

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Modelování zpětných vlivů solárních zdrojů na
distribuční síť

Modeling of solar sources impacts to the power grid

Srpen 2014

Vypracoval: Bc. David Uher
Vedoucí práce: Ing. Petr Janeček, Ph.D.

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta aplikovaných věd
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David UHER**
Osobní číslo: **A12N0177P**
Studijní program: **N3918 Aplikované vědy a informatika**
Studijní obor: **Kybernetika a řídicí technika**
Název tématu: **Modelování zpětných vlivů solárních zdrojů na distribuční síť**
Zadávající katedra: **Katedra kybernetiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s danou problematikou a vypracujte rešerši literatury.
2. Navrhněte modely zdroje pro výpočet rozšířených zpětných vlivů jako je např. nesymetrie zdroje a vyšší harmonické.
3. Navrhněte výpočetní algoritmy pro výpočty zpětných vlivů s využitím stávajícího algoritmu výpočtu chodu sítě.
4. Proveďte implementaci prototypu v Matlabu a ověřte výsledky.


Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **35-50 stránek A4**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**
Seznam odborné literatury:
Dodá vedoucí diplomové práce

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Janeček, Ph.D.**
Katedra kybernetiky

Datum zadání diplomové práce: **23. září 2013**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2014**


Doc. Ing. František Vávra, CSc.
děkan




Prof. Ing. Josef Psutka, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 23. září 2013

Prohlášení autora práce

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím odborné literatury a pramenů, jejichž úplný seznam je její součástí.

V Plzni dne _____

podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Janečkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a vedení mé práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině a všem, kteří mě po dobu mé práce a celého studia podporovali.

Abstrakt

Tématem této diplomové práce, zpracované na katedře kybernetiky fakulty aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni, je modelování zpětných vlivů solárních zdrojů, konkrétně fotovoltaických elektráren na distribuční síť. Cílem diplomové práce je zjištění, jak ovlivňuje připojená fotovoltaická elektrárna distribuční síť. Distribuční síť má normou specifikovanou kvalitu dodávané elektrické energie. V práci jsou provedeny analýzy naměřených dat v různých částech distribuční sítě obce Horušany s připojenými fotovoltaickými elektrárnami, které mají rozdílný výkon. Analýzy naměřených dat jsou vyhodnoceny a porovnávány s normou stanovených parametrů pro kvalitu elektrické energie v distribuční síti. Dále jsou navrženy modely pro výpočet rozšířených zpětných vlivů. Všechny získané poznatky jsou shrnuty do návrhu a implementace algoritmu pro nesymetrický třífázový výpočet chodu sítě a jeho vyhodnocení.

Klíčová slova

Solární zdroje energie, obnovitelné zdroje, fotovoltaická elektrárna, distribuční síť, připojování zdrojů, harmonické napětí, vyšší harmonická, nesymetrie, nesymetrie jednofázových zdrojů, nesymetrie třífázových zdrojů.

Abstract

The topic of this thesis, processed at the Department of Cybernetics, Faculty of Applied Sciences, University of West Bohemia in Pilsen, is modeling of solar sources impacts, namely solar power plants to the power grid. The objective of this thesis is detection, how it affects to distribution network, when connected photovoltaic power. The distribution network has the quality standards specified by the supplied electrical energy. The thesis carried out analysis of data measured in different parts of the distribution network of the village Horušany with connected photovoltaic power plants that have different performance. Analysis of the measured data are evaluated and compared with the standards set of parameters for power quality in the distribution network. In addition, models are designed to calculate the extended reverse impacts. All findings are summarized in the design and implementation of an algorithm for the calculation of three-phase unbalanced operation of the network and its evaluation.

Key words

solar energy sources, renewable source, photovoltaic power plants, distribution network, connecting sources, voltage harmonics, higher harmonic, unbalance, unbalance one-phase sources, unbalance three-phase sources.

Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	x
1 Úvod	1
2 Fotovoltaický článek	3
2.1 Typy fotovoltaických článků	4
2.2 Sklon a orientace fotovoltaického článku	6
2.3 Střídače	6
3 Požadavky na kvalitu elektrické energie	9
3.1 Kmitočet sítě	10
3.2 Velikost napětí	10
3.3 Rychlé změny napětí	11
3.4 Harmonické a mezipharmonické napětí	11
3.5 Nesymetrie napětí	12
4 Distribuční síť Horušany	13
5 Model pro výpočet harmonických napětí	15
5.1 Harmonická napětí naměřená v Horušanech	15
6 Model pro výpočet nesymetrie	23
6.1 Analýza naměřené nesymetrie napětí	24
6.2 Nesymetrie injektovaných proudů třífázových zdrojů	28
6.2.1 Analýza naměřené nesymetrie injektovaných proudů FVE 400 kWp	29
6.2.2 Analýza naměřené nesymetrie injektovaných proudů FVE 70 kWp .	33
6.3 Nesymetrie odběru maloodběratelů	37
6.4 Model odběratelů	40
6.5 Nesymetrie jednofázových zdrojů a jednofázových odběratelů	42
7 Třífázové výpočetní algoritmy	43

8 Závěr	55
Literatura	56
Příloha	I
A Harmonické FVE 400 kWp	I
B Harmonické FVE 70 kWp	IX

Seznam obrázků

2.1	Princip fotovoltaického článku [5]	4
2.2	Účinnost špičkových experimentálních článků - historie a cíle výzkumu pro rok 2015 [6]	5
2.3	Měrná produkce panelů se shodnou orientací a různým sklonem [7]	6
2.4	Účinnost [18]	7
4.1	FVE Horušany	14
4.2	Pozice měření	14
5.1	Porovnání harmonických ve dne a noci pro elektrárnu s výkonem 400 kWp	16
5.2	Histogram THD	18
5.3	Porovnání harmonických ve dne a noci pro elektrárnu s výkonem 70 kWp .	19
5.4	Histogram THD	20
5.5	Histogram THD	21
5.6	Histogram THD	22
6.1	Sousledná, zpětná a netočivá složka napětí FVE s výkonem 400kWp	25
6.2	Sousledná, zpětná a netočivá složka napětí na trafo stanici	26
6.3	Sousledná, zpětná a netočivá složka napětí FVE s výkonem 70kWp	27
6.4	Sousledná, zpětná a netočivá složka napětí na rozpojovací skříni	27
6.5	Sousledná, zpětná a netočivá složka proudu	28
6.6	Sousledná, zpětná a netočivá složka proudu	29
6.7	Závislost sousledné a zpětné složky proudu	30
6.8	Závislost sousledné a netočivé složky proudu	30
6.9	Diference sousledné složky v závislosti na zpětné složce proudu	31
6.10	Diference sousledné složky v závislosti na netočivé složce proudu	32
6.11	Sousledná, zpětná a netočivá složka proudu	33
6.12	Sousledná, zpětná a netočivá složka proudu	34
6.13	Závislost sousledné a zpětné složky proudu	34
6.14	Závislost sousledné a netočivé složky proudu	35
6.15	Diference sousledné složky v závislosti na zpětné složce proudu	35
6.16	Diference sousledné složky v závislosti na netočivé složce proudu	36
6.17	Naměřený výkon odběratele 1.	37
6.18	Naměřený výkon odběratele 2.	38

6.19	Naměřený výkon odběratele 3.	38
6.20	Naměřený výkon odběratele 4.	39
7.1	Schéma výpočetní metody	43
7.2	Schéma 1 fázového modelu sítě	44
7.3	3 fázová soustava	44
7.4	Schéma 3 fází	45
7.5	Fázový diagram napětí	45
7.6	Sousledná, zpětná a netočivá složka napětí na rozpojovací stanici	48
7.7	Sousledná, zpětná a netočivá složka napětí na FVE 70 kWp	49
7.8	Sousledná, zpětná a netočivá složka napětí u odběratele	50
7.9	Sousledná, zpětná a netočivá složka proudu na trafo stanici	51
7.10	Sousledná, zpětná a netočivá složka proudu u odběratele	52
7.11	Vliv impedance nulového vodiče na elektrárnu 70 kWp	53
7.12	Vliv impedance nulového vodiče na rozpojovací stanici	53
7.13	Nulový vodič na FVE 70 kWp	54
7.14	Nulový vodič na rozpojovací stanici	54

Seznam tabulek

6.1	Korelace výkonu na fázích	39
6.2	Odebíraný výkon	39
6.3	Odebíraný výkon	40
6.4	Rozdělení odběratelů do tříd podle sazby	40
6.5	Rozdělení odběratelů do tříd podle sazby	41
7.1	Výpočty na Trafo stanici	47
7.2	Výpočty na Rozpojovací stanici	47
7.3	Výpočty na Elektrárně s výkonem 70 kWp	47
7.4	Výpočty u Odběratele	47
7.5	Vyhodnocení rozpojovací stanice	48
7.6	Vyhodnocení FVE 70 kWp	49
7.7	Vyhodnocení u odběratele	50
7.8	Vyhodnocení na trafo stanici	51
7.9	Vyhodnocení u odběratele	52

Kapitola 1

Úvod

Slunce, jakožto základ života na zemi, poskytuje energii ve formě slunečních paprsků, které umožňují vznik a život na planetě Zemi. Tato energie je mnohonásobně vyšší, než potřebujeme. I přesto, že sluneční paprsky dopadají nepřetržitě na planetu Zemi už od pradávna, nedokážeme stále efektivně využít jejich možnosti a potenciál. Díky současnému ekologickému trendu a technologickému pokroku se nám prozatím daří v omezené míře využívat energii z obnovitelných zdrojů, jako je Slunce, vítr, voda apod.. Kdybychom teoreticky dokázali využít energii poskytovanou slunečním zářením efektivně, energetický problém naší planety by byl vyřešen. V této práci se budu převážně zabývat solárním obnovitelným zdrojem energie, nebo-li fotovoltaickým článkem a modelování jeho zpětných vlivů při připojení na distribuční síť. Distribuční síť nebyla historicky navržena pro lokální výrobu elektrické energie a o připojení fotovoltaických zdrojů k naší síti se mluví jako o problému. A to hlavně z toho důvodu, že při masivní penetraci solárních zdrojů je problém s příliš vysokým napětím, dále je problém s obráceným tokem v distribuční síti, s jištěním, s detekcí zkratů, projevují se také vyšší ztráty apod.. Bohužel v současné době ani technologie neumožňuje efektivně a ekologicky skladovat elektrickou energii ve větším množství. Nikdo v současné době neočekává, že bude solárních zdrojů ubývat, spíše naopak, je tedy zapotřebí vytvořit modely a nástroje pro posouzení technických možností připojení dalších zdrojů.

Obsahem práce je analýza zpětných vlivů fotovoltaické elektrárny a jejich modelování. Nejčastěji uvažovaný vliv je změna napětí. Výpočet a modely jsou již vytvořeny v klasických metodách řešení load flow problému [1]. Z tohoto důvodu jsem se zaměřil na ostatní zpětné vlivy, které nejsou dostatečně analyzovány a probádány. V práci budu analyzovat dvě zpětné vlivy a těmi jsou vyšší harmonické, kterým se věnuje kapitola 5 a nesymetrickou dodávkou do distribuční sítě, která je popsána v kapitole 6. Nesymetrická dodávka do distribuční sítě je zajímavější, jelikož roste podíl výstavby malých elektráren, které jsou zapojeny do jedné fáze. Shrnutí těchto poznatků vyústilo v algoritmus výpočtu třífázové nesymetrie sítě v kapitole 7. Tato kapitola obsahuje i citlivostní analýzu.

V současné době existuje několik analytických metod pro výpočet jednofázového load flow problému viz [1]. Simulační metody postavené na deterministickém algoritmu, jako Newtonova nebo Monte Carlo metoda. Výhodou Monte Carlo metody je její flexibilita. Nejci-

tovanější překážkou je velké množství iterací pro přesné řešení PLF problému. Výpočetní složitost nastává u velkých sítí, jelikož každý uzel zavádí novou nejistou zatížení a musí být testován v kombinaci s ostatními. Z těchto důvodů je většina existujících metod, které jsou na vyšší úrovni kombinací metody Monte Carlo simulace s efektivním algoritmem navrženým pro specifický případ. Pravděpodobnostní load flow analýza je komplikována nelinearitou výkonových rovnic. Existující analytické metody jsou postaveny na aproximaci těchto rovnic. Nejčastěji používaná je linearizace. Další metodou je aproximativní metoda založená na bodových odhadech v kombinaci s Monte Carlo metodou, která je detailně popsána v [2]. Na katedře kybernetiky byla vytvořena vlastní výpočetní efektivní metoda Backward/Forward load flow metoda [1] aplikovatelná pro load flow analýzu radiálních a slabě zasíťovaných sítí.

V současné době také existuje několik metod pro výpočet třífázového load flow problému. Pravděpodobnostní metoda popsána v [3] používá nelineární třífázové rovnice zatížení a Monte Carlo metodu k vyhodnocení fázového napětí a faktoru nesymetrie. Další simulační metoda pro výpočet třífázové nesymetrie napětí s využitím korelovaných gaussovských proměnných je kombinací pravděpodobnostní metody a deterministické. Opět s využitím Monte Carlo metody popsána v [4].

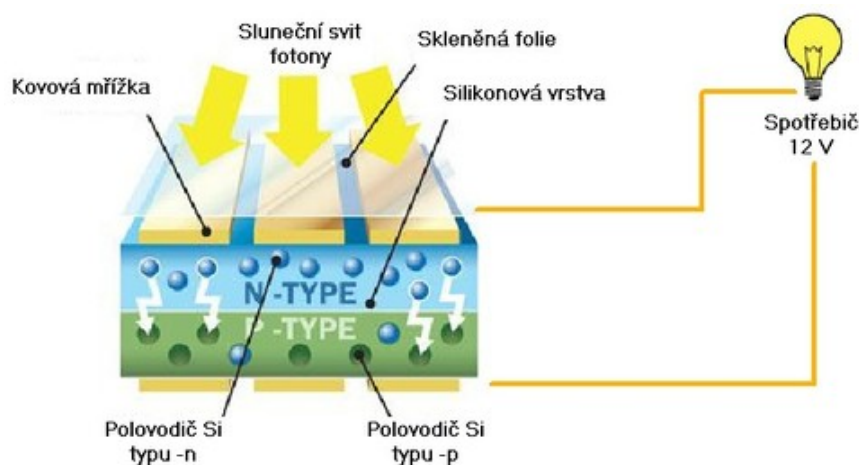
Kapitola 2

Fotovoltaický článek

Historie solárního článku se datuje rokem 1839. V tomto roce francouzský experimentální fyzik Edmund Becquerel při pokusech se dvěma kovovými elektrodami v elektrovedivém roztoku dokázal existenci fotovoltaického jevu. Zjistil, že pokud soustavu osvítí, vzroste na elektrodách napětí. V roce 1877 objevili W. G. Adams a R. E. Day fotovoltaický efekt na selenu a v roce 1833 vyrobil Charles Fritts první fotovoltaický článek. Jeho článek měl účinnost 1 %. Fotovoltaický efekt byl postupně objeven i u jiných chemických prvků, ovšem křemík se ukázal jako nejvhodnější. V roce 1946 si američan Russel Ohl nechal patentovat konstrukci solárních článků. Bell Laboratories datuje v roce 1954 zrození současné podoby solárních článků. Experimenty s dopovaným křemíkem potvrdily jeho nejvhodnější vlastnost v podobě vysoké citlivosti na osvětlení.

Abych mohl v krátkosti popsat princip fotovoltaického článku je zapotřebí nejprve objasnit fotovoltaický jev. Fotovoltaický jev vzniká tam, kde fotony slunečního záření dopadají na vrstvený solární panel, tvořený dvěma polovodičovými vrstvami materiálu s rozdílným typem vodivosti a díky tomu vyřazují z krystalické mřížky elektrony. Tyto elektrony se uvolňují z valenční vrstvy atomových jader, dochází k emitaci, stávají se volnými a jsou následně součástí toku elektrického proudu. Tímto způsobem fotovoltaický článek převádí sluneční energii na elektrický proud. Díky elektrodám můžeme takto získaný proud použít k napájení jednoduchých spotřebičů. Pro napájení běžných domácích spotřebičů pracujících při napájení střídavým proudem, je nutné článek doplnit o střídač, který převede energii na střídavé napětí o velikosti a frekvenci shodné s distribuční soustavou.

Fotovoltaický článek lze tedy popsat jako velkoplošnou polovodičovou součástku, která je schopná přeměnit sluneční záření na elektrickou energii při využití fotovoltaického jevu (obrázek 2.1).



Obrázek 2.1: Princip fotovoltaického článku [5]

2.1 Typy fotovoltaických článků

Rozdělení dle tvaru buňky:

1. monokrystalické články
 - skládají se z jednoho krystalu křemíku o velikosti větší než 10 cm
 - účinnost se pohybuje mezi 15 až 20 %
2. polykrystalické články
 - skládají se z více krystalů křemíku o velikosti 1 až 100 mm různě orientovaných
 - účinnost polykrystalických modulů je mezi 12 až 14 %

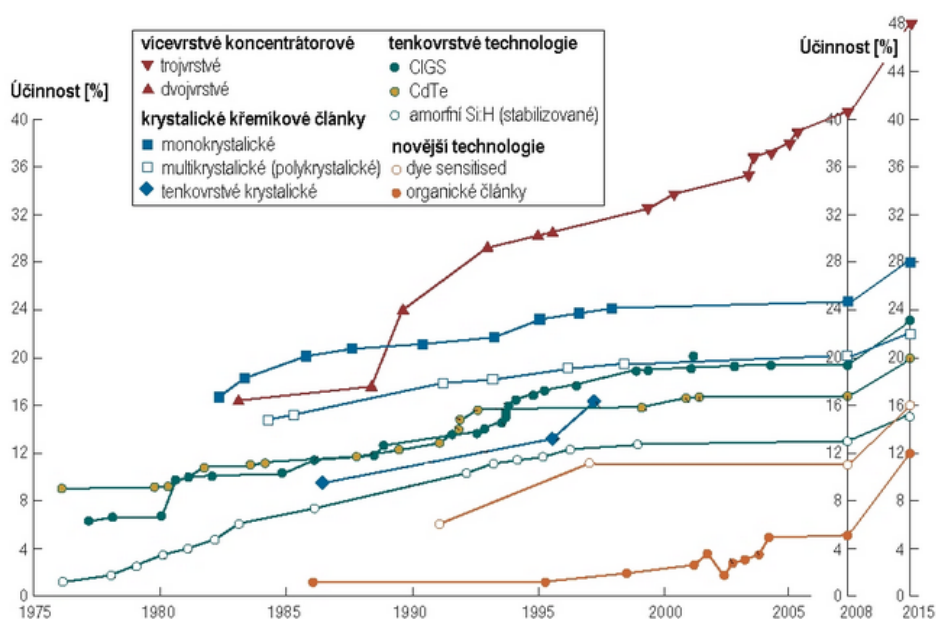
Rozdělení dle výroby:

1. krystalické technologie
 - krystalické články jsou vytvořeny na tenkých deskách polovodičového materiálu
 - v této technologii převažuje křemík
2. tenkovrstvé technologie
 - tenkovrstvé články jsou přímo nanášeny na sklo nebo jinou podložku
 - používá se několik technologií například amorfní křemík, ten je v tenké vrstvě nanesen na sklo nebo folii
 - účinnost amorfních článků je 8 až 9 %, celoroční výnos je ovšem až o 10 % vyšší, díky schopnosti zachytit více ambientního, neboli rozptýleného světla, které v ČR převládá

Výroba fotovoltaických panelů je díky pokroku ve vědě a technologii stále dokonalejší. Tomu přispívá stále se zvyšující zájem o obnovitelné zdroje a jejich využití. V laboratorních podmínkách již bylo dosaženo účinnosti 40 %, což jsou hodnoty, které se přibližují

k účinnosti větrných elektráren. [5]

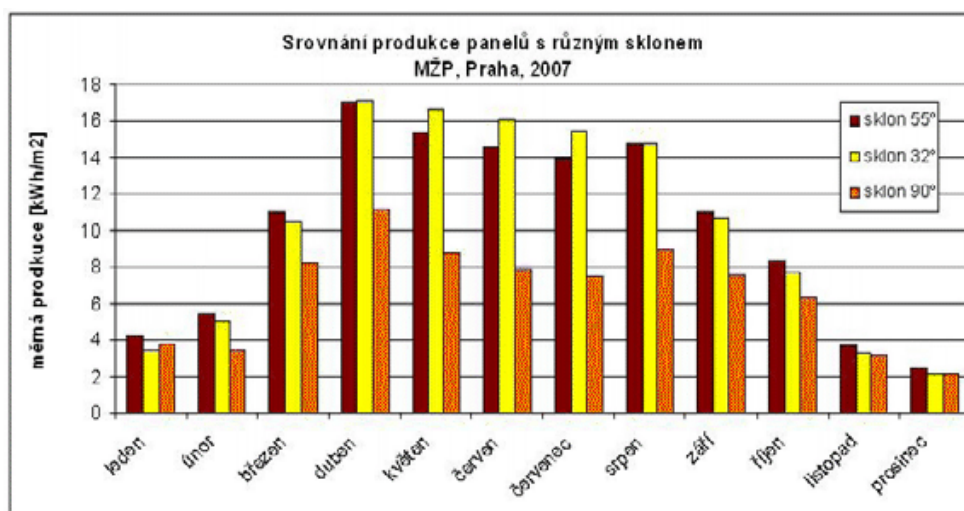
Nejlepší experimentální články vyrobené speciálními technologiemi v laboratořích, mohou dosahovat účinnosti až o 50 % vyšší než články vyráběné cenově dostupnými postupy v průmyslové výrobě, jak ukazuje následující graf. Účinnost nejlepších dostupných panelů je o 20 až 40 % nižší než účinnost rekordních článků.



