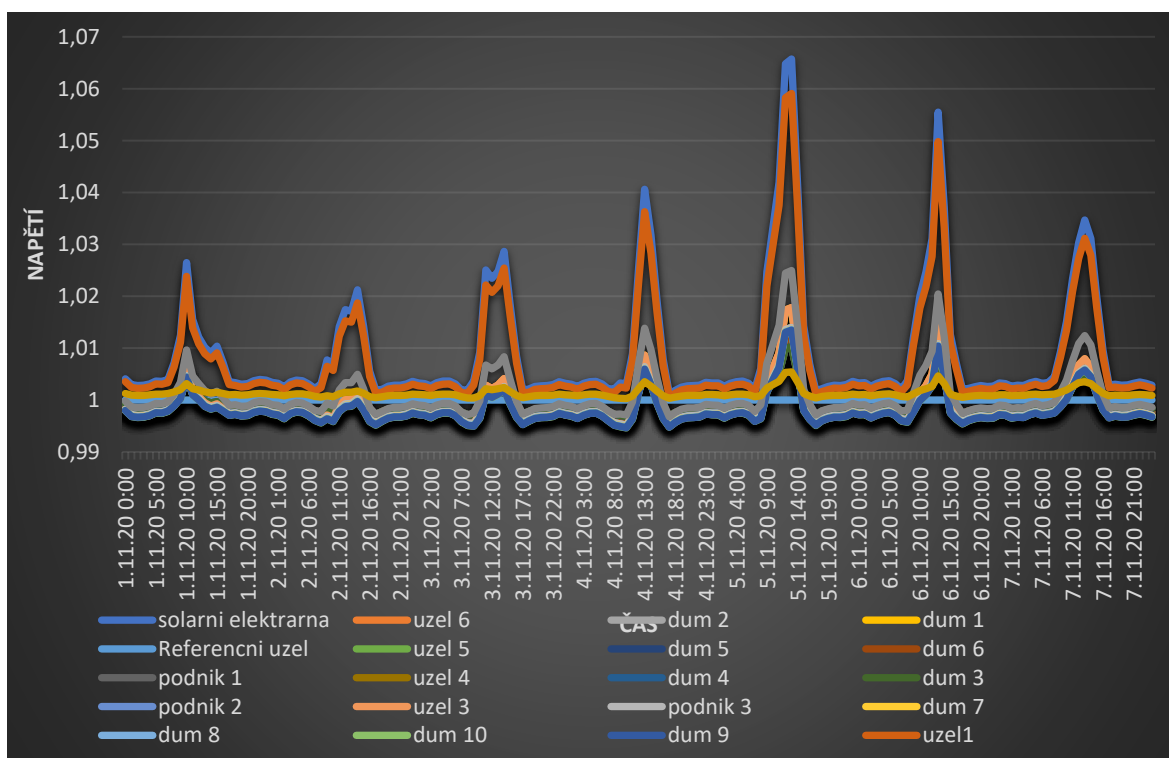
Obrázek 65 Napěťové poměry v síti dne 1.11.2020

V podzimním období došlo opět k poklesu napětí v okolí solární elektrárny vlivem snížení generovaného výkonu.

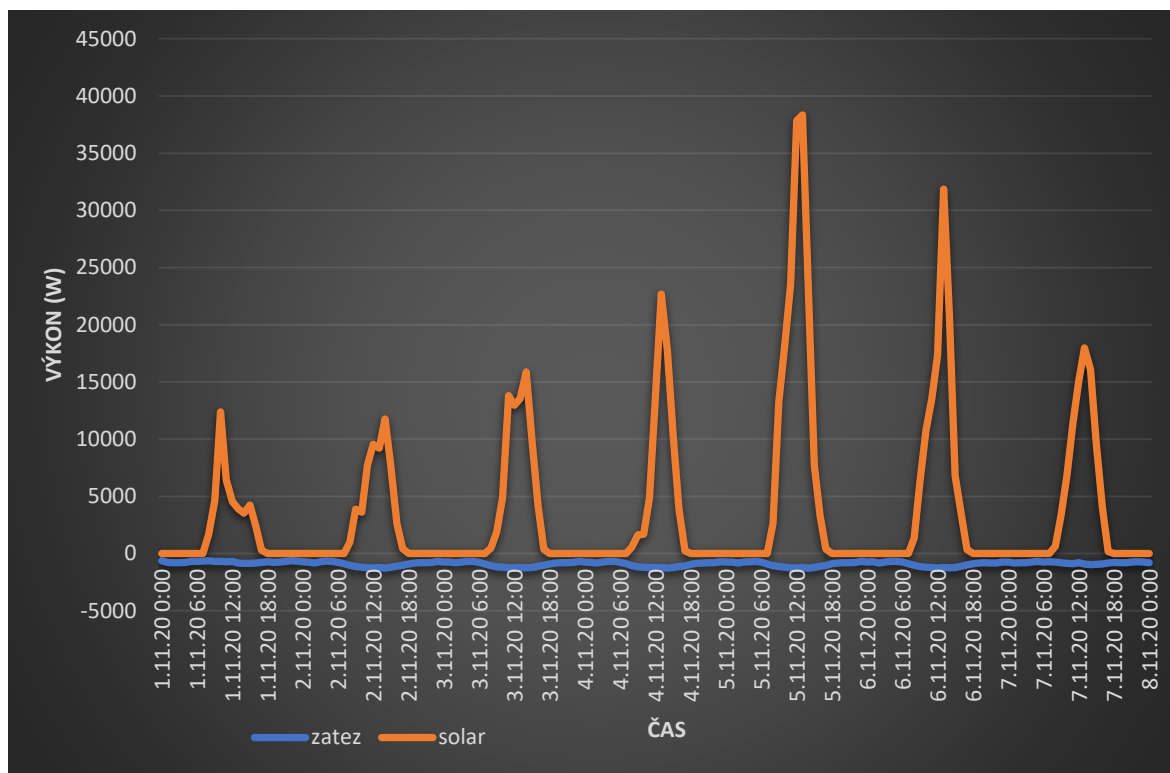


Obrázek 66 Výstupní výkon a zátěž 1.11.2020

V podzimním období se dle očekávání snížil generovaný výkon solární elektrárny.



