



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

ANALÝZA SLABÝCH MÍST DISTRIBUČNÍ SÍTĚ V OBCI S VYSOKÝM POČTEM FOTOVOLTAICKÝCH ZDROJŮ

WEAK POINTS ANALYSIS OF DISTRIBUTION NETWORK IN MUNICIPALITY WITH HIGH NUMBERS OF PHOTOVOLTAIC SOURCES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Sedlák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Paar, Ph.D.

BRNO 2020



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Petr Sedlák

ID: 189931

Ročník: 2

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Analýza slabých míst distribuční sítě v obci s vysokým počtem fotovoltaických zdrojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Podmínky pro připojení zdrojů do distribuční sítě
2. Přehled zpětných vlivů na síť NN
3. Struktura a stav stávající sítě NN
4. Vyhodnocení slabých míst omezující vyvedení výkonu z FV zdrojů na úrovni NN
5. Návrh úprav sítě pro zvýšení možnosti vyvedení výkonu z FV zdrojů

DOPORUČENÁ LITERATURA:

PNE, PPDS a IEEE

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 1.6.2020

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

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

SEDLÁK, Petr. *Analýza slabých míst distribuční sítě v obci s vysokým počtem fotovoltaických zdrojů* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127239>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Martin Paar.

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Analýza slabých míst distribuční sítě v obci s vysokým počtem fotovoltaických zdrojů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 01.06.2020

.....

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Paarovi, Ph.D. za účinnou pedagogickou a odbornou pomoc, za cenné rady a materiály při zpracování diplomové práce. Také panu Ing. Tomáši Kolaciovi za možnost spolupráce s firmou E.ON Distribuce, a.s. a za odbornou pomoc a poskytnuté materiály. Společnostem DAISY spol. s r.o. a EGC - EnerGoConsult ČB s.r.o. za zapůjčení výpočetních programů. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své přítelkyni Ing. Barboře Šustrové za pomoc a podporu.

ABSTRAKT

Diplomová práce pojednává o problematice slabých míst distribuční soustavy v obci s vysokým počtem fotovoltaických zdrojů. Do současného stavu rozvodné elektrické sítě konkrétní obce jsou postupně přidávány fotovoltaické elektrárny a při tom sledovány změny v parametrech sítě. Práce se zabývá úpravami sítě vzhledem ke snaze vyvedení co nejvyššího výkonu ze zdrojů do rozvodné soustavy při dodržení stanovených pravidel. Tato stanovená pravidla o připojení a provozu zdrojů v distribuční síti a zpětných vlivech v síti nízkého napětí popisuje teoretická část práce.

KLÍČOVÁ SLOVA: distribuční síť, fotovoltaická elektrárna, změny napětí, zpětné vlivy

ABSTRACT

The master's thesis deals with the issue of weak points of the distribution network in a municipality with high numbers of photovoltaic sources. Photovoltaic power plants are gradually being added to the current state of the electric power distribution network of a specific municipality, while changes in the network are being monitored. Due to the output of the highest possible power from the sources into the distribution system in compliance with the established rules, the thesis also describes network modifications. These established rules of connection and operation of resources in the distribution network and effects of injecting disturbances in the low voltage network are discussed in the theoretical part of the thesis.

KEY WORDS: effect of injecting disturbances, electric power distribution, photovoltaic power plant, voltage changes

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
1 ÚVOD	13
2 PODMÍNKY PRO PŘIPOJENÍ ZDROJŮ DO DISTRIBUČNÍ SÍTĚ	14
2.1 PRAVIDLA PRO PROVOZ VÝROBEN V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ.....	14
2.2 PODMÍNKY PŘIPOJENÍ ZAŘÍZENÍ K ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ.....	14
2.3 CHARAKTERISTIKA ELEKTRICKÉHO NAPĚTÍ U VEŘEJNÝCH DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ.....	16
2.3.1 POŽADAVKY NA KVALITU ELEKTRICKÉ ENERGIE	16
2.3.2 ZKUŠEBNÍ METODY ZA NORMÁLNÍCH PROVOZNÍCH PODMÍNEK.....	17
2.4 PROBLEMATIKA JALOVÝCH VÝKONŮ V SÍTÍCH ES V ČR.....	18
3 PŘEHLED ZPĚTNÝCH VLIVŮ NA SÍŤ NN.....	20
3.1 VLIV ZMĚNY NAPĚTÍ	20
3.2 HARMONICKÉ PROUDY	21
3.3 OVLIVNĚNÍ ZAŘÍZENÍ HDO.....	22
3.4 VLIV VELKÉHO POČTU FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN NA DS.....	22
4 METODY A POSTUPY ŘEŠENÍ.....	24
4.1 VÝPOČETNÍ PROGRAM DAISY BIZON PROJEKTANT	24
4.2 DNCALC: ANALÝZA POMĚRŮ V DS.....	25
5 STRUKTURA A STAV STÁVAJÍCÍ SÍTĚ NN A VN	26
5.1 POPIS VYBRANÉHO ÚZEMÍ.....	26
5.2 SOUČASNÁ STRUKTURA A STAV STÁVAJÍCÍ ROZVODNÉ ELEKTRICKÉ SÍTĚ	27
6 PENETRACE FVE	32
6.1 ANALÝZA MOŽNOSTÍ PENETRACE FVE.....	32
6.2 VYBRANÁ VARIANTA.....	34
6.2.1 JEDNOTLIVÉ ÚROVNĚ POSTUPNÉ PENETRACE FVE	34
6.3 PROVEDENÍ POSTUPNÉ PENETRACE FVE.....	35
6.3.1 PRVNÍ FÁZE PENETRACE OBCE FVE	36
6.3.2 DRUHÁ FÁZE PENETRACE OBCE FVE.....	37
6.3.3 TŘETÍ FÁZE PENETRACE OBCE FVE.....	38
6.3.4 ČTVRTÁ FÁZE PENETRACE OBCE FVE.....	39
6.3.5 PÁTÁ FÁZE PENETRACE OBCE FVE.....	40
6.3.6 ŠESTÁ FÁZE PENETRACE OBCE FVE	42
6.3.7 SEDMÁ FÁZE PENETRACE OBCE FVE.....	44
6.3.8 OSMÁ FÁZE PENETRACE OBCE FVE.....	46
6.3.9 DEVÁTÁ FÁZE PENETRACE OBCE FVE.....	48
6.3.10 DESÁTÁ FÁZE PENETRACE OBCE FVE	50

6.3.11 JEDENÁCTÁ FÁZE PENETRACE OBCE FVE.....	52
6.3.12 DVANÁCTÁ FÁZE PENETRACE OBCE FVE.....	53
6.4 VYHODNOCENÍ POSTUPNÉ PENETRACE OBCE FVE	55
6.5 KOMPLETNÍ INJEKTÁŽ OBCE FVE O STEJNÉM INSTALOVANÉM VÝKONU	58
6.5.1 INJEKTÁŽ ZDROJŮ O VÝKONU 5,5 kWp.....	58
6.5.2 INJEKTÁŽ ZDROJŮ O VÝKONU 10 kWp.....	60
7 NÁVRH ÚPRAV SÍTĚ	62
7.1 ZMĚNY TOPOLOGIE NAPÁJENÍ ODBĚRNÝCH MÍST	62
7.2 KABELIZACE.....	63
7.2.1 ČÁSTEČNÁ KABELIZACE	63
7.2.2 CELKOVÁ KABELIZACE	64
7.3 MŘÍŽOVÁ SÍŤ	64
7.4 VYHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH ÚPRAV SÍTĚ.....	65
8 ANALÝZA HARMONICKÝCH NAPĚTÍ.....	68
9 ZÁVĚR.....	72
POUŽITÁ LITERATURA	74
SEZNAM PŘÍLOH.....	76

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Závislost úrovně napětí na kmitočtu signálu ve veřejné distribuční síti NN a VN</i>	18
<i>Obr. 4-1 Výpočetní program DAISY Bizon Projektant</i>	25
<i>Obr. 4-2 Výpočetní program DNCalc</i>	25
<i>Obr. 5-1 Obec Moravany u Brna</i>	26
<i>Obr. 5-2 Vybraná oblast Moravan u Brna</i>	27
<i>Obr. 5-3 Model stávající distribuční soustavy – odchylky od jmenovitého napětí</i>	28
<i>Obr. 5-4 Model stávající distribuční soustavy dle topologie</i>	29
<i>Obr. 5-5 Model stávající distribuční soustavy – poměrné proudové zatížení</i>	30
<i>Obr. 6-1 Rozlišení budov v obci podle jednotlivých fází dle tabulky 6-1</i>	35
<i>Obr. 6-2 Model DS v první fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí</i>	37
<i>Obr. 6-3 Model DS v první fázi penetrace – poměrné proudové zatížení</i>	37
<i>Obr. 6-4 Model DS ve druhé fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí</i>	38
<i>Obr. 6-5 Model DS ve třetí fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí</i>	39
<i>Obr. 6-6 Model DS ve čtvrté fázi penetrace – rozmístění FVE</i>	40
<i>Obr. 6-7 Model DS ve čtvrté fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí</i>	40
<i>Obr. 6-8 Model DS v páté fázi penetrace – rozmístění FVE</i>	41
<i>Obr. 6-9 Model DS v páté fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí</i>	42
<i>Obr. 6-10 Model DS v šesté fázi penetrace – rozmístění FVE</i>	43
<i>Obr. 6-11 Model DS v šesté fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí</i>	43
<i>Obr. 6-12 Model DS v šesté fázi penetrace – poměrné proudové zatížení</i>	44
<i>Obr. 6-13 Model DS v sedmé fázi penetrace – rozmístění FVE</i>	45
<i>Obr. 6-14 Model DS v sedmé fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí</i>	45
<i>Obr. 6-15 Model DS v sedmé fázi penetrace – poměrné proudové zatížení</i>	46
<i>Obr. 6-16 Model DS v osmé fázi penetrace – rozmístění FVE</i>	47
<i>Obr. 6-17 Model DS v osmé fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí</i>	47
<i>Obr. 6-18 Model DS v osmé fázi penetrace – poměrné proudové zatížení</i>	48
<i>Obr. 6-19 Model DS v deváté fázi penetrace – rozmístění FVE</i>	49
<i>Obr. 6-20 Model DS v deváté fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí</i>	49
<i>Obr. 6-21 Model DS v deváté fázi penetrace – poměrné proudové zatížení</i>	50
<i>Obr. 6-22 Model DS v desáté fázi penetrace – rozmístění FVE</i>	51
<i>Obr. 6-23 Model DS v desáté fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí</i>	51

<i>Obr. 6-24 Model DS v desáté fázi penetrace – poměrné proudové zatížení</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 6-25 Model DS v jedenácté fázi penetrace – rozmístění FVE</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 6-26 Model DS v jedenácté fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 6-27 Model DS ve dvanácté fázi penetrace – rozmístění FVE.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 6-28 Model DS ve dvanácté fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 6-29 Model DS ve dvanácté fázi penetrace – poměrné proudové zatížení</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 6-30 Instalovaný výkon všech FVE v jednotlivých fázích penetrace obce.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 6-31 Napětí na hladině NN v jednotlivých fázích penetrace obce</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 6-32 Napětí na hladině VN v jednotlivých fázích penetrace obce</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 6-33 Odchylky od jmenovitého napětí v modelu DS při injektáži zdrojů o výkonu 5,5 kWp ..</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 6-34 Proudové zatížení v modelu DS při injektáži zdrojů o výkonu 5,5 kWp</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 6-35 Poměry napětí v modelu DS při injektáži zdrojů o výkonu 5,5 kWp při letním odběru</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 6-36 Odchylky od jmenovitého napětí v modelu DS při injektáži zdrojů o výkonu 10 kWp ..</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 6-37 Proudové zatížení v modelu DS při injektáži zdrojů o výkonu 10 kWp</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 7-1 Upravená topologie distribuční soustavy zvolené obce</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 7-2 Plánovaná kabelizace směrem na sever od ulice Hlavní</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 7-3 Napětí na hladině NN v DS obce při úpravě sítě.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 7-4 Instalovaný výkon všech FVE v DS obce umožňující vyvedení maximálního výkonu</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 8-1 Současný stav vybrané sítě namodelované v programu DNCalc</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 8-2 Harmonická napětí v různých místech sítě při stávajícím stavu DS.....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 8-3 Posuzovaná síť s přidanými FVE v programu DNCalc.....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 8-4 Harmonická napětí v různých místech sítě při postupné penetraci obce FVE</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 8-5 Harmonická napětí v různých místech sítě při injektáži zdrojů o výkonu 5,5 kWp</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 8-6 Harmonická napětí v různých místech sítě při injektáži zdrojů o výkonu 10 kWp</i>	<i>71</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Hodnoty harmonických napětí v předávacím místě až do 25. řádu harmonické.....</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 6-1 Jednotlivé fáze penetrace obce FVE.....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 6-2 Porovnání proudového zatížení transformátorů.....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 6-3 Vybrané varianty plošné penetrace FVE.....</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 8-1 Limity pro vybrané řády harmonických napětí.....</i>	<i>68</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

DS	distribuční soustava
ERÚ	Energetický regulační úřad
ES	elektrizační soustava
FV	fotovoltaický
FVE	fotovoltaická elektrárna
HDO	hromadné dálkové ovládání
KZ	kompensace účinníku
LDS	lokální distribuční soustavy
NN	nízké napětí
PDS	provozovatel distribuční soustavy
PPDS	Pravidla provozování distribučních soustav
PS	přenosová soustava
Q	jalové výkony
THD	celkové harmonické zkreslení
VN	vysoké napětí
VVN	velmi vysoké napětí

1 ÚVOD

V dnešní době jsou obnovitelné zdroje energie v rámci investičních projektů v oblasti energetiky na prvním místě. Aktuálně se ve světě neustále řeší změna klimatu, která je kromě jiného způsobována především spotřebou fosilních paliv při výrobě elektřiny. Ty navíc přispívají ke znečištění životního prostředí. Fosilní paliva, jako je např. ve velkém množství využívané uhlí, ropa a zemní plyn, jsou neobnovitelné omezené zdroje. Jednou se jejich množství rapidně sníží, což může vést ke zvyšování cen [7].

Naproti tomu obnovitelné zdroje energie jsou nepřetržitě obnovovány a jsou snadno dostupné po celém světě. Jejich využití při výrobě elektřiny je také šetrné k životnímu prostředí a nepodílí se na globálním oteplování. Obnovitelné zdroje se tak stávají nejnadějnějším prostředkem při poskytování nepřetržité čisté energie pro domácí a komerční spotřebiče. Mezi nejběžnější alternativní zdroje energie patří sluneční, větrná a vodní energie.

Solární fotovoltaika získává stále na popularitě. Dokáže vyrábět elektřinu přímo ze slunečního světla prostřednictvím fotovoltaických systémů. Systém nevytváří škodlivé emise skleníkových plynů a zdrojem energie je Slunce. Nejvýhodnější umístění fotovoltaických panelů je na střeších budov a na volném prostranství, aby docházelo k co největšímu využití slunečních paprsků a k co nejmenšímu zastínění. Fotovoltaický systém může dodávat vyrobenou energii nejen pro vlastní spotřebu, ale také do distribuční sítě.

Při zvyšujícím se podílu dodávané elektrické energie do distribuční sítě z fotovoltaických elektráren (FVE) se výrazně zvyšuje dopad na kvalitu energie v distribuční síti, což by mohlo způsobit kolísání napětí v důsledku variability výroby. Jelikož FVE dodávají energii do rozvodné sítě v závislosti na počasí, čímž vznikají výkyvy v množství energie, mohou také způsobit další problémy, jako je změna napětí, harmonické zkreslení atd. [9].

Tato diplomová práce se zabývá analýzou slabých míst v distribuční síti v obci s vysokým počtem fotovoltaických elektráren. V teoretické části jsou popsána pravidla pro provoz a podmínky pro samotné připojení výroby elektrické energie do elektrizační soustavy. Protože se diplomová práce zabývá tím, jaký vliv mají připojené zdroje na distribuční soustavu, tak byla popsána její charakteristika elektrického napětí a účinek výkonů. Podmínky vyhodnocující zpětné vlivy na síť NN byly popsány v následující kapitole. Praktická část byla vyhotovena za podpory společnosti E.ON. Programy, v nichž byl vypracován model distribuční sítě ve vybrané obci, a teoretické podklady byly poskytnuty touto společností a také samotnými poskytovateli programů.

Vybranou obcí jsou Moravany u Brna, jelikož práce bude navazovat na bakalářskou práci Bc. Martina Štefka na téma Potencionální produkce elektrické energie ze střešních fotovoltaických elektráren v obci do 3000 obyvatel [23]. Byla provedena penetrace obce fotovoltaickými elektrárnami v jednotlivých úrovních a také injektáž zdrojů o stejném výkonu. V této části bylo porovnáváno napětí o jmenovité frekvenci a proudové zatížení vedení a transformátorů v distribuční soustavě obce. V navazující části byly navrženy úpravy sítě, z hlediska vyvedení co nejvyššího výkonu dodávaného fotovoltaickými zdroji. Ze zpětných vlivů byla provedena analýza harmonických napětí ve vybrané části rozvodné sítě obce.

2 PODMÍNKY PRO PŘIPOJENÍ ZDROJŮ DO DISTRIBUČNÍ SÍTĚ

V následující kapitole budou popsána pravidla provozu a podmínky připojení výroben v elektrizační soustavě. Dále také charakteristika elektrického napětí u veřejných distribučních sítí podle stávající normy a problematika jalových výkonů v elektrizační síti.

2.1 Pravidla pro provoz výroben v elektrizační soustavě

Pro všechny výrobce elektřiny připojené k distribuční soustavě (DS) s nízkým napětím (NN), vysokým napětím (VN) nebo velmi vysokým napětím (VVN) je povinností dodržovat požadavky uvedené v Příloze 4 PPDS: Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulacních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy, kde jsou uvedeny např. informace o:

- podrobnosti o přihlašovacím řízení,
- podmínky pro připojení k síti,
- základní údaje ke spínacímu zařízení a ochranám,
- požadavky na chování výroben za normálního provozu a při přechodných dějích,
- zkoušky při uvádění do provozu [5].

2.2 Podmínky připojení zařízení k elektrizační soustavě

Pro připojení zařízení k přenosové soustavě (PS) nebo distribuční soustavě platí následující podmínky pro žadatele:

- žádost o připojení,
- studie připojitelnosti,
- smlouva o připojení mezi žadatelem a provozovatelem elektrizační soustavy nebo smlouva o změně stávající smlouvou o připojení,

kromě případu, kdy nedochází ke změně technických předpokladů připojení při:

- vystřídání držitele licence provozujícího zařízení bez přerušení připojení výroby el. energie k PS a DS,
- úpravě nebo úplného nahrazení výroby elektřiny, kdy nedochází ke změně druhu výroby nebo k navýšení instalovaného výkonu výroby nebo překročení stávající sjednané hodnotě rezervovaného výkonu výroby při dodržení běžných podmínek přenosu a distribuce elektřiny,
- vystřídání oprávněného uživatele využívajícího odběrné elektrické zařízení,
- snížení rezervovaného výkonu nebo příkonu el. zařízení,
- změně zákaznickových identifikačních údajů,
- připojení mikrozdrojů při splnění daných podmínek,

kdy stačí jen smlouva o připojení mezi žadatelem a provozovatelem PS nebo DS. Výrobní elektřiny se může připojit k odběrnému místu zákazníka nebo do předávacího místa jiné výroby.

Pro každé místo připojeného zařízení se zvlášť podává žádost o připojení. Ve smlouvě o připojení může být rezervovaný výkon v místě připojení výroby elektřiny vyjednáán nejvýše na 1,2 násobek instalovaného výkonu veškerých výroben el. energie připojených do uvažovaného místa připojení. Žadatel je povinen podat žádost o připojení před:

- výstavbou nebo připojením nového zařízení nejedná-li se o mikrozdroje,
- změnou charakteru odběru,
- změnou druhu výroby,
- změnou místa připojení k PS nebo DS,
- navýšením instalovaného výkonu výroby,
- navýšením rezervovaného příkonu nebo výkonu el. zařízení,

u výstavby výroben s instalovaným výkonem nad 0,5 MW je k žádosti o připojení nutné dodat harmonogram přípravy výstavby výroby. Žádost o připojení zařízení posuzuje provozovatel PS nebo DS s ohledem na:

- pořadí podaných žádostí,
- závazek připojit přednostně výrobu elektřiny z podporovaného zdroje,
- místo a způsob připojení k elektrizační soustavě,
- hodnotu požadovaného rezervovaného výkonu nebo příkonu,
- hodnotu instalovaného výkonu výroby,
- stanovený limit připojitelného výkonu do PS nebo DS soustavy,
- časový průběh zatížení,
- spolehlivost dodávky elektrické energie,
- charakter zpětného působení připojeného zařízení na elektrizační soustavu,
- chystaný rozvoj soustavy.

Provozovatel elektrizační soustavy může pro patřičné posouzení žádosti o připojení vyzvat žadatele o doplnění údajů v potřebném rozsahu k rozhodnutí o možném připojení elektrického zařízení. Není-li nalezen důvod, pro který by zařízení žadatele nemohlo být připojeno k PS nebo DS, předloží provozovatel elektrizační soustavy do stanovené lhůty návrh smlouvy o připojení. Smlouvu o připojení výroby elektřiny do odběrného místa podává zákazník.

Provozovatel PS nebo DS si může vyžádat do 30 dnů od podání žádosti o připojení od žadatele studii připojitelnosti, když připojované zařízení bude mít při přihlednutí ke všem situacím vliv na provoz PS nebo DS, nebo v případě kdy žádá o připojení k napěťové hladině vysokého napětí a vyšší. Podstatou studie připojitelnosti, kterou musí vymezit rozsahově provozovatel elektrizační soustavy, je posoudit očekávané vlivy způsobené připojením výroby nebo odběrného elektrického zařízení na provoz PS a DS. Nevyžádá-li provozovatel PS nebo DS vypracování studie připojitelnosti, nebo neposkytne-li žadateli podklady nezbytné pro zpracování studie připojitelnosti do 15 dnů od jejich vyžádání, má se za to, že vypracování studie připojitelnosti není třeba.

Zjednodušené připojení mikrozdroje k distribuční soustavě má za podmínku:

- připojení na hladině nízkého napětí,
- naměřená hodnota impedance proudové smyčky v místě připojení k DS není větší než hodnota limitní impedance (0,75 Ω pro zdroje do 10 A a 0,47 Ω pro zdroje do 16 A),

- zamezení dodávky elektřiny do DS v místě připojení mikrozdroje. Výjimkou jsou krátkodobé přetoky elektrické energie do DS (nezvyšující hodnotu napětí v místě připojení a sloužící pro reakci omezujícího zařízení),
- zažádání o uzavření nebo změnu smlouvy o připojení s nulovým rezervovaným výkonem,
- uzavření nebo změnu stávající smlouvy o připojení mikrozdroje mezi žadatelem a provozovatelem DS.

Mikrozdrojem nazýváme zdroje elektrické energie a veškeré zařízení spjaté s výrobou elektřiny, které jsou provozované paralelně s distribuční soustavou NN se jmenovitým střídavým fázovým proudem na fázi do 16 A včetně a maximálním celkovým instalovaným výkonem do 10 kW včetně. Žadatel smlouvy zajistí proměření impedance proudové smyčky v místě připojení mikrozdroje k DS osobou s odbornou způsobilostí podle české technické normy [25].

2.3 Charakteristika elektrického napětí u veřejných distribučních sítí

Pro veřejnou síť NN je normalizované jmenovité fázové napětí 230 V proti zemi se jmenovitým kmitočtem 50 Hz. U veřejných sítí VN (větším než 1 kV až 36 kV včetně) a VVN (větší než 36 kV až 150 kV včetně) je velikost napětí stanovena podle dohodnutého napájecího napětí.

Hlavní rozdíly od jmenovitých hodnot rozdělujeme na spojitě (průběžné) jevy (odchyly od jmenovitých hodnot vyskytující se v průběhu času) a napěťové události (náhlé a závažné odchyly od normálního nebo požadovaného tvaru vlny). Spojité jevy jsou stanoveny mezními hodnoty a jejich příčinou je nejčastěji charakter zatížení – změny, nelinearita. Zatímco pro napěťové události jsou uvedeny v současnosti jen informativní hodnoty a bývají způsobeny vnějšími vlivy (např. počasí, cizí zavinění) nebo neočekávatelnými událostmi (např. poruchy) [2].

2.3.1 Požadavky na kvalitu elektrické energie

Odchylna napájecího napětí u NN a VN za normálních provozních podmínek nesmí přesáhnout $\pm 10\%$ jmenovitého napětí, popř. dohodnutého napětí. Jelikož u sítí VVN mají uživatelé individuální smlouvy a jejich počet je omezen, nejsou tedy stanoveny meze pro odchyly napětí. Je ovšem třeba brát na vědomí předmětové normy pro zařízení VVN.

Střední hodnota kmitočtu základní harmonické, která je měřená za normálních provozních podmínek v intervalu 100 s, musí být v mezích 50 Hz $\pm 1\%$ během 99,5 % roku a 50 Hz + 4 % / -6 % po 100 % času v uspořádání se synchronním připojením k propojenému systému. V uspořádání bez synchronního připojení k propojenému systému (ostrovní napájecí systém) musí být střední hodnota kmitočtu základní harmonické měřená za normálních provozních podmínek v intervalu 10 s v mezích 50 Hz $\pm 2\%$ během 99,5 % týdne a 50 Hz $\pm 15\%$ po 100 % času [2].

2.3.2 Zkušební metody za normálních provozních podmínek

Celkově 95 % průměrných efektivních hodnot napájecího NN během každého týdne musí být v měřicím rozmezí 10 minut $U_n \pm 10 \%$. Veškeré průměrné efektivní hodnoty napájecího NN musí být v měřicím rozmezí 10 minut $U_n + 10 \%$ /- 15 %. V sítích VN je podmínka, že 99 % průměrných efektivních hodnot napájecího VN během každého týdne musí být v měřicím rozmezí 10 minut do hodnoty $U_n \pm 10 \%$. Žádná z průměrných efektivních hodnot napájecího VN nesmí být v měřicím rozmezí 10 minut mimo rozsah $U_n \pm 15 \%$. Při dodávce elektrické energie VVN jsou podle individuální smlouvy stanoveny odchylky napětí s ohledem na předmětové normy pro zařízení VVN.

Rychlé změny napájecího napětí jsou vyvolané především změnami v zatížení u uživatelů, spínacími ději a poruchami v dané síti. Dlouhodobá míra vjemu flikru P_{It} musí být po 95 % času v kterémkoliv týdenním období menší nebo rovno jedné.

V kterémkoliv týdenním období musí být 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot zpětné složky (základní harmonické) napájecího napětí v rozpětí 0 až 2 % sousledné složky. V kterémkoliv týdenním období musí být 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot napětí všech harmonických menší nebo rovny hodnotě uvedené v tabulce 2-1. Pro harmonické vyšších řádů, než je uvedeno v tabulce 2-1, se hodnoty neuvádějí z důvodu obtížného předvídání kvůli rezonančním účinkům a malých hodnot harmonického napětí.

Tab. 2-1 Hodnoty harmonických napětí v předávacím místě až do 25. řádu harmonické [2]

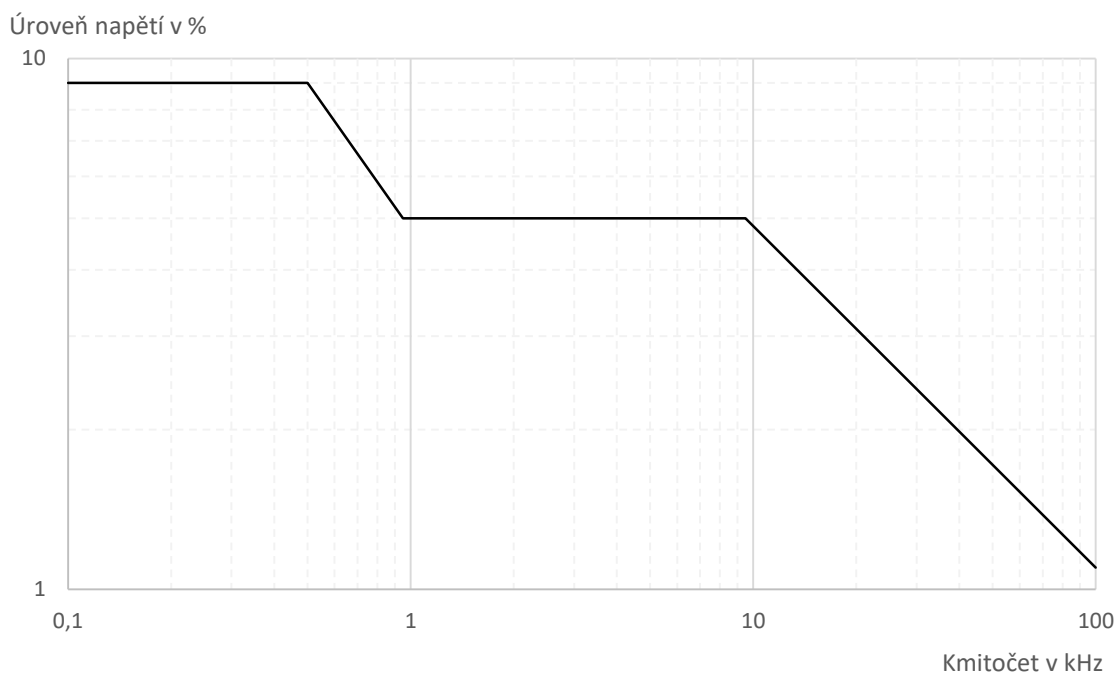
Liché harmonické						Sudé harmonické		
Nenásobky 3			Násobky 3					
Řád harmonické	Harmonické napětí U_h		Řád harmonické	Harmonické napětí U_h		Řád harmonické	Harmonické napětí U_h	
[-]	[%]		[-]	[%]		[-]	[%]	
	NN a VN	VVN		NN a VN	VVN		NN a VN	VVN
5.	6,0	5,0	3.	5,0	3,0	2.	2,0	1,9
7.	5,0	4,0	9.	1,5	1,3	4.	1,0	1,0
11.	3,5	3,0	15.	0,5	0,5	6.-24.	0,5	0,5
13.	3,0	2,5	21.	0,5	0,5			
17.	2,0	-						
19.	1,5	-						
23.	1,5	-						
25.	1,5	-						

Kromě těchto stanovených mezí je pro síť NN a VN stanoveno, že celkový činitel harmonického zkreslení THD napájecího napětí (všechny harmonické do řádu 40) musí být menší nebo roven 8 %. Celkové harmonické zkreslení THD vyjadřuje poměr efektivní hodnoty součtu všech harmonických složek do určitého řádu (v tomto případě řádu 40) k efektivní hodnotě základní složky.

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \left(\frac{Q_h}{Q_1}\right)^2} \quad (2.1)$$

Kde Q_h znázorňuje efektivní hodnotu proudu nebo napětí s řádem harmonické h a Q_1 představuje efektivní hodnotu základní složky [18].

Veřejná distribuční síť bývá také využívána k přenosu informací. Z toho důvodu musí být střední hodnota napětí signálu naměřená v rozmezí 3 sekund v 99 % dne menší nebo rovna hodnotám na obrázku 2-1. V sítích VVN se z důvodu malého (zanedbatelného) rezonančního kmitočtu neuvádí žádné napětí signálů [2].



Obr. 2-1 Závislost úrovně napětí na kmitočtu signálu ve veřejné distribuční síti NN a VN [2]

2.4 Problematika jalových výkonů v sítích ES v ČR

Trvalou součástí užívání přenosové i distribuční sítě jsou jalové výkony (Q) související s vlastními sítěmi (venkovní vedení i kabelové sítě), provozem zdrojů (podpora U/Q) a odběratelů (odebíraný Q). Jalové toky jsou významnou veličinou pro udržení požadovaného napětí v soustavě a při střídavém přenosu elektřiny je nemůžeme eliminovat. Je tedy potřebná jejich koordinace, zvláště v dnešní době, kdy dochází kromě vývoje elektrizačních sítí a jejich kabelizace k postupnému zastavení současných zdrojů a jejich nahrazení řadou menších decentralizovaných zdrojů. Celková bilance jalových výkonů v elektrizační soustavě (ES) je ovlivňována rozsahem sítí (délkou), jejich charakterem (napěťová hladina, venkovní vedení, kabely), prvky v síti (transformátory, kompenzační prostředky, vysílače HDO) a nepochybně též chováním zdrojů a spotřeby. Jalový výkon při provozu PS a DS má největší dopad na:

- pokles přenosové kapacity vedení a kabelů,
- zvýšení ztrát činného výkonu v síti (vlivem řízení jalového výkonu může dojít i ke snížení ztrát),

- působení jalového výkonu do úrovně a řízení napětí (pozitivní – řízení napětí od zdrojů nebo kompenzace, negativní – kolísající, vysoké nebo nízké napětí).