Obrázek 2.2: Účinnost špičkových experimentálních článků - historie a cíle výzkumu pro rok 2015 [6]

2.2 Sklon a orientace fotovoltaického článku

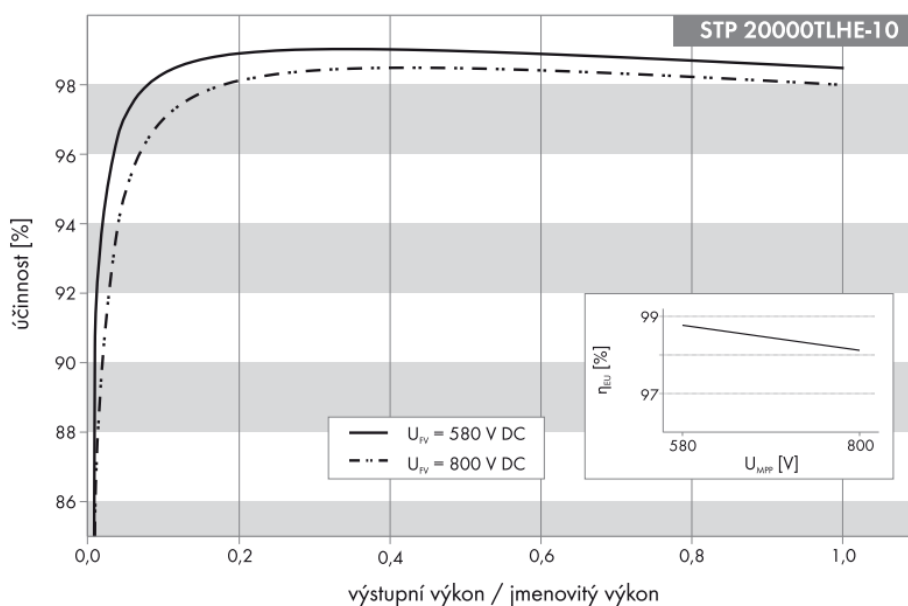
Ideální sklon panelu fotovoltaického článku je takový, aby sluneční paprsky dopadaly vždy kolmo na panely. Kolmý úhel umožňuje zachycení maxima dopadajícího záření. Toho lze docílit pohyblivou konstrukcí, nebo-li tracker. Tracker upravuje natočení panelu vzhledem k poloze slunce a vytváří kolmý úhel dopadu paprsků po celý den. Tracker bohužel není možné z hlediska konstrukce větrného namáhání a estetiky umisťovat na budovy se šikmou nebo plochou střechou. Jedno řešení se nabízí v podobě jednoosého trackeru, s osou v daném sklonu, který naklápí panely od východu k západu. To se týká jen instalací na volné ploše. Tracker se bohužel z hlediska náročnosti konstrukce a energetické náročnosti nevyplatí, proto se v podstatě na území ČR nevyužívá. Většinou se využívá u budov v ČR konstrukce fotovoltaické elektrárny s pevnou orientací a sklonem. Pro celou ČR je optimální sklon 35° , s optimální směrovou orientací přímo na jih. Orientace na jihovýchod až jihozápad způsobí ztráty přibližně 5 - 8 %, při vodorovné orientaci přicházíme o 10%. Sever, severovýchod nebo severozápad nejsou vhodné směrové orientace. Při dodržení těchto podmínek jsou fotovoltaické panely, instalované na území ČR, schopny využít maximálně sluneční paprsky během celého roku.[7]



Obrázek 2.3: Měrná produkce panelů se shodnou orientací a různým sklonem [7]

2.3 Střídače

Střídač nebo též měnič je elektrický přístroj, který převádí stejnosměrný proud z fotovoltaických panelů na střídavý proud, obvyklý v distribuční síti. Tím se stává srdcem každé fotovoltaické elektrárny. Střídače využíváme i při napájení běžných spotřebičů z akumulátorů, v podmínkách mimo dosah sítě nebo jako nouzový záložní zdroj. Provedení střídače je důležité pro zpětné vlivy FVE na distribuční síť. Jeho kvalita ovlivňuje zpětné vlivy. Jedním parametrem střídače je emise vyšších harmonických napětí nebo proudů, která je závislá na tom, jak přesně střídač sleduje sinusový průběh napětí. Střídač využívá diskrétní úrovně výstupu napětí a záleží kolik těchto úrovní má k dispozici a jak rychle mezi nimi dokáže přepínat. Dalším ze sledovaných parametrů je účinnost na obrázku 2.4. Je to poměr mezi výstupním a vstupním výkonem udávaným v procentech. Účinnost uvádíme pro minimální MPP (maximum power point) napětí, jmenovité vstupní napětí a maximální MPP napětí. Rozlišujeme maximální a evropskou účinnost. Maximální je nejvyšší účinnost střídače při jmenovitém vstupním napětí a evropská se vypočítává jako vážená hodnota z různých účinností, při dílčí zátěži a účinnosti při plné zátěži při jmenovitém vstupním napětí, podle četnosti jejich výskytu. Požadujeme aby při 20 % proudu byla účinnost více než 98 %. Střídače jsou konstruovány jako jednofázové a v případě třífázové elektrárny je použito tří nebo více střídačů.



Obrázek 2.4: Účinnost [18]

Kapitola 3

Požadavky na kvalitu elektrické energie

Pravidla provozování distribuční soustavy, která lze nalézt na stránkách ČEZ distribuce [8] stanovují minimální technické, plánovací, provozní a informační požadavky pro připojení uživatelů k distribuční soustavě. Tyto pravidla jsou shrnuty v podnikových normách [9 - 15] a poskytují komplexní informace bez nutnosti pracovat s mnoha souvisejícími právními, technickými a dalšími podklady a stanovují základní pravidla, zajišťující spolupráci a koordinaci mezi jednotlivými účastníky trhu s elektřinou.

Podnikové normy energetiky platí pro připojování a provozování elektrických zařízení z hlediska vlivu na elektrizační soustavu 50 Hz. Tyto normy popisují a specifikují požadavky na kvalitu provozování sítě a mimo jiné i požadavky na zpětné vlivy solárních zdrojů na distribuční síť. Z pohledu zákona č.458/2000 Sb. můžeme podnikové normy energetiky chápat jako technické oborové normy, přejímané organizacemi elektroenergetiky do svých předpisů a uplatňované při technických řešeních rozvodných zařízení i v případě smluvních vztahů s dodavateli mimo elektroenergetiku.

Právní direktivu pro výrobce elektřiny z obnovitelného zdroje energie lze v plném znění nalézt například na stránkách Energetického regulačního úřadu [16].

Požadavky na kvalitu elektrické energie definuje Česká technická norma ČSN EN 50160[17]. Tato norma stanovuje charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě. Je nejdůležitějším faktorem, jelikož zaručuje koncovému spotřebiteli parametry elektrické energie, které jsou nutné pro správnou funkci všech spotřebičů či zařízení připojených na veřejnou distribuční síť.

Hlavní parametry pro kvalitu elektrické energie jsou:

- kmitočet sítě
- velikost napětí
- rychlé změny napětí
- harmonické a mezipharmonické napětí
- nesymetrie napětí

3.1 Kmitočet sítě

Jmenovitý kmitočet napájecího napětí je 50 Hz. Za normálních podmínek musí být střední hodnota kmitočtu základní harmonické měřné v intervalu 10 s v mezích:

- systém se synchronním připojením k propojenému systému
50 Hz $\pm 1\%$ během 99.5 % roku
50 Hz + 4 %/-6 % po 100 % času
- systém bez synchronního připojení k propojenému systému (tj. ostrovní napájecí systémy)
50 Hz $\pm 2\%$ během 95 % týdne
50 Hz $\pm 15\%$ po 100 % času

Kmitočet sítě je parametr, kterým se ve své práci zabývat nebudu. Odchytky od jmenovité hodnoty frekvence jsou v celé síti stejné a pro vychýlení frekvence je zapotřebí velké výkonové nerovnováhy, tudíž kmitočet sítě nepovažujeme za zpětný vliv solárního zdroje na distribuční síť.

3.2 Velikost napětí

Normalizované jmenovité napětí U_n pro veřejnou síť nízkého napětí je $U_n = 230V$. Za normálních provozních podmínek, s vyloučením přerušení napájení musí být během každého týdne 95 % průměrných efektivních hodnot napájecího napětí v měřících intervalech 10 minut v rozsahu $U_n \pm 10\%$. Všechny průměrné efektivní hodnoty napájecího napětí v měřících intervalech 10 minut musí být v rozsahu $U_n + 10\% / - 15\%$.

3.3 Rychlé změny napětí

Rychlá změna napětí je jednotlivá změna efektivní hodnoty napětí mezi dvěma nebo více sobě následujícími úrovněmi napětí, které trvají určitou, avšak nestanovenou dobu. Rychlé změny napájecího napětí jsou zejména způsobeny změnami zatížení u odběratelů nebo spínáním v síti. Za normálních provozních podmínek rychlé změny napětí obecně nepřekračují 5 % U_n , za určitých okolností se však mohou vyskytnout několikrát denně rychlé změny napětí až do 10 % U_n . Kolísání napětí v distribučních soustavách nízkého napětí mohou způsobit flickr. Kolísání napětí je řada změn efektivní hodnoty napětí, vyhodnocená jako jediná hodnota pro každou z postupně následujících půlperiod mezi průchody nulou napětí zdroje. Definice flickru spočívá v pocitu nestálého zrakového vnímání vyvolaného světelným podnětem, jehož jas nebo spektrální rozložení kolísá v čase. Pro termín flickr se používá také blikání.

Vyhodnocujeme krátkodobou a dlouhodobou míru vjemu flickru. Dlouhodobá míra vjemu flickru je nepříznivý vjem flickru vyhodnocený po krátkou dobu (v minutách). Dlouhodobá je nepříznivý vjem flickru vyhodnocený po dlouhou dobu (několik hodin) s využitím po sobě následujících krátkodobých hodnot. Obecný vztah:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}}$$

kde:

P_{lt} je dlouhodobá míra vjemu flickru

P_{st} je krátkodobá míra vjemu flickru

Za normálních provozních podmínek musí být po 95 % času, v libovolném týdenním období, dlouhodobá míra vjemu flickru ≤ 1 .

Vzhledem k tomu, že Evropská Unie, respektive evropská komise rozhodla o zákazu prodeje běžných, nebo-li vysoce energeticky náročných žárovek pro domácí použití a obecně se začíná využívat nových zdrojů světla, je flickr jakožto zpětný vliv na distribuční síť pro nás nepodstatný. Flickr se u nových zdrojů světla díky stabilizovaným zdrojům napětí již nemůže projevit.

3.4 Harmonické a mezipharmonické napětí

Harmonické napětí je sinusové napětí s kmitočtem rovným celistvému násobku základního kmitočtu napájecího napětí. Mezipharmonické napětí je sinusové napětí s necelistvým násobkem základního kmitočtu síťového napětí. Harmonické napájecího napětí jsou způsobeny hlavně nelineárními zatíženími odběratelů připojenými do všech napěťových úrovní sítě. Opět za stejných podmínek musí být v libovolném týdenním období 95 % desetiminutových

středních efektivních hodnot napětí každé harmonické menší nebo rovno hodnotám uvedených v tabulce 1, v normě ČSN EN 50160. Mimoto celkový činitel zkreslení THD napájecího napětí zahrnující všechny harmonické napětí až do řádu 40 musí být menší nebo roven 8 %.

Vztah pro výpočet THD je normou definován:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} Y_h^2}}{Y_1} \cdot 100$$

kde:

h = řád harmonické

$\frac{Y_h}{Y_1} \cdot 100$ = poměr efektivní hodnoty obsahu harmonických dané veličiny do 40. řádu harmonické k efektivní hodnotě základní harmonické, což jsou naše naměřené hodnoty harmonického napětí.

S rozvojem používání střídačů, polovodičových zdrojů a podobných zařízení hladina mezipharmonických napětí narůstá. Napájecí síť zatěžují především nelineární spotřebiče, pak spínané zdroje, úsporné žárovky, střídače apod.

V určitých případech způsobují mezipharmonické napětí v nízkých úrovních flickr nebo rušení v systému hromadného dálkového ovládání.

3.5 Nesymetrie napětí

Nesymetrie napětí popisuje stav trojfázové sítě, při kterém efektivní hodnoty fázových napětí nebo rozdíly fázových úhlů mezi po sobě jdoucími fázemi nejsou stejné. Za normálních provozních podmínek musí být v libovolném týdenním období 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot zpětné složky napájecího napětí v rozsahu 0 % až 2 % sou- sledné složky.

Kapitola 4

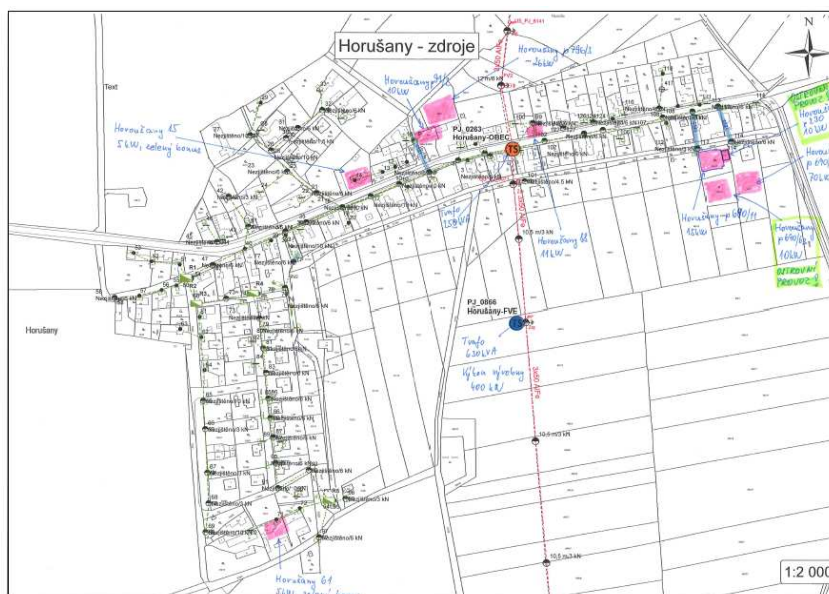
Distribuční síť Horušany

Horušany je část obce Soběkury v okrese Plzeň - jih. Nachází se přibližně 2,5 km na jihovýchod od Soběkury a přibližně 25 km na jihozápad od města Plzně. Je zde evidováno 92 adres s trvale žijícími 203 obyvateli. Také jsou Horušany názvem katastrálního území o rozloze 5,39 km^2 podle [19].

Obec Horušany byla pro měření vybrána, jelikož se zde nachází mnoho solárních zdrojů a je zde problém s kvalitou elektrické energie. Distribuční síť obce je vyobrazena na obrázku 4.1. V obci byla vytipována čtyři významná místa (obrázek 4.2), kde byla provedena měření:

1. Trafo stanice - zdroj obce, místo připojení k síti VN
2. FVE s výkonem 70 kW_p - koncový bod sítě, kde se očekává příliš vysoké napětí v síti
3. Rozpojovací stanice - koncový bod sítě, kde se očekává nedostatečné napětí
4. FVE s výkonem 400 kW_p - elektrárna s obcí sousedící, která má vlastní trafo stanici, díky tomu lze pozorovat chování VN sítě a vlastní FVE

V Horušanech s jejich radiální topologií se nachází 6 fotovoltaických zdrojů s celkovým instalovaným výkonem 142 kW_p, které jsou vyobrazeny na obrázku 4.2. Nezapočítávám zdroje v ostrovním provozu, kterými se má práce nezabývat. Nachází se zde 99 odběrných míst. Výpočetní experimenty budou zkoušeny a ověřovány na těchto naměřených datech.



Obrázek 4.1: FVE Horušany



Obrázek 4.2: Pozice měření

Kapitola 5

Model pro výpočet harmonických napětí

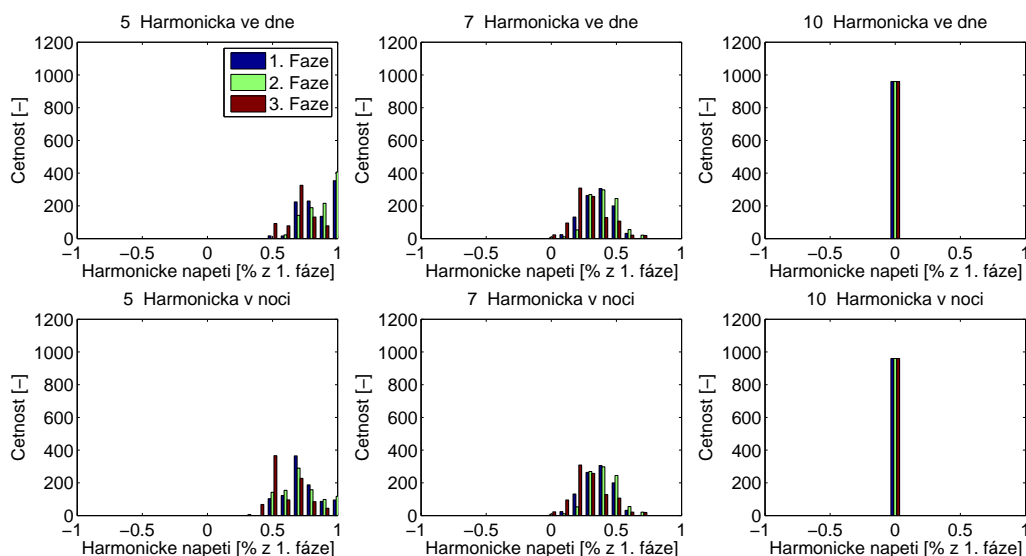
Jak jsem již zmínil v kapitole 3, harmonické a mezharmónické napětí je jedním ze sledovaných požadavků na kvalitu elektrické energie. Díky poskytnutým naměřeným datům na fotovoltaické elektrárně v Horušanech jsem se mohl v mé práci podrobněji podívat jak fotovoltaická elektrárna ovlivňuje harmonická napětí a kvalitu elektrické energie.

Harmonické zkreslení vznikne v důsledku zatížení nebo injekcí, která zkreslí sinusový průběh střídavé veličiny. Napájecí síť zatěžují především nelineární spotřebiče, pak spínané zdroje, úsporné žárovky, střídače apod.

Harmonická napětí jsou definovány jako sinusová napětí o kmitočtu, který je celočíselným násobkem základního kmitočtu, na kterém je provozována rozvodná síť, tedy 50 Hz. Harmonická složka napětí je definována jako složka většího než 1. řádu Fourierovy řady napětí, přičemž složka 1. řádu je základní harmonická. Harmonické se označují celým číslem, které je dáno poměrem kmitočtů harmonické a základní harmonické a určuje řád harmonické, například 2. harmonická.

5.1 Harmonická napětí naměřená v Horušanech

Pro analýzu jsem použil data z fotovoltaické elektrárny v Horušanech. Obsahují všechny potřebné veličiny k dalšímu zpracování a byla naměřena od 05.04.2011 v 10:30hod. do 25.04.2011 v 13:10hod. Data jsou zaznamenána s 10 minutovou granularitou. To znamená 2897 měření pro každou veličinu v uvedeném období. Po načtení naměřených dat ze třech fází pro 40 harmonických jsem data rozdělil do dvou skupin. První skupina jsou data naměřená od 22:00hod. do 04:00hod., dále označovaná jako noc a druhá skupina 10:00hod. do 15:00hod., dále označovaná jako den. Tímto rozdělením jsem dostal 977 naměřených hodnot ve dne a 960 naměřených hodnot v noci.



Obrázek 5.1: Porovnání harmonických ve dne a noci pro elektrárnu s výkonem 400 kWp

Rozložení amplitud vyšších harmonických je možné zobrazit pomocí histogramů. Na obrázku 5.1 jsou znázorněny nejzajímavější vyskytované příklady zpracovaných hodnot, histogramy všech 40 harmonických jsou uvedeny v příloze. Jak demonstruje 10. harmonická, tato veličina je nulová pro napětí všech tří fází ve dne i v noci. To lze pozorovat se zanedbatelnými odchylkami a zanedbáním harmonických napětí do 0.5 % u 37 harmonických. Jsou to harmonické: 2,3,4,6,8,9,10 - 40. Zbylé harmonické, 5 a 7, vykazují vyšší příspěvky ve fázích, které jsou stejné ve dne a noci. Tyto příspěvky jsou velmi malé, pohybují se v řádech desetin procent, a proto lze na základě těchto pozorování říci, že fotovoltaická elektrárna s výkonem 400 kWp v závislosti na denní a noční periodě nijak významně neovlivňuje harmonické složky napětí.

Všechny harmonické sdružuje norma ČSN EN 50160 do celkového činitele zkreslení THD napájecího napětí, zahrnujícího všechny harmonické až do řádu 40, musí být podle normy menší nebo roven 8%.

Vztah pro výpočet THD je normou definován:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} Y_h^2}}{Y_1} \cdot 100$$

kde:

h = řád harmonické

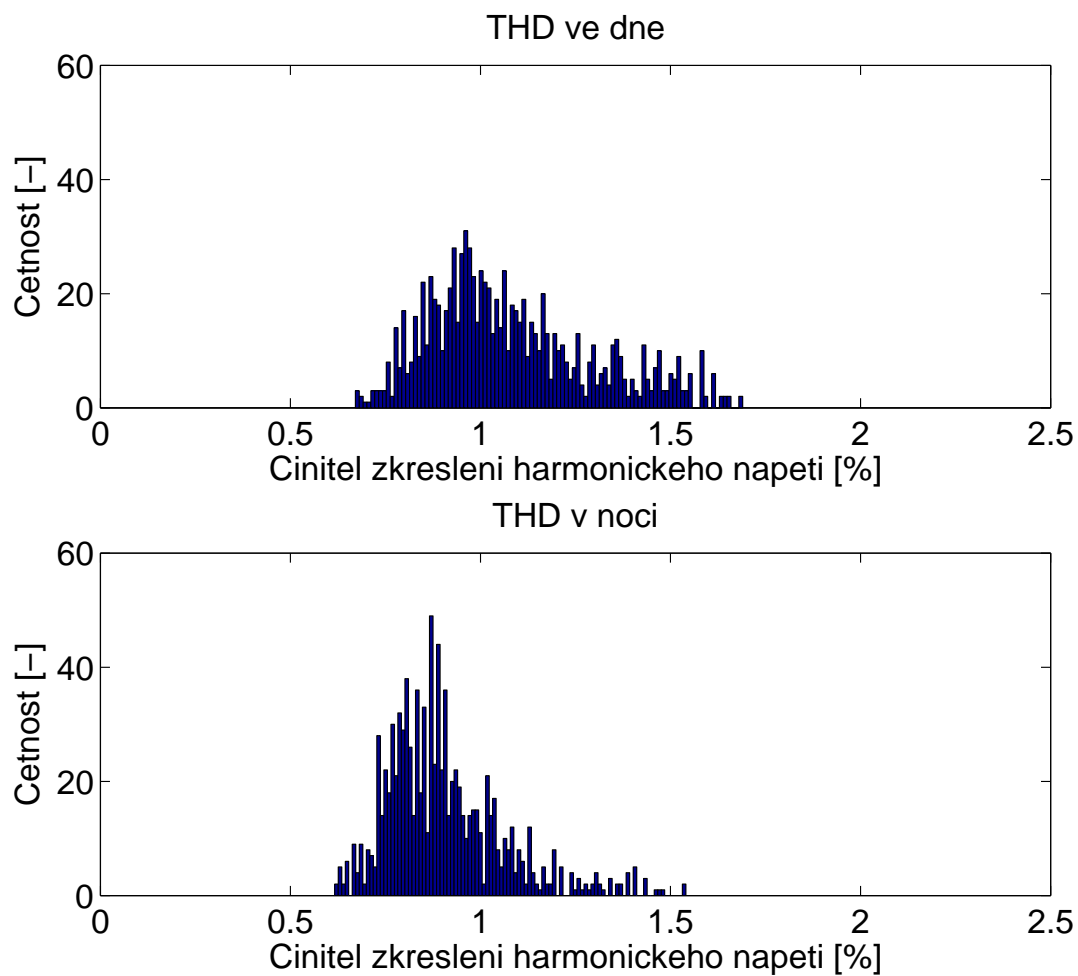
$\frac{Y_h}{Y_1} \cdot 100$ = poměr efektivní hodnoty obsahu harmonických dané veličiny do 40. řádu harmonické k efektivní hodnotě základní harmonické, což jsou naše naměřené hodnoty harmonického napětí.