Obrázek 67 Napěťové poměry v distribuční soustavě od 1-7.11.2020

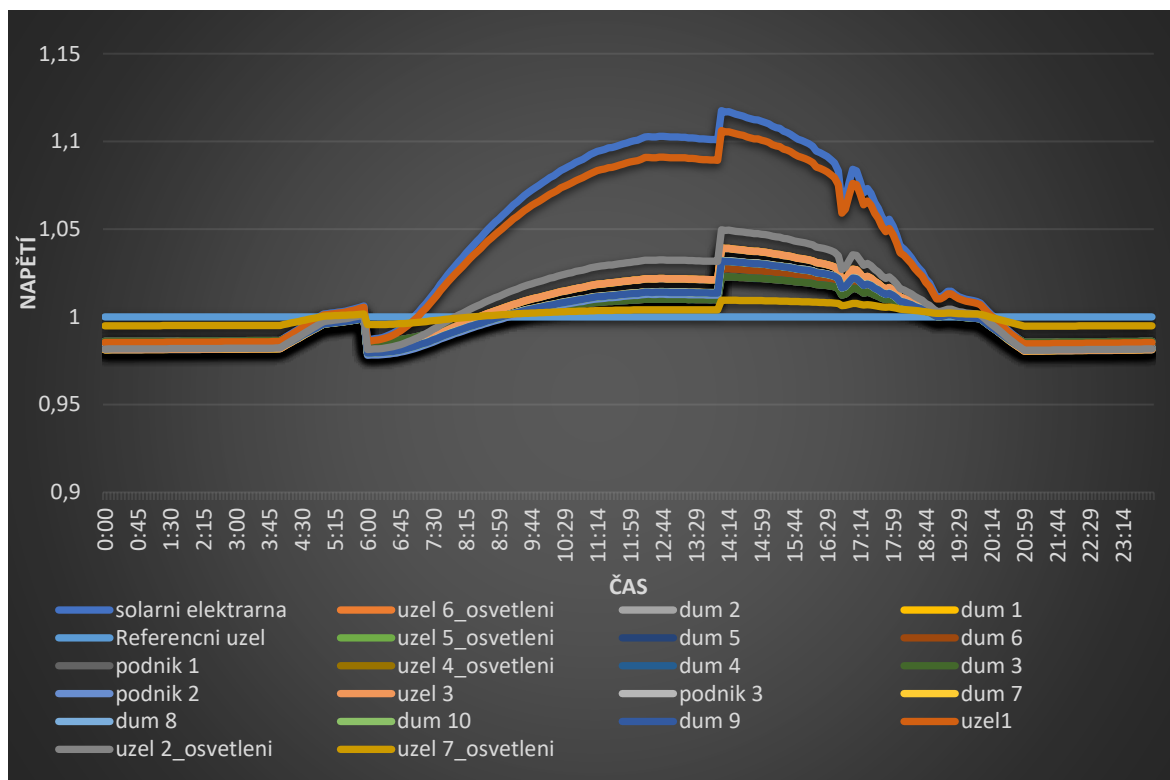


Obrázek 68 Výstupní výkon a zátěž 1-7.11.2020

6.4.7 Simulace prudkých změn činného výkonu v okolí malého nesynchronního výrobního bloku

Změny zatížení doposud představovali pouze zákazníci s integrálním měřením (pouze firmy a domácnosti), následující zatížení bude rozšířeno o zákazníka třídy TDD8, které představuje pouliční osvětlení. Jako jistící prvek byl zvolen jistič o hodnotě 40 A.

Pro simulaci prudkých změn činného výkonu i v hodinách, kdy není sepnuté pouliční osvětlení, byla jako zátěž zvolena velká odporová pec sloužící k tavení kovů. Tato pec je umístěna ve schématu v podniku 2 (zvýší jeho odběr). V této peci se tvoří umělecké odlitky z hliníku, které dosahují hmotnosti až 100 kg a pro roztavení tohoto množství kovu je zapotřebí pece o příkonu 33,996 kW. [21]