Vedení generuje jalový výkon, když je velká část sítí PS i DS málo zatížená. V distribuční soustavě přibývá kabelů, které jsou zdrojem Q ve většině svého provozního času. Oproti tomu transformátory ve všech napěťových hladinách jalový výkon spotřebovávají, výrazněji však při vyšším zatížení. Mezi napěťovými hladinami sítě toky jalového výkonu velmi kolísají velikostí i směrem. Minimální zatížení elektrizační soustavy nastává v nočním období vánočních svátků a maximální v únoru v pracovní den dopoledne. Přenosová soustava se musí vyrovnávat se stavy, kdy je do ní přenášen výkon z DS až 1000 MVar či naopak odebírán Q do DS o velikosti až 800 MVar. Celková bilance Q v PS, na hladině 110 kV a VN je převážně kladná, což znamená, že sítě dodávají Q, který musí být spotřebován u zdrojů, v kompenzaci nebo přenesen do jiné napěťové hladiny. U napěťové hladiny NN je celková bilance Q trvale záporná (odebírání Q), ovšem vůči ostatním napěťovým hladinám se uplatňuje méně.

V přenosové soustavě jsou v současnosti sítě vybaveny kompenzačními prostředky pro Q. Zatímco v distribučních sítích (s výjimkou rotačního kompenzátoru v Krasíkově) nejsou žádné kompenzační prostředky. V budoucnosti bude ovšem zapotřebí s rozvojem sítí a kabelizací reagovat na tyto vlivy. Nejlepší možností pro odlehčené stavy se jeví snížení nežádoucích Q kompenzací (omezením) buď přímo v DS nebo v předávacím místě PS s DS.

V PPDS nebo normách platí pro zdroje připojované do DS, že jsou součtově provozovány s účinnkem blízkým neutrálnímu. Pro podporu napětí v síti a omezování toků Q nejsou tedy příliš využívány zdroje v DS. Velkoodběratelé na napěťové hladině NN, VN i VVN upravili svůj odběr Q regulačním postupem uvedeným v současně účinném cenovém rozhodnutí Energetického regulačního úřadu (ERÚ). V ČR je podle statistiky ERÚ zaevidováno 786 licencí pro provozování lokální distribuční soustavy (LDS). Na hladině VN a VVN vykazují veškeré LDS velmi dobrý průměrný měsíční účinník.

Hlavními problémy z hlediska řízení Q v ES ČR se řadí:

- pro platby za Q mezi PS a 110 kV nejsou zatím stanoveny žádná pravidla (jsou navržena),
- útlum klasických velkých rotačních zdrojů do PS má za následek snížení zdrojů pro regulaci Q a jejich kapacitu bude nezbytně vhodným způsobem nahradit,
- rozšiřující se decentralizované zdroje v DS nejsou plně používány a motivovány pro podporu U/Q v ES,
- zatím jsou stále rezervy ve sjednocení a využitelnosti měření Q v DS,
- současný systém placení za Q v DS je penalizační (při překročení stanoveného limitu je účtován odstupňovaný procentní příplatek), již se chystá systém rezervační (obdobný jako platí u rezervace činného výkonu),
- jalové výkony jsou vyhodnocovány až za celý měsíc v DS, oproti vyhodnocování činného výkonu po čtvrt hodině, což má za následek u Q snížení a zatažení nevhodného chování při stavech náhlého odlehčení,
- nevybavenost DS (110 kV a VN) kompenzačními prvky pro Q (kromě výjimky v Krasíkově, kde je rotační kompenzátor),
- nepatřičné chování z hlediska dodržení dovoleného účinníku u některých velkoodběratelů,
- na hladině NN je často vysoký (kapacitní) účinník odběrů, odběratelé NN nejsou v současnosti nijak motivováni k udržování účinníku [20].

3 PŘEHLED ZPĚTNÝCH VLIVŮ NA SÍŤ NN

Elektrická rozvodná síť byla navrhovaná a dnes ještě stále ve většině případů provozovaná na jednosměrný tok velkého množství elektrické energie od zdroje ke spotřebitelům elektriny. Tento způsob tzv. pasivní dodávky el. energie plní systém s centralizovanými výrobními. S růstem počtu rozptýlených zdrojů tzv. decentralizovaných zdrojů (především obnovitelných zdrojů) vyvedených do elektrizační soustavy se mění soustava v aktivní, kde se toky výkonů mění. Změny toku výkonů mají vliv na stabilitu sítě, napětí, funkci ochran, bezpečnost atd. [14].

Tyto zpětné vlivy výroben se musí omezit, aby nedocházelo k rušení zařízení odběratelů a provozovaných zařízení provozovatelem distribuční soustavy (PDS). Pouze když je poměr zkratového výkonu sítě ke jmenovitému výkonu kompletního zařízení větší než 500, tak se může výroba bez jakékoliv kontroly zpětných vlivů připojit k síti.

Pro zhodnocení zpětných vlivů je uvažováno při připojení jedné nebo více výroben v jednom společném napájecím bodu dané mezní podmínky. Mezi tyto podmínky patří změna napětí, harmonické proudy a ovlivnění zařízení hromadného dálkového ovládání (HDO) [4].

3.1 Vliv změny napětí

Decentralizované zdroje jsou ve velké míře závislé na měnícím se počasí, což má za následek nestabilní dodávku vyrobené energie do veřejné sítě. Napětí v místě připojení zdroje a s tím související napětí v jednotlivých uzlech dané sítě je ovlivňováno změnou výkonu. Z toho důvodu musí PDS udržovat napětí v požadovaných mezích [24].

Při dodržení mezního napětí, můžeme stanovit dovolenou změnu napětí pro společný napájecí bod (v místě připojení decentralizovaného zdroje):

- v síti NN $\Delta U \leq 3 \% U_n$,
- v síti VN a 110 kV $\Delta U \leq 2 \% U_n$.

Měnicí se napětí způsobuje také tzv. flickr, což je pocit nestabilního zrakového vnímání zapříčiněný světelným podnětem, jehož spektrální rozložení nebo jas kolísá v čase. Při posuzování jedné či více výroben v jednom předávacím bodě NN nebo VN je nutné dodržet:

$$P_{lt} \leq 0,46.$$

Ve společném výstupním bodě 110 kV je mezní hodnota:

$$P_{lt} \leq 0,37.$$

Pomocí činitele flickru c , který je dán buď výrobcem zařízení nebo nezávislým institutem, lze určit dlouhodobou míru flickru zařízení:

$$P_{lt} = c \cdot \frac{S_{nE}}{S_{kV}} \quad (-; -, VA, VA), \quad (3.1)$$

kde S_{nE} je jmenovitý výkon zařízení, S_{kV} je zkratový výkon sítě. Když dle předešlé rovnice vyjde výsledek větší než 0,46, tak lze do výpočtu zahrnout fázové úhly (ψ_{kV} – fázový úhel zkratové impedance sítě, φ_i – fázový úhel proudu generátoru):

$$P_{lt} = c \cdot \frac{S_{nE}}{S_{kV}} \cdot |\cos(\psi_{kV} - \varphi_i)| \quad (-; -, VA, VA, ^\circ, ^\circ) \quad (3.2)$$

Fázový úhel φ_i se vypočítá za pomoci přesně změřené velikosti kolísání činného výkonu ΔP a kolísání jalového výkonu ΔQ vlastní výrobnu.

$$\varphi_i = \arctan \frac{\Delta Q}{\Delta P} \quad (^\circ; VA_r, W) \quad (3.3)$$

U výroby s více než jedním zařízením se musí výpočet provést pro každý modul zvlášť a výslednou hodnotu pro flickr ve společném napájecím bodě stanovit podle následující rovnice:

$$P_{ltres} = \sqrt{\sum_i P_{lti}^2} \quad (-; -). \quad (3.4)$$

U výroby s n stejnými zařízeními lze pro zjednodušení použít vzorec:

$$P_{ltres} = \sqrt{n} \cdot P_{lt} \quad (-; -, -) [4]. \quad (3.5)$$

3.2 Harmonické proudy

U přístrojů se střídači a měniči frekvence vznikají velmi často harmonické proudy, o kterých musí výrobce informovat (např. zprávou o typové zkoušce).

Dovolené velikosti harmonických proudů u zařízení se střídači, kde se využívá šestipulzního usměrňovače s induktivním vyhlazením bez zvláštních opatření pro snížení vyšších harmonických (jedná se tedy o jednoduché trojfázové můstkové zapojení), nebudou překročeny. Je ovšem nutno dodržení podmínky:

$$\frac{S_{rA}}{S_{kV}} < \frac{1}{120}.$$

Pokud součet jmenovitých výkonů zařízení S_{rA} splňuje následující podmínku:

$$\frac{\sum S_{rA}}{S_{kV}} < \frac{1}{60},$$

není nutné očekávat rušivé harmonické při provozu výroben elektřiny v sítích s nízkým až průměrným zatížením harmonickými.

Výroby v síti NN vyhovující požadavkům velikosti emise harmonických proudů podle ČSN EN 61000-3-2 Ed. 2, resp. ČSN EN 61000-3-12 Ed. 2, je možno považovat za přípustné svým vlivem emitovaných harmonických proudů na síť DS. Jestliže meze v těchto normách nejsou splněny, lze pro posouzení připojitelnosti bez přidání opatření aplikovat následující kritérium:

$$I_{vnn} = i_v \cdot \frac{S_{kV}}{\sin \psi_{kV}} \quad (A; A, VA, ^\circ), \quad (3.6)$$

kde i_v je přípustný vztažný proud.

Zemnění uzlu v třífázové soustavě má za následek, že proudy třetí harmonické a jejich násobků jsou ve všech fázových vodičích směrově stejné, tudíž se v uzlu sčítají (tzv. nulový systém). Středním vodičem tedy tečou trojnásobky harmonických proudů. Zatímco v izolovaném uzlu se třetí harmonická proudů nevyskytuje [4].

3.3 Ovlivnění zařízení HDO

Výrobní a zařízení pro kompenzaci účinníku (KZ) jsou nejčastějšími ovlivňujícími prvky pro zařízení hromadného dálkového ovládání. Jsou provozovány většinou s frekvencí v rozsahu 183,3 Hz až 283,3 Hz. Místně využívanou frekvenci HDO zjistíme u PDS. Úroveň vysílání je běžně v rozmezí 1,6 % až 2,5 % U_n .

Vysílač HDO je ovlivňován přídatným zatížením výrobní nebo KZ, vyplývající z:

- impedance vlastního zařízení (výrobní, KZ),
- zvýšeného zatížení sítě.

Pokud je vliv výrobní (případně KZ) na zatížení příslušného vysílače HDO blízký maximu zatížení sítě, které poskytne PDS, tak je připojení bez příslušných opatření nepřijatelné. Jestliže tomu tak není, je následující zvýšení zatížení vysílače přípustné:

- do 2 A u vysílače HDO do VN,
- do 5 A u vysílače HDO do 110 kV.

Úroveň signálu HDO může být výrobní nebo KZ snížena maximálně o 5 % za předpokladu, že bude zachována hodnota minimální přípustné úrovně signálu vysílače HDO. Pro frekvence 183 až 283,3 Hz platí nadcházející minimální úrovně signálu HDO:

- 150 % U_f u NN,
- 190 % U_f u VN,
- 200 % U_f do 110 kV,

kde U_f je náběhové napětí přijímače, které se obvykle pohybuje od 0,8 % do 0,9 % U_n [4].

3.4 Vliv velkého počtu fotovoltaických elektráren na DS

Následující text popisuje studii od autorů Jindřicha Stuchlého a Jakuba Vramby. Tato práce nese název: Analyses of power quality and voltage variation of photovoltaic power plant connected into 22 kV public grid.

Skupina instalovaných fotovoltaických elektráren může ovlivnit stabilitu distribuční soustavy. Změny napětí v místě připojení této skupiny jsou zapříčiněny kvůli dynamické proměnlivosti toku energie z těchto obnovitelných (často nepravidelných) dodávek energie od zdrojů. Tato změna napětí může mít široký dopad na stabilitu a spolehlivost DS v místě připojení. Distribuční síť může být tedy ovlivněna regulací napětí v místě připojení FV zdrojů, přetečením energie na vyšší úroveň napětí (přechodový systém) a dokonce i výpadkem proudu v ovlivněné části sítě.

Jednou z možných metod, jak eliminovat provoz FV s kapacitním účinníkem, je instalace kompenzačního a dekompenzačního systému. Instalace velkokapacitního úložiště je vhodným řešením v sítích vysokého napětí. Jestliže FV pracuje na své maximální instalované energetické

kapacitě, tak bude maximální energie dodávaná do veřejné sítě redukována, aby se zaoprátilo splnění limitu napětí a přebytečná část generované energie se akumulovala.

Tento řídicí systém zabraňuje rychlým změnám toku energie z elektrárny do distribuční soustavy, přetečení energie do sítí s vyšším napětím a eliminuje kolísání napětí v místě připojení. Spolu s tímto řídicím systémem se jeví jako vhodné řešení pro přestavbu veřejné sítě na inteligentní. Pro použití tohoto velkokapacitního paměťového zařízení lze předvídat a částečně řídit energii vyrobenou z fotovoltaických elektráren [22].

4 METODY A POSTUPY ŘEŠENÍ

Ve čtvrté kapitole této diplomové práce jsou definovány výpočetní programy, které budou použity v praktické části.

4.1 Výpočetní program DAISY Bizon Projektant

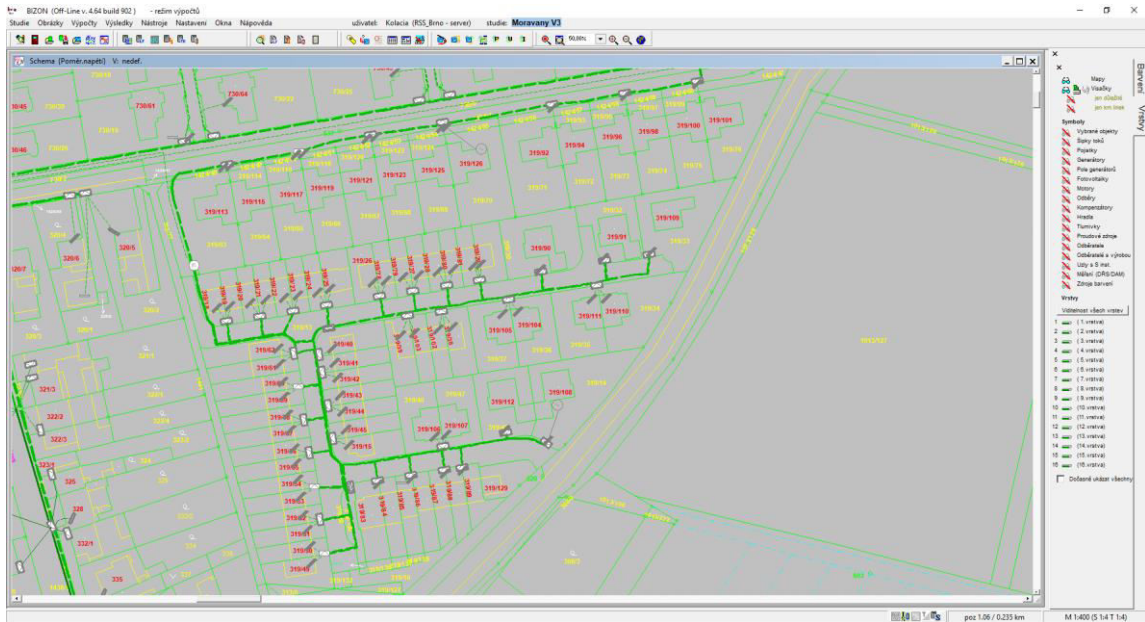
Software DAISY Bizon Projektant je výpočetní program pro rozvodné elektroenergetické sítě všech napěťových hladin (NN, VN, VVN). Uživatelské rozhraní tohoto programu je založeno na grafickém pohledu na data. Vstupní data zadáváme v obrázcích a pomocných tabulkových rámečcích, podobně jako u tabulkových kalkulátorů.

Tento software zahrnuje obsáhlý systém kontrol hrubých chyb v projektovaných údajích. Automaticky dohlíží na dodržení mezí v počítaných hodnotách daných veličin (např. předepsaná pásma napětí, přetížení nebo naopak nevyužití transformátorů a vedení, vypínací proudy u jističích prvků). U výpočtu nastavení ochran a jištění pojistkami a jističi poskytuje podporu. Umí vypočítat symetrické, nesymetrické nebo vícenásobné poruchy (přerušení fází, zkratů). Dále také umožňuje nalezení míst se slabou vazbou (podklad rozpojovacích míst v síti), výpočty kapacitních proudů a také výpočtení ztrát na vedení.

Vytvoření nové sítě nebo předělání již existující studie je snadné díky v podstatě neomezenému rozsahu a druhu počítaných sítí (tisíce uzlů a větví, paprskové, kruhové nebo mřížové, NN, VN a VVN sítě), práci s podkladovými mapami ve formátech CIT, DGN, DXF a BMP v přesně určeném měřítku pro přesný náčrt sítě nad těmito vloženými mapami. Za pomoci podkladových map je program schopen odečíst zakreslenou délku ve zvoleném měřítku (reálných souřadnic). Námahu při zadávání jednotlivých dat nám značně usnadňuje automatické označování vkládaných prvků, užívání typových tabulek, kopírování bloků aj.

Nejpodstatnější funkce mají přiřazeny i zkratkové klávesy tzv. hot keys. Pro přehlednost je zde možnost nastavování probarvení sítě podle topologie, rozložení napětí v síti, typu a zatížení vedení nebo kabelů a dalších druhů probarvení podle našich potřeb.

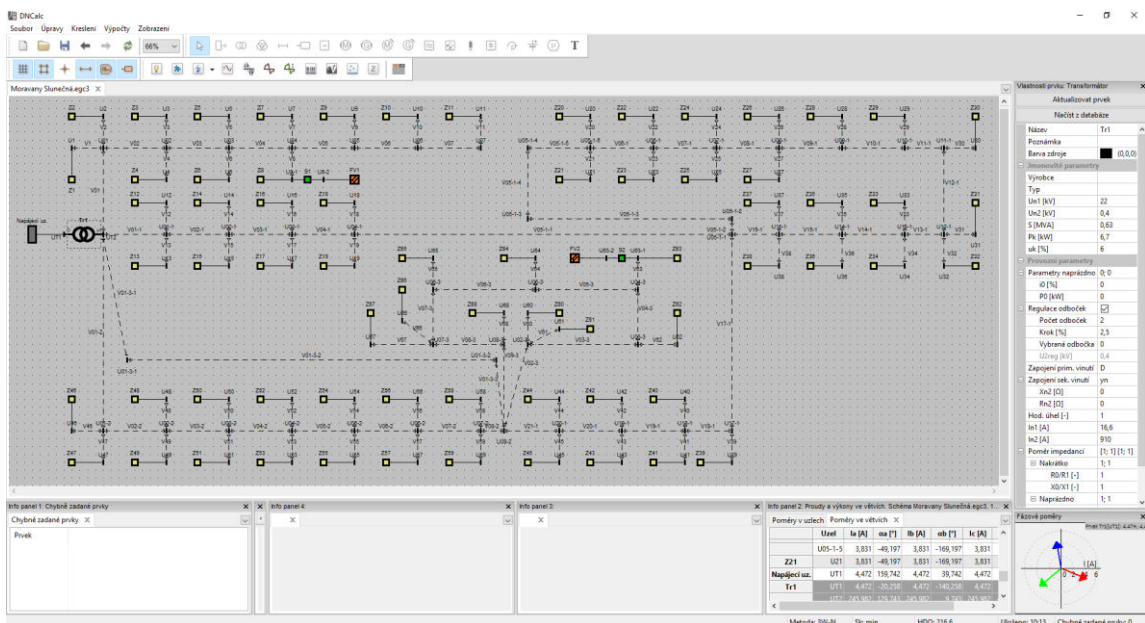
Výsledky výpočtu a veškeré zadané údaje je možné přehledně zobrazit ve schématech, tabulkách a protokolech pro tisk. Výsledné hodnoty jsou počítány bez jakýchkoliv zjednodušení výpočetní metody (především při výpočtech okrajových situací na hranici technických možností sítě), které by mohlo způsobit zavádějící výsledek [3].



Obr. 4-1 Výpočetní program DAISY Bizon Projektant

4.2 DNCalc: analýza poměrů v DS

Pro výpočet zpětných vlivů bude využit program DNCalc od společnosti EGC – EnerGoConsult ČB s.r.o. vycházející z ověřeného výpočetního programu E-Vlivy 3.0. Program DNCalc umožňuje souhrnnou analýzu obsáhlých, zauzlených a paralelně provozovaných sítí NN, VN a VVN. Pro tvorbu a správu schématu elektrických sítí umožňuje program široké spektrum prostředků a výpočetních analýz pro chod sítě, poruchové stavy a ztráty činného a jalového výkonu. Součástí je i funkce pro posouzení připojení zdrojů a odběrů s distribuční sítí v souladu s požadavky účinné legislativy. Výpočet kvality elektrické energie je zaměřen na celkové pokrytí analýz týkajících se posouzení zpětných vlivů odběrů a zdrojů [6].



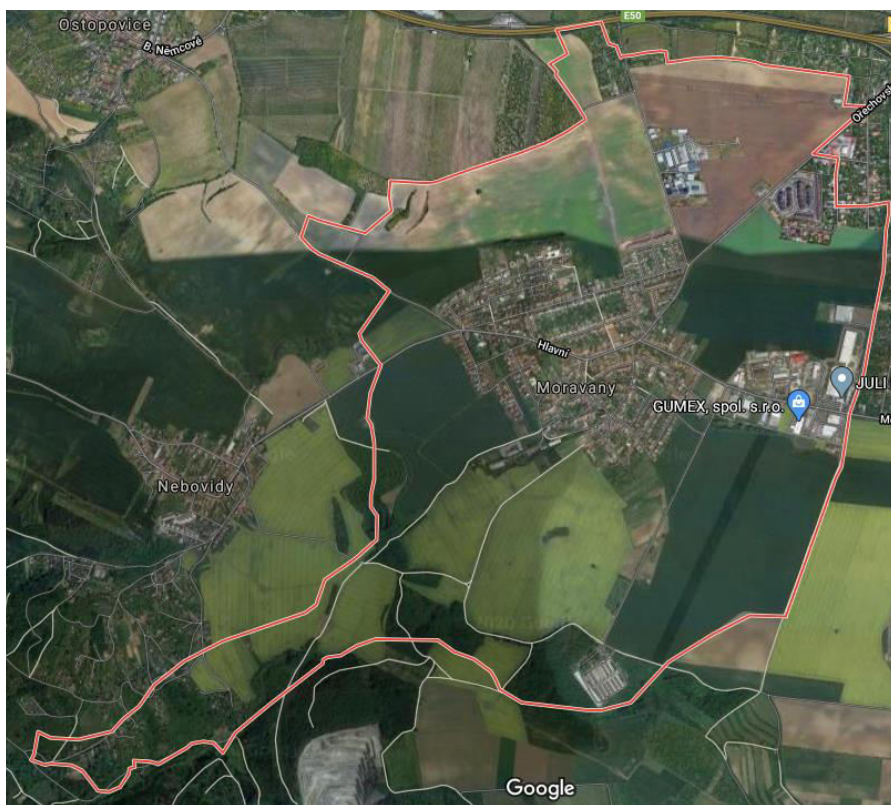
Obr. 4-2 Výpočetní program DNCalc

5 STRUKTURA A STAV STÁVAJÍCÍ SÍTĚ NN A VN

Následující kapitola zkoumá vliv velkého počtu připojených fotovoltaických elektráren do distribuční soustavy, především z hlediska slabých míst v elektrizační soustavě a také zpětných vlivů v síti nízkého napětí.

5.1 Popis vybraného území

Pro analýzu byla zvolena obec Moravany u Brna, poněvadž tato práce navazuje na bakalářskou práci Bc. Martina Štefka na téma Potencionální produkce elektrické energie ze střešních fotovoltaických elektráren v obci do 3000 obyvatel [15]. Obec se nachází v Jihomoravském kraji 7 km jihozápadně od Brna s nadmořskou výškou od 230 do 338 m nad mořem. Žije zde přibližně 3 000 obyvatel převážně v rodinných domech se sedlovou střechou [29]. Na obrázku 5-1 je červeně zvýrazněna hranice celé obce.



Obr. 5-1 Obec Moravany u Brna [13]

Na následujícím obrázku 5-2 je zobrazeno vybrané území obce pro tuto práci, které je zvýrazněno modrou barvou. Přílehlé části obce, které navíc zkoumal ve své práci pan Štefek (oranžově zvýrazněno), nebyly uvažovány, jelikož by namodelování elektrizační soustavy bylo velmi obtížné a pro účely práce nepodstatné. Na mapě je také červeně zvýrazněna ulice Hlavní.



Obr. 5-2 Vybraná oblast Moravan u Brna [23]

5.2 Současná struktura a stav stávající rozvodné elektrické sítě

Protože je tato práce zaměřena na nalezení úzkých míst ve stávající distribuční síti s ohledem na omezení vyvedení výkonu a zpětných vlivů, bere se v úvahu distribuční síť až po úroveň 22 kV. Stáří sítě NN je v rozmezí od roku 1980 až po současnost. Plánují se obnovy všech venkovních vedení (do kabelů) na sever od ulice Hlavní. Zbylé venkovní vedení bude následovat později. V obci Moravany u Brna je použito na hladině napětí 400 V pro rozvod elektřiny 32 866 m kabelového vedení typu:

- AYKY 4x10, 4x16, 4x25, 4x35, 4x70, 4x120, 3x120+70, 3x185+95, 3x240+120,
- AYKYz 4x16, 4x25,
- 1-NAYY-J 4x16, 4x25, 4x150, 4x240,
- CYKY 4x10, 4x16, 4x35, 3x95+70,
- AES 4x16, 4x25, 4x35, 4x50, 4x120,
- NFA2X 4x16, 4x25, 4x50, 4x120,

dále je také použito 4 550 m venkovního vedení typu:

- AlFe 4x25, 4x50, 3x50+35, 4x70, 3x70+50.

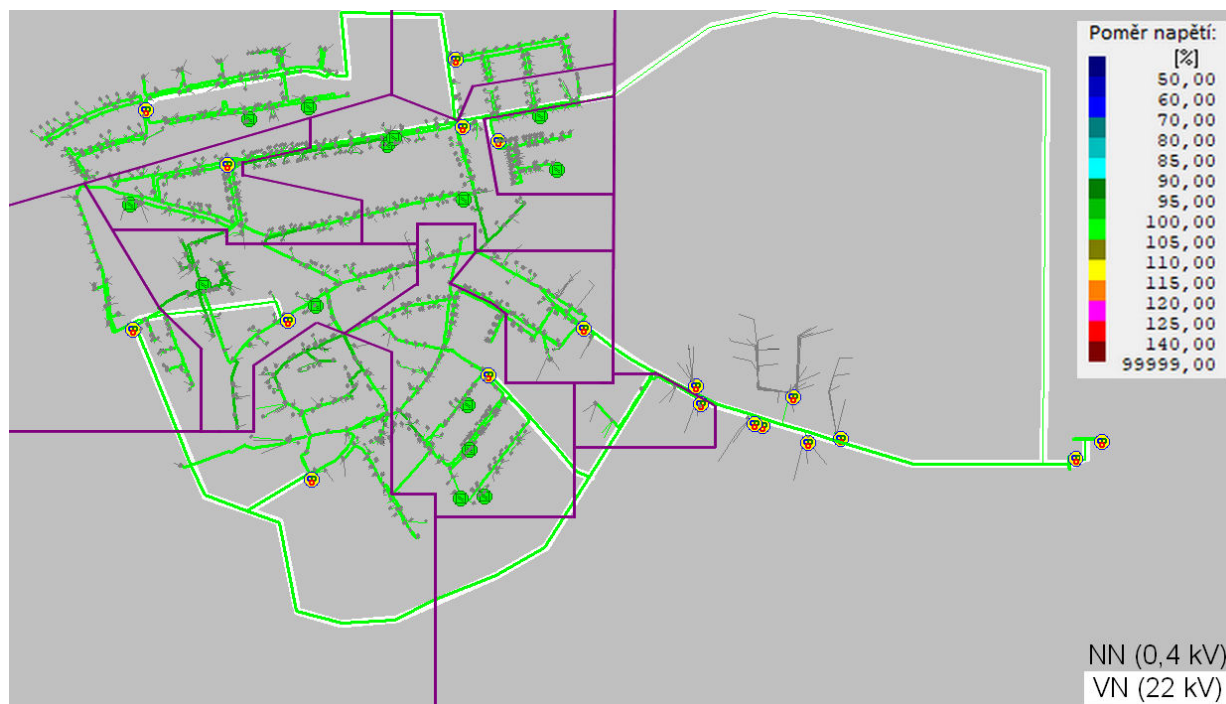
Na hladině napětí 22 kV je v obci použito 1 143 m kabelového vedení typu:

- AXEKCEY 70, 120, 240,
- NA2XS(F)2Y 240/25,

ovšem nejvíce je použito venkovní vedení typu:

- AlFe 35, 42/7, 70,
- AlFe6 35,
- SAX – izol. 50,

o celkové délce 6 369 m [10].



Obr. 5-3 Model stávající distribuční soustavy – odchylky od jmenovitého napětí

Na obrázku 5-3, který je uveden výše, je vyznačena rozvodná síť, přičemž bíle podbarvené vedení značí hladinu napětí 22 kV a šedě podbarvené vedení (bez bílého podbarvení) hladinu 400 V. Fialové linie na obrázku značí hranice sítě NN, která je napájena z jedné trafostanice. Napětí na hladině 22 kV je udržováno v DS na vyšší hodnotě, než je jmenovitá hodnota napětí, z toho důvodu bylo v této práci zvoleno udržované napětí 23,1 kV [10]. Hlavní příčinou je dodržení napěťových poměrů na konci dlouhých vývodů. Dalším důvodem provozu při vyšším napětí jsou například výrazně nižší ztráty ve vodičích. Při přenosu stejného výkonu se zvýšením napětí sníží proud, ale velikost ztrát klesá s druhou mocninou proudu [26]. Tato hodnota udržovaného napětí byla zadána i do výpočetního programu, aby výsledky odpovídaly co nejpřesněji hodnotám ve skutečnosti. Tento model byl vytvořen v programu DAISY Bizon Projektant. Ve výpočetním programu je poměr napětí počítán vzhledem k jmenovitým hodnotám 400 V a 22 kV. Výsledek v procentech (podbarvení vedení) je tedy zavádějící vzhledem k udržovanému napětí 23,1 kV.

Pro snížení napětí VN na NN je použito v distribuční síti na vymezeném území sedmáct dvouviňutových transformátorů. Z toho je sedm o jmenovitém výkonu 630 kVA, čtyři o jmenovitém výkonu 400 kVA, čtyři o jmenovitém výkonu 100 kVA, dva o jmenovitém výkonu 250 kVA a zbylý jeden transformátor o jmenovitém výkonu 160 kVA. Síť NN je tedy na mapě rozdělena fialovou barvou do oblastí, přičemž každá je napájena jednou trafostanicí.

V obci je síť NN navržena jako okružní, jednotlivé paprsky nebo polosmyčky jsou uspořádány tak, aby se daly sepnout do uzavřených smyček. V obvyklém provozním stavu se tedy jedná o síť paprskovou, kdy vedení vychází z jednoho napájecího místa (transformovny nebo spínací stanice) a zásobují jednotlivé odběry. Vývody (paprsky) jsou vedeny z napájecího místa samostatně a nelze je spojovat. Při poruše v okružní síti je výhodou snadné přepnutí postiženého obvodu na vývod sousední [10]. Na obrázku 5-4 jsou přehledněji (oproti předchozímu obrázku) barevně odlišeny jednotlivé sítě NN napájené z jedné transformovny. Tento model byl také zhotoven v programu DAISY Bizon Projektant.



Obr. 5-4 Model stávající distribuční soustavy dle topologie

Do soustavy na hladině nízkého napětí je momentálně připojeno patnáct fotovoltaických elektráren (FVE), které jsou umístěné na střeších budov a jsou držiteli licencí udělených Energetickým regulačním úřadem. Největší z nich mají celkový instalovaný výkon 20 kWp, 19 kWp a 12 kWp. Ostatních dvanáct FVE s celkovým instalovaným výkonem pod 10 kWp má celkový instalovaný výkon dohromady 65 kWp. Všechny FVE mají dohromady instalovaný výkon 116 kWp [8].

Odběr elektrické energie se u jednotlivých odběratelů stále mění a celková spotřeba elektřiny v obci je v letních měsících jiná než v zimních, což má vliv na parametry sítě. Odběry byly zadány typem proudového jističe a koeficientem soudobosti. Důležité pro diplomovou práci bude stav, kdy je odebírán maximální výkon (zimní období) a minimální výkon (letní období). Pro zkoumanou obec je maximální zimní odběr 3 105,7 kW (1 020,8 kVAr) a minimální letní odběr 1 962,9 kW (645,2 kVAr). Pro tyto dva mezní stavy spotřeby elektrické energie byl proveden výpočet ustáleného chodu sítě [10] [23].

Pro zimní neboli maximální odběr obce vyšly celkové ztráty ve vedení 53,9 kW. Ztráty transformátorů jsou rovny 27,3 kW, z čehož je ztrát ve vinutí 16,0 kW a naprázdno 11,3 kW. Zatímco při letním neboli minimálním odběru vyšly celkové ztráty ve vedení 20,1 kW. Ztráty transformátorů jsou rovny 17,4 kW, z čehož je ztrát ve vinutí 6,1 kW a naprázdno zůstaly stejné 11,3 kW. Celková bilance a zatížení elektrizační soustavy bylo vypočítáno programem DAISY Bizon Projektant a je uvedeno v tabulce 5-1.