Tento výraz můžeme upravit:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \left(\frac{Y_h}{Y_1} \cdot 100 \right)^2}$$

Požadavek na kvalitu napětí je:

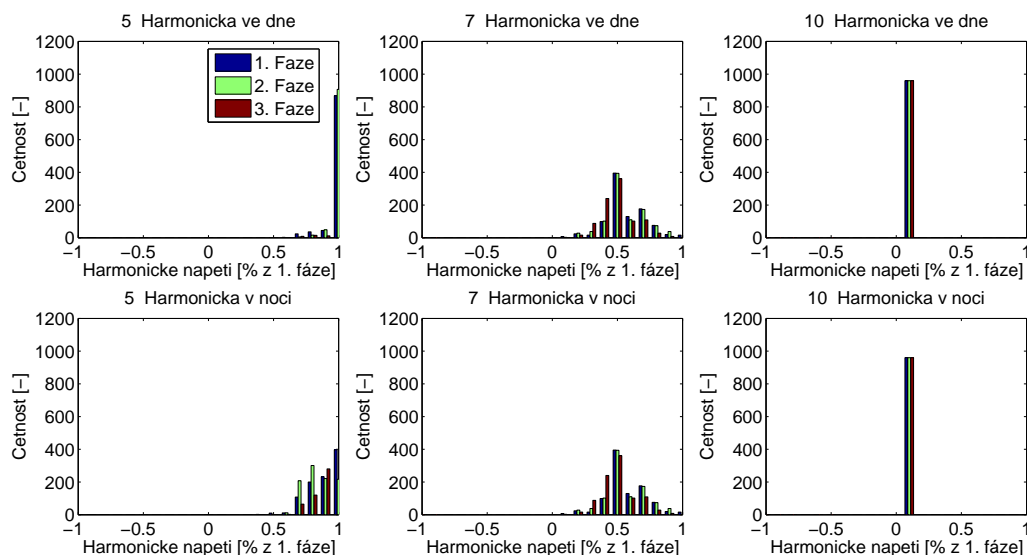
$$THD < 8\%$$



Obrázek 5.2: Histogram THD

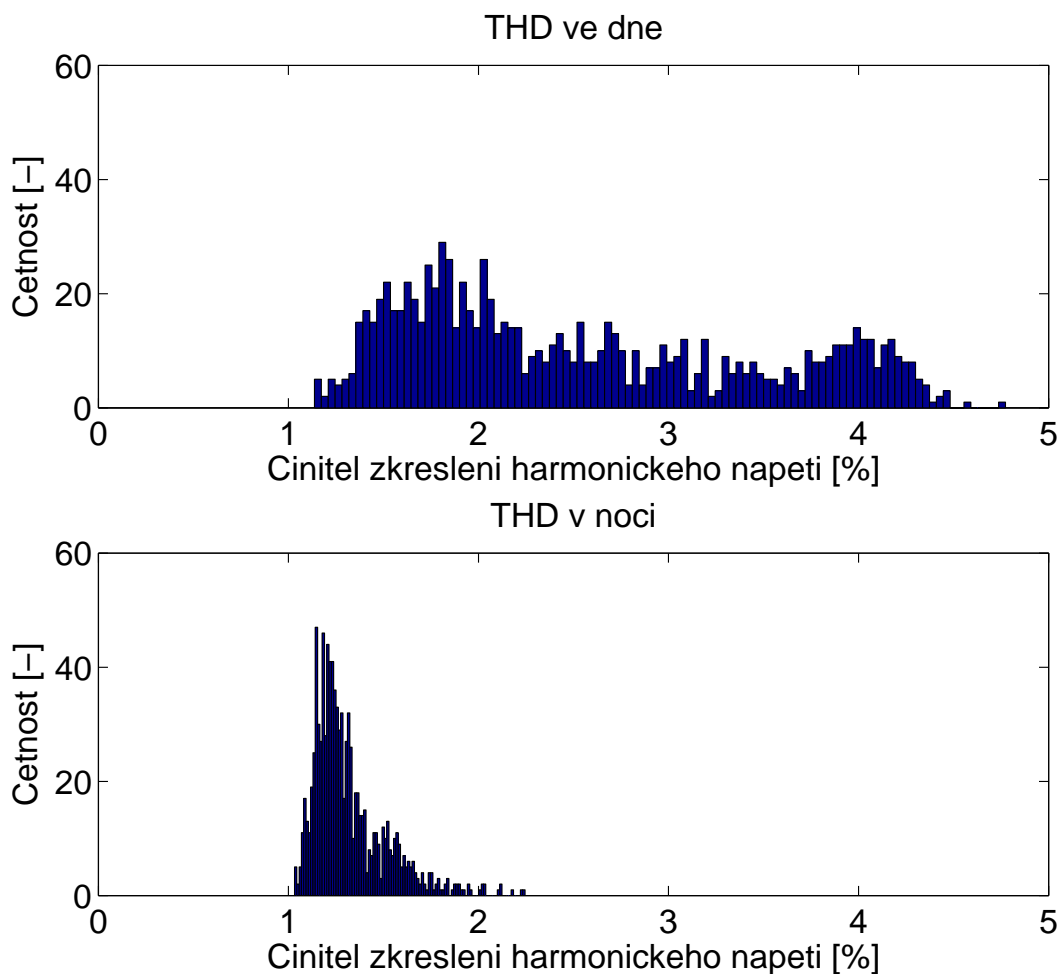
Vypočtené hodnoty THD z naměřených dat lze zobrazit pomocí histogramu. Z histogramů na obrázku 5.2 ve dne a v noci je patrné, že po celou dobu měření na fotovoltaické elektrárně 400 kWp jsou hodnoty činitele zkreslení srovnatelné a z pohledu normy zanedbatelné, jelikož mají velkou rezervu do mezní normové hodnoty.

Pro porovnání jsou srovnatelnou analýzou vyhodnocena i data naměřená na fotovoltaické elektrárně s výkonem 70 kWp.



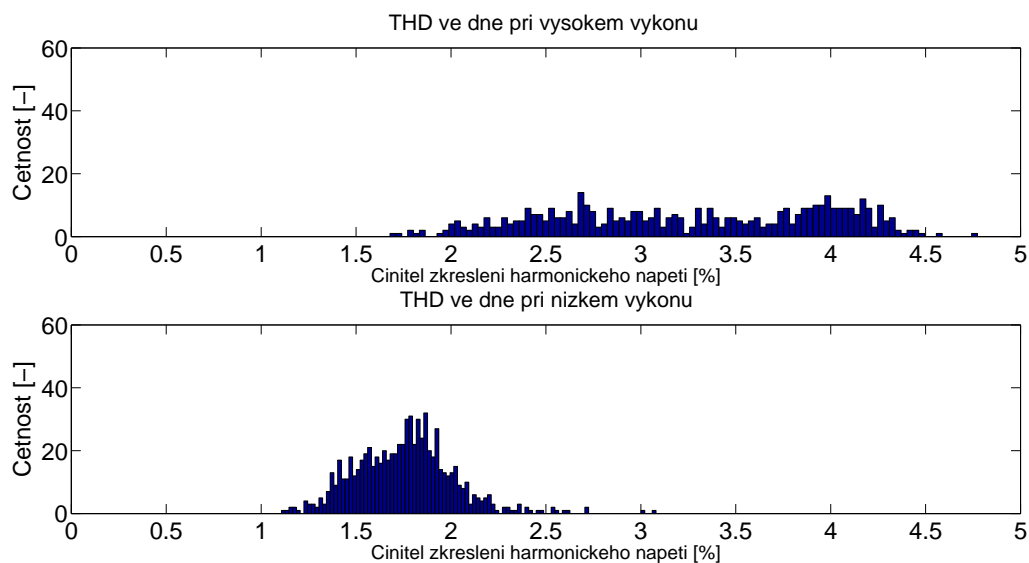
Obrázek 5.3: Porovnání harmonických ve dne a noci pro elektrárnu s výkonem 70 kWp

Na obrázku 5.3 jsou znázorněny nejzajímavější vyskytované příklady zpracovaných hodnot, histogramy všech 40 harmonických jsou uvedeny v příloze. U fotovoltaické elektrárny s výkonem 70 kWp byly pozorovány srovnatelné výsledky jako v předchozím případě a stejně bylo vypočteno i THD. Většina lichých harmonických vykazuje vyšší příspěvky ve fázích než u elektrárny 400 kWp. I přesto, že příspěvky jsou velmi malé a pohybují se v řádech desetin procent, podíváme se dále jak ovlivňují THD.



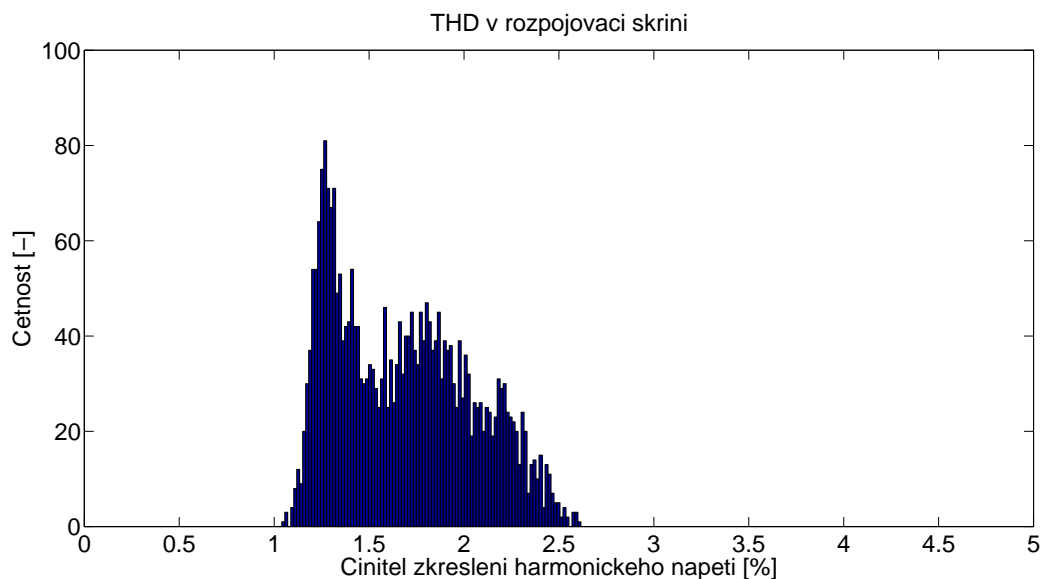
Obrázek 5.4: Histogram THD

Vypočtené hodnoty THD z naměřených dat jsou zobrazeny pomocí histogramu, který je na obrázku 5.4. Je patrný rozdíl vypočtených hodnot THD ve dne u měřeného napětí na elektrárně s výkonem 70 kWp oproti obrázku 5.2 ve dne pro elektrárnu s výkonem 400 kWp. Rozhodl jsem se podívat podrobněji, zda-li souvisí THD s výkonem výroby fotovoltaické elektrárny. Cílem je poznat, zda-li je vyšší THD opravdu způsobeno elektrárnou samotnou nebo je ovlivněno jinými vlivy v síti. Vzhledem ke schématu sítě Horušany na obrázku 4.2 v kapitole 4, kde je vidět rozložení fotovoltaických elektráren a elektrárna s výkonem 70 kWp se nachází vpravo na konci sítě, lze předpokládat, že elektrárny mohou ovlivňovat harmonické v síti.



Obrázek 5.5: Histogram THD

Data pro výpočet THD ve dne jsem rozdělil podle vyráběného výkonu do dvou skupin. První při vysokém výkonu od 40 kW do 75 kW a druhá při nízkém výkonu od 3 kW do 40 kW. Obrázek 5.5 ukazuje výskyt činitele zkreslení harmonického napětí THD v souvislosti s výkonem výroby. Obrázek ukazuje, že při vysokém zatížení elektrárny se zvyšuje THD. Vyšší THD je způsobeno vlivem fotovoltaické elektrárny. Pozorované výsledky ovšem nepřesahují 60 % normové hodnoty, a proto nepředstavují problém pro chod sítě. Také nelze stále vyloučit ovlivnění jinými vlivy v síti, pro kontrolu byla vyhodnocena ještě data naměřená v rozpojovací skříni, která se nachází na druhé straně sítě, viz. schéma na obrázku 4.2, kde nejsou v takové míře zastoupeny fotovoltaické elektrárny.



Obrázek 5.6: Histogram THD

Hodnoty THD z dat naměřených v rozpojovací skřini (Obrázek 5.6) ukazují stejné pozorování jako obrázek 5.2 u elektrárny s výkonem 400 kWp. Z tohoto výsledku usuzují, že vyšší harmonické příspěvky ve fázích a vyšší THD pozorované u elektrárny s výkonem 70 kWp jsou způsobeny střídači fotovoltaické elektrárny. Střídače FVE mohou emitovat vyšší harmonické příspěvky, je ovšem otázkou, zda se jednalo o jeden konkrétní střídač či všechny střídače. Jak již bylo řečeno, hodnoty vyšších příspěvků ani THD bezpečně nepřesahují normové hodnoty, a proto nepředstavují problém pro chod sítě. Z tohoto důvodu se harmonickým napětím ani činitelem zkreslení napájecího napětí (THD) nebudou dále zabývat. Model pro výpočet harmonických napětí je symetrický.

Kapitola 6

Model pro výpočet nesymetrie

Dalším aspektem při zkoumání požadavků na kvalitu elektrické energie je nesymetrie napětí. Trojfázová soustava je nazývána symetrická, jestliže trojfázová napětí a proudy mají stejnou amplitudu a jsou navzájem pootočený o 120° . Pokud není splněna jedna z podmínek je trojfázová soustava nesymetrická. V reálné síti je soustava vždy nesymetrická, a proto norma definuje přípustnou hodnotu nesymetrie, viz kapitola 3. Obecný postup zkoumání nesymetrie napětí nebo proudu je transformace nesymetrické soustavy na soustavu symetrické, které jsou vhodnou reprezentací nesymetrie a jsou popsány v [20].

Soustavy:

1. Soustava sousledná - soustava třech fázorů se stejnou amplitudou, vzájemně pootočených o 120° ve směru otáčení soustavy.
2. Soustava zpětná - soustava třech fázorů se stejnou amplitudou, vzájemně pootočených o 120° proti směru otáčení soustavy.
3. Soustava netočivá - soustava třech rovnoběžných fázorů se stejnou amplitudou.

Matematický rozklad nesouměrné soustavy (\vec{U}) na tři soustavy souměrné soustavu souslednou (\vec{U}_s), zpětnou (\vec{U}_z) a netočivou (\vec{U}_n):

$$\begin{aligned}\vec{U}_1 &= \vec{U}_{S1} + \vec{U}_{Z1} + \vec{U}_{N1} \\ \vec{U}_2 &= \vec{U}_{S2} + \vec{U}_{Z2} + \vec{U}_{N2} \\ \vec{U}_3 &= \vec{U}_{S3} + \vec{U}_{Z3} + \vec{U}_{N3}\end{aligned}$$

Zavedení operátoru natočení:

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Rovnice v maticovém tvaru:

$$\begin{bmatrix} \vec{U}_1 \\ \vec{U}_2 \\ \vec{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{U}_S \\ \vec{U}_Z \\ \vec{U}_N \end{bmatrix}$$

Nebo ve tvaru:

$$\vec{U} = F \cdot \vec{U}_{SZN}$$

Kde matice F:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}$$

Fázor soustavy sousledné vytváří první složku matice \vec{U}_{SZN} , vypočítanou podle:

$$\vec{U}_{SZN} = F^{-1} \cdot \vec{U}$$

Stejný postup jsem použil i v případě fázorů proudu.

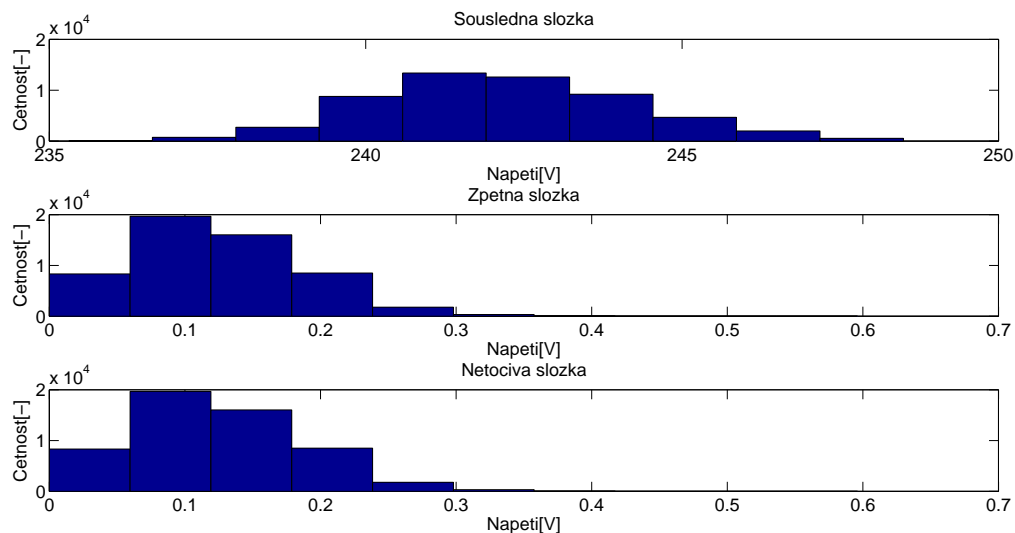
Pro jednofázové výpočty třífázovou soustavu reprezentuje soustava sousledná, která představuje průměr všech tří fázorů soustavy nesouměrné. Pro reprezentaci soustavy sousledné postačí jedna fáze, jelikož soustava sousledná je symetrická.

6.1 Analýza naměřené nesymetrie napětí

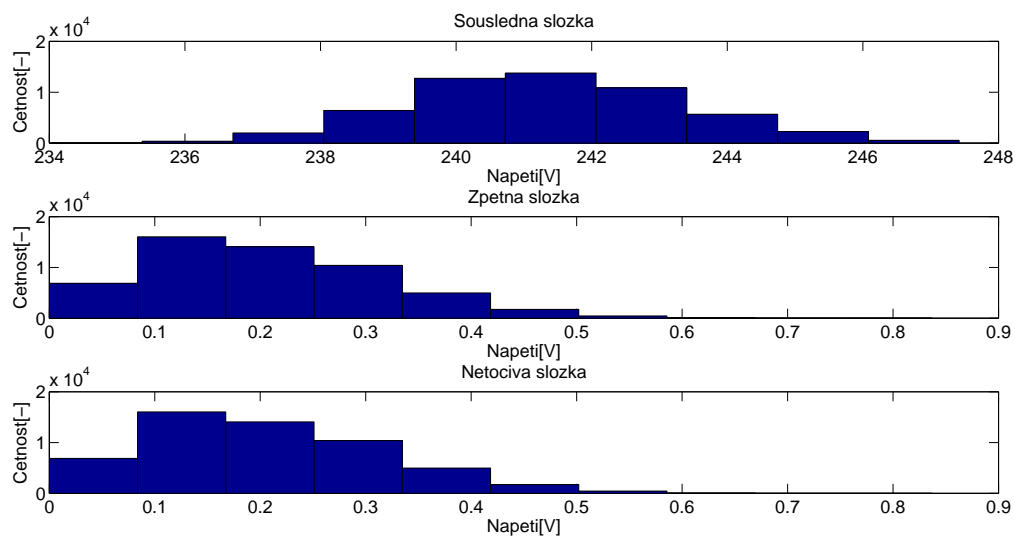
Norma, viz. kapitola 3. udává za normálních podmínek maximální hodnotu zpětné složky napájecího napětí v rozsahu 0 % až 2 % sousledné složky. Cílem této kapitoly je podívat se jaká je nesymetrie v síti vysokého napětí a nízkého napětí. Naměřená data v síti vysokého napětí měření neobsahuje, ale pro náhled na síť vysokého napětí se dají uvažovat naměřená data v síti nízkého napětí, hned za transformátorem, jako srovnatelná.

Pro analýzu jsem použil opět data ze sítě v Horušanech, nyní bez úpravy. Data byla naměřena od 05.04.2011 v 10:29:53hod. do 13.05.2011 v 10:01:50hod. Data jsou zaznamenána s jednominutovou granularitou. To znamená 54693 měření pro každou veličinu v uvedeném období. Data konkrétně obsahovala napětí na třech fázích, proud na třech fázích a úhel mezi napětím a proudem.

Nejprve jsem vyhodnotil nesymetrii na soustavě vysokého napětí. Jak již bylo řečeno, měření neobsahuje data na síti VN, ale pro analýzu lze použít data naměřená na sekundárním vedení transformátoru VN / NN. Použil jsem data naměřená na FVE s výkonem 400 kWp mající vlastní transformátor a také data naměřená na trafo stanici. FVE elektrárna 400 kWp je viz kapitola 6. symetrická a změna napětí na transformátoru je stejná. Proto je možné analýzu považovat za korektní.