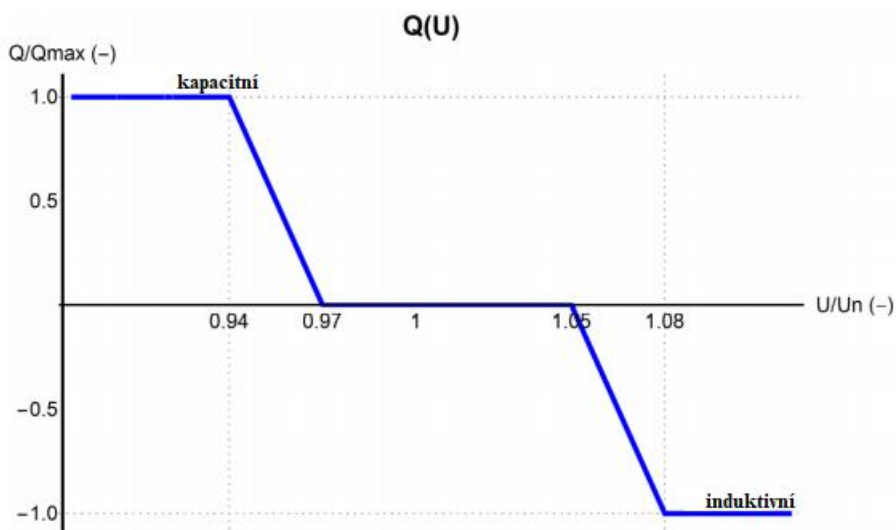


Obrázek 69 Napěťové poměry v distribuční síti dne 1.8.2020

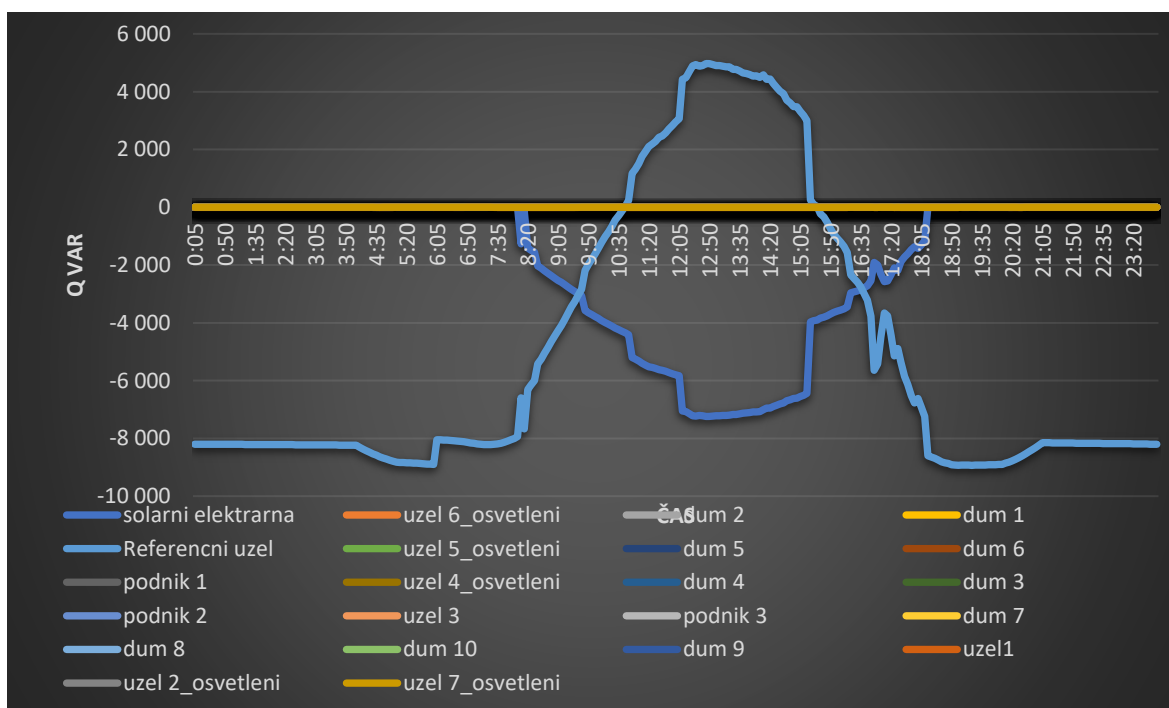
Od šesté hodiny ranní do druhé hodiny odpolední je používaná tavná pec a její vliv je znatelný na Obrázek 69. Vliv pece působí na síť v odpoledních hodinách kladně a udržuje síť v mezích stability, ovšem po druhé hodině odpolední jsou meze opět překonány, proto simulace na Obrázek 71 obsahuje střídač dodávající nejen činný, ale i jalový výkon, díky kterému ponížíme napětí na povolenou mez. V našem případě přepětí sítě způsobuje sama solární elektrárna a tu jako takovou lze omezit řídicím úhlem spínání spínacích součástek střídače. [22]

$$Q = 0,484 \cdot P_{vystup} \quad (6.50)$$

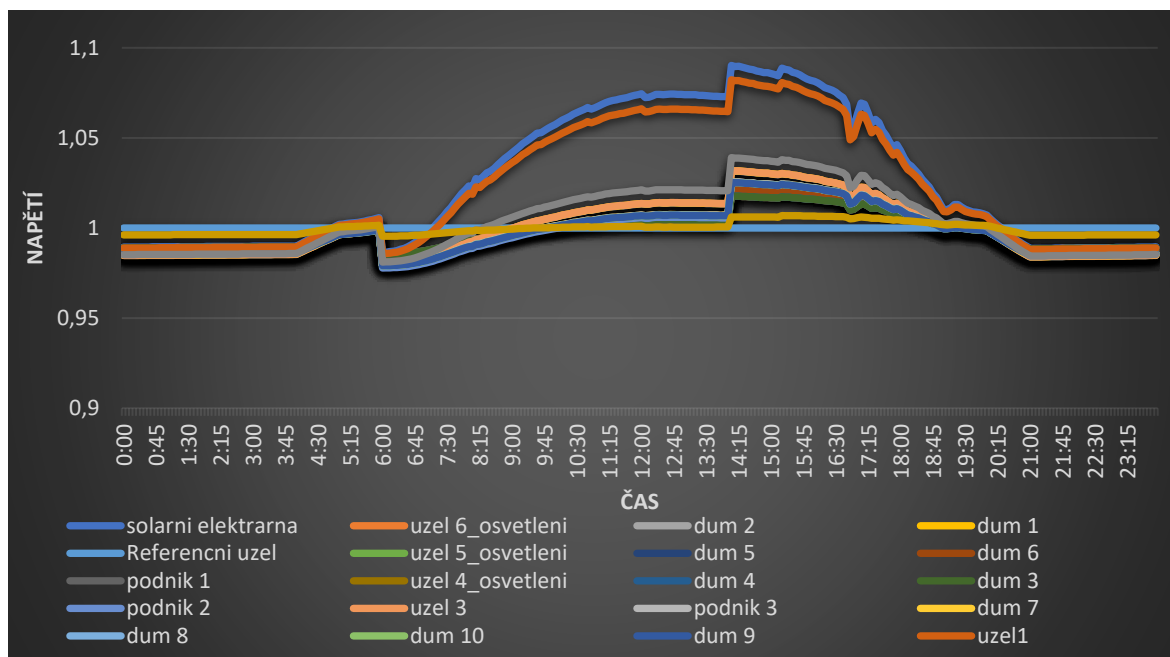
Q(U) regulace je započata hodnotou $0,97 U_n$ pro kapacitní charakter a $1,05 U_n$ pro induktivní charakter. Pokud nedodává solární elektrárna energii do distribuční sítě, má velice proměnný výstupní výkon, proto musí být regulátor dostatečně rychlý, aby výrobná nezhoršovala kvalitu napětí. [22]