Tab. 5-1 Celková bilance výkonů

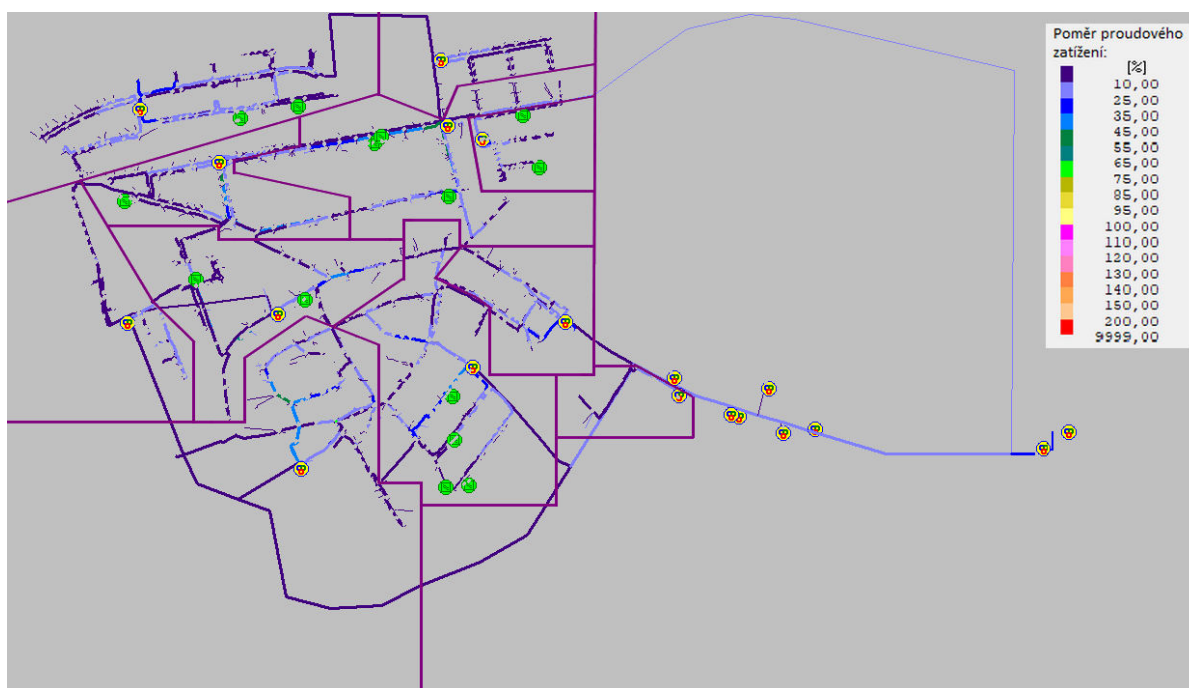
roční období	Činný výkon [kW]			Jalový výkon [kVAr]		
	Dodávka	Odběr	Ztráty	Dodávka	Odběr	Ztráty
zima	3186,9	3105,7	81,2	1188,4	1020,8	167,6
léto	2000,4	1962,9	37,5	744,7	645,2	99,5

Na obrázku 5-3 je model stávající distribuční soustavy v obci, kde lze pomocí barvy vedení pozorovat místa s větším rozdílem od jmenovité hodnoty napětí při daném zimním odběru. V letních obdobích, kdy je v současné době menší spotřeba, je síť méně zatížená a napětí nedosahuje takových odchylek od jmenovitého napětí jako v zimě. V následující tabulce jsou uvedeny počty uzlů, minimální, maximální a průměrná hodnota vypočítaného napětí v uzlech v konkrétní napěťové hladině.

Tab. 5-2 Uzlová napětí

roční období	U_n	$n_{uzlů}$	U_{min}		U_{max}		$U_{prům}$	
	[V]	[-]	[V]	[%]	[V]	[%]	[V]	[%]
zima	23 100	31	23 019	99,6	23 082	99,9	23 048	99,8
	400	1 743	384	95,9	418	104,5	406	101,5
léto	23 100	31	23 050	99,8	23 089	100,0	23 068	99,9
	400	1 743	398	99,5	419	104,7	411	102,8

Proudové zatížení nepřesahuje 65 % z maximálního proudového zatížení vedení a transformátorů. Tuto hodnotu nepřesahuje v létě, ale také ani v zimě, kdy je větší proudové zatížení v DS, jak lze vidět na obrázku 5-5.



Obr. 5-5 Model stávající distribuční soustavy – poměrné proudové zatížení

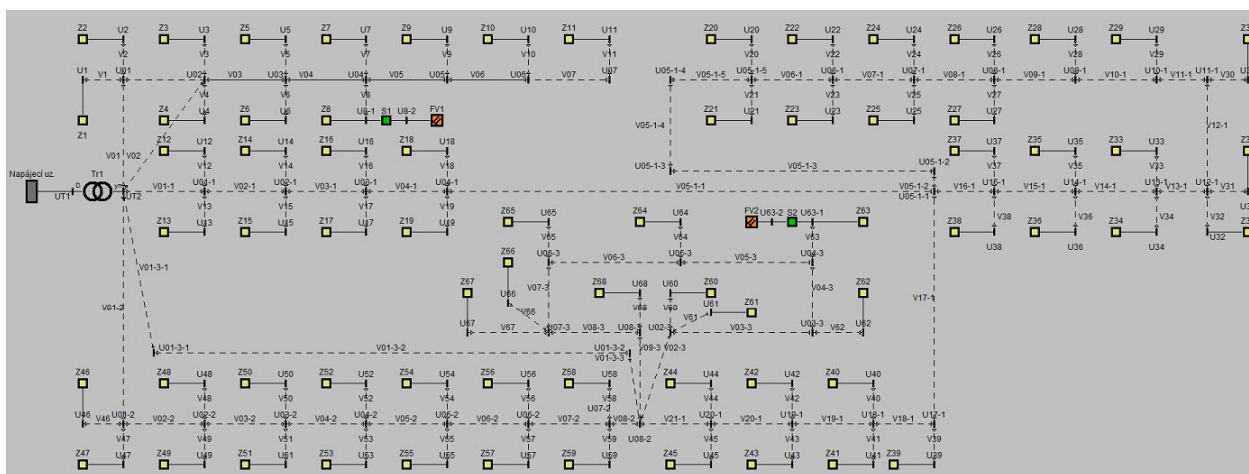
Namodelovaná síť v programu DAISY Bizon Projektant neuvažuje to, že kromě Moravan u Brna je z přívodního vedení 22 kV napájeno několik dalších obcí. Z hlediska dodávky elektrické energie jsou Moravany blízko od napájecí transformovny 110/22 kV. Také byl pro zjednodušení modelu sítě obce uvažován pouze jeden hlavní přívod VN. Ve skutečnosti je na druhém konci obce druhý přívod vedení 22 kV napájený z jiné transformovny 110/22 kV.

V programu DNCalc byl vytvořen model elektrizační sítě napájený z transformovny Moravany Slunečná. Síť je tvořena transformátorem o jmenovitém výkonu 630 kVA, kabely NAYY-J 4x150 a AYKY 4x16. K veřejné síti jsou připojeny také dvě FVE o instalovaném výkonu 5 kWp.



Obr. 5-5 Vybraná oblast pro namodelování v programu DNCalc

Namodelovaná síť v programu DNCalc je uvedena na obrázku 5-5. Pro ověření správného výpočtu byla provedena kontrola, že napětí v jednotlivých uzlech je stejné jako ve výpočetním programu DAISY Bizon Projektant. Po ověření, že se vypočtená napětí shodují, byly zkontrolovány poměry proudu a ztráty ve větvích vedení. Celkové ztráty ve vedení a transformátoru při zimním spotřebě vyšly 1,798 kW a 3,216 kVAr, z čehož samotné ztráty ve vedení činí 1,321 kW a 0,492 kVAr.



Obr. 5-6 Část stávající distribuční soustavy ověřované v programu DNCalc

6 PENETRACE FVE

Počet FVE instalovaných na střechách budov v České republice se neustále zvyšuje, přičemž největší rozmach FVE nastal v roce 2010, kdy počet vzrostl na více jak dvojnásobek. K roku 2019 je v ČR instalováno 28 554 FVE (o výkonu 2 127,54 MWp), přičemž za posledních 5 let se počet zvýšil o 427 FVE. Kdyby se nárůst FVE jako v roce 2010 měl znovu opakovat (jelikož politika ČR a EU směřuje k decentrální energetice a rozvoj těch-to zdrojů je očekáván), mohlo by to mít nepříznivý dopad na stávající rozvodnou elektrizační síť, která je stavěna na jednosměrný tok elektrické energie [1] [8]. Následující článek se bude zabývat modelovou situací, jak by v budoucnu mohl probíhat rozvoj z hlediska osazování budov FVE v obci, přičemž injektáž zdrojů do různých míst v obci by měla mít vliv na chování elektrizační sítě.

6.1 Analýza možností penetrace FVE

Hlavní vliv na penetraci FVE má především nastavení státních podpor. Stanovení podpor v roce 2008 pomocí vysokých pevných výkupních cen a následného poklesu nákladů na FVE v letech 2009 a 2010 znamenalo nekontrolovatelný nárůst počtu instalovaných FVE. Tento velmi rychlý nárůst byl zpomalen opatřením Energetického regulačního úřadu pomocí solární daně a téměř zastaven změnou v podpoře obnovitelných zdrojů v roce 2014. V letech 2014 a 2015 se v České republice instaloval pouze nízký počet FVE v řádu jednotek MW celkového instalovaného výkonu.

Znovu nastartovat pomalý kontrolovatelný růst FVE se povedlo až v roce 2016 díky novým dotacím programu zvaném Nová zelená úsporám. Za rok 2019 přibylo v Česku 142 FVE, které již ovšem nesmějí vznikat na polích jako dříve, tudíž se instalují především na střechy budov [1] [8] [19]. Podpora decentralizované výroby je stále aktuální v podobě dotačních programů s názvem Operační program podnikání a inovace pro konkurenceschopnost (OPPIK), kdy odběratel dostane část investičních nákladů na výrobu zpět (při splnění podmínky primární spotřeby vlastní vyrobené elektřiny spotřebovat ve svém odběrném místě) [17].

Existuje scénář nárůstu instalovaného výkonu v Národním akčním plánu (NAP SSG), ale pro řešení této práce není roční nárůst stěžejní. Práce se zabývá především využitelností budov pro FVE a jejich následnou instalací v určených bodech sítě NN [7].

Mezi hlavní scénáře podle podpory od státu můžeme řadit tři základní:

1. bez vlivu vlády – bez státní podpory,
2. rozsáhlá podpora firem
3. rozsáhlá podpora domácností.

První scénář by znamenal minimální (téměř žádný) zájem o FVE z hlediska domácností, jelikož by návratnost nebyla žádná nebo po velmi dlouhé době, která by z pohledu životnosti nebyla zcela jistá. Cena pro domácnosti, které by instalovaly malé FVE do 30 kWp, by byla bez dotací od státu příliš vysoká a nevýhodná. Jediný, kdo by si mohl dovolit stavět FVE bez jakékoliv podpory, by byly firmy s obrovskými výrobními budovami tzv. průmyslové parky. Tyto společnosti by pak instalovaly FVE ve stovkách kWp. Jednalo by se o velké počáteční investice, které by si mohl dovolit jen velmi nízký počet domácností [27].

Druhá varianta by podpořila a zrychlila nárůst FVE na střechách průmyslových a zemědělských budov. Výhodou by bylo, že vyrobená elektrická energie by byla přímo předávána do vyšší napěťové hladiny než s nízkým napětím.

Třetí možnost týkající se podpory domácností můžeme rozdělit na dvě další varianty:

- a) široká podpora domácností (zvýšení výkupní ceny za elektřinu),
- b) specifická podpora – rozšíření programu Nová zelená úsporám.

Při široké podpoře domácností by vzrostl počet FVE především u movitějších domácností, které by si mohly dovolit prvotní investici. Ovšem mohl by poté nastat případ jako v roce 2010 a nekontrolovatelně by vzrostl počet FVE a výkupní cena elektřiny by pro chudší domácnosti bez FVE mohla nepříznivě vzrůst. Nevýhodou specifické podpory, která spočívá v prvotní investiční dotaci, je pomalý nárůst instalovaných FVE. Je určena především pro domácnosti, které chtějí ušetřit, ale jsou schopni prvotní investice s návratností okolo 10 let. U bytových domů je situace komplikovanější, jelikož domluva s více vlastníky je hlavní problém při instalaci FVE na střeše. Příznivější je, když byty vlastní jeden majitel, který o všem rozhoduje, a záleží pouze na něm, zda investuje do FVE. Zisk z vyrobené elektrické energie se poté nemusí přerozdělovat [16].

Budovy, které ve vybrané obci Moravany u Brna mají již instalovanou FVE, jsou především středně movité, velmi movité domácnosti a jedna menší průmyslová budova. Což odpovídá tomu, že tři FVE byly instalovány v době pevné vysoké výkupní ceny na movitějších budovách a zbylé FVE byly instalovány buď za stejným účelem, nebo především za důvodem ušetření elektrické energie s prvotní investiční podporou od státu.

Z hlediska velikosti napětí v elektrizační síti, do níž je instalována FVE, je těžké určit vhodné místo pro instalaci. Jak bylo vyzkoušeno na modelovém schématu obce v programu DAISY Bizon Projektant, umístěním FVE do jednoho nejméně vhodného místa může mít příznivý vliv na dané místo, ale nepříznivý účinek na jiná místa v elektrizační síti. Je tedy velmi obtížné podle tohoto hlediska umisťovat zdroje do dobře vybudovaných elektrizačních rozvodných sítí.

Další variantou úvahy je možné využití střechy při použití:

- fotovoltaických panelů,
- fotovoltaických tašek,
- fotovoltaických panelů a tašek.

Podle toho se odvíjí maximální instalovaný výkon, který lze při maximálním využití střechy budovy získat. Pokud je střecha rovná nebo šikmá a bez jakýchkoliv výklenků a záhybů, je zcela nejlepší i nejlevnější použít fotovoltaické panely. Při šikmé členité střeše s výklenky je možné z hlediska maximálního využití střechy i případných stínů od výklenků a přehybů použít fotovoltaické tašky či případnou kombinaci s panely.

S tím souvisí to, z jakých světových stran instalujeme fotovoltaické panely nebo tašky. Nejvíce výhodná bude strana jižní, na kterou dopadá nejvíce slunečního záření. Strana západní nebo východní bude pokryta fotovoltaikou podle potřeb uživatele FVE, kdy vyžaduje největší výrobu elektrické energie, jestli dopoledne nebo odpoledne. Uživatel je v dnešní době směřován k tomu, aby bral při stavbě FVE na vědomí své denní využití vyrobené elektrické energie pro vlastní spotřebu.

V případě rovných střech se hovoří o tom, že by se neměly využívat pro výrobu elektrické energie, ale měly by být pokryty zelení. V programu Nová zelená úsporám jsou v současné době podmínky pro vyplácení dotací i pro zelené střechy [16].

6.2 Vybraná varianta

Z předchozí úvahy můžeme usoudit, že FVE si v dnešní době pořizují především středně movité domácnosti se sedlovou střechou a instalovaným výkonem FVE okolo 5,5 kWp a také ty více movité s instalovaným výkonem FVE do 10 kWp – z důvodu snadnějšího připojení FVE (mikrozdroje). Tato hranice 10 kWp je také kvůli využití programu Nová zelená úsporám, jelikož FVE nad 10 kWp jsou podporovány pouze se systémem na přípravu teplé vody s přímým ohřevem. Hodnota instalovaného výkonu 5,5 kWp je průměrná hodnota velikosti FVE připojených v posledních třech letech na území, kde provozovatelem distribuční soustavy je E.ON Distribuce, a.s. Pro instalaci FVE jsou a zatím budou nejčastěji využívány fotovoltaické panely umístěné na jižní straně střechy. V případě novostaveb bude u více movitých (nebo s rozšířením podpory od státu u středně movitých) zájem o využití fotovoltaických tašek instalovaných na jižní, západní i východní straně střechy – tedy tzv. maximální využití střechy [10] [16].

Další možností (ovšem méně pravděpodobnou) je varianta s motivací podpory dotacemi, případně jinými výhodami (např. z hlediska daní) pro firmy s obrovskými výrobními budovami, které by instalovaly FVE o mnohem větším výkonu oproti domácnostem.

6.2.1 Jednotlivé úrovně postupné penetrace FVE

Pro penetraci obce FVE bylo stanoveno pořadí uvedené v tabulce 6-1, v kterém budou instalovány FVE na střechách budov v obci z hlediska movitosti domácnosti, orientace sedlové střechy a velikosti celkového instalovaného výkonu FVE.

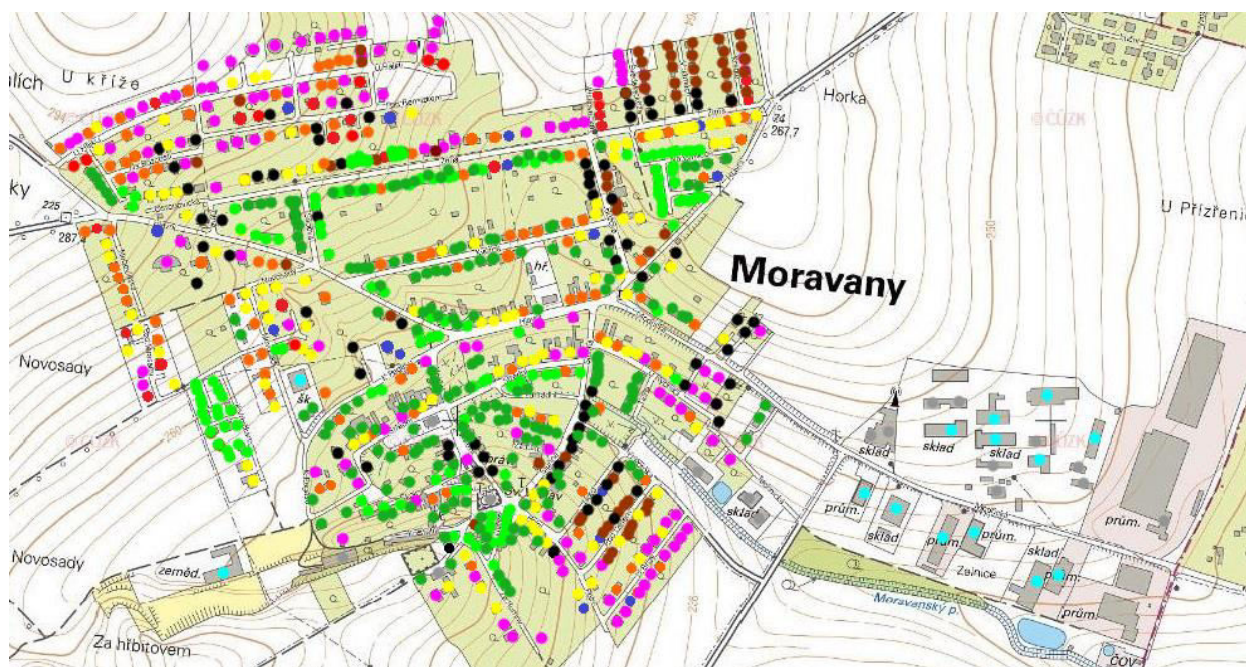
Tab. 6-1 Jednotlivé fáze penetrace obce FVE

pořadí	domácnosti	orientace střechy	instalovaný výkon [kWp]
0.	s fotovoltaickou el.	-	stávající
1.	středně a více movité	jih	5,5
2.	středně a více movité	jih	10
3.	středně a více movité	západ nebo východ	5,5
4.	středně a více movité	západ nebo východ	10
5.	středně a více movité	jih, východ, západ	max. možný
6.	firmy	rovná nebo mírně nakloněná	≥ 100
7.	středně, velmi movité, byty	jih, východ, západ, rovná	max. možný
8.	firmy	rovná nebo mírně nakloněná	≥ 50
9.	méně movité	jih, východ, západ	5,5
10.	méně movité	jih, východ, západ, rovná	10
11.	méně movité	rovná	5,5
12.	ostatní (firmy, kostel)	-	max. možný

Při uvažování o pořadí v tabulce bylo přikloněno k vybrané variantě v předchozí podkapitole v prvním odstavci. Předpokládá se, že budovy s rovnou střechou budou spíše pokryty zelení, což souvisí i s využitím dotací z programu Nová zelená úspora. Až od větších instalovaných výkonů FVE se vyplatí využít střechu k výrobě elektrické energie na rovných střechách.

Bytové domy byly zařazeny do sedmého pořadí, protože pokud se vlastník nebo vlastníci rozhodnou investovat do FVE, tak s největší pravděpodobností užijí celou využitelnou střechu pro fotovoltaické panely nebo tašky. Horní hranice využitelnosti střech již byla určena v bakalářské práci „Potencionální produkce elektrické energie ze střešních fotovoltaických elektráren v obci do 3000 obyvatel“ [23].

Podle tabulky 6-1 byla na základě osobního zhodnocení provedena penetrace FVE obce Moravan u Brna. Na obrázku 6-1 jsou barevnými body vyznačeny budovy osazené FV zdroji v jednotlivých fázích penetrace (dle již zmíněné tabulky 6-1). Z tohoto obrázku lze usoudit, že nejvíce budou nově instalované fotovoltaické zdroje přibývat po okraji obce, kde se nachází novější stavby.



Obr. 6-1 Rozlišení budov v obci podle jednotlivých fází dle tabulky 6-1 [15]

6.3 Provedení postupné penetrace FVE

Ve výpočetním programu DAISY Bizon Projektant byla provedena zvolená penetrace FVE při uvažování maximálního zimního odběru. Použití maximálního odběru ve výpočtech bylo z několika následujících příčin. Jeden z hlavních důvodů je, že penetrace obce se týká budoucího rozvoje sítě a odběry domácností a firem budou mít v budoucnu vyšší odběr než dnes. Příčinou toho budou elektromobily, větší počet domácích spotřebičů a strojů ve firmách. Navýšení spotřeby se neuvážovalo, jelikož spotřeba přímo v místě výroby je pro síť žádoucí. Dalším důvodem zvolení vyššího odběru je výhodná spotřeba vlastní vyrobené el. energie v místě připojení zdroje, jak z hlediska provozovatele FVE, tak především provozovatele DS.

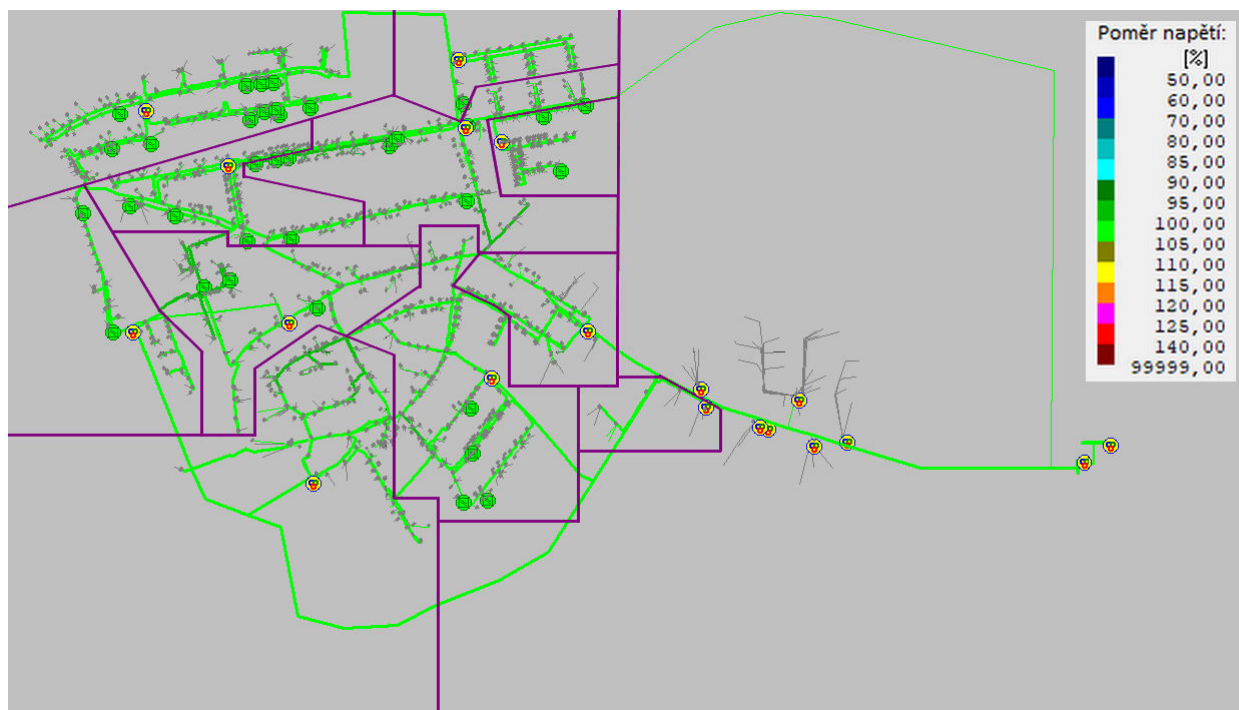
V distribuční síti obce, která byla přichystána ve výpočetním programu autorem práce, byly postupně injektovány zdroje elektrické energie představující FVE na střechách budov se zadaným činným výkonem dodávajícím do DS. Je prakticky nemožné, aby všechny přidané FVE byly ve stejný moment ve své maximální produkci, protože namontované FV panely nebo tašky jsou orientovány na různé světové strany. Tomuto stavu je nejbližší situace, kdy na všechny FV zdroje dopadá sluneční záření, když je Slunce v nadhlavníku. Tento stav nastává jen dvakrát ročně, a to při rovnodennosti [21]. Ovšem i při ozáření všech FV zdrojů nebude jejich dodávaný výkon maximální, protože sluneční záření nedopadne na různě orientované FV panely (tašky) kolmo [28].

Jelikož se tato diplomová práce zabývá vyvedením co největšího výkonu z FVE, tak počítáme s tím, že všechny FVE v síti produkují maximální činný výkon. Při přidávání decentralizovaných FV zdrojů do DS obce se nebere ohled na stávající PPDS, především na dovolenou změnu napětí pro společný napájecí bod a také na skutečnou vzdálenost napájecí trafostanice 110/22 kV. Injektáž byla provedena v jednotlivých fázích podle vybrané varianty v předcházející úvaze o penetraci obce FVE.

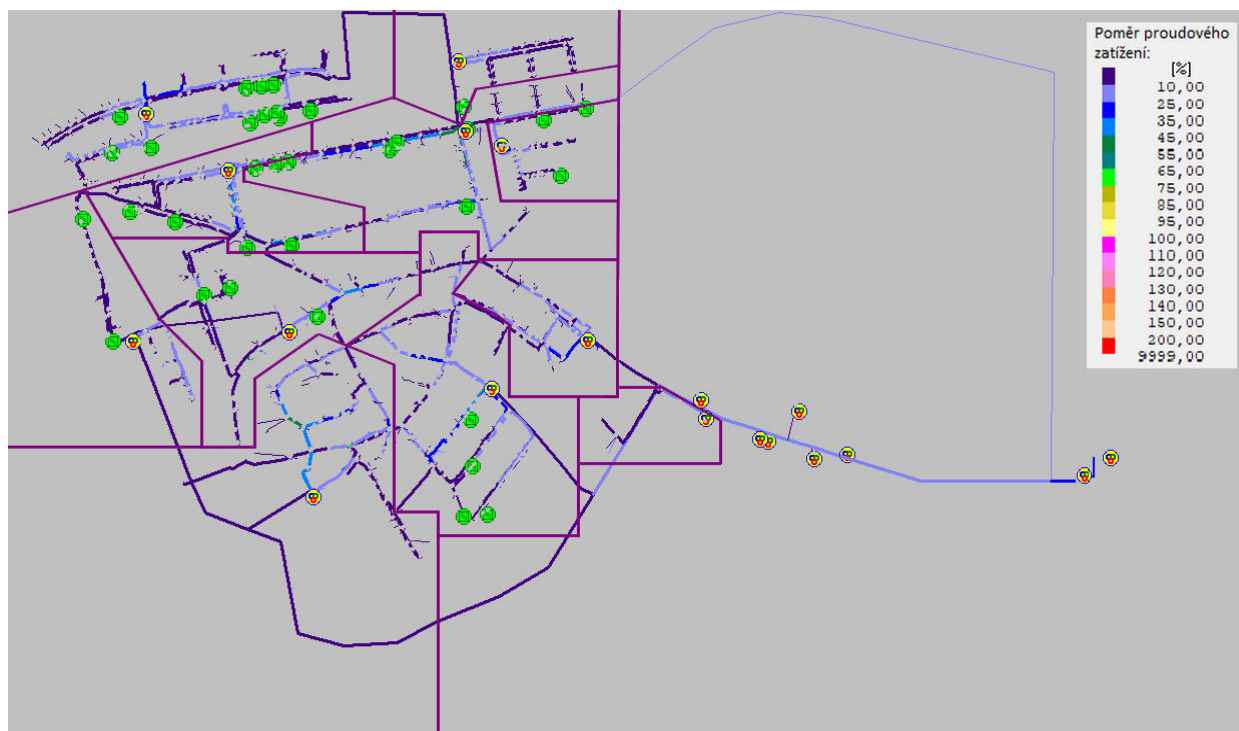
6.3.1 První fáze penetrace obce FVE

Do stávající distribuční sítě bylo přidáno 26 FVE – každá o instalovaném výkonu 5,5 kWp. Tyto zdroje el. energie se nachází na budovách středně a více movitých domácností se sedlovou střechou orientovanou na jižní světovou stranu, na které se bez problémů umístí fotovoltaické panely o výkonu 5,5 kWp. Jedná se o budovy, u kterých se nejvíce předpokládá, že na nich budou v nejbližší době instalovány FVE. Uvažujeme ovšem s tím, že na tyto budovy se nevejdou fotovoltaické panely větší, jak 10 kWp. Z celkového počtu budov v obci jde pouze o 2,87 % FVE nacházející se po první fázi penetrace v DS jsou zobrazeny na obrázku 6-2.

Napětí v elektrizační soustavě se téměř nezměnilo. Celá čísla maximální i průměrné hodnoty napětí v síti s NN zůstaly stejné jako před penetrací. Na hladině VN se napětí také téměř nezměnilo. Minimální napětí v rozvodné síti VN zaznamenalo největší nárůst o 4 V na 23,023 kV, nicméně vzhledem k velikosti napětí je tato změna nepodstatná. Poměr proudového zatížení vedení nepřekračuje 70 % a u transformátorů 60 %.



Obr. 6-2 Model DS v první fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí



Obr. 6-3 Model DS v první fázi penetrace – poměrné proudové zatížení

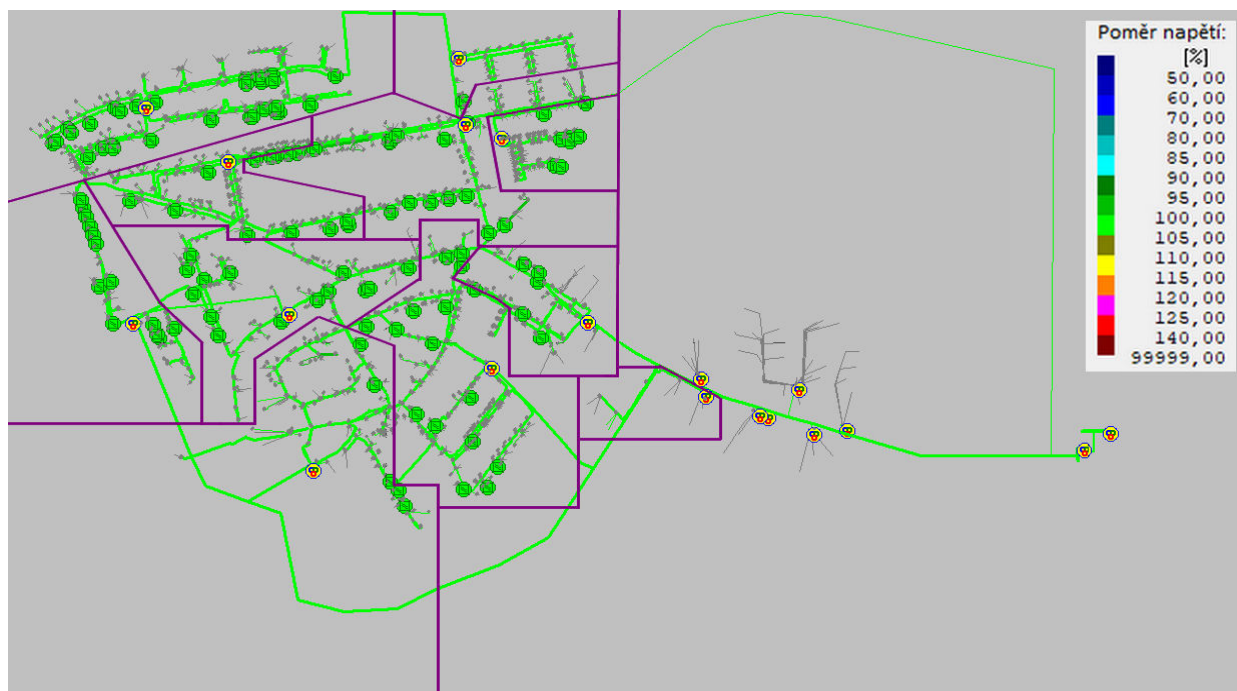
6.3.2 Druhá fáze penetrace obce FVE

V druhé fázi penetrace byly injektovány zdroje o výkonu 10 kWp. Tyto zdroje představující FVE byly umístěny do DS v místech připojených budov se středně a více movitými domácnostmi, které mají orientovanou střechu na jižní světovou stranu a bez problémů se na ni umístí

fotovoltaické panely o výkonu 10 kWp. Tomuto předpokladu v obci odpovídá 99 budov, což je 10,94 % z celkového počtu budov v obci (viz obrázek 6-4).