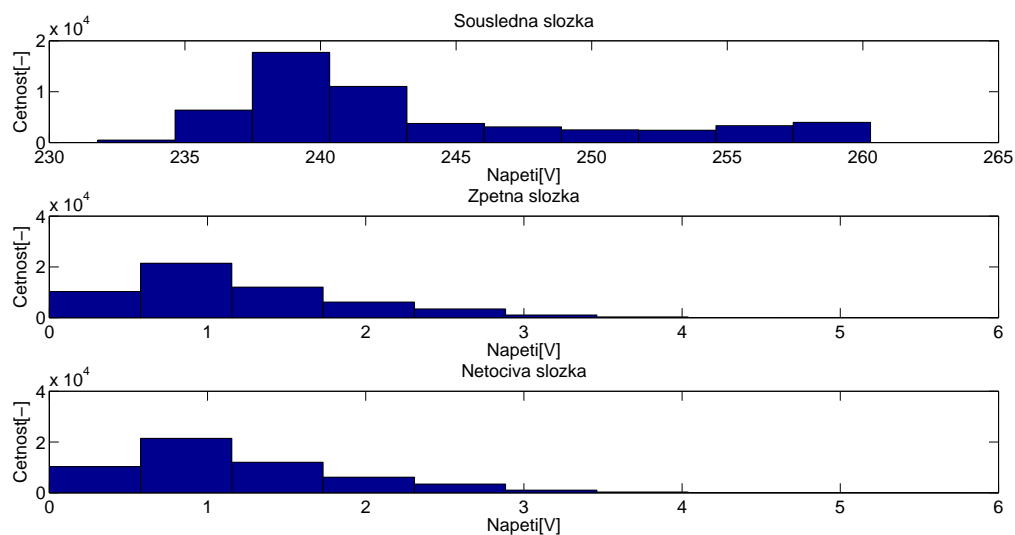
Obrázek 6.1: Sousledná, zpětná a netočivá složka napětí FVE s výkonem 400kWp



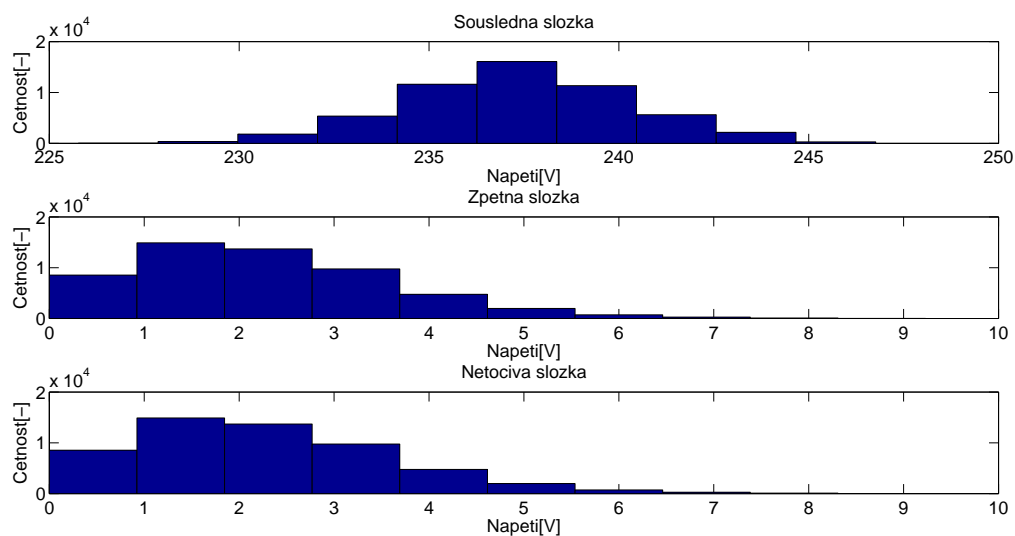
Obrázek 6.2: Sousedná, zpětná a netočivá složka napětí na trafo stanici

Na obrázku 6.1 a 6.2 pozorujeme minimální nesymetrickou složku napětí, která dosahuje maximálně desetin V . Tato nesymetrie je na hranici přesnosti měřících přístrojů a tudíž je možné ji zanedbat. Z těchto výsledků je možné považovat síť vysokého napětí za symetrickou.

Dále budu analyzovat nesymetrii napětí na konci vedení. Použiji data naměřená na FVE s výkonem 70 kWp a rozpojovací stanici. Jak je vidět na obrázku 4.2, nachází se daleko od trafo stanice, jako krajní body sítě.



Obrázek 6.3: Sousledná, zpětná a netočivá složka napětí FVE s výkonem 70kWp

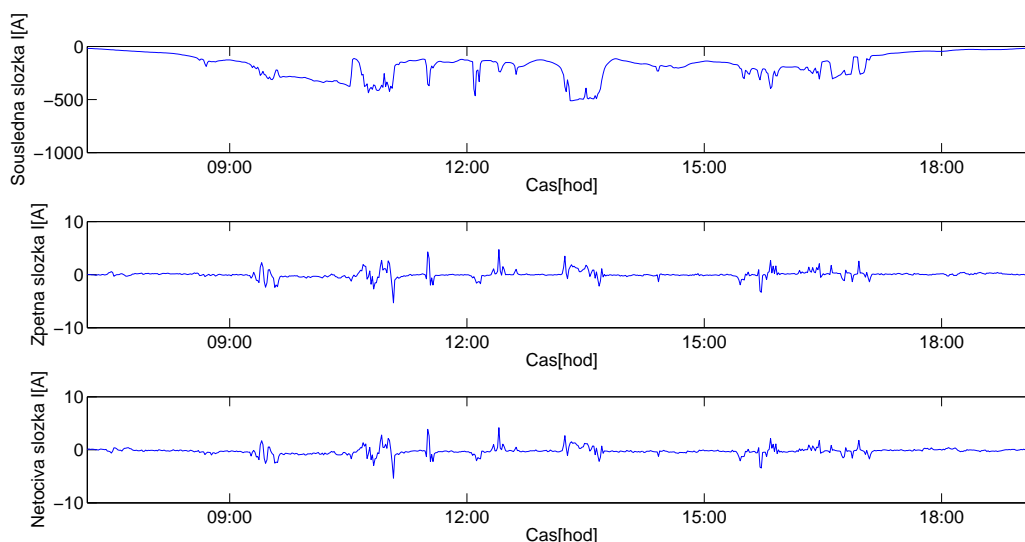


Obrázek 6.4: Sousledná, zpětná a netočivá složka napětí na rozpojovací skříni

Obrázek 6.3 a 6.4 ukazuje vliv zatížení jednotlivých odběratelů a injekcí FVE. Ukazuje nesymetrickou složku napětí v řádech voltů, s 95 % kvantilem okolo 5 V na rozpojovací stanici. Norma připouští 2 % sousledné složky napětí což odpovídá v našem případě přibližně 4.8 V. Pozorované hodnoty nesymetrie napětí jsou vyšší než norma stanovuje a představují porušení kvality dodávky elektrické energie. Na základě těchto pozorování jsem se rozhodl pro pokračování analýzou nesymetrie proudu.

6.2 Nesymetrie injektovaných proudů třífázových zdrojů

Existuje hypotéza, která připouští vznik nesymetrie napětí mezi jednotlivými fázemi FVE. Dle ní nesymetrie vzniká při skokové změně intenzity osvětlení především při přechodu mraku nad jednotlivými částmi elektrárny, které jsou připojeny do různých fází a způsobí, že změna sousledné složky proudu vyvolá změnu ve zpětné a netočivé složce proudu.

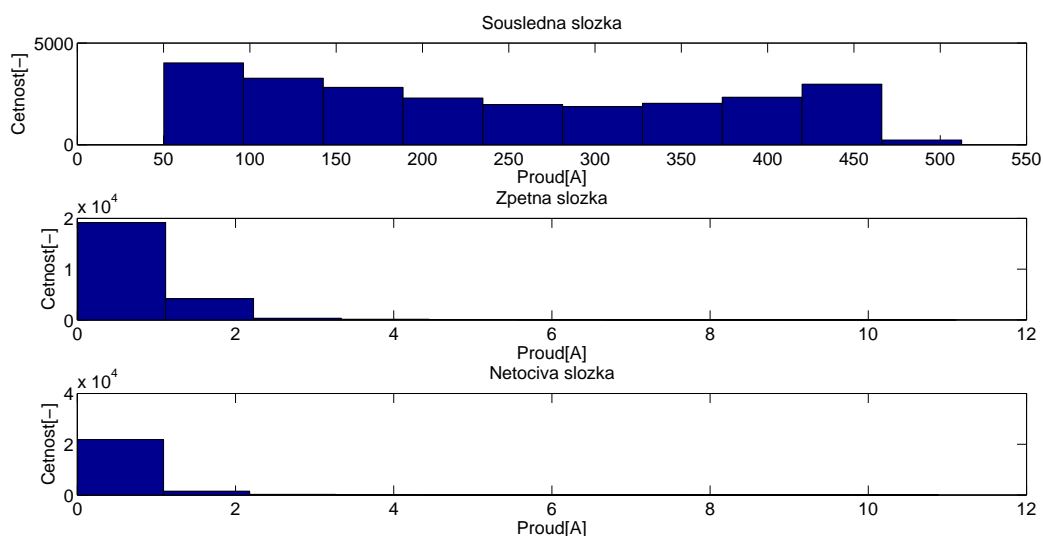


Obrázek 6.5: Sousledná, zpětná a netočivá složka proudu

Obrázek 6.5 je průběh sousledné, zpětné a netočivé složky proudu v jeden oblačný den. V porovnání těchto složek je vidět kolísání průběhu, ale není úplně zřejmé, zda-li je mezi nimi souvislost. Vzhledem k hypotéze mě dále zajímalo, jak souvisí sousledná, zpětná a netočivá složka proudu.

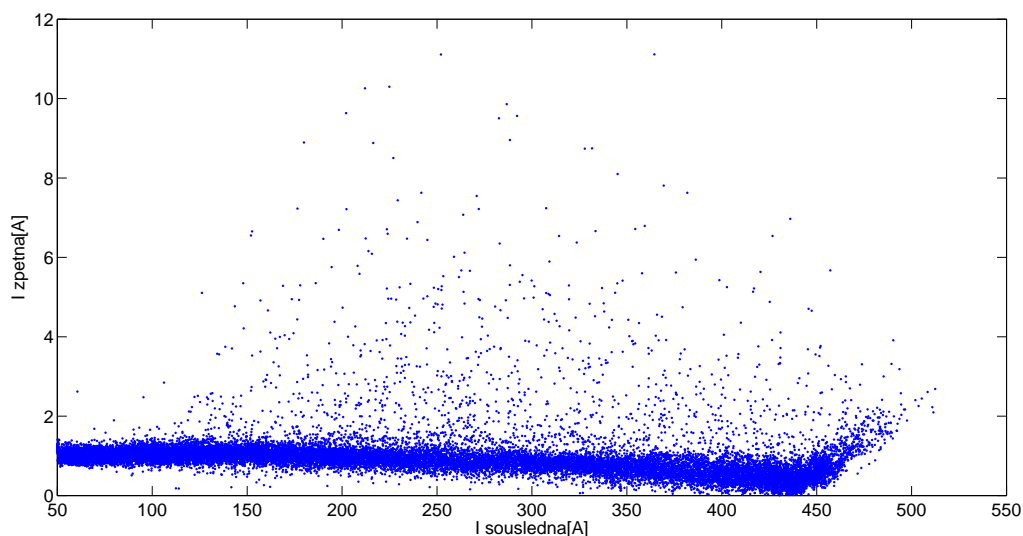
6.2.1 Analýza naměřené nesymetrie injektovaných proudů FVE 400 kWp

Pro vyhodnocení nesymetrie proudu jsem z naměřených dat vyfiltroval proudy menší než 10%. Tím jsem odstranil nenaměřené hodnoty a hodnoty proudů, kdy fotovoltaická elektrárna nevyráběla elektrickou energii.

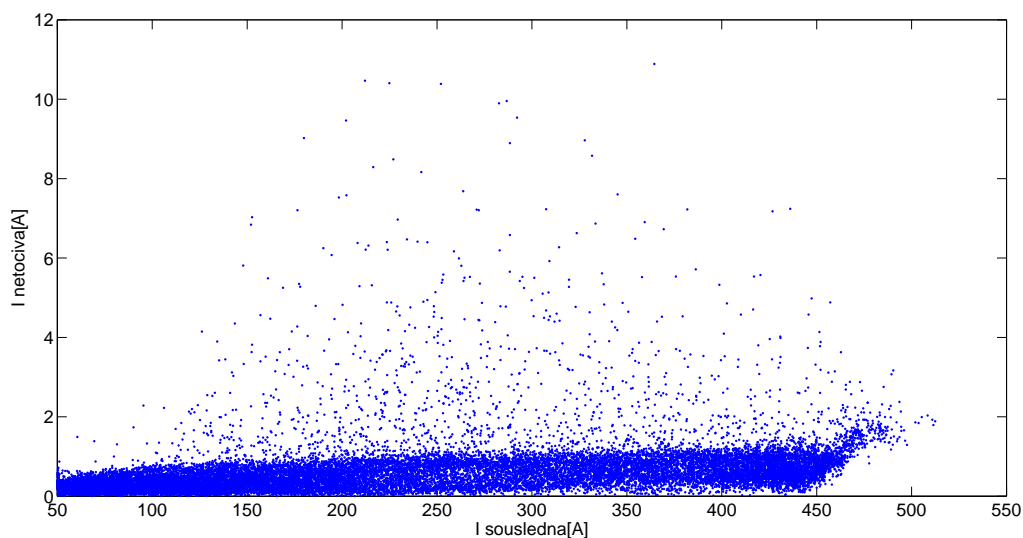


Obrázek 6.6: Sousledná, zpětná a netočivá složka proudu

Obrázek 6.6 zobrazuje četnosti sousledné, zpětné a netočivé složky proudu. Zpětná a netočivá složka je převážně nulová. Dále jsem se rozhodl vyhodnotit závislost či nezávislost jednotlivých složek proudu, která souvisí s již zmíněnou hypotézou.



Obrázek 6.7: Závislost sousledné a zpětné složky proudu



Obrázek 6.8: Závislost sousledné a netočivé složky proudu

Z obrázků 6.7 a 6.8 je patrné, že velikost nesymetrie nesouvisí s velikostí proudu. To lze spolehlivě vyjádřit pomocí korelace. Korelace vyjadřuje vzájemný vztah mezi veličinami x a y . Míru korelace vyjadřuje korelační koeficient, který nabývá hodnot od -1 do 1 . Hodnota korelačního koeficientu 1 značí lineární závislost a hodnota -1 značí nelineární závislost.

Při nezávislosti veličin X a Y je koeficient korelace roven 0.

Výpočet korelačního koeficientu:

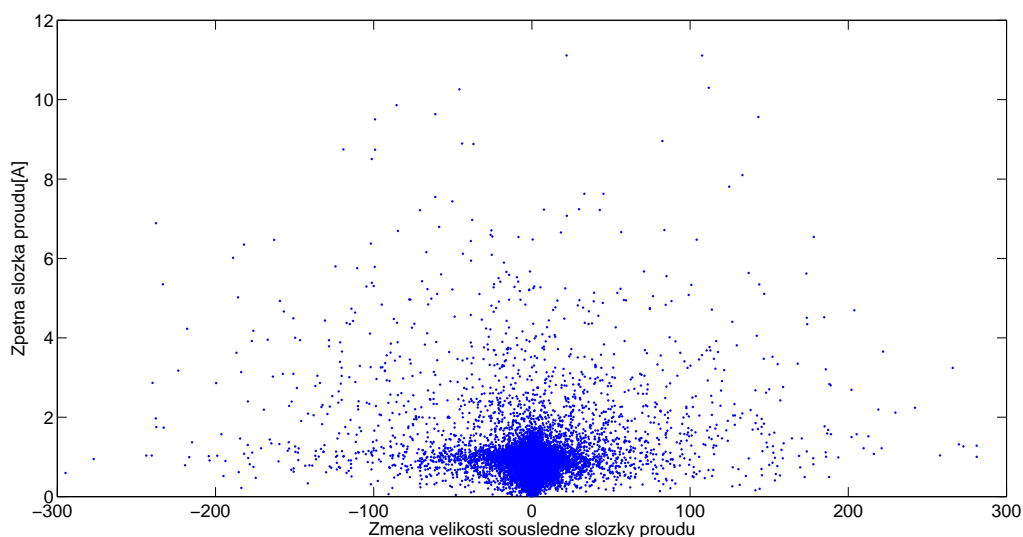
$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X\sigma_Y} = \frac{E((X - \mu_X)(Y - \mu_Y))}{\sigma_X\sigma_Y}$$

kde:

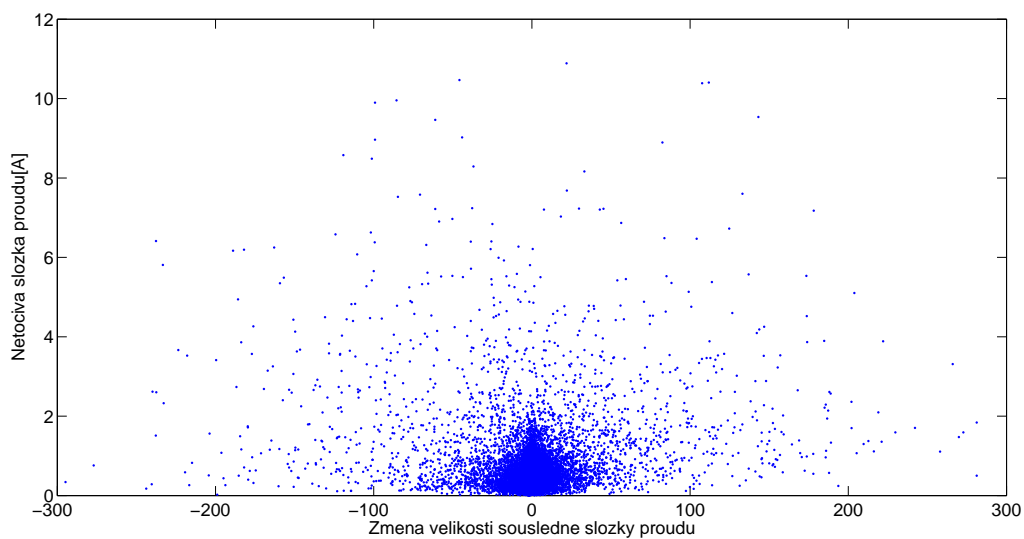
cov značí kovarianci a $\sigma_X\sigma_Y$ je součin odmocnin rozptylů proměnných X a Y .

Korelační koeficienty $\rho_{I_{\text{sousledna}}, I_{\text{zpetna}}} = 0.2287$ a $\rho_{I_{\text{sousledna}}, I_{\text{netociva}}} = 0.3298$ potvrzují nezávislost změny sousledné složky proudu se zpětnou a netočivou složkou proudu.

Dále jsem vypočítal difference sousledné složky proudu a vytvořil jejich závislost na zpětné a netočivé složce proudu, protože dle hypotézy nesymetrie vzniká při změně proudu.



Obrázek 6.9: Diference sousledné složky v závislosti na zpětné složce proudu

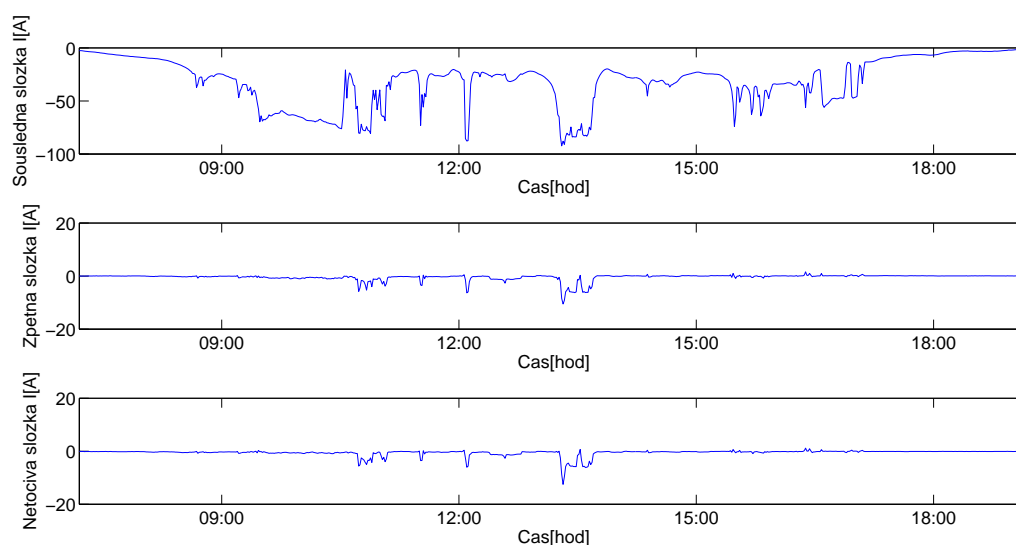


Obrázek 6.10: Diference sousledné složky v závislosti na netočivé složce proudu

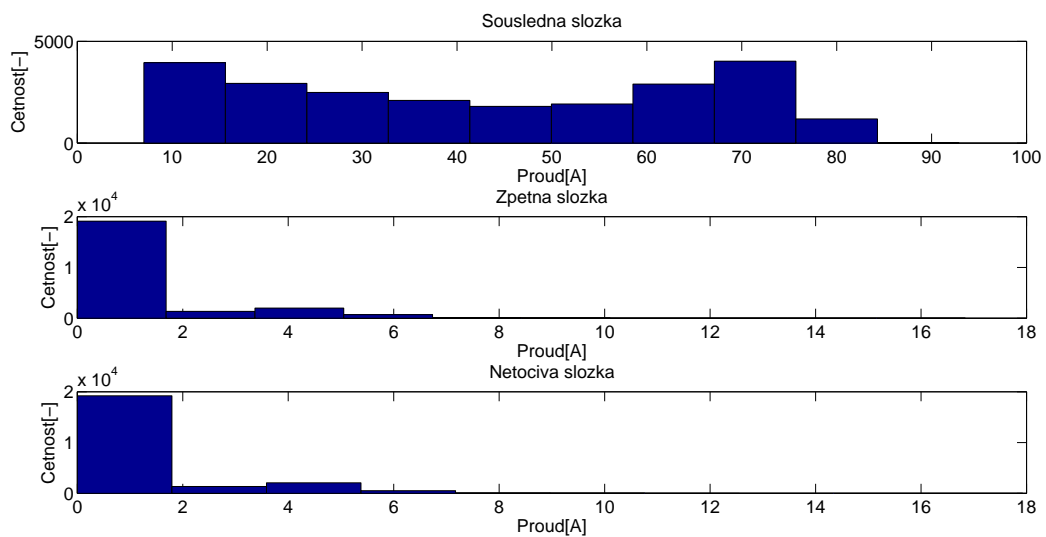
Z pozorování obrázků 6.9 a 6.10 vyplývá, že porovnávané veličiny jsou nekorelované. Korelační koeficienty $\rho_{\Delta I_{\text{sousledna}}, I_{\text{zpetna}}} = 0.0196$ a $\rho_{\Delta I_{\text{sousledna}}, I_{\text{netociva}}} = 0.0079$ potvrzují nezávislost změny sousledné složky proudu se zpětnou a netočivou složkou proudu. Totožná analýza byla použita i v případě FVE s výkonem 70 kWp.

