

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky



Diplomová práce

**Analýza vlivů fotovoltaických zdrojů a bateriových úložišť
malých výkonů na distribuční systém nízkého napětí**

Autor: Bc. Mária-Anna Turociová

Vedoucí práce: Ing. Martin Čerňan, Ph.D.

Rok: 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Turociová** Jméno: **Mária-Anna** Osobní číslo: **474394**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Analýza vlivů fotovoltaických zdrojů a bateriových uložení malých výkonů na distribuční systém nízkého napětí

Název diplomové práce anglicky:

Analysis of the effects of photovoltaic sources and battery storages of low power on the low voltage distribution system

Pokyny pro vypracování:

1. Zpracujte průzkum trhu s malými fotovoltaickými systémy, určenými pro instalaci u maloodběratelů v síti nízkého napětí (zaměření na technické parametry a technologie).
2. Zpracujte průzkum trhu s dostupnými bateriovými systémy pro akumulaci elektrické energie u stejné kategorie jako v předešlém bodě.
3. Identifikujte rizika vznikající při zvýšeném měřítku zastoupení rozptýlené výroby v rámci distribuční soustavy nízkého napětí a zpracujte odhad chování maloodběratelů z hlediska jednotlivých tarifů.
4. Navrhněte metodiku a matematický model pro analyzování vlivu rozptýlené výroby a akumulace elektrické energie v rozsáhlejších částech distribuční soustavy nízkého napětí.
5. Proveďte případovou studii pro vybranou část distribučního systému nízkého napětí s využitím vhodné sady testovacích scénářů.

Seznam doporučené literatury:

- [2] Benoît Robyns, Bruno François, Gauthier Delille, Christophe Saudemont. Energy Storage in Electric Power Grids, Hoboken, ISBN:9781848216112.
- [3] William Murray, Marco Adonis, Atanda Raji. Voltage control in future electrical distribution networks, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 146, 2021, 111100, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111100>.
- [4] Mirosław Parol, Tomasz Wójtowicz, Krzysztof Księżyk, Christoph Wenge, Stephan Balischewski, Bartłomiej Arendarski. Optimum management of power and energy in low voltage microgrids using evolutionary algorithms and energy storage, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 119, 2020, ISSN 0142-0615, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105886>.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Martin Čerňan, Ph.D. katedra elektroenergetiky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **08.02.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2023**

Ing. Martin Čerňan, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Čestné prohlášení

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

V Praze dne 11.05.2022

.....

Turociová Mária-Anna

Poděkování

Ráda bych tímto poděkovala svému vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Čerňanovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, velkou časovou vstřícnost v rámci konzultací, cenné rady a připomínky.

Abstrakt

Práce se zabývá vlivem většího zastoupení fotovoltaických zdrojů a bateriových úložišť malých výkonů na část distribuční soustavy nízkého napětí. Důvodem, proč se touto otázkou zabývat, je stále rostoucí počet malých fotovoltaických zdrojů s bateriovými systémy na střechách rodinných domů. Fotovoltaické elektrárny na střechách budov mají v České republice velký potenciál a v následujících letech se předpokládá, že u nás nastane větší decentralizace výroby. To však znamená, že v distribuční soustavě, ve které jsou tyto decentralizované zdroje ve větší míře umístěny, může dojít k nežádoucímu ovlivnění kvality elektrické energie, především napětí. Pro vytvoření celkového pohledu na danou problematiku je v úvodu práce věnována pozornost fotovoltaickým a bateriovým systémům dostupných na českém trhu. V další části se práce zabývá právě možnými riziky rozptýlené výroby v rámci distribuční soustavy, analýzou spotřeby elektrické energie maloodběrateli a stanovením výroby elektrické energie fotovoltaickou elektrárnou. Aby bylo možné určit vliv fotovoltaických zdrojů a bateriových úložišť na distribuční síť nízkého napětí, je potřeba vytvořit metodiku výpočtů a matematický model soustavy, na jejichž základě se budou provádět výpočty ustáleného stavu sítě. Pro výpočet ustáleného stavu soustavy byla zvolena Newton-Raphsonova iterační metoda, která je ještě s Gauss-Seidlovou iterační metodou nejpoužívanější. Poslední část práce se zabývá zvolením, popisem a vyhodnocením jednotlivých scénářů pro analyzování vlivu rozptýlené výroby ve vybrané části distribuční soustavy. V této části jsou porovnány stavy sítě před a po připojení určitého množství fotovoltaických zdrojů, případně bateriových systémů.

Klíčová slova

Fotovoltaická elektrárna, bateriové úložiště, distribuční síť, rozptýlená výroba, nízké napětí, ustálený stav sítě

Abstract

The thesis deals with the influence of a greater representation of photovoltaic sources and battery storage of small output on a part of the low voltage distribution system. The reason to address this issue is the increasing number of small photovoltaic sources with battery systems on the roofs of family houses. Photovoltaic power plants on the roofs of buildings have great potential in the Czech Republic and in the coming years it is expected that there will be a greater decetralization of production in our country. However, this means that in the distribution network in which these decentralised sources are located to a greater extent, the quality of electricity, especially voltage, may be adversely affected. In order to create an overall view of the given issue, attention is paid to photovoltaic and battery systems available on the Czech market in the introduction. In the next part, the thesis deals with the possible risks of dispersed production within the distribution system, the analysis of electricity consumption by small customers and the determination of electricity production by a photovoltaic power plant. In order to determine the effect of photovoltaic sources and battery storage systems on the low voltage distribution network, it is necessary to develop a calculation methodology and a mathematical model of the system of which power flow calculations will be performed. The Newton-Raphson iteration method was chosen, which is with the Gauss-Seidel iteration method the most widely used for this matter. The last part of the thesis deals with the selection, description and evaluation of individual scenarios for analyzing the impact of dispersed production in a selected part of the distribution network. This section compares the grid states before and after connecting a certain number of photovoltaic sources, eventually battery storage systems.

Keywords

Photovoltaic power plant, battery storage system, distribution network, dispersed production, low voltage, Load Flow

OBSAH

SEZNAM ZKRATEK.....	1
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	2
SEZNAM TABULEK	3
SEZNAM GRAFŮ.....	4
ÚVOD	5
1 FV SYSTÉMY	6
1.1 Základní informace o FV systémech.....	6
1.2 Situace FVE v ČR	8
1.3 Potenciál FVE v ČR.....	10
1.4 FVE na českém trhu	13
2 BATERIOVÉ SYSTÉMY PRO AKUMULACI ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	15
2.1 Základní informace o bateriových systémech	15
2.2 Bateriové systémy pro malé fotovoltaické systémy	15
3 RIZIKA SPOJENÁ SE ZVÝŠENÝM ZASTOUPENÍM ROZPTÝLENÉ VÝROBY V RÁMCI DISTRIBUČNÍ SÍTĚ NÍZKÉHO NAPĚTÍ A ODHAD CHOVÁNÍ MALOODBĚRATELŮ.....	20
3.1 Rizika vznikající při zvýšeném měřítku zastoupení rozptýlené výroby v rámci distribuční soustavy nízkého napětí.....	20
3.1.1 Rozptýlená výroba.....	20
3.1.2 Rizika spojená se zvýšeným zastoupením rozptýlené výroby v rámci distribuční sítě nízkého napětí.....	20
3.2 Analýza spotřeby elektrické energie maloodběratelů.....	22
3.2.1 Odhad roční spotřeby elektrické energie	22
3.3 Výroba elektrické energie z FVE a její uložení do baterie.....	24
3.3.1 Baterie	26
4 METODIKA A MATEMATICKÝ MODEL PRO ANALYZOVÁNÍ VLIVU ROZPTÝLENÉ VÝROBY A AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE	28
4.1 Výpočetní metoda.....	28
4.1.1 Ustálený chod soustavy	28
4.1.2 Výpočet ustáleného chodu sítě	28
4.1.3 Newton-Raphsonova iterační metoda.....	29
4.2 Model distribuční soustavy nízkého napětí	31
4.2.1 Popis modelu	31
4.2.2 Parametry prvků modelové sítě.....	33
4.3 Matematický model.....	34
4.3.1 Princip výpočtu ustáleného stavu sítě v programu Wolfram Mathematica.....	34
4.3.2 Zpracování výstupních dat	39

5 PŘÍPADOVÁ STUDIE PRO VYBRANOU DISTRIBUČNÍ SOUSTAVU NÍZKÉHO NAPĚTÍ.....	41
5.1 Testovací scénáře	41
5.2 Výsledky z provedených výpočtů pro jednotlivé testovací scénáře	42
5.2.1 Statistické zpracování činných výkonů	42
5.2.2 Napěťové profily	45
5.2.3 Zatížení větví.....	53
5.2.4 Porovnání jednotlivých testovacích scénářů z pohledu celkových výkonů.....	60
5.3 Krajní případ.....	62
ZÁVĚR.....	65
LITERATURA	67
Seznam příloh.....	70
Příloha č. 1 Parametry vedení pro základní scénář	70
Příloha č. 2 Závislosti činných výkonů na čase	70
Příloha č. 3 Závislosti jalových výkonů na čase	72
Příloha č. 4 Závislosti ztrát na čase.....	75
Příloha č. 5 Závislosti poměru P a poměru Q na čase	77
Příloha č. 6 Parametry vedení pro krajní scénář	79

SEZNAM ZKRATEK

FV	Fotovoltaický
FVE	Fotovoltaická elektrárna
NN	Nízké napětí
VN	Vysoké napětí
OZE	Obnovitelné zdroje energie
ČR	Česká republika
TDD	Typové diagramy dodávky
DC	Stejnoseměrný
AC	Střídavý
DS	Distribuční síť
NZÚ	Nová Zelená úsporám
BMS	Battery management system
ES	Ekvivalent soustavy
OM	Odběrné místo
DTS	Distribuční transformátorová stanice

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek č. 1 – Blokové schéma obecného FV systému připojeného k rozvodné síti [1]	6
Obrázek č. 2 – Zapojení střídačů a) modulové, b) řetězcové, c) centrální [1].....	7
Obrázek č. 3 – Zapojení hybridního systému [1]	8
Obrázek č. 4 – Vývoj výroby elektřiny brutto (GWh) [4].....	9
Obrázek č. 5 – Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto – 2020 [4]	9
Obrázek č. 6 – Vývoj instalovaného výkonu FVE (MW) [4]	10
Obrázek č. 7 – Ekonomický potenciál instalovaného výkonu FVE dle EGÚ Brno a minulost [7].....	11
Obrázek č. 8 – Očekávaný vývoj ceny silové elektřiny [7].....	12
Obrázek č. 9 – Očekávaný pokles cen fotovoltaiky [7].....	14
Obrázek č. 10 – Vlevo bateriový modul HVS, vpravo bateriový systém BYD B-Box Premium HVS 7.7 [20]	16
Obrázek č. 11 – Baterie LG Chem Resu [22].....	17
Obrázek č. 12 – Bateriový systém Pylontech [24]	19
Obrázek č. 13 – Obrázek zobrazující napětí v DS při různém zatížení soustavy [27]	21
Obrázek č. 14 – Pohled na rezidenční zástavbu Konhefrových domů v Horních Počernicích [30].....	22
Obrázek č. 15 – Nastavení parametrů pro výpočet v PVGIS hourly radiation data [34]	24
Obrázek č. 16 – Průběh ozáření H v závislosti na daném měsíci v roce pro různé úhly sklonu β [36].	25
Obrázek č. 17 – Vývojový diagram chování baterie	27
Obrázek č. 18 – Jednofázové schéma modelu distribuční sítě NN IEEE European Low Voltage Test Feeder [42]	31
Obrázek č. 19 – Schéma napájecího bodu transformátoru	31
Obrázek č. 20 – Zjednodušený model distribuční soustavy NN [42].....	32
Obrázek č. 21 – Vývojový diagram výpočtu ustáleného stavu sítě v programu Wolfram Mathematica	35
Obrázek č. 22 – Rozdělení intervalu náhodných koeficientů.....	37
Obrázek č. 23 – Vývojový diagram inicializace výpočtu Power Flow	38
Obrázek č. 24 – Diagram vysvětlující bilanci výkonů pro variantu neuvažující s FVE	39
Obrázek č. 25 – Diagram vysvětlující bilanci výkonů pro variantu s FVE.....	40
Obrázek č. 26 – Jednopolové zjednodušené schéma soustavy s barevným rozlišením kmenových a ostatních větví [42].....	54

SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1 – Celkový technický potenciál [7].....	11
Tabulka č. 2 – Celkový technický potenciál, počet a kategorie [7].....	11
Tabulka č. 3 – Počet nových instalací [7].....	11
Tabulka č. 4 – Nabídky FVE na klíč a základní informace o FVE – systém s ohřevem vody [11] [12] [13] [14] [15] [16]	13
Tabulka č. 5 – Nabídky FVE na klíč a základní informace o FVE – systém s akumulací energie do baterie [11] [12] [13] [14] [15] [16]	13
Tabulka č. 6 – Technické parametry FV panelu Canadian Solar 450 Wp [17].....	14
Tabulka č. 7 – Technické parametry baterie BYD B-Box Premium HVS/HVM [20] [21]	17
Tabulka č. 8 – Technické parametry baterie LG Chem Resu [21] [22]	18
Tabulka č. 9 – Technické parametry systému POWERCUBE-X1 [21] [23]	19
Tabulka č. 10 – Parametry ES	33
Tabulka č. 11 – Parametry 3f transformátoru.....	33
Tabulka č. 12 – Testovací scénáře.....	41
Tabulka č. 13 – Tabulka celkových výkonů a ztrát pro dané varianty	61

SEZNAM GRAFŮ

Graf č. 1 – Graf zobrazující průměrný hodinový odebíraný výkon rodinného domu v průběhu roku 2016 [31] [33].....	23
Graf č. 2 – Graf zobrazující hodinový výkon vyráběný FVE v průběhu roku 2016 [34].....	25
Graf č. 3 – Histogramy činných výkonů pro období 1.1.2016 - 30.1.2016.....	43
Graf č. 4 – Histogramy činných výkonů pro období 21.4.2016 - 20.5.2016.....	44
Graf č. 5 – Napěťový profil pro variantu 1.....	45
Graf č. 6 – Napěťový profil pro variantu 2.....	46
Graf č. 7 – Napěťový profil pro variantu 3.....	46
Graf č. 8 – Napěťový profil pro variantu 4.....	47
Graf č. 9 – Napěťový profil pro variantu 5.....	47
Graf č. 10 – Napěťový profil pro variantu 6.....	48
Graf č. 11 – Napěťový profil pro variantu 7.....	48
Graf č. 12 – Napěťový profil pro variantu 8.....	49
Graf č. 13 – Napěťový profil pro variantu 9.....	50
Graf č. 14 – Napěťový profil pro variantu 10.....	50
Graf č. 15 – Napěťový profil pro variantu 11.....	51
Graf č. 16 – Napěťový profil pro variantu 12.....	51
Graf č. 17 – Napěťový profil pro variantu 13.....	52
Graf č. 18 – Napěťový profil pro variantu 14.....	52
Graf č. 19 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 1.....	55
Graf č. 20 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 2.....	55
Graf č. 21 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 3.....	55
Graf č. 22 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 4.....	56
Graf č. 23 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 5.....	56
Graf č. 24 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 6.....	56
Graf č. 25 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 7.....	57
Graf č. 26 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 8.....	57
Graf č. 27 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 9.....	58
Graf č. 28 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 10.....	58
Graf č. 29 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 11.....	58
Graf č. 30 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 12.....	59
Graf č. 31 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 13.....	59
Graf č. 32 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 14.....	59
Graf č. 33 – Napěťový profil pro krajní variantu 1.....	63
Graf č. 34 – Napěťový profil pro krajní variantu 4.....	63
Graf č. 35 – Napěťový profil pro krajní variantu 8.....	64
Graf č. 36 – Napěťový profil pro krajní variantu 11.....	64

ÚVOD

Problematika rozptýlené výroby je ve společnosti velmi aktuální téma, speciálně vzhledem k současnému vývoji na trhu s energiemi. Lze předpokládat, že zdražování elektrické energie a nejistota způsobená odchodem některých velkých dodavatelů energií koncovým zákazníkům povede ke zvýšení zájmu spotřebitelů o částečnou energetickou soběstačnost.

Současná klimatická politika EU vede ke stále většímu důrazu na využití OZE. Zvětšením podílu výroby elektrické energie z OZE lze docílit především snížení škodlivých emisí a také úspory ztenčujících se zásob fosilních paliv. Jedním z těchto OZE je přímá sluneční energie, kterou lze pomocí FVE přeměnit na elektřinu. V posledních letech se v ČR stále více uplatňují malé FVE určené na střechy budov a dochází tak větší decentralizaci výroby elektrické energie. Vzhledem ke geografické poloze a struktuře krajiny je u nás rozvoj ostatních obnovitelných zdrojů poměrně limitován. Využití solární energie má tedy vysoký potenciál a předpokládá se, že počet FV zdrojů v budoucích letech výrazně vzroste. Vzhledem k tomu, že FVE vyrábí většinou nejvíce elektrické energie v době, kdy je spotřeba domácností nejmenší, je vhodné přebytečnou energii nějakým způsobem dále využít. Jedním z častých způsobů je právě akumulace energie do baterie, která umožňuje efektivnější využití vyrobené energie, čímž se snižuje spotřeba objektu. Vliv bateriových úložišť je tedy nutné vzít v úvahu.

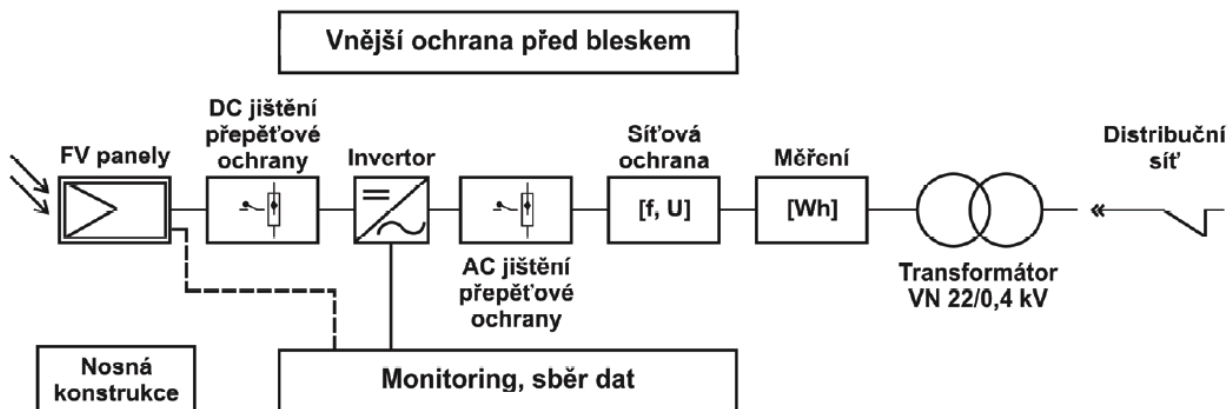
Větší míra zastoupení FV zdrojů v části distribuční sítě může mít negativní vliv na kvalitu elektrické energie, zejména napětí. V okamžiku, kdy decentralizované zdroje dodávají do sítě výkon, který však soustava není schopná spotřebovat, dochází ke změně toku výkonů a napěťového profilu sítě. Tato práce se tedy zabývá tím, jaké množství FV zdrojů je pro distribuční soustavu navrženou pro centrální výrobu limitující a jak velký vliv mají bateriová úložiště.

Diplomová práce je členěná celkem do pěti částí. V prvních dvou částech je pozornost věnována FV a bateriovým systémům dostupných na českém trhu. Možná rizika většího zastoupení rozptýlené výroby elektrické energie v distribuční soustavě a analýza spotřeby elektrické energie maloodběratelů, včetně stanovení výroby elektrické energie FVE a výběr vhodné baterie, jsou popsány ve třetí části. Čtvrtá část se zabývá vytvořením metodiky a matematického modelu vybrané distribuční soustavy NN. Výsledky jednotlivých scénářů pro určení vlivu FV systémů a bateriových úložišť na modelovanou soustavu NN před a po jejich připojení jsou uvedeny v poslední části práce.

1 FV SYSTÉMY

1.1 Základní informace o FV systémech

FV systém slouží k výrobě elektrické energie ze slunečního záření a sestává z několika hlavních částí: FV modulů, nosné konstrukce, střídače, ochran a případně ještě akumulčního systému.



Obrázek č. 1 – Blokové schéma obecného FV systému připojeného k rozvodné síti [1]

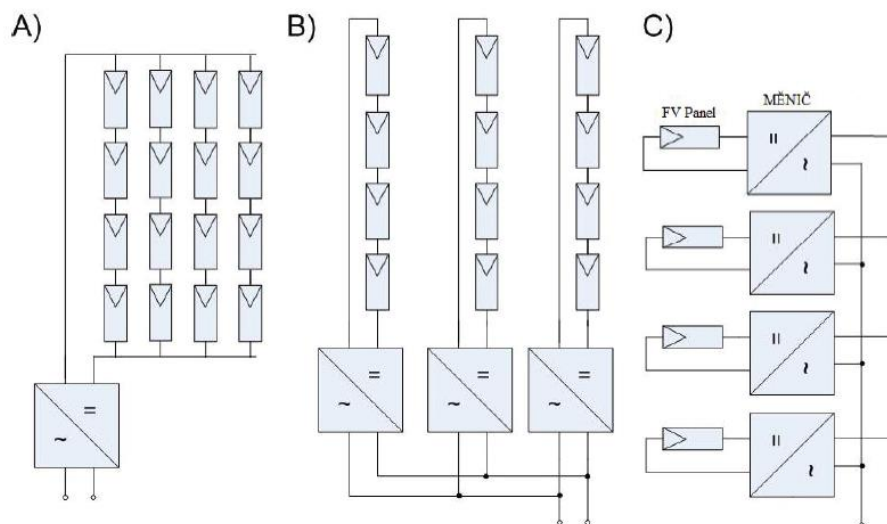
FV moduly se skládají z více FV článků, které umožňují přeměnu slunečního záření na DC elektrický proud díky tzv. vnitřnímu fotoelektrickému jevu, kdy jsou elektrony uvolňovány uvnitř polovodiče. Základními parametry FV článku jsou:

- proud nakrátko I_{sc} ,
- napětí naprázdno U_{oc} ,
- maximální napětí U_{mp} ,
- maximální proud I_{mp} ,
- výkon P ,
- činitel plnění FF a
- účinnost η .

Tyto parametry jsou určovány při standardních testovacích podmínkách STC tedy teplotě 25 °C, intenzitě slunečního záření $I = 1000 \text{ W/m}^2$ a definované vzduchové hmotě (Air Mass) $AM = 1,5$. FV články mohou být různého typu. V současnosti nejpoužívanějšími jsou články na bázi křemíku (články první generace), které mohou být vyrobeny buď z polykrystalického nebo monokrystalického křemíku. Oby typy se liší způsobem výroby, vlastnostmi, barvou a účinností. Monokrystalické křemíkové články se většinou vyrábí Czochralského metodou. Mají typicky tmavou barvu a tvar čtverce se zaoblenými rohy. Průměrná účinnost článku je v rozmezí 15-17 %. Polykrystalické články se vyznačují jednodušší a levnější výrobou Birdgmannovou nebo HP metodou, nicméně mají nižší účinnost v rozmezí 13-16 %. Polykrystalický článek je typicky čtvercového tvaru a má modrou barvu. [1] [2] [3]

Dalším důležitým komponentem je nosná konstrukce, která slouží k upevnění FV modulů. Konstrukční systémy můžeme podle způsobu použití rozdělit na: konstrukce pro sedlové střechy, konstrukce pro ploché střechy, konstrukce pro volná prostranství a polohovatelné systémy. Nejpopulárnějším typem v současné době je konstrukce pro sedlové střechy, která je vhodná především pro malé instalace na rodinných domech. O něco pracnější a nákladnější je konstrukce pro ploché střechy. U větších FVE umístěných např. na poli se používá podobná konstrukce jako pro ploché střechy s tím rozdílem, že konstrukce se spojuje pevně se zemí a její požadavky na odolnost proti různým vlivům např. proti silnému větru jsou vyšší. Polohovatelné systémy tzv. trackery umožňují otáčení a naklání FV panelů směrem ke slunci a tím větší výtěžnost FV systému. Nevýhodou je však vysoká pořizovací cena, vlastní spotřeba a pravidelný dozor. [1]

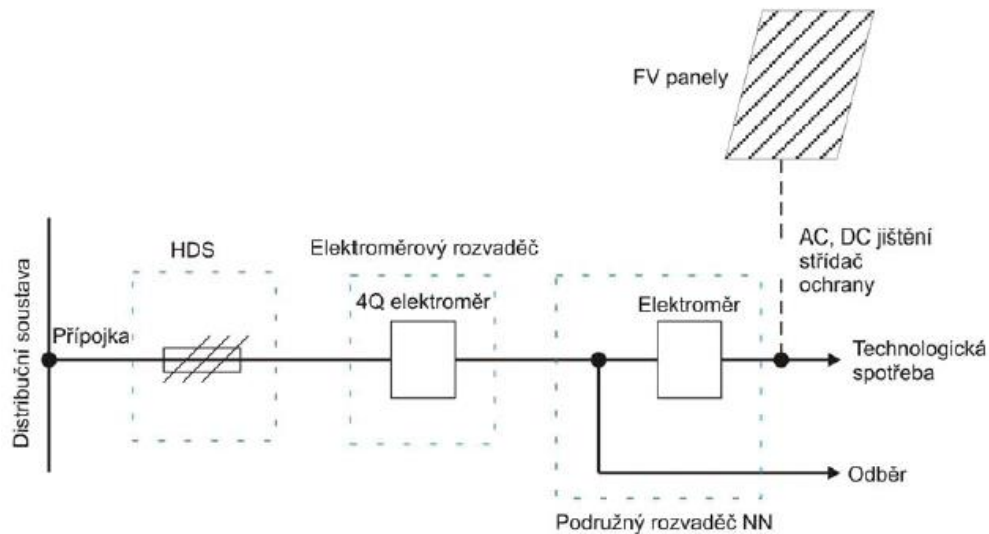
Vyrobený DC proud FV panely je kabely odváděn do střídače, který ho transformuje na AC proud požadovaných parametrů. Střídač může kromě toho mít i další funkce jako např. monitoring sítě a provozních údajů, ochranné funkce či upozornění na jakýkoliv problém či chybu systému. Střídače pro FV systémy připojené k rozvodné síti můžeme z hlediska zapojení rozdělit na modulové, řetězcové (stringové) a centrální viz. následující Obrázek č. 2. [1]



Obrázek č. 2 – Zapojení střídačů a) modulové, b) řetězcové, c) centrální [1]

FV systém jako celek můžeme ještě rozdělit z hlediska zapojení na autonomní, hybridní a přímo spojený se sítí. Autonomní systémy, neboli ostrovní systémy, mohou vyrábět elektrickou energii nezávisle na elektrické síti. Při tomto zapojení se veškerá vyrobená elektrická energie spotřebuje v objektu, případně je přebytečná elektrická energie uložena do speciálně navržených baterií. Tyto izolované systémy se používají např. v odlehlých oblastech bez DS, v dopravní signalizaci v místech, kde je daleko síť, pro lokální osvětlení nebo parkovací automaty. Systémy přímo spojené se sítí, neboli grid-on systémy, mají opačné použití tzn. veškerá vyrobená elektrická energie je dodávána do DS. Jsou to především velké elektrárny instalované na polích. Kombinací výše zmíněných zapojení je hybridní

system, který umožňuje využít převážnou část vyrobené elektrické energie pro vlastní spotřebu objektu a případné přebytky odvádět do DS. V této práci se budu zabývat právě tímto typem elektrárny. [1]

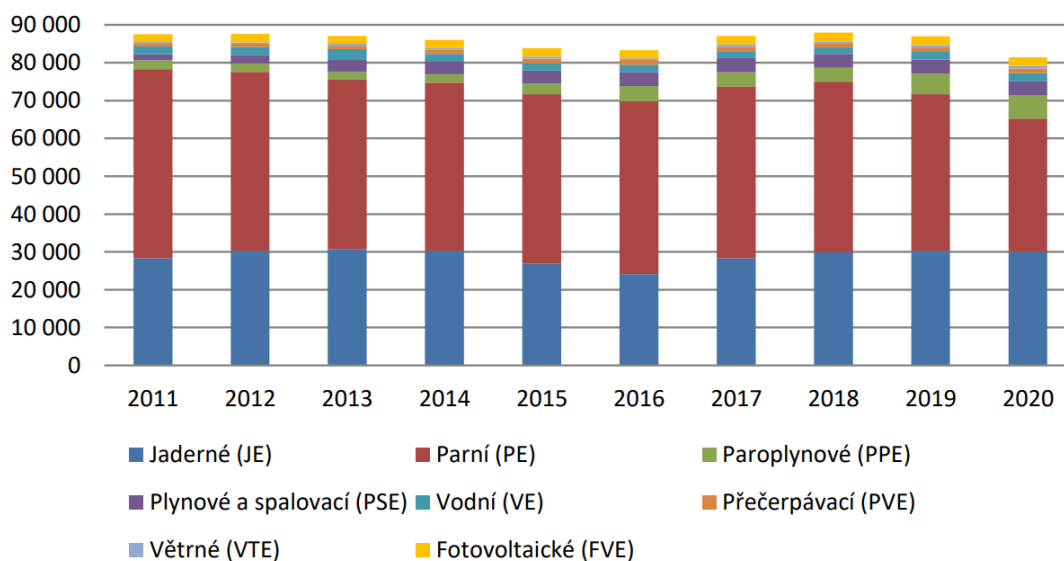


Obrázek č. 3 – Zapojení hybridního systému [1]

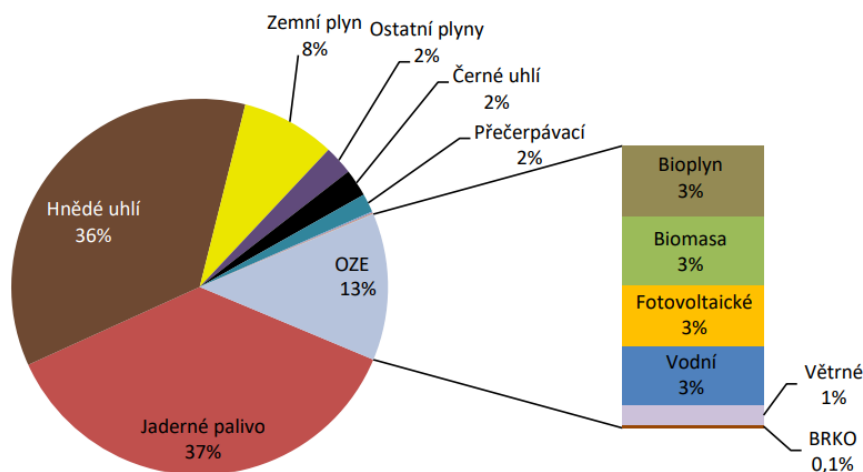
1.2 Situace FVE v ČR

Celková výroba elektřiny brutto v roce 2020 byla nejnižší za posledních 18 let a dosáhla jen 81,4 TWh. Na pokles výroby měla výrazný vliv pandemie COVID-19, kdy v důsledku mimořádných opatření došlo k poklesu spotřeby u velkooběru (vn i vvn) a malooběru podnikatelů. Naopak spotřeba domácností vzrostla. Největší meziroční pokles výroby o 6,2 TWh zaznamenaly parní elektrárny, což je jasným signálem, že se ČR, stejně jako i další státy EU, snaží upustit od klasických uhelných elektráren. Naopak výroba elektřiny brutto z OZE meziročně vzrostla o 265 GWh a její podíl se tak zvýšil na 13 %. Tento rok však klesla výroba z FVE o 52 GWh. [4]

Vývoj výroby elektřiny brutto (GWh)

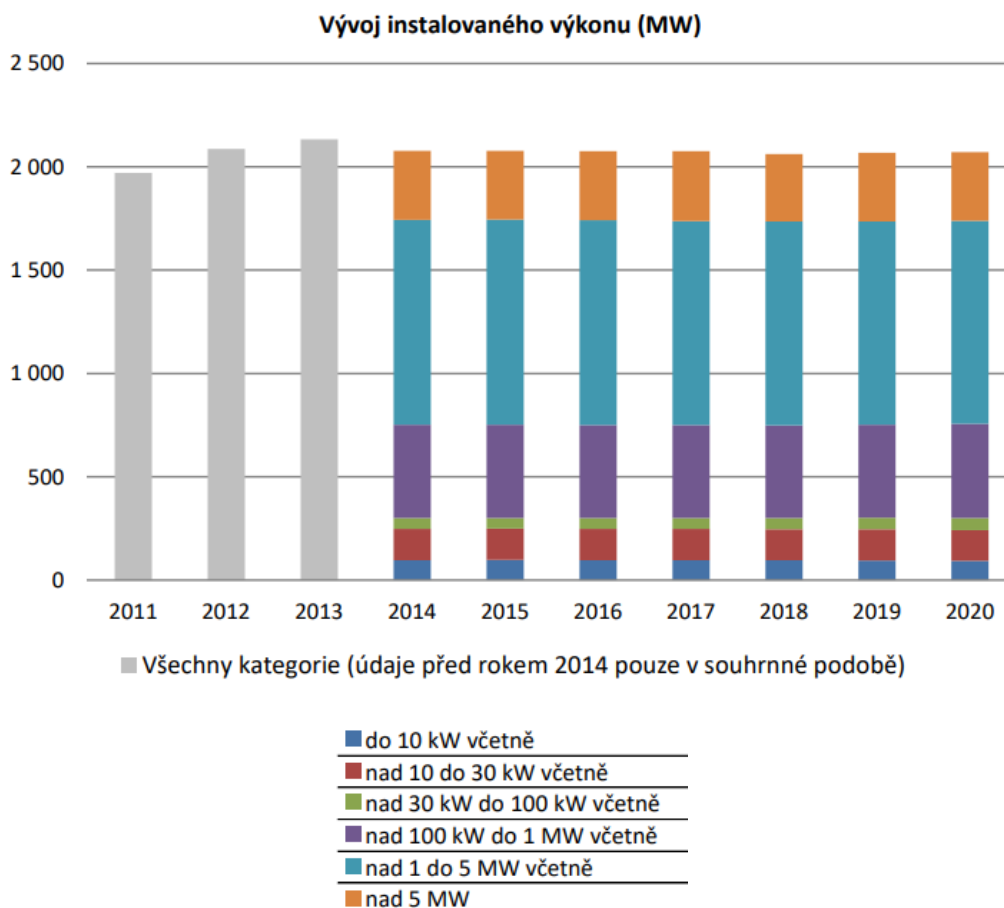


Obrázek č. 4 – Vývoj výroby elektřiny brutto (GWh) [4]



Obrázek č. 5 – Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto – 2020 [4]

Instalovaný výkon FVE v roce 2020 činil 2 071,3 MW_e. Celková výroba elektřiny brutto byla 2 235,1 GWh. Do ES bylo FVE dodáno 2 066,4 GWh elektrické energie. Největší zastoupení mají v instalovaném výkonu FVE nad 1 do 5 MW včetně, dále nad 100 kW do 1 MW včetně a nad 5 MW. Poměrně malé procentní zastoupení momentálně zaujímají FVE do 10 kW. [4]



Obrázek č. 6 – Vývoj instalovaného výkonu FVE (MW) [4]

Ke 31.12.2020 bylo v ČR zaznamenáno 41 634 FVE. V roce 2020 bylo v ČR nově instalováno celkem 6 293 nových FVE s celkovým výkonem 51,4 MWp. 1 373 z těchto nově instalovaných FVE o celkovém výkonu 28,8 MWp tvořily komerční instalace na střechách podniků a továren. Zbýlých 4 864 FVE o instalovaném výkonu 22,6 MWp bylo instalováno na rodinných domech. Ke 31.12.2020 bylo v ČR podle dat ERÚ [5] 28 880 FV provozoven vyžadujících licenci. Licence je vyžadována pro FVE o instalovaném výkonu větším než 10 kWp. Malých střešních elektráren do 10 kWp je tedy ke 31.12.2020 přibližně 12 750. [6]