Maximální napětí v síti NN se nezměnilo a průměrné napětí se zvýšilo o 4 V na hodnotu 410 V. Na hladině VN se minimální napětí zvýšilo z 23,019 kV při původním (stávajícím) stavu sítě na 23,046 kV, maximální napětí se zvýšilo pouze o 5 V na 23,087 kV. Jedná se tedy o zanedbatelné změny v síti VN.

Proudové zatížení je stále pod hranicí maximálního dovoleného proudu vedení a transformátorů.

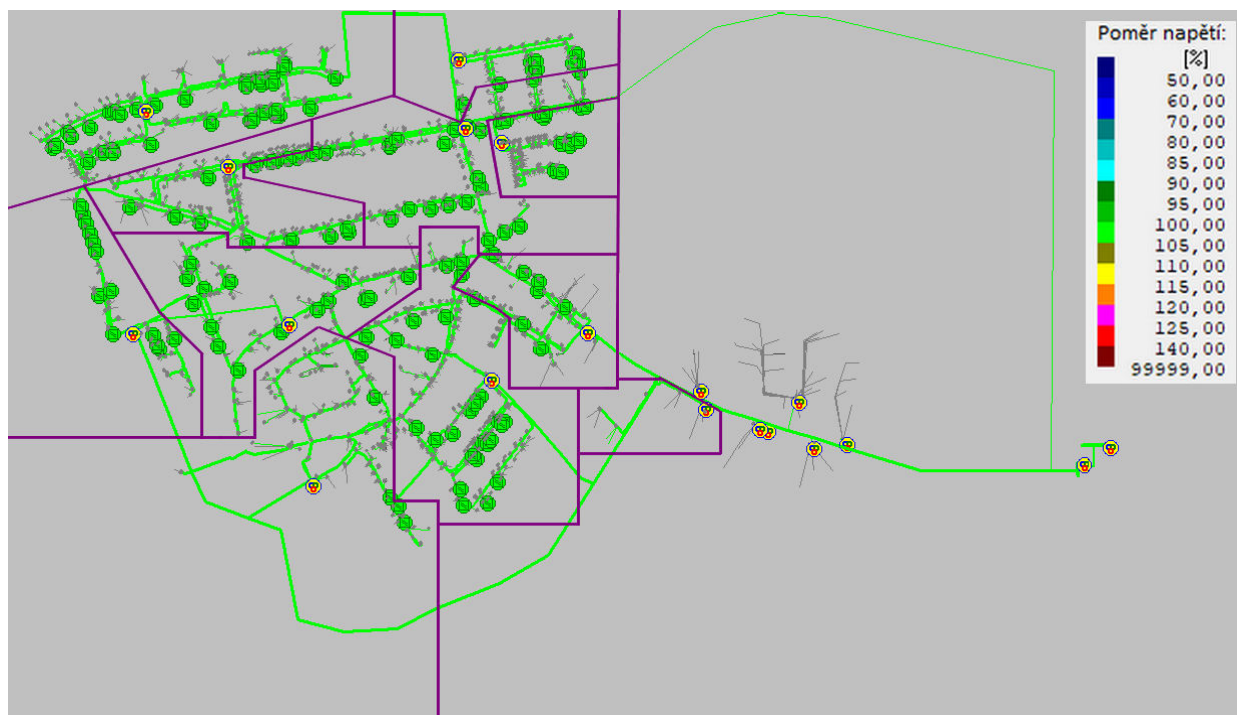


Obr. 6-4 Model DS ve druhé fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí

6.3.3 Třetí fáze penetrace obce FVE

V dalším kroku penetrace byly vybrány budovy domácností středně a více movitých s orientovanou střechou na západ nebo východ světové strany, na které nevejdou fotovoltaické panely o výkonu 10 kWp, ale jen o instalovaném výkonu 5,5 kWp. Takovýchto budov se v obci nachází 59 (6,52 % z celkového počtu budov v obci). Instalovaný výkon všech FVE nacházejících se na území obce je v této fázi momentálně 1573,5 kW. Dodávaný výkon z fotovoltaických zdrojů nyní pokrývá polovinu odebíraného činného výkonu celé obce při maximálním zimním odběru.

Maximální napětí v síti NN zůstává stále na 418 V a průměrné napětí se o 1 V zvýšilo na 411 V. V síti s VN se napětí nijak výrazně nezměnilo a průměrné napětí je 23,067 kV (99,9 % udržovaného napětí).



Obr. 6-5 Model DS ve třetí fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí

Proudové zatížení vedení je stále pod 70 % a u transformátorů se zmenšilo pod 50 % (tabulka 6-2) z důvodu menšího odběru el. energie z nadřazené soustavy 22 kV.

Tab. 6-2 Porovnání proudového zatížení transformátorů

fáze	I_{T1} [%]	I_{T2} [%]	I_{T3} [%]	I_{T4} [%]	I_{T5} [%]	I_{T6} [%]	I_{T7} [%]	I_{T8} [%]	I_{T9} [%]	I_{T10} [%]	I_{T11} [%]	I_{T12} [%]	I_{T13} [%]	I_{T14} [%]	I_{T15} [%]	I_{T16} [%]	I_{T17} [%]
0.	44,7	44,6	27,1	27,5	12,1	50,2	27,7	60,2	27,7	49,8	33,6	48,1	43,9	52,4	61,3	44,7	59,9
3.	44,6	44,6	19,9	11,3	12,1	16,0	27,7	24,0	27,7	30,5	20,6	39,0	43,9	20,6	39,7	11,1	28,6

6.3.4 Čtvrtá fáze penetrace obce FVE

Ve čtvrté fázi penetrace byly injektovány zdroje – každý o instalovaném výkonu 10 kWp. Zdroje elektrické energie vyrobené FVE byly instalovány na střechy budov se sedlovou střechou orientovanou na západní nebo východní světovou stranu u středně a více movitých domácností. Také splňují podmínku, že střecha budovy je dostatečně velká pro umístění fotovoltaických panelů o výkonu 10 kWp. Tuto podmínku v obci splňuje 72 budov.

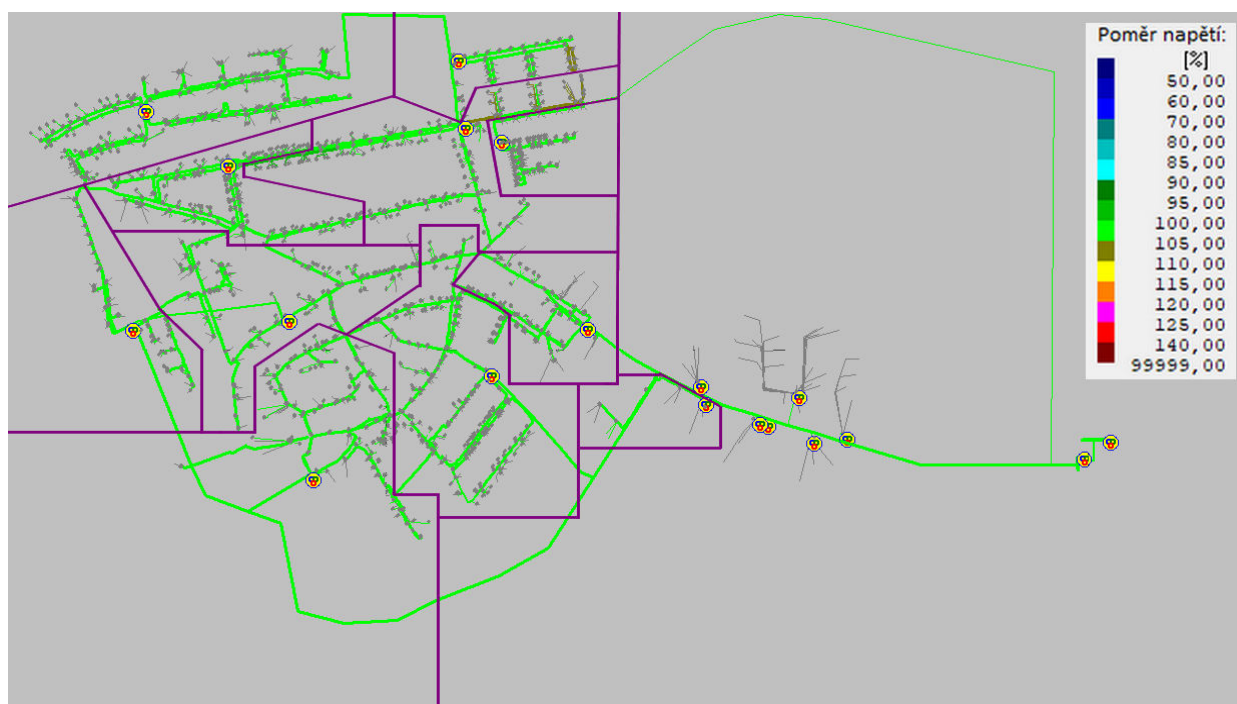
V obci jsou již FVE na 271 budovách, což činí 30,2 % z celkového počtu budov. Dodávaný výkon z FVE do sítě je téměř tři čtvrtě výkonu odebíraného v DS obce při zimním spotřebě. V letních měsících, kdy je odběr v současné době nižší než zimní, tak dodávaný výkon 2 293,5 kW z FVE převyšuje odběr i o více jak 300 kW. Minimální napětí v elektrizační soustavě NN se postupným přidáváním zdrojů zvýšilo z prvotní hodnoty napětí ve výši 384 V na 395 V.

Maximální napětí v DS obce NN se zvýšilo na 423 V (105,7 % U_n) a průměrné napětí na 413 V. Vzhledem k velikosti dodávaného výkonu a blízké vzdálenosti trafostanice 110/22 kV jsou změny VN při přidání FV zdrojů zanedbatelné.

Poměrné zatížení proudem se prozatím výrazně nezvýšilo.



Obr. 6-6 Model DS ve čtvrté fázi penetrace – rozmístění FVE



Obr. 6-7 Model DS ve čtvrté fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí

6.3.5 Pátá fáze penetrace obce FVE

Při páté fázi byly přidány FVE na budovy středně a více movitých domácností, které mají sedlovou střechu rozčleněnou do více ploch orientovaných především na jižní, západní a východní světovou stranu. Takovýchto budov v obci je 105, tedy 11,4 % budov z celkového počtu budov. Na tyto střechy budov se kvůli složitosti střechy vyplatí umístit fotovoltaické tašky, které umožní

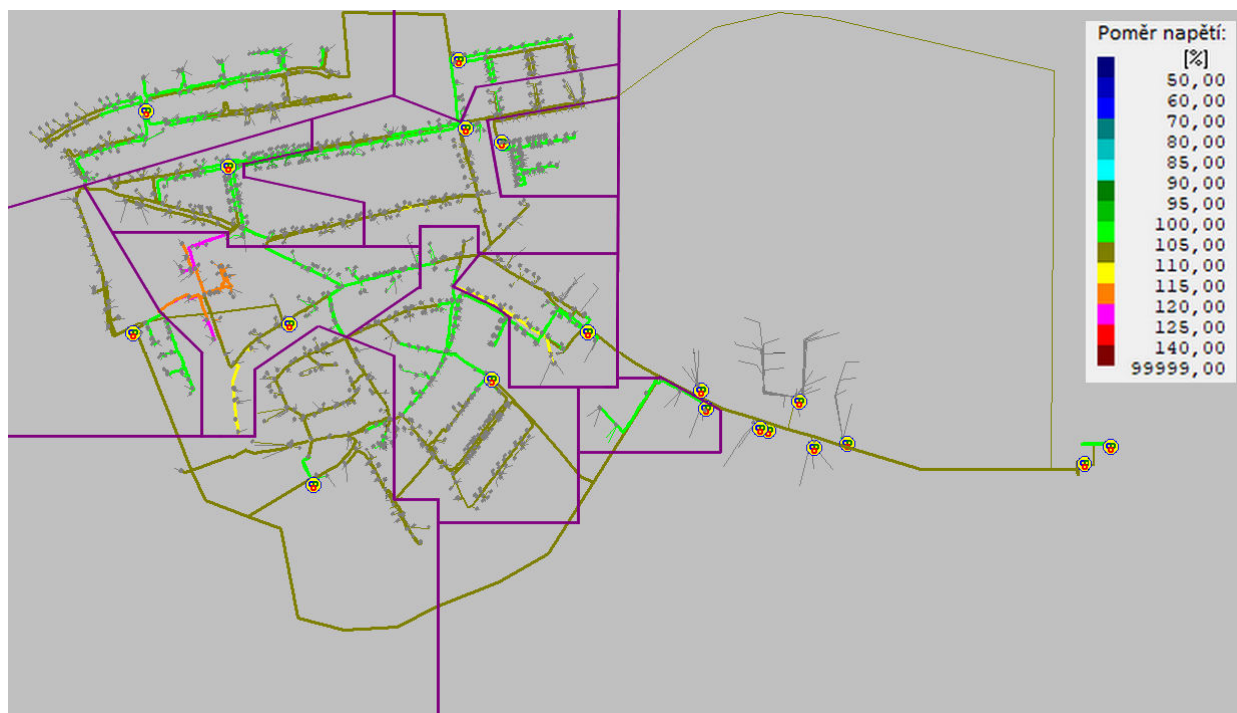
získat maximální možný výkon, který je možné ze střešní plochy získat. Tyto výkony jsou převzaty z bakalářské práce na téma Potencionální produkce elektrické energie ze střešních fotovoltaických elektráren v obci do 3000 obyvatel [23]. Instalované výkony FVE se pohybují v rozmezí od 10,3 kWp až do 73,0 kWp s průměrnou hodnotou 28,0 kWp. Jedná se tedy již o výkonově větší FVE, než které byly doposud přidány do DS v předchozích fázích penetrace. Instalovaný výkon veškerých FVE vzrostl z předchozí fáze o více jak dvojnásobek na hodnotu 5 118,4 kW, přičemž nyní přesahuje odběr obce.

Maximální napětí v DS na hladině NN je 481 V (120,2 % U_n). Toto napětí značně přesahuje dovolené napětí, které je v rozmezí ± 10 % jmenovitého napětí. Průměrné napětí v elektrizační síti NN se zvýšilo na 423 V. Napětí na hladině VN vzrostlo, ale stále je minimální i maximální hodnota napětí v těsné blízkosti udržovaného napětí DS obce. Průměrné napětí v síti s VN je 23,112 kV.

Proudové zatížení vedení v některých úsecích dosahuje až k 75 % maximální dovoleného proudu. Jedná se o úseky, kde se napětí zvýšilo nad dovolenou hodnotu. Proudové zatížení transformátorů v některých případech přesáhlo hodnotu 50 %, ale stále je pod 100 % zatížení transformátorů.



Obr. 6-8 Model DS v páté fázi penetrace – rozmístění FVE



Obr. 6-9 Model DS v páté fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí

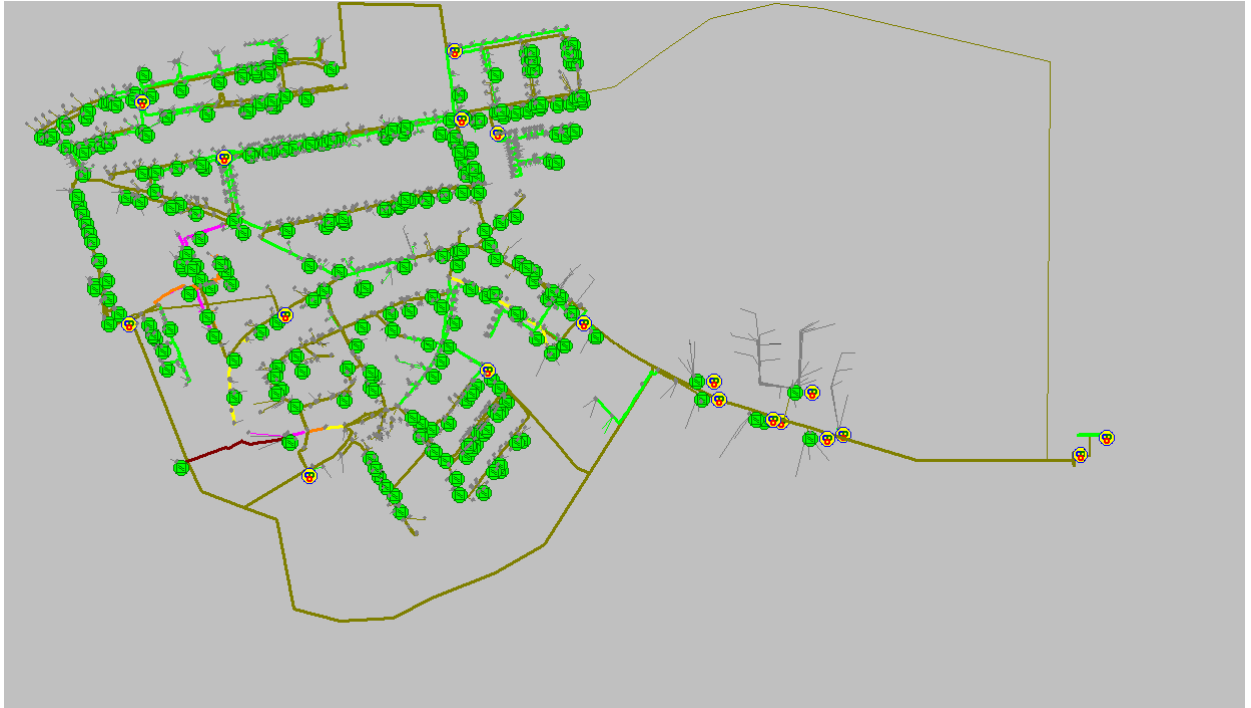
6.3.6 Šestá fáze penetrace obce FVE

V další fázi penetrace byly injektovány fotovoltaické zdroje na velké budovy firem, které mají rovnou nebo mírně nakloněnou střechu a je na ně tudíž možné umístit fotovoltaické panely o instalovaném výkonu přesahující 100 kWp. Na vymezené DS obce se nachází třináct hal, které splňují předchozí podmínky. Nejvyšší výkon FVE v této fázi činí 398,1 kWp a nejmenší 102,4 kWp. Průměrný instalovaný výkon těchto FVE je 176,5 kWp [23].

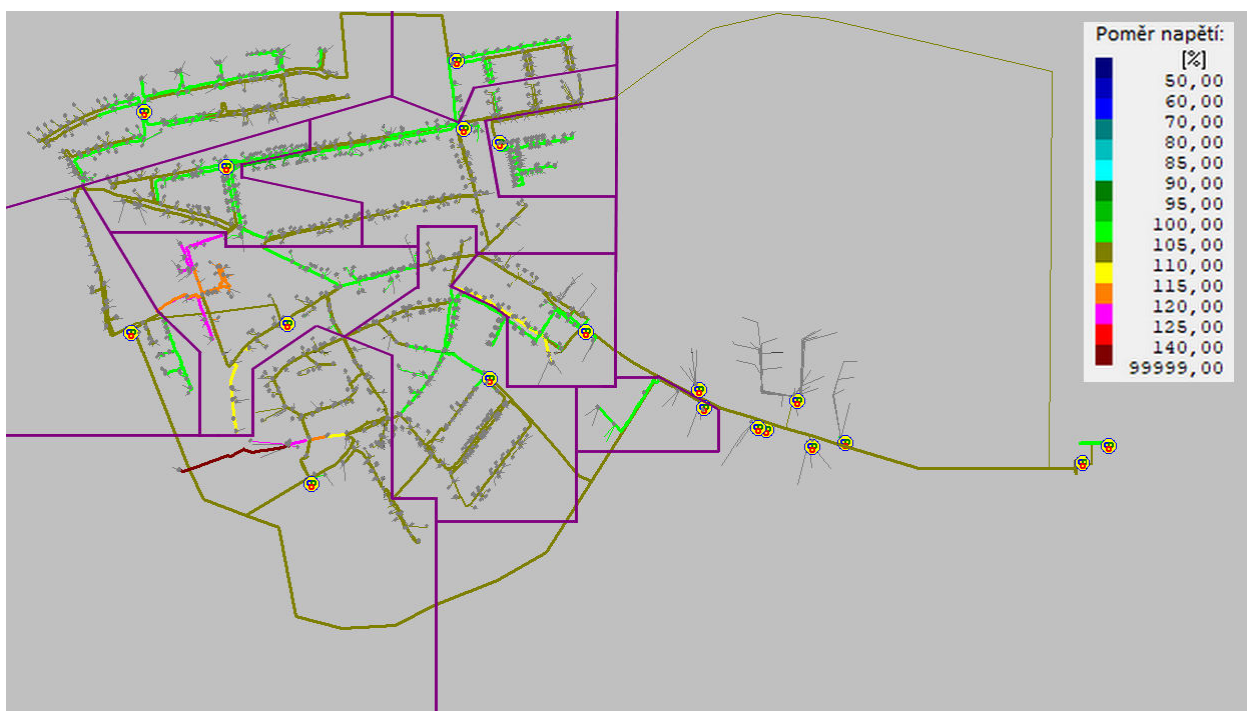
Téměř všechny FVE injektované v této fázi jsou vyvedeny přes transformátory přímo na hladinu 22 kV. Výjimkou jsou dvě FVE, které jsou vyvedeny do odběrné soustavy se jmenovitým napětím 400 V. Tyto dvě elektrárny způsobí zvýšení napětí v určité oblasti až na hodnotu 566 V, které je vysoko nad dovoleným napětím.

Minimální napětí na hladině NN zůstává nezměněno od předchozí fáze penetrace na hodnotě 397 V. Průměrné napětí v síti NN se tedy zvýšilo o 2 V na 425 V. Na hladině VN vzrostlo minimální napětí z předchozí fáze o 12 V na hodnotu 23,114 kV, maximální napětí se zvýšilo o 33 V na 23,160 kV. Průměrné napětí na hladině VN tedy nyní bylo 23,134 V (100,1 % U_n).

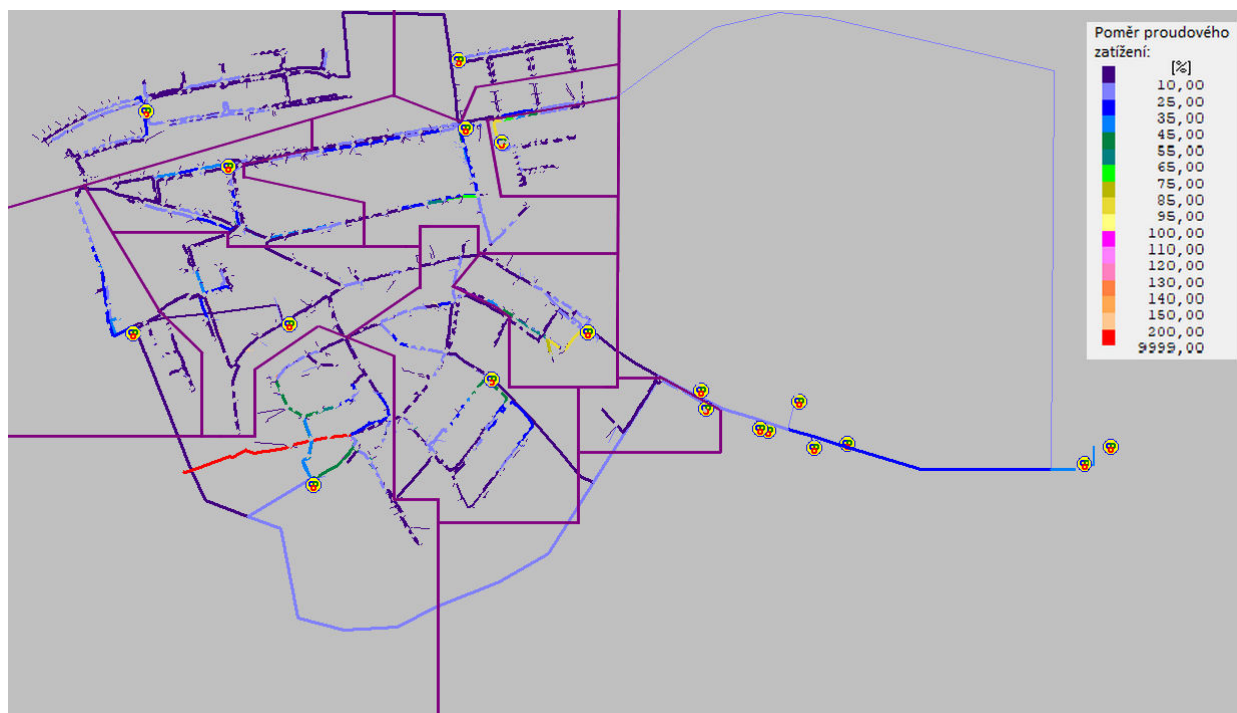
Poměrné zatížení proudem bylo přesáhnuo několikanásobně u těch transformátorů, ke kterým byly nyní připojeny FVE o velkých výkonech. Také u vedení, které spojovalo dvě FVE, jenž byly instalovány do odběrné soustavy na hladině napětí 400 V, byl překročen maximální dovolený proud.



Obr. 6-10 Model DS v šesté fázi penetrace – rozmístění FVE



Obr. 6-11 Model DS v šesté fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí



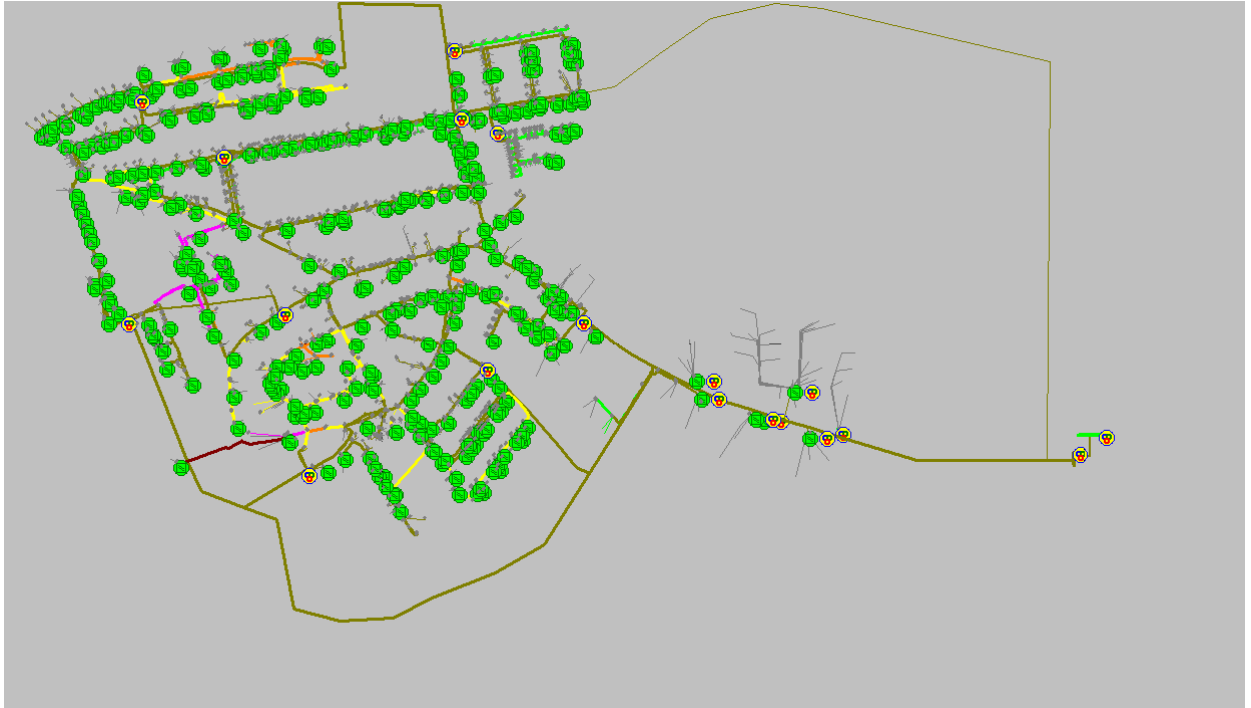
Obr. 6-12 Model DS v šesté fázi penetrace – poměrné proudové zatížení

6.3.7 Sedmá fáze penetrace obce FVE

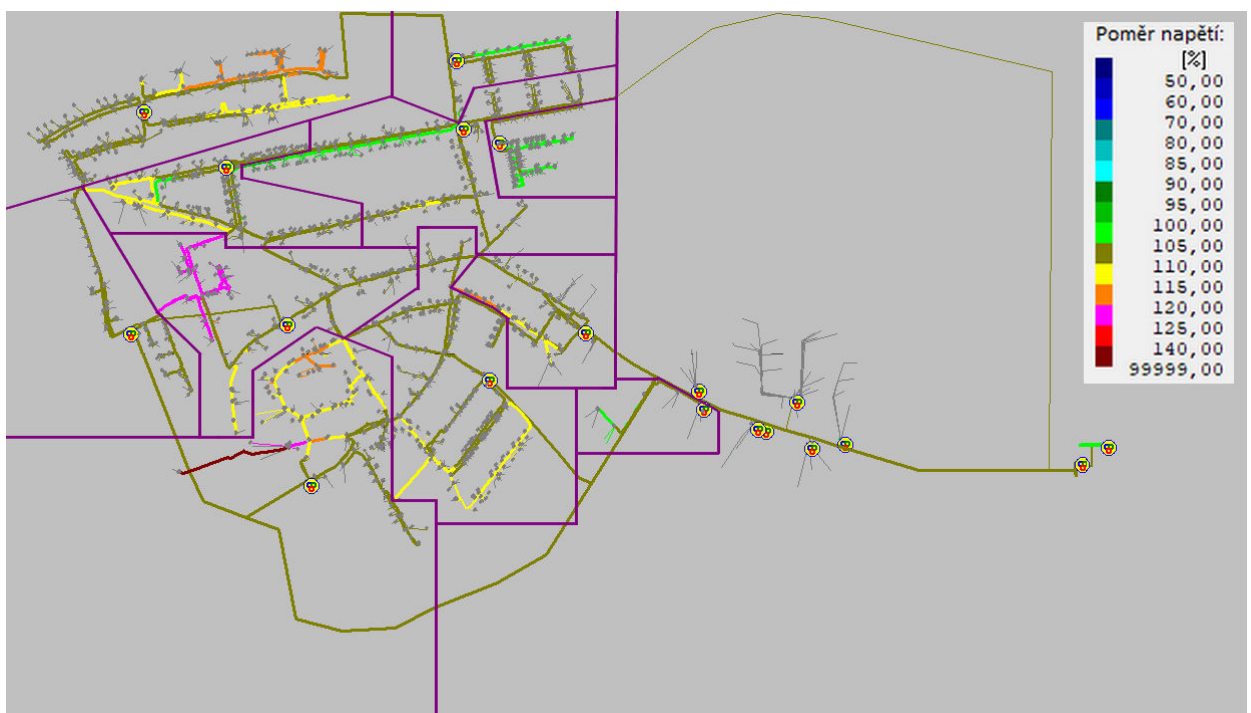
V sedmé fázi bylo přidáno do DS obce 115 zdrojů el. energie představující FVE na střeších budov. Těmto 12,7 % budovám z celkového počtu budov v obci byla přiřazena FVE o maximálním možném instalovaném výkonu při využití celé plochy střechy. Jedná se o zbylé budovy středně až velmi movité domácnosti s rovnou nebo sedlovou střechou orientovanou na jih, východ nebo západ. Dále do sedmé fáze penetrace patří také budovy, v nichž se nacházejí byty. Instalovaný výkon budov v této fázi je od 10,3 kWp do 102,6 kWp s průměrem 31,2 kWp [23]. Výkon všech FVE v DS je nyní 11 003,2 kWp. Nízké napětí v síti se zhoršilo nad dovolenou mez napětí a v některých místech více (zvláště tam, kde se nacházejí velké nové domy).

Maximální napětí v DS obce je až 570 V a průměrné napětí se zvýšilo o 9 V na 434 V. Vysoké napětí udržované na hodnotě 23,100 kV se celkově zhoršilo pouze o 0,2 % na hodnotu 23,171 kV.