6.2.2 Analýza naměřené nesymetrie injektovaných proudů FVE 70 kWp

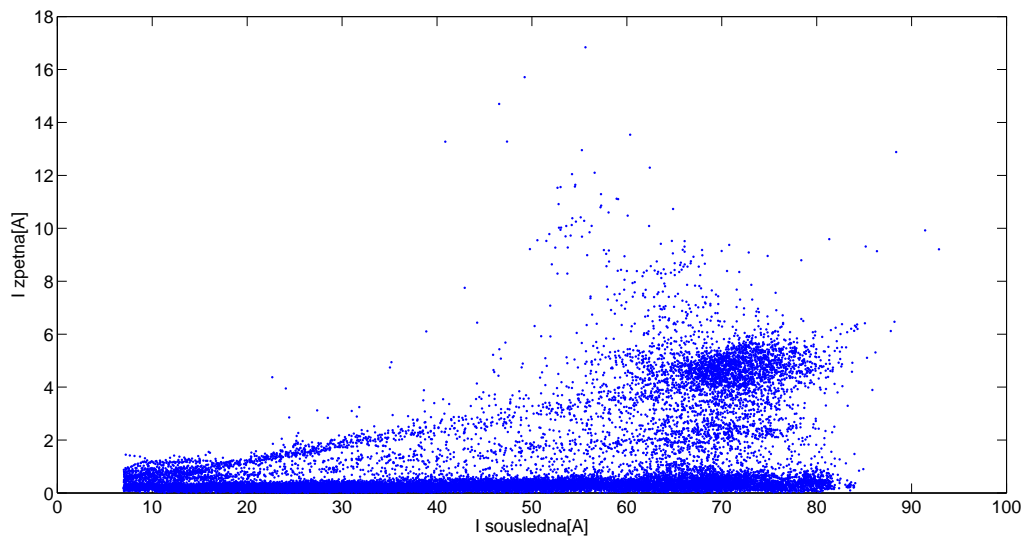
Následující obrázky 6.11 až 6.16 ukazují dosažení srovnatelných výsledků analýzy, jako v případě FVE s výkonem 400 kWp. Pouze u obrázků 6.13 a 6.14 je pozorována vyšší závislost sousledné složky na zpětné a netočivé složce proudu. Toto pozorování potvrzují vypočítané korelační koeficienty. Korelační koeficienty ukazují mírný stupeň korelační závislosti. Nelze přesně určit z jakého důvodu došlo k mírné závislosti u FVE 70 kWp nicméně pro zpětnou a netočivou složku proudu zobrazenou na obrázku 6.12 jsem vypočítal, že 78% zpětné a netočivé složky je menších než 1 A. To jsou v souvislosti se souslednou složkou proudu zanedbatelné hodnoty. A proto lze porovnávané veličiny považovat za nekorelované a změny sousledné složky proudu jako nezávislé se zpětnou a netočivou složkou proudu. Nepodařilo se najít závislost mezi velikostí výroby elektrárny a nesymetrií proudu. Z tohoto důvodu lze zamítnout hypotézu, že změna sousledné složky proudu vyvolá změnu ve zpětné a netočivé složce proudu. Lze tedy zamítnout i hypotézu, která připouští vznik nesymetrie napětí mezi jednotlivými fázemi elektrárny, například při přechodu mraku nad jednotlivými částmi elektrárny, které jsou připojeny do různých fází. Na základě těchto pozorování a analýz jsem se rozhodl dále se nezabývat nesymetrií u třífázových zdrojů. Model pro výpočet nesymetrie třífázových zdrojů je symetrický.



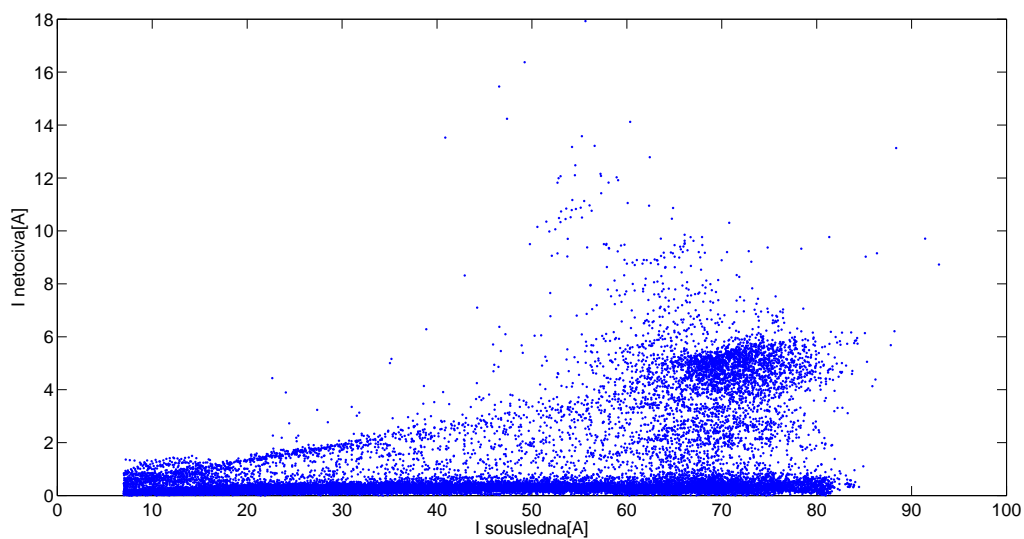
Obrázek 6.11: Sousledná, zpětná a netočivá složka proudu



Obrázek 6.12: Sousedná, zpětná a netočivá složka proudu

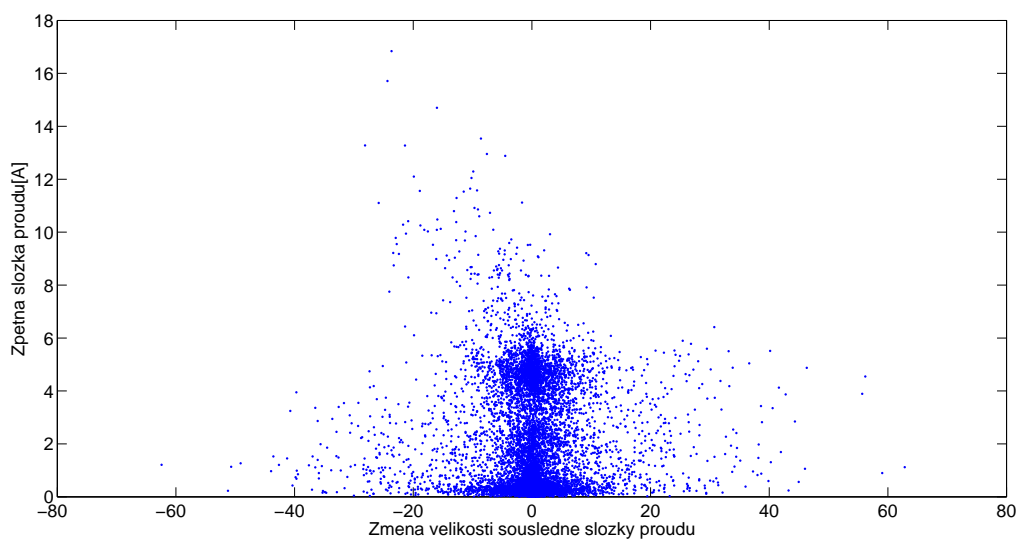


Obrázek 6.13: Závislost sousledné a zpětné složky proudu

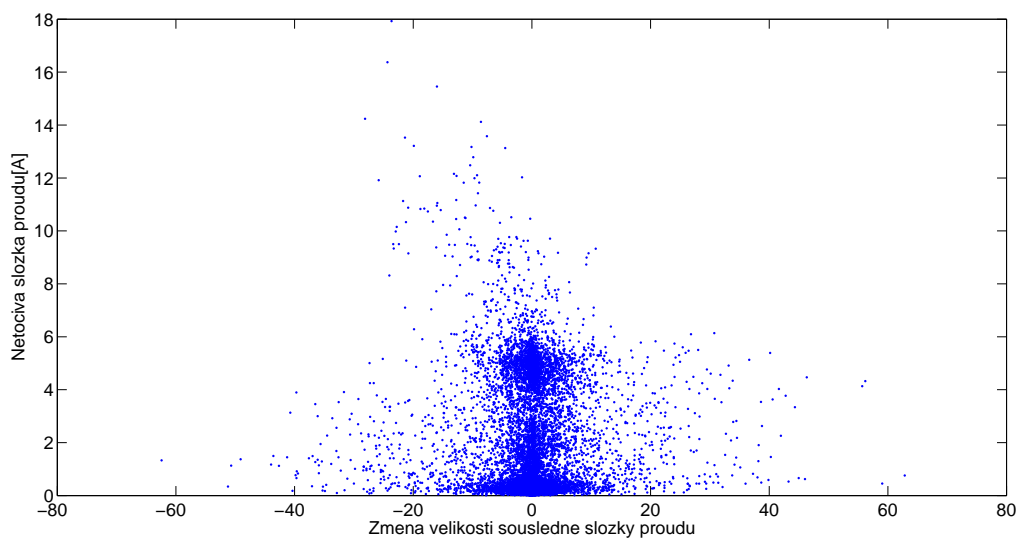


Obrázek 6.14: Závislost sousledné a netočivé složky proudu

Korelační koeficienty $\rho_{I_{\text{sousledna}}, I_{\text{zpetna}}} = 0.4737$ a $\rho_{I_{\text{sousledna}}, I_{\text{netociva}}} = 0.4722$ ukazují mírný stupeň korelační závislosti.



Obrázek 6.15: Diference sousledné složky v závislosti na zpětné složce proudu

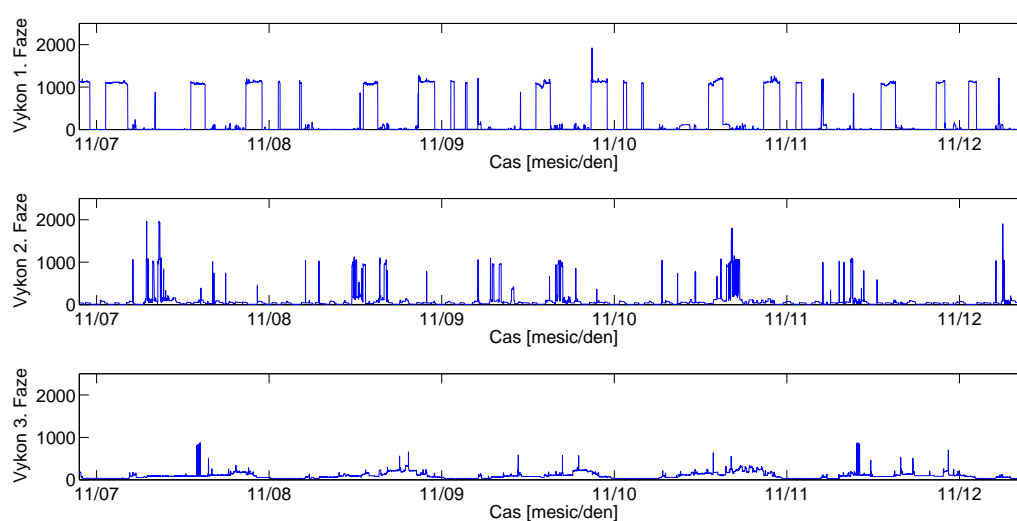


Obrázek 6.16: Diference sousledné složky v závislosti na netočivé složce proudu

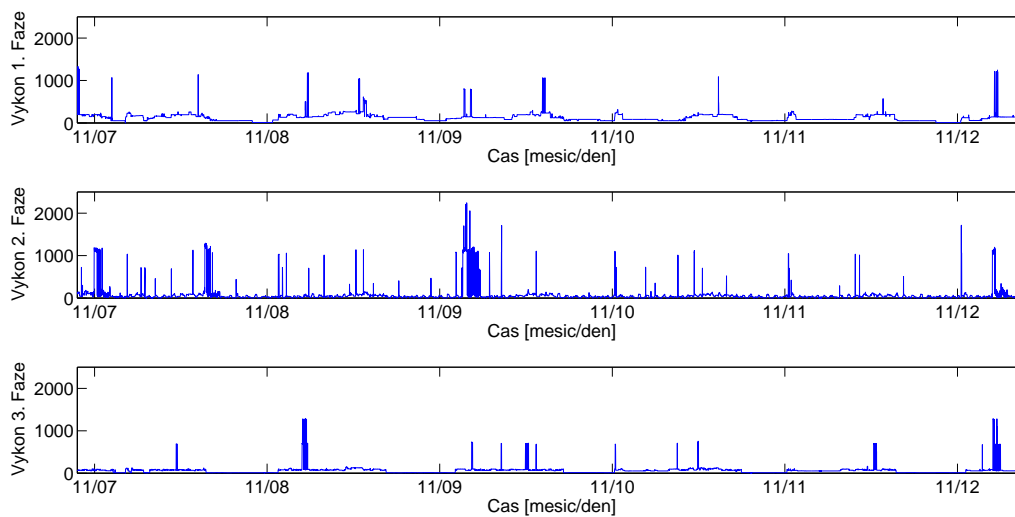
Korelační koeficienty $\rho_{\Delta I_{\text{sousledna}}, I_{\text{zpetna}}} = 0.0346$ a $\rho_{\Delta I_{\text{sousledna}}, I_{\text{netociva}}} = 0.0414$ potvrzují nezávislost změny sousledné složky proudu se zpětnou a netočivou složkou proudu.

6.3 Nesymetrie odběru maloodběratelů

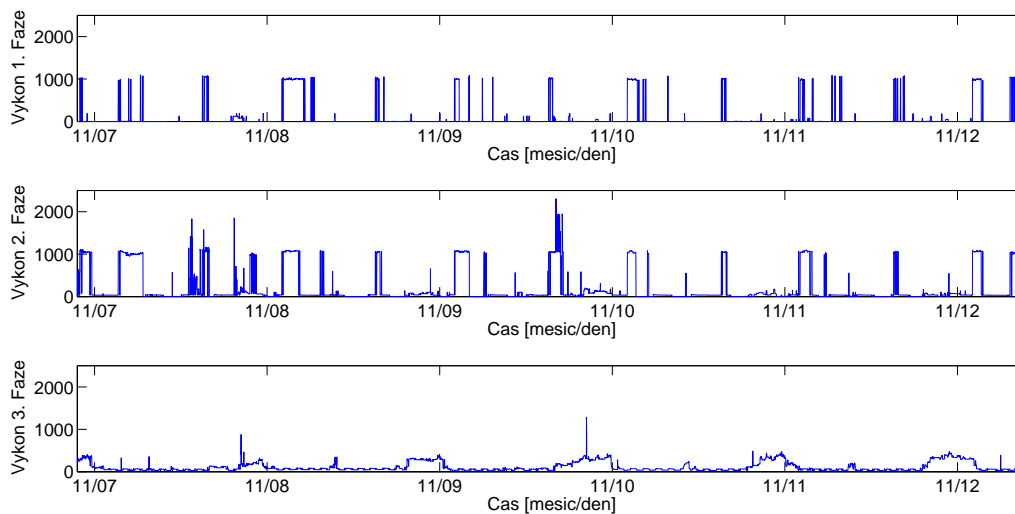
Pro návrh výpočetního algoritmu pro výpočet zpětných vlivů s využitím stávajícího výpočtu chodu sítí, je zapotřebí podívat se i na nesymetrii odběratelů DS. V Horušanské síti bylo provedeno i měření u odběratelů. Měřeno bylo u deseti odběratelů, a to konkrétně výkon, proud a napětí na 3 fázích. Vzhledem k tomu, že někteří odběratelé mají vlastní FVE, která ovlivnila toto měření a v průběhu měření se u některých odběratelů vyskytly problémy s komunikací, šumem apod., jsem se rozhodl použít pro svou práci data naměřená u čtyř odběratelů, která vypadají na první pohled jako správně naměřená. Pro vyhodnocení nesymetrie odběratelů jsem se zaměřil na naměřený odebíraný výkon u odběratelů.



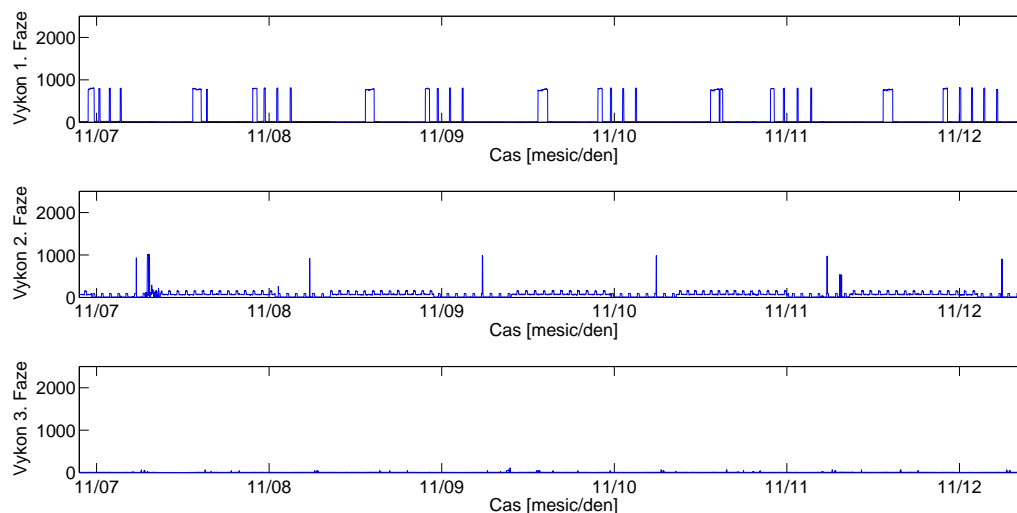
Obrázek 6.17: Naměřený výkon odběratele 1.



Obrázek 6.18: Naměřený výkon odběratele 2.



Obrázek 6.19: Naměřený výkon odběratele 3.



Obrázek 6.20: Naměřený výkon odběratele 4.

Obrázky 6.17 - 6.20 ukazují vykreslené výkony na 3 fázích u jednotlivých odběratelů. Vypočítal jsem korelace mezi fázemi (tabulka 6.1) a odebíraný výkon z jednotlivých fází u odběratelů (tabulka 7.2). Odebíraný výkon je vyjádřen procentuálně v tabulce 6.3.

Tabulka 6.1: Korelace výkonu na fázích

	P1 vs. P2	P1 vs. P3	P2 vs. P3
Korelace odběratel 1	0.0876	0.0102	0.1425
Korelace odběratel 2	0.1631	0.2300	0.1604
Korelace odběratel 3	0.5210	0.1284	0.0701
Korelace odběratel 4	0.0014	0.0191	0.0252

Tabulka 6.2: Odebíraný výkon

	Výkon 1. fáze[kWh]	Výkon 2. fáze[kWh]	Výkon 3. fáze[kWh]
Odběratel 1	33.9	12.1	12.8
Odběratel 2	17.1	10.2	8.8
Odběratel 3	11.9	27.1	14.8
Odběratel 4	12.3	9.3	0.7

Tabulka 6.3: Odebíraný výkon

	Výkon 1. fáze[%]	Výkon 2. fáze[%]	Výkon 3. fáze[%]
Odběratel 1	57.6	20.6	21.8
Odběratel 2	47.3	28.2	24.5
Odběratel 3	22.1	50.3	27.6
Odběratel 4	54.9	41.6	3.5

Z dosažených výsledků analýzy usuzují, že odebíraný výkon do jednotlivé fáze je nezávislý na ostatních fázích. Je tedy možné modelovat 3 fázového odběratele z DS jako 1 fázového. V tabulce 6.3 je vidět, že odběratel odebírá z 1 fáze od 0% do maximálně přibližně 60% z celkové roční spotřeby.

6.4 Model odběratelů

O neměřených odběratelých je obecně málo relevantních informací. Typicky známe jen informace sloužící k fakturaci elektrické energie:

1. sazba
2. roční spotřeba
3. velikost hlavního jističe

Existuje 8 tříd odběratelů:

Tabulka 6.4: Rozdělení odběratelů do tříd podle sazby

Podnikatelé	
Třída	Sazba
1	C01,C02,C03
2	C24,C25,C26,C35,C36
3	C45,C46,C55
8	C62

Tabulka 6.5: Rozdělení odběratelů do tříd podle sazby

Domácnosti	
Třída	Sazba
4	D01,D02
5	D24,D25,D26
6	D34,D35,D36
7	D45,D46,D55

Dále budu pro vytvoření modelu odběratele používat metodu, která se používá na katedře kybernetiky FAV, ZČU a je popsána v [21].

Pro každou třídu poskytují OTE[22] typové diagramy dodávky (TDD_n) elektrické energie, které reprezentují rozložení spotřeby během roku. Tyto diagramy jsou pro další výpočty znormovány relativně k roční práci podle vzorce:

$$TDD_\mu(t) = \frac{TDD_n(t)}{\sum_{i=1}^{8760} TDD_n(i)}$$

Každého zákazníka můžeme modelovat odebíraným výkonem:

$$S_{0k}(t) = P_{0k}(t) + iQ_{0k}(t)$$

První dva momenty určujeme na základě denních diagramů:

$$\begin{aligned} \langle P_{0k}(t) \rangle &= TDD_\mu(t) \cdot W_{rok} \\ \langle \langle P_{0k}(t) \rangle \rangle &= (TDD_\sigma(t) \cdot W_{rok})^2 \end{aligned}$$

Jalový výkon na základě zadaného účinníku $\cos(\phi)$:

$$Q_{0k} = P_{0k} \cdot \tan(\phi) = P_{0k} \cdot \frac{\sqrt{1 - \cos^2(\phi)}}{\cos(\phi)}$$

3 fázový výkon je možné rozdělit do jednotlivých fází:

$$P_{0k}^{3f}(t) = [k_{1k}, k_{2k}, k_{3k}] \cdot P_{0k}(t)$$

kde:

$k = 0 - 60\%$ vycházející z analýzy v kapitole 6.3 a musí platit $k_1 + k_2 + k_3 = 1$

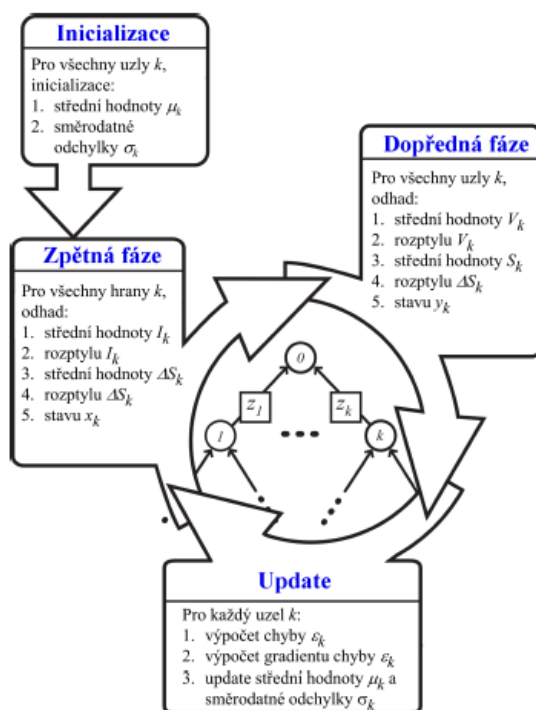
6.5 Nesymetrie jednofázových zdrojů a jednofázových odběratelů

Injektovaný nebo odebíraný výkon je u jednofázových zdrojů nebo odběratelů stejný jako u třífázových. Z definice vyplývá, že veškerý výkon je injektován nebo odebírán do 1 fáze, na kterou může být připojen jednofázový odběratel např. v panelovém domě nebo malá FVE.