1.3 Potenciál FVE v ČR

Technický potenciál FVE v ČR je stanoven na cca 39 GW viz. následující Tabulka č.1. Jedná se však pouze o teoretickou hodnotu a nepředpokládá se její naplnění. [7]

FVE technický potenciál	Instalovaný výkon [GWp]
střechy budov	10,6
fasády budov	13,2
celkem	23,7
brownfieldy	15,3
celkem	39

Tabulka č. 1 – Celkový technický potenciál [7]

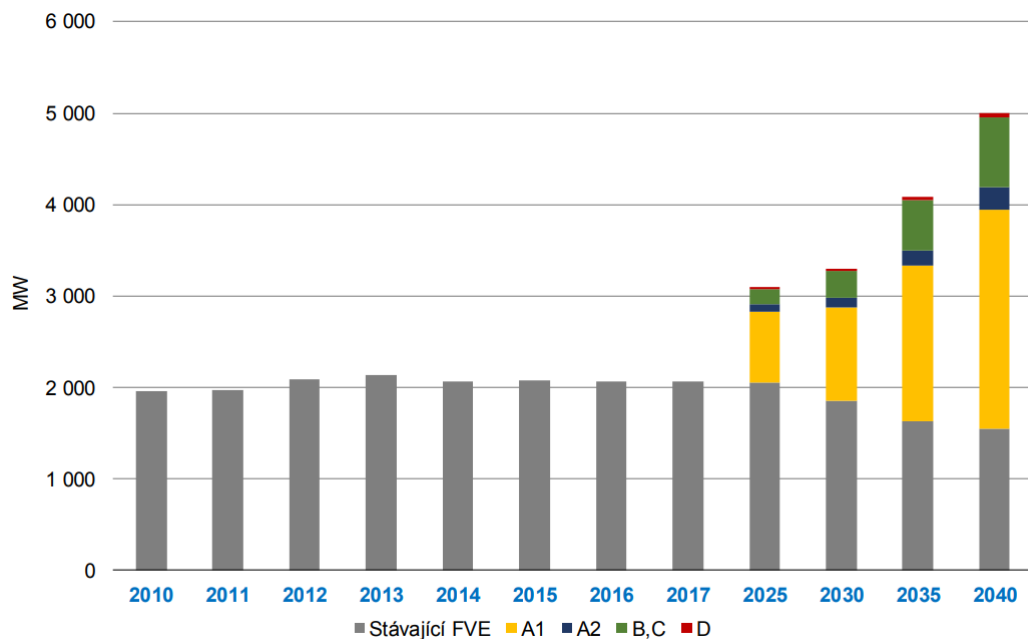
Kategorie zdroje	Výkon zdroje	Napěťová hladina	P _{inst} [MW]	Počet instalací
A1	od 800 W do 11 kW vč	nn	26 180	2 289 500
A2	od 11 kW do 100 kW vč.	nn/vn	2 590	70 800
B, C	od 100 kW do 10 MW vč.	vn	9 610	1 920
D	od 10 MW	110 kV	620	30
celkem			39 000	2 362 250

Tabulka č. 2 – Celkový technický potenciál, počet a kategorie [7]

Ekonomický potenciál instalovaného výkonu FVE, tedy reálný potenciál, je pro rok 2030 stanovený na 3,5 GW a pro rok 2040 na 5,5 GW. [7]

Kategorie zdroje	Výkon zdroje	Napěťová hladina	2030	2040
A1	od 800 W do 11 kW vč	nn	102 400	240 400
A2	od 11 kW do 100 kW vč.	nn/vn	3 200	7 400
B, C	od 100 kW do 10 MW vč.	vn	69	176
D	od 10 MW	110 kV	2	3
celkem			105 671	247 979

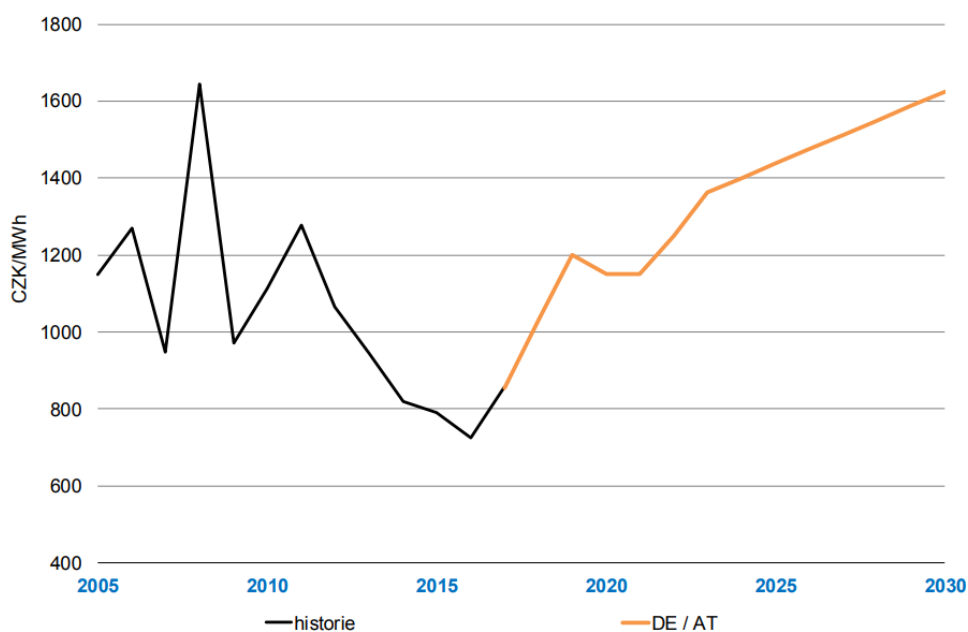
Tabulka č. 3 – Počet nových instalací [7]



Obrázek č. 7 – Ekonomický potenciál instalovaného výkonu FVE dle EGÚ Brno a minulost [7]

Z předchozí Tabulky č. 3 a Obrázku č. 7 je zřejmé, že počet FV instalací na hladině NN bude v budoucnu výrazně stoupat.

Tyto odhady souvisí také s vývojem ceny silové elektřiny, která se však predikuje velmi složitě. Předpokládá se, že ceny silové elektřiny v ČR budou do roku 2030 kopírovat ceny na německé burze. Dále autoři posudku EGÚ Brno [7] počítají ve svých odhadech s mírně rostoucí cenou emisních povolenek od cca 20 EUR za tunu v roce 2020 po cca 30 EUR za tunu v roce 2030. Cena emisních povolenek však od roku 2021 do začátku roku 2022 vzrostla o více jak 200 % a začátkem února 2022 dosáhla téměř 100 EUR za tunu. [8] Emisní povolenky jsou jedním z nástrojů EU k motivaci producentů CO₂ k přechodu na technologie, které budou více ekologické a účinnější. Cena emisních povolenek začala výrazněji růst v roce 2018 a její nárůst se ještě zvýšil na podzim 2020. Za rekordním zvýšením ceny stála dlouhá zima 2020-2021, vstup spekulantů na trh s emisními povolenkami a snížení počtu emisních povolenek. Na trhu mohou emisní povolenky nakupovat také spekulanti, kteří nemusí být producenty CO₂ a tudíž emisní povolenky ani nepotřebují, čímž zbytečně uměle navyšují jejich cenu a snižují jejich počet. Energetika je pomalé odvětví v tom smyslu, že není schopna reagovat na změnu ceny emisních povolenek ze dne na den, což je při stále rostoucí ceně povolenek ekonomicky náročné. [9] Následkem tohoto růstu je mnohem dramatičtější zvýšení ceny silové elektřiny, než který byl v posudku EGÚ Brno [7] predikován.



Obrázek č. 8 – Očekávaný vývoj ceny silové elektřiny [7]

Ke skokovému nárůstu ceny silové elektřiny by podle EGÚ Brno mělo dojít mezi lety 2022 a 2023, kdy budou odstaveny jaderné elektrárny v Německu. Další růst po roce 2023 pak odráží předpokládaný růst emisních povolenek, paliv a pozvolné změny ve zdrojové základně. Vzhledem k současné situaci však ceny silové elektřiny budou mnohem vyšší, než EGÚ Brno předpokládalo. [7]

1.4 FVE na českém trhu

Instalovaný výkon malých FVE na střechu rodinných domů se pohybuje běžně v rozmezí 1,5 až 9,9 kWp. Pro provoz FVE s instalovaným výkonem 10 kWp a vyšším už výroba elektrické energie vyžaduje licenci. [10] Přebytečnou energii lze využít několika způsoby např. akumulací do baterií, na ohřev vody nebo na vytápění domu. Takové využití přebytečné energie snižuje spotřebu objektu a představuje tím pádem ekonomicky efektivnější způsob snížení nákladů za elektřinu, než kdyby veškeré přebytky byly dodávány pouze do sítě. Cena za dodanou kWh do sítě je poměrně nízká ve srovnání s cenou za kWh silové elektřiny ze sítě odebranou. Nejčastěji se tak v ČR setkáváme s FVE s možností akumulace energie do vody nebo do baterie. Vzhledem k tomu, že se budu v této práci zabývat hybridními FVE, uvedu v následujících dvou tabulkách FVE spadající do podoblasti podpory NZÚ C.3.3, C.3.4, C.3.5, C.3.6 a C.3.7. V těchto tabulkách jsou zobrazeny nejčastěji nabízené tzv. „FVE na klíč“. Jedná se v podstatě o jakýsi balíček, který obsahuje veškeré komponenty FVE a zahrnuje např. i vypracování projektu, vyřízení žádosti NZÚ a případně instalaci. Tyto údaje slouží pouze pro představu. V praxi jsou často FVE projektovány na míru na základě individuálních potřeb a požadavků.

FV systém s ohřevem vody (C.3.3, C.3.4)		
Instalovaný výkon FVE	Střídač	Cena vč. DPH
2 kWp	1 fázový	113 125 Kč
2,25 kWp	Fronius Galvo	120 000 Kč
2,7 kWp	Fronius Galvo	139 000 Kč
3,3 kWp	Fronius Primo	145 000 Kč
3,6 kWp	Fronius SYMO	170 000 Kč
4,5 kWp	GoodWe GW	197 000 Kč

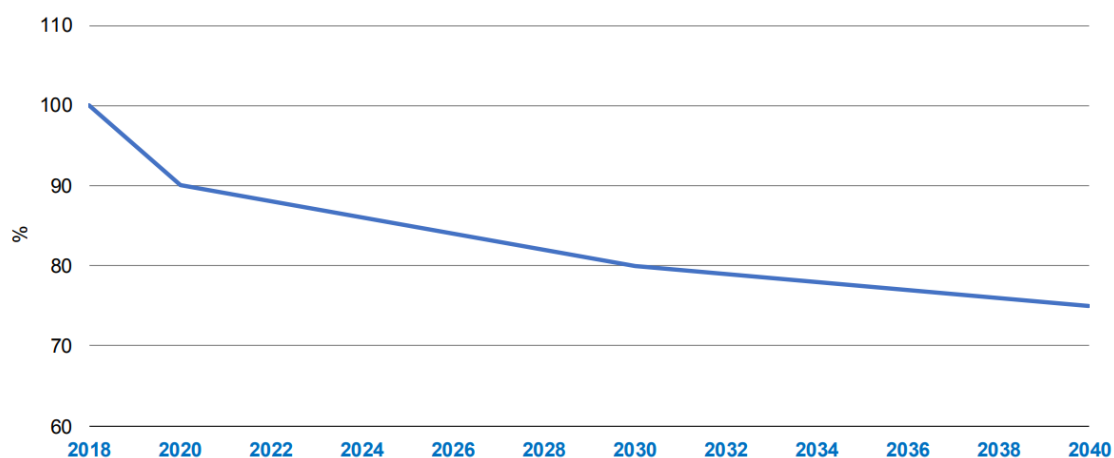
Tabulka č. 4 – Nabídky FVE na klíč a základní informace o FVE – systém s ohřevem vody [11] [12] [13] [14] [15] [16]

FV systém s využitím baterie (C.3.5, C.3.6., C.3.7)				
Instalovaný výkon FVE	Střídač	Baterie	Kapacita baterie	Cena vč. DPH
2,25 kWp	GoodWe GW	Pylontech	3,55 kWh	195 000 Kč
2,7 kWp	GoodWe GW	Pylontech	4,8 kWh	215 000 Kč
3,12 kWp	x	x	7,2 kWh	344 659 Kč
3,6 kWp	GoodWe GW	Pylontech	4,8 kWh	240 000 Kč
4 kWp	x	x	7,2 kWh	390 973 Kč
4,5 kWp	GoodWe GW	Pylontech	7,1 kWh	315 000 Kč
5,4 kWp	GoodWe GW	Pylontech	7,1 kWh	330 000 Kč
6,5 kWp	x	x	11,6 kWh	544 914 Kč
7,2 kWp	GoodWe GW	Pylontech	10,65 kWh	410 000 Kč
9,9 kWp	GoodWe GW	Pylontech	14,2 kWh	475 000 Kč

Tabulka č. 5 – Nabídky FVE na klíč a základní informace o FVE – systém s akumulací energie do baterie [11] [12] [13] [14] [15] [16]

Požizovací cena za FVE se tedy pohybuje od cca 100 000 Kč do 550 000 Kč v závislosti na velikosti instalovaného výkonu a možnosti akumulace.

Příznivou zprávou je, že podle EGÚ Brno [7] se dá očekávat pokles cen FV instalací. V roce 2030 by mohly náklady na pořízení FV elektrárny klesnout o 20 % a v roce 2040 o 25 %.



Obrázek č. 9 – Očekávaný pokles cen fotovoltaiky [7]

V ČR se pro rodinné FVE používají, jak monokrystalické, tak i polykrystalické panely např. značky Canadian Solar, Axitec, Munchen Solar nebo LG. V Tabulce č. 6 jsou vypsány základní technické parametry FV monokrystalického panelu značky Canadian Solar o výkonu 450 Wp.

Canadian Solar HiKu CS3W-450MS	
Elektrické parametry (STC)	
Nominální výkon [W _p]	450
Jmenovité napětí U _{mp} [V]	41,1
Maximální proud při zátěži I _{mp} [A]	10,96
Napětí naprázdno U _{oc} [V]	49,1
Proud nakrátko I _{sc} [A]	11,6
Max. účinnost modulu [%]	20,4
Maximální systémové napětí [V]	1000/1500
Další parametry	
Záruka výrobce	25 let (80 %), 10 let (90 %)
Typ konektoru	MC4-EVO2
Typ buněk	monokrystalické
Počet buněk na modul	144
Cena (přibližně)	5 000 Kč

Tabulka č. 6 – Technické parametry FV panelu Canadian Solar 450 Wp [17]

2 BATERIOVÉ SYSTÉMY PRO AKUMULACI ELEKTRICKÉ ENERGIE

2.1 Základní informace o bateriových systémech

FVE s bateriovým systémem umožňuje ukládat nespotřebovanou elektrickou energii na později např. na večer, kdy je spotřeba obvykle vyšší, čímž dochází k větší úspoře elektrické energie odebírané z DS v porovnání s FV systémem bez akumulace.

V současné době se pro FV aplikace nejvíce používají lithiové akumulátory. Jsou to akumulátory s bezvodým elektrolytem. Katoda je tvořena oxidem lithia a jiného kovu např. Mn, Ni nebo Co. Anoda je vyrobena z porézního uhlíku. Jako elektrolyt se používá lithiová sůl např. LiPF_6 v nepolárním organickém rozpouštědle. Existuje několik typů lithiových akumulátorů. Pro potřeby této práce však blíže zmíním pouze dva. [1] [18]

Prvním typem jsou lithium-iontové články s kapalným elektrolytem. Jmenovité napětí jednotlivých článků je 3,6 V, nabíjecí napětí pak 4,2 V na článek. Energetická hustota se pohybuje mezi cca 150-200 Wh/kg. Druhým typem jsou články LFP (lithium-železo-fosfát) označované nejčastěji jako LiFePO_4 . Jmenovité napětí článků je 3,2 V a nabíjecí napětí 3,6 V. Energetická hustota je nižší a pohybuje se mezi cca 90-120 Wh/kg. Výhodou tohoto typu je větší proudová zatížitelnost a určitá odolnost proti hlubokému vybití. [18]

Jednotlivé články je možné serioparalelně spojovat a tím získat požadovanou kapacitu a výstupní napětí. Důležitou součástí těchto baterií je tzv. BMS, který balancuje energii uloženou v jednotlivých člancích baterie, čímž je zajištěna maximální kapacita článků a tím i jejich delší životnost. BMS představuje také velmi důležitou ochranu proti poškození baterie např. vlivem hlubokého vybití. V této souvislosti rozlišujeme pasivní a aktivní balancování. V současné době je používanější aktivní balancování, kdy je nabíjení a vybíjení jednotlivých článků řízeno mikroprocesorem. [18] [19]

Velkou předností akumulačních systému na bázi lithia je velmi malá hmotnost lithia na instalovanou kWh a možnost uložit větší množství energie na jednotku obsahu. Tyto baterie jsou vhodné pro dynamické akumulační systémy, neboť umožňují rychlé nabíjení a vybíjení. Vyznačují se také dlouhodobou životností a z pohledu zátěže na životní prostředí, co se týče výroby a následné recyklace, představují ohleduplnější řešení. [1]

2.2 Bateriové systémy pro malé fotovoltaické systémy

Tento odstavec pojednává o bateriích užívaných ve FV aplikacích dostupných na českém trhu. Z celkové nabídky byly vybrány tři konkrétní bateriové systémy, které se podle mého názoru vyskytují momentálně nejčastěji a představují různé zástupce způsobu řešení.

Baterie BYD B-Box Premium HVS je vysokonapěťová akumulátorová LFP baterie kompatibilní např. se střídačem značky Fronius, SMA či GoodWe, která se skládá z 2 až 5 HVS bateriových modulů o kapacitě 2,56 kWh spojených do série. Spojením jednotlivých modulů může baterie tedy dosáhnout kapacity od 5,1 do 12,8 kWh. Při paralelním spojení tří identických bateriových boxů je možno získat max. kapacitu 38,4 kWh. Dalším typem baterie je baterie BYD B-Box Premium HVM, která se skládá ze 3 až 8 HVM modulů o kapacitě 2,76 kWh. Rozsah využitelné kapacity je tedy v rozmezí 8,3 až 22,1 kWh. Při paralelní kombinaci tří identických boxů je možné získat max. kapacitu 66,2 kWh. [20]



Obrázek č. 10 – Vlevo bateriový modul HVS, vpravo bateriový systém BYD B-Box Premium HVS 7.7 [20]

V následující Tabulce č. 7 jsou uvedeny základní technické parametry baterie. Cena uvedená v této tabulce je pouze orientační a je vypočtena pouze na základě ceny bateriového modulu a jejich počtu v uvedeném systému. Tento předpoklad je použit i u následujících tabulek, aby bylo možné jednotlivé baterie mezi sebou porovnat. Do ceny tedy není započítána cena např. boxu, racku nebo BMS.

BATTERY-BOX PREMIUM HVS/HVM		
Technické údaje		
HVS		
Typ	HVS 7.7	HVS 10.2
Bateriový modul	HVS (2,56 kWh; 102,4 V; 38 kg)	
Počet modulů	3	4
Využitelná kapacita [kWh]	7,68	10,24
Max. výstupní proud [A]	25	
Špičkový výstupní proud [A] (po dobu 3 s)	50	
Jmenovité napětí [V]	307,2	409,6
Provozní napětí [V]	240~345,6	320~460,8
Cena (přibližně)	120 000 Kč	160 000 Kč
HVM		
Typ	HVM 8.3	HVM 16.6
Bateriový modul	HVM (2,76 kWh; 51,2 V; 38 kg)	
Počet modulů	3	6
Využitelná kapacita [kWh]	8,28	16,56
Max. výstupní proud [A]	40	
Špičkový výstupní proud [A] (po dobu 3 s)	75	
Jmenovité napětí [V]	153,6	307,2
Provozní napětí [V]	120~172,8	240~345,6
Cena (přibližně)	117 000 Kč	234 000 Kč

Tabulka č. 7 – Technické parametry baterie BYD B-Box Premium HVS/HVM [20] [21]

Dalším používaným systémem je baterie LG Chem Resu. Jedná se o lithium-iontovou baterii s kapacitou od 3,3 do 13 kWh. Baterie LG Chem Resu mohou být pro napětí 48 V nebo 400 V a jsou kompatibilní se střídači značky SMA, GoodWe nebo SolarEdge. [22]



Obrázek č. 11 – Baterie LG Chem Resu [22]

Baterie LG Chem Resu		
Technické údaje		
48 V		
Typ	RESU6.5	RESU10
Celková kapacita [kWh]	6,5	9,8
Využitelná kapacita [kWh]	5,9	8,8
Jmenovitá kapacita [Ah]	126	189
Jmenovité napětí [V]	51,8	
Provozní napětí [V]	42~58,8	
Jmenovitý výkon [kW]	4,2	5
Špičkový výkon [kW] (po dobu 3 s)	4,6	7
Počet cyklů	6000	
Cena (přibližně)	100 000 Kč	135 000 Kč
400 V		
Typ	RESU7H (Type-R)	RESU10H (Type-R)
Celková kapacita [kWh]	7	9,8
Využitelná kapacita [kWh]	6,6	9,3
Jmenovitá kapacita [Ah]	63	
Jmenovité napětí [V]	-	
Provozní napětí [V]	350~450	
Špičkový výkon [kW] (po dobu 10 s)	5	7
Počet cyklů	6000	
Cena (přibližně)	145 000 Kč	155 000 Kč

Tabulka č. 8 – Technické parametry baterie LG Chem Resu [21] [22]

Bateriový systém od firmy Pylontech najdete nejčastěji pod názvem Powercube. Jednotlivé bateriové moduly, většinou pod označením LiFePO4 Pylontech, se umísťují do tzv. racků, což je standardizovaný systém pro akumulaci energie. Jedná se o vysokonapěťové LFP baterie, které jsou nejčastěji používány se střídačem značky GoodWe a hodí se spíše pro větší solární systémy. Každý systém Powercube se liší typem bateriového modulu a jejich počtem např. Powercube-X1 je určen pro až 7 modulů H48050 (kapacita modulu je 2,4 kWh) a max. kapacita je 16,8 kWh, Powercube-H2 může být tvořen až 12 bateriovými moduly H48074 (kapacita modulu je 3,55 kWh) o max. kapacitě 42,62 kWh. [23]



Obrázek č. 12 – Bateriový systém Pylontech [24]

Systém akumulace energie POWERCUBE-X1	
Technické údaje	
Bateriový modul	H48050
Počet modulů	7
Kapacita bateriového modulu [kWh]	2,4
Kapacita bateriového systému [kWh]	16,8
Kapacita bateriového systému [Ah]	50
Napětí bateriového systému [V]	336
Nejvyšší napětí systému [V]	378
Nejnižší napětí systému [V]	315
Jmenovitý nabíjecí proud systému [A]	25
Účinnost [%]	96
Hloubka vybití (DOD) [%]	80
Počet provozních cyklů	3500
Cena (přibližně)	202 000 Kč

Tabulka č. 9 – Technické parametry systému POWERCUBE-X1 [21] [23]

3 RIZIKA SPOJENÁ SE ZVÝŠENÝM ZASTOUPENÍM ROZPTÝLENÉ VÝROBY V RÁMCI DISTRIBUČNÍ SÍTĚ NÍZKÉHO NAPĚTÍ A ODHAD CHOVÁNÍ MALOODBĚRATELŮ

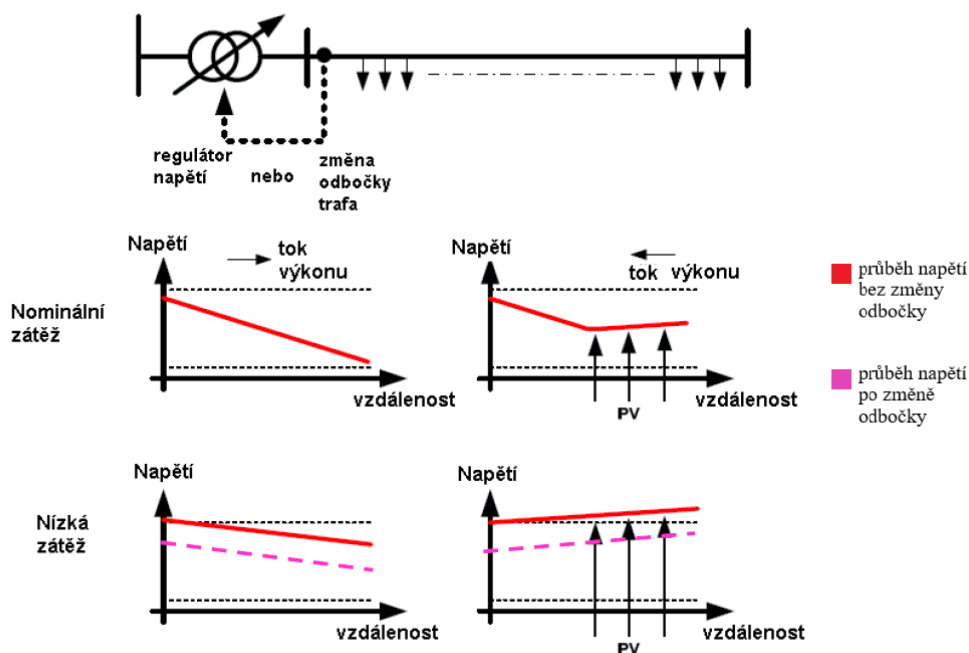
3.1 Rizika vznikající při zvýšeném měřítku zastoupení rozptýlené výroby v rámci distribuční soustavy nízkého napětí

3.1.1 Rozptýlená výroba

Rozptýlená nebo také decentralizovaná výroba elektrické energie se vyznačuje velkým počtem zdrojů o malém výkonu, které jsou umístovány v místě spotřeby. Jedná se o model výroby spojený s rozvojem OZE. Naproti tomu centralizovaná výroba elektrické energie, která zatím v ČR stále převládá, je charakterizována malým počtem zdrojů o velkém výkonu a k přepravě elektřiny od těchto zdrojů dochází na velké vzdálenosti. [25]

3.1.2 Rizika spojená se zvýšeným zastoupením rozptýlené výroby v rámci distribuční sítě nízkého napětí

Při zvýšeném počtu malých zdrojů v částech DS může být ovlivněna kvalita elektrické energie. Elektrizovaná soustava v ČR je uzpůsobena centrální výrobě elektrické energie, u které předpokládáme, že se napětí (výkon) směrem od zdroje ke spotřebiteli snižuje. V případě, kdy umístíme vícero zdrojů do DS např. NN se může stát, že výkon dodávaný těmito decentrálními zdroji, v našem případě FVE, může být náhle tak velký, že ho tato část sítě nebude schopna pojmout a dojde k přetoku energie z nižší napěťové soustavy do vyšší. Tento princip je zobrazen na Obrázku č. 13. Z obrázku je dále patrné, jak velký vliv má zatížení sítě. Pokud je zatížení nízké, tzn. odběr ze sítě není tak velký, je riziko výše popsaného jevu vyšší. Z tohoto pohledu má FVE jednu velkou nevýhodu a to tu, že vyrábí a dodává největší výkon v období, kdy je spotřeba elektrické energie (zatížení sítě) nejmenší. [26] [27]



Obrázek č. 13 – Obrázek zobrazující napětí v DS při různém zatížení soustavy [27]

Z hlediska kvality elektrické energie, konkrétně napájecího napětí, nás v tomto případě zajímají zejména odchylky napájecího napětí v sítích NN. Odchylka napětí by neměla překročit $\pm 10\%$ jmenovitého napětí U_n . Podle [28] musí být za normálních provozních podmínek v rozsahu $\pm 10\%$ U_n 95 % hodnot napětí. Pro zajištění požadované hodnoty napětí ve všech místech DS lze využít např. automatickou regulaci napětí u transformátorů VVN/VN nebo přestavení odboček distribučních transformátorů VN/NN. Síť 110 kV tvoří spojovací článek mezi přenosovou soustavou a distribučními soustavami. Regulaci transformátoru VVN/VN, který je posledním článkem regulace napětí v distribučních soustavách, lze provádět pod zatížením. Tyto transformátory jsou vybaveny automatickým regulátorem napětí a většina má odbočkový přepínač na straně VN v rozsahu $110\text{ kV} \pm 8 \times 2\% / \text{VN}$. Regulace napětí lze také dosáhnout nastavením převodu distribučních transformátorů VN/NN, které jsou vybaveny odbočkami na primární straně a lze je přepínat pouze ve stavu bez napětí. Starší transformátory mají 3 stupně: $+5\%$, 0% a -5% . Novější transformátory mají 5 stupňů: $+5\%$, $+2,5\%$, 0% , $-2,5\%$ a -5% . Při nastavení kladné hodnoty se napětí na výstupu sníží, v případě záporné hodnoty se napětí zvýší. Při nízkém zatížení sítě a vysokém dodávaném výkonu decentrálními zdroji narůstá napětí. Vzhledem k tomu, že se přepínač nachází na VN straně, by v důsledku vyššího napětí mohlo dojít k přesycení transformátoru ze strany NN. U NN vinutí by zase mohlo v důsledku vyššího napětí, než na které je vinutí navrženo, docházet k přesycování magnetického obvodu.

Řešením, kterým by se dalo předejít nežádoucímu zvýšenému napětí, je přepnutí odbočky transformátoru. U distribučních transformátorů se však odbočky mění manuálně a v beznapěťovém

stavu, což znamená, že udržení napětí v dovolených mezích tímto opatřením je téměř nerealizovatelné. Jedním z řešení by bylo změnit odbočku distribučního transformátoru např. při revizi. To by však znamenalo, že po tuto dobu by byli zákazníci bez dodávky elektrické energie. Distribučních transformátorových stanic je navíc v DS velké množství. [29]

Dalším potenciálním problémem může být nedostatečné dimenzování jednotlivých prvků soustavy při velkém přetoku výkonu do sítě. Např. z hlediska proudové zatížitelnosti kabelového vedení se může stát, že kabely tvořící hlavní páteř sítě a nacházející se nejbližší distribučnímu transformátoru budou přetížené, což by při dlouhodobém provozu mohlo způsobit zrychlené stárnutí izolace, následně její porušení až např. zkrat. Řešením je buď nahradit dotčené kabely za jiné s vyšším průřezem, případně doplnit ty stávající o další, paralelní, kabely.

3.2 Analýza spotřeby elektrické energie malooběratelů

V současné době vznikají ve větší míře rezidenční zástavby, ve kterých jsou kladeny vyšší požadavky na energetickou náročnost staveb. Příkladem takové rezidenční zástavby jsou např. Konhefrovy domy v Horních Počernicích, kde jsou pro splnění energetických nároků použita tepelná čerpadla sloužící k vytápění, chlazení i ohřevu teplé užitkové vody. Pro analyzování vlivu FV systémů a bateriových úložišť bude vytvořen model soustavy podobné rezidenční zástavby se stejným charakterem odběru v odběrných uzlech.



Obrázek č. 14 – Pohled na rezidenční zástavbu Konhefrovy domy v Horních Počernicích [30]

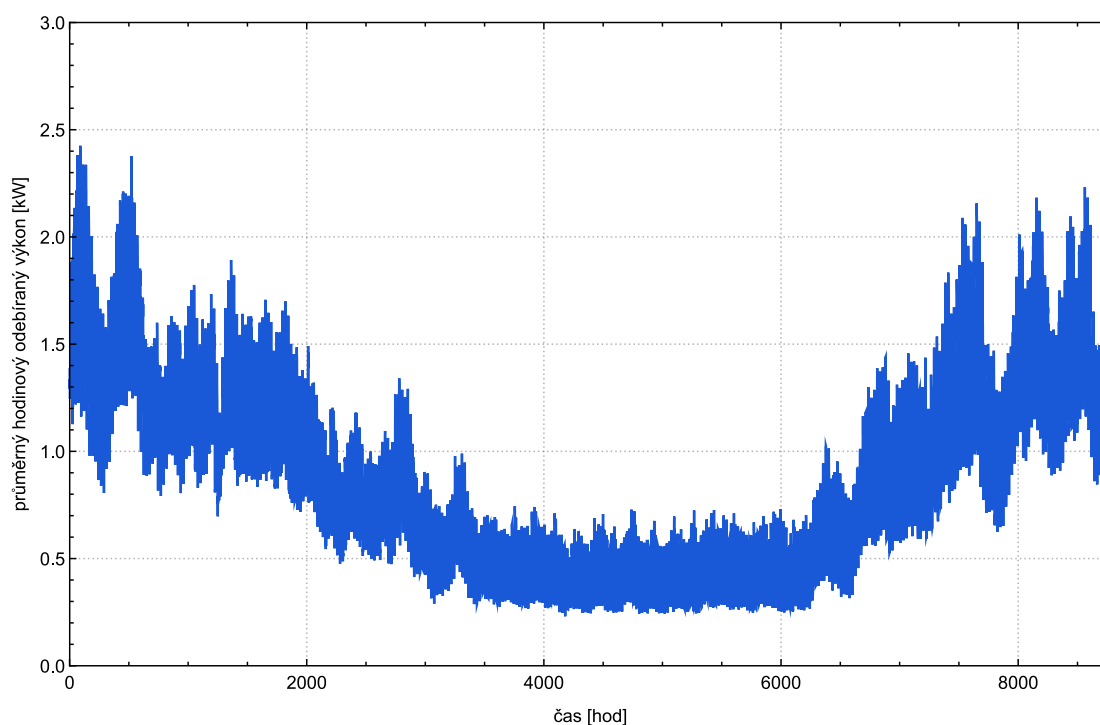
3.2.1 Odhad roční spotřeby elektrické energie

Pro odhad roční spotřeby elektrické energie bude využito přepočteného typového diagramu dodávky, zkráceně TDD. Přepočtené TDD respektuje skutečné denní průměrné teploty a přepočítává se z normalizovaného TDD, které bere v úvahu normálové průměrné denní teploty. Mezi těmito TDD se stanovuje koeficient, který je platný pro daný obchodní den a respektuje vliv skutečné teploty v daném dni na zatížení. [31] V ČR máme celkem 8 tříd TDD podle typu odběratele a charakteru odběru. [32] Vzhledem k tomu, že rodinné domy ve vybrané modelové DS využívají pro vytápění, chlazení a ohřev

vody tepelné čerpadlo, spadá jejich odběr do TDD7. Roční průměrná spotřeba zákazníků patřících do TDD7 je pro velikost jističe nad 3 x 20 A do 3 x 25 A včetně 7 827,6 kWh/rok. Tato roční spotřeba byla určena jako průměr ročních spotřeb elektrické energie mezi lety 2017-2021. [31] Velikost jističe 3 x 25 A se v kombinaci s tepelným čerpadlem poměrně běžně používá a jeho hodnota by měla být dostačující. Průměrný hodinový odebraný výkon v průběhu celého roku lze získat z celostátních přepočtených TDD7. [33] Jedná se o koeficienty nabývající hodnot od 0 do 1, zobrazující profil odběru dané třídy TDD 24 hodin denně. Hodnoty přepočteného TDD7 byly vybrány s ohledem na dostupná data výroby FVE pro rok 2016. Aby bylo možné průměrnou roční spotřebu pro TDD7 rozpočítat do jednotlivých hodin v průběhu jednoho roku, je nutné určit konstantu k pomocí následujícího vzorce:

$$E = k \cdot \sum_{i=1}^{8784} TDD7_i \quad (3.1)$$

E je průměrná roční spotřeba zákazníku v TDD7 a $TDD7_i$ představuje i -tý koeficient. Dosazením získáme k rovno 2,24.