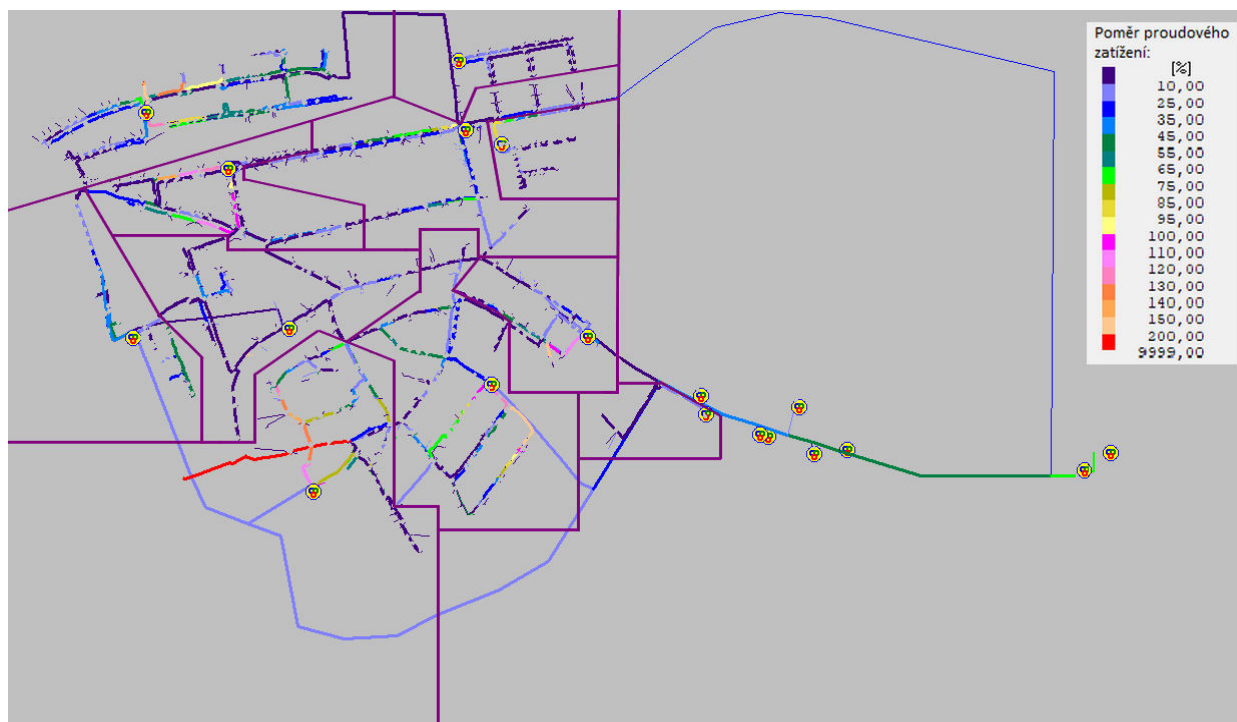
Poměrné proudové zatížení překročilo dovolené maximální proudové zatížení vedení a transformátorů v místech, kde se nejvíce zhoršila kvalita napětí, jak lze vidět na obrázku 6-15.



Obr. 6-13 Model DS v sedmé fázi penetrace – rozmístění FVE



Obr. 6-14 Model DS v sedmé fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí



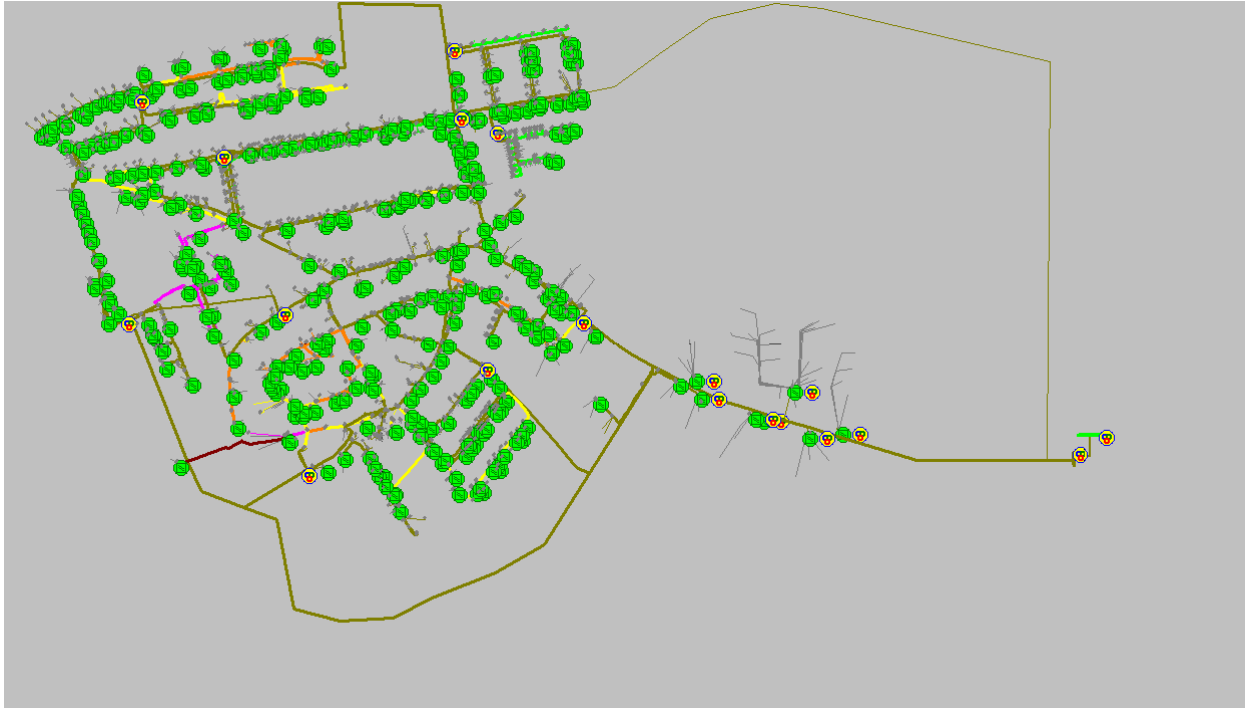
Obr. 6-15 Model DS v sedmé fázi penetrace – poměrné proudové zatížení

6.3.8 Osmá fáze penetrace obce FVE

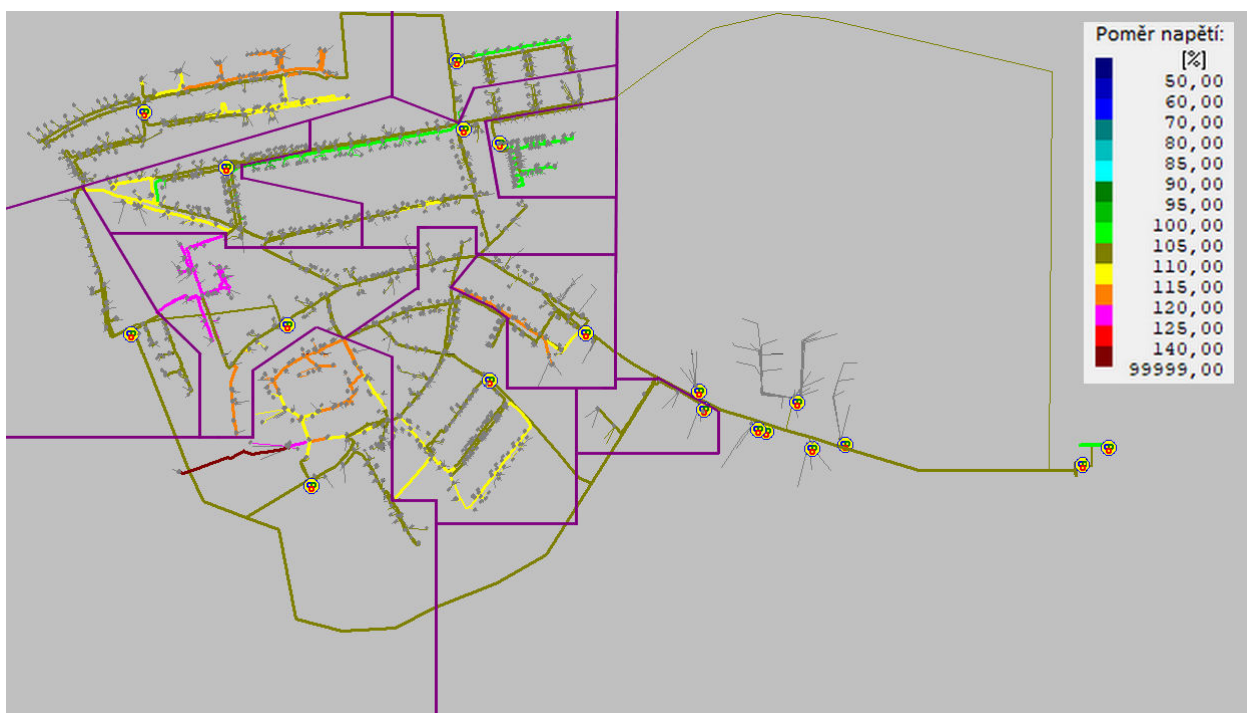
Budovy firem s rovnou nebo mírně nakloněnou střechou, na které je možné instalovat fotovoltaické panely o výkonu větším jak 50 kWp, budou osazeny FVE v osmé fázi penetrace obce. Celkem tedy 13 FVE o instalovaném výkonu od 51,3 kWp do 84,5 kWp. Průměr nově injektovaných zdrojů je 64,8 kWp [23].

Minimální napětí v síti na hladině NN se od předchozí fáze penetrace nijak nezměnilo a stále činí 399 V. Pouze o jeden volt se zvýšilo maximální a průměrné napětí v elektrizační síti NN. Napětí se viditelně zvýšilo především na místech, kde FVE byly připojeny na hladinu NN. Nejedná se totiž o připojení FVE o malém instalovaném výkonu, které nemělo vliv na síť o NN, které na takové výkony není stavěno. V místech, kde byla elektrárna připojena přímo přes transformátor na hladinu VN, se napětí změnilo pouze nepatrně (maximálně na napětí 23,226 kV).

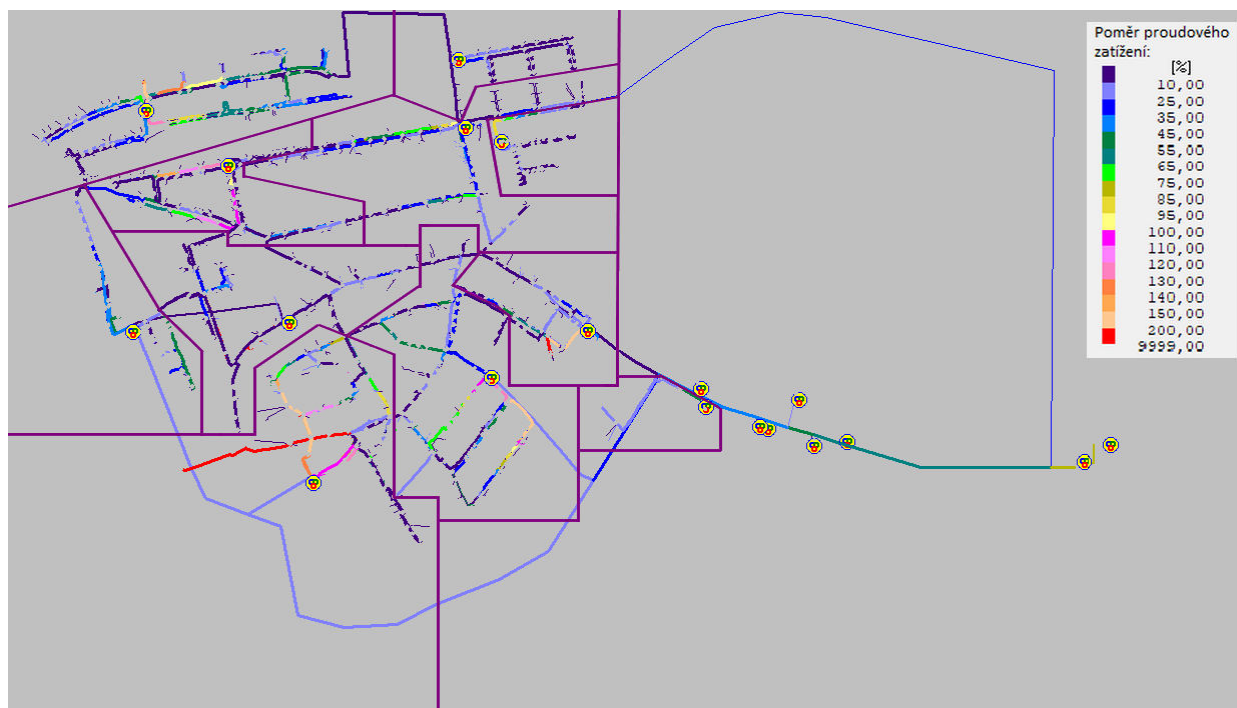
Proudové zatížení bylo překročeno jak na vedení, tak na transformátorech, které zajišťovaly přenos energie na hladinu VN.



Obr. 6-16 Model DS v osmé fázi penetrace – rozmístění FVE



Obr. 6-17 Model DS v osmé fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí



Obr. 6-18 Model DS v osmé fázi penetrace – poměrné proudové zatížení

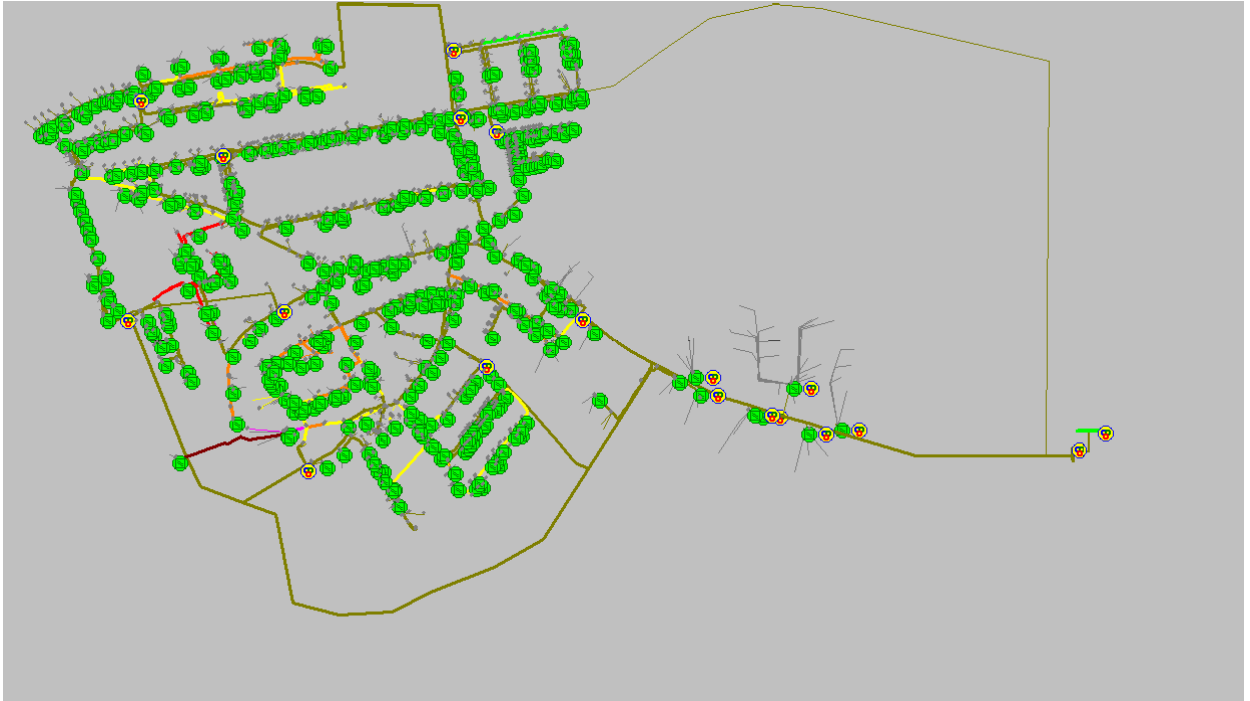
6.3.9 Devátá fáze penetrace obce FVE

Další fází penetrace obce FVE je injektáž zdrojů do DS v místech připojení budov méně movitých domácností, které mají sedlovou střechu orientovanou na jih, východ nebo západ, a na jejichž plochu je možné umístit fotovoltaické panely o výkonu 5,5 kWp, ale ne větší jak 10 kWp. V obci Moravany u Brna se takovýchto budov nachází celkem 140.

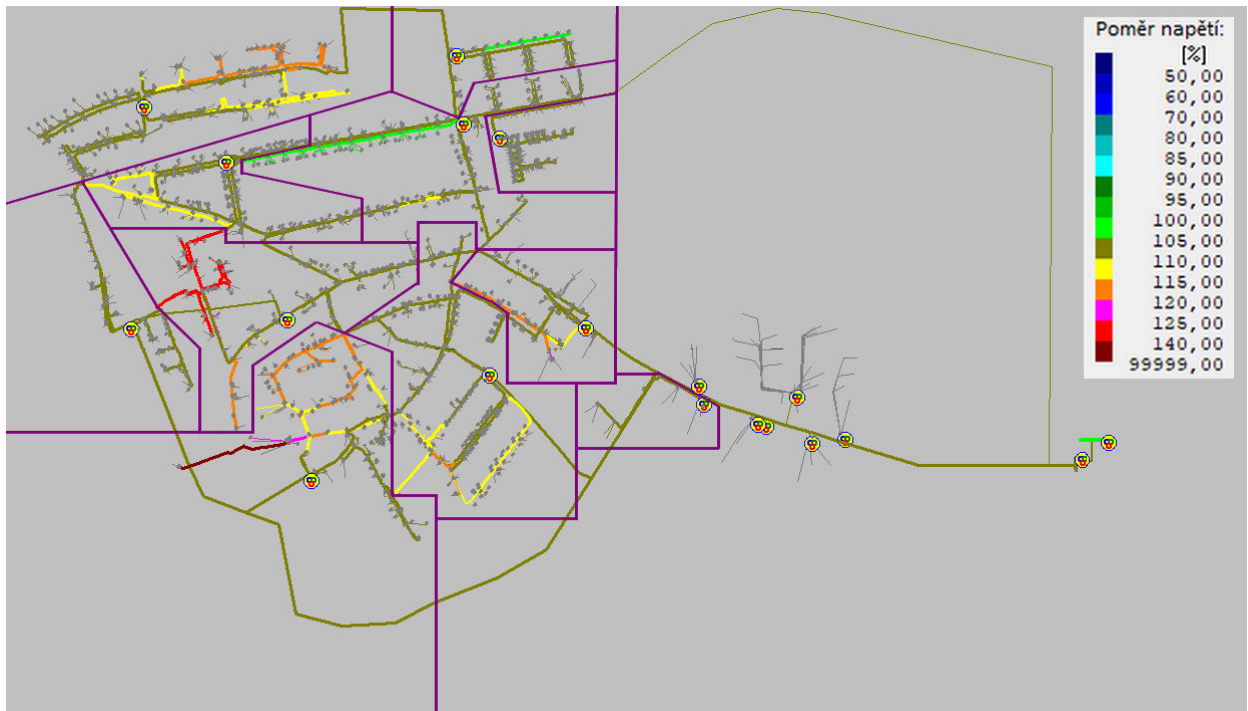
Po injektování těchto zdrojů o výkonech 5,5 kWp přesáhl dodávaný výkon FVE (12 616 kW) čtyřnásobně zimní odběr obce (3 106 kW). Napětí v DS na hladině NN se plošně zhoršilo, ovšem překročení dovoleného napětí zůstalo pouze na stejných místech jako v předchozí fázi penetrace.

Minimální napětí v elektrizační soustavě je rovno jmenovitému napětí o hodnotě 400 V. Maximální napětí v síti NN se zvýšilo o 1 V na 572 V a průměrné napětí o 2 V na 437 V. Napětí v síti s VN se stále nijak výrazně nemění vzhledem k celkové hodnotě. Průměrné napětí na hladině VN je 100,4 % udržovaného napětí tedy 23,186 kV.

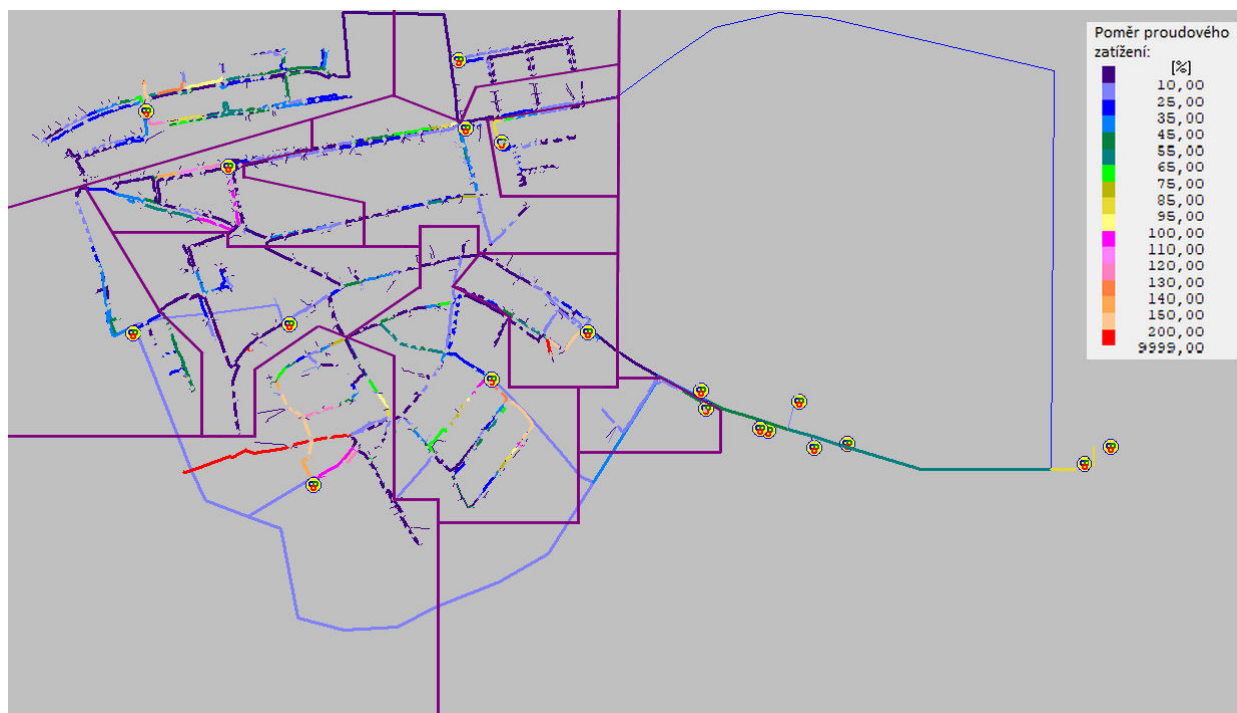
Proudové zatížení se od předchozí fáze výrazně nezměnilo, jelikož byly přidány zdroje o malém výkonu rovnoměrně po celé DS obce.



Obr. 6-19 Model DS v deváté fázi penetrace – rozmístění FVE



Obr. 6-20 Model DS v deváté fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí



Obr. 6-21 Model DS v deváté fázi penetrace – poměrné proudové zatížení

6.3.10 Desátá fáze penetrace obce FVE

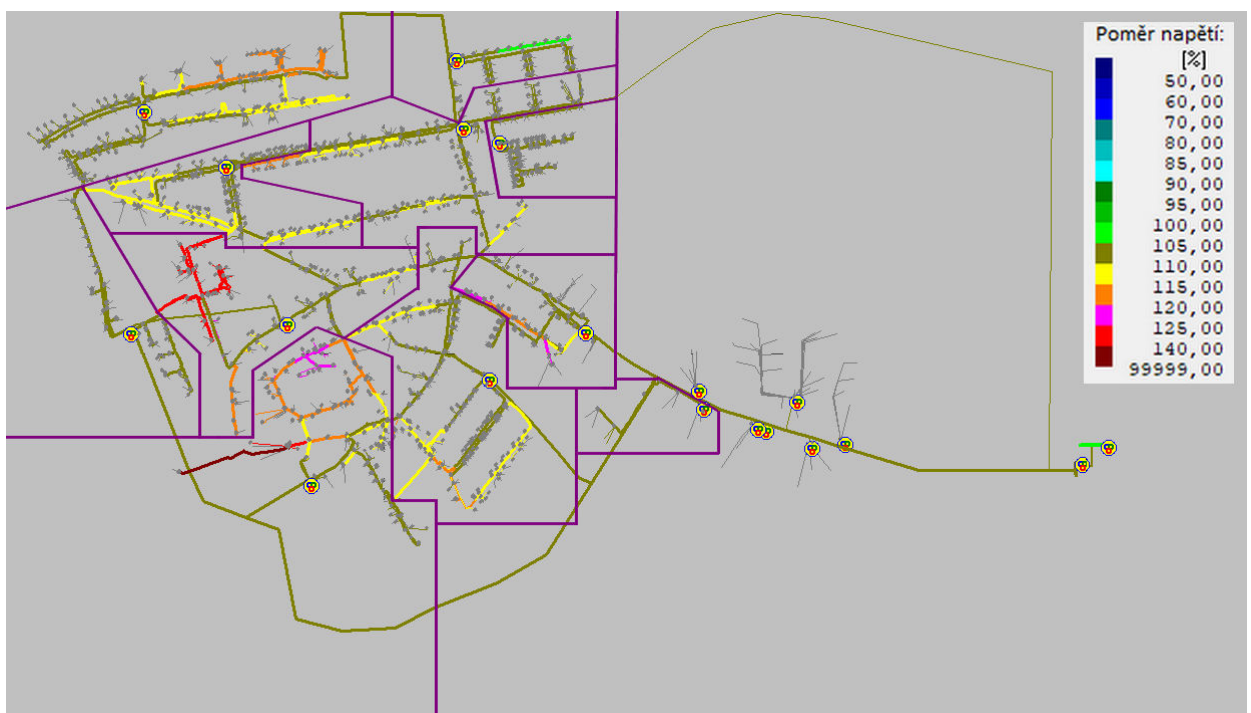
V desáté fázi penetrace bylo injektováno nejvíce zdrojů el. energie do DS obce. Zdroje představující FVE byly umístěny na 173 budov. Do této velké skupiny patří budovy s méně movitými domácnostmi, rovnými střechami nebo sedlovými střechami orientovanými na jih, východ nebo západ. Lze na ně umístit fotovoltaické panely o výkonu 10 kWp. Nyní je již na 830 budovách FVE, což je 92,9 % z celkového počtu budov v obci. Napětí v DS obce se na hladině NN značně zvýšilo.

Minimální napětí vzrostlo ze 400 V na 417 V. Maximální napětí se zvýšilo pouze o 3 V na hodnotu 575 V. Toto napětí je výrazně vyšší, než dovolené napětí. Na většině míst DS přesahuje NN mez 110 % jmenovitého napětí, jelikož průměrné napětí je 442 V. Nicméně na hladině VN je stále hodnota napětí zcela v normě.

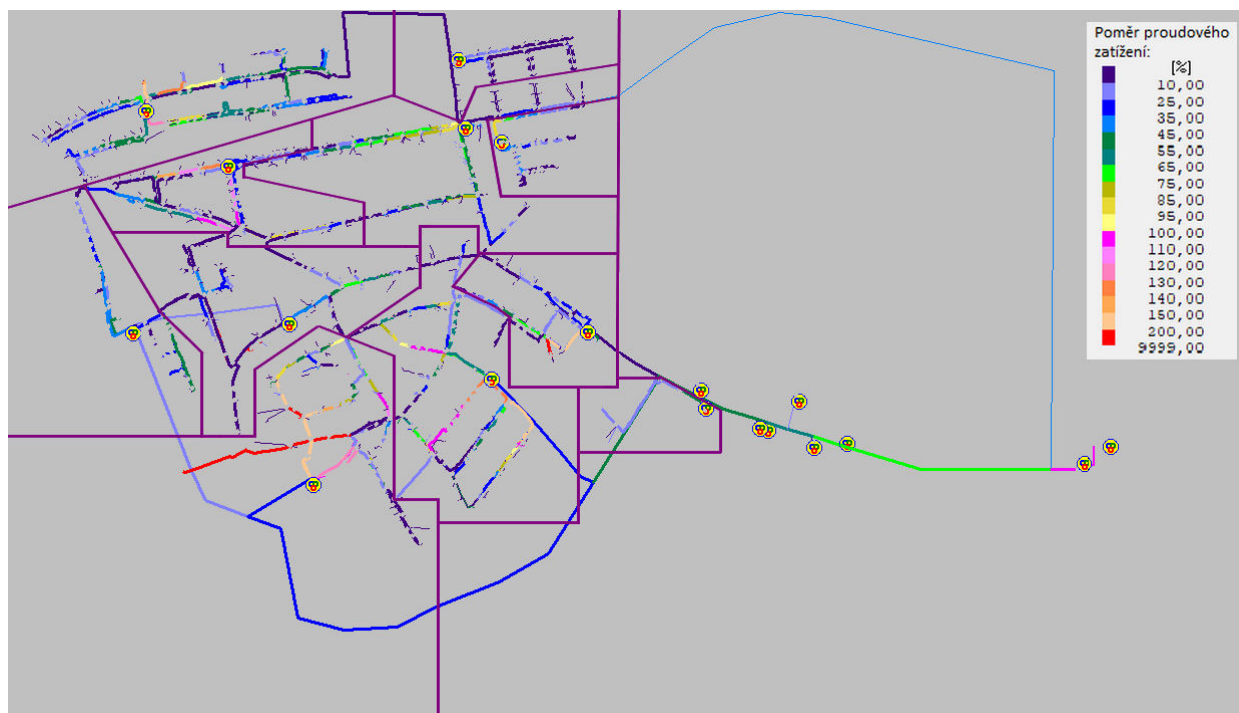
Zatížení vedení a transformátorů s rostoucím instalovaným výkonem FVE na hodně místech značně převyšuje maximální zátěžný proud, jak je vidět na obrázku 6-24.



Obr. 6-22 Model DS v desáté fázi penetrace – rozmístění FVE



Obr. 6-23 Model DS v desáté fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí



Obr. 6-24 Model DS v desáté fázi penetrace – poměrné proudové zatížení

6.3.11 Jedenáctá fáze penetrace obce FVE

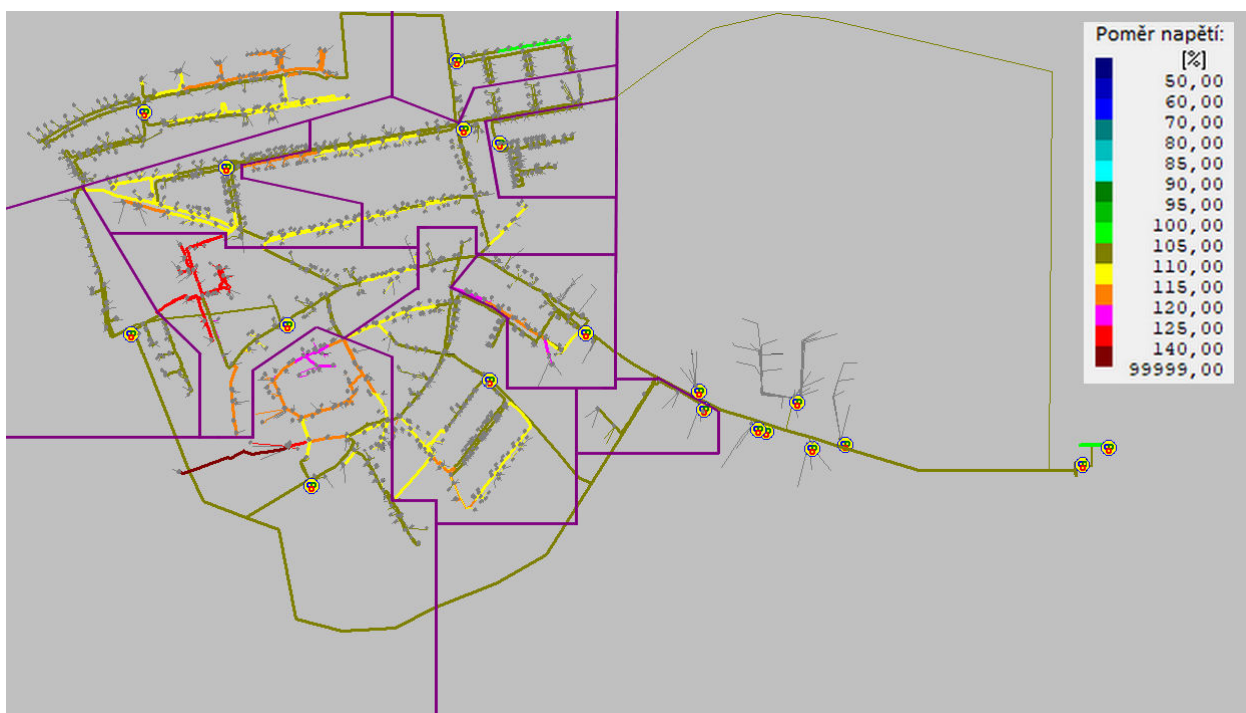
V následující fázi penetrace budou injektovány FVE na rovné malé střechy budov, které nespádaly do páté ani desáté fáze penetrace. Na tyto rovné plochy střech nebylo možné umístit fotovoltaické panely o výkonu 10 kWp. Z toho důvodu budou na tyto střechy méně movitých instalovány zdroje o instalovaném výkonu 5,5 kWp. Takovýchto budov se ve vybrané obci nachází 27.

Minimální, maximální, ani průměrné napětí se v síti s NN nezměnilo a je na stejné úrovni jako při předchozí fázi. Napětí v rozvodné síti VN se v průměru zvýšilo pouze o 1 V na 23,203 kV.

Také proudové zatížení v DS se výrazněji nezměnilo od předchozí fáze, tudíž není nutné znovu schéma sítě uvádět.