Kapitola 7

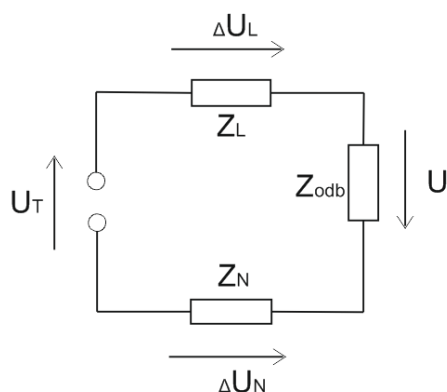
Třífázové výpočetní algoritmy

V této kapitole vycházím z výpočetní metody pro řešení probabilistic load flow problému anglicky nazvanou Backward/Forward load flow Analysis, která je popsána v [1]. Tato výpočetní metoda počítá se symetrickou soustavou a provádí jednofázový výpočet. Algoritmus výpočetní metody je graficky znázorněn na obrázku 7.1 [1].

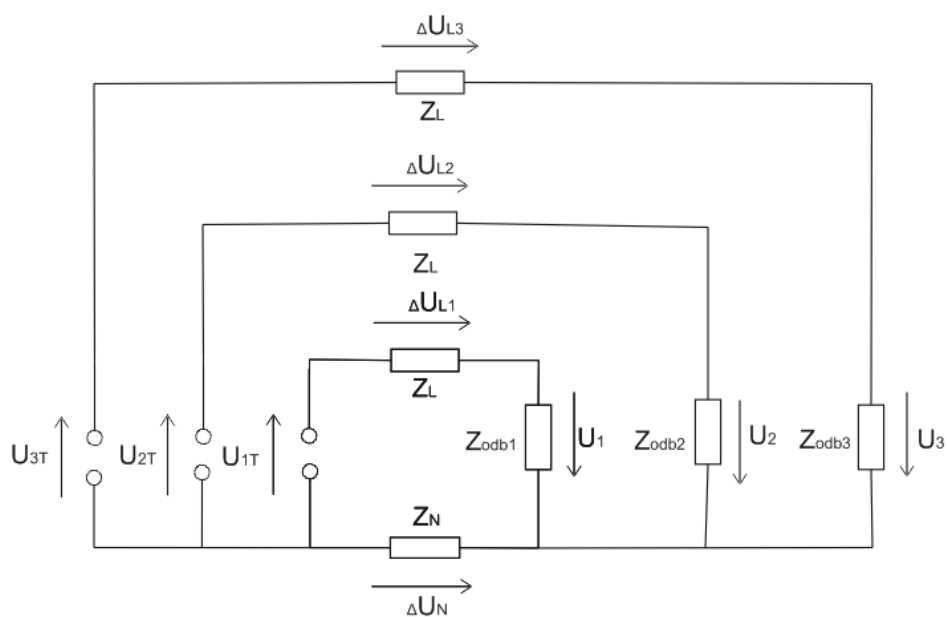


Obrázek 7.1: Schéma výpočetní metody

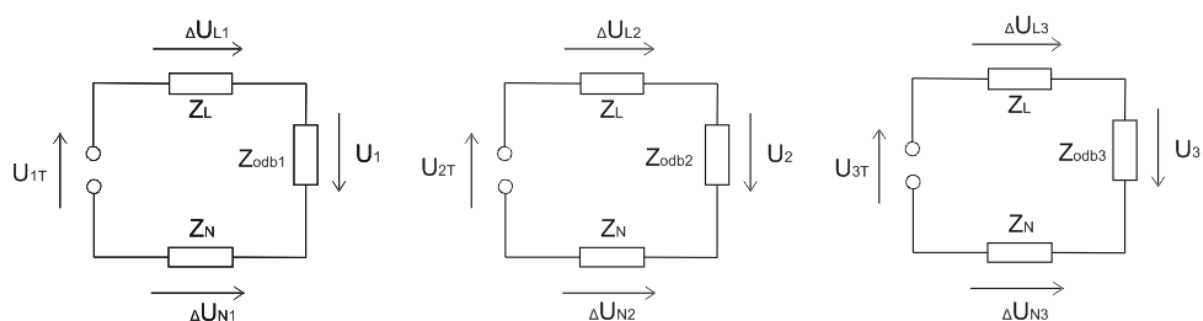
Pro jednoduchost bude 3 fázové rozšíření výpočetní metody vysvětleno na síti s 1 odběratelem. V jednofázovém výpočtu model sítě představuje obvod na obrázku 7.2. Pro 3 fázový výpočet je zapotřebí uvažovat plný 3 fázový model této sítě na obrázku 7.3. Podle principu superpozice lze třífázovou soustavu převést na 3 jednofázové soustavy (obrázek 7.4).



Obrázek 7.2: Schéma 1 fázového modelu sítě

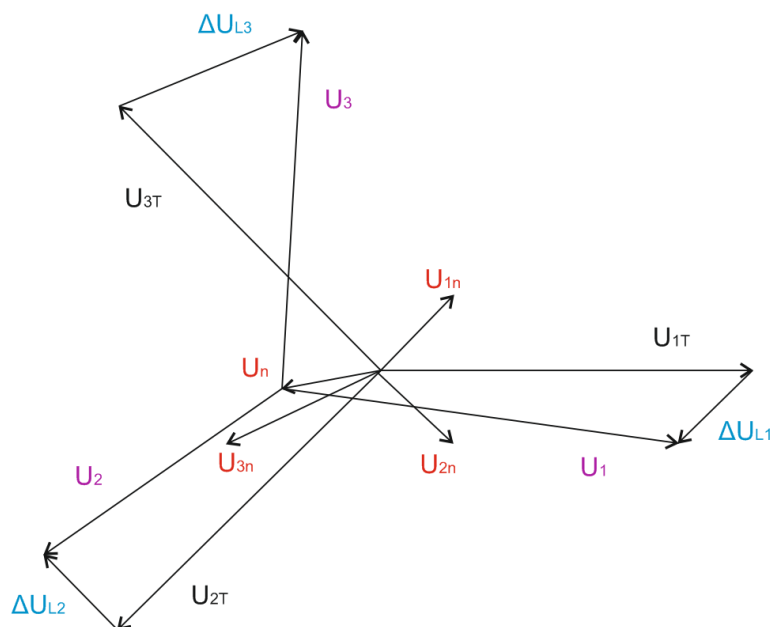


Obrázek 7.3: 3 fázová soustava



Obrázek 7.4: Schéma 3 fází

Princip superpozice spočívá v tom, že pro každou fázi probíhá vyhodnocení zvlášť a podle principu superpozice je zapotřebí tyto fáze po vyhodnocení sečíst zpátky. Jediná společná část obvodu je nulový vodič. Proudů protékajících ve fázovém vodiči jsou stejné, jak v 1 fázovém, tak v 3 fázovém obvodu. Proudů na nulovém vodiči se vektorově sčítají. Výpočet napětí je složitější a je principiálně zobrazen na fázovém diagramu na obrázku 7.5.



Obrázek 7.5: Fázový diagram napětí

Napětí na transformátoru představují fázory U_{1T} , U_{2T} a U_{3T} . Z 1 fázových obvodů je vypočítán úbytek na jednotlivých fázích ΔU_{L1} , ΔU_{L2} a ΔU_{L3} . Protékající proud nulovým vodičem také změní napětí mezi místem měření a transformátorem U_n . Napětí na nulovém vodiči je změna napětí na nulovém vodiči. U_n je vypočítáno součtem úbytků napětí na nulovém vodiči jednotlivých fází:

$$U_n = \Delta \vec{U}_{1n} + \Delta \vec{U}_{2n} + \Delta \vec{U}_{3n}$$

Fázové napětí U_1, U_2 a U_3 se vypočte z napětí na transformátoru, úbytku a napětí v nulovém vodiči.

Díky tomu, že platí princip superpozice jsem mohl vycházet z uvedené 1 fázové výpočetní metody a provést její modifikaci pro výpočet na třífázové soustavě.

Ve skutečnosti není v odběrném místě známo, jakým způsobem je 3 fázový odběr rozdělen do jednotlivých fází. Není známo, který vodič konkrétně odpovídá jaké fázi. Jediné určené je pořadí fází. Jednofázové zdroje jsou také připojeny k distribuční síti náhodně, stejně jako jednofázový odběratel. Pokud jsou zjištěny problémy s nesymetrií jsou odběratel přepojeni na jiné fáze. Z tohoto důvodu z hlediska výpočtu rozdělení jednotlivých fází je možné považovat za náhodné. Zajímalo mě tedy, jak moc ovlivňuje rozdělení do jednotlivých fází a jaké jsou hranice mezní nesymetrie.

V kapitole 6.3 jsem dokázal, že odebíraný výkon do jednotlivé fáze je nezávislý na ostatních fázích. Odběratelé byli rozděleni do 3 fází podle výpočtu dosaženého v kapitole 6.4.

Citlivostní analýza rozdělení odběrů a zdrojů do fází

Výpočty byly vyhodnoceny na významných místech sítě obce Horušany viz kapitola 4. Pouze místo FVE 400 kWp je vyhodnocen vybraný odběratel z distribuční sítě. Odběratel na adrese Horušany 11, Soběkury 334 01. Algoritmus počítá celou distribuční síť obce, ale pro mou práci jsou významné body dostačující. Výsledné hodnoty jsou převedeny zpět do 3 fázové soustavy a vyobrazeny v následujících tabulkách 7.1 až 7.4. Vyhodnocení, jehož cílem je zjistit jak se liší 1 fázový výpočet a 3 fázový, je na základě střední hodnoty a směrodatné odchylky. Vypočítané střední hodnoty a směrodatné odchylky jsou provedeny z výsledků Monte Carlo simulace s 10 000 realizacemi, tak aby byla zaručena přesnost simulace.

Tabulka 7.1: Výpočty na Trafo stanici

		Třířákový výpočet (MC n = 10000)					
		1 fáze		2 fáze		3 fáze	
	Jednofázový výpočet	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
Napětí [V]	244.25	244.25	0	244.25	0	244.25	0
Proud na jedné fázi [A]	94.04	96.38	9.42	96.58	9.47	96.61	9.34
Horní kvantil napětí [V]	244.25	244.25					
Spodní kvantil napětí [V]	244.25	244.25					

Tabulka 7.2: Výpočty na Rozpojovací stanici

		Třířákový výpočet (MC n = 10000)					
		1 fáze		2 fáze		3 fáze	
	Jednofázový výpočet	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
Napětí [V]	242.26	242.52	0.36	242.51	0.36	242.52	0.36
Proud na jedné fázi [A]	0	0	0	0	0	0	0
Horní kvantil napětí [V]	243.32	243.35					
Spodní kvantil napětí [V]	241.29	241.68					

Tabulka 7.3: Výpočty na Elektrárně s výkonem 70 kWp

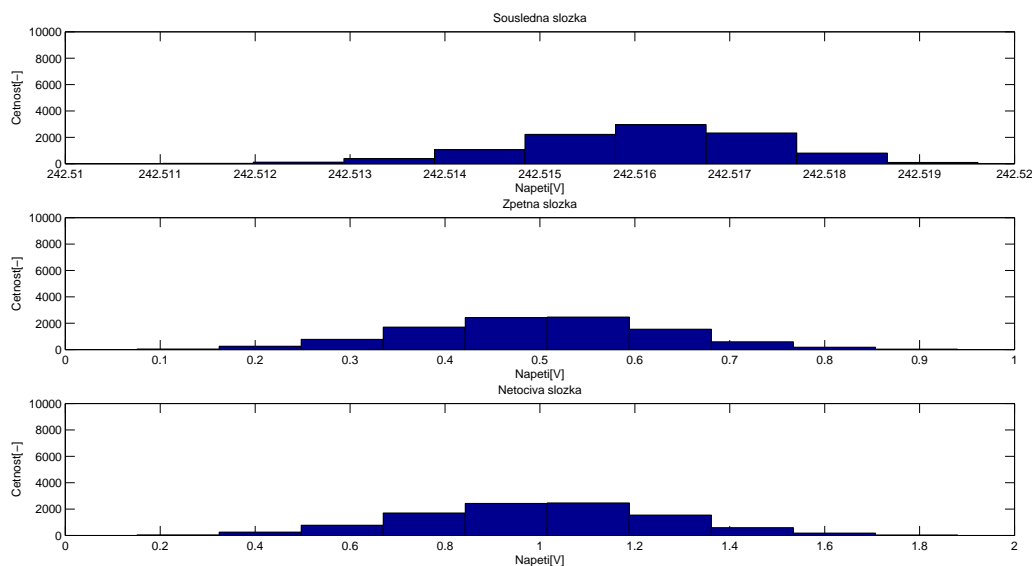
		Třířákový výpočet (MC n = 10000)					
		1 fáze		2 fáze		3 fáze	
	Jednofázový výpočet	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
Napětí [V]	257.64	255.99	0.16	255.99	0.16	255.99	0.16
Proud na jedné fázi [A]	63.82	64.25	1.13	64.23	1.13	64.25	1.13
Horní kvantil napětí [V]	258.66	257.02					
Spodní kvantil napětí [V]	256.67	254.95					

Tabulka 7.4: Výpočty u Odběratele

		Třířákový výpočet (MC n = 10000)					
		1 fáze		2 fáze		3 fáze	
	Jednofázový výpočet	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Střední hodnota	Směrodatná odchylka
Napětí [V]	244.54	244.50	0.09	244.50	0.09	244.50	0.09
Proud na jedné fázi [A]	0.30	0.30	0.16	0.30	0.16	0.30	0.16
Horní kvantil napětí [V]	244.79	244.82					
Spodní kvantil napětí [V]	244.29	244.19					

Tabulky 7.1 až 7.4 ukazují, že střední hodnoty napětí na všech fázích jsou stejné. Rozdělení injektovaného výkonu do jednotlivých fází se ukazuje na směrodatné odchylce napětí. Rozdíl napětí mezi 1 fázovým výpočtem a 3 fázovým je u trafo stanice, rozpojovací stanice a u odběratele je minimální. Směrodatná odchylka na rozpojovací stanici 0.36 ukazuje rozdíly realizací přibližně do 1 V. U elektrárny 70 kWp je rozdíl ve střední hodnotě mezi 1 fázovým a 3 fázovým výpočtem přibližně 1.5 V. Spolu se směrodatnou odchylkou to znamená chybu přibližně do 2 V. Vyhodnocený proud je nejvyšší na trafo stanici. Vyšší směrodatná odchylka proudu odpovídá předpokladům z měření. Směrodatná odchylka určuje potřebný počet realizací metody Monte Carlo s požadovanou přesností. Chyba metody MC je $\sqrt{\frac{\sigma^2}{n}}$, kde σ je směrodatná odchylka a n je počet realizací. Pokud uvažujeme požadovanou přesnost 1 V, tak pro napětí, postačí jedna realizace.

U proudu je lepší se podívat na transformace symetrické soustavy jako je sousledná, zpětná a netočivá složka a stanovit počet počtu realizací na základě směrodatné odchylky. Výsledky výpočtů je možné opět transformovat stejným způsobem jako v kapitole 6 na souslednou, zpětnou a netočivou složku.

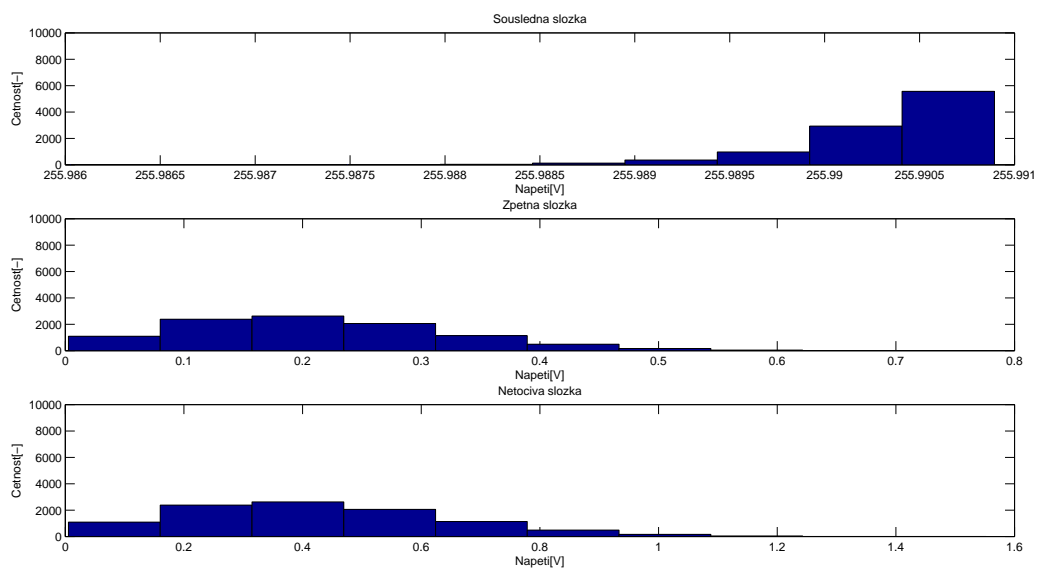


Obrázek 7.6: Sousedná, zpětná a netočivá složka napětí na rozpojovací stanici

Tabulka 7.5: Vyhodnocení rozpojovací stanice

	Střední hodnota [V]	Směrodatná odchylka [V]
Sousedná složka napětí	242.51	0
Zpětná složka napětí	0.49	0.13
Netočivá složka napětí	0.99	0.26

Norma, viz. kapitola 3. udává za normálních podmínek maximální hodnotu zpětné složky napájecího napětí v rozsahu 0 % až 2 % sousledné složky. Jak vyplývá z obrázku 7.6 a tabulky 7.5 je hodnota zpětné složky napětí 0.20 % sousledné složky.

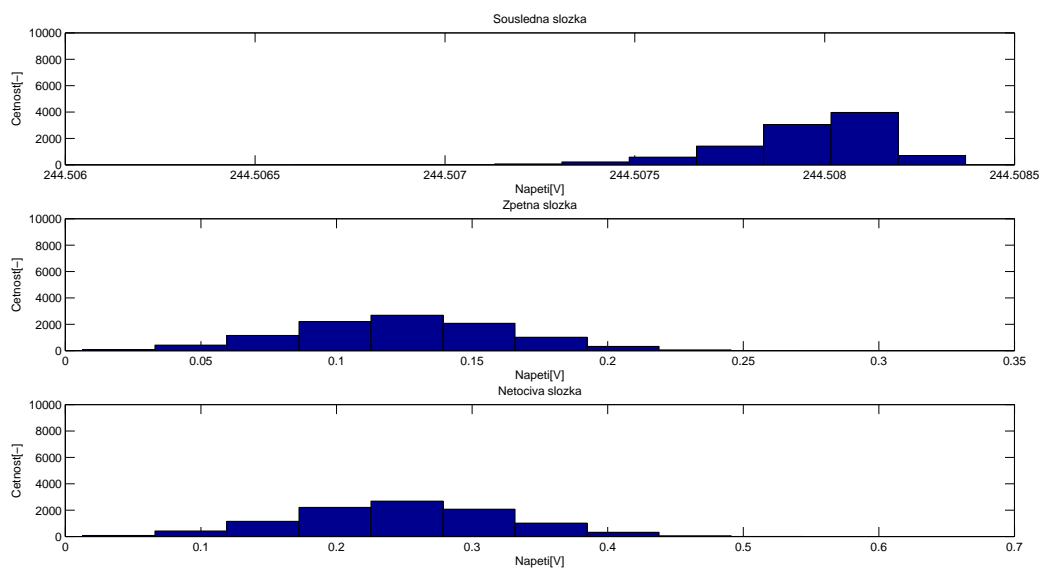


Obrázek 7.7: Sousledná, zpětná a netočivá složka napětí na FVE 70 kWp

Tabulka 7.6: Vyhodnocení FVE 70 kWp

	Střední hodnota [V]	Směrodatná odchylka [V]
Sousledná složka napětí	255.99	0
Zpětná složka napětí	0.21	0.11
Netočivá složka napětí	0.42	0.12

Jak vyplývá z obrázku 7.7 a tabulky 7.6 je hodnota zpětné složky napětí 0.08 % sousledné složky.

