



Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

**ANALÝZA REGULAČNÍCH FUNKCÍ FOTOVOLTAICKÝCH
STŘÍDAČŮ Z POHLEDU DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY NÍZKÉHO
NAPĚTÍ**

Bakalářská práce

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

Filip Zítek

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zítek** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **507394**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza regulačních funkcí fotovoltaických střídačů z pohledu distribuční soustavy nízkého napětí

Název bakalářské práce anglicky:

Analysis of the control functions of photovoltaic inverters from the point of view of the low voltage distribution system

Pokyny pro vypracování:

1. Zpracujte přehled aktuálně dostupných fotovoltaických střídačů včetně jejich funkcí, využívaných v bez-licenčních fotovoltaických elektrárnách.
2. Navrhněte metodiku pro analýzu jejich dopadů na distribuční soustavu nízkého napětí.
3. Navrhněte k tomuto účelu simulační model ve vhodném simulačním nástroji.
4. Proveďte případovou studii pro různou míru zastoupení bez-licenčních fotovoltaických elektráren a výsledky porovnejte.

Seznam doporučené literatury:

1. NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2016/631 ze dne 14. dubna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0631&from=LT>
2. Nowak, S.; Metcalfe M. S.; Eberle, W. and Wang, L. "Comparison of voltage control methods in distribution systems using Q-V based PI and droop controls of solar inverters," 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Chicago, IL, USA, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM.2017.8273969.
3. Youngil, K.; Manef, B; Azeddine, H.; Hyeok K. "Comprehensive Approach to Mitigating Solar Photovoltaic Power Penetration Effects in a Microgrid", International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 2022, Article ID 3568263, 19 pages, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/3568263>
4. Mastný, P.; Drápela, J.; Mišák, S.; Macháček, J.; Ptáček, M.; Radil, L.; Bartošík, T.; Pavelka, T. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **12.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

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

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne 21.5.2024

.....

Filip Zítek

Poděkování

Rád bych poděkoval především svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Martinu Čerňanovi, Ph.D. za pomoc při celém průběhu tvorby této práce, řadu cenných rad, kterých si moc vážím, a poskytnutí mnoha zkušeností v oblasti distribuce elektrické energie.

Na závěr bych chtěl poděkovat svým rodičům, prarodičům a bratrovi za podporu během zpracování bakalářské práce.

Abstrakt

Práce se zabývá analýzou regulačních funkcí malých (bezlicenčních) fotovoltaických elektráren připojených do distribuční soustavy nízkého napětí v České republice. Na počátku teoreticky vysvětluje princip fungování fotovoltaické elektrárny (FVE), včetně názvosloví jednotlivých komponent, a poté se zabývá samotným fotovoltaickým střídačem, jeho typickými parametry, druhy a funkcemi. V další části zkoumá dopad fotovoltaických střídačů na distribuční soustavu (DS) nízkého napětí, jejich regulační schopnosti a požadavky na tyto výrobní moduly. Dále se v krátkosti věnuje problematice spojené s kvalitou elektrické energie a legislativním požadavkům na připojení FVE do DS. Navazující praktická část práce popisuje vytvořený model distribuční sítě nízkého napětí s připojenými FVE do jednotlivých odběrných míst (uzlů), mimo jeden uzel, kde se nachází agregovaná (koncentrovaná) zátěž. Dle tohoto uzlu s koncentrovanou zátěží rozlišuje případy A a B, pro které byly prováděny různé typy simulací. Simulace bez FVE, s FVE bez regulace, a nakonec s FVE a s různými regulačními způsoby střídačů. S využitím tohoto modelu byla provedena případová studie pro dvě roční období s velkou a nízkou výrobou z FVE a bylo dosaženo závěru, že regulační schopnosti střídačů přispívají ke zlepšení napěťových profilů a snížení ztrát.