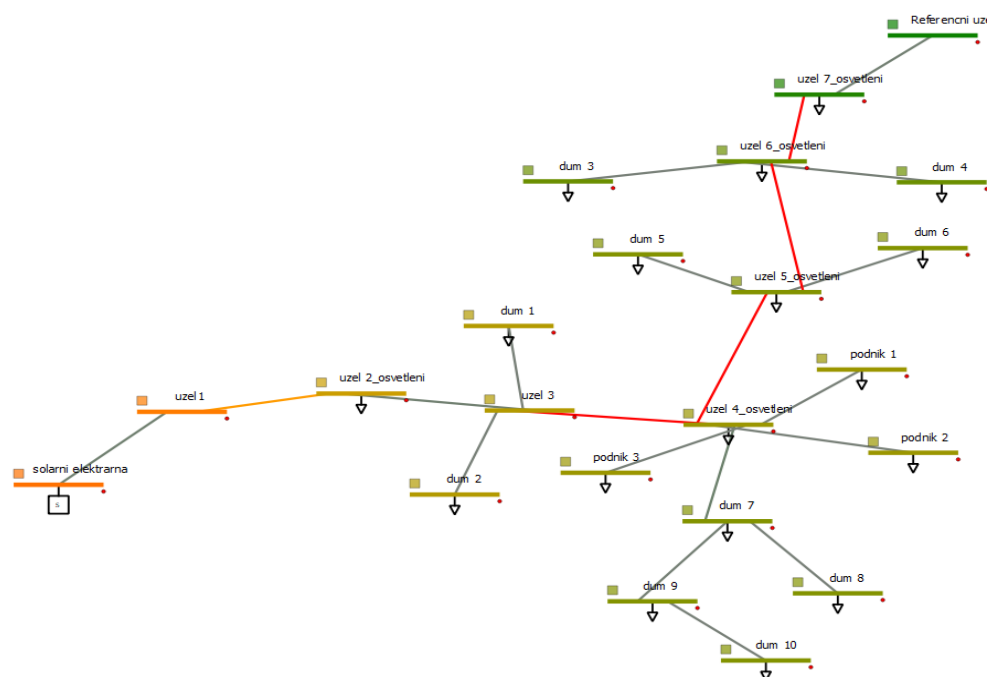
Obrázek 70 Q(U) charakteristika společnosti ČEZ [23]



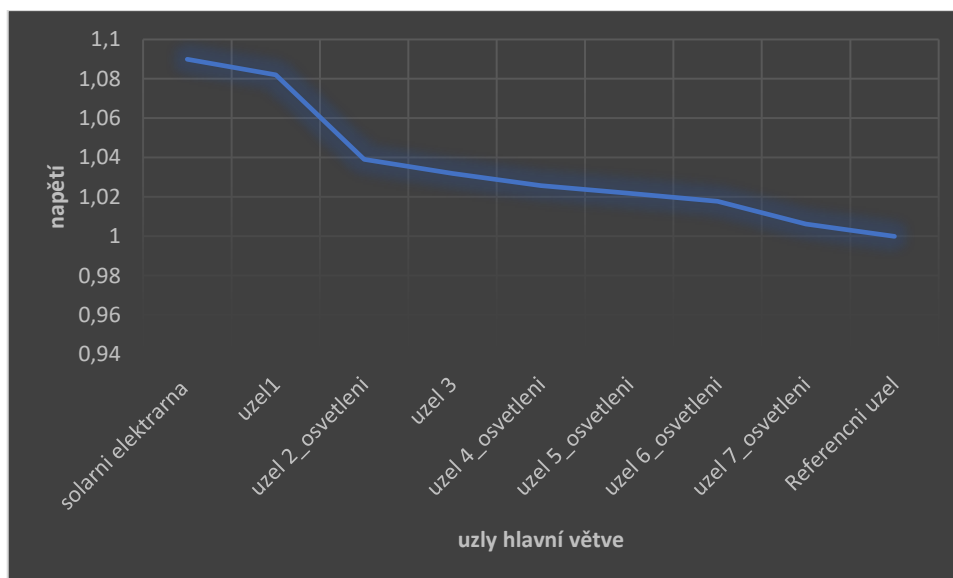
Obrázek 71 Jalový výkon procházející distribuční soustavou dne 1.8.2020



Obrázek 72 Napět'ové poměry v distribuční síti dne 1.8.2020 za použití Q(U) regulace
 Q(U) regulace je vytvořena na základě výpočtů v programu excel a se zvyšujícím se přepětím roste induktivní výkon, který je dodáván solární elektrárnou. Důležité je, že Q(U) regulací došlo k poklesu napětí do normou povolených mezí.