Obr. 6-25 Model DS v jedenácté fázi penetrace – rozmístění FVE



Obr. 6-26 Model DS v jedenácté fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí

6.3.12 Dvanáctá fáze penetrace obce FVE

Do poslední fáze penetrace obce FVE patří kostel a zbylé budovy firem, které neměly dostatečně velkou střechu pro umístění FVE o výkonu větším jak 50 kWp. Jedná se 24 budov. Nyní už je na 98,6 % budov z celkového počtu budov v obci umístěna FVE. Pouze třináct budov zůstalo bez FVE, protože mají střechu orientovanou pouze na severní světovou stranu, kde je po celý

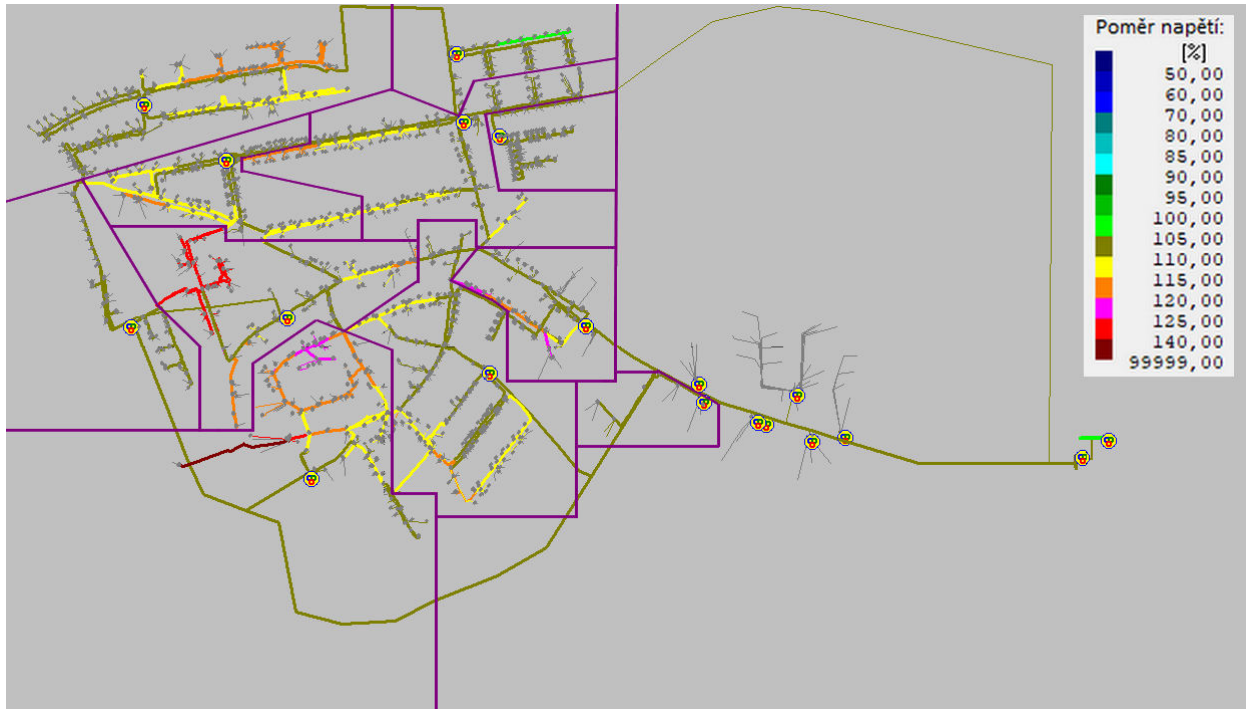
den stín (např. z důvodu vegetace). Instalovaný výkon všech FVE nacházejících se v DS obce je 15 186,6 kW. Tento výkon elektráren se blíží pětinásobku maximální zimní spotřeby v obci.

Minimální (417 V) a maximální (575 V) napětí v síti NN se od desáté fáze penetrace nezměnilo. Průměrné napětí se v této fázi penetrace zvýšilo pouze o 1 V na hodnotu 443 V. V rozvodné síti s VN bylo maximální napětí 23,273 kV, což je stále v dovolené odchylce, jak od udržovaného napětí, tak od obvyklého VN 22 kV.

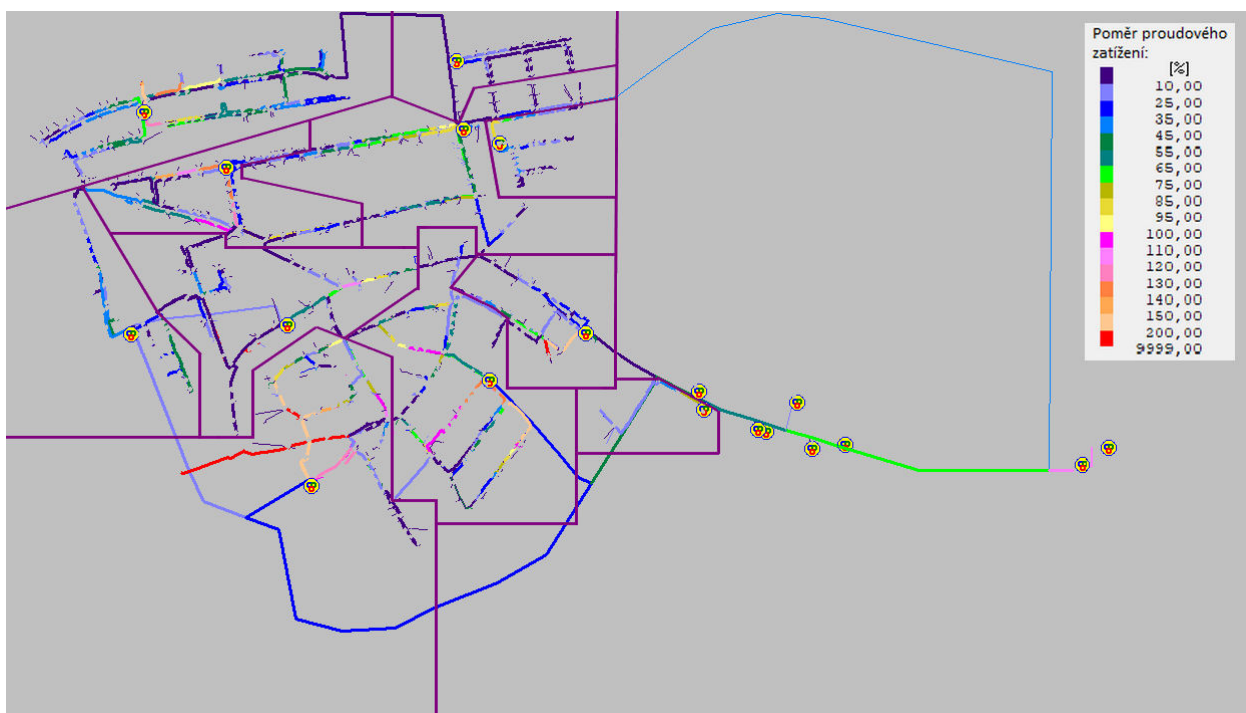
Proudové zatížení vedení a transformátorů přesáhlo dovolený maximální proud již na více místech. Především tam, kde se napětí nejvíce zvýšilo nad dovolenou mez.



Obr. 6-27 Model DS ve dvanácté fázi penetrace – rozmístění FVE



Obr. 6-28 Model DS ve dvanácté fázi penetrace – odchylky od jmenovitého napětí

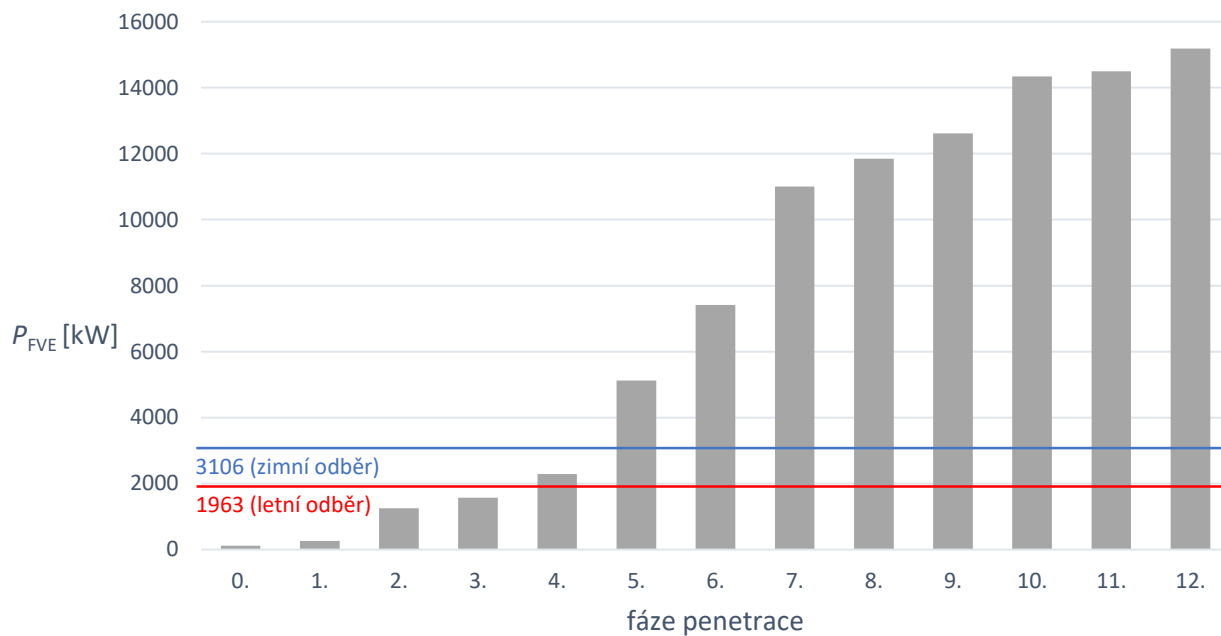


Obr. 6-29 Model DS ve dvanácté fázi penetrace – poměrné proudové zatížení

6.4 Vyhodnocení postupné penetrace obce FVE

Při postupném růstu FVE se napětí a proudové zatížení vedení, transformátorů a jiných zařízení v síti zvyšovalo. Na některých místech rostlo až skokově, z toho důvodu je pro lepší představu ukázáno na obrázcích jednotlivých fází penetrace poměry napětí a proudů. Veškeré výsledné parametry sítě jsou uvedeny v příloze této práce. V práci bylo přijato zjednodušení

týkající se denního průběhu odběru elektřiny v domácnostech, kdy maximální je v podvečer po návratu lidí z práce a výroba FV zdrojů je maximální kolem poledne. Na hladině VN nebyla zaznamenána větší změna napětí jak jedno procento z udržovaného napětí, jelikož není bráno v úvahu, že se přírodní trafostanice 110/22 kV nenachází v blízkosti obce. Celkový instalovaný výkon FVE byl při výpočtech brán jako dodávaný činný výkon zdroje do DS. Jak tento činný výkon dodávaný do sítě z FVE v jednotlivých fázích roste lze vidět v obrázku 6-30.

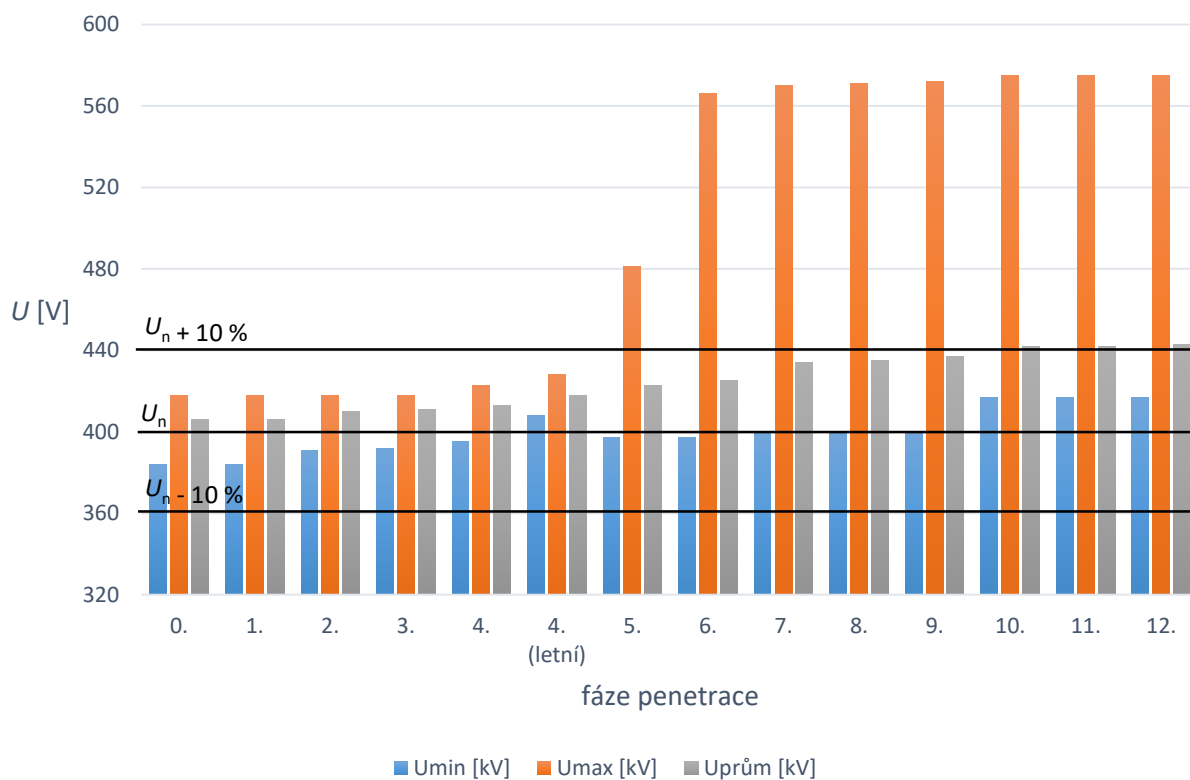


Obr. 6-30 Instalovaný výkon všech FVE v jednotlivých fázích penetrace obce

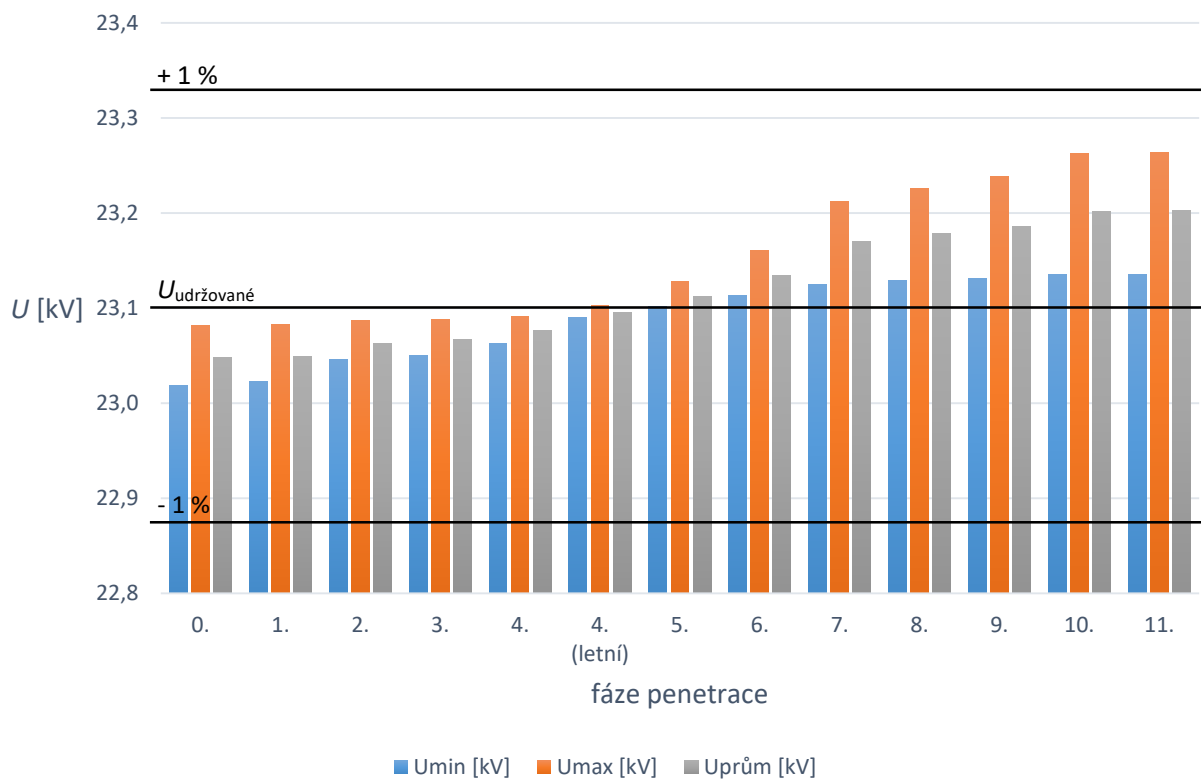
Až v páté fázi penetrace obce FVE nastalo překročení dovoleného napětí na hladině NN a zároveň celkový instalovaný výkon všech zdrojů přesáhl maximální zimní odběr obce. Maximální nízké napětí v DS obce bylo ještě ve čtvrté fázi penetrace 423 V, což je 105,7 % jmenovitého napětí. Ovšem v páté fázi se napětí v síti zvýšilo až na 481 V (120,2 % U_n). Protože byly výpočty provedeny pro maximální zimní odběr obce, tak je třeba vyzkoušet, zda budou parametry sítě v normě ve čtvrté fázi penetrace i při letním minimálním odběru. Po provedení změny odběru na letní bylo zjištěno, že při čtvrté fázi penetrace je maximální napětí v síti NN 428 V, což je stále v mezích dovolené odchylky od jmenovitého napětí. Bylo tedy ověřeno, že do stávajícího stavu sítě může být při uvažované penetraci obce bez problému dodáván výkon z FVE o výkonu 2 293,5 kW, když nebereme v potaz současné PPDS a to především z úrovně pro změnu napětí pro společný napájecí uzel.

Po páté fázi penetraci se přidaly FVE i na střechy velkých budov firem, kde bylo možné instalovat celkový výkon větší než 100 kW. Maximální napětí v síti opět skokově vzrostlo až na hodnotu 566 V (141,4 % U_n).

V dalších bodech penetrace se napětí postupně zvyšovalo. V desáté fázi penetrace napětí na většině míst DS obce překročilo dovolené napětí 440 V. Průměrné napětí v elektrizační soustavě obce bylo nyní 442 V. V poslední dvanácté fázi penetrace obce bylo průměrné napětí v síti 443 V a v některých místech dosahovalo napětí až 575 V (143,8 % U_n). Proudové zatížení vedení a transformátorů bylo největší v místech, kde byl největší nárůst napětí nad dovolenou mez. Především v blízkosti transformátorů, které byly od šesté fáze také přetíženy.



Obr. 6-31 Napětí na hladině NN v jednotlivých fázích penetrace obce



Obr. 6-32 Napětí na hladině VN v jednotlivých fázích penetrace obce

6.5 Kompletní injektáž obce FVE o stejném instalovaném výkonu

Následující podkapitola bude zkoumat vliv napětí a proudu v DS zvolené obce, když budou na všech 884 využitelných budovách pro instalaci fotovoltaických panelů v obci přidány FVE o stejném výkonu. Do rozvodné sítě tedy bude dodáváný výkon rovnoměrně rozložen podle hustoty budov. Tento případ by mohl v budoucnosti také nastat, kdyby byl uzákoněn maximální dodáváný výkon z decentralizovaných zdrojů do DS, který by měl zamezit dodávání velkého výkonu v jednom místě. Předěšlo by se tak náhlému ovlivnění parametrů sítě v místech připojení zdroje.

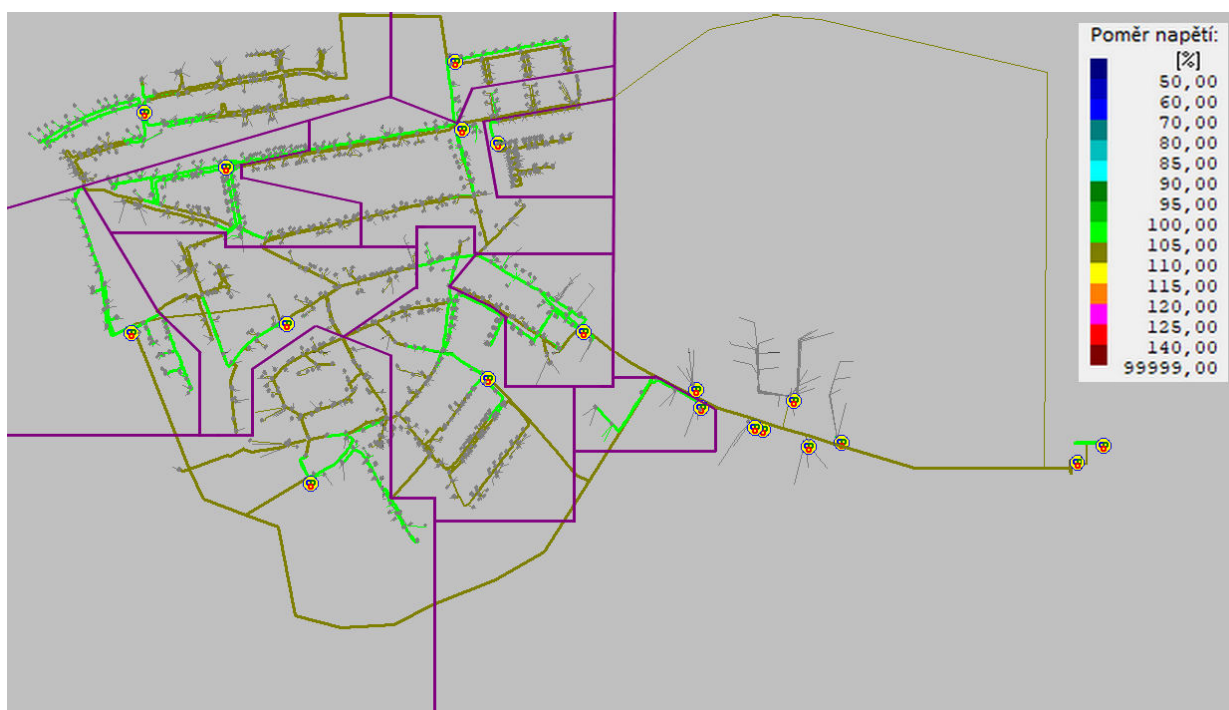
Kromě již popsané postupné penetraci obce bude nyní provedena tzv. plošná penetrace FVE ve variantách uvedených v tabulce 6-3, která bude popsána v následujících podkapitolách.

Tab. 6-3 Vybrané varianty plošné penetrace FVE

varianta	budov	instalovaný výkon [kWp]	instalovaný výkon všech FVE [kWp]
13.	884	5,5	4862,0
14.	884	10,0	8840,0

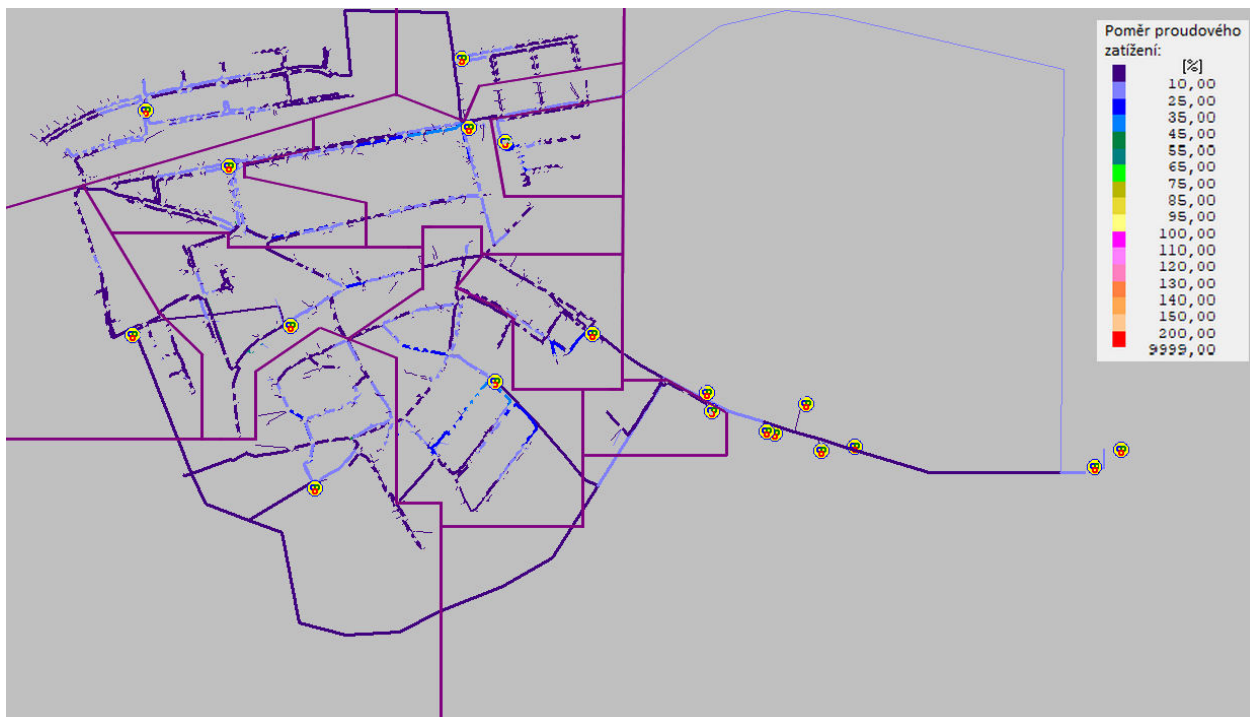
6.5.1 Injektáž zdrojů o výkonu 5,5 kWp

Při osazení všech budov v obci FVE o instalovaném výkonu 5,5 kWp (což je průměrná hodnota FVE připojených v posledních třech letech na území, kde provozovatelem distribuční soustavy je E.ON Distribuce, a.s.) bylo zjištěno, že napětí a proudové zatížení v DS obce bude při maximálním zimním odběru v mezích tolerance. Maximální napětí v síti NN bude 439 V, což je těsně pod dovolenou toleranci od jmenovitého napětí. Průměrné napětí na hladině NN se zvýší z hodnoty 406 V na 422 V. Místo s nejmenší hodnotou napětí bude mít 414 V. V rozvodné síti VN se napětí zvýšilo až na 23,121 kV, které je vzhledem k udržovanému napětí jen o 0,1 % vyšší.



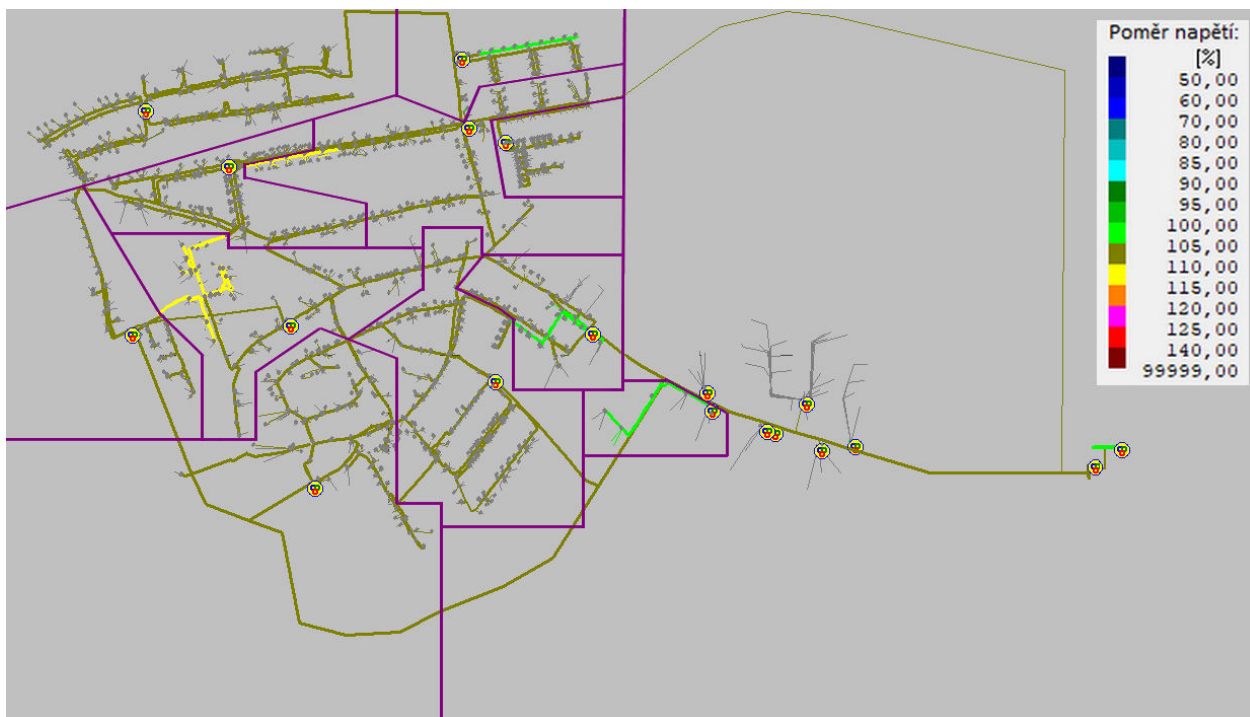
Obr. 6-33 Odchytky od jmenovitého napětí v modelu DS při injektáži zdrojů o výkonu 5,5 kWp

Dodávaný výkon z FVE byl 4 862 kW, což je o 1 757 kW víc než stanovený maximální odběr obce. Proudové zatížení přitom nebylo na žádném transformátoru ani vedení výrazně navýšeno.



Obr. 6-34 Proudové zatížení v modelu DS při injektáži zdrojů o výkonu 5,5 kWp

Jelikož při letním (nižším) odběru el. energie obce není dodávaný výkon z FVE v takové míře spotřebováván v místě výroby jako při zimním (maximálním) odběru, tak síť bude více zatěžována tímto dodávaným výkonem.

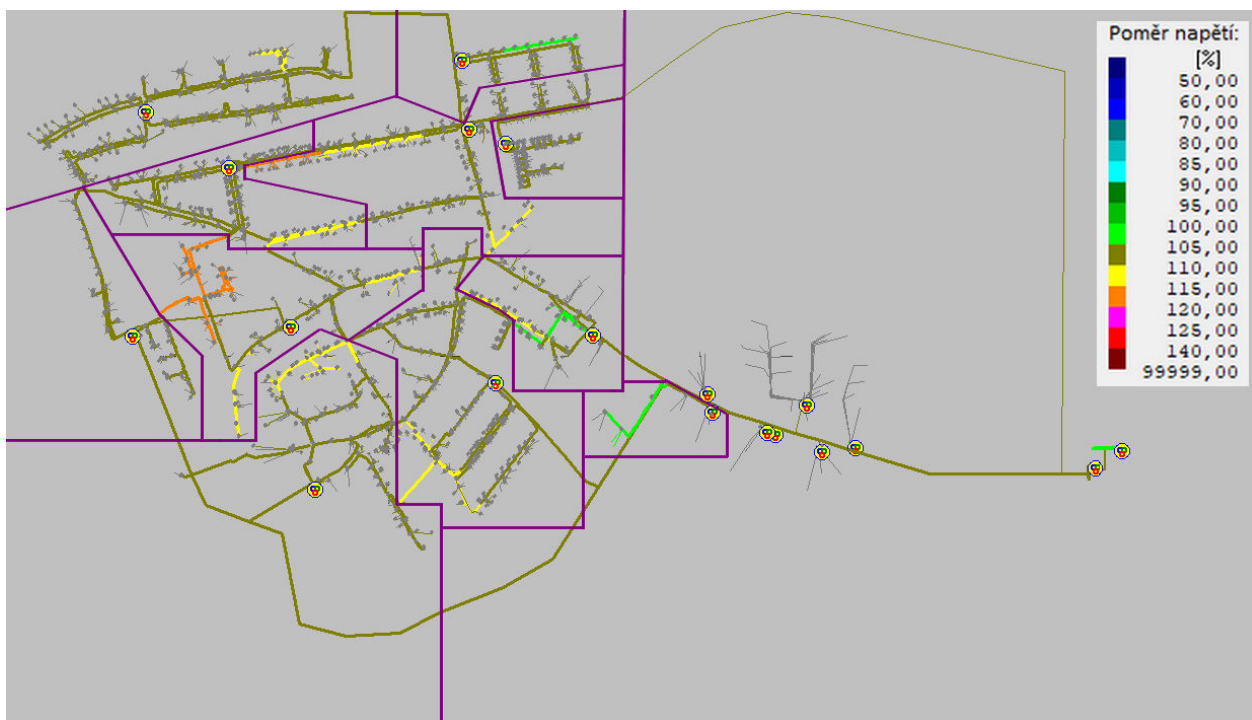


Obr. 6-35 Poměry napětí v modelu DS při injektáži zdrojů o výkonu 5,5 kWp při letním odběru

Jak lze vidět z obrázku 6-35, tak ve dvou oblastech sítě napětí překročilo dovolenou odchylku 10 % od jmenovitého napětí. Maximální napětí v těchto dvou místech bylo až 449 V. Díky tomu se zjistila nejslabší místa v síti, která odpovídají i předchozí studii při postupné penetraci obce FVE. Průměrné napětí na hladině NN se zvýšilo o 4 V na hodnotu 426 V. Na hladině VN napětí dosáhlo hodnoty až 23,149 kV, což je stále vzhledem k velikosti VN nepodstatná změna. Poměrné proudové zatížení v modelované DS zůstalo stále v normě u všech zařízení používaných k přenosu el. energie.