Graf č. 1 – Graf zobrazující průměrný hodinový odebraný výkon rodinného domu v průběhu roku 2016 [31] [33]

Při výpočtech bude uvažováno s účínkem $\cos\varphi = 0,95$. Vzhledem k tomu, že jsou k dispozici pouze data o činném výkonu, je nutné dopočítat výkon jalový. Ten lze jednoduše určit na základě tohoto vzorce:

$$Q = P \cdot tg\varphi \quad (3.2)$$

3.3 Výroba elektrické energie z FVE a její uložení do baterie

Instalovaný výkon FVE pro rodinné domy byl zvolen s ohledem na průměrnou roční spotřebu 7 827,6 kWh na 7,2 kWp.

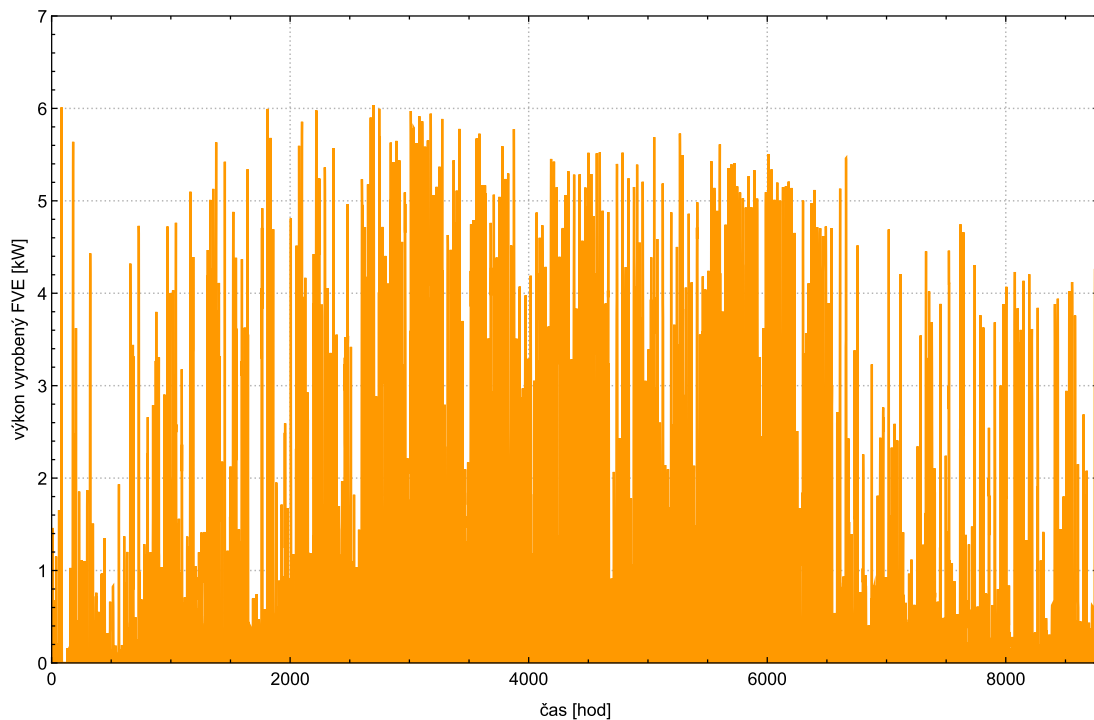
Pro určení roční výroby FVE byl využit program PVGIS [34]: hourly radiation data. Zvolena byla databáze PVGIS-SARAH, která je přesnější, než výchozí databáze PVGIS-CMSAF. Nejnovější hodinové údaje jsou dostupné pouze pro rok 2016. Typ upevnění je fixní, sklon je zvolen 35°, což je optimální sklon pro ČR [35] a azimut 0° znamená, že panely budou natočeny přesně na jih. FV panely jsou z krystalického křemíku a systémové ztráty jsou nastaveny defaultně na 14 %. Pro generování dat je však potřeba uvést ještě souřadnice oblasti, kde se bude FV systém nacházet. Zvolena byla oblast rezidenční zástavby v Horních Počernicích, neboť vybraná modelová DS se fyzicky nikde nenachází.

The screenshot displays the PVGIS 'Hourly Radiation Data' configuration interface. On the left is a map showing a residential area in Horních Počernicích. The right panel contains the following settings:

- Cursor:** Selected: 60.125, 14.632; Elevation (m): 263
- Use terrain shadows:** Calculated horizon; Upload horizon file
- Solar radiation database:** PVGIS-SARAH
- Start year:** 2016; **End year:** 2016
- Mounting type:** Fixed; Vertical axis; Inclined axis; Two axis
- Slope [°]:** 35; Optimize slope
- Azimuth [°]:** 0; Optimize slope and azimuth
- PV power:** PV power
- PV technology:** Crystalline silicon
- Installed peak PV power [kWp]:** 7.2
- System loss [%]:** 14
- Radiation components

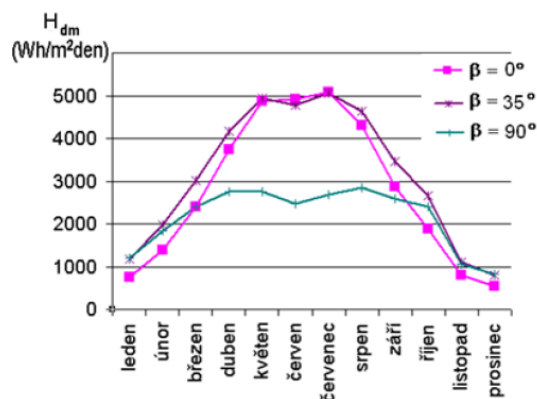
Buttons for downloading data as CSV and JSON are visible at the bottom of the configuration panel.

Obrázek č. 15 – Nastavení parametrů pro výpočet v PVGIS hourly radiation data [34]



Graf č. 2 – Graf zobrazující hodinový výkon vyráběný FVE v průběhu roku 2016 [34]

Z Grafu č. 2 je možné si všimnout, že max. výkon FVE se nenachází v letních měsících, kde bychom ho předpokládali. Je to dáno úhlem sklonu β FV panelů, který by měl být optimálně roven úhlu zeměpisné šířky při zanedbání vlivu atmosféry. Vzhledem k tomu, že reálně vliv atmosféry zanedbat nelze, se jako optimální sklon volí 35° , protože difúzní záření zvýhodňuje menší úhly sklonu. Při orientaci FV panelů na Jih odpovídá většímu ozáření v letních měsících menší sklon β a v zimních měsících zase větší sklon β viz. následující Obrázek č. 16. [36]



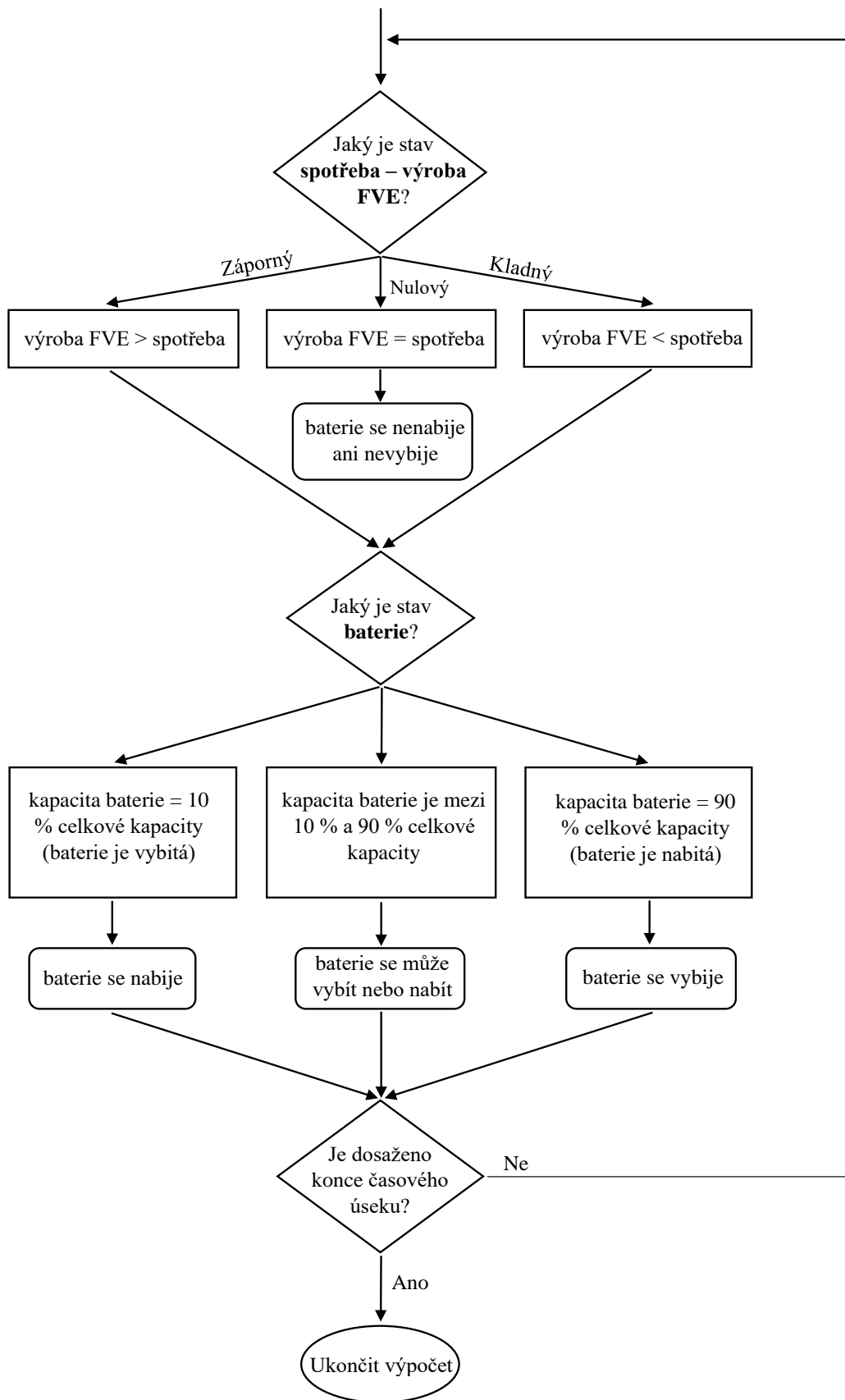
Obrázek č. 16 – Průběh ozáření H v závislosti na daném měsíci v roce pro různé úhly sklonu β [36]

Při výpočtech se pro zjednodušení uvažuje s účinníkem $\cos\varphi = 1$. Odběrná místa s FVE tedy do sítě dodávají pouze činný výkon.

3.3.1 Baterie

Pro variantu FVE s baterií je zvolena kapacita baterie 10,65 kWh. FVE s tímto instalovaným výkonem a kapacitou baterie patří mezi běžně nabízené „FVE na klíč“ pro domácnosti se spotřebou do 9 MWh/rok. [11] Kapacita baterie se volí na základě instalovaného výkonu. Minimální měrná kapacita akumulátorů (Li-Ion, LiFePO₄, LiFeYPO) je podle [37] 1,25 kWh/kWp. Baterie by se měla nabíjet maximálně do 90–95 % kapacity baterie a vybíjet minimálně na 10–15 % kapacity pro zachování výrobcem garantovaného množství nabíjecích cyklů. Čím méně kapacity baterie se využívá, tím déle vydrží. Při výpočtech uvažuji s tím, že se baterie bude nabíjet maximálně na 90 % kapacity a vybíjet na 10 % kapacity baterie. [38]

Pro zjednodušení výpočtů se předpokládá chování baterie naprogramované v prostředí MS Office Excel viz. následující vývojový diagram.



Obrázek č. 17 – Vývojový diagram chování baterie

4 METODIKA A MATEMATICKÝ MODEL PRO ANALYZOVÁNÍ VLIVU ROZPTÝLENÉ VÝROBY A AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE

4.1 Výpočetní metoda

4.1.1 Ustálený chod soustavy

Ustálený chod soustavy je stav, ve kterém nedochází k přechodovým jevům. Matematická formulace výpočtu ustáleného chodu sítě vede na soustavu nelineárních rovnic. Pro řešení nelineárního matematického modelu je nutné použít iterační metody. Z těchto metod se používá Gauss-Seidlova a Newton-Raphsonova iterační metoda. Hlavními nevýhodami těchto metod jsou časová náročnost výpočtu, konvergence řešení ke špatnému výsledku, nebo řešení nekonverguje vůbec. Pro sestavení základních rovnic popisujících soustavu se používají některé z metod řešení lineárních obvodů. V praxi se nejčastěji používá metoda uzlových napětí. [39]

Ustálený chod je popsán čtyřmi uzlovými veličinami: absolutní hodnota napětí U , úhel napětí δ , činný výkon P a jalový výkon Q . Při řešení ustáleného chodu sítě rozlišujeme několik typů uzlů, podle toho, které z přechodových hodnot známe a které ne. Slackem neboli bilančním uzlem označujeme uzel, u kterého máme zadáno napětí U a jeho úhel δ . Slack má za úkol udržovat bilanci uzlových výkonů tak, aby se dodávka rovnala odběru. V tomto případě se dopočítává činný a jalový výkon. Uzel typu PQ neboli odběrový uzel je uzel, u kterého máme zadané hodnoty činného a jalového výkonu a zjišťujeme napětí a jeho úhel. Výkony jsou do uzlu dodávány nebo jsou z uzlu odebírány. Většina uzlů v elektrizační soustavě jsou tohoto typu. Posledním typem uzlu je uzel PU neboli regulační uzel, u kterého víme činný výkon a napětí a dopočítává se úhel napětí a jalový výkon. [39]

4.1.2 Výpočet ustáleného chodu sítě

V uzlech bývají odběry a dodávky obvykle zadány činnými a jalovými výkony. [39]

Pro i -tý uzel platí vztah:

$$S_i = P_i + jQ_i = U_i \cdot I_i^* \quad (4.1)$$

Z rovnice (4.1) vyjádříme komplexně sdružený proud:

$$I_i^* = \frac{S_i}{U_i} = \frac{P_i + jQ_i}{U_i} \quad (4.2)$$

Úpravou předchozí rovnice (4.2) získáme vztah pro proud v i -tém uzlu:

$$I_i^* = \frac{S_i^*}{U_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{U_i^*} = \sum_{j=1}^n Y_{i,j} \cdot U_j \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.3)$$

Rovnice (4.3) je základní nelineární rovnicí popisující ustálený chod sítě.

4.1.3 Newton-Raphsonova iterační metoda

Tato iterační metoda, vycházející z Taylorova rozvoje, je nejrozšířenější metodou pro řešení nelineárních rovnic. [40]

Řešená soustava n nelineárních rovnic o n neznámých je ve tvaru:

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= c_1 \\ \vdots & \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= c_n \end{aligned} \quad (4.4)$$

Rozvojem do Taylorovy řady dostaneme:

$$\begin{aligned} (f_1)^{(0)} &= \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(0)} \cdot \Delta x_1^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(0)} \cdot \Delta x_n^{(0)} = c_1 \\ \vdots & \\ (f_n)^{(0)} &= \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(0)} \cdot \Delta x_1^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(0)} \cdot \Delta x_n^{(0)} = c_n \end{aligned} \quad (4.5)$$

Soustavu rovnic (4.5) přepíšeme do maticového zápisu:

$$\begin{pmatrix} c_1 - (f_1)^{(0)} \\ \vdots \\ c_n - (f_n)^{(0)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(0)} \\ \vdots & & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(0)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Zjednodušený maticový zápis rovnice (4.6):

$$(\Delta C^{(0)}) = (J^{(0)}) \cdot (\Delta X^{(0)}) \quad (4.7)$$

(matice defektů) = (Jakobiho matice) · (matice odchylek)

Algoritmus iterační metody je tedy:

$$\begin{aligned} (\Delta C^{(k)}) &= \begin{pmatrix} c_1 - (f_1)^{(k)} \\ \vdots \\ c_n - (f_n)^{(k)} \end{pmatrix} \\ (\Delta X^{(k)}) &= (J^{(k)})^{-1} \cdot (\Delta C^{(k)}) \\ (\Delta X^{(k+1)}) &= (X^{(k)}) + (\Delta X^{(k)}) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Aplikací této iterační metody na rovnici (4.3) popisující ustálený chod sítě získáme [41]:

$$(\mathbf{S}) = (\mathbf{U}_{diag}) \cdot (\mathbf{I}^*) = (\mathbf{U}_{diag}) \cdot (\mathbf{Y}^*) \cdot (\mathbf{U}^*) \quad (4.9)$$

Roznásobením matice z rovnice (4.9) získáme obecný vztah pro zdánlivý výkon i-tého uzlu:

$$\mathbf{S}_i = \mathbf{U}_i \cdot \sum_{j=1}^n \mathbf{Y}_{i,j}^* \cdot \mathbf{U}_j \quad (4.10)$$

Napětí a admitance vyjádřené v exponenciálním tvaru:

$$\mathbf{U}_i = |\mathbf{U}_i| \cdot e^{j\text{Arg}(\mathbf{U}_i)} = U_i \cdot e^{j\delta_i} \quad (4.11)$$

$$\mathbf{Y}_{i,j} = |\mathbf{Y}_{i,j}| \cdot e^{j\text{Arg}(\mathbf{Y}_{i,j})} = Y_{i,j} \cdot e^{j\varepsilon_{i,j}} \quad (4.12)$$

Dosažením rovnic (4.11) a (4.12) do rovnice (4.10) získáme upravený vztah pro zdánlivé výkony v i-tých uzlech:

$$\mathbf{S}_i = \mathbf{U}_i \cdot \sum_{j=1}^n Y_{i,j} \cdot U_j \cdot e^{j(\delta_i - \delta_j - \varepsilon_{i,j})} \quad (4.13)$$

Pro činný a jalový výkon platí:

$$e^{j\varphi} = \cos(\varphi) + j\sin(\varphi) \quad (4.14)$$

$$P_i = U_i \cdot \sum_{j=1}^n Y_{i,j} \cdot U_j \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \varepsilon_{i,j}) \quad (4.15)$$

$$Q_i = U_i \cdot \sum_{j=1}^n Y_{i,j} \cdot U_j \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \varepsilon_{i,j}) \quad (4.16)$$

Jedná se o soustavu $2(n-1)$ rovnic pro $(n-1)$ neznámých napětí a jejich úhlů. Pro uzly typu PQ, kde známe činné a jalové výkony kromě slacku, kde je zadáno napětí U_1 a jeho úhel δ_1 , platí pro výpočet diferencí ΔU_i a $\Delta \delta_i$ tento zkrácený maticový tvar [39] [40]:

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial U} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

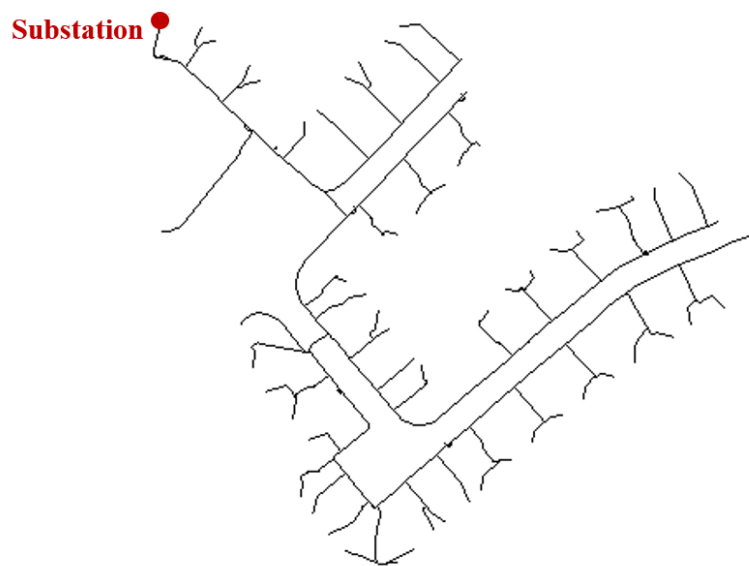
Algoritmus Newton-Raphsonovy metody:

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} \delta \\ U \end{pmatrix}^{(k)} \\ \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix}^{(k)} &= \begin{pmatrix} P_{zad} \\ Q_{zad} \end{pmatrix}^{(k)} - \begin{pmatrix} P \\ Q \end{pmatrix}^{(k)} \\ \begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{pmatrix}^{(k)} &= \mathbf{J}^{(k)-1} \cdot \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix}^{(k)} \\ \begin{pmatrix} \delta \\ U \end{pmatrix}^{(k+1)} &= \begin{pmatrix} \delta \\ U \end{pmatrix}^{(k)} + \begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{pmatrix}^{(k)} \end{aligned} \quad (4.18)$$

4.2 Model distribuční soustavy nízkého napětí

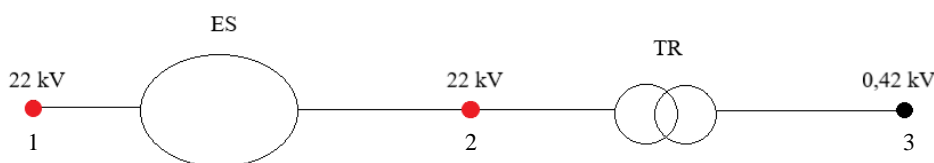
4.2.1 Popis modelu

Z důvodu dostupnosti kvalitních dat bude pro distribuční síť NN použit model IEEE European Low Voltage Test Feeder [42]. Jedná se o testovací model části DS používaný pro studium sítí NN běžných v Evropě k zachycení středního až dlouhodobého dynamického chování. Tento model je nutné modifikovat tak, aby parametry odpovídaly distribučnímu prostředí ČR. NN testovací soustava je uvažována radiální s frekvencí 50 Hz a napětím 420 V. Se soustavou vysokého napětí je spojena přes distribuční transformátor, který snižuje napětí z 22 kV na 420 V.



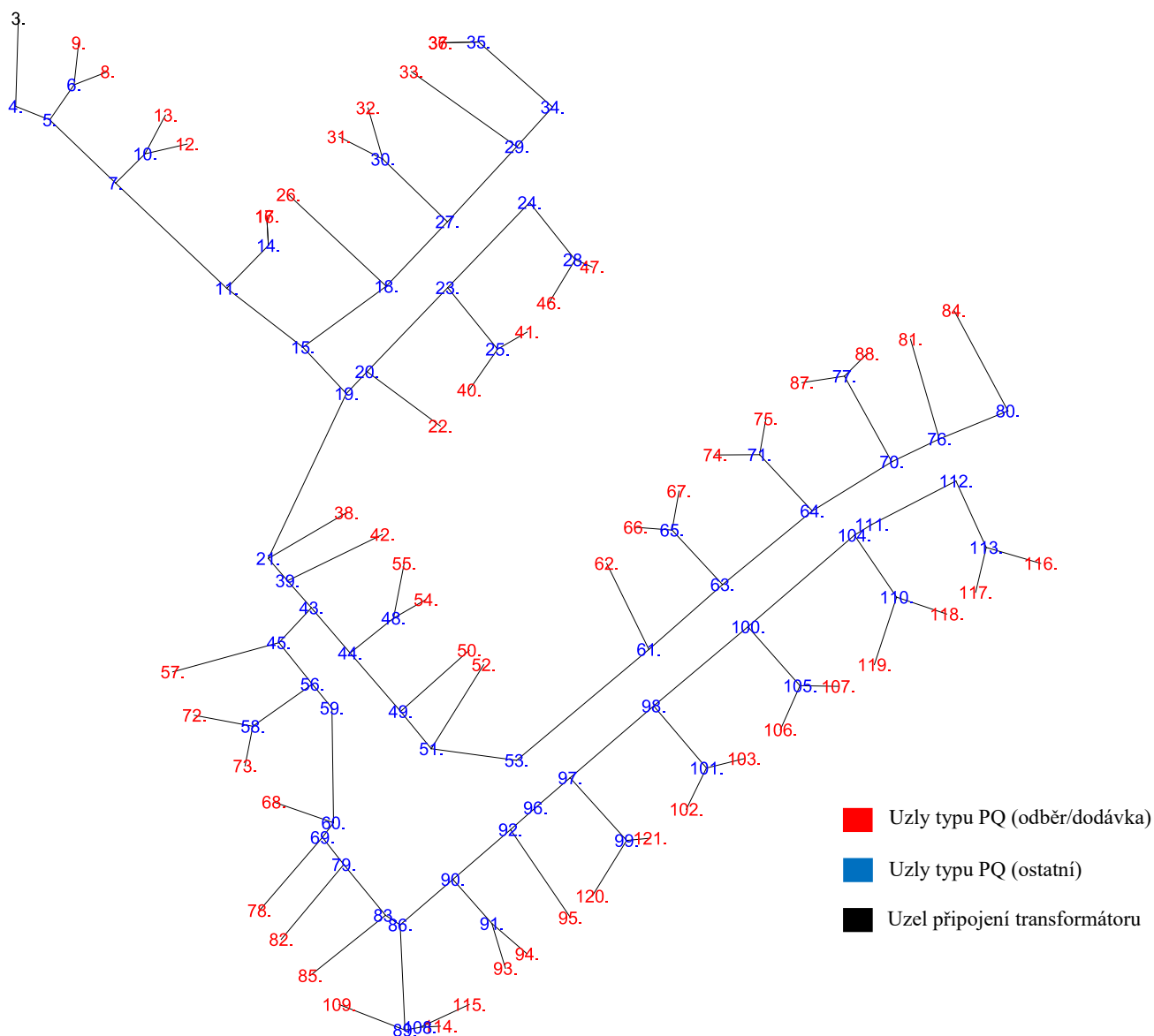
Obrázek č. 18 – Jednofázové schéma modelu distribuční sítě NN IEEE European Low Voltage Test Feeder [42]

Model je dále potřeba upravit z hlediska uzlů. Do modelu DS NN je nejprve nutné doplnit dva uzly. Napájecí bod transformátoru je tvořen dvěma fiktivními uzly, mezi kterými je vložena sériová impedance zkratového ekvivalentu VN a transformátoru viz. následující Obrázek č. 19:



Obrázek č. 19 – Schéma napájecího bodu transformátoru

V modelu soustavy se dále nacházejí uzly navíc, které slouží pro lomové body DS nebo nejsou pro výpočty důležité. Z tohoto důvodu je nutné vybrat pouze uzly, které jsou potřebné, aby např. nedošlo při výpočtu k chybám, neboť některé uzly mohou být od sebe vzdáleny pouze jednotky centimetrů. Ponechány byly tedy důležité uzly, které představují odběr, místo setkání více větví a uzly, kde je připojen transformátor. Oproti původní variantě je ještě nutné kvůli výpočtům vybrané uzly přečíslovat.



Obrázek č. 20 – Zjednodušený model distribuční soustavy NN [42]

Aby bylo možné uvažovat s jednofázovým schématem soustavy, je nutným předpokladem symetrická 3f soustava.

Po úpravě modelu IEEE se síť skládá celkem ze 121 uzlů z nichž dva jsou fiktivní a nejsou na předchozím zjednodušeném modelu DS zobrazeny. Uzel č. 1 (fiktivní) je bilančním uzlem neboli slackem. Hodnota napětí U_1 v tomto uzlu je 1,05 p.j., předpokládáme-li vztažné napětí U_v 400 V a úhel napětí δ_1 je roven 0° . Dalších 120 uzlů jsou uzly typu PQ z nichž 55 uzlů je odběrných. Při výpočtu je uvažováno pouze s podélnými impedancemi všech větví, příčné admittance jsou uvažovány nulové. Hodnoty budou v průběhu výpočtů vztaženy na výkon $S_v = 630$ kVA, tedy na jmenovitý výkon transformátoru a vztažné napětí $U_v = 400$ V.

Při výpočtech bude uvažována zdrojová znaménková konvence, tzn. dodávka je kladná a odběr je záporný.

4.2.2 Parametry prvků modelové sítě

Reaktance soustavy X_s a impedance transformátoru Z_{TR} jsou přepočítány na napěťovou hladinu 420 V.

Reaktance soustavy X_s :

$$X_s = \frac{U_s^2}{S_{ks}} \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 = \frac{22\,000^2}{50 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{420}{22\,000}\right)^2 = 3,53 \text{ m}\Omega \quad (4.19)$$

Reaktance transformátoru Z_{TR} :

$$Z_{TR} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_2^2}{S_{nT}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{420^2}{630 \cdot 10^3} = 16,8 \text{ m}\Omega \quad (4.20)$$

$$R_{TR} = \Delta P_k \cdot \frac{U_2^2}{S_{nT}^2} = 5\,600 \cdot \frac{420^2}{(630 \cdot 10^3)^2} = 2,5 \text{ m}\Omega \quad (4.21)$$

$$X_{TR} = \sqrt{Z_{TR}^2 - R_{TR}^2} = \sqrt{16,8^2 - 2,5^2} = 16,6 \text{ m}\Omega \quad (4.22)$$

Vysokonapěťová část soustavy je modelována jako napěťový zdroj s impedancí. Parametry ES jsou uvedeny v následující tabulce:

Parametry ES		
S_{ks}	50	MVA
X_s	3,53	mΩ

Tabulka č. 10 – Parametry ES

Do rozvodny byl vybrán distribuční transformátor o následujících parametrech:

Parametry transformátoru		
Zapojení vinutí	Dyn1	
U_1	22	kV
U_2	420	V
u_k	6	%
i_0	0,15	%
S_{nT}	630	kVA
P_k	5600	W
P_0	560	W
Z_{TR}	16,8	mΩ
R_{TR}	2,5	mΩ
X_{TR}	16,6	mΩ

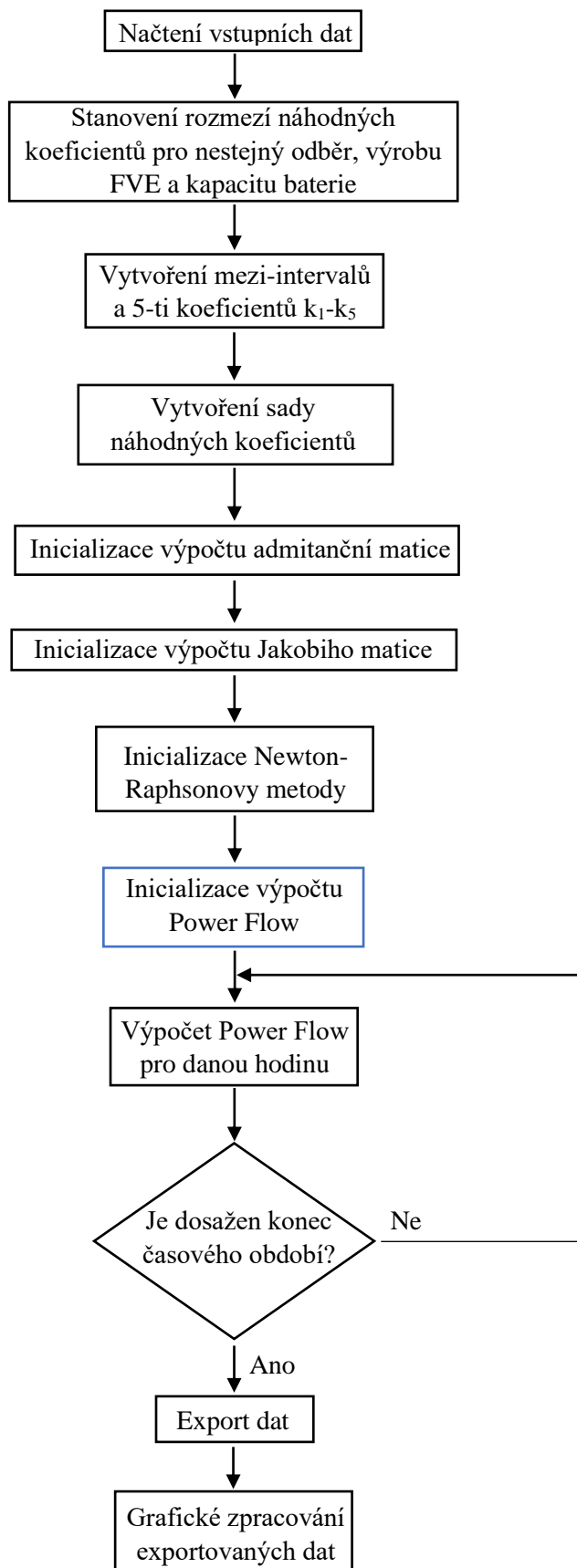
Tabulka č. 11 – Parametry 3f transformátoru

Parametry vedení byly převzaty ze zdrojů [42] a [43] a vzhledem k velkému množství dat jsou uvedeny v Příloze č. 1 této diplomové práce.

4.3 Matematický model

Pro vytvoření matematického modelu DS a výpočty ustáleného chodu sítě bude použit výpočetní program Wolfram Mathematica.

4.3.1 Princip výpočtu ustáleného stavu sítě v programu Wolfram Mathematica



Obrázek č. 21 – Vývojový diagram výpočtu ustáleného stavu sítě v programu Wolfram Mathematica

Načtení vstupních dat

Do modelu vstupují tři sady dat. První z nich obsahuje informace o čísle uzlu, typu a napětí uzlu a zdali je uzel odběrný, potenciálně výrobní. Ve druhém souboru jsou údaje o čísle větvi, z a do jakého uzlu vede, rezistanci a reaktanci větve a dále ještě hodnota max. dovoleného proudu, který závisí na typu vedení viz. Příloha č. 1. V posledním souboru jsou data o spotřebě jednoho OM pro danou hodinu. V případě, že se uvažuje s FVE je v souboru zahrnuta ještě výroba jednoho OM pro danou hodinu a pokud se počítá i s bateriovým systémem, obsahuje prostředí MS Office Excel ještě celkovou bilanci sítě se zahrnutím baterie a informaci o změnách výkonu baterie, tedy jejím nabíjení nebo vybíjení.

Stanovení rozmezí náhodných koeficientů pro nestejný odběr, výrobu FVE a kapacitu baterie

Pro přiblížení se reálné situaci bylo vytvořeno pět různých variant, které počítají s tím, že všechna OM nemají stejný odběr, výrobu elektrické energie (velikost FVE) a stejnou hodnotu kapacity baterie. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.2.1, roční průměrná spotřeba elektrické energie jednoho OM je 7,8 MWh. Pro určení krajních hodnot intervalu, ze kterého se budou generovat koeficienty pro vytvoření nestejných odběrů, výroby FVE a kapacity baterie, se k této hodnotě energie přičtou a odečtou 3 MWh. Max. a min. hodnota intervalu se určí následujícím postupem:

$$koef_{max} = \frac{7,8 + 3}{7,8} = 1,38 [-] \quad (4.23)$$

$$koef_{min} = \frac{7,8 - 3}{7,8} = 0,62 [-] \quad (4.24)$$

Vytvoření mezi-intervalů a pěti koeficientů k_1 - k_5

Dále je potřeba v intervalu $\langle koef_{max}; koef_{min} \rangle$ vytvořit 5 mezi-intervalů stejné velikosti:

$$velikost = \frac{koef_{max} - koef_{min}}{5} = 0,15 [-] \quad (4.25)$$

Získáme tedy tyto mezi-intervaly:

- $\langle 0,62; 0,77 \rangle$
- $\langle 0,77; 0,92 \rangle$
- $\langle 0,92; 1,08 \rangle$
- $\langle 1,08; 1,23 \rangle$
- $\langle 1,23; 1,38 \rangle$

Z těchto mezi-intervalů se následně určí koeficienty k_1 až k_5 :

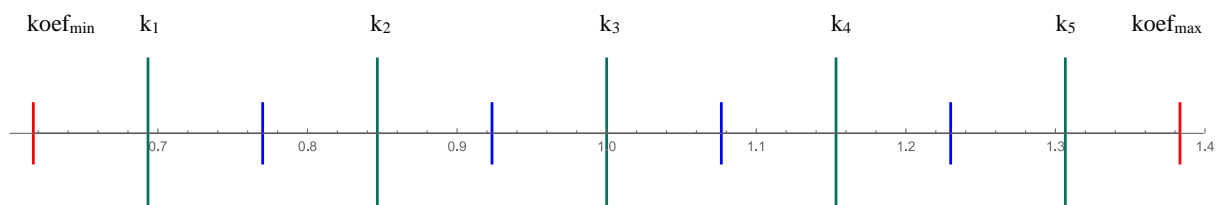
$$k_1 = 1 - \frac{4}{10} \cdot (1,38 - 0,62) = 0,69 [-] \quad (4.26)$$

$$k_2 = 1 - \frac{2}{10} \cdot (1,38 - 0,62) = 0,85 [-] \quad (4.27)$$

$$k_3 = 1 - \frac{0}{10} \cdot (1,38 - 0,62) = 1 [-] \quad (4.28)$$

$$k_4 = 1 + \frac{2}{10} \cdot (1,38 - 0,62) = 1,15 [-] \quad (4.29)$$

$$k_5 = 1 + \frac{4}{10} \cdot (1,38 - 0,62) = 1,31 [-] \quad (4.30)$$



Obrázek č. 22 – Rozdělení intervalu náhodných koeficientů

Koeficient k_3 je roven jedné a představuje tedy základní variantu odběru, velikosti FVE a kapacity baterie, které byly popsány v kapitolách 3.2 a 3.3. Pro získání rozdílných hodnot budou data pro základní variantu vynásobena koeficienty k_1 až k_5 . V každé variantě bude tedy pro danou hodinu jiná velikost odebíraného výkonu, výkonu generovaného FVE a kapacity baterie.