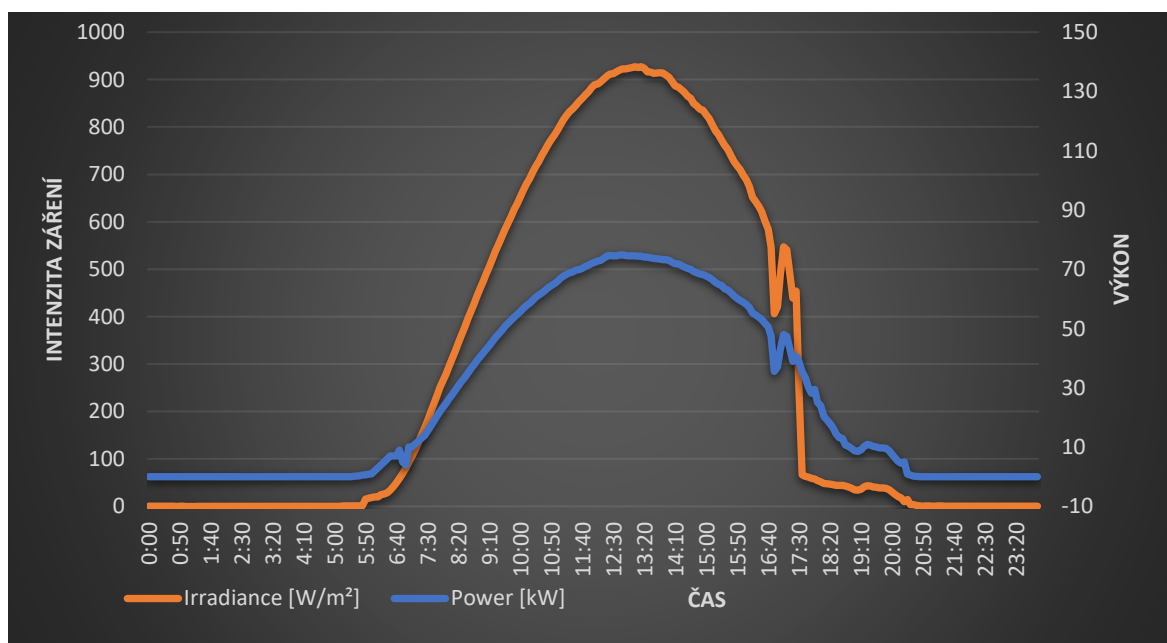


Obrázek 73 Schéma obsahující pouliční osvětlení podél hlavní komunikace



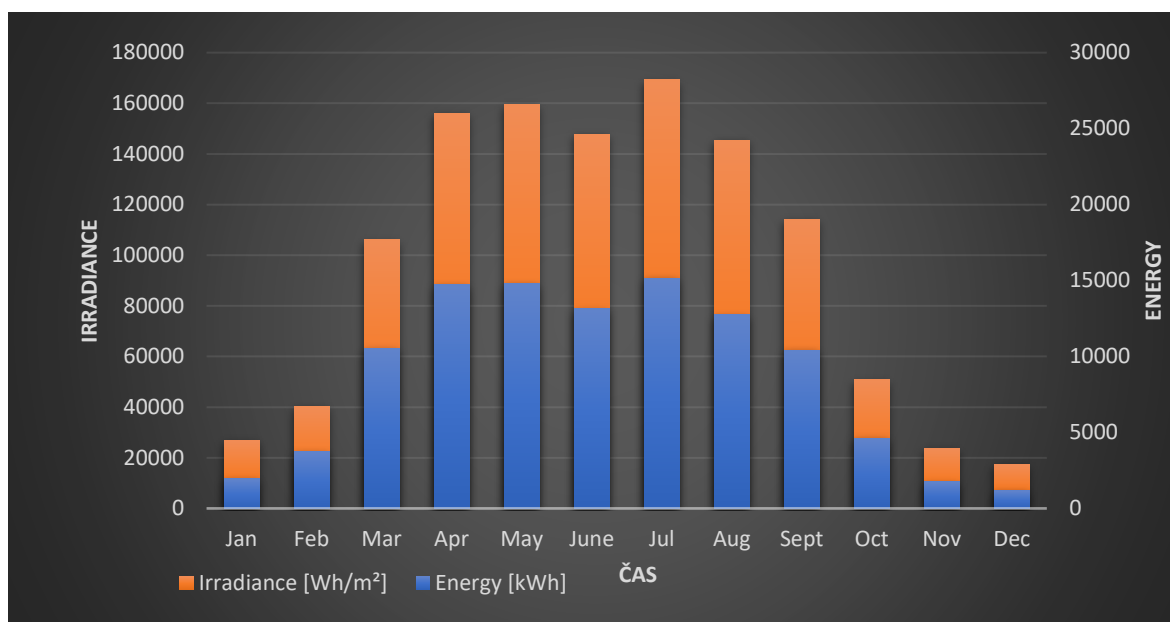
Obrázek 74 Napětí v uzlech hlavní napájecí větve

Z power (load) flow analýzy vyplývá, že největší přepětí vzniká na solární elektrárně a s rostoucí vzdáleností od solární elektrárny přepětí klesá.



Obrázek 75 Graf vyhodnocení intenzity záření a výstupního výkonu dne 1.8.2020

Z Obrázek 75 uvedeného grafu je vidět, že výstupní výkon solární elektrárny má podobný tvar jako dopadajícího slunečního záření, což je zřejmé, ale právě intenzita slunečního záření je důležitým ukazatelem pro projektanta solární elektrárny. Do výstupního výkonu zasahuje mnoho proměnných (například teplota panelu, teplota okolního vzduchu...). [22]



Obrázek 76 Intenzita záření a výstupní výkon v jednotlivých měsících roku 2020

6.4.8 Souhrn informací získaných ze simulací

Souhrnem informací je doporučení pro provoz malého obnovitelného zdroje. Z námi naměřených hodnot, pomocí kterých byly realizovány simulace distribuční sítě vyplývá, že v době největší spotřeby, to jest v zimním období, kdy stoupá spotřeba především vlivem potřeby vytápění objektů (v simulaci byli uvedeni zákazníci třídy TDD2 s hybridním vytápěním), rovněž stoupá spotřeba vlivem prodlužujících se intervalů využití pouličního osvětlení. Výstupní výkon solární energie je nízký, ale stále můžeme prohlásit, že příznivě napomáhá udržet stabilitu sítě. V letním období byla solární elektrárna zdrojem přepětí, ale toto přepětí se daří udržet v normou stanovených hodnotách za pomoci Q(U) regulace. Další možností by bylo omezit výstupní výkon pomocí střídače. Přepětí v simulaci vznikalo pouze v těsné blízkosti solární elektrárny, proto je možné mu předejít nebudeme-li koukat na finanční stránku zdvojeným vedením vn, popřípadě vhodnějším výběrem transformátoru. K udržení stability by značně napomohla akumulace energie do baterií, ovšem legislativa neumožňuje dodávat energii akumulovanou bateriemi do sítě. Základem energetiky je potřeba umět bilancovat s energií a podíváme-li se na Obrázek 58 vidíme, že solární elektrárna není spolehlivý zdroj a těžko si od ní nakoupíme na smlouvenou hodinu na burze předem domluvené množství energie (například na denním trhu se silovou elektřinou).