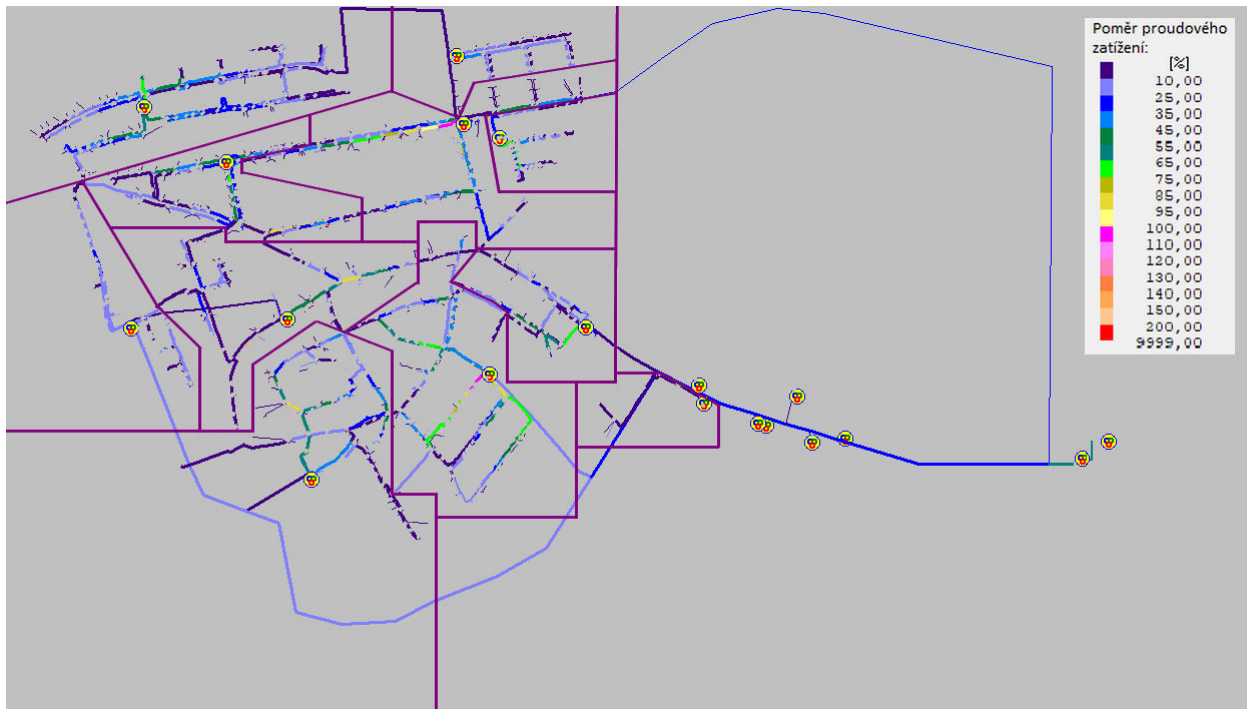
6.5.2 Injektáž zdrojů o výkonu 10 kWp

U injektáže zdrojů představující FVE o instalovaném výkonu 10 kWp na každou budovu v obci byly zjištěny následující příčiny. Maximální napětí v DS na hladině NN bylo 473 V, což je 118,2 % ze jmenovité hodnoty napětí (vysoce převyšující dovolenou mez napětí). Zatímco průměrné napětí 433 V bylo ještě stále v dovolené odchylce od jmenovité hodnoty NN 400 V. Místa, u nichž došlo k přesáhnutí 10 % jmenovité hodnoty, se shodují s posledními fázemi postupné penetrace obce. V DS s VN bylo maximální napětí 23,194 kV, což je 100,4 % z udržovaného napětí. Průměrné napětí na hladině VN je 13,152 kV (100,2 % udržovaného napětí).



Obr. 6-36 Odchylky od jmenovitého napětí v modelu DS při injektáži zdrojů o výkonu 10 kWp

Při dodávaném činném výkonu 8 840,0 kW z FVE nastalo v blízkosti transformátorů proudové přetížení vedení. U pěti transformátorů napájející domácnosti v obci bylo překročeno maximální dovolené proudové zatížení.



Obr. 6-37 Proudové zatížení v modelu DS při injektáži zdrojů o výkonu 10 kWp

7 NÁVRH ÚPRAV SÍTĚ

Následující kapitola se bude věnovat úpravám pro zvýšení možnosti vyvedení výkonu z FV zdrojů. Především v místech, kde byla v předchozí kapitole v namodelované elektrizační síti zjištěna slabá místa. Jedná se tedy o rozvodnou elektrizační síť NN, protože na hladině VN bylo vše v pořádku i při nejvyšší dodávce výkonu z FVE.

7.1 Změny topologie napájení odběrných míst

Elektrizační síť NN v obci je rozdělena do několika oblastí, které mají jednu napájecí trafostanici. Největší změny napětí při zátěži nebo dodávce el. energie jsou ve vzdálenějších místech od napájecí trafostanice. Stávající síť je provozována radiálně a z toho důvodu se tyto místa nachází na druhém konci vedení od napájecího transformátoru.

Na obrázku 5-3, kde je zobrazeno napětí ve stávající DS, mají tyto slabá místa nejmenší napětí. Postupným přidáváním FV zdrojů do těchto míst se napětí v těchto místech zvýší. Plošně se napětí v DS zlepší díky rovnoměrně rozloženému dodávanému výkonu z decentralizovaných zdrojů nepřesahující odběr obce. Ovšem při příliš velké dodávce el. energie z FV zdrojů v těchto slabších místech způsobí zvýšení napětí nad dovolenou mez. Tento nárůst napětí je s postupným přidáváním zdrojů do sítě poměrně rychlý. Tento jev můžeme pozorovat od páté fáze penetrace. I při hromadné injektáži zdrojů v obci o výkonu 5,5 kWp je v letním období překročeno dovolené napětí v těchto nejslabších místech rozvodné sítě. Při hromadné injektáži zdrojů o stejném instalovaném výkonu lze nejlépe pozorovat slabá místa v síti. Po malé úpravě ve stávající topologii DS obce, která je na obrázku 5-4, spočívající v přerozdělení těchto nejslabších míst do oblastí napájené z jiného transformátoru, než byly doposud. Tato změna v topologii sítě napájení odběrných míst je zobrazena na obrázku níže.



Obr. 7-1 Upravená topologie distribuční soustavy zvolené obce

Po úpravě topologie oblastí napájených z různých trafostanic došlo k zlepšení napěťových poměrů v této oblasti. U hromadné penetraci obce FV zdroji o výkonu 5,5 kWp se v letním období změnilo maximální napětí v síti z 449 V na 436 V a průměrné napětí se zmenšilo o 1 V na hodnotu 425 V. Při postupné penetraci obce FV zdroji při páté fázi, kdy nastalo překročení dovoleného napětí, by změny v topologii pomohly pouze v zimním období a to jen na hranici dovoleného napětí. Maximální napětí v síti se snížilo z napětí 481 V až k hraniční dovolené hodnotě napětí 439 V. Průměrné napětí v DS obce po úpravě topologie páté fáze penetrace bylo 422 V, což je o 1 V míň než před úpravou slabých míst. V letních měsících při snížené spotřebě by maximální napětí jistě překročilo dovolené napětí, jelikož je i v zimním období při maximálním odběru dodávané el. energie z FVE těsně na hranici 440 V.

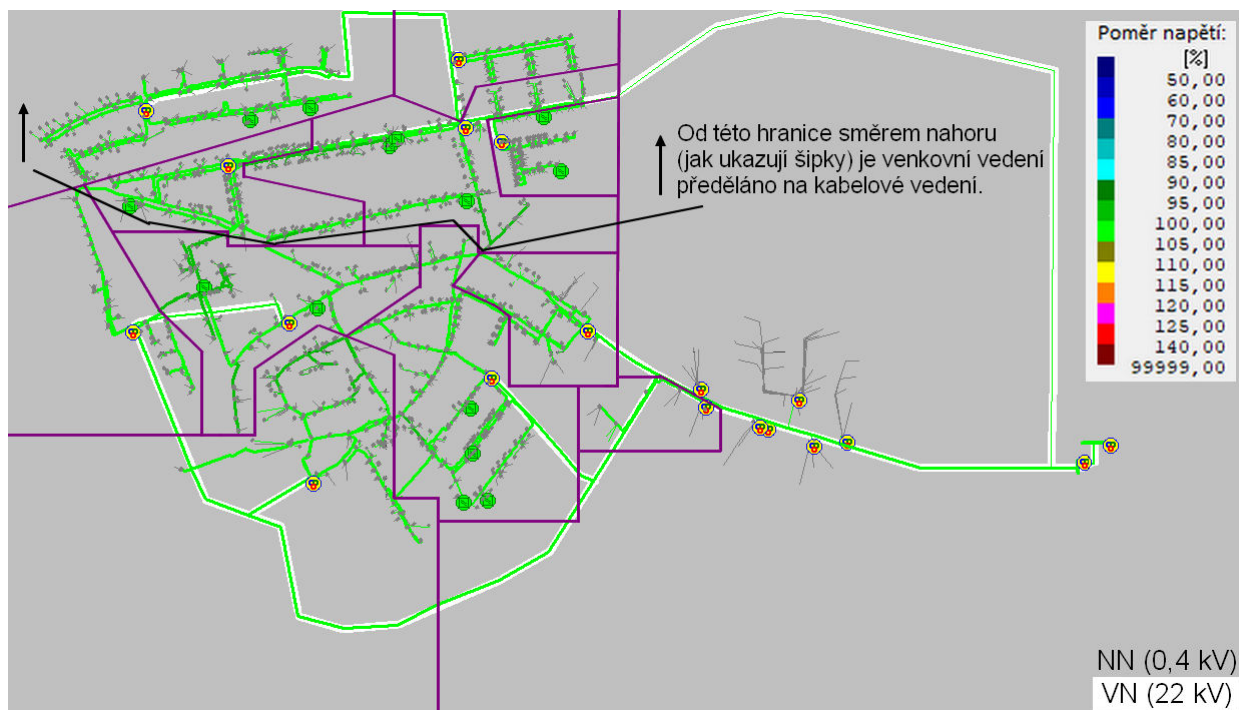
7.2 Kabelizace

Další variantou pro zvýšení možnosti vyvedení výkonu je výměna venkovního vedení za kabelové vedení daného typu. V dnešní době se u nových vedení běžně používají na hladině NN kabelové vedení NAYY-J 4x150 (NAYY-J 4x240). Výhodou je umístění jednožilového kabelu pod zem, což zaručuje zanedbatelné působení klimatických vlivů na vodič. Kabelizace byla pro tuto práci zjednodušena – reálně by byla délka vedení větší z důvodu zasmyčkování a drobných změn při trasování oproti venkovnímu vedení.

7.2.1 Částečná kabelizace

Při výměně starých venkovních vedení na hladině NN dochází ke kabelizaci vedení. Jelikož je prakticky nemožné vyměnit veškeré vedení v obci současně, tak se provádí postupně. V nejbližší době je plánovaná kabelizace směrem na sever od ulice Hlavní kabelovým vedením typu NAYY-J 4x150. Jedná se přibližně o nahrazení poloviny z celkového počtu venkovních vedení v obci (obrázek 7-2).

Při stávajícím stavu sítě se v zimním období navýší minimální hodnotu napětí na 391 V z původních 384 V. Maximální hodnota 418 V se nezmění a průměrná hodnota napětí v DS se zvýší o 1 V na 407 V. Díky zmenšení ztrát ve vedení o téměř 5 kW se celkové ztráty v rozvodné síti snížily na 76,5 kW. U letního odběru při současném stavu sítě se minimální napětí zvýší z 398 V na hodnotu 403 V. Maximální napětí se nezmění a průměrné napětí v síti se jako u zimního odběru navýší o 1 V na napětí 412 V. Ztráty ve vedení se také (jako při zimním odběru) snížily přibližně o 5 % na 35,8 kW z původních 37,5 kW.



Obr. 7-2 Plánovaná kabelizace směrem na sever od ulice Hlavní

7.2.2 Celková kabelizace

V budoucnu se předpokládá, že na hladině NN budou všechna vedení kabelová. Při stejném provozu a odběru sítě jako je v současné době DS obce by se při zimní i letní spotřebě napětí v síti výrazně nezměnilo od hodnot uvedených při částečné kabelizaci. Pouze ztráty ve vedení se zmenšily o dalších 5 %. Při zimní spotřebě, kdy byl ve stávajícím stavu celkový ztrátový výkon 81,2 kW, je po celkové kabelizaci téměř o 10 % menší 71,7 kW. Stejně tak v letním období, kdy je spotřeba nižší se ztráty zmenšily z 37,5 kW na 34,0 kW.

U postupné penetrace obce FVE v páté fázi, kdy nastalo překročení dovoleného napětí, byla provedena kabelizace celé obce. Ovšem maximální ani průměrné napětí se nezměnilo. Pouze minimální hodnota napětí v síti se z 397 V zvýšila na 409 V. Pokud se k úpravě kabelizace obce přidala i úprava topologie sítě, tak podle očekávání maximální napětí kleslo na 439 V (stejně jako bez kabelizace). Minimální napětí v síti se tentokrát zvýšilo na 412 V a průměrné napětí v DS kleslo o 2 V (pouze s úpravami topologie se snížilo o 1 V) na 421 V. Při letní spotřebě obce by nicméně kabelizace s úpravami topologie nestačila, protože maximální napětí v síti by opět vzrostlo až na hodnotu 447 V.

Kabelizace byla také provedena pro situaci, kdy je celá obec osazena FVE o výkonu 10 kWp. Průměrné napětí v DS obce pokleslo o 2 V na 431 V, ale maximální i minimální napětí v síti zůstalo nezměněné. Napětí v síti tedy stále dosahovalo až 473 V.

7.3 Mřížová síť

Distribuční síť může být kromě paprskovitě a okružně koncipované sítě i mřížová. Mřížová síť má výhodu rovnoměrnějšího rozložení zatížení vedení i transformátorů. Mřížová síť může

být klasická nebo zjednodušená. Klasická mřížová síť vyžaduje, aby tak byla navržena od základu výstavby. V této práci, se uvažuje předělání stávající sítě na zjednodušenou mřížovou síť, kterou lze provést tehdy, kdy jsou připojeny do společné sítě alespoň dva transformátory VN/NN [24]. Při tomto zapojení, se transformátory vzájemně doplňují. V síti se tak zmenší ztráty a zmenší se úbytek nebo přebytek napětí. Mřížová síť je náročnější na provoz oproti radiálně provozované síti, tudíž lze uvažovat, že při jejím provozu by již byla celá obec zkabelizována.

Síť v současné podobě provozovaná jako mřížová by neměla příliš význam, jelikož je stávající stav dostačující a provoz mřížové sítě vyžaduje vyšší provozní náklady. V budoucnosti, když by se skládala síť z velkého počtu decentralizovaných zdrojů, by byla mřížová síť jednou z nejlepších možností, jak zajistit přenos a dodávku v předepsané kvalitě el. energie. Při současných zimních odběrech by se minimální napětí v DS obce zvýšilo z původních 384 V na 399 V. Maximální napětí by zůstalo stejné 418 V a průměrné napětí by se zvýšilo o 3 V na 409 V. Celkové ztráty v elektrizační síti obce by se při zimním odběru snížily o 20 % z 81,2 W na 65,1 W. V letních měsících, kdy je v dnešní době spotřeba menší, se mřížová síť chová stejně, jako při zimní spotřebě.

Při stupňovité penetraci obce FVE v páté fázi penetrace bylo zjištěno, že v letních měsících je napětí v síti nad dovolenou mezí i při celkové kabelizaci a úpravami v topologii sítě. Zamřížováním sítě se maximální napětí v DS obce sníží na vyhovujících 436 V při letním odběru a při zimním odběru se sníží až na hodnotu 431 V. Průměrné napětí v síti je 425 V při nevalnější situaci nižšího letního odběru. Ztráty v elektrizační soustavě se v této páté fázi penetrace při zimním odběru snížily ze 145,1 kW na 86,4 kW.

Celková penetrace obce FVE o stejném instalovaném výkonu 10 kWp je pro DS zatížením, které způsobí překročení dovoleného napětí na více místech v síti. Pomocí rozložení zatížení by měla právě mřížová síť. Při zimním vyšším odběru maximální napětí v síti pokleslo ze 473 V na 439 V, což je těsně pod hranicí dovoleného napětí 440 V. V případě nižší letní spotřeby se toto napětí zvýší opět na více místech mimo dovolenou mez na 444 V. Při uvažování snížení výkonů všech FVE na výkon 8,5 kWp, by napětí v mřížové síti bylo v dovolené odchylce od jmenovitého napětí. Další možnou úpravou by bylo zvětšení průřezu kabelů NAYY-J 4x150 na kabely typu NAYY-J 4x240. Tato změna průřezů kabelových vedení by u DS s FVE 10 kWp snížila maximální napětí v nepříznivější situaci, kdy je odběr v létě nižší, na hodnotu 438 V. Průměrné napětí v DS je 430 V a při zimním odběru 427 V. V porovnání se sítí bez úprav se maximální napětí snížilo při zimním odběru ze 473 V na 433 V a průměrné napětí ze 433 V na 427 V.

7.4 Vyhodnocení jednotlivých úprav sítě

Výše zmiňované úpravy sítě byly provedeny vzhledem k vyvedení co nejvyššího výkonu z FVE instalovaných ve zvolené obci. Zároveň byly brány v úvah úpravy sítě plánované v blízké době (kabelizace) a nejčastěji používané úpravy sítě.

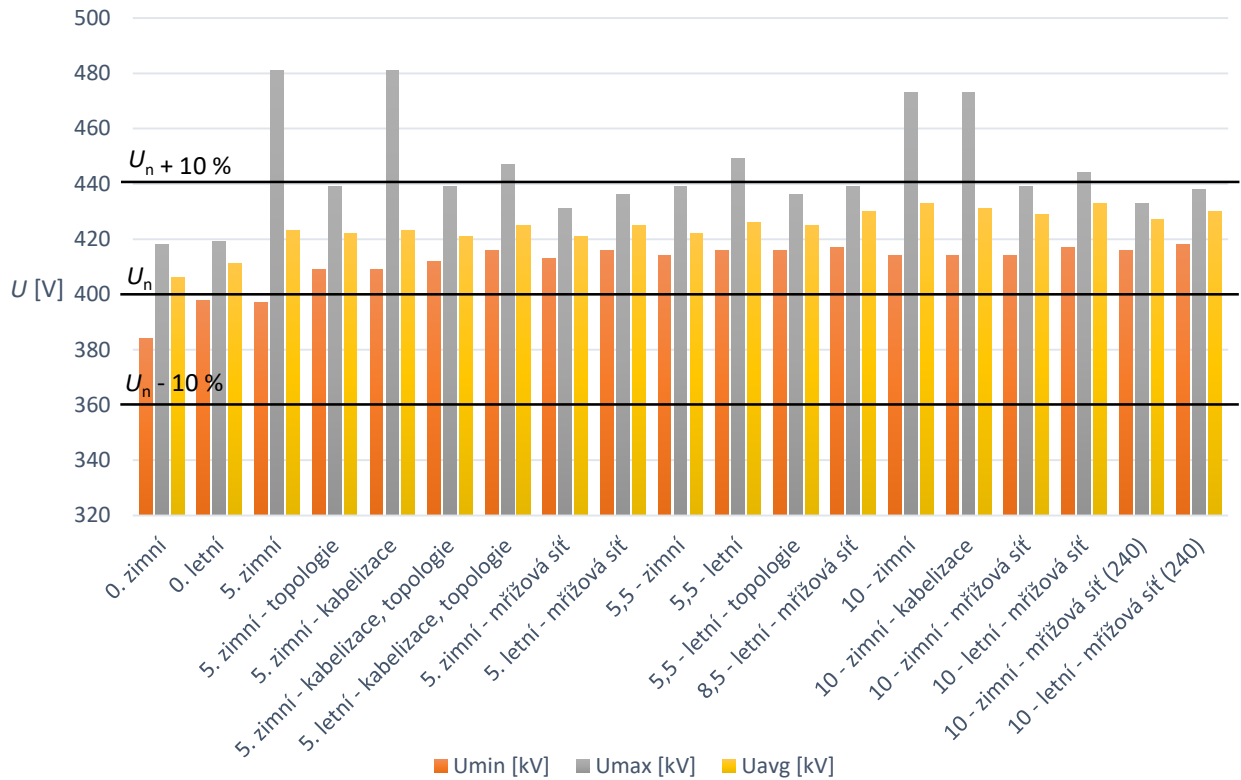
Při postupné penetraci obce FVE bylo zjištěno, že překročení dovolených mezí nastane v páté fázi penetrace. Napětí na hladině NN vzrostlo nad dovolenou odchylku na třech místech až na 481 V při zimním odběru elektřiny. Změna topologie sítě v těchto místech pomohla snížit maximální napětí na hraniční hodnotu 439 V, která by při menší letní spotřebě v síti opět vzrostla. Samotná kabelizace obce neměla vliv na maximální hodnotu napětí v těchto postižených místech. Pouze na na minimální hodnotu v DS, která se zvýšila díky kabelizaci. Případné změny topologie

napájení odběrných míst v kabelizované DS obce pomohly pouze v případě maximálního odběru, ale při letním nižším odběru opět bylo maximální napětí o 7 V nad hraniční hodnotou NN 440 V. Další variantou byl mřížový provoz sítě. Tato úprava byla již úspěšná a maximální napětí v síti NN byla i při letním odběru 436 V, což je v dovolené odchylce od jmenovitého napětí. Proudové zatížení vedení i transformátorů bylo i při dodávaném výkonu 5 118,4 kW z FVE pod maximálním dovoleným proudem zařízení. Pátá fáze penetrace po navržené úpravě sítě již vyhověla z hlediska kontrolovaných parametrů sítě.

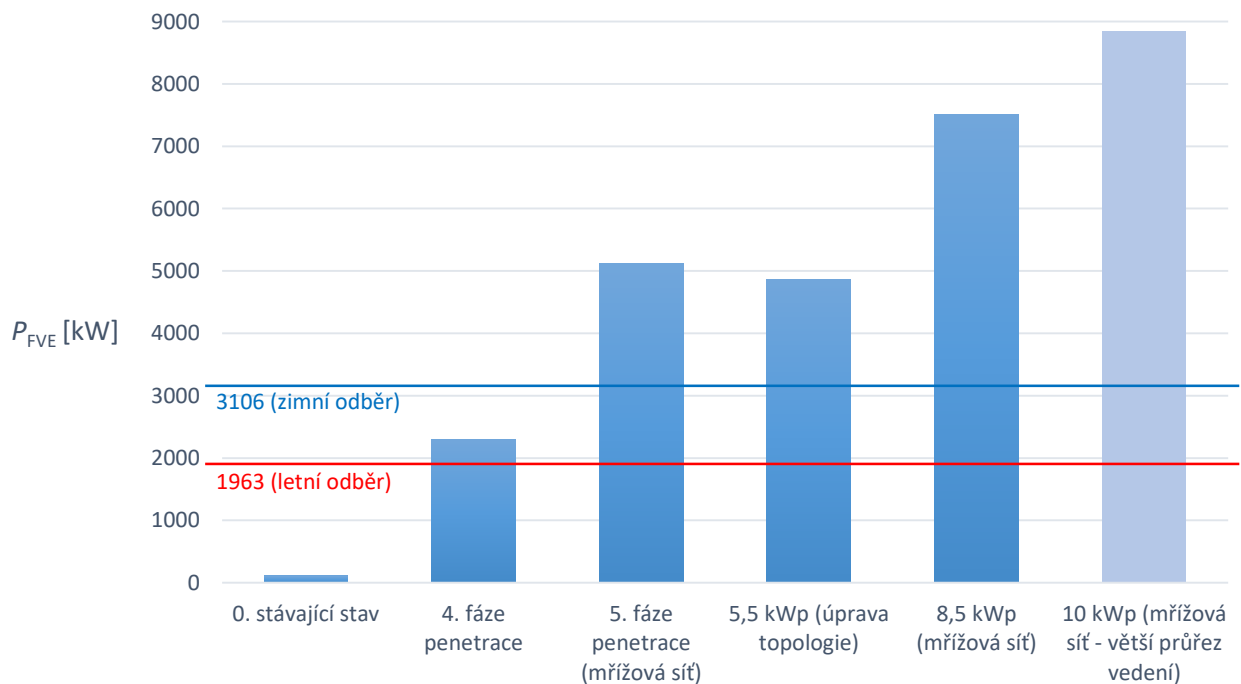
U kompletní injeckáže obce FVE o stejném instalovaném výkonu 5,5 kWp byly překročeny meze napětí na dvou místech sítě při menším letním odběru. Zde stačila pouze úprava topologie sítě, která spočívala v rozdělení nejslabších míst tak, aby byly napájeny z jiných napájecích míst. Maximální napětí v síti NN poté bylo 436 V a průměrné 425 V při menším odběru elektřiny v obci. Proudové zatížení bylo v celé DS v povolených mezích. Při posouzení zmíněných hodnot vyhověla tedy i tato varianta při uvážení nejhoršího scénáře.

Při kompletní injeckáži obce FVE o výkonech 10 kWp nastalo překročení dovolených mezí nejen u napětí, ale i u proudového zatížení vedení a transformátorů. Jelikož bylo napětí na více místech nad dovolenou mezí, tak by úprava topologie sítě nepomohla. Dodávaný výkon z FVE je 8840 kW. Kvůli proudovému přetížení byla provedena úprava vedení na kabelové o průřezu 150 mm² a síť provozována jako zjednodušená mřížová. Při zimním odběru kleslo maximální napětí v síti NN ze 473 V na 439 V, přičemž při snížení spotřeby na letní minimální odběr bude dosahovat 444 V. Napětí v síti NN tedy bude na některých místech stále překročovat dovolenou odchylku. Při těchto zmíněných navrhovaných úpravách by vyhověla DS obce pouze při snížení instalovaného výkonu všech FVE z 10 kWp na 8,5 kWp. Dále by tedy připadalo v úvahu zvětšit průřez kabelů vedení ze 150 mm² na 240 mm². Tato úprava už vyhověla normám, které byly kontrolovány, když opomineme proudové přetížení některých transformátorů. Maximální napětí v síti NN při zimním odběru bylo 433 V a při letním odběru 438 V. Proudové zatížení se díky mřížovému provozu sítě rovnoměrně rozložilo mezi vedení tak, že nebyly přetěžovány. Pouze u některých transformátorů nastávalo proudové přetížení.

Na následujícím grafu 7-3 je zobrazeno napětí o jmenovité frekvenci při navržených úpravách sítě ve vybraných variantách. Pod tímto grafem jsou zobrazeny hodnoty výkonu (obrázek 7-4), které je možné i díky úpravám sítě dodávat do DS obce, když neuvažujeme veškeré podmínky současných PPDS (změnu napětí po připojení zdroje). Světle modrou je vyznačena varianta, která jako jediná ze všech uvedených nevyhovuje proudovému zatížení transformátorů.



Obr. 7-3 Napětí na hladině NN v DS obce při úpravě sítě



Obr. 7-4 Instalovaný výkon všech FVE v DS obce umožňující vyvedení maximálního výkonu

8 ANALÝZA HARMONICKÝCH NAPĚTÍ

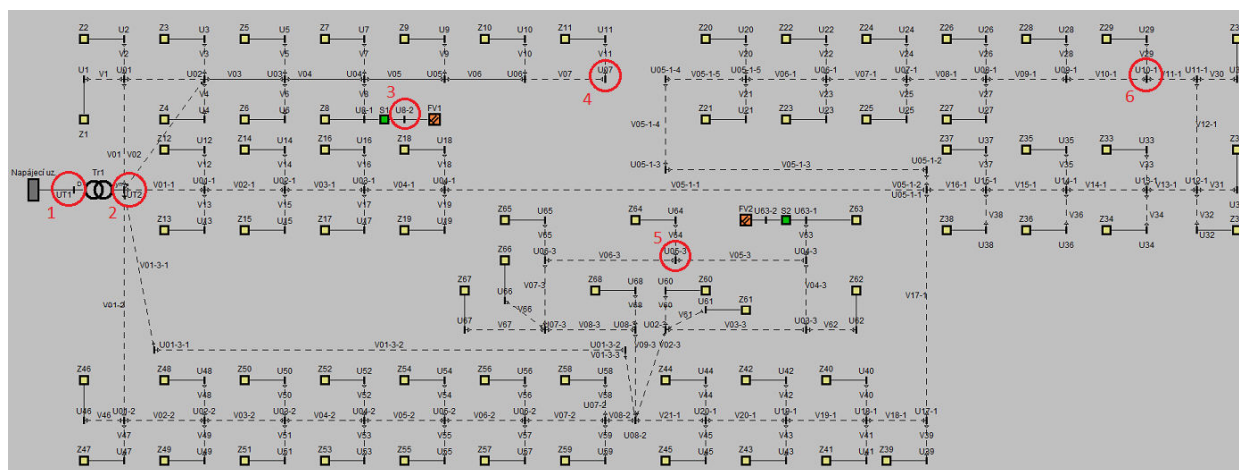
Pro posouzení zpětných vlivů byla ve výpočetním programu DNCalc namodelována jedna z oblastí zkoumané DS obce (jelikož se nejednalo o hlavní cíl této práce a také nebylo možné pracovat v tomto programu z důvodu karantény). Tato část je napájena transformátorem VN/NN o výkonu 630 kVA. Zkratový výkon v rozvaděči NN trafostanice je 6 824 kVA. Odběry jsou zadány pro zimní období, kdy je v současnosti nejvyšší spotřeba elektriny.

Do FV zdrojů el. energie v namodelované síti byly zadány hodnoty lichých harmonických proudů 3., 5., 7. a 15. řádu. Podle studie Vyhodnocení parametrů kvality napětí ve VN a NN distribučních sítích s rozptýlenou výrobou od pana Ing. Martina Kašpírka, Ph.D. byly přejaty vstupní hodnoty pro měniče u FVE odpovídající nejvíce síti číslo čtrnáct. Zadané řády harmonických proudů byly zvoleny z toho důvodu, jelikož právě ty mají největší vliv u FVE [11]. Bez ohledu na použití typu střídače, který bude využívat jakákoliv FVE, nesmí být na napěťové hladině NN a VN překročeny následující limity pro vybrané řády harmonických napětí:

Tab. 8-1 Limity pro vybrané řády harmonických napětí [2]

Řád harmonické	Harmonické napětí U_h [%]
3.	5,0
5.	6,0
7.	5,0
15.	0,5

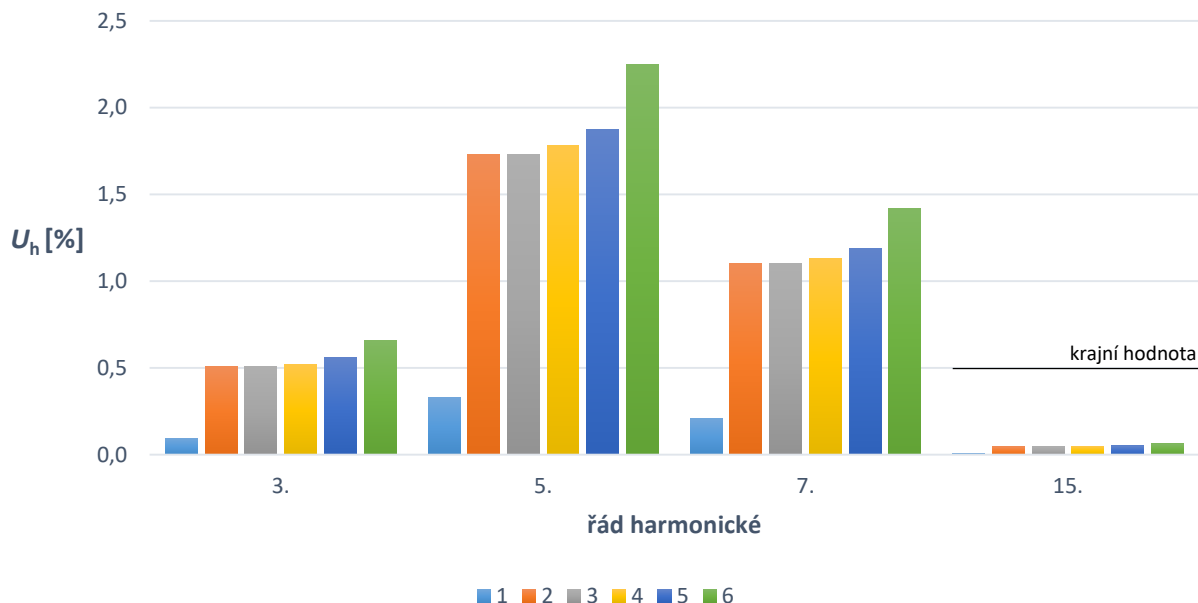
Při porovnávání hodnot harmonického napětí budou posuzovány místa vyznačená a očíslovaná na obrázku 8-1. Tato namodelovaná síť odpovídá radiálnímu provozu, což také koresponduje se skutečným stavem sítě.