Vytvoření sady náhodných koeficientů

Aby se výše zmíněné varianty vybíraly k OM náhodně, je ještě potřeba vygenerovat 55 náhodných čísel, která budou spadat do intervalu $\langle \text{koef}_{\min}; \text{koef}_{\max} \rangle$. V průběhu výpočtů se budou tato náhodně generovaná čísla zařazovat do mezi-intervalů a podle toho, do kterého budou patřit, se na OM vybere daná varianta 1-5.

V případě, že se při výpočtu uvažuje s FVE, jsou v této části ještě náhodně vybrána OM, které mají FVE.

Inicializace výpočtu admitanční matice

Admitanční matice je vypočítaná na základě metody uzlových napětí, kde je na diagonále vlastní uzlová admitance kladná a mimo diagonálu je meziuzlová admitance záporná.

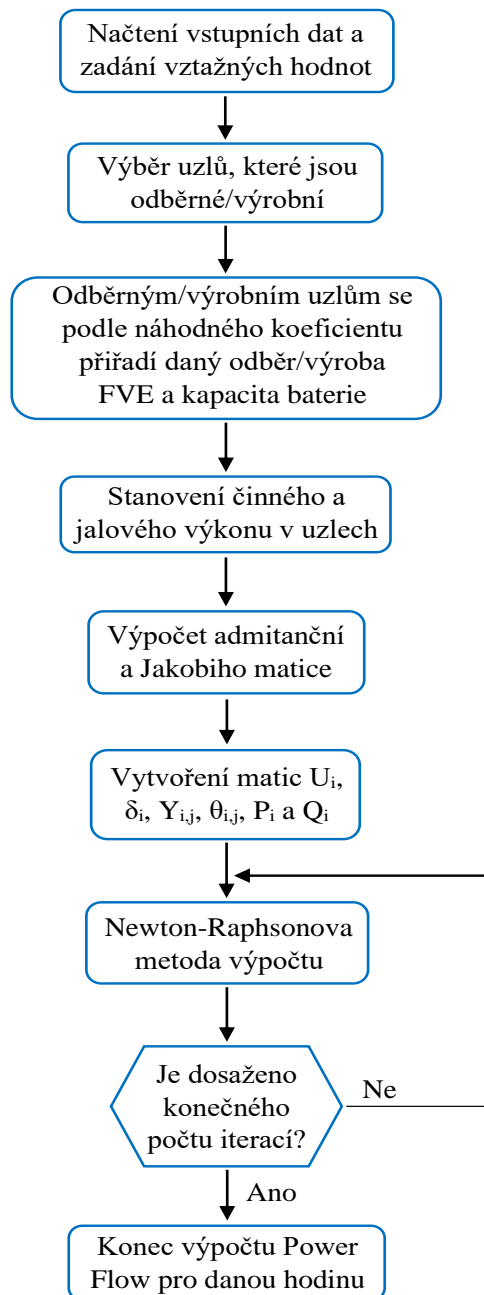
Inicializace výpočtu Jakobiho matice

Jakobiho matice je matice parciálních derivací. Výstupem inicializace jsou jednotlivé parciální derivace vyjádřené proměnnými, do kterých se při výpočtu následně dosazuje.

Inicializace Newton-Raphsonovy metody

V této části je naprogramován algoritmus samotné Newton-Raphsonovy metody viz. vzorec 4.18.

Inicializace výpočtu Power Flow



Obrázek č. 23 – Vývojový diagram inicializace výpočtu Power Flow

Pro výpočet Power Flow pro jednu hodinu postačovaly 4 iterace.

4.3.2 Zpracování výstupních dat

Výsledky výpočtu jsou pro každou variantu trochu odlišné, ale ve všech výstupech dostaneme pro danou hodinu v roce tato data:

- číslo uzlu
- fázor napětí uzlu
- velikost napětí uzlu
- uzlové výkony (P, Q)

V případě varianty s FVE s/bez baterie výstupní data obsahují navíc informaci o fiktivních uzlových výkonech (P, Q) a o výkonech vyráběných FVE. Pro variantu s FVE s baterií je výstup doplněn ještě o výkon baterie. Tyto výsledky jsou u každé varianty vyexportovány do excelů, ze kterých se s daty pak následně pracuje.

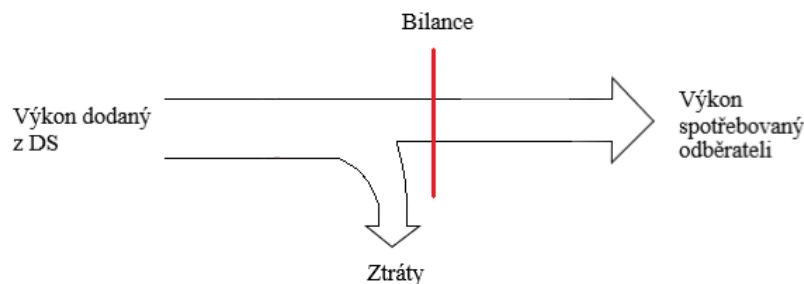
Pro grafické zobrazení výkonů a ztrát je potřeba určit celkový výkon uzlů pro danou hodinu. Výkon v prvním uzlu P_1 je celkový výkon dodávaný z VN DS do dané DTS a pod ní spadajícího NN rozvodu. Celkový odebíraný výkon je:

$$P_{\text{odběr}} = \sum_{i=2}^{121} P_i \quad (4.31)$$

Pro činné ztráty platí tento vztah:

$$\Delta P = P_1 + P_{\text{odběr}} \quad (4.32)$$

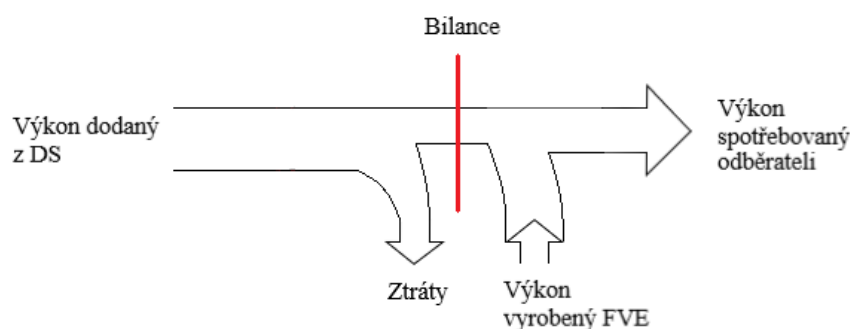
Podobné vztahy platí i pro jalové výkony. Pokud je zahrnuta FVE, počítá se i celkový vyrobený výkon uzlů s FVE. Stejně tak se určí celkový výkon baterie v jednotlivých uzlech pro variantu s FVE s baterií. Z výstupních dat se dále počítá celkový dodaný výkon P, Q. Pro jalový výkon je celkový dodaný výkon Q roven jalovému výkonu dodanému z DS. Ten samý předpoklad platí i pro celkový činný dodaný výkon v případě, že uvažujeme s variantou bez FVE viz. následující Obrázek č. 24.



Obrázek č. 24 – Diagram vysvětlující bilanci výkonů pro variantu neuvažující s FVE

Situace u variant s FVE je jiná. Celkový dodaný činný výkon je pro konkrétní hodinu dán součtem:

$$\text{celkový dodaný } P = |P \text{ dodaný z DS}| + |\text{výkon vyrobený FVE}| \quad (4.33)$$



Obrázek č. 25 – Diagram vysvětlující bilanci výkonů pro variantu s FVE

Z výstupních dat se dále určuje poměr P a poměr Q:

$$\text{poměr } P = \frac{\text{činné ztráty}}{\text{celkový dodaný } P} \quad (4.34)$$

$$\text{poměr } Q = \frac{\text{jalové ztráty}}{\text{celkový dodaný } Q} \quad (4.35)$$

V dalším kroku jsou výstupní data zpracována pro grafické znázornění zatížení větví. Z fázorů napětí jednotlivých uzlů a fázorů impedancí jednotlivých větví se počítají fázory proudů, velikosti proudů a zatížení daných větví viz. následující rovnice.

Fázor proudu je určen pro danou hodinu tímto vztahem:

$$\mathbf{I}_v = \frac{\mathbf{U}_{iduzluodkud} - \mathbf{U}_{iduzlukam}}{\mathbf{Z}_v}, \quad (4.36)$$

kde index v představuje číslo větve.

$$|I_v| = |I_v| \quad (4.37)$$

Při znalosti velikosti proudu větve vypočítaného (4.37) a dovoleného proudu větvi lze určit zatížení dané větve:

$$\text{zatížení}_v = \frac{|I_v|}{I_{vdovolený}} \quad (4.38)$$

5 PŘÍPADOVÁ STUDIE PRO VYBRANOU DISTRIBUČNÍ SOUSTAVU NÍZKÉHO NAPĚTÍ

5.1 Testovací scénáře

V základní rovině jsou testovací scénáře rozděleny na:

- scénář, kde není uvažováno s FVE,
- scénář, kde jsou zahrnuty FVE, ale neuvažuje se s bateriovým úložištěm,
- a scénář, kde se počítá, jak s FVE, tak i s bateriový systém.

V případech, kdy se uvažuje s FVE ať už bez nebo s bateriovým systémem, jsou OM mající FVE vybírána náhodně ze všech odběrných, potenciálně výrobních uzlů tak, aby FVE mělo:

- 25 % OM (14 OM),
- 50 % OM (28 OM),
- a nakonec 75 % OM (41 OM).

Při výpočtech vlivů FV systémů a bateriových úložišť malých výkonu je uvažováno se dvěma časovými úseky o délce třiceti dnů v různých částech roku pro krajní případy maximálního odběru a maximální výroby FVE. Součet odebíraných výkonů 30 dní po sobě je maximální v období od 1.1.2016 do 30.1.2016. V období od 21.4.2016 do 20.5.2016 je zase největší součet vyrobených výkonu FVE. V tomto období také nejvíce pracuje baterie. Tím je myšleno, že se max. mění její výkon.

Detailní přehled jednotlivých variant je zobrazen v následující Tabulce č. 12:

Období	1.1.2016 - 30.1.2016						
Varinata	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4	Varianta 5	Varianta 6	Varianta 7
FVE	NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
25 % OM s FVE	X	ANO	X	X	ANO	X	X
50 % OM s FVE	X	X	ANO	X	X	ANO	X
75 % OM s FVE	X	X	X	ANO	X	X	ANO
Baterie	NE	NE	NE	NE	ANO	ANO	ANO
Období	21.4.2016 - 20.5.2016						
Varinata	Varianta 8	Varianta 9	Varianta 10	Varianta 11	Varianta 12	Varianta 13	Varianta 14
FVE	NE	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
25 % OM s FVE	X	ANO	X	X	ANO	X	X
50 % OM s FVE	X	X	ANO	X	X	ANO	X
75 % OM s FVE	X	X	X	ANO	X	X	ANO
Baterie	NE	NE	NE	NE	ANO	ANO	ANO

Tabulka č. 12 – Testovací scénáře

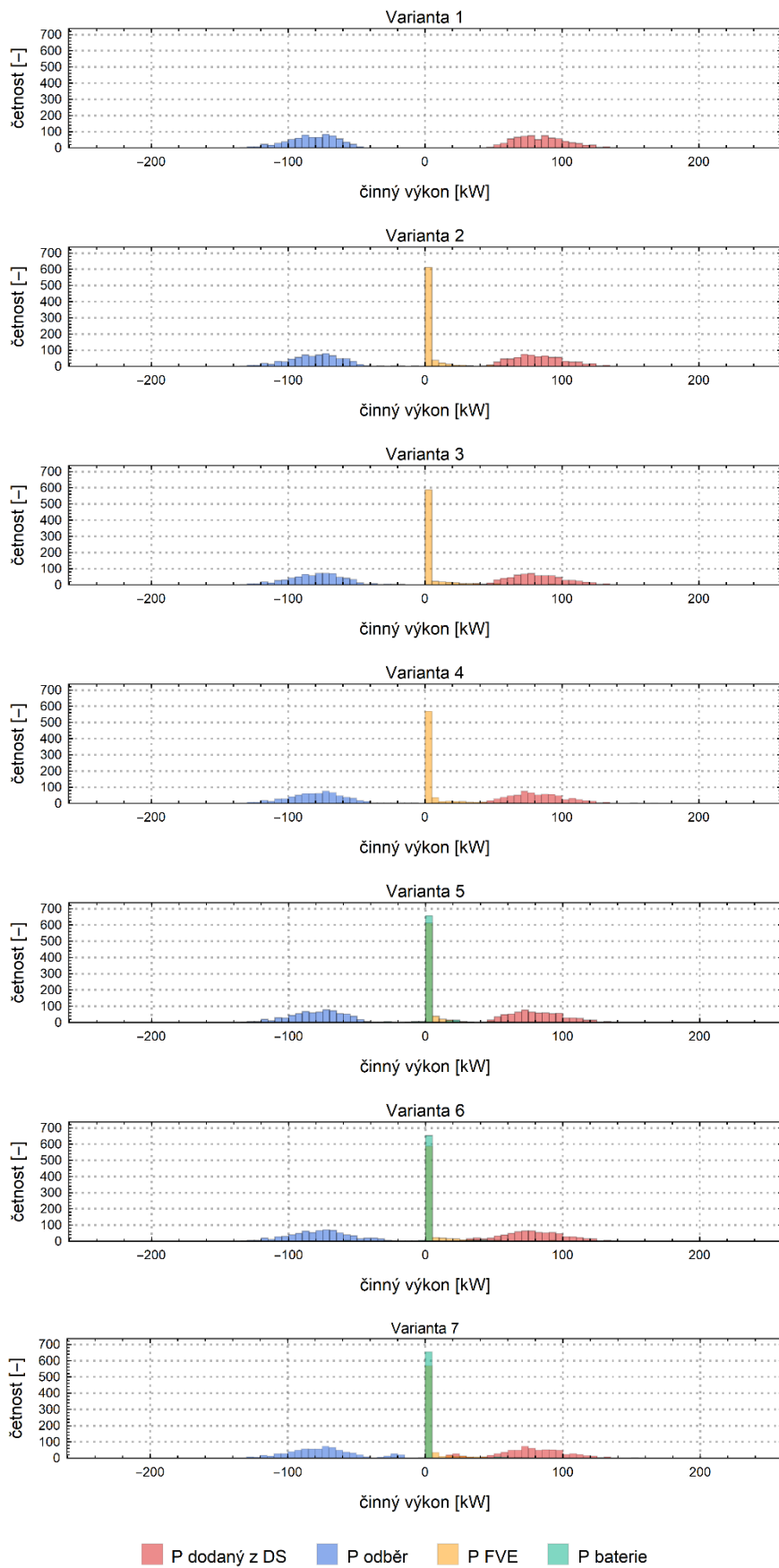
5.2 Výsledky z provedených výpočtů pro jednotlivé testovací scénáře

5.2.1 Statistické zpracování činných výkonů

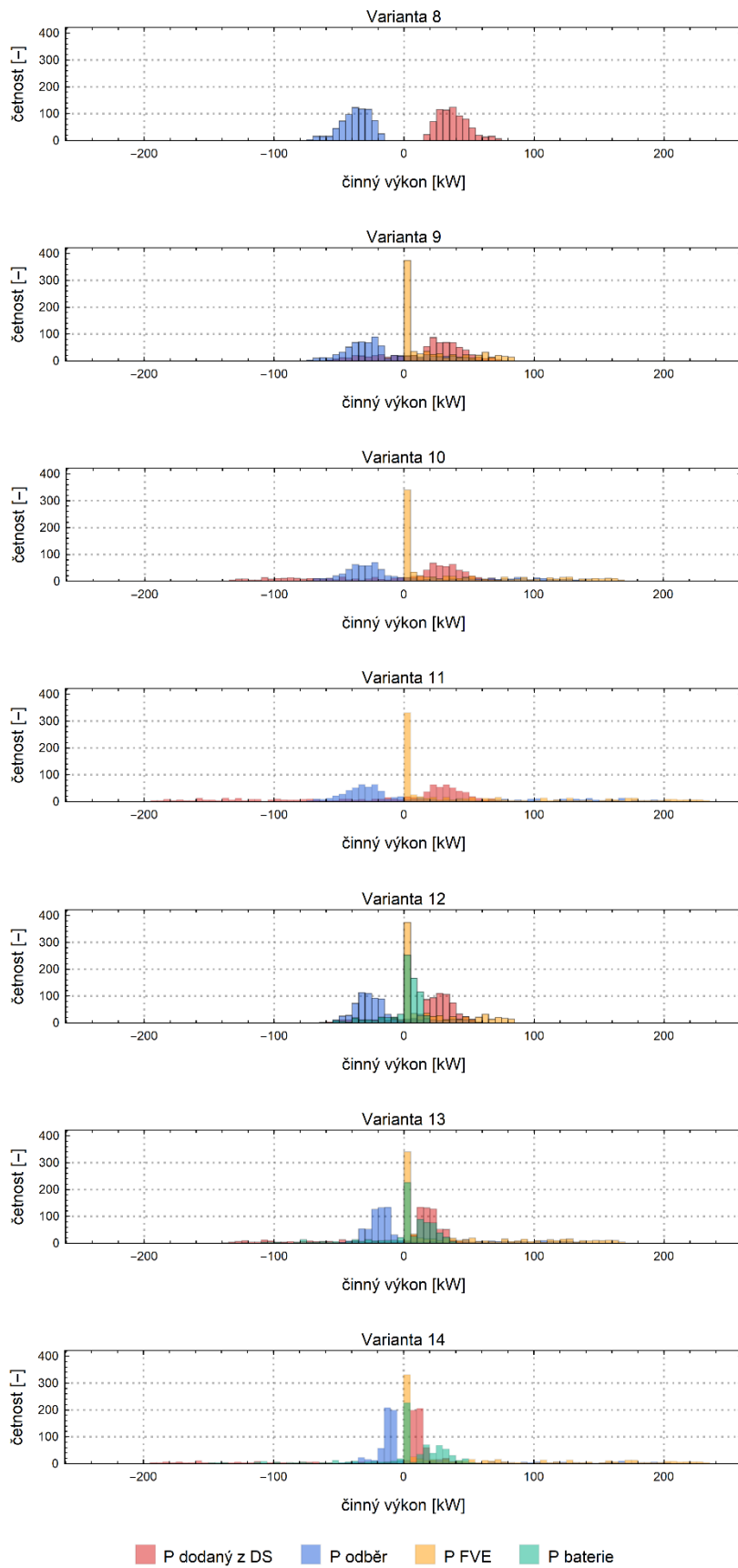
Aby bylo možné data mezi sebou jednoduše porovnat, byly činné výkony statisticky zpracovány do histogramů, což jsou sloupcové diagramy četnosti sledované veličiny v určitém rozpětí hodnot. Sloupce v histogramu se nazývají třídy. Pro porovnání jednotlivých histogramů je potřeba zvolit stejnou šířku třídy.

V následujícím Grafu č. 3 jsou zobrazeny histogramy jednotlivých variant pro období od 1.1.2016 do 30.1.2016. Na první pohled je zřejmé, že dodávaný činný výkon z DS a odebíraný činný výkon se mezi jednotlivými variantami výrazně neliší. Nedochozí ani k výraznému přetoku činného výkonu do sítě. U variant s FVE vidíme, že výkon vyráběný FVE je malý a koresponduje se stavem činného výkonu baterie. S rostoucím počtem OM mající FVE je výroba FVE samozřejmě větší, nicméně FVE nemají v tomto období výrazný vliv.

Histogramy jednotlivých variant pro období od 21.4.2016 do 20.5.2016 jsou zobrazeny v Grafu č. 4. V tomto časovém úseku je velmi dobře vidět, jak vliv FVE, tak bateriového systému. U variant uvažujících s FVE sledujeme, že s rostoucím počtem OM s FVE roste také činný vyráběný výkon a podle toho klesá činný dodávaný výkon z DS a činný odebíraný výkon. Na druhou stranu je zřejmé, že četnosti dodávaného činného výkonu z DS a odebíraného činného výkonu jsou i záporné, což znamená, že vyrobený činný výkon není v OM spotřebován a je dodáván do sítě. Na základě zdrojové znaménkové konvence je pro tuto situaci dodávaný činný výkon z DS záporný a odebíraný činný výkon kladný. Bateriový systém poměrně výrazně snižuje odebíraný výkon z DS a dodávaný výkon OM s FVE do DS. Činný výkon FVE je pouze kladný. Činný výkon bateriových systémů může nabývat, jak kladných, tak záporných hodnot, neboť v případě, kdy se baterie nabíjí se vůči síti chovají jako spotřebič. Výkon je tedy podle zdrojové znaménkové konvence záporný. Při vybíjení baterií je stav opačný.



Graf č. 3 – Histogramy činných výkonů pro období 1.1.2016 - 30.1.2016



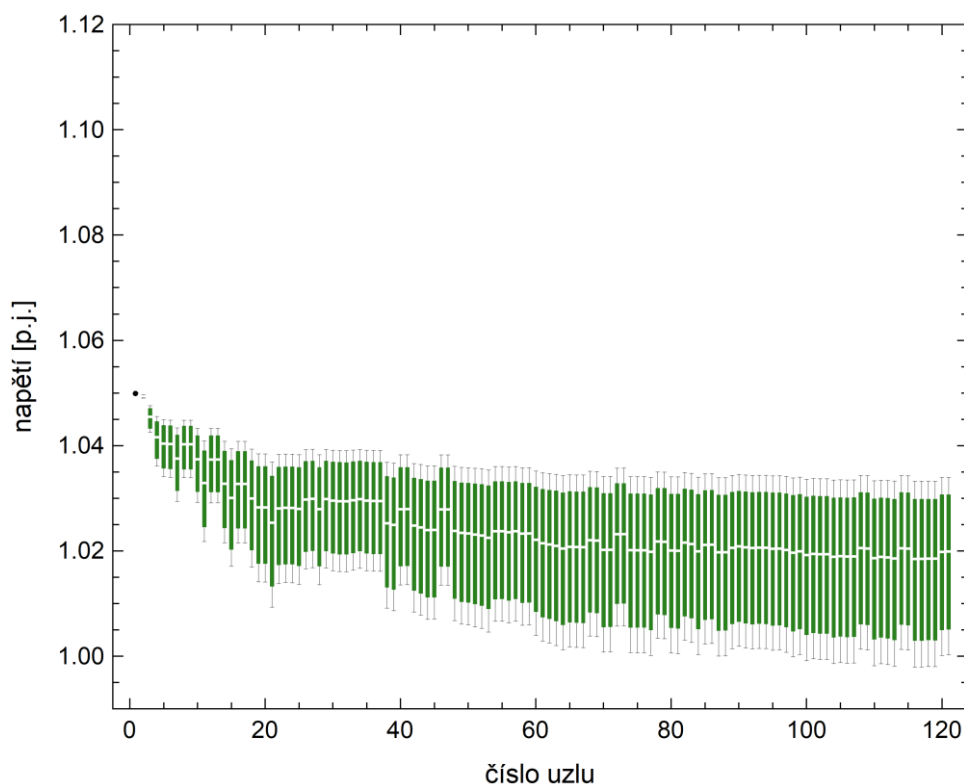
Graf č. 4 – Histogramy činných výkonů pro období 21.4.2016 - 20.5.2016

Vzhledem k velkému počtu grafů jsou časové závislosti činných výkonů uvedeny v Příloze č. 2, závislosti jalových výkonů na čase pro jednotlivé testovací scénáře v Příloze č. 3, časové závislosti činných a jalových ztrát v Příloze č. 4 a závislosti poměru P a poměru Q na čase se nachází v Příloze č. 5 této diplomové práce.

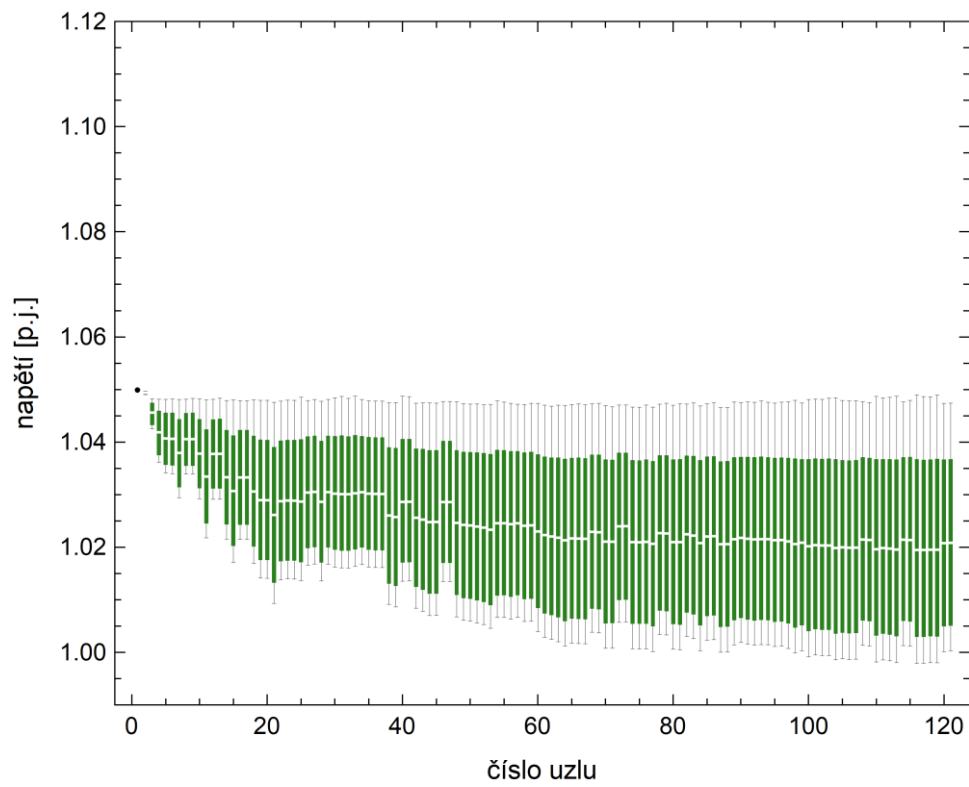
5.2.2 Napěťové profily

Napěťové profily jsou důležité z hlediska posouzení odchylek napájecího napětí. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1.2, za normálních provozních podmínek musí být v rozsahu $\pm 10\%$ U_n 95 % hodnot napětí. Vzhledem k tomu, že každé období má 720 hodin, odstaneme pro každý uzel 720 hodnot napětí. Statistickým zpracováním těchto hodnot dostaneme závislost napětí v p.j. na čísle uzlu, kde 95 % všech hodnot napětí je zobrazeno v barevném boxíku. Dále je také pro daný uzel vyznačena max. a min. hodnota napětí a medián. Napětí v prvním uzlu je vždy 1,05 p.j. a dovolený rozsah napětí je od 0,9 do 1,1 p.j.. Pokud se všechny hodnoty nacházejí v dovoleném pásmu napětí, je barva boxíku zelená. Pro případ, kdy se nachází v dovoleném rozsahu pouze 95 % všech hodnot napětí je barva boxu oranžová. Pro všechny ostatní případy, tedy pokud je více jak 5 % hodnot mimo rozsah napětí, je barva boxíku červená.

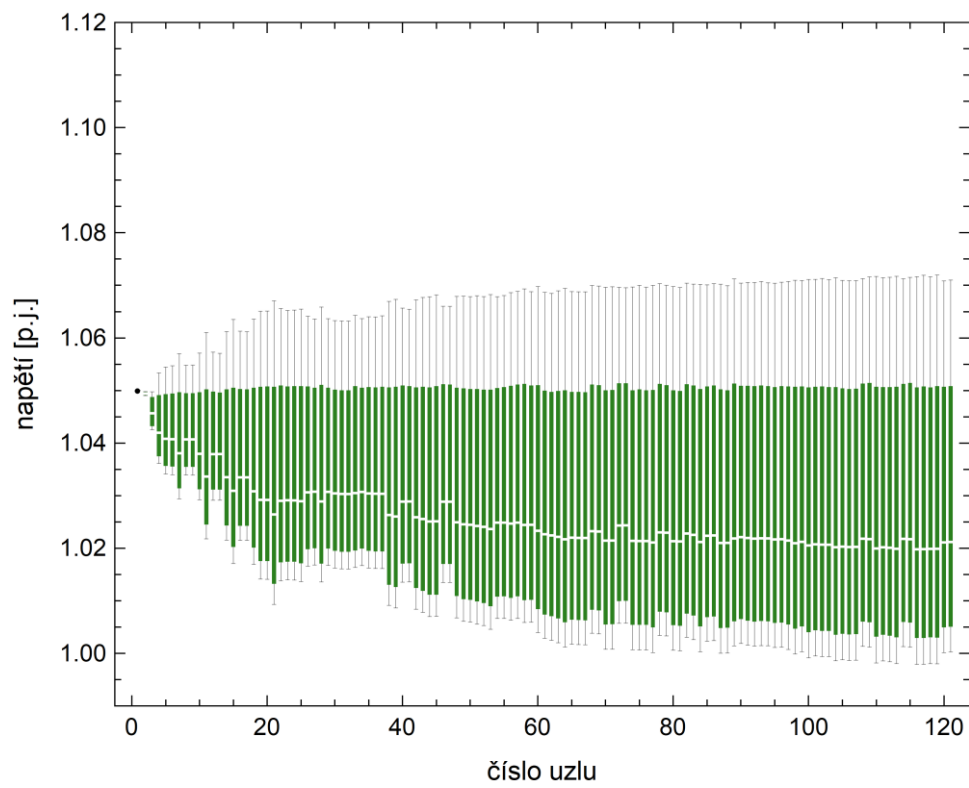
Napěťové profily pro období od 1.1.2016 do 30.1.2016:



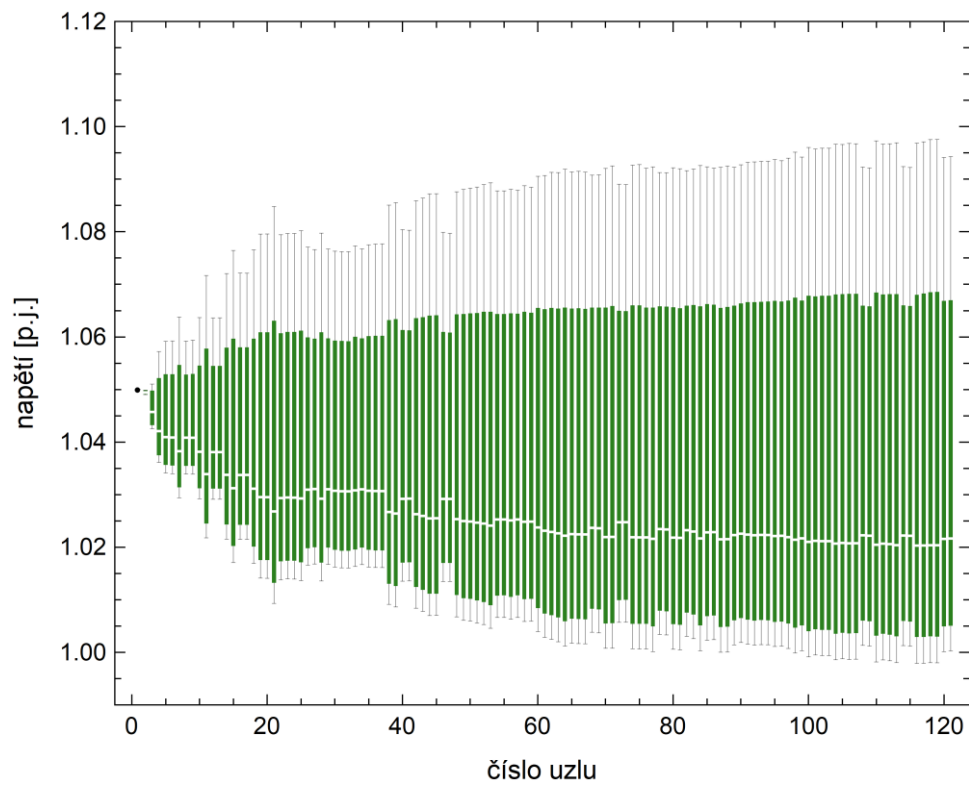
Graf č. 5 – Napěťový profil pro variantu 1



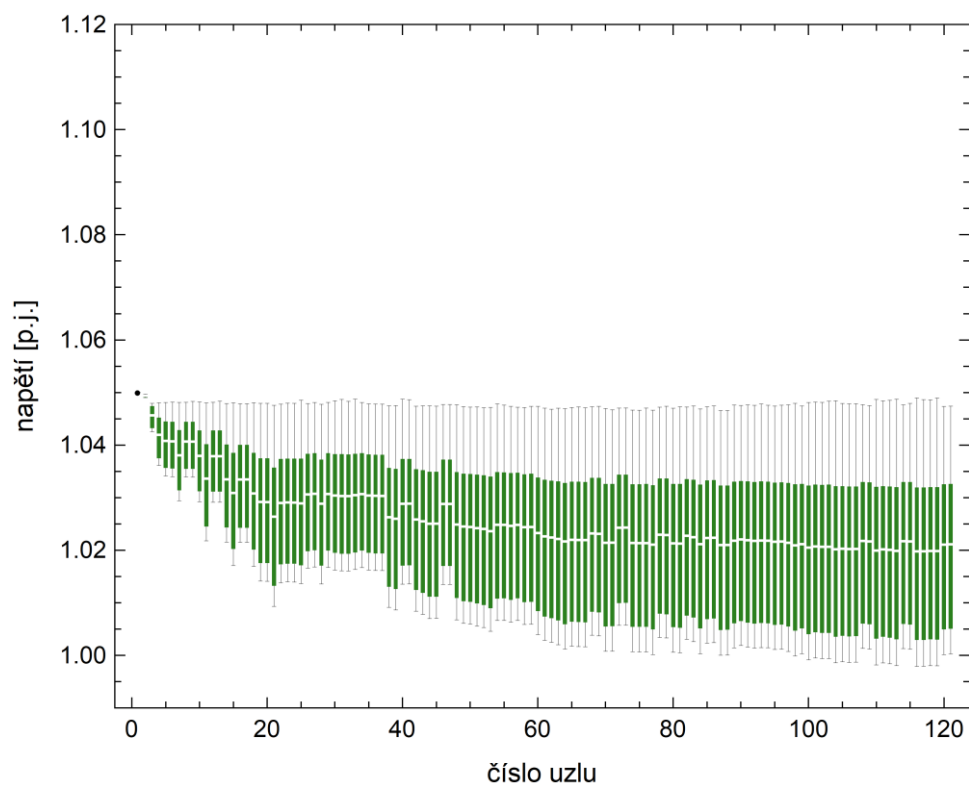
Graf č. 6 – Napěťový profil pro variantu 2