Klíčová slova

Fotovoltaická elektrárna, pravidla provozování distribučních soustav, regulační schopnosti střídačů, P-Q diagram

Abstract

This bachelor thesis deals with the analysis of control functions of small (license-exempt) photovoltaic power plants connected to the low-voltage distribution system in the Czech Republic. It starts with a theoretical explanation of the principle of operation of a photovoltaic power plant (PVPP), including the nomenclature of individual components, and then deals with the PV inverter itself, its typical parameters, types and functions. The next section examines the impact of PV inverters on the low-voltage distribution system (DS), their control capabilities, and the requirements for these generation modules. It also briefly discusses issues related to power quality and the legislative requirements for connecting PV to the DS. The subsequent practical part of the thesis describes the developed model of a low voltage distribution network with PV plants connected to individual customer points (nodes), except for one node where the aggregated (concentrated) load is located. According to this node with concentrated load, it distinguishes cases A and B, for which different types of simulations were performed. Simulations without PV, with PV without regulation, and finally with PV and different inverter control methods. Using this model, a case study was performed for two seasons with high and low generation from PV and it was concluded that the regulation capabilities of the inverters contribute to voltage profiles improvement and losses reduction.

Key words

Photovoltaic power plant, distribution system operational regulations, inverter control capability, P-Q diagram

Obsah

Seznam obrázků	xii
Seznam tabulek	xiii
Seznam použitých zkratk	xiv
1 Úvod.....	1
1.1 Organizace práce	3
2 Solární elektrárna	4
2.1 Princip fungování fotovoltaické elektrárny	4
3 Fotovoltaický střídač.....	5
3.1 Rozdělení fotovoltaických střídačů	6
3.1.1 Obecné rozdělení – podle druhu aplikace	6
3.1.2 Z hlediska zapojení v systému FVE.....	8
3.1.3 Rozdělení střídačů podle počtu fází	9
3.1.4 Střídače podle rozdělení výkonu mezi tři fáze.....	9
3.2 Jednofázový napěťový střídač.....	11
3.3 Třífázový napěťový střídač	11
3.4 Typické parametry fotovoltaických střídačů.....	12
3.5 Speciální funkce střídače.....	14
3.5.1 Sledování bodu maximálního výkonu (MPPT)	14
3.5.2 Ochrana proti ostrovnímu provozu (anti-islanding)	15
4 Dopad fotovoltaických střídačů na distribuční soustavu nízkého napětí.....	16
4.1 Regulační schopnosti střídačů FVE	17
4.1.1 Statické řízení napětí	17
4.1.2 Dynamické řízení napětí	22
4.2 Obecné požadavky na výrobní moduly typu A.....	23
4.3 Rozsah trvalého provozního napětí	25
5 Podmínky pro připojení výrobních modulů k distribuční síti.....	26
5.1 Obecné ustanovení	26
5.2 Všeobecné podmínky	27
5.3 Žádost o připojení.....	27
5.4 Posouzení žádosti o připojení výrobní	28
5.5 Studie připojitelnosti výrobní	29
5.6 Projektová dokumentace	29
5.7 Připojení k síti	30
5.8 Kvalita elektrické energie.....	31
6 Popis modelu distribuční sítě nízkého napětí s připojenými FVE.....	32
6.1 Distribuční soustava	32

6.2	Jednopolové schéma modelu DS.....	33
7	Případová studie.....	34
7.1	Metodika zpracování vstupních dat.....	34
7.2	Popis provedených simulací.....	36
7.3	Vyhodnocení provedených simulací.....	38
8	Závěr.....	44
9	Reference.....	45
	Seznam příloh.....	47
10	Příloha A – Vybrané průběhy napěťových profilů.....	47
10.1	Varianty A – 07.04.2016.....	47
10.2	Varianty A – 02.01.2017.....	49
10.3	Varianty B – 07.04.2016.....	51
10.4	Varianty B – 02.01.2017.....	53
11	Příloha B – Výpočet parametrů 3fázového distribučního transformátoru.....	55
12	Příloha C – Vytvořený model distribuční sítě nízkého napětí s připojenými FVE.....	57