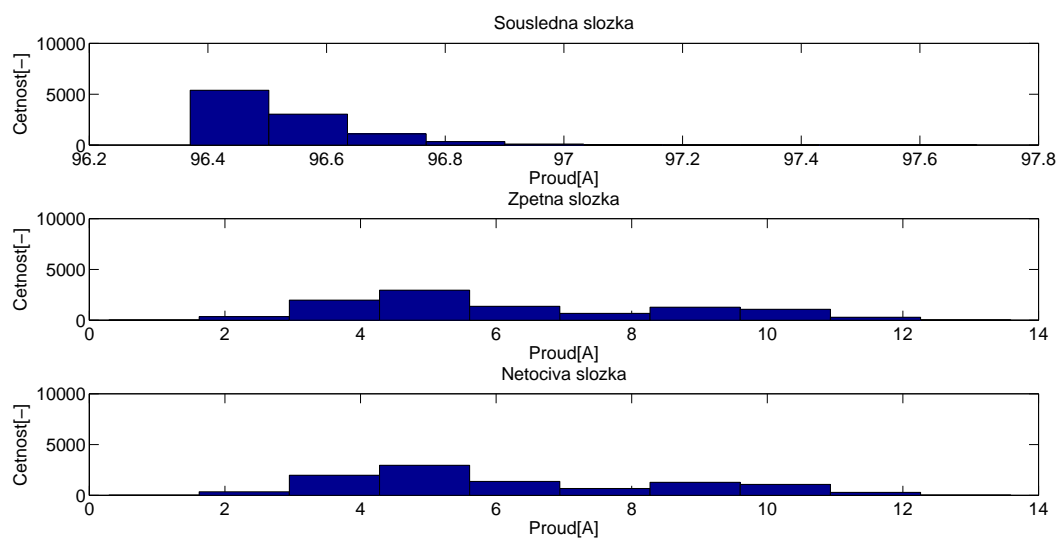


Obrázek 7.8: Sousedná, zpětná a netočivá složka napětí u odběratele

Tabulka 7.7: Vyhodnocení u odběratele

	Střední hodnota [V]	Směrodatná odchylka [V]
Sousedná složka napětí	244.50	0
Zpětná složka napětí	0.12	0.03
Netočivá složka napětí	0.24	0.07

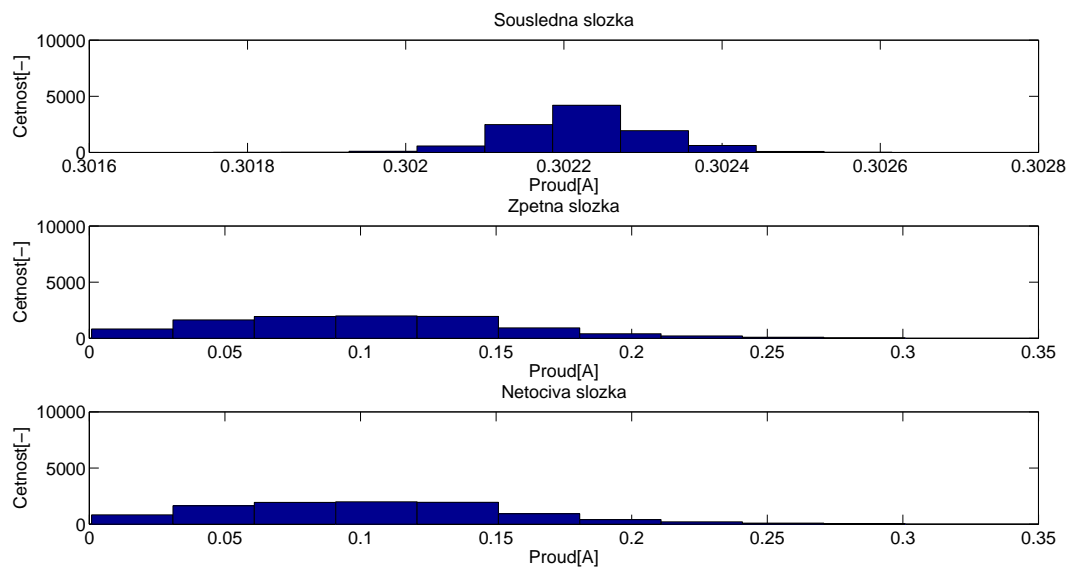
Jak vyplývá z obrázku 7.8 a tabulky 7.6 je hodnota zpětné složky napětí 0.05 % sousledné složky.



Obrázek 7.9: Sousedná, zpětná a netočivá složka proudu na trafo stanici

Tabulka 7.8: Vyhodnocení na trafo stanici

	Střední hodnota [A]	Směrodatná odchylka [A]
Sousedná složka proudu	96.52	0.11
Zpětná složka proudu	6.24	2.45
Netočivá složka proudu	6.24	2.45



Obrázek 7.10: Sousedná, zpětná a netočivá složka proudu u odběratele

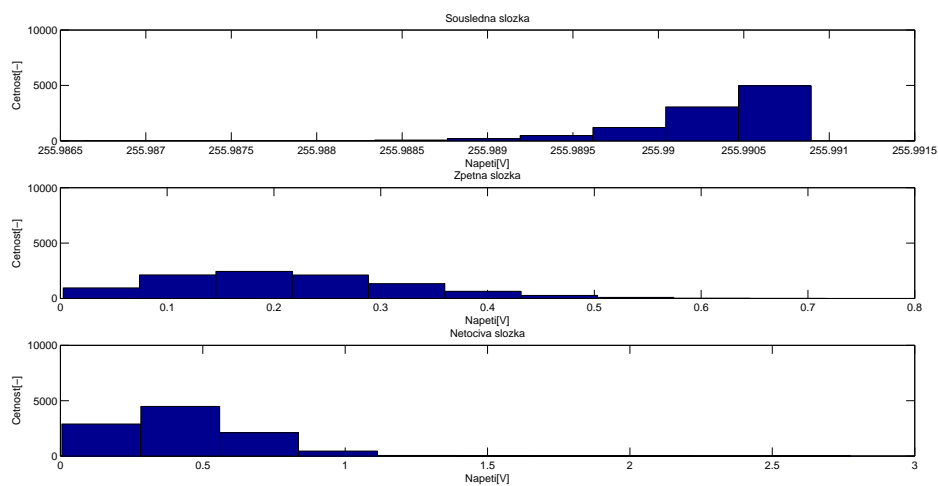
Tabulka 7.9: Vyhodnocení u odběratele

	Střední hodnota [A]	Směrodatná odchylka [A]
Sousedná složka proudu	0.30	0
Zpětná složka proudu	0.10	0.05
Netočivá složka proudu	0.10	0.05

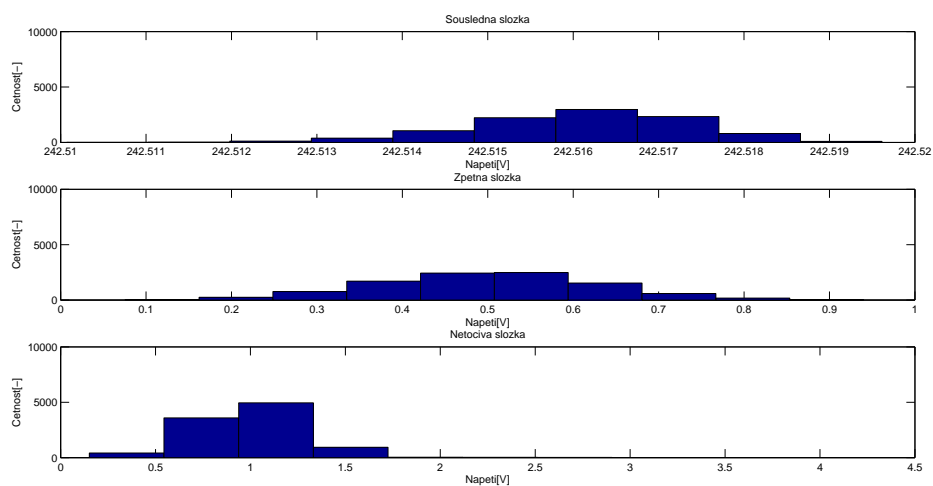
Jak vyplývá z vypočtené směrodatné odchylky proudu na transformátoru, pokud uvažujeme přesnost do 1 A, postačí pro výpočet proudu 7 realizací Monte Carlo simulace.

Vliv impedance nulového vodiče

V předchozí kapitole jsem uvažoval, že impedance nulového vedení je stejná jako u fázového. Z konstrukčních důvodů se používá silnějších vedení u lan nulového vodiče. Pro analýzu vlivu impedance jsem její hodnotu ve výpočtech pro nulový vodič dvakrát vynásobil.



Obrázek 7.11: Vliv impedance nulového vodiče na elektrárnu 70 kWp

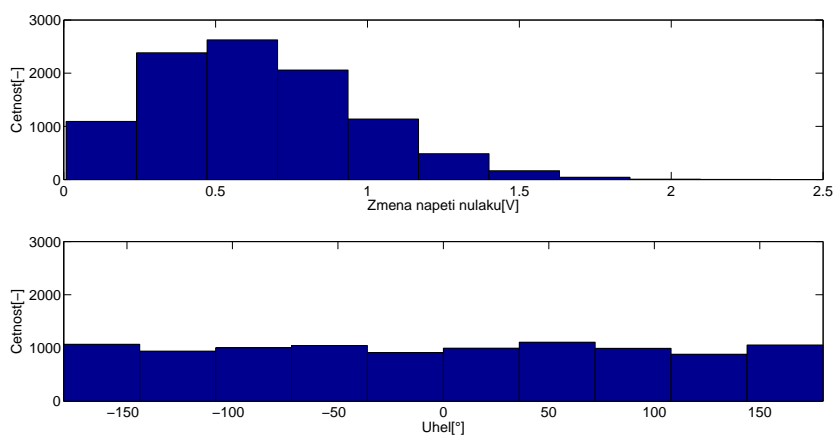


Obrázek 7.12: Vliv impedance nulového vodiče na rozpojovací stanici

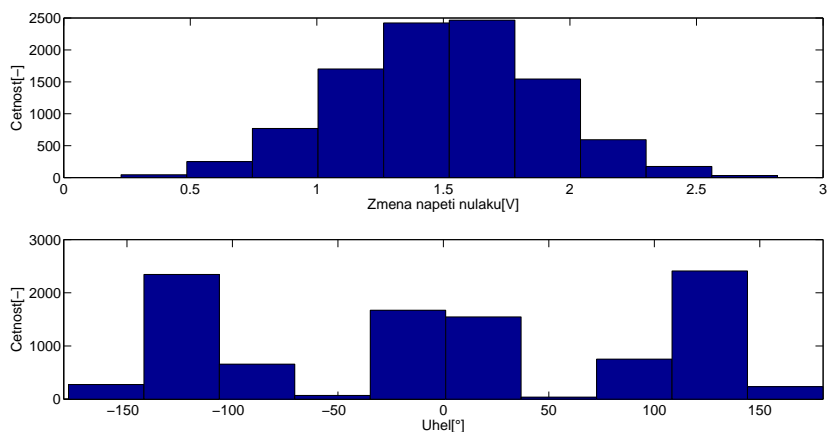
Obrázky 7.11 a 7.12 ukazují zvětšení netočivé složky napětí v obou případech, ve střední hodnotě netocive složky v podstate ke zvetseni nedoslo, tak nevím o kolik napsat..

Změny napětí v nulovém vodiči

Změny napětí v nulovém vodiči jsou vyhodnoceny na obrázku 7.5 a 7.6 pomocí histogramů. Vyhodnoceny jsou místa měření rozpojovací stanice a FVE s výkonem 70 kWp, přičemž je uvažována stejná impedance vedení nulového vodiče jako fázového. V jednofázovém výpočtu se změna v nulovém vodiči zanedbává, tak jsem se na ní podíval u 3 fázového výpočtu. Rozdíl potenciálů není příliš velký.



Obrázek 7.13: Nulový vodič na FVE 70 kWp



Obrázek 7.14: Nulový vodič na rozpojovací stanici

Kapitola 8

Závěr

V první části mé práce jsem shrnul základní fakta o fotovoltaických elektrárnách, jak vzniká fotovoltaický jev, technologii a umístění používané při výrobě a instalaci fotovoltaických panelů a vlastnosti střídače fotovoltaických elektráren. Provedl jsem také rešerši technických požadavků pro připojení fotov. elektrárny k distribuční síti a rešerši problematiky zpětných vlivů solárních zdrojů připojených k distribuční síti. Požadavky na kvalitu elektrické energie sjednocuje Česká technická norma ČSN EN 50160[17]. Tato norma stanovuje charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě.

Práce je motivována obcí Horušany, kde byla vytipována místa pro měření dat s fotovoltaickými elektrárnami připojenými k síti. Horušany byly vybrány díky vysoké penetraci solárních zdrojů v síti a naměřeným datům na kterých jsem analyzoval zpětné vlivy fotovoltaické elektrárny na distribuční síť.

V další části práce jsem se zaměřil na vyšší harmonické složky napětí. Konkrétně se jednalo o zpracování a analýzu neměřených dat v různých vytipovaných částech distribuční sítě obce Horušany s připojenými fotov. elektrárnami. Ukázalo se, že vyšší harmonické napětí se objevují pouze u některých lichých harmonických frekvencí, převážně u třetí, páté a sedmé. Analýzou dosažené hodnoty vyšších příspěvků ani činitele harmonického zkreslení bezpečně nepřesahují normou dané hodnoty, a proto nepředstavují problém pro chod sítě. Z tohoto důvodu není nutné je dále modelovat a počítat.

Dále jsem se v práci zaměřil na výpočet nesymetrie. Analýza naměřené nesymetrie napětí ukazuje vyšší hodnoty než norma stanovuje, a proto jsem se rozhodl pro pokračování analýzou nesymetrie proudu. Nepodařilo se najít závislost mezi velikostí výroby třífázové fotovoltaické elektrárny a nesymetrií proudu. Z tohoto důvodu lze zamítnout hypotézu, která připouští vznik nesymetrie napětí mezi jednotlivými fázemi třífázové elektrárny, například při přechodu mraku nad jednotlivými částmi elektrárny, které jsou připojeny do různých fází. Z analýz je patrné, že nesymetrie dodávky proudu na třífázové fotovoltaické elektrárně je zanedbatelná a je tedy možné sestavit symetrický model pro výpočet nesymetrie třífázových zdrojů. Provedl jsem analýzu odběru z distribuční sítě, aby byla analýza kompletní. Ukázalo se, že třífázový odběratel z distribuční sítě je nesymetrický a odběr z jednotlivých fází je nekorelovaný, je tedy možné ho modelovat jako 3 nezávislé jednofázové odběratele.

Poslední část práce se zabývá návrhem výpočetního algoritmu pro výpočet zpětných vlivů s využitím stávajícího algoritmu výpočtu chodu sítě. Ve stávajícím algoritmu jsem provedl modifikaci s využitím principu superpozice na 3 jednofázové soustavy. Odebíraný výkon odběratelů byl rozdělen do 3 fází podle dosažených výsledků analýzou odběratelů v Hodušanech, a to od 0 – 60% na jednu fázi z celkové roční spotřeby. Na závěr jsem provedl citlivostní analýzu vlivu rozdělení odběru a injekcí simulační metodu Monte Carlo pro výpočet 3 fázové soustavy, která ukázala, že pokud nás zajímá pouze sousledná složka napětí je rozdíl mezi jednofázovým a třífázovým výpočtem do 2 V. Z výsledků také vyplývá, že pro požadovanou přesnost výpočtu 1 V je zapotřebí 1 realizace metody Monte Carlo. Pokud nás zajímá sousledná složka proudu, pak je odchylka do 2 A. Z výsledků také vyplývá, že pro požadovanou přesnost 1 A výpočtu zpětné a netočivé složky proudu je zapotřebí 7 realizací metody Monte Carlo. Pro úplnost jsem provedl i analýzu změn napětí v nulovém vodiči. Rozdíl potenciálu mezi nulovým vodičem na konci sítě a transformátorem je v řádech jednotek voltů.

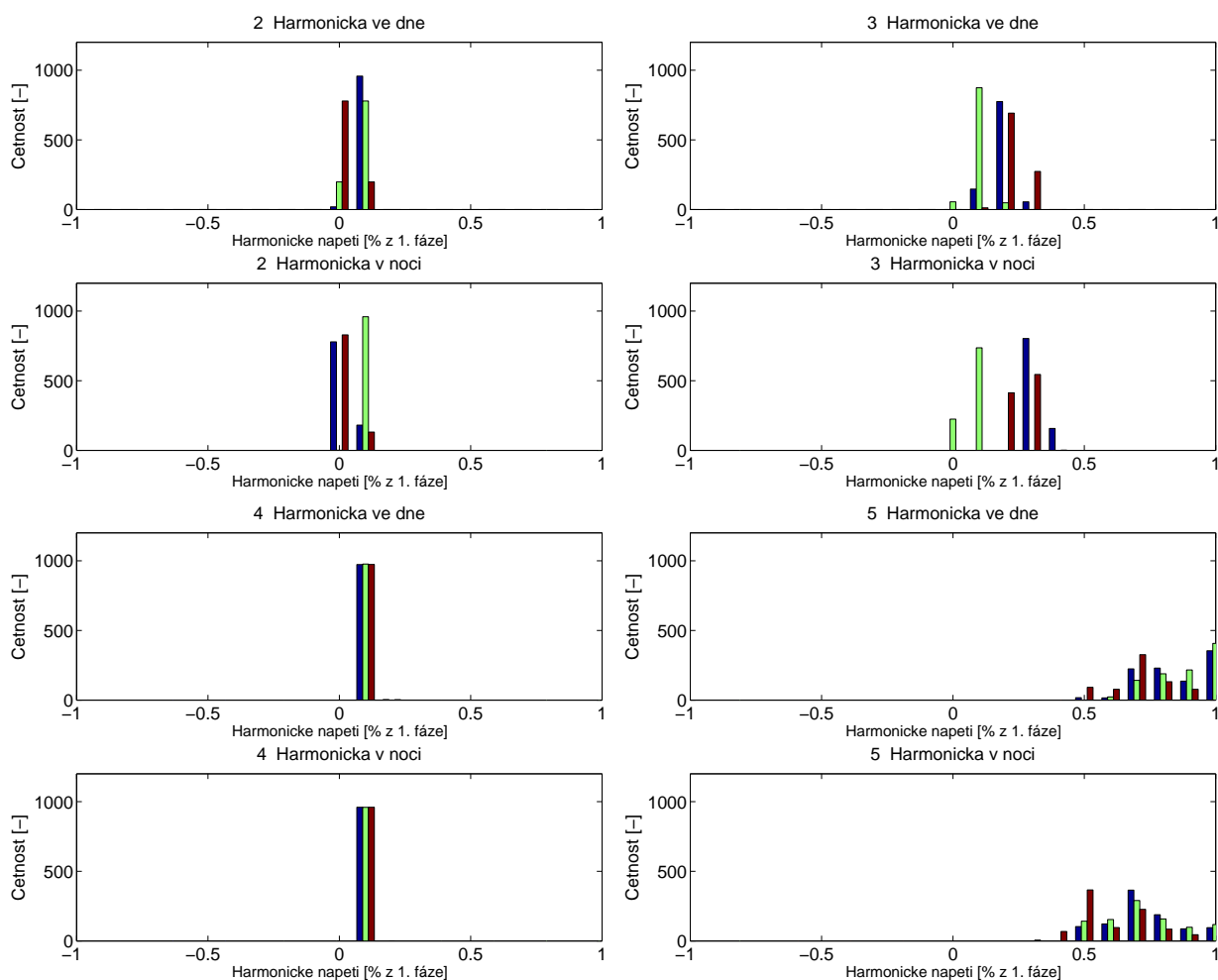
Literatura

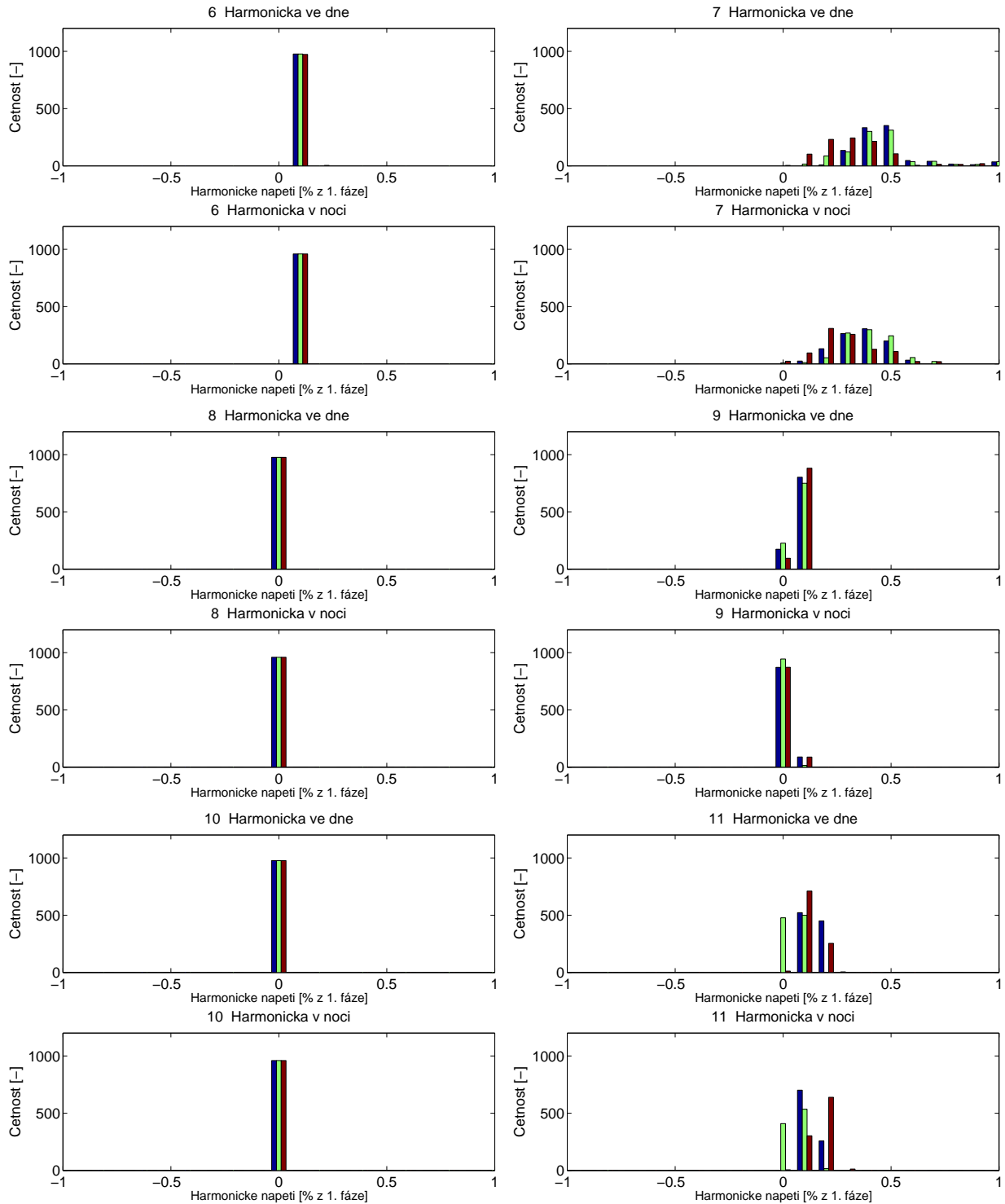
- [1] JANECEK, Eduard a Daniel GEORGIEV. Probabilistic Extension of the Backward/Forward Load Flow Analysis Method. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2012, vol. 27, issue 2, s. 695-704. DOI: 10.1109/TPWRS.2011.2170443.
- [2] H. HONG. An efficient point estimate method for probabilistic analysis. *Reliab. Eng. Syst. Safety*, vol. 59, pp.261-267, 1998
- [3] P. CARAMIA, G. CARPINELLI, M. PAGANO a P. VARILONE. Probabilistic three-phase load flow for unbalanced electrical distribution systems. *IET Renew. Power Gener.*, 2007, 1,(2),pp. 115-122
- [4] WANG, Y., a PIERRAT, L. Simulation of three-phase voltage unbalances using correlated Gaussian random variables. 5th Int. Conf. PMAPS'97, Vancouver, Canada, 1997
- [5] Sdružení techniků a inženýrů ve stavebnictví a energetice. *Tzb-energ* [online]. [cit. 2014-02-20]. Dostupné z: <http://www.tzb-energ.cz/>
- [6] BECHNÍK, Bronislav. Fotovoltaika - nejlepší dostupná technologie. *Czech RE Agency: Česká agentura pro obnovitelné zdroje* [online]. [cit. 2014-03-05]. Dostupné z: <http://www.czrea.org>
- [7] Vliv sklonu a orientace. *Eko WATT: Centrum pro obnovitelné zdroje a úspory energie* [online]. [cit. 2014-03-05]. Dostupné z: <http://fotovoltaika.ekowatt.cz/>
- [8] ČEZ, a. s. *ČEZ DISTRIBUCE* [online]. [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <http://www.cezdistribuce.cz/>
- [9] PNE 33 3430-1. Parametry kvality elektrické energie: Část 1: Harmonické a mezipharmonické. 3.vydání. ČR, 2009.
- [10] PNE 33 3430-2. Parametry kvality elektrické energie – Část 2: Kolísání napětí. 3.vydání. ČR, 2009.
- [11] PNE 33 3430-3. Parametry kvality elektrické energie – Část 3: Nesymetrie a změny kmitočtu napětí. 3.vydání. ČR, 2009.