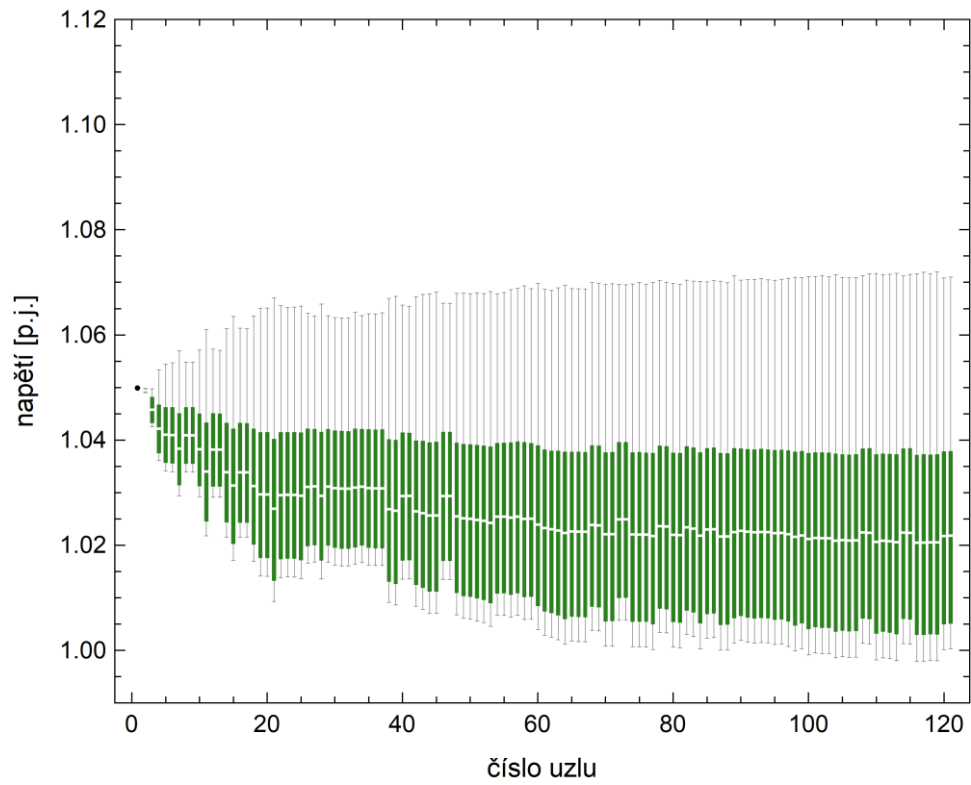
Graf č. 7 – Napěťový profil pro variantu 3



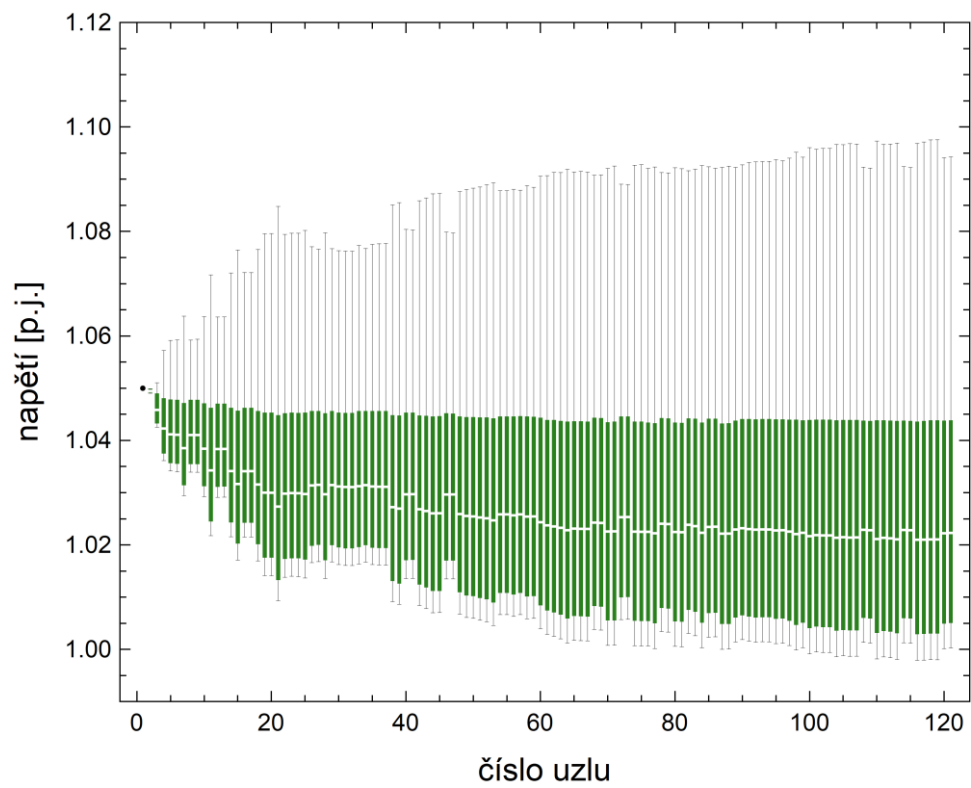
Graf č. 8 – Napěťový profil pro variantu 4



Graf č. 9 – Napěťový profil pro variantu 5



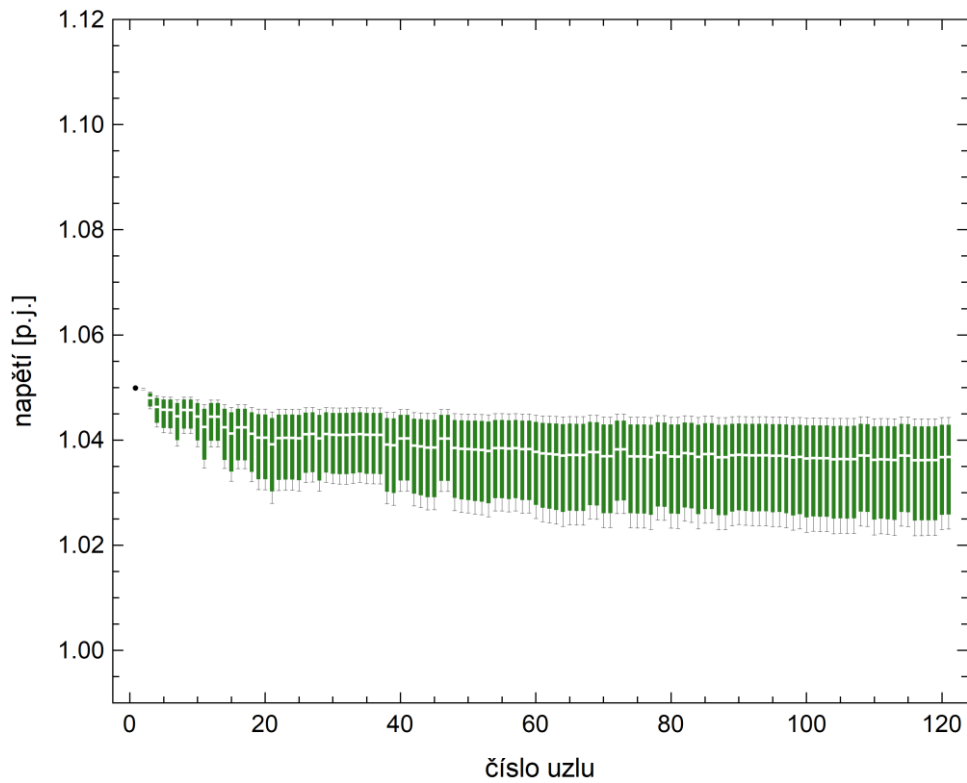
Graf č. 10 – Napěťový profil pro variantu 6



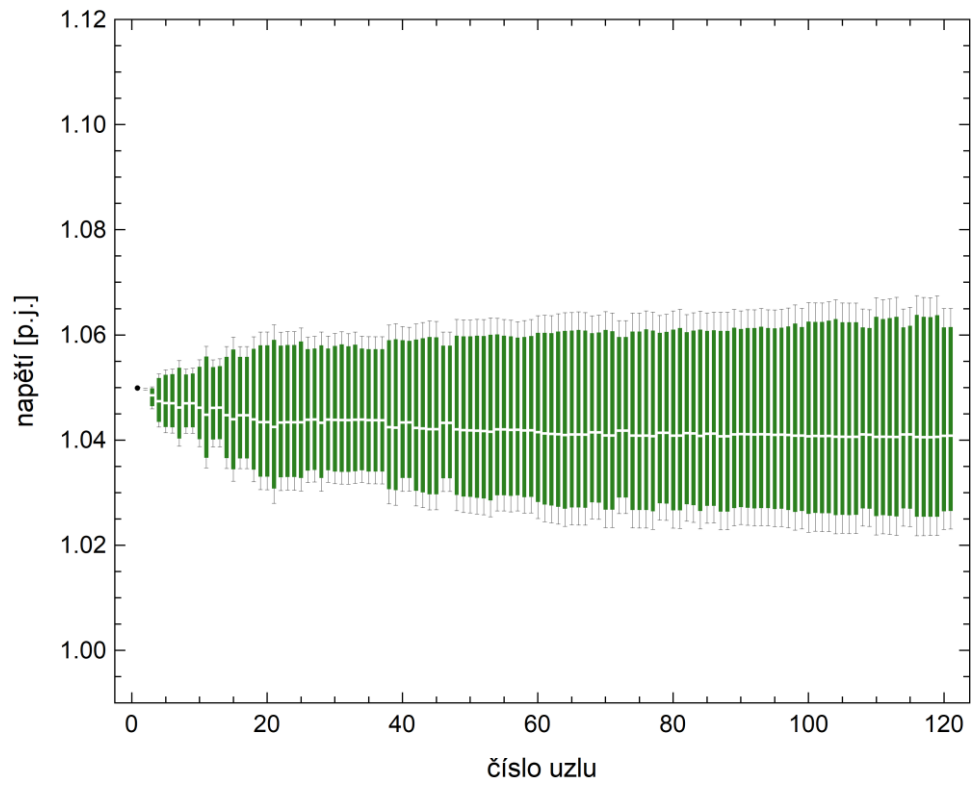
Graf č. 11 – Napěťový profil pro variantu 7

Ze základní varianty 1 vidíme, že napětí s rostoucím číslem uzlu klesá. Pro varianty s FVE však dochází k tomu, že v okamžiku, kdy FVE dodávají výkon do sítě, má napětí opačný charakter a to rostoucí. Nicméně až na variantu 4 má 95 % hodnot napětí klesající tendenci. U varianty 4 vidíme, že vliv výkonu dodávaného OM s FVE do sítě NN je velmi výrazný. V tomto období největšího odběru však napětí ani v jedné z variant nepřekračuje dovolený rozsah napětí.

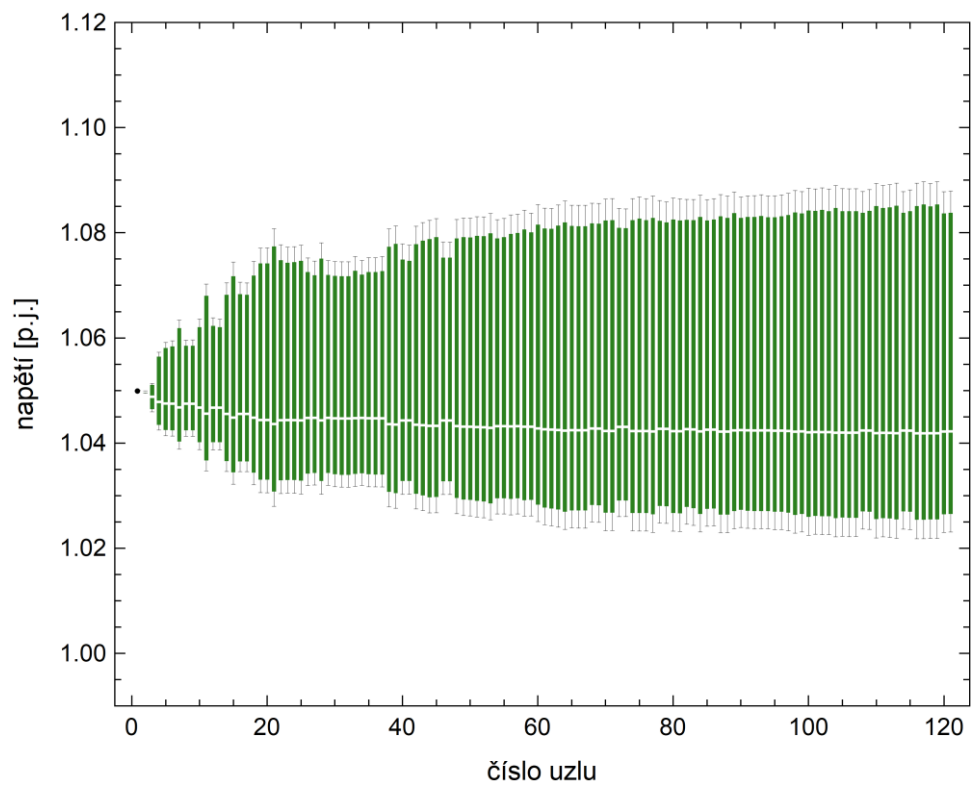
Napěťové profily pro období od 21.4.2016 do 20.5.2016:



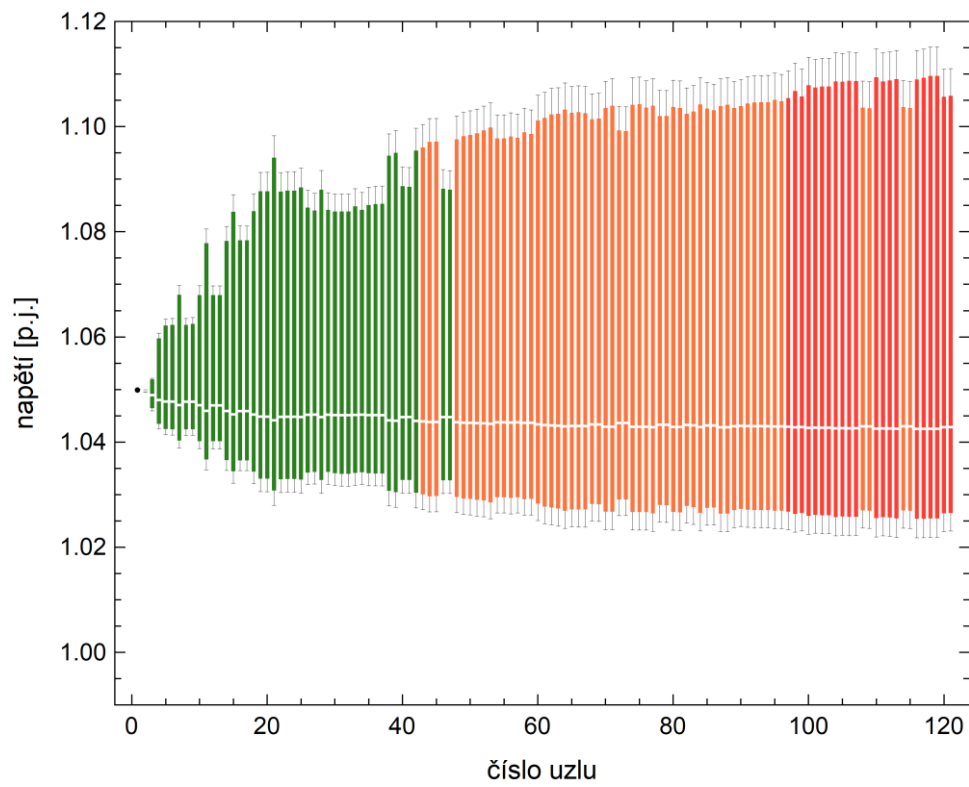
Graf č. 12 – Napěťový profil pro variantu 8



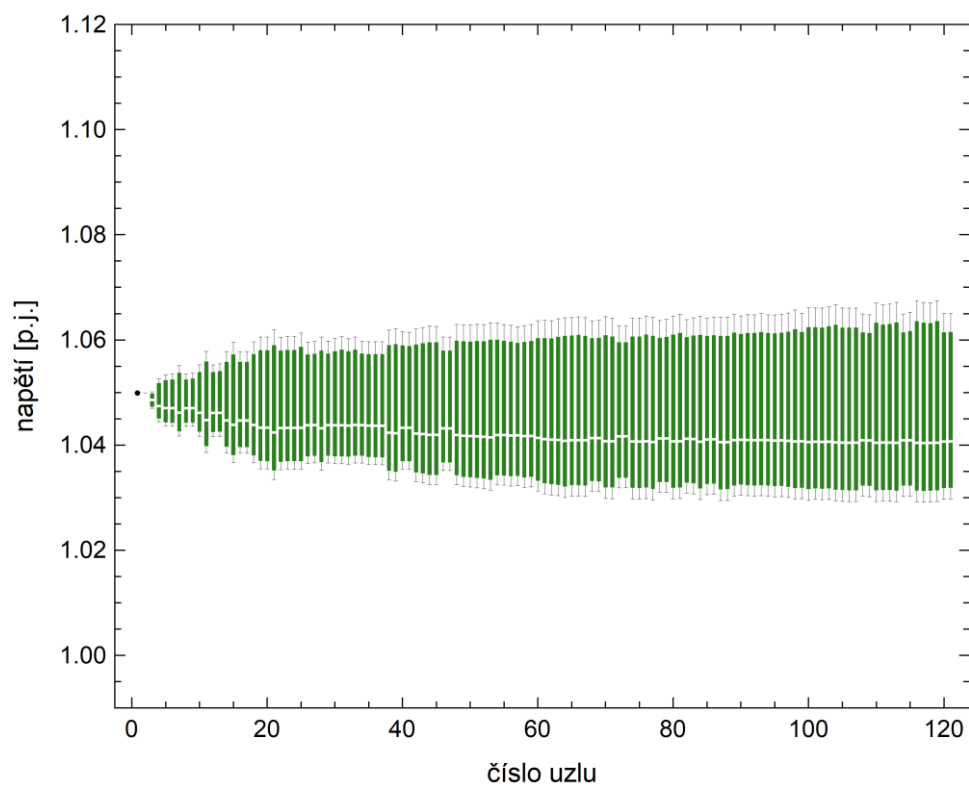
Graf č. 13 – Napěťový profil pro variantu 9



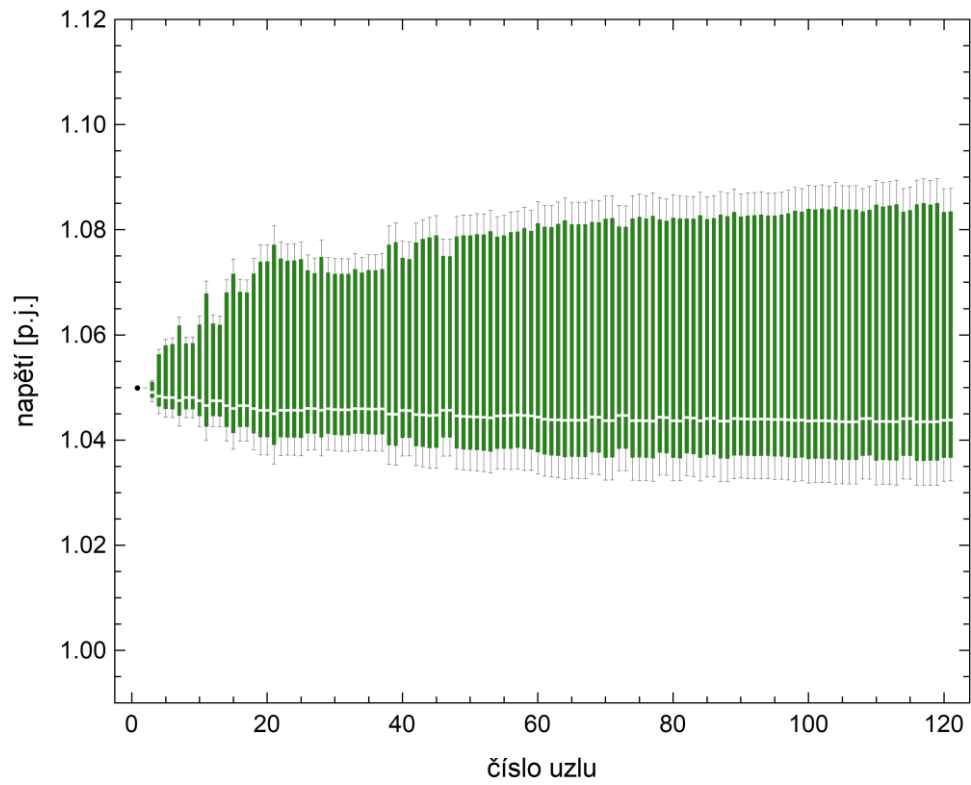
Graf č. 14 – Napěťový profil pro variantu 10



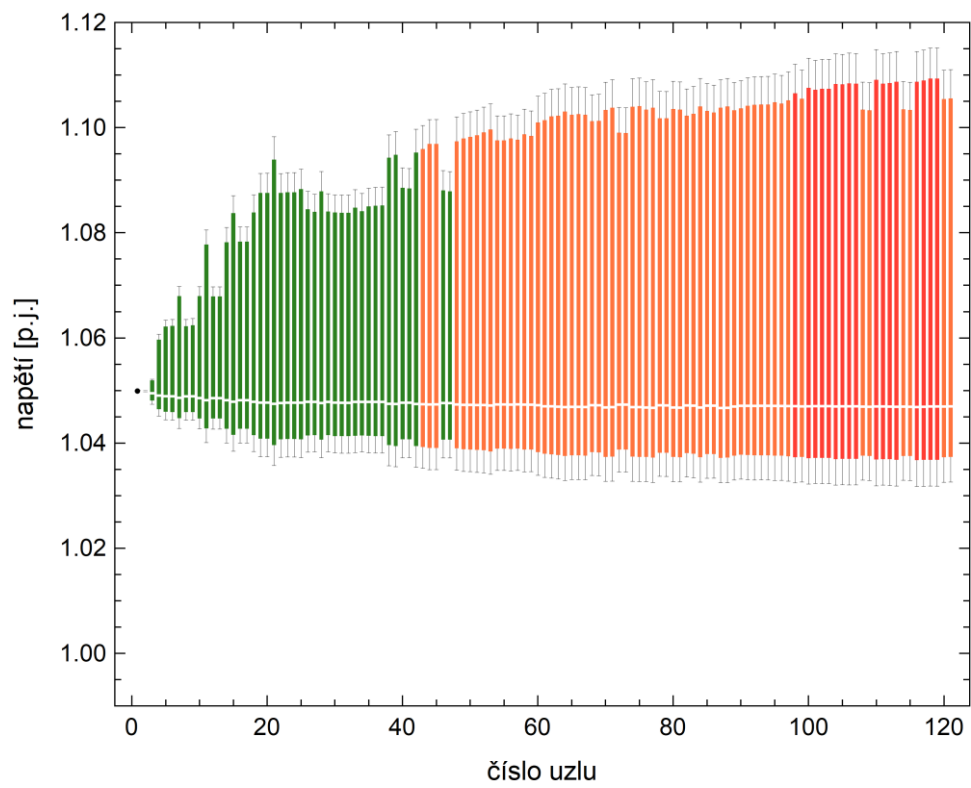
Graf č. 15 – Napětový profil pro variantu 11



Graf č. 16 – Napětový profil pro variantu 12



Graf č. 17 – Napěťový profil pro variantu 13



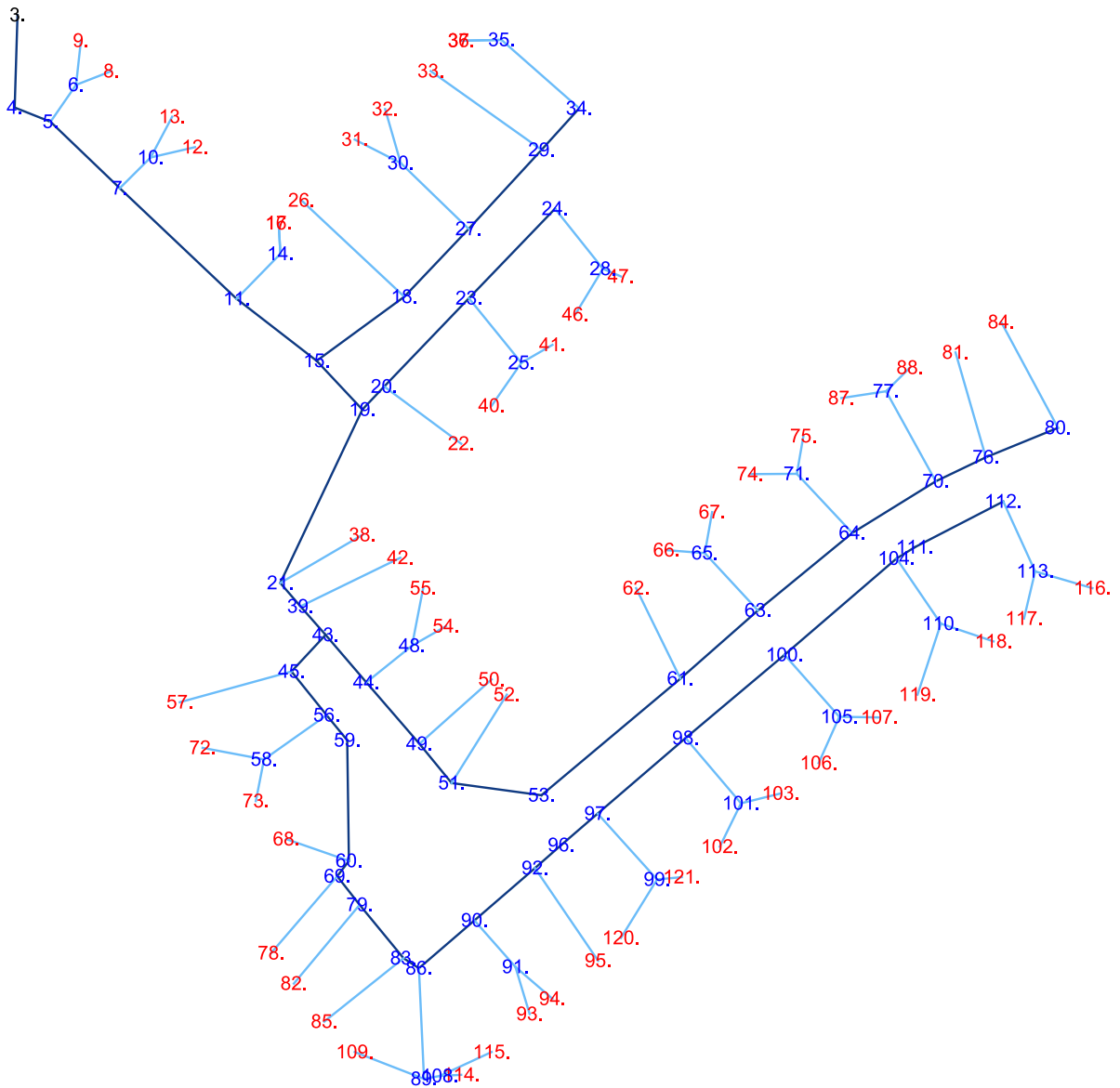
Graf č. 18 – Napěťový profil pro variantu 14

V porovnání se zimním obdobím napětí v tomto období tolik nepoklesne. Na druhou stranu u scénářů uvažujících s FVE má napětí převážně rostoucí charakter. V případě varianty 11 a 14 se dostane více jak 5 % ze všech hodnot mimo horní hranici pásma dovoleného napětí. I zde vidíme pozitivní vliv baterie, kde počet uzlů, u kterých dochází k překročení limitů je menší než v případě varianty 11, která uvažuje pouze s FVE bez baterie. U variant 12, 13 a 14 je min. hodnota napětí větší než u ostatních variant, kde je pokles napětí výraznější.

Na základě charakteru všech grafů lze říci, že čím větší je počet OM s FVE, tím větší je napětí v jednotlivých uzlech v případě, že OM s FVE dodávají výkon do sítě.

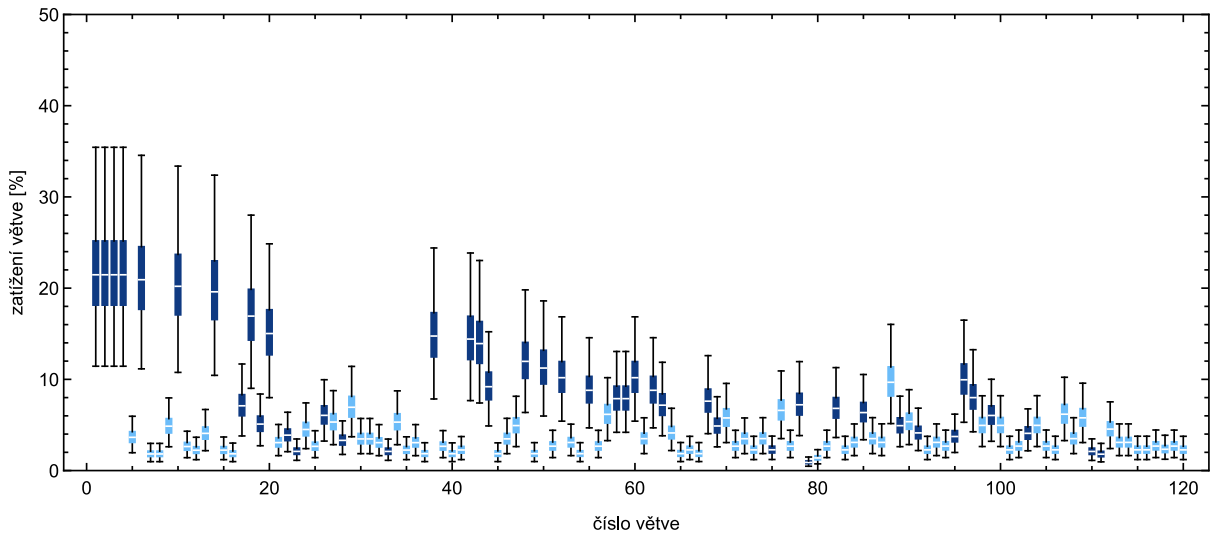
5.2.3 Zatížení větví

Pro posouzení vlivu malých FV zdrojů a bateriových úložišť na vybranou část DS NN je ještě použito grafické zobrazení zatížení jednotlivých větví. Stejně jako v případě napěťového profilu, dostaneme pro každé období 720 hodnot zatížení pro danou větev. Tyto hodnoty budou opět statisticky zpracovány tak, aby v boxíku bylo tentokrát pouze 50 % všech hodnot. V grafu je opět zobrazena i min. a max. hodnota a medián zatížení. Zatížení větví je rozděleno barevně tak, že tmavě modrou barvou jsou označeny segmenty kmenové linky a světle modrou ostatní větve viz. následující Obrázek č. 26.

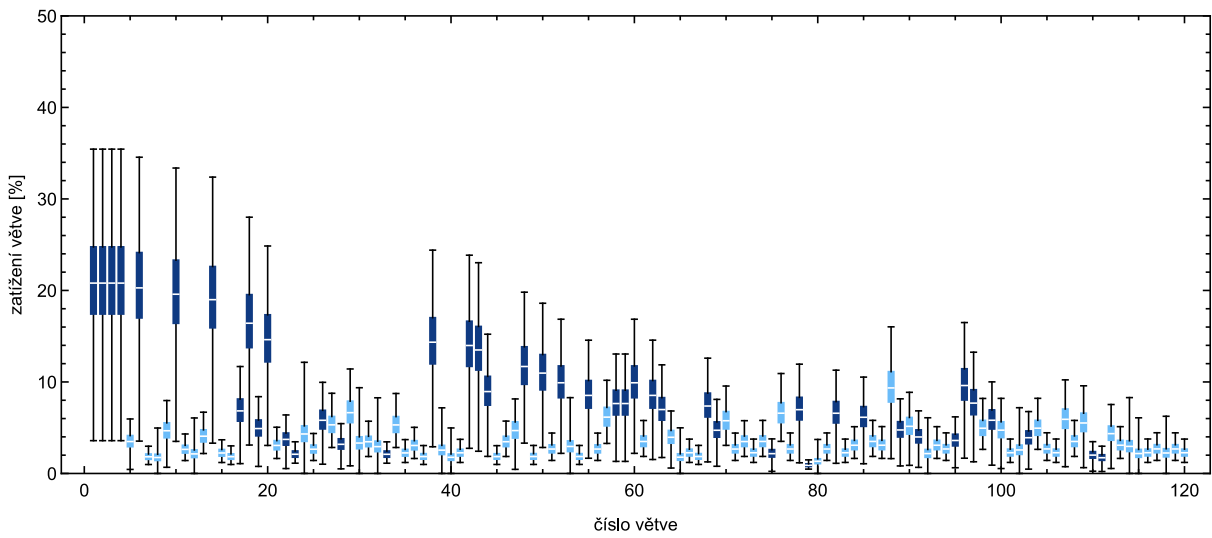


Obrázek č. 26 – Jednólové zjednodušené schéma soustavy s barevným rozlišením kmenových a ostatních větví [42]

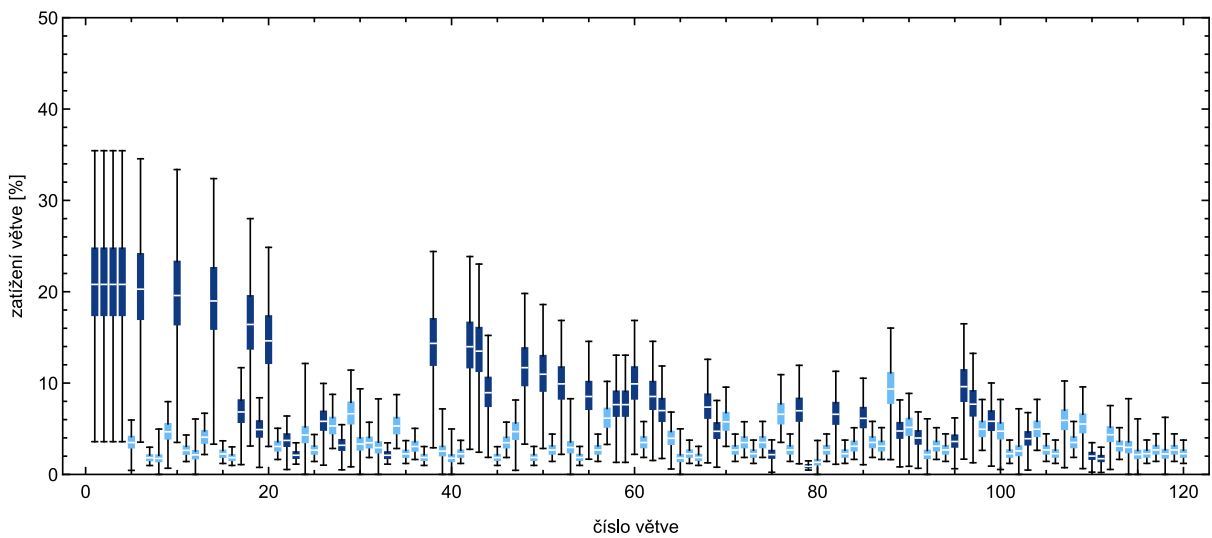
Zatížení větví pro období od 1.1.2016 do 30.1.2016:



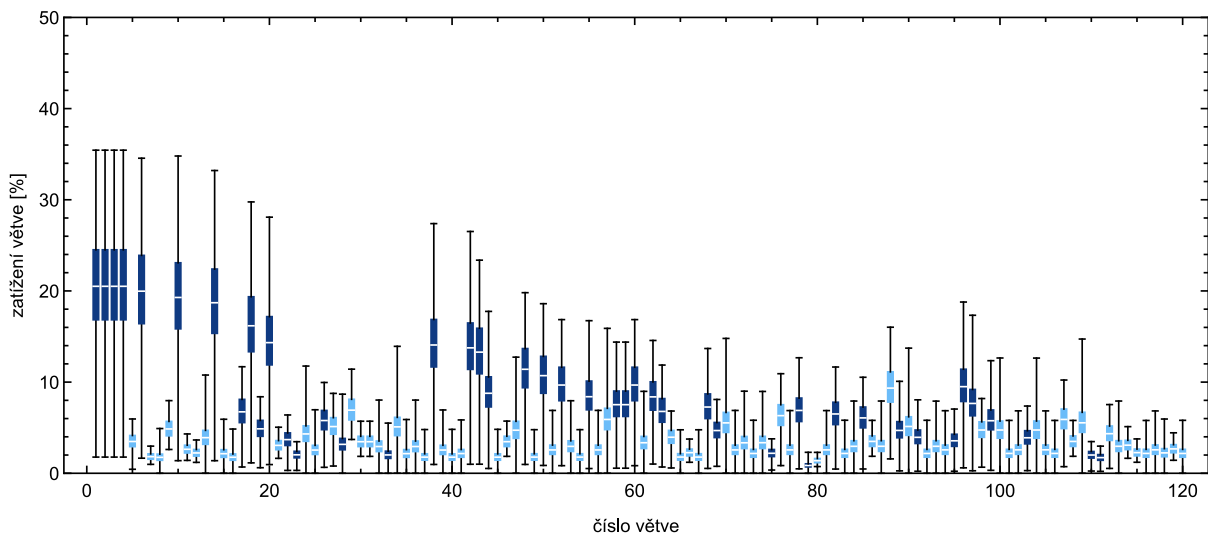
Graf č. 19 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 1



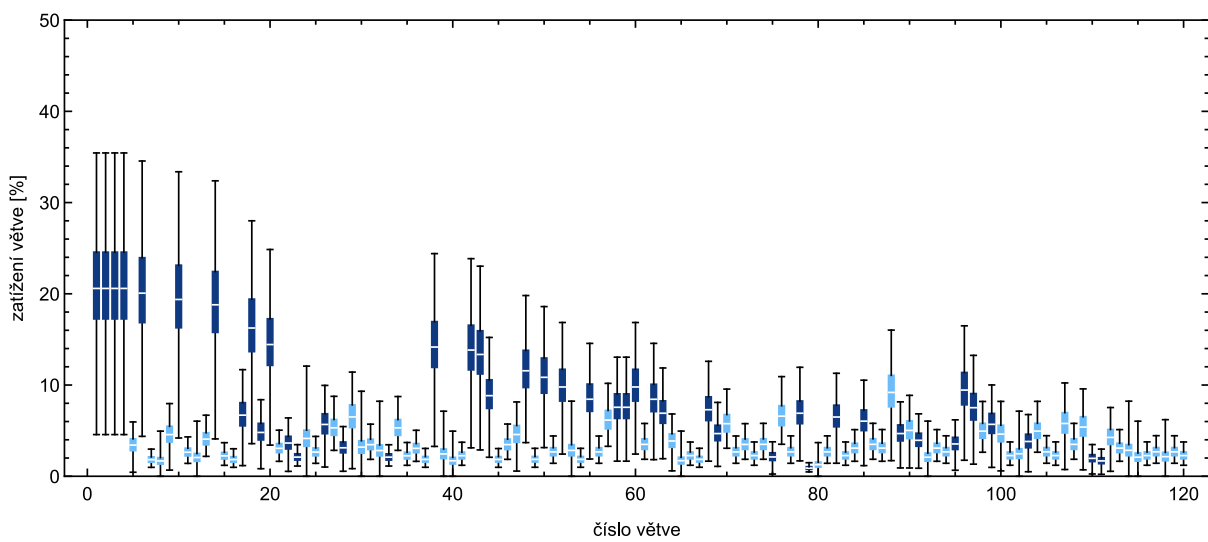
Graf č. 20 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 2



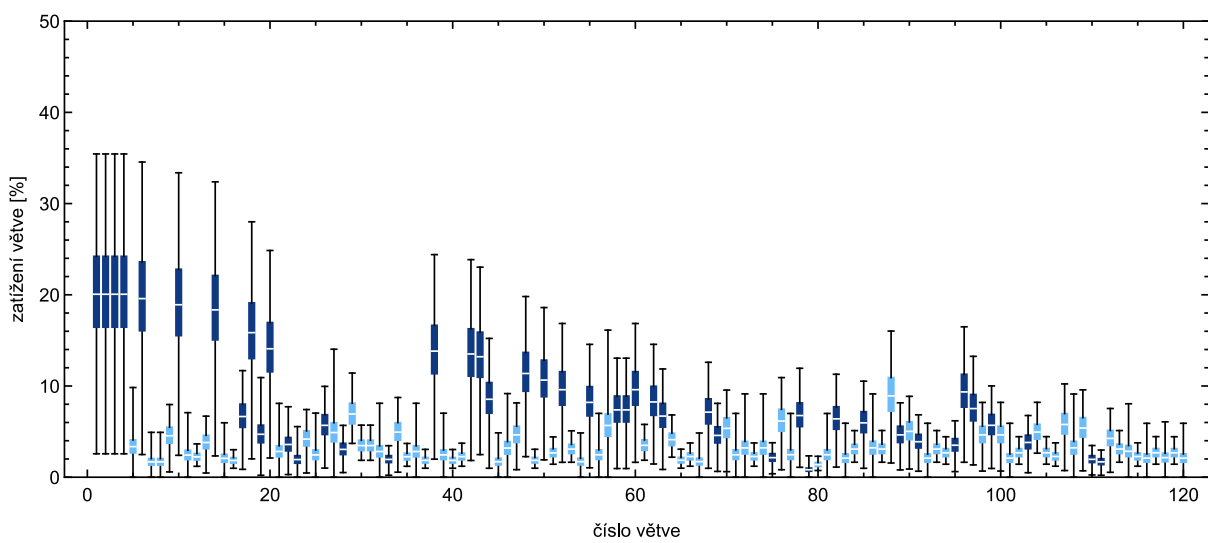
Graf č. 21 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 3



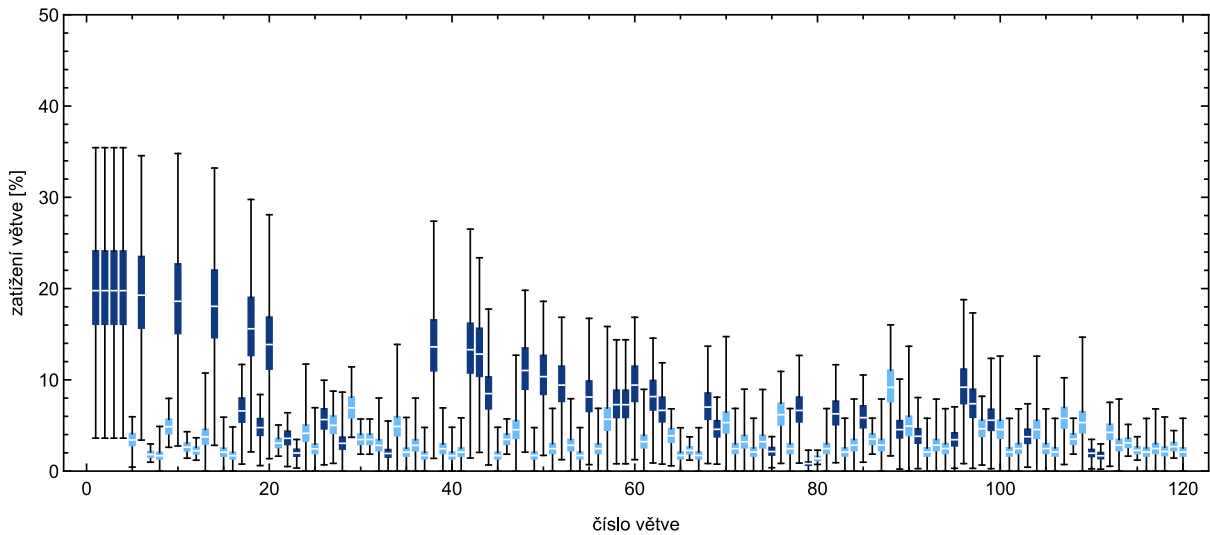
Graf č. 22 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 4



Graf č. 23 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 5



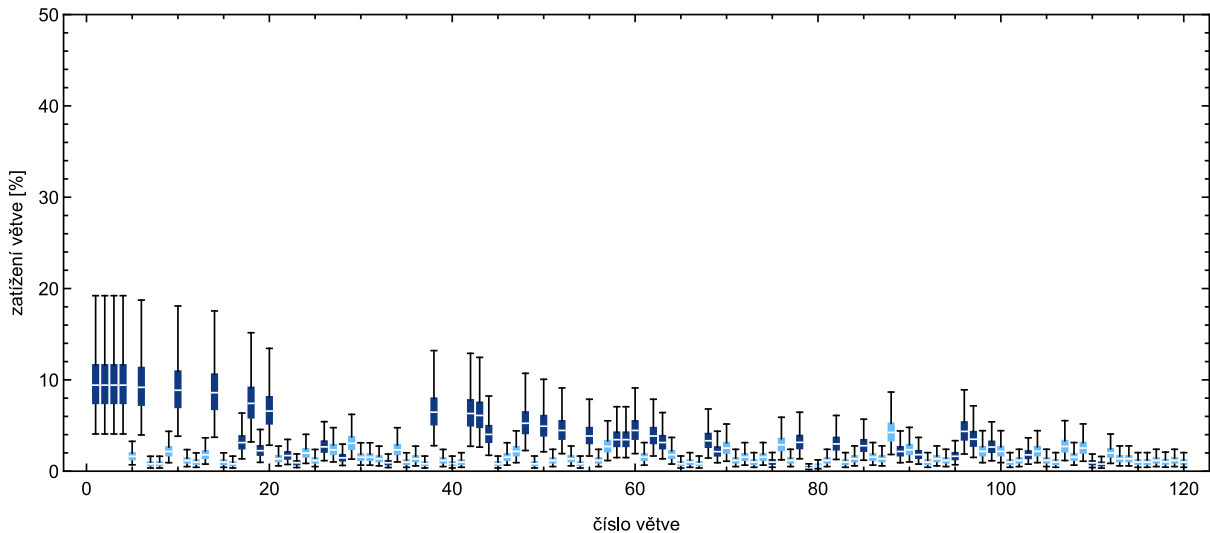
Graf č. 24 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 6



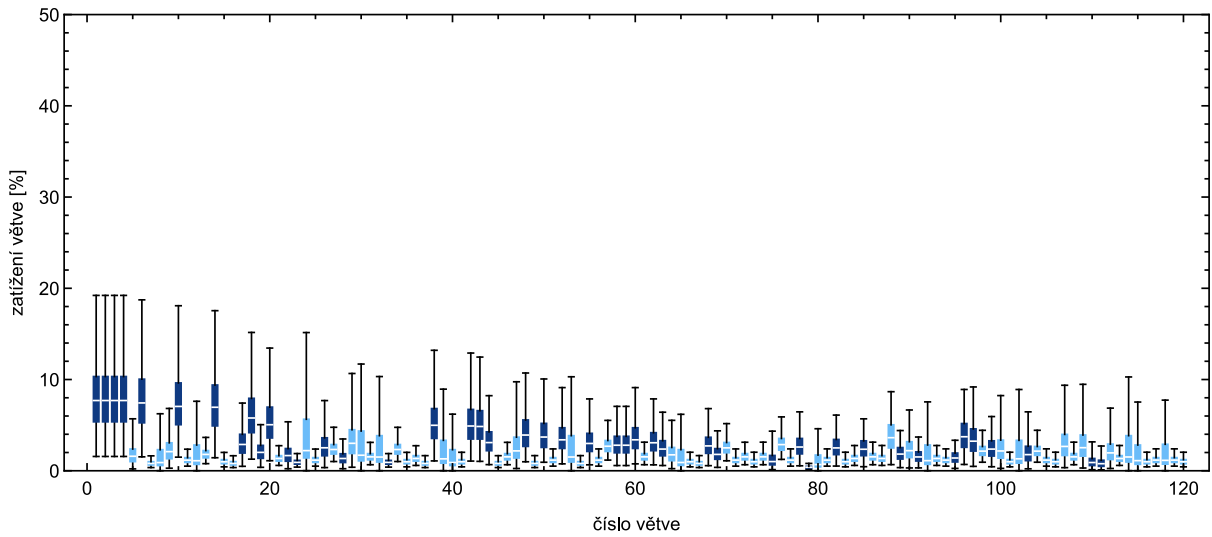
Graf č. 25 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 7

Z grafů je zřetelně vidět, že kmenové linky jsou většinou ty více zatížené. Nejvíce zatížené jsou vždy první 4 větve za distribučním transformátorem. Max. hodnota zatížení je pro jednotlivé větve u všech variant téměř shodná. U variant uvažujících s FVE se min. hodnota zatížení jednotlivých větví liší v porovnání se základní variantou 1. Min. hodnota zatížení u kmenových linek poměrně výrazně klesá až na jednotky procent. Ke stejnému jevu dochází i u ostatních větví a u některých z nich dokonce zatížení klesá až k hodnotám blízkým nule procent. Vliv bateriového systému na zatížení větví v tomto období není patrný.

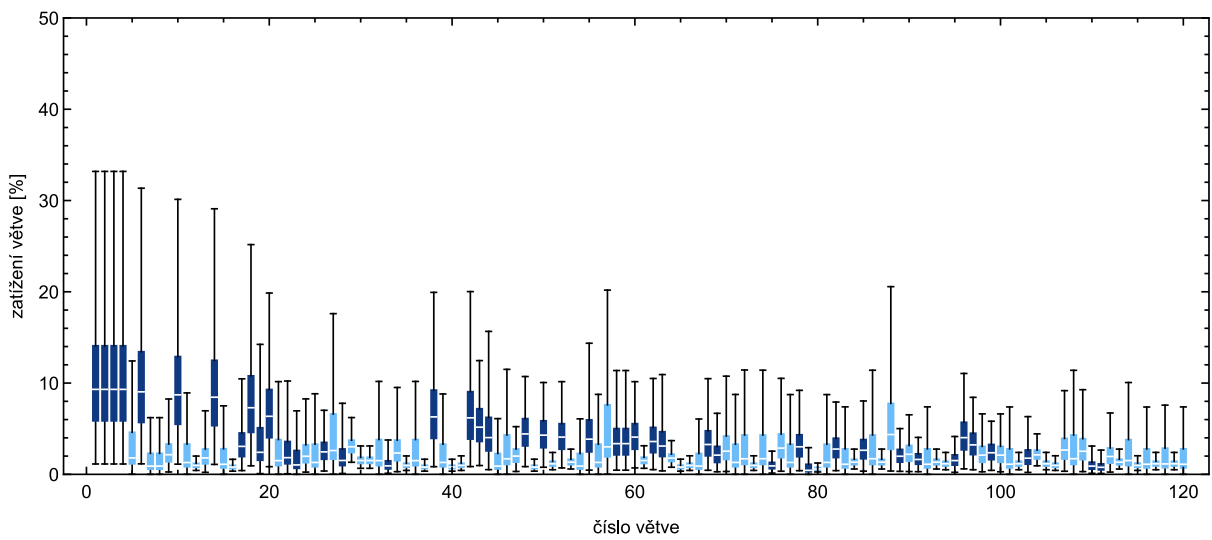
Zatížení větví pro období od 21.4.2016 do 20.5.2016:



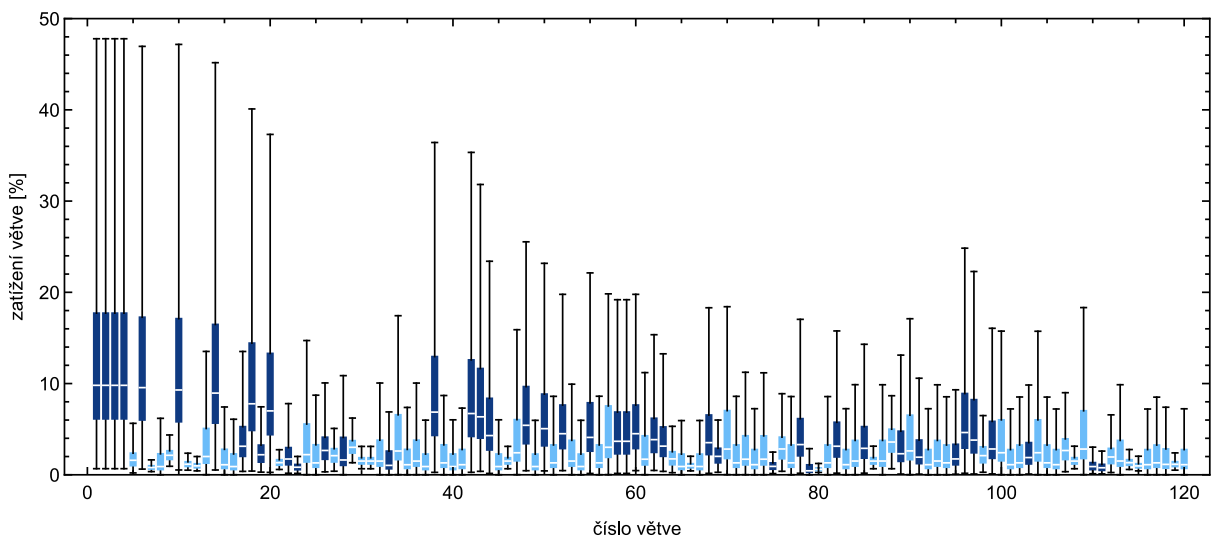
Graf č. 26 – Zatížení jednotlivých linek pro variantu 8



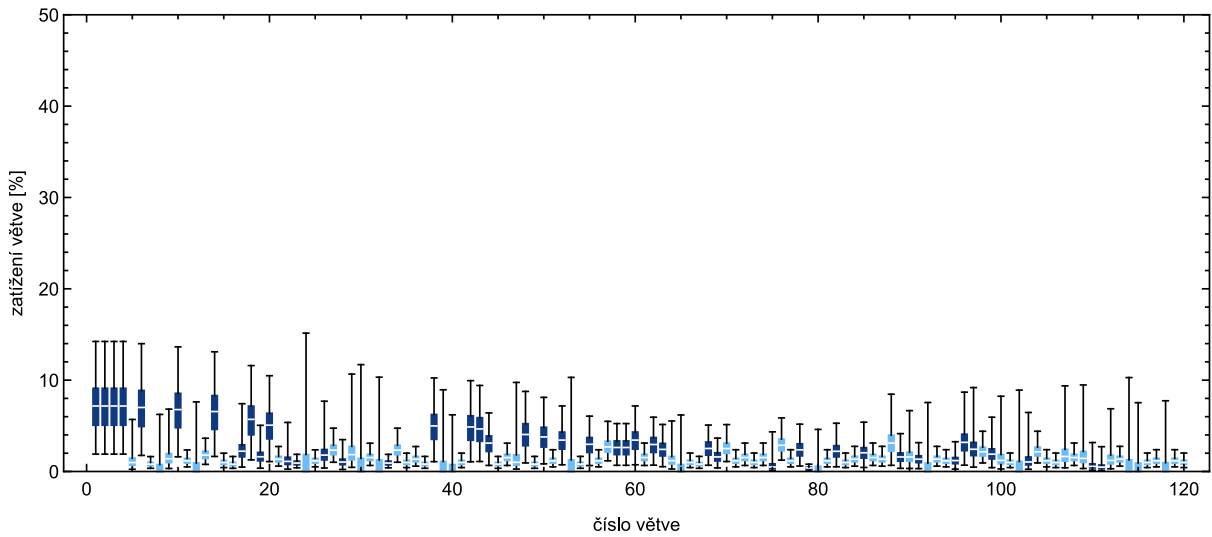
Graf č. 27 – Zátížení jednotlivých linek pro variantu 9



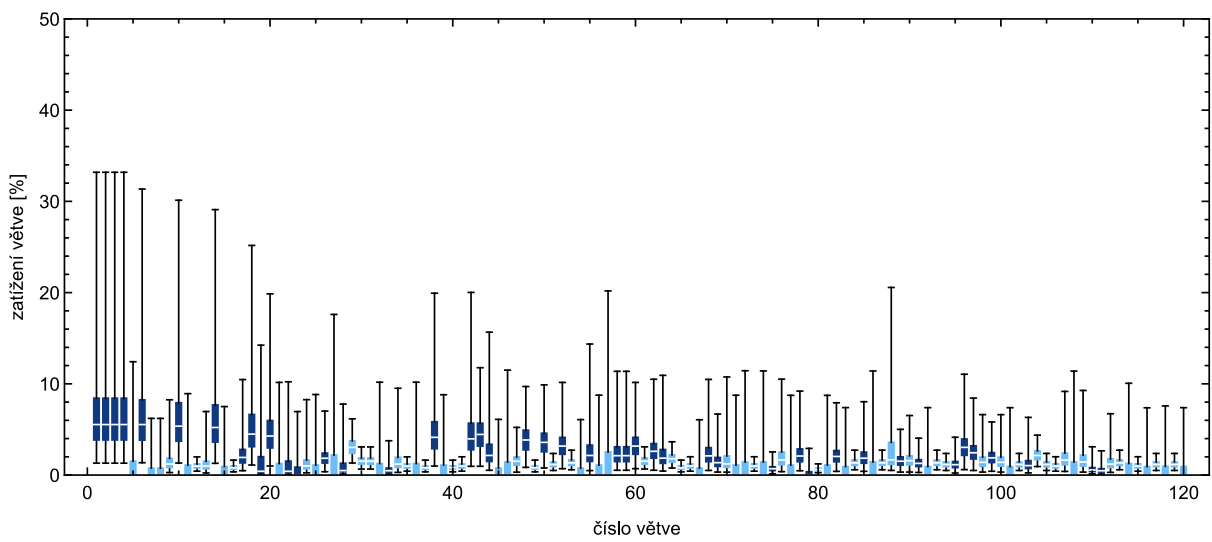
Graf č. 28 – Zátížení jednotlivých linek pro variantu 10



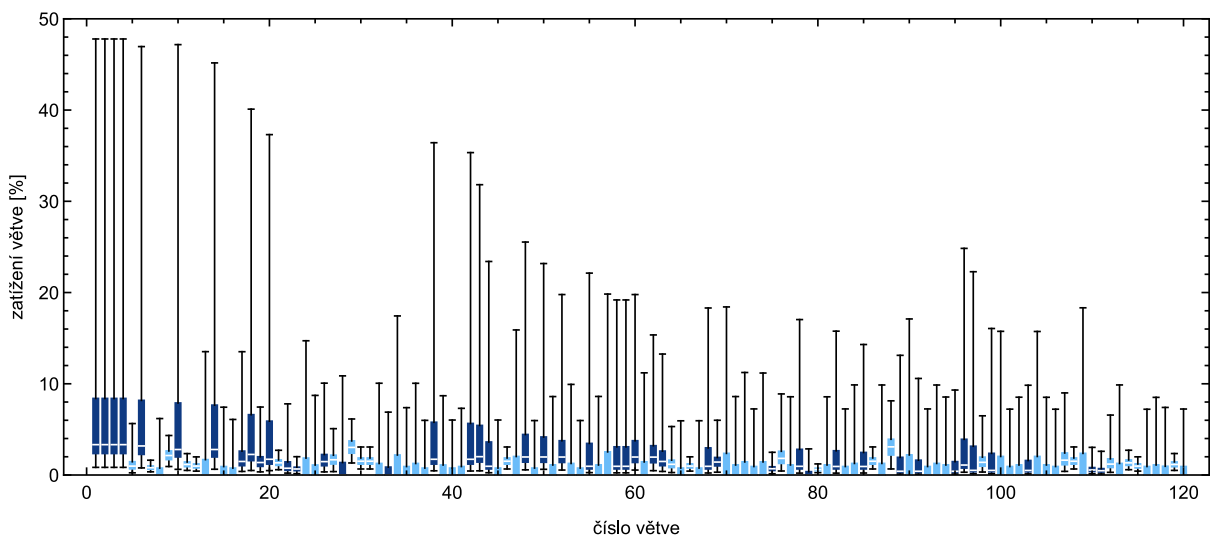
Graf č. 29 – Zátížení jednotlivých linek pro variantu 11



Graf č. 30 – Zátížení jednotlivých linek pro variantu 12



Graf č. 31 – Zátížení jednotlivých linek pro variantu 13



Graf č. 32 – Zátížení jednotlivých linek pro variantu 14

Pokud bychom porovnali základní scénář, který nepočítá s FVE z hlediska obou období, zjistíme, že zatížení větví je v jarním období nižší, neboť se i celkově odebírá menší výkon z DS. Toto však neplatí, pokud bereme v úvahu FVE, neboť tím, že FVE vyrábí v tomto časovém úseku nejvíce, je i do DS dodáván větší výkon. Vliv počtu OM s FVE, a tedy i velikosti dodávaného výkonu do DS na zatížení jednotlivých větví, je velmi výrazný. I v tomto případě jsou nejvíce zatížené větve spíše ty kmenové a stejně jako v předchozím období i zde platí, že u variant s FVE je min. hodnota zatížení jednotlivých větví nižší. Max. hodnota zatížení je však pro jednotlivé linky u variant s FVE vyšší, a kromě kmenových větví dochází k výraznému nárůstu max. hodnoty také u ostatních větví. Vliv bateriového úložiště je v tomto období patrnější. U variant 12, 13 a 14 je vidět, že některé boxíky začínají rovnou v nule zatížení. Čím větší je počet OM s FVE, tím větší je jejich počet. Na základě těchto pozorování lze tvrdit, že bateriový systém obecně snižuje zatížení jednotlivých větví a v některých případech dokonce způsobí, že jsou linky nezatížené.

Z hlediska zatížení jednotlivých větví však u žádné varianty nedošlo k jejich přetížení, tzn. žádná větev nedosahuje většího zatížení než 100 %. Vzhledem k tomu, že se ani v tom nejhorším případě, nedostaneme přes zatížení 50 %, lze konstatovat, že síť je v tomto případě zbytečně předimenzovaná. Otázkou však zůstává, jaký by byl stav, pokud by byly k dispozici hodnoty pro každou sekundu vybraných časových úseků. Hodnoty hodinových odebíraných výkonů jsou v tomto případě zprůměrovány a nejsou tak k dispozici informace o špičkách výkonů, např. když se připojí konvice k ohřevu vody nebo fén.

5.2.4 Porovnání jednotlivých testovacích scénářů z pohledu celkových výkonů

V této kapitole jsou uvedeny celkové výkony a ztráty za dané období 30-ti dnů pro každou variantu:

Období	1.1.2016 - 30.1.2016						
Varinata	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4	Varianta 5	Varianta 6	Varianta 7
Činný výkon dodaný z DS [kW]	60 871,0	58 351,8	56 628,0	55 588,2	58 403,2	56 085,7	54 368,0
Jalový výkon dodaný z DS [kVAr]	20 455,0	19 875,0	19 317,1	18 897,6	19 672,1	18 898,8	18 301,4
Činný výkon odebíraný z DS [kW]	-59 388,6	-56 951,3	-55 276,6	-54 271,2	-57 016,3	-54 769,8	-53 102,5
Jalový výkon odebíraný z DS [kVAr]	-19 520,1	-18 993,0	-18 460,0	-18 040,9	-18 798,9	-18 069,7	-17 496,4
Činné ztráty z dodaného výkonu z DS [kW]	1 482,4	1 400,5	1 351,3	1 317,1	1 386,9	1 315,9	1 265,6
Jalové ztráty z dodaného výkonu z DS [kVAr]	934,9	882,0	857,2	856,7	873,2	829,1	805,0
Činný výkon dodaný do DS [kW]		5,8	801,3	1 738,0	5,5	163,2	386,1
Činný výkon odebraný DS [kW]		-5,6	-791,8	-1 694,9	-5,4	-161,0	-376,7
Činné ztráty z dodaného výkonu do DS [kW]		0,2	9,5	43,1	0,1	2,1	9,4
Činný výkon vyrobený FVE [kW]		2 443,2	4 913,3	6 855,5	2 443,2	4 913,3	6 855,5
Celkový činný výkon dodaný do DS [kW]	60 871,0	60 800,6	62 333,1	64 138,6	60 851,7	61 160,1	61 600,1
Období	21.4.2016 - 20.5.2016						
Varinata	Varianta 8	Varianta 9	Varianta 10	Varianta 11	Varianta 12	Varianta 13	Varianta 14
Činný výkon dodaný z DS [kW]	27 163,4	17 451,4	15 215,3	14 348,5	16 572,7	11 091,8	7 196,6
Jalový výkon dodaný z DS [kVAr]	9 021,1	7 855,0	6 902,0	6 325,7	6 853,6	4 840,1	3 390,9
Činný výkon odebíraný z DS [kW]	-26 856,1	-17 261,8	-15 049,4	-14 192,5	-16 423,3	-11 015,9	-7 163,0
Jalový výkon odebíraný z DS [kVAr]	-8 827,2	-7 711,0	-6 582,5	-5 695,2	-6 741,7	-4 633,1	-2 975,3
Činné ztráty z dodaného výkonu z DS [kW]	307,2	189,7	165,9	156,0	149,3	75,8	33,6
Jalové ztráty z dodaného výkonu z DS [kVAr]	193,9	144,0	319,5	630,5	111,9	207,0	415,6
Činný výkon dodaný do DS [kW]		4 475,7	16 489,2	26 816,9	3 365,5	11 909,1	19 024,6
Činný výkon odebraný DS [kW]		-4 435,9	-16 168,6	-25 925,3	-3 334,5	-11 668,6	-18 365,4
Činné ztráty z dodaného výkonu do DS [kW]		39,8	320,6	891,6	31,0	240,5	659,2
Činný výkon vyrobený FVE [kW]		14 070,1	28 296,0	39 480,6	14 070,1	28 296,0	39 480,6
Celkový činný výkon dodaný do DS [kW]	27 163,4	35 957,4	59 679,9	79 754,4	33 977,2	51 056,3	65 042,5

Tabulka č. 13 – Tabulka celkových výkonů a ztrát pro dané varianty

Z hodnot uvedených v Tabulce č. 13 je zřejmé, že pro období od 1.1.2016 do 30.1.2016 jsou: činný/jalový výkon dodávaný z DS, činný/jalový výkon odebíraný z DS a činné/jalové ztráty z dodaného výkonu z DS největší. Díky vyráběnému činnému výkonu FVE dochází k poklesu výše zmíněných výkonů a ztrát a také k dodávce činného výkonu do DS. Čím více OM má FVE, tím větší je samozřejmě vyrobený činný výkon a tím větší je následně dodávka do DS. Mezi variantami s FVE bez a s bateriovým úložištěm je zřejmý rozdíl. Díky bateriím se činný výkon vyráběný FVE lépe využije v OM s FVE, čímž se snižuje celkový odběr. Bateriový systém tedy pozitivně ovlivňuje velikost ztrát, neboť snižuje, jak dodávku výkonu do sítě, tak odběr. Celkový činný výkon dodaný do DS je pro jednotlivé varianty velmi podobný. Nejvíce se od základní varianty 1 odklání varianty 3 a 4.

Pro jarní období od 21.4.2016 do 20.5.2016 je vliv FVE a bateriového systému na celkové výkony a ztráty zřejmý. V porovnání se stejným zastoupením OM s FVE jsou všechny výkony a ztráty menší u variant s bateriovým systémem. S rostoucím počtem FVE jsou rozdíly mezi variantami s FVE bez a s baterií ještě patrnější. U všech variant s FVE je obecně vidět, že se činný/jalový výkon dodávaný z DS a činný/jalový výkon odebíraný z DS snižuje. Na druhou stranu činný výkon dodaný do DS a činný výkon odebíraný DS s větším počtem OM s FVE samozřejmě roste. Se zvyšujícím se zastoupením FVE klesají činné/jalové ztráty z dodaného výkonu z DS. Činné ztráty z dodávaného výkonu do DS naopak vzrůstají. Celkový činný výkon dodaný do DS je u každé varianty odlišný. Nejmenší vychází pro variantu 8. Pro varianty se stejným počtem OM s FVE se rozdíl zvětšuje s rostoucím zastoupením FVE.

5.3 Krajní případ

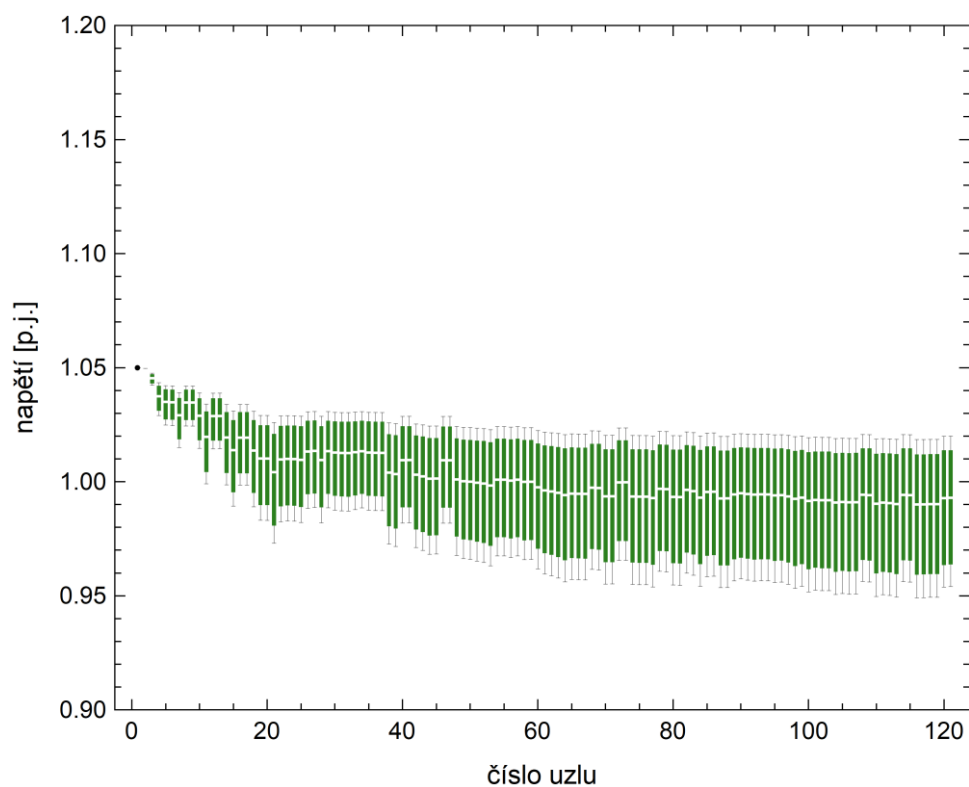
V předchozí kapitole byla při výpočtech jednotlivých scénářů uvažována hustější DS. V této kapitole je zvolena rozlehlejší DS.

Parametry ES a parametry distribučního transformátoru zůstávají stejné. Jednotlivé vzdálenosti mezi uzly jsou uvažovány dvojnásobné, což znamená, že dojde ke změně parametrů vedení, jež jsou uvedeny v Příloze č. 6.