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Schéma fotovoltaické elektrárny [4]	4
Obr. 2-2 FV článek, modul a pole [5].....	5
Obr. 3-1 Zapojení systému pro vlastní spotřebu [3].....	7
Obr. 3-2 Zapojení systému pro dodávku do sítě [3].....	7
Obr. 3-3 Blokové schéma hybridního systému [7].....	8
Obr. 3-4 Příklady zapojení střídačů [3]	9
Obr. 3-5 Základní schéma jednofázového střídače s RL zátěží [10].....	11
Obr. 3-6 Základní schéma zapojení třífázového napěťového střídače s třífázovou RL zátěží [10]	11
Obr. 3-7 Voltampérová charakteristika FV článku [3].....	14
Obr. 4-1 P-Q charakteristika střídače a Q-V droop řízení [20]	19
Obr. 4-2 Grafické znázornění minimálních i nepovinných požadavků dodávky/odběru jalového výkonu při jmenovitém napětí [8]	20
Obr. 4-3 Jalový výkon VM pro $P = P_D$ [8]	21
Obr. 4-4 Časový průběh napětí v místě připojení za podmínek poruchy pro nesynchronní výrobní moduly kategorie A1, A2 (FRT křivka) [8]	22
Obr. 4-5 Schopnost překlenutí poruchy synchronních VM A1, A2 [8]	22
Obr. 4-6 Schopnost frekvenční odezvy činného výkonu u výrobních modulů v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci [22]	23
Obr. 4-7 Snižování maximálního výkonu s klesající frekvencí [22]	24
Obr. 6-1 Schéma třífázové distribuční sítě	32
Obr. 6-2 Jednopolové schéma modelu distribuční sítě.....	33
Obr. 7-1 Dubnové napěťové profily s agregovanou zátěží na začátku vedení	39
Obr. 7-2 Lednové napěťové profily s agregovanou zátěží na začátku vedení.....	40
Obr. 7-3 Dubnové napěťové profily s agregovanou zátěží na konci vedení	41
Obr. 7-4 Lednové napěťové profily s agregovanou zátěží na konci vedení	42
Obr. 10-1 Časové průběhy napětí varianty A – 07.04.2016	47
Obr. 10-2 Časové průběhy napětí varianty A – 07.04.2016	47
Obr. 10-3 Časové průběhy napětí varianty A – 07.04.2016	47
Obr. 10-4 Časové průběhy napětí varianty A – 07.04.2016	48
Obr. 10-5 Časové průběhy napětí varianty A – 07.04.2016	48
Obr. 10-6 Časové průběhy napětí varianty A – 07.04.2016	48
Obr. 10-7 Časové průběhy napětí varianty A – 02.01.2017	49
Obr. 10-8 Časové průběhy napětí varianty A – 02.01.2017	49
Obr. 10-9 Časové průběhy napětí varianty A – 02.01.2017	49
Obr. 10-10 Časové průběhy napětí varianty A – 02.01.2017	50
Obr. 10-11 Časové průběhy napětí varianty A – 02.01.2017	50
Obr. 10-12 Časové průběhy napětí varianty A – 02.01.2017	50
Obr. 10-13 Časové průběhy napětí varianty B – 07.04.2016	51
Obr. 10-14 Časové průběhy napětí varianty B – 07.04.2016	51
Obr. 10-15 Časové průběhy napětí varianty B – 07.04.2016	51
Obr. 10-16 Časové průběhy napětí varianty B – 07.04.2016	52
Obr. 10-17 Časové průběhy napětí varianty B – 07.04.2016	52
Obr. 10-18 Časové průběhy napětí varianty B – 07.04.2016	52
Obr. 10-19 Časové průběhy napětí varianty B – 02.01.2017	53
Obr. 10-20 Časové průběhy napětí varianty B – 02.01.2017	53
Obr. 10-21 Časové průběhy napětí varianty B – 02.01.2017	53
Obr. 10-22 Časové průběhy napětí varianty B – 02.01.2017	54
Obr. 10-23 Časové průběhy napětí varianty B – 02.01.2017	54
Obr. 10-24 Časové průběhy napětí varianty B – 02.01.2017	54
Obr. 11-1 Náhradní schéma transformátoru s vypočtenými parametry.....	57