Obr. 8-1 Současný stav vybrané sítě namodelované v programu DNCalc

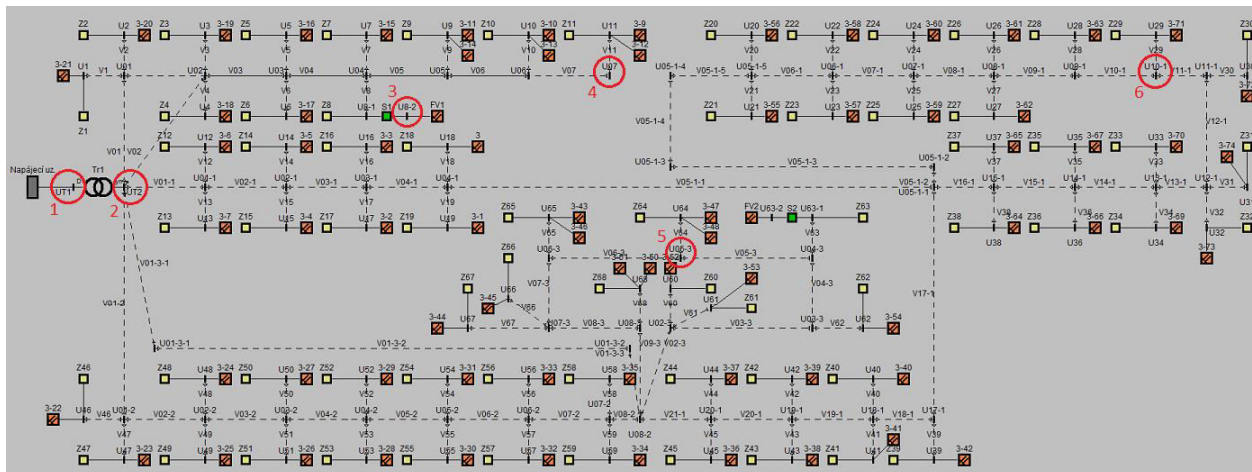
Vyznačené body 1 a 2 byly vybrány z důvodu zjištění poměrů harmonických napětí před a za transformátorem VN/NN. Třetí bod měření byl zvolen v místě připojení jedné z FVE. Zkratový výkon v místech připojení FVE činí 2 946 kVA a 3 225 kVA. Zbylé tři body byly umístěny na nejvzdálenější místa od napájecího transformátoru. V těchto šesti vybraných uzlech

elektrizační síť je harmonické napětí tak nízké, že do obrázku 8-2 nejsou znázorněny krajní hodnoty kromě 15. harmonické.



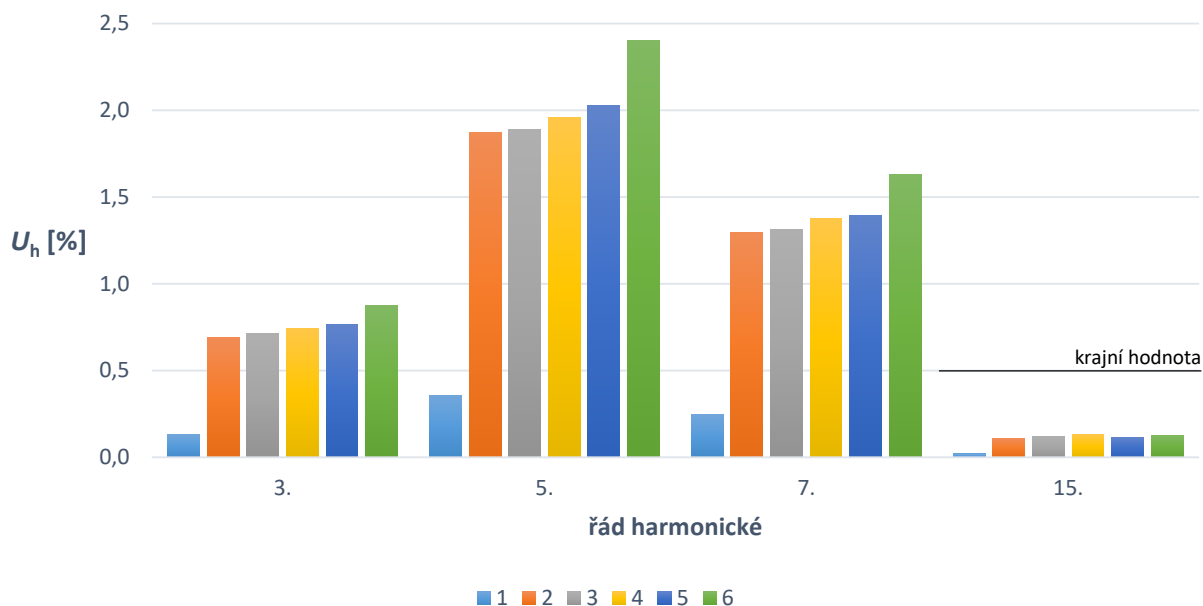
Obr. 8-2 Harmonická napětí v různých místech sítě při stávajícím stavu DS

Dále byly přidány FVE do namodelované sítě podle vypracované penetrace obce FVE (obrázek 8-3). Jedná se tedy o FVE umístěné na střechách budov ve zkoumané oblasti s instalovanými výkony 25,6 kWp, 10 kWp, 5 kWp, přičemž nejčastěji o výkonu 5,5 kWp. Maximální možný dodávaný výkon do sítě z těchto 74 zdrojů je 716,8 kW. Posuzovaná místa z hlediska harmonických napětí zůstala nezměněna od předchozí varianty.



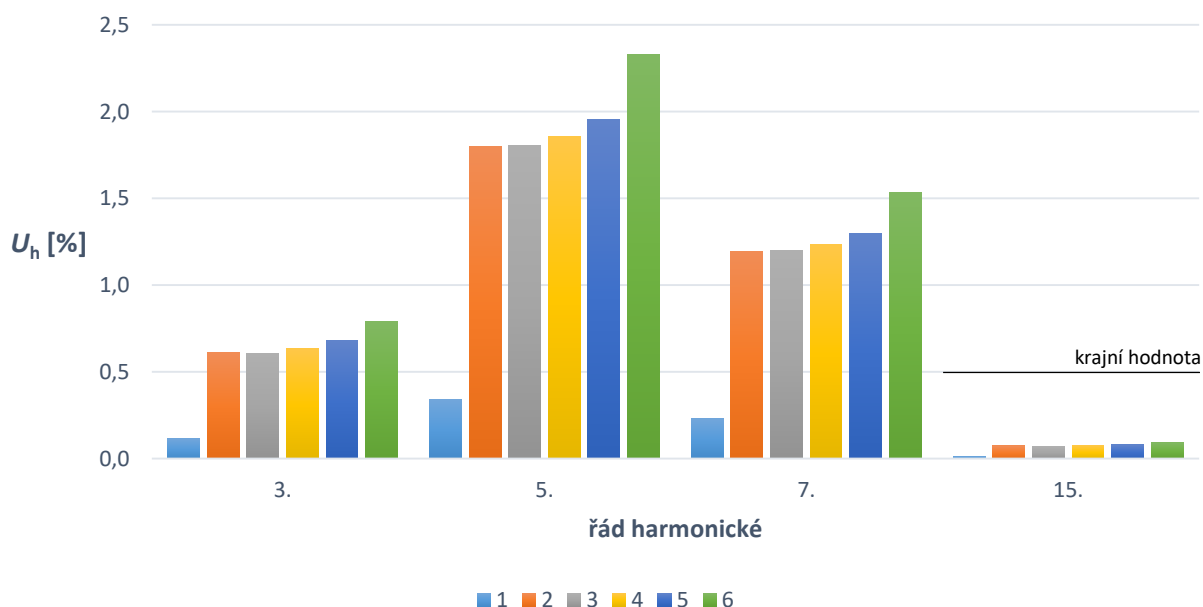
Obr. 8-3 Posuzovaná síť s přidáními FVE v programu DNCalc

Graf 8-4 zobrazuje, že i instalování FVE na všechny střechy budov ve vybrané oblasti nezpůsobí překročení mezních hodnot. Mezní hodnoty z důvodu velikosti oproti vypočítaným hodnotám nebyly znázorněny až na 15. řád harmonického napětí.



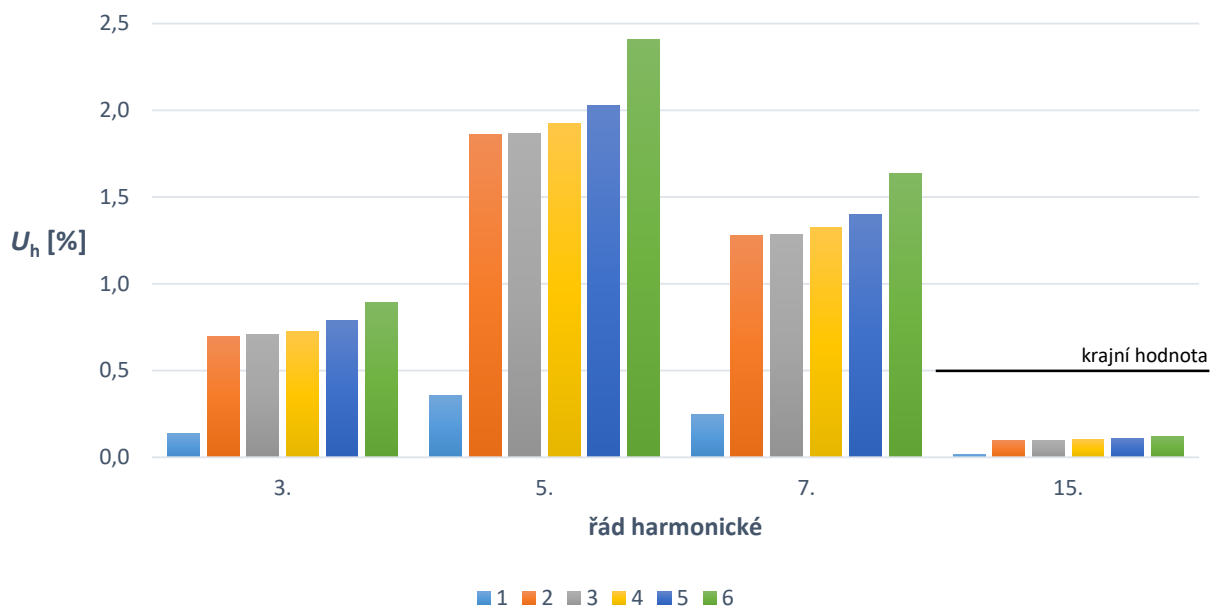
Obr. 8-4 Harmonická napětí v různých místech sítě při postupné penetraci obce FVE

U FVE na všech využitelných střechách ve vybrané oblasti namodelované v programu DNCalc byla vyzkoušena také varianta, kdy mají tyto zdroje el. energie stejný instalovaný výkon. Nejprve byla otestována možnost, kdy FVE mají shodný instalovaný výkon 5,5 kWp a poté s výkonem 10 kWp. Při injektáži FV zdrojů o výkonech 5,5 kWp je celkový dodávaný výkon do sítě 407 kW. Vliv harmonických napětí ve zvolených uzlech sítě nepřekračuje ani při této variantě limity dané normou (obrázek 8-5).



Obr. 8-5 Harmonická napětí v různých místech sítě při injektáži zdrojů o výkonu 5,5 kWp

Poslední zkoumanou variantou byla situace, kdy všechny FVE mají instalovaný výkon 10 kWp. Tyto zdroje v namodelované rozvodné síti dodávají svůj maximální možný výkon, celkově tedy 740 kW. Hraniční hodnoty harmonických napětí nejsou i při této variantě překročeny.



Obr. 8-6 Harmonická napětí v různých místech sítě při injeztáži zdrojů o výkonu 10 kWp

Při analýze harmonických napětí nebyl v této zvolené části sítě obce identifikován problém. Nejspíše díky tomu, že v místech připojení FVE byl velký zkratový výkon, který je jedním z nejvíce ovlivňujících parametrů pro harmonická napětí. Namodelovaná síť je ve zvolené obci jedna z nejnovějších a zároveň nejstabilnějších, jak bylo zjištěno v předchozí kapitole při zkoumání odchylek napětí od jmenovité hodnoty a proudového zatížení [12]. Pro přesnější výsledky by bylo vhodné provést validaci hodnot optimálním měřením.

9 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala především slabými místy v DS při penetraci obce FVE. Nejprve se zabývá teorií vázanou ke zdrojům elektrické energie, jako jsou fotovoltaické elektrárny instalované na střeších budov. Konkrétně podmínkami pro připojení zdrojů do distribuční soustavy, přehledem zpětných vlivů působící na síť NN a výpočetními programy využitelnými pro zjištění slabých míst v elektrizační síti. V praktické části byl vytvořen model stávající distribuční sítě Moravan u Brna na základě reálných parametrů sítě poskytnutých firmou E.ON Distribuce, a.s. V němž byla provedena penetrace FVE o různých výkonech v několika úrovních a stejných výkonech. Poté byly podle zjištěných slabých míst při penetraci provedeny úpravy sítě tak, aby bylo možné vyvést co největší výkon z FVE.

V první kapitole byly charakterizovány základní pravidla pro provoz a podmínky připojení výroben v distribuční soustavě podle PPDS a vyhlášky č. 16/2016 Sb. Byla popsána charakteristika elektrického napětí, kde byly uvedeny dovozené odchylky napětí a kmitočtu a zkušební metody kvality elektrické energie za normálních provozních podmínek. Tyto zkušební metody byly popsány pro dovozený rozsah napájecího napětí v různých hladinách napětí, míru vjemu flikru, harmonické zkreslení napětí a úroveň napětí signálu pro přenos informací. V závěru této kapitoly byla objasněna problematika jalových výkonů přicházející s růstem malých decentralizovaných zdrojů, které souvisí s udržováním požadovaného napětí v síti.

V současné době při provozu distribuční soustavy je jedním ze způsobů ochrany kvality a spolehlivosti dodávky elektrické energie omezení zpětných vlivů od zátěží i zdrojů. Případný budoucí rozmach střešních fotovoltaických elektráren v obcích by mohl způsobit vysoký fotovoltaický potenciál v síti, který by byl mnohem vyšší než spotřeba. To by mělo za následek vysoké zpětné dodávky elektrické energie do distribuční sítě. Pro zhodnocení nepříznivých zpětných vlivů byly popsány mezní podmínky změny napětí, harmonické proudy a ovlivňování zařízení HDO.

Po dohodě se společností E.ON, kde byla vypracovávána praktická část, byl zvolen pro vyhodnocení ustáleného chodu program DAISY Bizon Projektant a pro porovnání výsledků a posouzení zpětných vlivů program DNCalc.

Pro studii byla zvolena obec Moravany u Brna s přibližným počtem 3 000 obyvatel, kde se nachází převážně sedlové střechy, na které lze instalovat fotovoltaické elektrárny. Struktura a stav stávající sítě byl popsán a namodelován až po hladinu napětí 22 kV. V současné době je na vybraném území připojeno do distribuční soustavy patnáct fotovoltaických elektráren o celkovém instalovaném výkonu 116 kW. Stávající síť je dostatečně dimenzovaná a splňuje veškeré požadavky PPDS.

Postupná penetrace obce FVE byla rozdělena do dvanácti fází, které se snaží vystihnout aktuální situaci v ČR z hlediska budoucí výstavby FVE. V jednotlivých fázích byly podrobně popsány změny napětí a proudů v DS obce. Z této studie bylo zjištěno, že při uvažované čtvrté fázi penetrace, kdy je dodáván z FVE umístěných na 30,2 % střeších budov výkon 2 293,5 kW, nenastalo překročení dovolených mezí. Tento instalovaný výkon FV zdrojů přesahuje minimální letní spotřebu obce. V další fázi penetrace už ovšem došlo k překročení dovolené odchylky od jmenovitého napětí na některých místech sítě.

Dále byla také provedena kompletní injeckáž FVE o stejném výkonu na veškeré použitelné střechy budov. Při instalovaném výkonu 5,5 kWp u všech FVE byly parametry sítě v pořádku

pouze při maximálním zimním odběru. Při nižším letním odběru byly meze napětí překročeny na dvou místech v síti. U vyšších instalovaných výkonů FVE byly kritéria sítě nad dovolenou mezí na více místech sítě. Z těchto obou variant byly zjištěny slabá místa v elektrizační síti, v nichž byly překročeny dovolené meze napětí a proudů o jmenovité frekvenci.

Po zjištění vlivů FVE přidanych do DS obce byly navrženy úpravy sítě, které braly v úvahu i plánovanou změnu venkovního vedení za kabelové, také možnou změnu v napájení odběrných míst z jiné trafostanice a provoz soustavy při zjednodušené mřížové síti. Díky změnám v topologii sítě (napájení slabých míst z jiné trafostanice) bylo možné vyvést výkon 4 862 kW z FVE o výkonu 5,5 kWp. Kdyby byla v obci provozována elektrizační soustava jako zjednodušená mřížová síť zcela zkabelizovaná, tak by bylo možné do sítě instalovat FVE o výkonu 8,5 kWp a dosáhnout dodávaného výkonu až 7 514 kW. Zjednodušená mřížová síť by umožnila splnění pravidel pro provoz sítě i pro pátou fázi penetrace, kdy se na 41,6 % budovách v obci nachází FVE. Do DS je po této úpravě provozování sítě možné dodávat výkon 5 118 kW. Nejvíce se podařilo do sítě obce vyvést výkon 8 840 kW z FVE o instalovaném výkonu 10 kWp, nacházející se na každé využitelné střeše v obci. Všechny kontrolované parametry byly v normě, kromě přetížení některých transformátorů. Tohoto výkonu se podařilo docílit při provozování zjednodušené mřížové sítě tvořené kabelovým vedením o průřezu 240 mm².

Ze zpětných vlivů byl v programu DNCalc vyhodnocen pouze okrajově vliv harmonických napětí v jedné z částí DS obce (jelikož se nejednalo o hlavní cíl této práce). Tato část sítě napájená transformátorem o výkonu 630 kVA vyhovovala stanoveným mezím pro ověřovaná harmonická napětí 3., 5., 7. a 15. řádu i při přidání FVE. Dohromady byly vyzkoušeny tři varianty s přidávanými zdroji do současné sítě. Posuzované harmonické napětí se po přidání zdrojů do sítě příliš nezměnilo vzhledem k hodnotám, které nesmí být překročeny. Simulace harmonických vyšších řádů vycházejících z teoretických podkladů (ne však naměřených hodnot) ukazuje, že problém s růstem FVE v této části sítě není. Z časových důvodů nebylo možné tuto problematiku více rozvinout, jelikož po čas karantény nebylo možné pracovat ve výpočetním programu DNCalc.

Tato práce nepokrývá všechna v praxi vyžadovaná vyhodnocení, tedy vliv zpětných vlivů na celou síť, kde by byly především podrobněji popsány harmonická napětí, flickr a ovlivnění zařízení HDO v celé DS při vysokém počtu fotovoltaických zdrojů. Vyhodnocení tohoto rozsahu je mimo časové možnosti této práce a mohou být rozvinuty v dalších navazujících studiích.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Centrální a decentrální výroba elektřiny a tepla. *EGÚ Brno, a. s.* [online]. 2017 [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <https://www.egubrno.cz/wp-content/uploads/2018/03/EFEKT-centralni-a-decentralni-vyroba.pdf>
- [2] ČSN EN 50160 ed. 3: Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí.
- [3] Daisy spol. s.r.o. DAISY Bizon Projektant. *Daisy* [online]. 2017 [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://daisy.cz/web/produkty/daisy-bizon-projektant/>
- [4] E.ON Distribuce, a. s. *PPDS 2018 – Příloha č. 4* [online]. 2018 [cit. 2019-10-25]. Dostupné z: <https://www.eon-distribuce.cz/sites/default/files/2019-01/p%C5%99%C3%ADloha%204%20Pravidla%20pro%20paraleln%C3%AD%20provoz%20v%C3%BDroben%20%20akumula%C4%8Dn%C3%ADch%20za%C5%99%C3%ADzen%C3%AD%20-11%202018.pdf>
- [5] E.ON Distribuce, a. s. *Pravidla provozování distribuční soustavy* [online]. 2016 [cit. 2019-10-25]. Dostupné z: <https://www.eon-distribuce.cz/sites/default/files/2019-01/Pravidla%20provozov%C3%A1n%C3%AD%20distribu%C4%8Dn%C3%AD%20soustavy%20E.ON%20Distribuce%2C%20a.s.%20%20E2%80%93%202005%202016%20%282%29.pdf>
- [6] EGC-EnerGoConsult ČB s.r.o. DNCalc: analýza poměrů v DS. *EGC - EnerGoConsult ČB s.r.o. - dodavatel řešení pro energetiku* [online]. 2019 [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: <https://www.egc-cb.cz/produkty-pro-energetiku/software/dncalc-analyza-pomeru-v-ds.html>
- [7] Energetická legislativa. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. 2020 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/energeticka-legislativa/>
- [8] ERÚ. *Energetický regulační úřad* [online]. 2014-2019 [cit. 2019-12-05]. Dostupné z: <http://www.eru.cz/cs/>
- [9] FARANADIA, A.H, OMAR, A.M., NOOR, S.Z. Power Quality Assessment of Grid Connected Photovoltaic System on Power Factor. *2018 AEIT International Annual Conference* [online]. AEIT, 2018, s. 1-6 [cit. 2019-12-25]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8577408>
- [10] Informace poskytl Tomáš Kolacia. E.ON Distribuce, a.s. Brno, 2020.
- [11] KAŠPÍREK, M., JIŘIČKA, J., MIKULÁŠ, L. *Vyhodnocení parametrů kvality napětí ve VN a NN distribučních sítích s rozptýlenou výrobou*. Konference ČK CIRED 2017. Tábor, 2016.
- [12] KAŠPÍREK, M., MEZERA, D., PROCHÁZKA, K. *Analýza harmonických napětí v distribuční síti NN*. Konference ČK CIRED 2014. Tábor, 2014.
- [13] Mapy Google. *Google.com* [online]. 2019 [cit. 2019-12-25]. Dostupné z: <https://maps.google.com>
- [14] MASTNÝ, P. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [15] Nahlížení do katastru nemovitostí. *Český úřad zeměměřický a katastrální* [online]. 2020 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://nahlizeniidokn.cuzk.cz/VyberKatastrMapa.aspx>

- [16] Nová zelená úsporám. *Státní fond životního prostředí ČR* [online]. 2020 [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <https://www.novazelenausporam.cz/>
- [17] OPPIK – Informační portál o dotacích pro podnikatele a Operační program Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost. *Enovation s.r.o.* [online]. 2020 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.oppik.cz/>
- [18] PNE 33 3430-1 ed. 3: Parametry kvality elektrické energie: Harmonické a meziharmonické
- [19] Příčiny solárního boomu v ČR. *oEnergetice.cz - denní zpravodajství z energetiky* [online]. 2015 [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/priciny-solarniho-boomu>
- [20] PTÁČEK, J., PROCHÁZKA, K. *Bilance jalových výkonů v sítích ES ČR*. Sekce č. 4, referát č. 6. Konference ČK CIRED. Tábor, 2019.
- [21] Rovnodennost a slunovrat. *Axina* [online]. 2015 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.axina.cz/blog/1-astronomicky-koutek/141-rovnodennost-a-slunovrat.html>
- [22] STUHLÝ, J., VRAMBA, J. Analyses of power quality and voltage variation of photovoltaic power plant connected into 22 kV public grid. *2013 13th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)* [online]. Wroclaw, 2013, s. 48-51 [cit. 2019-12-25]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6737881>
- [23] ŠTEFEK, M. *Potencionální produkce elektrické energie ze střešních fotovoltaických elektráren v obci do 3000 obyvatel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. 74 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Paar, Ph.D.
- [24] TOMAN, P. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [25] Topinfo s.r.o. *Vyhláška č. 16/2016 Sb. ze dne 13. ledna 2016 o podmínkách připojení k elektrizační soustavě* [online]. 2001-2019 [cit. 2019-12-05]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/docu/predpisy/download/V16-2016.pdf>
- [26] VÁPENÍK, R. Regulace napětí v distribuční soustavě vn a nn. *Elektrorevue*. 2011, 13 (3). ISSN 1213-1539 [online]. 2011 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <http://elektrorevue.cz/file.php?id=200000599-5a5255b4c5>
- [27] Velká fotovoltaika se již v ČR obejde bez dotací. *TZB-info* [online]. 2019 [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/18959-velka-fotovoltaika-se-jiz-v-cr-obejde-bez-dotaci>
- [28] Vliv sklonu a orientace. *EkoWATT – centrum pro obnovitelné zdroje a úspory energie* [online]. 2008 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://fotovoltaika.ekowatt.cz/vliv-sklonu-orientace.php>
- [29] WEBHOUSE, s.r.o. *Historie. Moravany, Oficiální web obce* [online]. 2019 [cit. 2019-12-05]. Dostupné z: <http://www.moravanyubrna.cz/historie/d-1087/p1=52>

SEZNAM PŘÍLOH

A	PARAMETRY DS OBCE PŘI STÁVAJÍCÍM STAVU A POSTUPNÉ PENETRACI FVE	77
B	PARAMETRY DS OBCE PŘI POSTUPNÉ PENETRACI FVE.....	78
C	PARAMETRY DS OBCE PŘI INJEKTÁŽI FVE O STEJNÉM INST. VÝKONU.....	79

A Parametry DS obce při stávajícím stavu a postupné penetraci FVE

							NN						VN					
období	změny	varianta	P_{inst} [kWp]	P_{FVE} [kW]	$P_{odběr}$ [kW]	$P_{zátěž}$ [kW]	U_{min} [kV]	U_{min} [%]	U_{max} [kV]	U_{max} [%]	$U_{prům}$ [kV]	$U_{prům}$ [%]	U_{min} [kV]	U_{min} [%]	U_{max} [kV]	U_{max} [%]	$U_{prům}$ [kV]	$U_{prům}$ [%]
zimní	-	0.	-	116,0	3105,7	81,2	384	95,9	418	104,5	406	101,5	23,019	99,6	23,082	99,9	23,048	99,8
letní	-	0.	-	116,0	1962,9	37,5	398	99,5	419	104,7	411	102,8	23,050	99,8	23,089	100,0	23,068	99,9
zimní	úpravy	0.	-	116,0	3105,7	75,8	392	97,9	418	104,5	407	101,7	23,018	99,6	23,083	99,9	23,048	99,8
letní	úpravy	0.	-	116,0	1962,9	35,7	402	100,6	419	104,7	412	103,0	23,050	99,8	23,089	100,0	23,068	99,9
zimní	částečná kabeliz.	0.	-	116,0	3105,7	76,5	391	97,7	418	104,5	407	101,7	23,019	99,6	23,082	99,9	23,048	99,8
letní	částečná kabeliz.	0.	-	116,0	1962,9	35,8	403	100,7	419	104,7	412	102,9	23,050	99,8	23,089	100,0	23,068	99,9
zimní	kabeliz.	0.	-	116,0	3105,7	71,7	391	97,7	418	104,5	407	101,9	23,019	99,6	23,083	99,9	23,048	99,8
letní	kabeliz.	0.	-	116,0	1962,9	34,0	403	100,7	419	104,7	412	103,1	23,050	99,8	23,089	100,0	23,068	99,9
zimní	mřížová 150	0.	-	116,0	3105,7	65,1	399	99,9	418	104,5	409	102,2	23,019	99,6	23,083	99,9	23,048	99,8
letní	mřížová 150	0.	-	116,0	1962,9	31,7	407	101,8	419	104,7	413	103,2	23,050	99,8	23,089	100,0	23,068	99,9
zimní	-	1.	5,5	259,0	3105,7	76,4	384	96,0	418	104,5	406	101,6	23,023	99,7	23,083	99,9	23,049	99,8
zimní	-	2.	10,0	1249,0	3105,7	47,1	391	97,7	418	104,5	410	102,5	23,046	99,8	23,087	99,9	23,063	99,8
zimní	-	3.	5,5	1573,5	3105,7	42,0	392	98,0	418	104,6	411	102,8	23,050	99,8	23,088	99,9	23,067	99,9
zimní	-	4.	10,0	2293,5	3105,7	36,4	395	98,7	423	105,7	413	103,3	23,063	99,8	23,091	100,0	23,076	99,9
letní		4.	10,0	2293,5	1962,9	29,0	408	102,1	428	106,9	418	104,6	23,091	100,0	23,103	100,0	23,095	100,0

B Parametry DS obce při postupné penetraci FVE

období	změny	varianta	P_{inst} [kWp]	P_{FVE} [kW]	$P_{odběr}$ [kW]	$P_{ztráty}$ [kW]	NN						VN					
							U_{min} [kV]	U_{min} [%]	U_{max} [kV]	U_{max} [%]	$U_{prům}$ [kV]	$U_{prům}$ [%]	U_{min} [kV]	U_{min} [%]	U_{max} [kV]	U_{max} [%]	$U_{prům}$ [kV]	$U_{prům}$ [%]
zimní	-	5.	max. možný	5118,4	3105,7	145,1	397	99,2	481	120,2	423	105,8	23,102	100,0	23,127	100,1	23,112	100,1
zimní	úpravy	5.	max. možný	5118,4	3105,7	104,4	409	102,1	439	109,8	422	105,5	23,102	100,0	23,128	100,1	23,112	100,1
zimní	kabeliz.	5.	max. možný	5118,4	3105,7	130,2	409	102,2	481	120,2	423	105,7	23,102	100,0	23,127	100,1	23,113	100,1
zimní	kabeliz. +úpravy	5.	max. možný	5118,4	3105,7	94,2	412	103,1	439	109,8	421	105,3	23,102	100,0	23,128	100,1	23,112	100,1
letní	kabeliz. +úpravy	5.	max. možný	5118,4	1962,9	122,5	416	103,9	447	111,7	425	106,3	23,108	100,0	23,156	100,2	23,130	100,1
zimní	mřížová 150	5.	max. možný	5118,4	3105,7	86,4	413	103,2	431	107,7	421	105,4	23,102	100,0	23,129	100,1	23,113	100,1
letní	mřížová 150	5.	max. možný	5118,4	1962,9	112,9	416	103,9	436	108,9	425	106,3	23,108	100,0	23,157	100,2	23,130	100,1
zimní	-	6.	? 100	7413,1	3105,7	333,1	397	99,2	566	141,4	425	106,1	23,114	100,1	23,160	100,3	23,134	100,1
zimní	-	7.	max. možný	11003,2	3105,7	651,7	399	99,7	570	142,5	434	108,4	23,125	100,1	23,212	100,5	23,171	100,3
zimní	-	8.	? 50	11846,0	3105,7	750,3	399	99,7	571	142,7	435	108,7	23,129	100,1	23,226	100,5	23,179	100,3
zimní	-	9.	5,5	12616,0	3105,7	815,0	400	100,0	572	143,0	437	109,2	23,130	100,1	23,238	100,6	23,186	100,4
zimní	-	10.	10,0	14346,0	3105,7	1011,7	417	104,2	575	143,8	442	110,4	23,135	100,2	23,263	100,7	23,202	100,4
zimní	-	11.	5,5	14494,5	3105,7	1029,0	417	104,2	575	143,8	442	110,5	23,135	100,2	23,264	100,7	23,203	100,4
zimní	-	12.	? 50	15186,6	3105,7	1114,8	417	104,3	575	143,8	443	110,7	23,138	100,2	23,273	100,8	23,208	100,5

C Parametry DS obce při injektáži FVE o stejném inst. výkonu

období	změny	varianta	P_{inst} [kWp]	P_{FVE} [kW]	$P_{odběr}$ [kW]	$P_{ztráty}$ [kW]	NN						VN					
							U_{min} [kV]	U_{min} [%]	U_{max} [kV]	U_{max} [%]	$U_{prům}$ [kV]	$U_{prům}$ [%]	U_{min} [kV]	U_{min} [%]	U_{max} [kV]	U_{max} [%]	$U_{prům}$ [kV]	$U_{prům}$ [%]
zimní	-	13.	5,5	4862,0	3105,7	63,1	414	103,4	439	109,8	422	105,4	23,101	100,0	23,121	100,1	23,109	100,0
letní	-	13.	5,5	4862,0	1962,9	94,0	416	104,1	449	112,2	426	106,6	23,107	100,0	23,149	100,2	23,126	100,1
letní	úpravy	13.	5,5	4862,0	1962,9	84,2	416	104,1	436	109,0	425	106,3	23,107	100,0	23,149	100,2	23,126	100,1
letní	mřížová 150	15.	8,5	7514,0	1962,9	204,4	417	104,2	439	109,8	430	107,5	23,116	100,1	23,199	100,4	23,156	100,2
zimní	-	14.	10,0	8840,0	3105,7	303,0	414	103,5	473	118,2	433	108,1	23,114	100,1	23,194	100,4	23,152	100,2
zimní	kabeliz.	14.	10,0	8840,0	3105,7	272,0	414	103,5	473	118,3	431	107,7	23,115	100,1	23,194	100,4	23,152	100,2
zimní	mřížová 150	14.	10,0	8840,0	3105,7	234,2	414	103,6	439	109,8	429	107,3	23,115	100,1	23,198	100,4	23,153	100,2
letní	mřížová 150	14.	10,0	8840,0	1962,9	296,3	417	104,2	444	110,9	433	108,1	23,120	100,1	23,223	100,5	23,170	100,3
zimní	mřížová 240	14.	10,0	8840,0	3105,7	195,2	416	104,1	433	108,3	427	106,7	23,115	100,1	23,197	100,4	23,153	100,2
letní	mřížová 240	14.	10,0	8840,0	1962,9	249,6	418	104,6	438	109,5	430	107,5	23,120	100,1	23,223	100,5	23,170	100,3