7 Závěr

Tato diplomová práce je zaměřena na vliv malé solární elektrárny, která ovlivňuje distribuční síť. V úvodní části je popsán princip solární elektrárny. Druhá kapitola této práce je věnována podmínkám pro připojení výroby k elektrizační soustavě. V této kapitole jsou popsány výrobní moduly, z jejichž popisu vyplývá, že solární elektrárna, na jejichž výstupních hodnotách je založena tato diplomová práce, je modulem A.

Třetím tématem je teoretické rozebrání výpočtu chodu sítě. Zde je detailně popsána metoda uzlových napětí a teorie výpočtu ustálených stavů sítě. Nejpodstatnější částí třetí kapitoly je Gauss – Seidelova a Newton – Raphsonova výpočetní metoda. Čtvrtá kapitola je věnována názorné ukázce výpočtu určité části sítě, která je analyzována v nástroji Microsoft Excel a následně byla porovnána s výsledky mé simulace v programech PSAT (Power System Analysis Toolbox) a GridCal. Porovnáním těchto výsledků došlo ke křížové verifikaci správnosti výpočtů programu GridCal, ve kterém byla zvolena Newton – Raphsonova analýza. V páté části diplomové práce je popsána stabilita elektrizační soustavy, která obsahuje informace o výkonové bilanci a podrobně se zaměřuje na frekvenční a napěťovou stabilitu sítě.

V šesté kapitole je obsažena praktická ukázka, ve které se nachází zásadní chyby v prostředí GridCal a návod jak je obejít, je zde i několik vzorců, které vysvětlují, kde vývojář učinil chybu. Především jsou v této části popsány jednotlivé prvky schématu a zjištění jejich parametrů včetně nezbytných podrobných výpočtů. Úkolem bylo vytvořit simulaci blízkou se co nejvíce reálnému prostředí, proto byly použity reálné zátěže a reálné výstupy elektrárny sladěné ve stejných časech. Simulace je nastavena tak, aby co nejdříve popsala poměry v distribuční síti v blízkosti malé solární elektrárny. Obrovský vliv na výstup solární elektrárny, ale i na zátěž, má dané roční období a s ním spojené rozdíly teplot a osvětlení. Z tohoto důvodu jsou v diplomové práci simulace popisující poměry v síti ve čtyřech ročních obdobích. Poslední část diplomové práce je věnována simulacím, které popisují jednoduchou regulaci napětí, prováděnou změnou dodávaného jalového výkonu, která je z mé strany trochu improvizována, ale její dopad je “zřetelný“, podařilo se udržet síť v normou povolených napěťových hranicích.

8 Citovaná literatura

- [1] „Fotovoltaické elektrárny - princip funkce a součásti, elektrárny v ČR,“ 16 12 2016. [Online]. Available: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/fotovoltaicka-elektrarna-princip-funkce-a-soucasti>. [Přístup získán 16 1 2021].
- [2] „Nařízení komise (EU),“ 27 4 2016. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0631&from=EN>. [Přístup získán 25 4 2021].
- [3] I. J. Bárta, *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*, Praha: Ústav jaderného výzkumu Řež a.s. , 2011.
- [4] P. Doc. Ing. Karel Noháč, „Výpočet chodu sítě,“ Západočeská univerzita, [Online]. Available: <http://home.zcu.cz/~nohac/MS/MS-Pr-04.pdf>. [Přístup získán 8 2 2021].
- [5] Jroslav Reichl a Martin Všeticka, „přeměna (transfigurace) hvězdy na trojúhelník,“ [Online]. Available: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1630-premena-transfigurace-hvezdy-a-na-trojjuhelnik>. [Přístup získán 15 3 2021].
- [6] Noháč, „Řízení elektrizační soustavy,“ [Online]. Available: <http://home.zcu.cz/~nohac/E2/Elektrarny2-cast11-v1.pdf>.
- [7] D. E. D. CSc, „Trh se SE,“ [Online]. Available: <https://courseware.zcu.cz/portal/studium/courseware/kee/mmee/prednasky.html>.
- [8] P. Ing.Lenka Raková, „Courseware.zcu,“ 2013. [Online]. Available: <http://home.zcu.cz/~dvorsky/MR/CviceniMR/U%E8ebn%ED%20text%20ke%20cvi%E8en%ED%20z%20MR.pdf>.
- [9] „Zákony pro lidi,“ [Online]. Available: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-359>. [Přístup získán 27 4 2021].
- [10] „Elektrické sítě a vodiče,“ [Online]. Available: <https://publi.cz/books/260/01.html>. [Přístup získán 27 4 2021].
- [11] „Normalizované TDD,“ [Online]. Available: https://www.ote-cr.cz/pubweb/attachments/20/2020/Normalizovane_TDD_2020_CZ.zip. [Přístup získán 28 4 2021].

- [12] „Stanovení množství SE DZ TDD,“ ZCU, [Online]. Available: <https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=199241>. [Přístup získán 28 4 2021].
- [13] „metodika pouziti tdd v cs ote a systemech,“ [Online]. Available: http://www.ote-cr.cz/cs/dokumentace/dokumentace-elektrina/metodika_pouziti_tdd_v_cs_ote_a_systemech_pds_25_8_2020.docx. [Přístup získán 28 4 2021].
- [14] „Kdy zacina (jaro, leto, podzim, zima),“ [Online]. Available: <https://kalendar.beda.cz/kdy-zacina-jaro-leto-podzim-zima>. [Přístup získán 30 4 2021].
- [15] Prakab, „silové kabely 0,6 až 1 kV,“ [Online]. Available: https://www.prakab.cz/upload/1_AYKY.pdf. [Přístup získán 28 4 2021].
- [16] „OTE,“ [Online]. Available: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/typove-diagramy-dodavek-elekriny/teploty?date=2021-04-01>. [Přístup získán 28 4 2021].
- [17] P. Doc. Ing. Pavla Hejtmánková, „Parametry transformátorů,“ ZCU, [Online]. Available: <http://home.zcu.cz/~hejtman/PEC/Cviceni/Tab-trafa.pdf>. [Přístup získán 10 5 2021].
- [18] P. Doc. Ing. Karel Noháč, „Přepočet veličin v elektroenergetice,“ Zcu, [Online]. Available: http://home.zcu.cz/~nohac/EE1/Prepocet_velicin/Prepocety_velicin_v_elektroenergetice.html. [Přístup získán 10 5 2021].
- [19] R. Míček, „AUTOMATIZOVANÝ VÝPOČET NÁVRHU,“ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2008. [Online]. Available: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=9099. [Přístup získán 19 5 2021].
- [20] P. D. SOUSTAV, „Pravidla provozování distribučních soustav,“ E distribuce, [Online]. Available: https://www.cezdistribuce.cz/webpublic/file/edee/distribuce/ppds/ppds-2020_priloha-7.pdf. [Přístup získán 19 5 2021].
- [21] „Implementation of solution,“ [Online]. Available: https://interflex-h2020.com/wp-content/uploads/2019/01/D6.2-Implementations-of-solution_CezDistribuce_InterFlex_v1.0.pdf. [Přístup získán 19 5 2021].