Seznam tabulek

Tab. 3-1 Rozsah parametrů 3fázových střídačů výkonu 5 kW.....	12
Tab. 4-1 Provozní frekvenční rozsah FVE v síti NN pro kontinentální Evropu [22].....	24
Tab. 4-2 Rozsahy napětí pro výrobní s přípojením do sítě VN [8].....	25
Tab. 7-1 Použité metodiky při rozložení vstupních dat do modelu DS varianty A.....	35
Tab. 7-2 Použité metodiky při rozložení vstupních dat do modelu DS varianty B.....	35
Tab. 7-3 Tabulka provedených simulací	37
Tab. 7-4 Porovnání celkových ztrát mezi jednotlivými případy	43
Tab. 11-1 Šítkové hodnoty transformátoru (p.j. = poměrná jednotka).....	55

Seznam použitých zkratk

PS	přenosová soustava
DS	distribuční soustava
PPS	provozovatel distribuční soustavy
PPDS	Pravidla provozování distribučních soustav
HDO	hromadné dálkové ovládání
FRT	překlenutí poklesu napětí „fault-ride-through“
HDS	hlavní domovní skříň
ČR	Česká republika
VM	výrobní modul
MPPT	Maximum Power Point Tracking = „sledovač bodu maximálního výkonu“
MPP	bod maximálního výkonu
FV	fotovoltaický
OTE	Operátor trhu s elektřinou
PF	účinník (power factor)
LOLE	počet hodin s nedodávkou elektřiny za 1 rok
EENS	celková roční nedodávka
PWM	pulzně šířková modulace
OZE	obnovitelný zdroj energie
NN	nízké napětí
VN	vysoké napětí
VVN	velmi vysoké napětí
ZVN	zvlášť vysoké napětí
AC	střídavý proud
DC	stejnoseměrný proud
p.j.	poměrná jednotka
EMC	elektromagnetická kompatibilita
THD	celkové harmonické zkreslení

1 Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na malé fotovoltaické systémy, které jsou součástí staveb s instalovaným výkonem do 50 kW v podmínkách ČR, dle zákona č. 458/2000 Sb [1]. Hranice na 50 kW instalovaného výkonu byla navýšena, oproti původním 10 kW, nedávno (18.1.2023) novelou energetického zákona, tzv. LEX OZE 1 [2]. Tyto zdroje se někdy označují také jako bezlicenční, neboť pro jejich provoz není v současné době potřeba licence.

FVE se stala v dnešní době nedílnou součástí energetického mixu. Díky tomu má značný vliv na dosahování dlouhodobých cílů Evropské unie, která především směřuje k dekarbonizaci energetiky. V současné době je vypracována analýza v souladu s Nařízením Evropského parlamentu a Rady (EU) 2019/943 o vnitřním trhu s elektřinou a obsahuje čtyři scénáře – Respondentní, Konzervativní, Progresivní a Dekarbonizační. Jednotlivé scénáře predikují, zda bude elektrizační soustava v horizontu do roku 2040 zdrojově přiměřená či nikoliv, dle ukazatelů LOLE (počet hodin s nedodávkou elektřiny za 1 rok) a EENS (celková roční nedodávka). Hodnocení zohledňuje faktory, jako je předpokládaná podoba energetického mixu, importní a exportní kapacita, výše spotřeby a socioekonomický vývoj.

Respondentní scénář zobrazuje základní trajektorii vývoje energetického mixu a neuvažuje konec uhlí před rokem 2040. Instalovaný výkon OZE narůstá pozvolna, a naproti tomu dochází k postupnému navyšování spotřeby v kontextu zvyšování životní úrovně a elektrifikace (zejména sektorů dopravy a vytápění). V důsledku realizace odchodu od uhlí až po roce 2040 se výsledné hodnoty LOLE a EENS z provedených simulací nasazení zdrojů pohybují nejniž ze všech scénářů. Maximálního LOLE 3 h a EENS 0,9 GWh dosahuje scénář v roce 2040. Soustava je tak zdrojově přiměřená v průběhu celého sledovaného období.