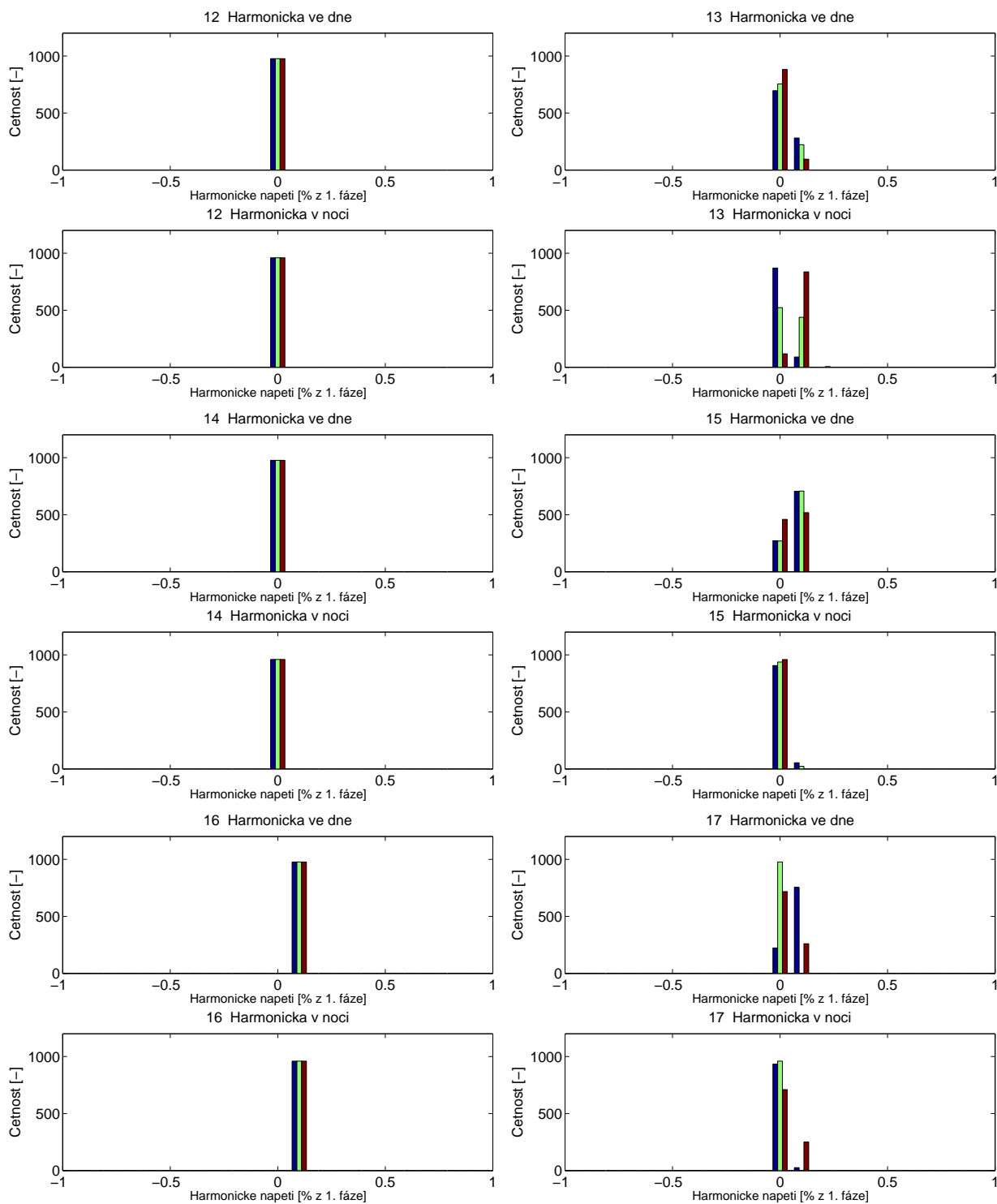
- [12] PNE 33 3430-4. Parametry kvality elektrické energie – Část 4: Poklesy a krátká přerušení napětí. 3.vydání. ČR, 2009.
- [13] PNE 33 3430-5. Parametry kvality elektrické energie – Část 5: Přejídná přepětí - impulzní rušení. 3.vydání. ČR, 2009.
- [14] PNE 33 3430-6. Parametry kvality elektrické energie – Část 6: Omezení zpětných vlivů na hromadné dálkové ovládání. 3.vydání. ČR, 2009.
- [15] PNE 33 3430-7. Charakteristiky napětí elektrické energie ve veřejné distribuční síti. 3.vydání. ČR, 2009.
- [16] Energetický regulační úřad. *ERU* [online]. [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <http://www.eru.cz/>
- [17] ČSN EN 50160. Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě. Český normalizační institut, 2000.
- [18] SMA Solar technology *Sunny tripower*[online]. © 2014 [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: www.sma-czech.com
- [19] Příspěvatelé Wikipedie, Horušany [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2013, Datum poslední revize 16. 10. 2013, 15:50 UTC, [citováno 22. 08. 2014] Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Horu>
- [20] JIŘINA MERTLOVÁ, Pavla Hejtmánková. Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-807-0433-072.
- [21] JANEČEK, P.: Metody a algoritmy pro validaci připojitelnosti OZE zdrojů do distribuční sítě. Plzeň: KKY-FAV ZČU v Plzni, 2012. Výzkumná zpráva
- [22] OTE, a.s. OTE Spojujeme trhy a příležitosti [online]. 2014 [cit. 2014-08-07]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/>

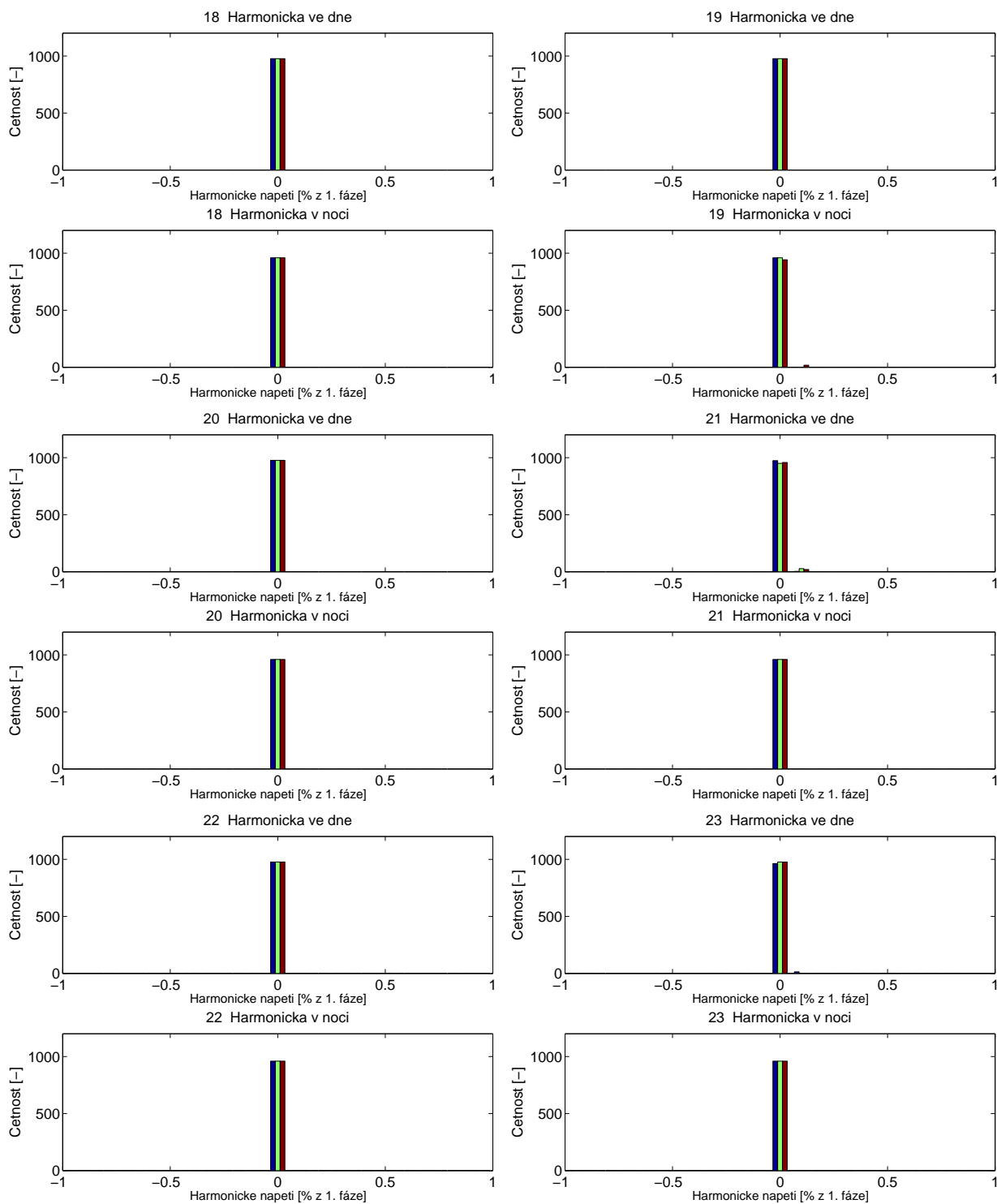
Příloha A

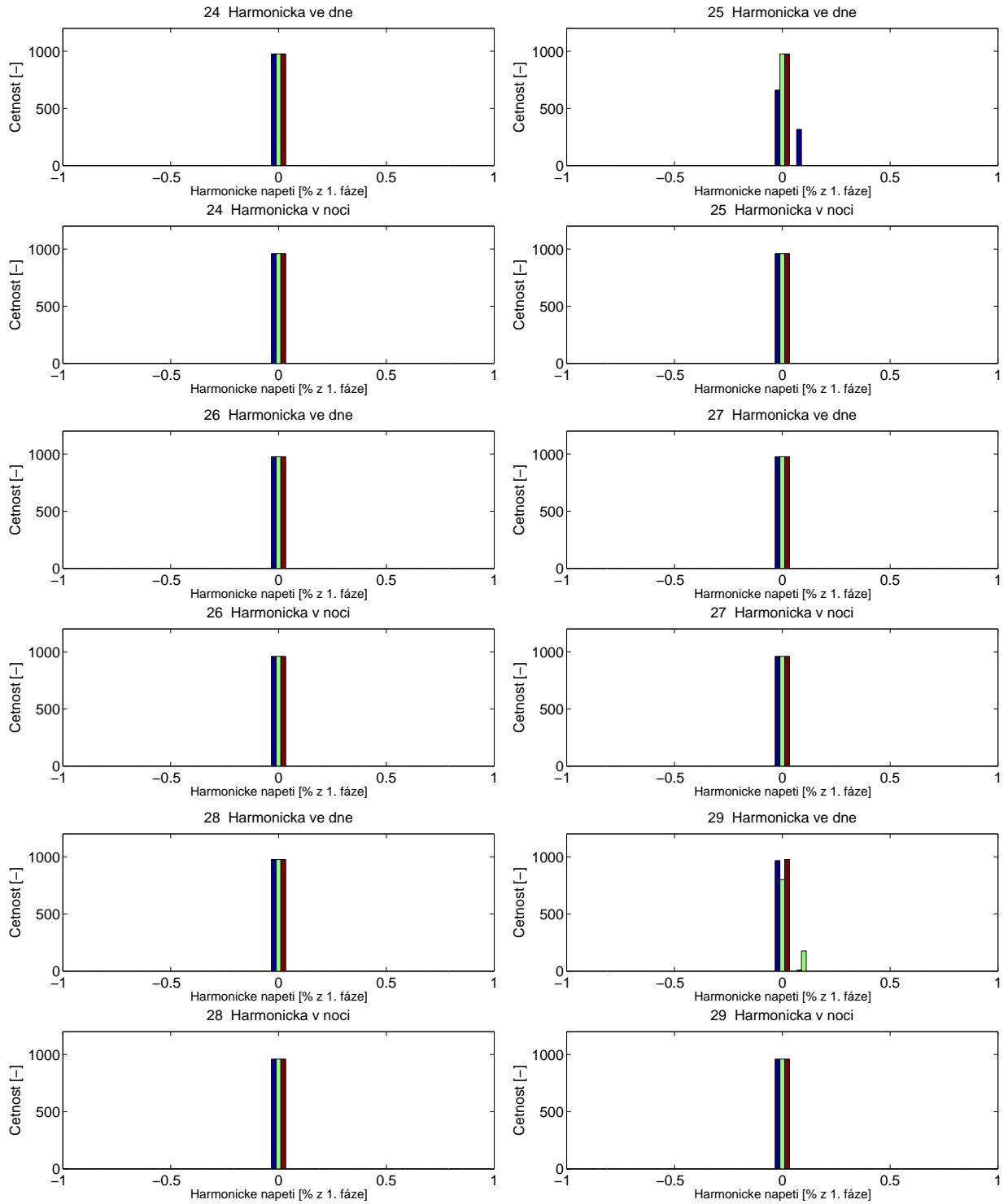
Harmonické FVE 400 kWp

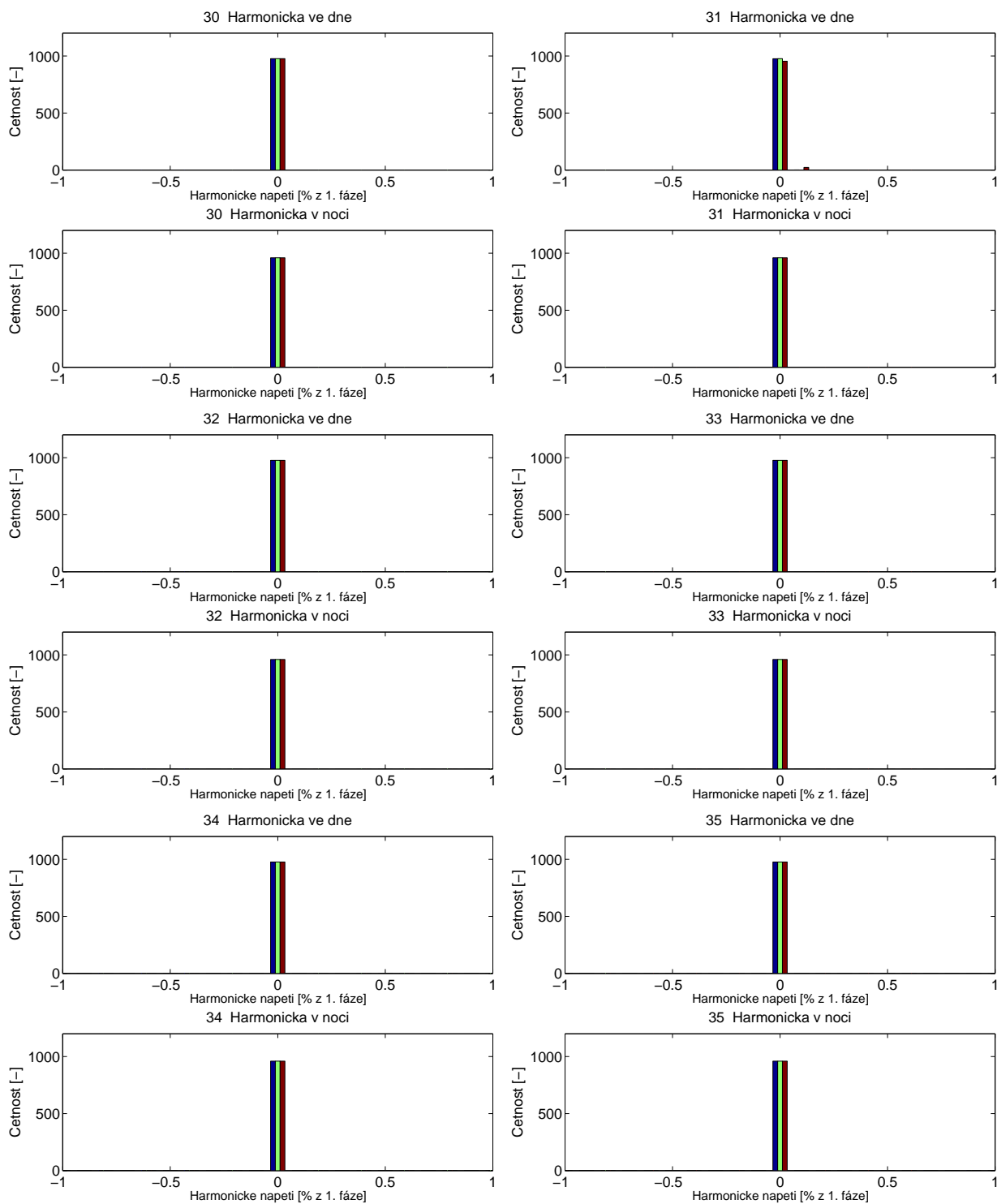


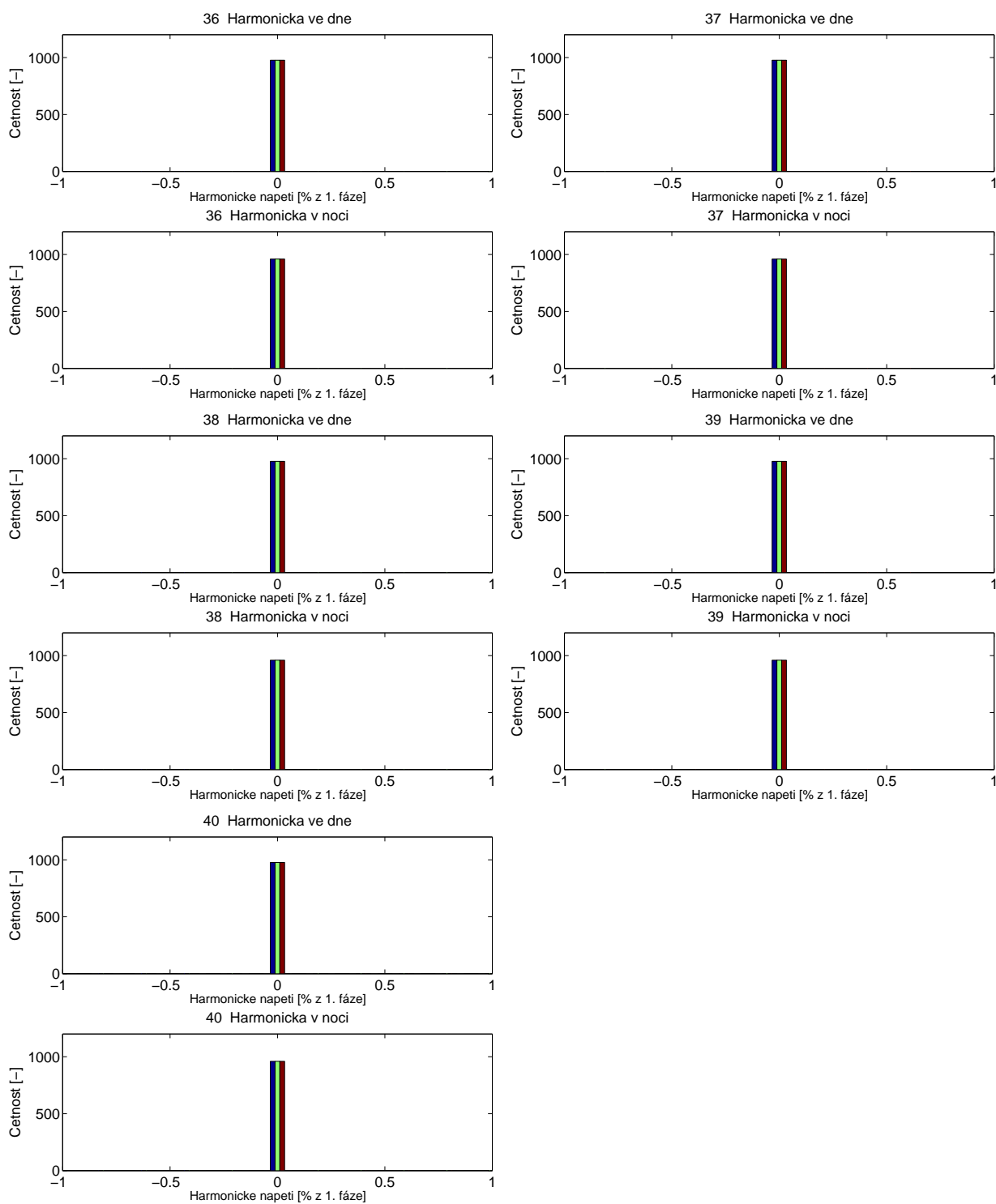












Příloha B

Harmonické FVE 70 kWp