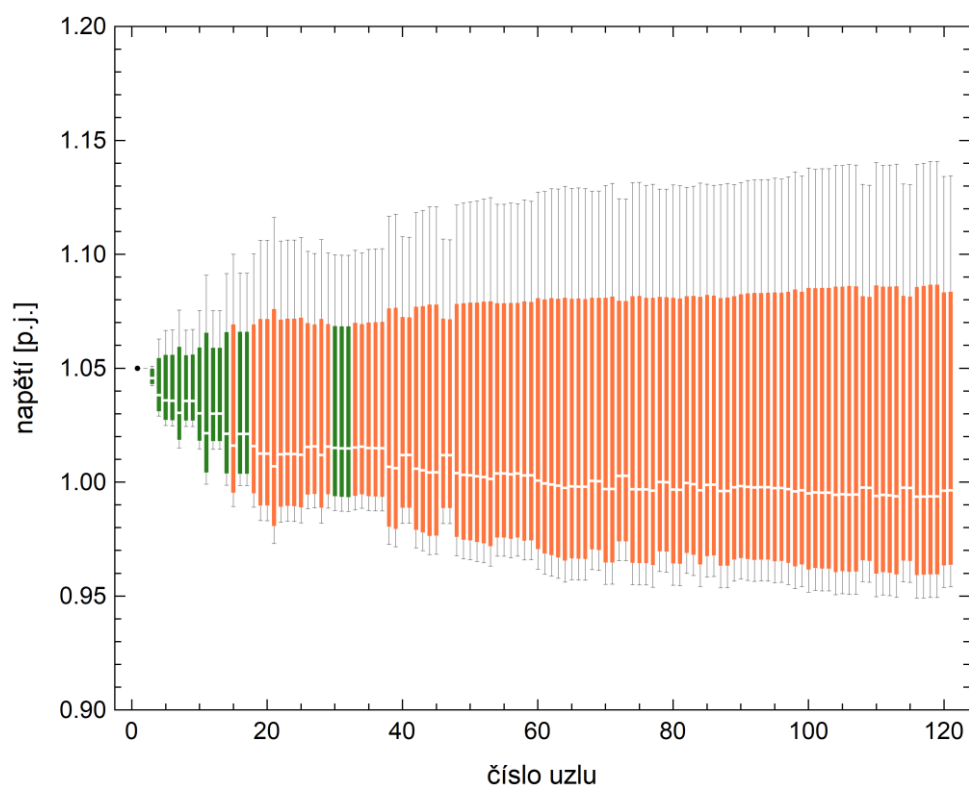
Z původních scénářů byly pro výpočty zvoleny dva nejhorší případy. První z pohledu max. odběru činného a jalového výkonu, a tedy i největšího poklesu napětí a druhý naopak z pohledu max. vyráběného výkonu FVE, a tedy největšího nárůstu napětí v síti. Konkrétně to jsou varianty 1, 4, 8 a 11.

Vzhledem k většímu množství dat jsou v této kapitole uvedeny pouze napěťové profily jednotlivých variant, neboť se výsledky v napěťových profilech vybraných krajních variant liší oproti původním nejvíce.

Napětíové profily pro období od 1.1.2016 do 30.1.2016:

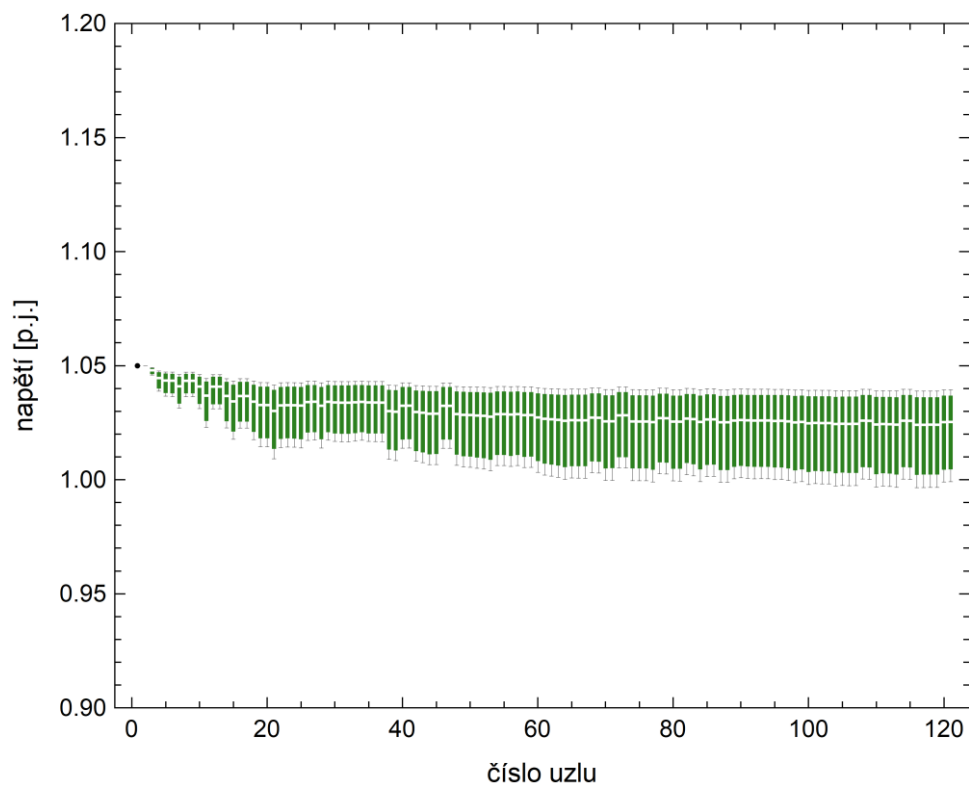


Graf č. 33 – Napětíový profil pro krajní variantu 1

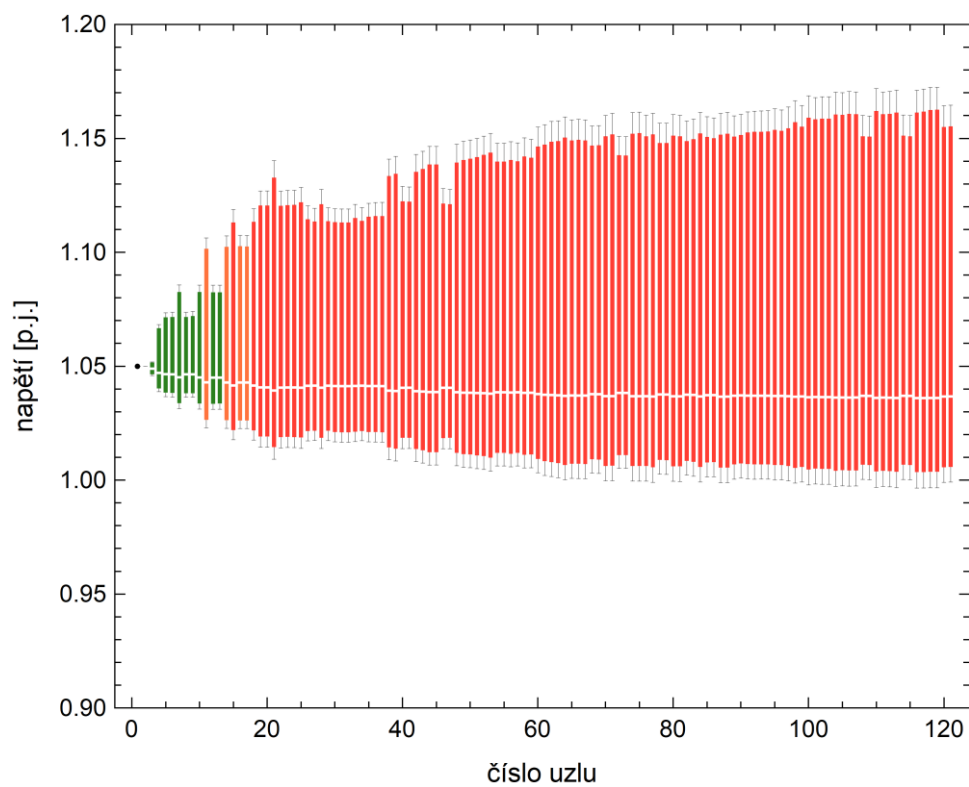


Graf č. 34 – Napětíový profil pro krajní variantu 4

Napětové profily pro období od 21.4.2016 do 20.5.2016:



Graf č. 35 – Napětový profil pro krajní variantu 8



Graf č. 36 – Napětový profil pro krajní variantu 11

Z napěťových profilů je zřejmé, že v případě rozlehlejší sítě poklesne a vzroste napětí mnohem více než v případě husté DS. Z pohledu poklesu napětí se však ani v tomto případě nedostane více než 5 % hodnot napětí mimo dolní hranici dovoleného rozmezí. Situace je však naprosto odlišná v případě variant 4 a 11, které uvažují se 75 % OM s FVE. V jarním období se u varianty 11 dostane zcela mimo dovolenou toleranci více než 80 % uzlů. Instalace malých FV zdrojů tohoto množství do této rozsáhlejší DS by tak mohla představovat velký problém.

Řešením by mohlo být přeprnutí odbočky distribučního transformátoru tak, aby se na sekundární straně snížilo napětí. Otázkou však je, jak by toto opatření ovlivnilo pokles napětí v případě varianty 1, kde by mohlo hrozit, že více než 5 % hodnot napětí poklesne pod hodnotu 0.9 p.j. a na druhou stranu, zda by vůbec pokles napětí v DS zajistil, že by v letních měsících pro velký počet FV zdrojů nebyl překročen horní limit napětí.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce je analyzování vlivu většího zastoupení FV zdrojů a bateriových systémů malých výkonů na DS NN. Zvýšený podíl rozptýlené výroby z OZE, konkrétně FVE, má na DS poměrně zásadní vliv, zejména na napěťové poměry.

V práci jsem se věnovala nejprve obecnému popisu FV a bateriových systémů dostupných na českém trhu. V této části jsem se také snažila nastínit, jaký by mohl být potenciální rozvoj FVE v ČR v následujících letech a proč se tedy danou problematikou vůbec zabývat. Dále jsem v práci popsala možná rizika zvýšeného zastoupení rozptýlené výroby na DS NN. Pro určení uzlových výkonů jsem stanovila odhad spotřeby elektrické energie odběrných míst, výrobu elektrické energie FVE a k ní odpovídající velikost kapacity baterie. Srdcem celé práce je matematický model zvolené DS vytvořený v programu Wolfram Mathematica. Pomocí tohoto modelu je počítán ustálený stav sítě před a po připojení určitého množství FVE, případně i bateriového systému, využívající Newton-Raphsonovu iterační metodu. Výpočty jsou provedeny pro dvě období 30-ti po sobě jdoucích dnů. První období od 1.1.2016 do 30.1.2016 představuje časový úsek s největším odběrem. Pro druhé období od 21.4.2016 do 20.5.2016 je charakteristická zase největší výroba FVE. Celkem bylo vytvořeno 14 variant, 7 pro každé období. Jejich rozdělení je ve třech základních rovinách, kde nejprve uvažuji bez FVE, následně s FVE bez bateriového systému, a nakonec s FVE s bateriovým úložištěm. U scénářů počítajících s FVE se jednotlivé varianty ještě liší v množství odběrných míst s FVE, kdy FVE má 25 % odběrných míst, 50 % odběrných míst a 75 % odběrných míst. Na základě výsledků napěťových profilů jednotlivých variant byly vybrány ty nejhorší z pohledu největšího poklesu a nárůstu napětí a pro ty byly ještě provedeny výpočty pro rozsáhlejší DS s cílem určit, jaký vliv má samotná rozlehlost DS.

Z výsledků vyplývá, že pro takto zvolenou DS by varianta uvažující se 75 % odběrnými místy s FVE bez baterie nemohla být z hlediska napěťového profilu realizována. Řešením by však mohlo být trvalé přepnutí odbočky distribučního transformátoru, čímž by došlo ke snížení napětí na straně NN. Nicméně z pohledu zatížení větví ani v jednom případě nedošlo k jejich přetížení a nejvyšší zatížení bylo do 50 %, což znamená, že modelová DS je z hlediska zvolených vedení a jejich dovolených proudů předimenzovaná. Obecně platí, že pro referenční varianty, tedy ty bez FVE, napětí vždy pokleslo výrazněji. Na druhou stranu, čím je větší počet odběrných míst s FVE, tím větších hodnot napětí lze v době dodávky výkonu do DS v jednotlivých uzlech dosáhnout. Vliv FVE na DS NN je více patrný v období od 21.4.2016 do 20.5.2016, kdy napěťové profily variant uvažujících s FVE jsou spíše rostoucího charakteru a výrazněji se oproti referenční variantě bez FVE zvyšuje s rostoucím zastoupením FVE také zatížení jednotlivých větví. Z provedených výpočtů je také patrný vliv samotného bateriového systému, který snižuje, jak odběr, tak dodávané výkony z/do DS, čímž snižuje také ztráty. Pozitivní vliv má mimo jiné také na napěťový profil, kdy snižuje pravděpodobnost, že napětí ve vzdálenějších uzlech překročí dovolené rozmezí a v některých případech snižuje zatížení jednotlivých větví. Rozlehlost DS má významný vliv na napěťové profily, kdy napětí klesá nebo vzrůstá výrazněji než v případě husté DS. Pro variantu uvažující se 75 % OM s FVE byla napětí téměř ve všech uzlech mimo dovolené rozmezí. Vzhledem k výraznějšímu poklesu a nárůstu napětí v jednotlivých uzlech se ani trvalé přepnutí odbočky distribučního transformátoru nejeví v tomto případě jako řešení. Toto opatření by však mohlo pomoci u variant uvažujících s menším zastoupením FVE, které nemusí být v této rozlehlé DS vyhovující.

LITERATURA

- [1] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: ČVUT v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [2] HASELHUHN, Ralf. *Fotovoltaika: Budovy jako zdroj proudu*. Ostrava: HEL, 2010. ISBN 978-80-86167-33-6.
- [3] BENDA, Vítězslav. *Fotovoltaické články z krystalického křemíku* [přednáška]. Praha: ČVUT v Praze, 4. října 2021.
- [4] *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy České republiky za rok 2020* [online]. ERÚ, 2020. [cit. 2021-10-16]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/6616306/Rocni_zprava_provoz_ES_2020.pdf/edc0cb03-700a-43a7-8c08-a1ccb3f2d173
- [5] *Sluneční elektrárny, stav k 30.9.2021* [online]. ERÚ, 2021. [cit. 2021-10-16]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/463106/SLE_21_09.pdf/f65c2c9b-49ea-4107-a951-700ecdad1d1a
- [6] *Solární rok 2020: Česká fotovoltaika roste i během pandemie, stále ale nevyužíváme její plný potenciál* [online]. 2021. [cit. 2021-10-16]. Dostupné z: <https://www.solarniasociace.cz/cs/aktualne/21054-solarni-rok-2020--ceska-fotovoltaika-roste-i-behem-pandemie--stale-ale-nevyuzivame-jeji-plny-potencial>
- [7] *Oponentní posudek k vybraným tématům z návrhu Národního Klimaticko-Energetického plánu (NKEP) pro oblast FVE* [online]. EGÚ Brno, a.s., 2018. [cit. 2021-10-16]. Dostupné z: https://www.solarniasociace.cz/aktuality/20190107_oponentni-posudek-k-nkep-pro-fve.pdf
- [8] *EU Carbon Permits* [online]. [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon>
- [9] KOHOUT, Štěpán. *Teplárenství* [přednáška]. Praha: ČVUT v Praze, 13. května 2021.
- [10] *Časté dotazy* [online]. [cit. 2021-10-16]. Dostupné z: <https://www.solarniasociace.cz/cs/pro-verejnost/caste-dotazy>
- [11] *Ceny typizovaných fotovoltaických elektráren na klíč* [online]. [cit. 2021-10-16]. Dostupné z: <https://www.bce.cz/cenik/>
- [12] *Fotovoltaika s dotací* [online]. [cit. 2021-10-16]. Dostupné z: https://www.joyce-energie.cz/typova-reseni-s-dotaci/?gclid=CjwKCAjw8KmlBhB8EiwAQbqNoNM9wbiTNY10a9T4kox3ST0A_JDW_mEAFSdvCQMrtqCst1_Ox2CNoBoCZdYQAvD_BwE
- [13] *FVE na klíč* [online]. [cit. 2021-10-16]. Dostupné z: <https://shop.solarpartner.cz/fotovoltaicke-elektrarny>

- [14] *Solární fotovoltaické elektrárny na klíč* [online]. [cit. 2021-10-16]. Dostupné z: <https://www.sefy-cr.cz/>
- [15] *Nejprodávanější innogy fotovoltaické systémy* [online]. [cit. 2021-10-16]. Dostupné z: <https://www.elektřinazeslunce.cz/>
- [16] *Ceník fotovoltaických elektráren* [online]. [cit. 2021-10-16]. Dostupné z: <http://www.sollaris.cz/cenik-fotovoltaickych-elektren>
- [17] *Solární panel Canadian Solar 450Wp MONO stříbrný rám* [online]. [cit. 2021-10-17]. Dostupné z: <https://shop.iftech.cz/solarni-panely/2934-solarni-panel-canadian-solar-450wp-mono-stribrny-ram.html>
- [18] TICHÝ, Jiří. *Lithiové akumulátory* [online]. 2019. [cit. 2021-10-16]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektřiny/13612-lithiove-akumulatory>
- [19] *BMS* [online]. [cit. 2021-10-25]. Dostupné z: <https://www.fotovoltaika-gottwald.cz/bms#>
- [20] *BATTERY-BOX PREMIUM HVS/HVM datasheet* [online]. [cit. 2021-10-16]. Dostupné z: <https://www.europe-solarstore.com/download/byd/BYD-Battery-Box-Premium-HVS-datasheet.pdf>
- [21] *Baterie* [online]. [cit. 2021-10-16]. Dostupné z: <https://shop.iftech.cz/85-baterie>
- [22] *LG Chem Resu datasheet* [online]. [cit. 2021-10-16]. Dostupné z: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0017/8847/7489/files/LG_Chem_RESU_data_sheet.pdf?704
- [23] *Vysokonapěťový systém pro akumulaci energie* [online]. [cit. 2021-10-16]. Dostupné z: <https://www.solidpower.cz/data/user-content/datasheety/baterie/pylontech/vysokonapetove/x1/pylontech-datasheet-powercube-cz.pdf>
- [24] *Pylontech HV H48050* [online]. [cit. 2021-10-16]. Dostupné z: <https://suministrosdelsol.com/en/pylontech-battery/873-1780-pylontech-high-voltage-battery-h48050-bms.html>
- [25] ČERNÁN, Martin. *Rozptýlená (decentralizovaná) výroba elektrické energie* [přednáška]. Praha: ČVUT v Praze, 2021.
- [26] HALAD, Josef. *Napěťové profily v distribuční soustavě s decentrálními zdroji* [online]. [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/18697/1/Hlad%20BP.pdf>
- [27] BENDA, Vítězslav. *Fotovoltaické systémy připojené k rozvodné síti* [přednáška]. Praha: ČVUT v Praze, 2021.
- [28] PNE 33 3430-7. Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie. Charakteristiky napětí elektrické energie ve veřejné distribuční síti. Vydání 3. 2008. Dostupné z: <https://docplayer.cz/5613588-Charakteristiky-napeti-elektricke-energie-ve-verejne-distribucni-siti.html>

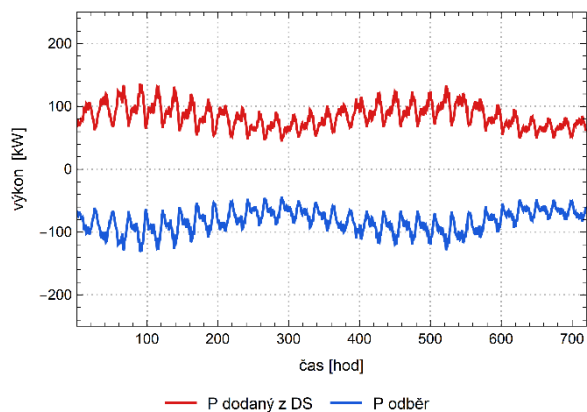
- [29] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Praha: ČVUT v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [30] *Konhefrovy domy Horní Počernice* [online]. [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: <https://konhefrovydomy.cz/>
- [31] *Dokumentace* [online]. [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/dokumentace/dokumentace-elektrina/dokumentace-tdd>
- [32] *Třídy typových diagramů dodávek* [online]. [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/474995/Priloha_4_541.pdf/91493ff9-be09-4af0-8791-87b36410b071
- [33] *Statistika* [online]. [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/typove-diagramy-dodavek-elektriny/normalizovane-tdd?date=2019-01-01>
- [34] *Photovoltaic geographical information system* [online]. [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#HR
- [35] *Kolik elektřiny vyrobí vaše FVE? Roli hraje nejen lokalita, sklon či orientace panelů* [online]. [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: <https://www.silektro.cz/kolik-elektriny-vyrobi-vase-fve-rol-i-hraje-nejen-lokalita-sklon-ci-orientace-panelu/>
- [36] BENDA, Vítězslav. *Úvod. Solární energie, spektra, atmosférické vlivy* [přednáška]. Praha: ČVUT v Praze, 2021.
- [37] *Závazné pokyny pro žadatele a příjemce podpory z podprogramu Nová zelená úsporám – Rodinné domy – v rámci 3. výzvy k podávání žádostí* [online]. [cit. 2021-11-18]. Dostupné z: https://novazelenausporam.cz/files/documents/storage/2018/09/18/1537271767_NZ%C3%A9A1vazn%C3%A920pokyny%20pro%20C5%BEadatele%20RD%203-v%C3%BDzva_2018-09.pdf
- [38] *Baterie pro hybridní fotovoltaiku, jakou vybrat?* [online]. 2020. [cit. 2021-11-24]. Dostupné z: <https://www.nemakej.cz/baterie-pro-hybridni-fotovoltaiku.-jakou-vybrat-0497>
- [39] HALUZÍK, Evžen. *Řízení provozu elektrizačních soustav*. Praha, 1984. [cit. 2021-11-25]
- [40] *Ustálené chody v uzlových sítích* [online]. ČVUT v Praze. [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/PRE/PRE_pr01_ustalene_stavy.pdf
- [41] *Výpočet ustáleného chodu soustavy pomocí Newton-Raphsonovy iterační metody* [online]. ČVUT v Praze. [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/wiki/PRE>
- [42] *The IEEE European Low Voltage Test Feeder*. 2015. [cit. 2022-04-10]
- [43] BOGLOU, Vesileios. *A Fuzzy Energy Management Strategy for the Coordination of Electric Vehicle Charging in Low Voltage Distribution Grids*. 2020. [cit. 2022-04-11]

Seznam příloh

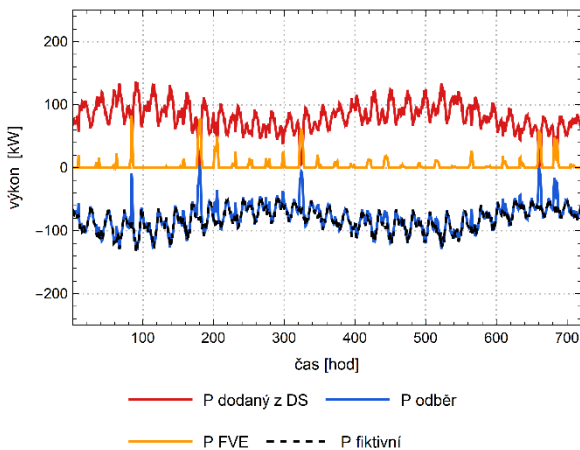
Příloha č. 1 Parametry vedení pro základní scénář

Elektronická příloha

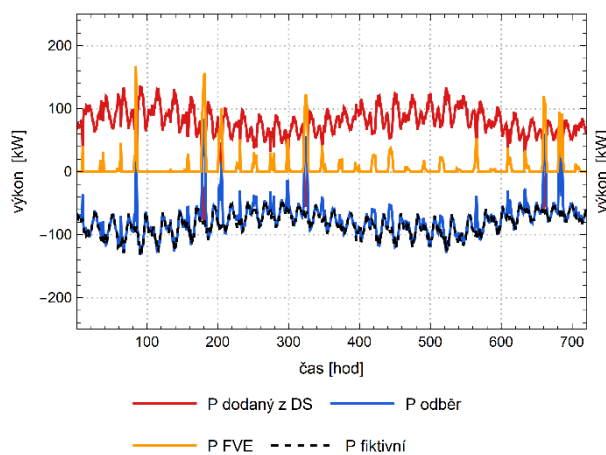
Příloha č. 2 Závislosti činných výkonů na čase



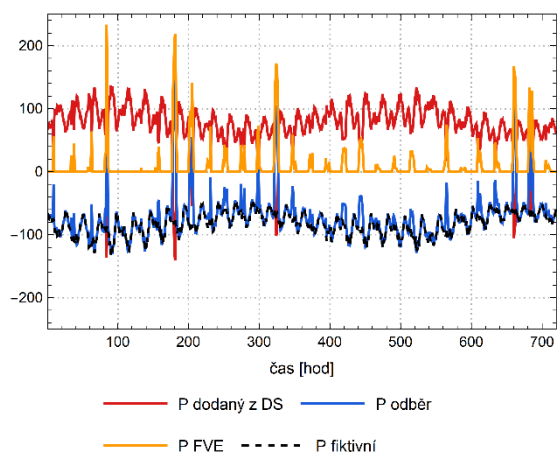
Graf P2: 1 – Závislost činných výkonů na čase varianta 1



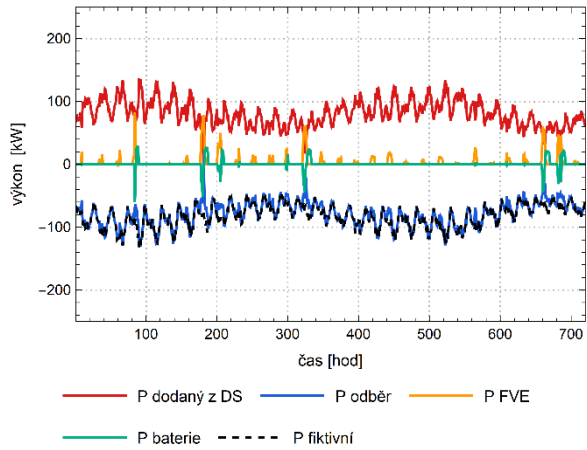
Graf P2: 2 – Závislost činných výkonů na čase varianta 2



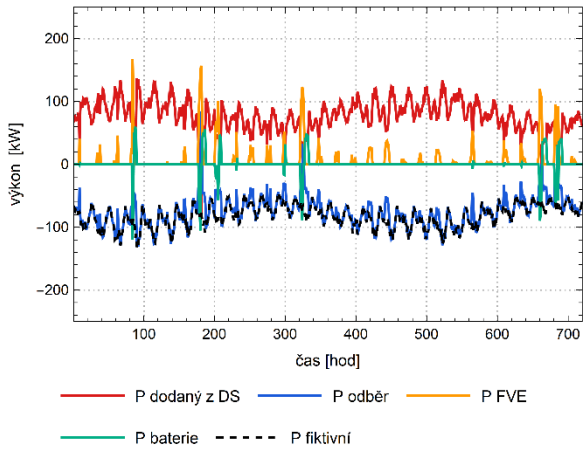
Graf P2: 3 – Závislost činných výkonů na čase varianta 3



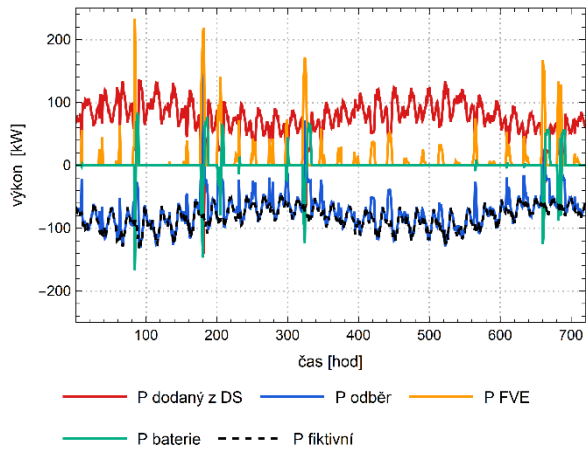
Graf P2: 4 – Závislost činných výkonů na čase varianta 4



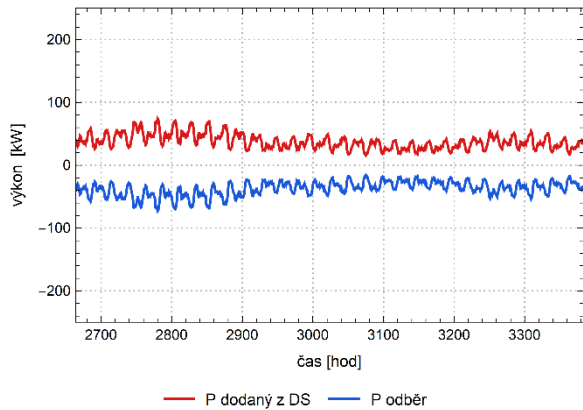
Graf P2: 5 – Závislost činných výkonů na čase varianta 5



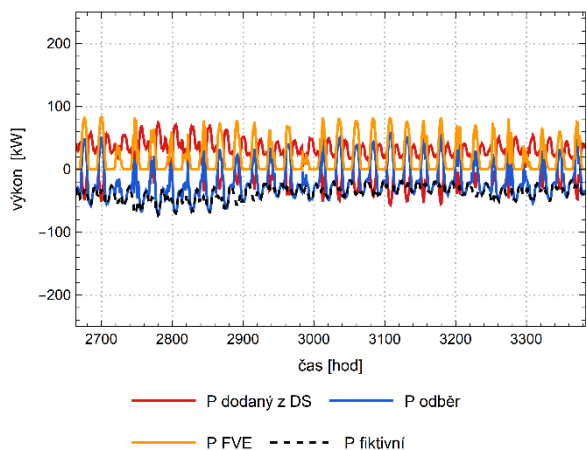
Graf P2: 6 – Závislost činných výkonů na čase varianta 6



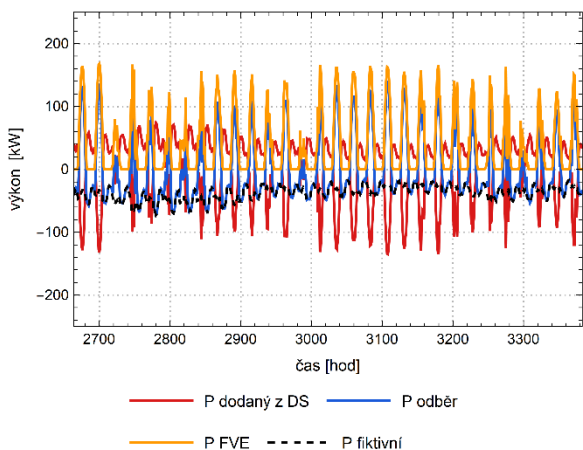
Graf P2: 7 – Závislost činných výkonů na čase varianta 7



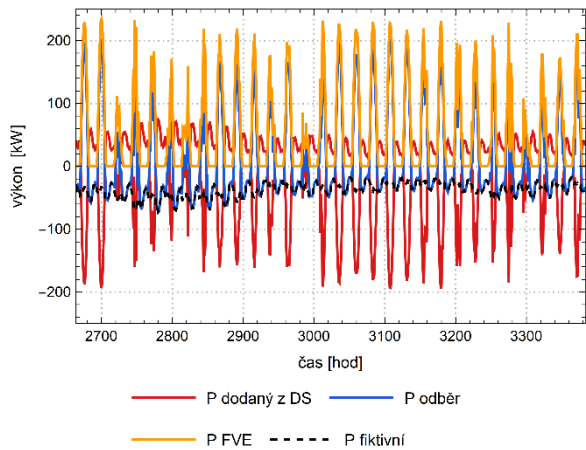
Graf P2: 8 – Závislost činných výkonů na čase varianta 8



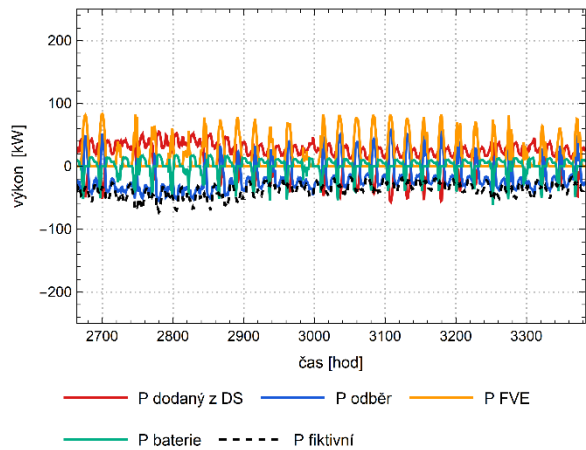
Graf P2: 9 – Závislost činných výkonů na čase varianta 9



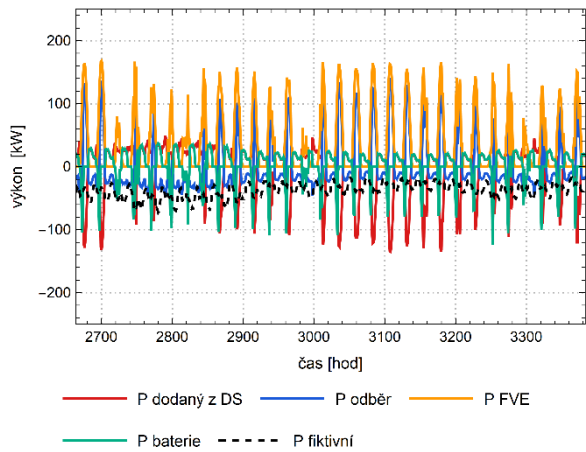
Graf P2: 10 – Závislost činných výkonů na čase varianta 10



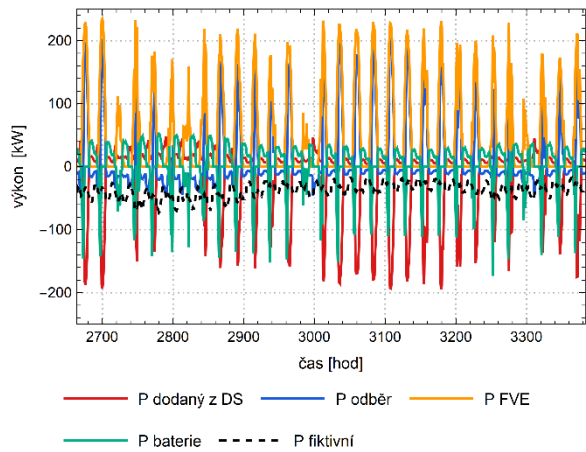
Graf P2: 11 – Závislost činných výkonů na čase varianta 11



Graf P2: 12 – Závislost činných výkonů na čase varianta 12

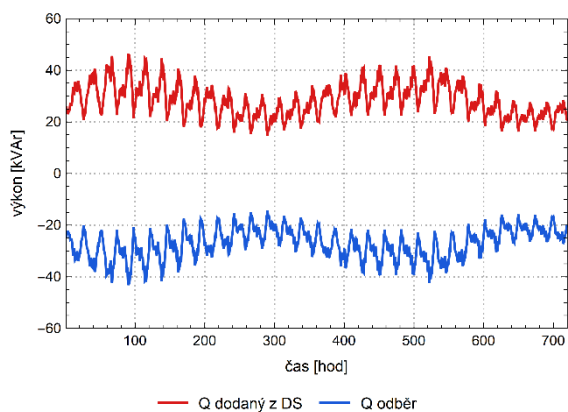


Graf P2: 13 – Závislost činných výkonů na čase varianta 13

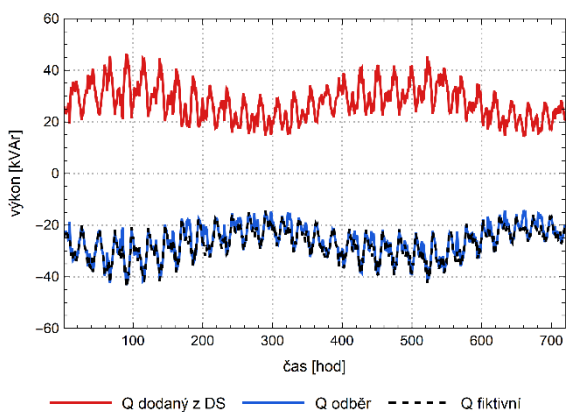


Graf P2: 14 – Závislost činných výkonů na čase varianta 14

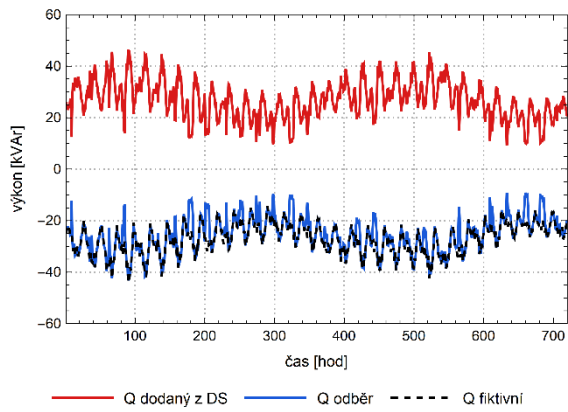
Příloha č. 3 Závislosti jalových výkonů na čase