- [22] P. doc. Ing. Tomáš Matuška, „Zjednodušený bilanční výpočet ročních přínosů fotovoltaických instalací,“ Fakulta strojní, ČVUT, 7 3 2016. [Online]. Available: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/13878-zjednoduseny-bilancni-vypocet-rocnich-prinosu-fotovoltaickych-instalaci>. [Přístup získán 20 5 2021].
- [23] D. I. E. Dvorský.CSc., „CourseWARE,“ [Online]. Available: <https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=199238>. [Přístup získán 27 4 2021].
- [24] „OTE,“ [Online]. Available: https://www.ote-cr.cz/cs/dokumentace/dokumentace-elektrina/files_dokumentace/Zasady_uziti_TDD.zip. [Přístup získán 27 4 2021].
- [25] P. Doc. Ing. Karel Noháč, „Modelování elektrických sítí,“ [Online]. Available: <http://home.zcu.cz/~nohac/MS/MS-Pr-02.pdf>. [Přístup získán 28 4 2021].
- [26] „About GridCal,“ 27 5 2021. [Online]. Available: https://gridcal.readthedocs.io/en/latest/tutorials/tutorials_module.html.

9 Přílohy

9.1 Příklad řešení - Gauss - Seidlova metoda (G-Sp)

Postup řešení:

$$x + 3 \times \frac{y}{x} = 4 \quad (9.1)$$

$$-\frac{5}{y} + 8xy = 11 \quad (9.2)$$

Zvolí se očekávaná přibližná hodnota. $\{x_0, y_0\} = \{1; 1\}$

Upravení rovnice

$$x^2 + 3y - 4x = 0 \quad (9.3)$$

$$8xy^2 - 11y - 5 = 0 \quad (9.4)$$

Z rovnice (9.3) lze vyjádřit jednu proměnou a druhou z rovnice (9.4)

$$y^{(p+1)} = \frac{(4 - x^{(p)})x^p}{3} \quad (9.5)$$

$$x^{(p+1)} = \frac{11 + \frac{5}{y^{(p+1)}}}{8y^{(p+1)}} \quad (9.6)$$

První iterace se provede dosazením očekávaných hodnot do vzorců (9.5), (9.6).

$$y^{(p+1)} = \frac{(4 - 1) \times 1}{3} = 1 \quad (9.7)$$

$$x^{(p+1)} = \frac{11 + \frac{5}{1}}{8} = 2 \quad (9.8)$$

Výsledky proměnných x a y se opět vloží do rovnice (9.5) a (9.6) dokud nebudou po sobě jdoucí výsledky konvergovat ke konkrétní hodnotě s malou nebo nulovou odchylkou.

Odchylka je rozdíl po sobě jdoucích spočtených hodnot.

iterace	x	y	odchylka x	odchylka y
1	1	1	1	0
2	2	1	1	0
3	2	1,333333	0	0
4	1,382813	1,333333	-0,61719	0
5	1,382813	1,20636	0	0
6	1,569256	1,20636	0,186444	0
7	1,569256	1,271487	0	0
8	1,468007	1,271487	-0,10125	0
9	1,468007	1,238994	0	0
10	1,516909	1,238994	0,048902	0
11	1,516909	1,255541	0	0
12	1,491623	1,255541	-0,02529	0
13	1,491623	1,247184	0	0
14	1,504292	1,247184	0,012669	0
15	1,504292	1,251424		0

Možností urychlení výpočtu je, že při prvním výpočtu hodnoty y užijí právě vypočtenou hodnotu x, namísto odhadované hodnoty x z toho vyplývá, že odhadovanou hodnoty x nepotřebují.

9.2 Příklad řešení Newtom - Raphsonova metoda

Postup řešení:

$$x + 3 \times \frac{y}{x} = 4 \tag{9.9}$$

$$-\frac{5}{y} + 8xy = 11 \tag{9.10}$$

Rovnice je nutno položit rovno 0.

$$x + 3 \times \frac{y}{x} - 4 = 0 \tag{9.11}$$

$$-\frac{5}{y} + 8xy - 11 = 0 \tag{9.12}$$

volí se očekávaná přibližná hodnota. $\{x_0, y_0\} = \{1; 1\}$

Ukončovací hodnota požadovaná mez $\varepsilon_{mez} = 1 \cdot 10^{-4}$

$$\begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta f_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (9.13)$$

Dosazení vzorců **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a (9.12) do rovnice (9.13)

$$\begin{bmatrix} x + 3\frac{y}{x} - 4 \\ -\frac{5}{y} + 8xy - 11 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 1 - \frac{3y}{x^2} & \frac{3}{x} \\ 8y & \frac{5}{y^2} + 8x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (9.14)$$

Dosazením očekávaných hodnot pro bod $x_0 = \{1; 1\}$.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ -8 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} -2 & 3 \\ 8 & 13 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (9.15)$$

Nyní se provede invertování Jacobiho matice postup

$$\left(\begin{array}{cc|cc} -2 & 3 & 1 & 0 \\ 8 & 13 & 0 & 1 \end{array} \right) \quad (9.16)$$