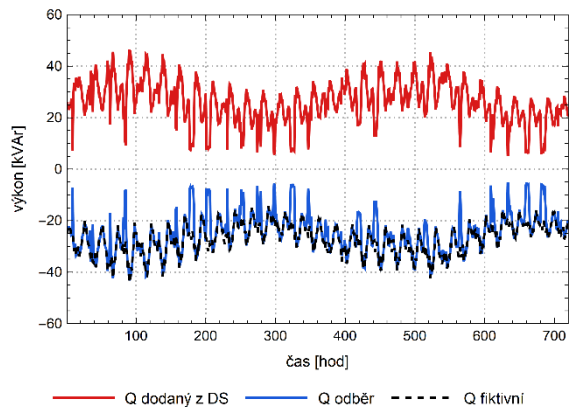
Graf P3: 1 – Závislost jalových výkonů na čase varianta 1



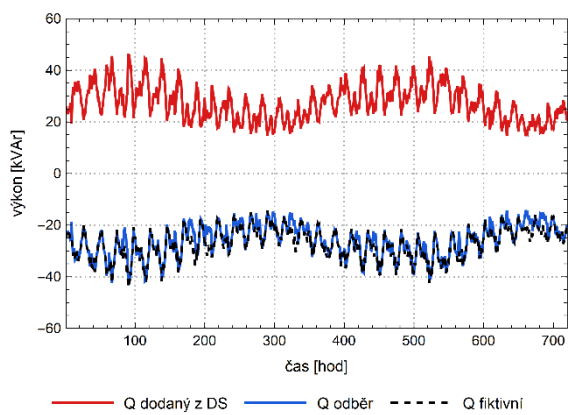
Graf P3: 2 – Závislost jalových výkonů na čase varianta 2



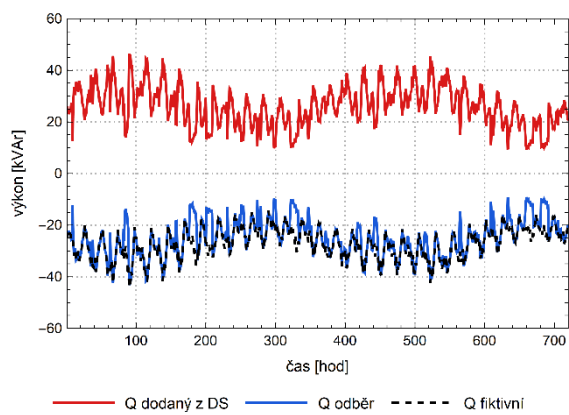
Graf P3: 3 – Závislost jalových výkonů na čase variantu 3



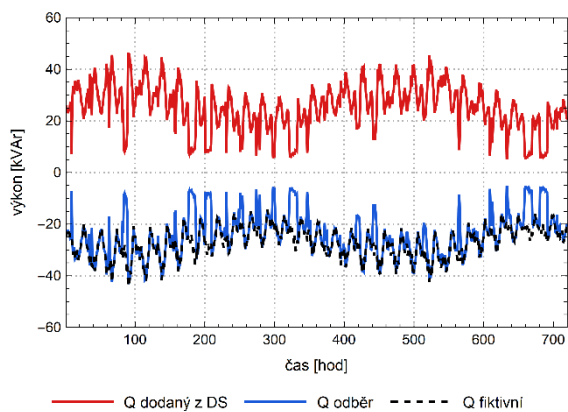
Graf P3: 4 – Závislost jalových výkonů na čase variantu 4



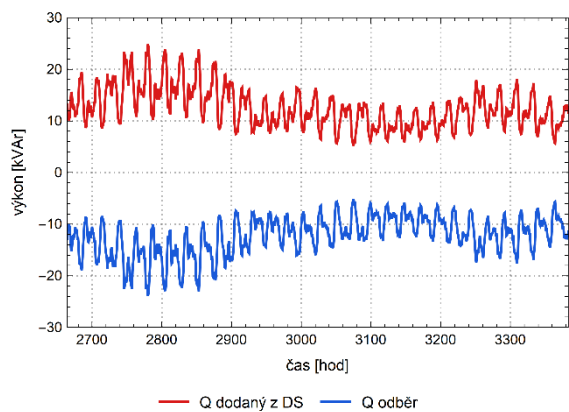
Graf P3: 5 – Závislost jalových výkonů na čase variantu 5



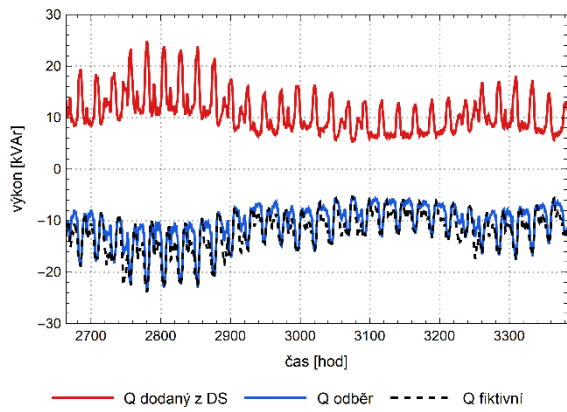
Graf P3: 6 – Závislost jalových výkonů na čase variantu 6



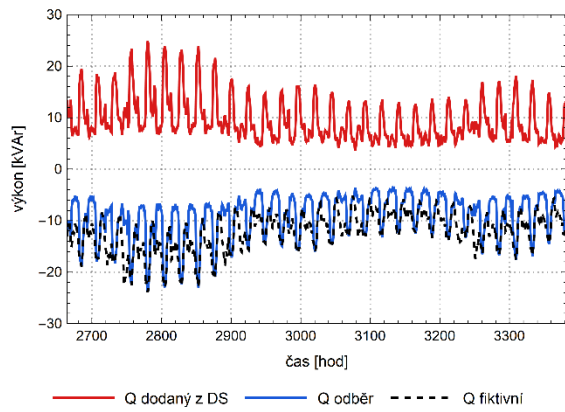
Graf P3: 7 – Závislost jalových výkonů na čase variantu 7



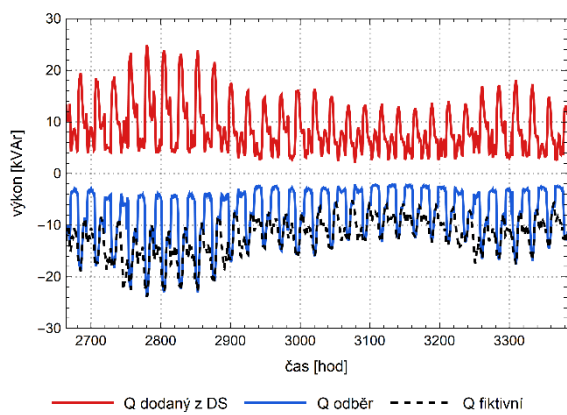
Graf P3: 8 – Závislost jalových výkonů na čase variantu 8



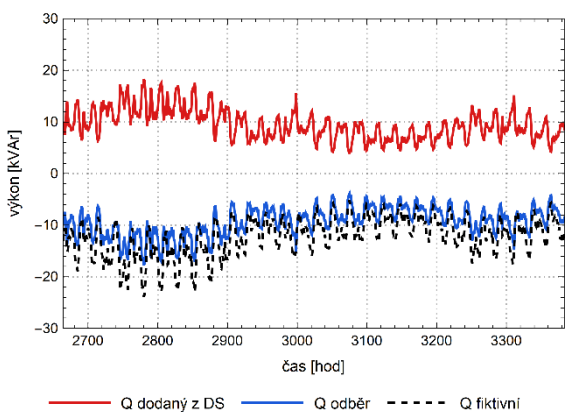
Graf P3: 9 – Závislost jalových výkonů na čase variantu 9



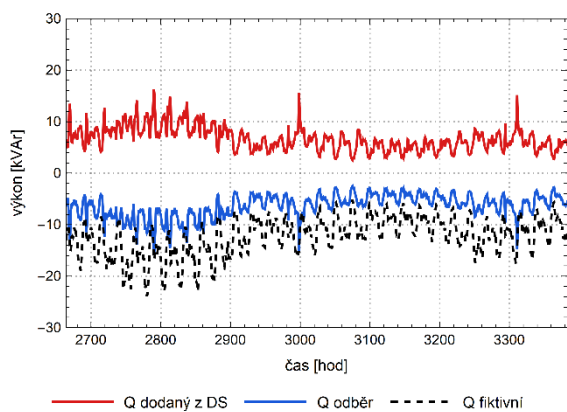
Graf P3: 10 – Závislost jalových výkonů na čase variantu 10



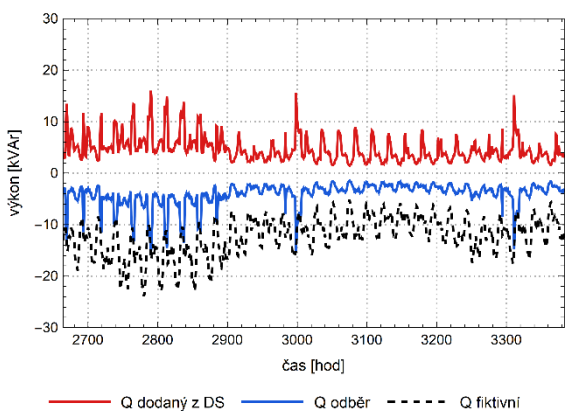
Graf P3: 11 – Závislost jalových výkonů na čase variantu 11



Graf P3: 12 – Závislost jalových výkonů na čase variantu 12

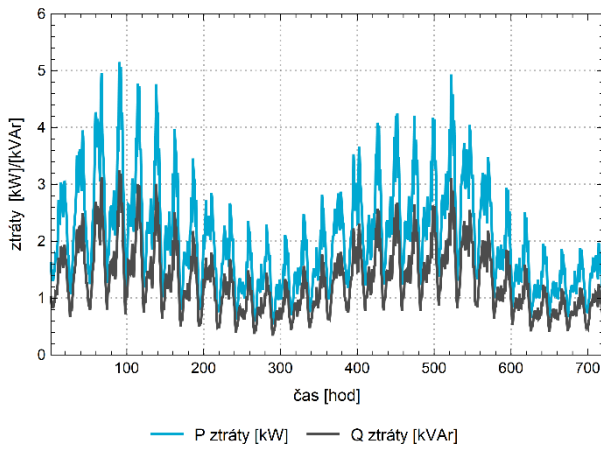


Graf P3: 13 – Závislost jalových výkonů na čase variantu 13

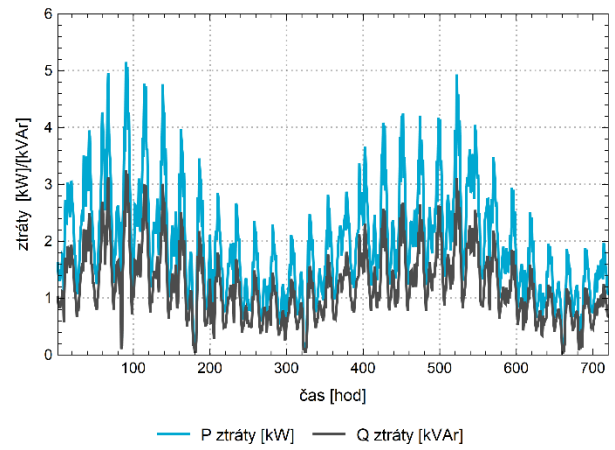


Graf P3: 14 – Závislost jalových výkonů na čase variantu 14

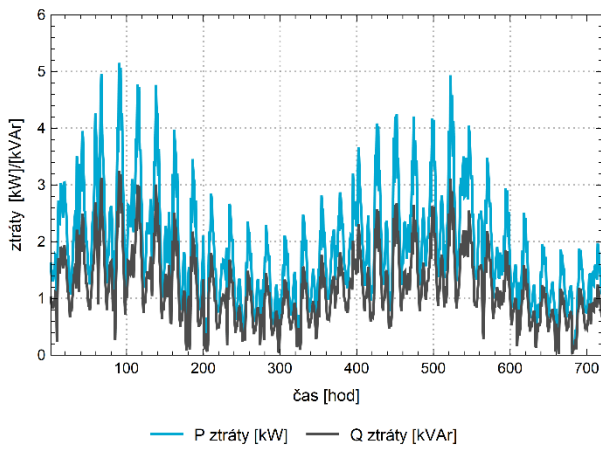
Příloha č. 4 Závíslosti ztrát na čase



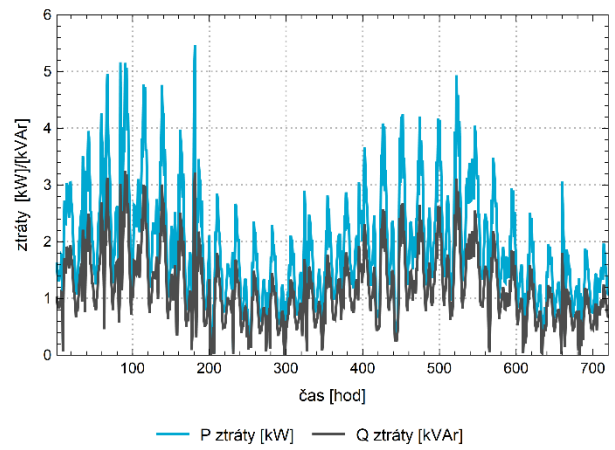
Graf P4: 1 – Závislost ztrát na čase varianta 1



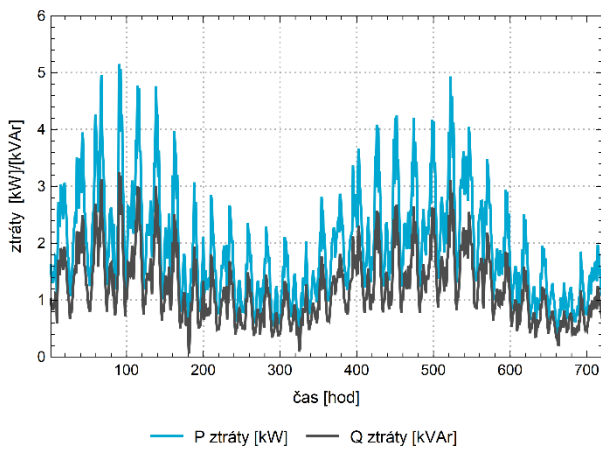
Graf P4: 2 – Závislost ztrát na čase varianta 2



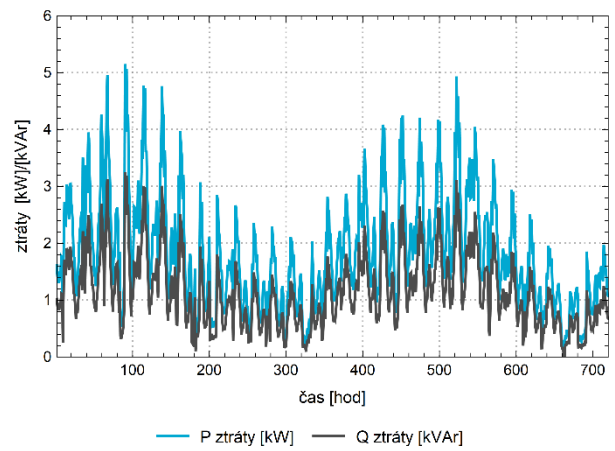
Graf P4: 3 – Závislost ztrát na čase varianta 3



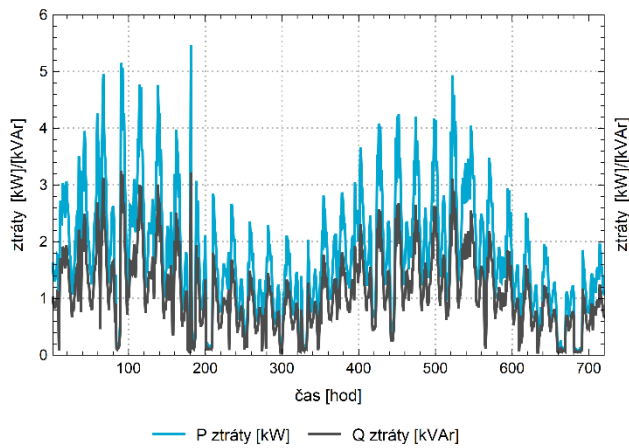
Graf P4: 4 – Závislost ztrát na čase varianta 4



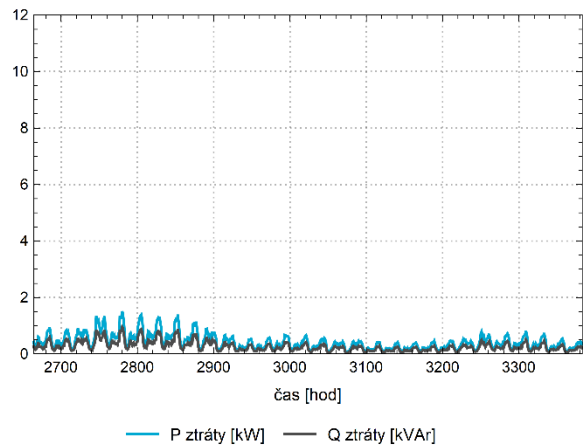
Graf P4: 5 – Závislost ztrát na čase varianta 4



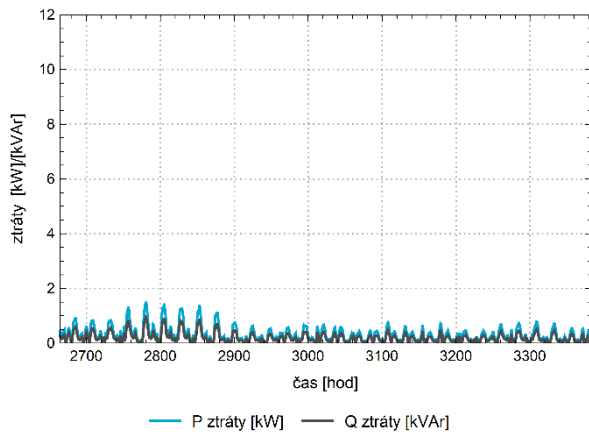
Graf P4: 6 – Závislost ztrát na čase varianta 6



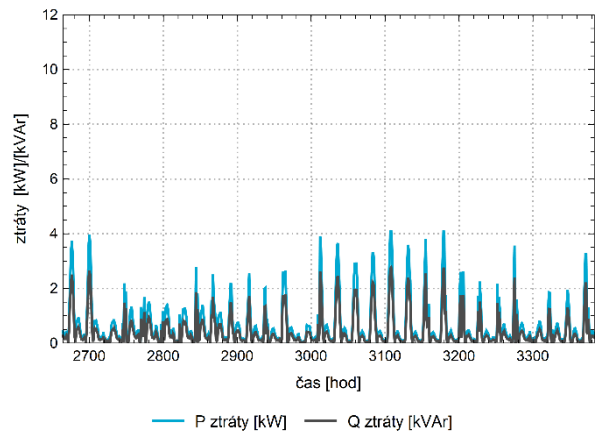
Graf P4: 7 – Závislost ztrát na čase varianta 7



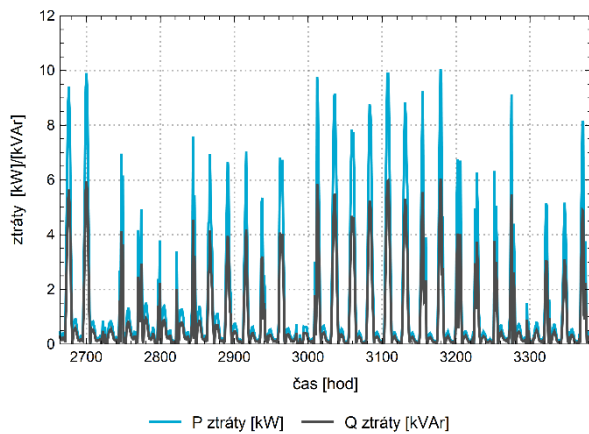
Graf P4: 8 – Závislost ztrát na čase varianta 8



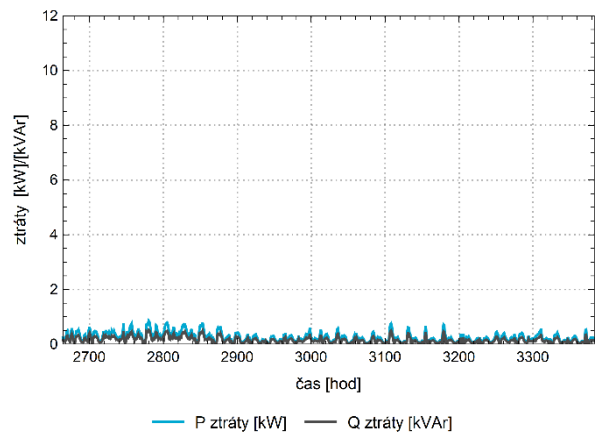
Graf P4: 9 – Závislost ztrát na čase varianta 9



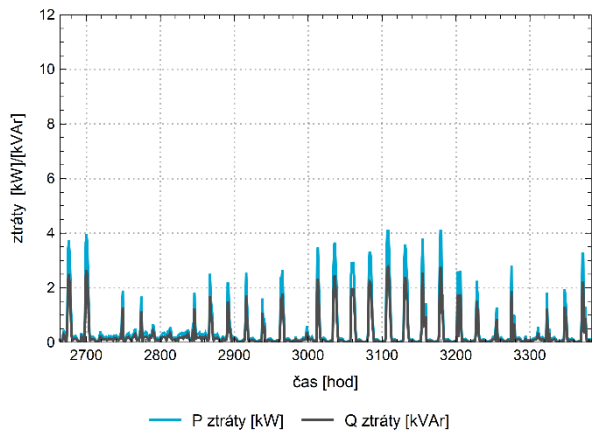
Graf P4: 10 – Závislost ztrát na čase varianta 10



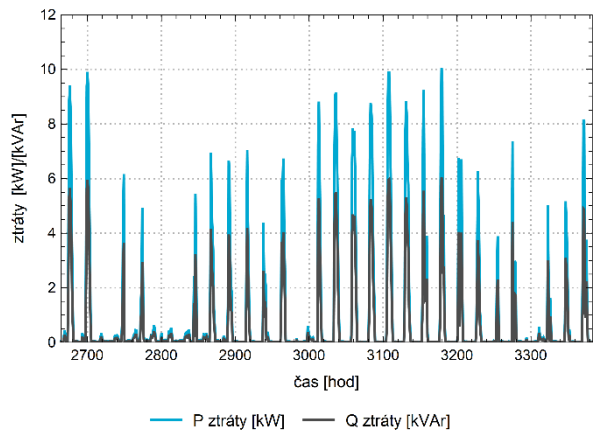
Graf P4: 11 – Závislost ztrát na čase varianta 11



Graf P4: 12 – Závislost ztrát na čase varianta 12

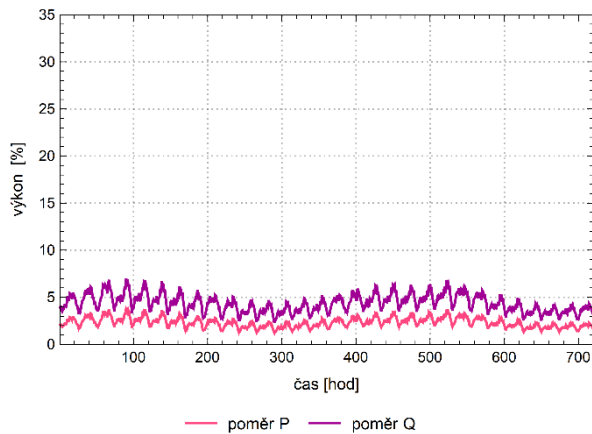


Graf P4: 13 – Závislost ztrát na čase varianta 13

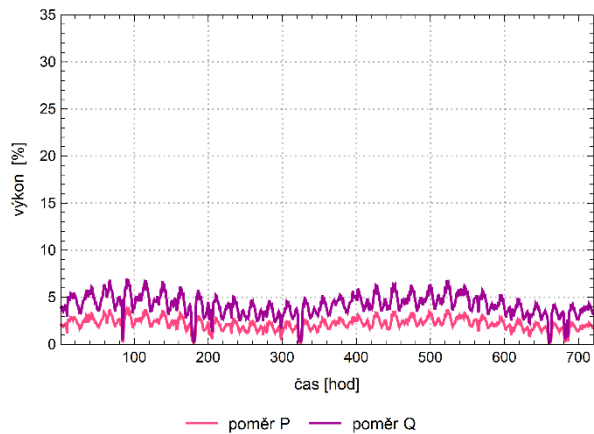


Graf P4: 14 – Závislost ztrát na čase varianta 14

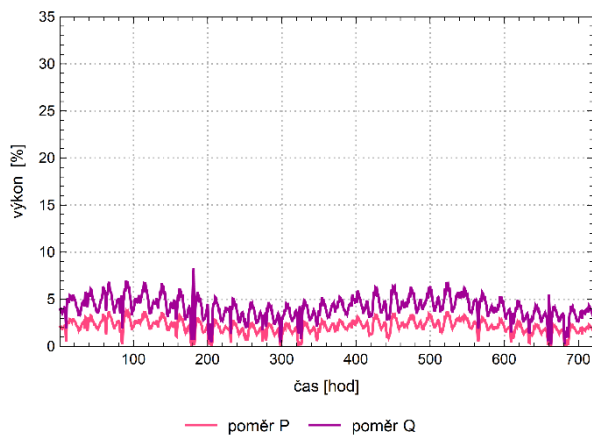
Příloha č. 5 Závislosti poměru P a poměru Q na čase



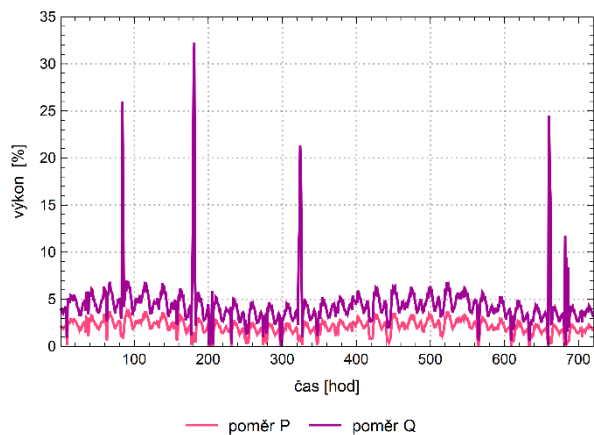
Graf P5: 1 – Závislost poměru P a poměru Q varianta 1



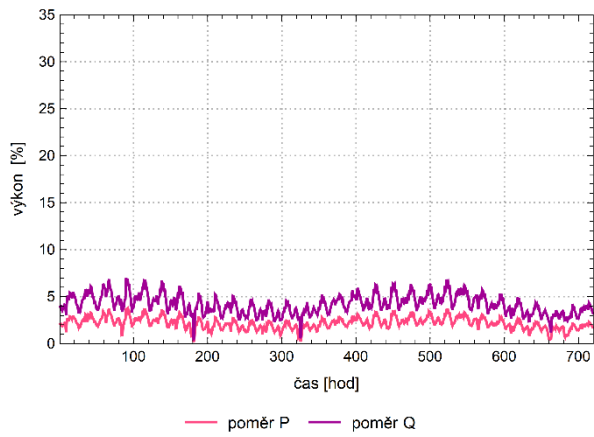
Graf P5: 2 – Závislost poměru P a poměru Q varianta 2



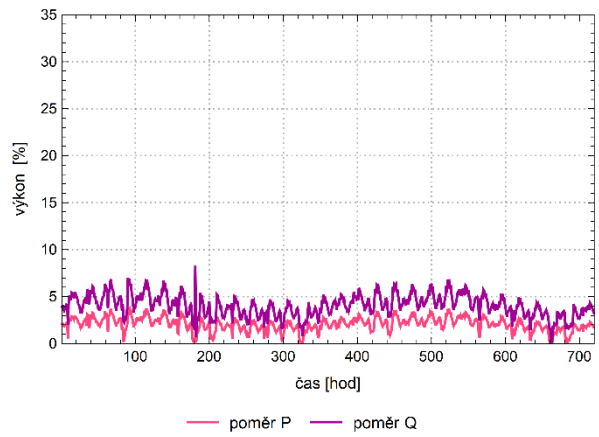
Graf P5: 3 – Závislost poměru P a poměru Q varianta 3



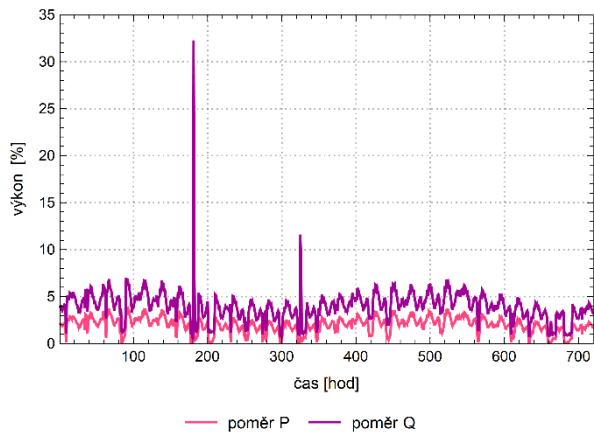
Graf P5: 4 – Závislost poměru P a poměru Q varianta 4



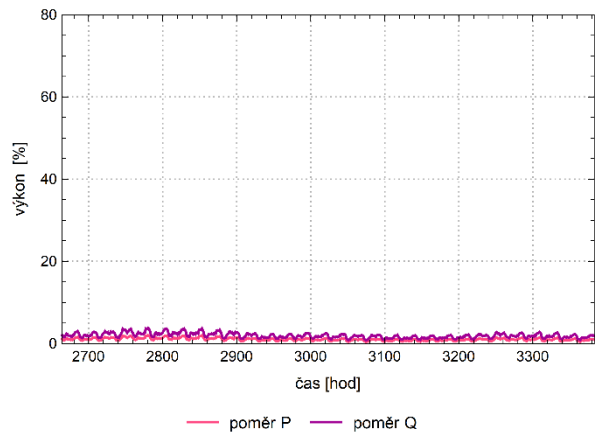
Graf P5: 5 – Závislost poměru P a poměru Q varianta 5



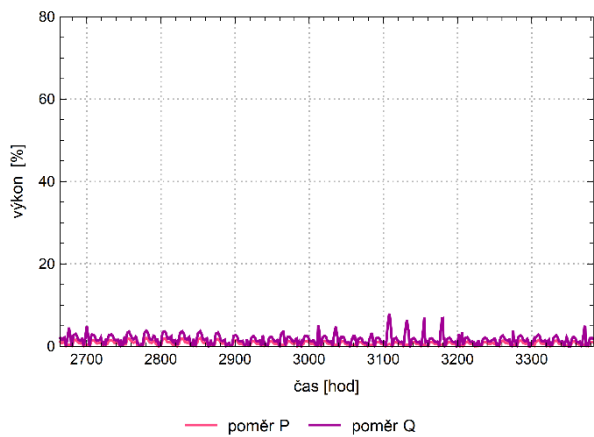
Graf P5: 6 – Závislost poměru P a poměru Q varianta 6



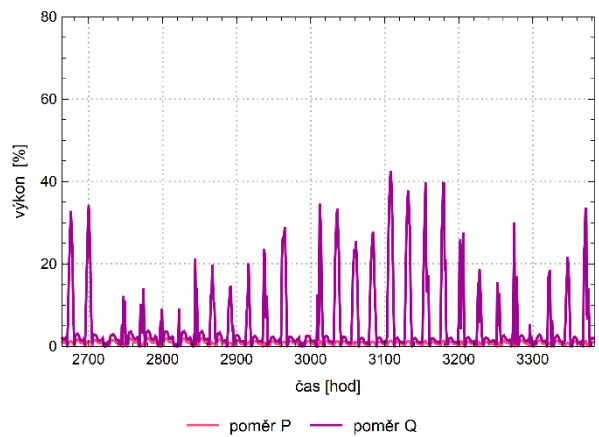
Graf P5: 7 – Závislost poměru P a poměru Q varianta 7



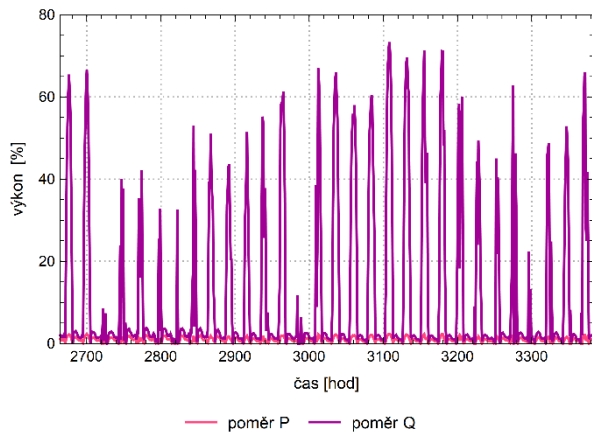
Graf P5: 8 – Závislost poměru P a poměru Q varianta 8



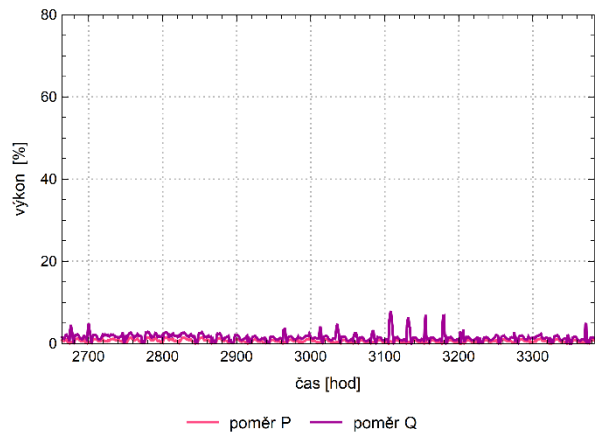
Graf P5: 9 – Závislost poměru P a poměru Q varianta 9



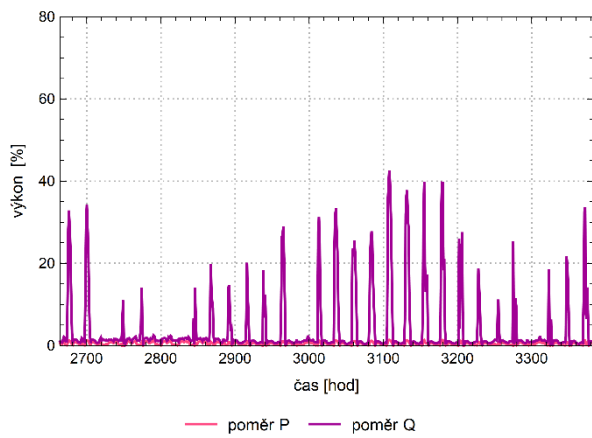
Graf P5: 10 – Závislost poměru P a poměru Q varianta 10



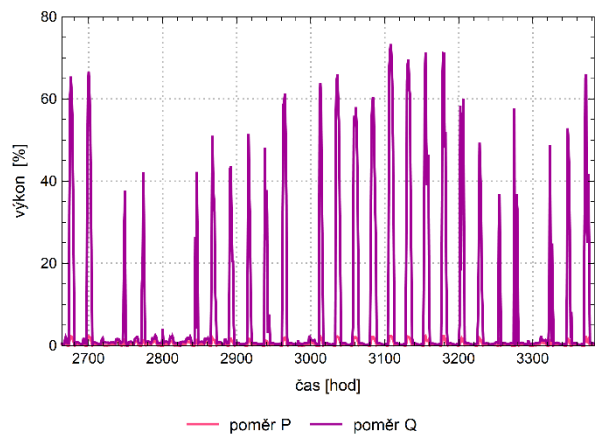
Graf P5: 11 – Závislost poměru P a poměru Q varianta 11



Graf P5: 12 – Závislost poměru P a poměru Q varianta 12



Graf P5: 13 – Závislost poměru P a poměru Q varianta 13



Graf P5: 14 – Závislost poměru P a poměru Q varianta 14

Příloha č. 6 Parametry vedení pro krajní scénář

Elektronická příloha