Horní řádek je vynásoben 4 a následně přičten ke spodnímu, čímž se pozice a_{21} vynuluje.

$$\left(\begin{array}{cc|cc} -2 & 3 & 1 & 0 \\ 0 & 25 & 4 & 1 \end{array} \right) \quad (9.17)$$

Spodní řádek je vynásoben konstantou $(\frac{-1}{8,33})$ a následně přičten k hornímu řádku, čímž se pozice a_{21} vynuluje.

$$\left(\begin{array}{cc|cc} -2 & 0 & 0,5198 & -0,12005 \\ 0 & 25 & 4 & 1 \end{array} \right) \quad (9.18)$$

Horní řádek je podělen konstantou -2 a spodní je podělen konstantou 25, čímž se jednotková matice přemístila na levou stranu a na pravé straně je matice inverzní.

$$\left(\begin{array}{cc|cc} 1 & 0 & -0,2599 & 0,06025 \\ 0 & 1 & 0,16 & 0,04 \end{array} \right) \quad (9.19)$$

Po zaokrouhlení

$$- \begin{bmatrix} -2 & 3 \\ 8 & 13 \end{bmatrix}^{-1} = - \begin{bmatrix} -0,26 & 0,06 \\ 0,16 & 0,04 \end{bmatrix} \quad (9.20)$$

Úpravou vzorce **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** do tvaru vzorce (3.40 získáme posuvy Δx a Δy dle vzorce (3.58).

$$(9.21)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} -0,26 & 0,06 \\ 0,16 & 0,04 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ -8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (0,26 \cdot 0) + (0,06 \cdot (-8)) \\ (0,16 \cdot 0) + (0,04 \cdot (-8)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,48 \\ 0,32 \end{bmatrix}$$

Pro stanovení nového bodu (bod ve kterém tečna protíná osu x) je využit vzorec (3.36).

$$x^1 = 1 + 0,48 = 1,48 \quad (9.22)$$

$$y^1 = 1 + 0,32 = 1,32 \quad (9.23)$$

Výsledné hodnoty (9.22)a (9.23) nahradí vstupní hodnoty bodu $x_0 = \{1; 1\}$ a spočte nový tvar Jacobiho matice, která se opět invertuje a následně se stanoví posuvy Δx , Δy , které se přičtou k hodnotám bodu x_1 . Tento proces se opakuje dokud Δx , Δy nejsou dostatečně malé, což znamená, dokud není splněna podmínka konvergence dle vzorce (3.42).

iterace	x	y	odchylka
0	1	1	8
1	1,48	1,32	0,84
2	1,49	1,25	0,02
3	1,5	1,25	$7,125 \cdot 10^{-6}$

K řešení dané úlohy stačili pouhé tři iterace.

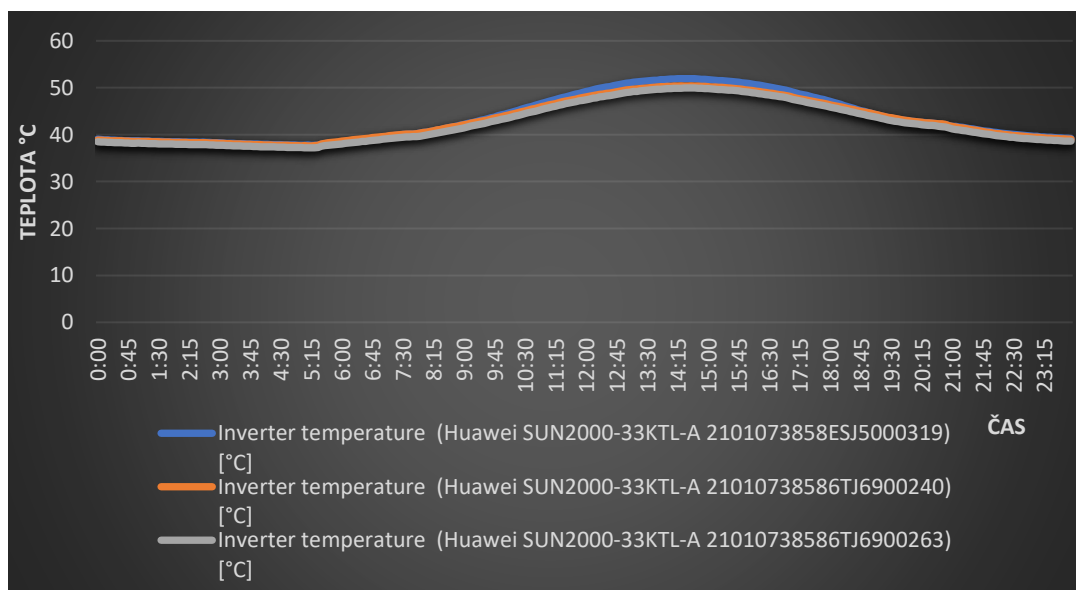
9.3 Údaje o střídači

Slouží k přeměně stejnosměrného napětí na střídavé. Použitý typ střídače je Power AC (Huawei SUN2000-33KTL-A), který má rozsah na fázi do 33 kW (power range 33kW).

Tabulka parametrů střídače

Vstupní hodnoty	
Maximální stejnosměrné napětí	1100 V
Jmenovité stejnosměrné napětí	620 V
Minimální stejnosměrné napětí pro zahájení napájení	250 V
Maximální vstupní stejnosměrný proud	88 A
MPP(T) napěťový rozsah	200~1000 V
Počet MPP snímačů	4
Stejnoseměrné vstupy	8
Výstupní hodnoty	
Maximální střídavý výstupní výkon	33 kW
Maximální výstupní proud	48 A
Možnosti frekvence	50/60 Hz
Možnosti účinníku cos (φ)	0,8
Zkreslení THD	3 %
Počet napájecích fází	3
Obecné údaje	
Provozní teplota	-25 ~ +60 °C

Graf znázorňující teplotu střídače v letním dni 8.1.2020



Graf vstupního DC napětí vstupní hodnoty ze dne 8.1.2021