Konzervativní scénář naznačuje směr, kterým se česká elektroenergetika může ubírat v případě ukončení výroby elektřiny z uhlí do roku 2038. Z pohledu rozvoje OZE a spotřeby se tento scénář shoduje s Respondentním. Z hlediska zdrojové přiměřenosti nenaznačují výsledky vážnější problémy a ve výhledu do roku 2040 počet hodin nedodávky nepřekročí normu spolehlivosti ČR (LOLE do 15 h/rok). Navýšení importu v roce 2035 souvisí s postupným odchodem od uhlí, který je v následujících letech částečně kompenzován plánovaným dostavením nového bloku JE Dukovany a navýšením výroby na plynových zdrojích.

Progresivní scénář je spojený s plány dekarbonizovat nejen elektroenergetiku v souladu s cíli EU. Zobrazuje odklon od uhlí do roku 2033, který je kombinován s rapidnějším nárůstem instalované kapacity OZE a navyšující se spotřebou elektřiny v důsledku intenzivní elektrifikace. Výsledky po roce 2030 indikují razantní navýšení počtu hodin nepokrytého zatížení stejně jako objemu nedodané energie. Podle tohoto scénáře by elektrizační soustava ČR nesplňovala požadavek na spolehlivost. Brzké ukončení výroby na

uhelných zdrojích je kompenzováno nárůstem výroby na plynových zdrojích a vysokými importy, které se však pohybují na hranici technické importní schopnosti české elektrizační soustavy.

Dekarbonizační scénář je v porovnání s ostatními scénáři charakterizován rapidní dekarbonizací, kdy rozsáhlá elektrifikace, a to zejména v dopravě, vytápění a v průmyslu, vede k výraznému navýšení spotřeby elektřiny. Portfolio zdrojů je založeno na konci uhlí k roku 2030 a instalovaná kapacita OZE v něm v průběhu sledovaného horizontu narůstá na téměř dvojnásobek (na 19,8 GW) oproti Konzervativnímu scénáři. Ani za vysokého využití plynových zdrojů a vysokých objemů importované elektřiny však není toto portfolio schopno udržet soustavu ve stavu zdrojové přiměřenosti. To poukazuje na nutnost rozšíření zdrojové základny ČR říditelnými zdroji elektrické energie, případně zavedením kapacitních mechanismů do české legislativy.

Výsledky Progresivního a Dekarbonizačního scénáře také ukazují, že v dlouhodobém horizontu se Česká republika neobejde bez výstavby dalších nových jaderných zdrojů. Stoupající elektrifikace a spotřeba rovněž naznačují potřebu zavádění nových nástrojů pro řízení ES ČR v oblasti flexibility, decentrálních zdrojů (například malých FVE na střechách rodinných domů) a digitalizace.

Největšími náklady na pokrytí tuzemské spotřeby elektřiny v letech 2025–2040 se vyznačuje Dekarbonizační scénář, který je spojen s extrémně nákladným importem elektřiny ze zahraničí, vysokou výrobou z plynových zdrojů a rozsáhlými investicemi do OZE. Nejnížší náklady naopak vykazuje Respondentní scénář, následovaný Konzervativním a Progresivním, neboť s nižší poptávkou elektřiny a pozdějším odklonem od uhlí klesá i ekonomická náročnost na pokrytí spotřeby. Z hlediska environmentálních dopadů jednotlivých scénářů vychází nejvyšší emisní zátěž paradoxně u Dekarbonizačního scénáře. Je to dáno tím, že sektor elektroenergetiky přebere emisní zátěž jiných sektorů (zejména dopravy, vytápění a průmyslu), kde dochází k dekarbonizaci prostřednictvím elektrifikace.

Na konci roku 2021 činil celkový netto instalovaný výkon FVE 2,1 GW. Dle studie se u Respondentního a Konzervativního scénáře předpokládá vývoj celkového netto instalovaného výkonu na zhruba 10 GW. Pro Progresivní se odhaduje navýšení o 4,6 GW oproti scénáři Konzervativnímu a Dekarbonizační o dvojnásob (na 20 GW). Z tohoto zhodnocení můžeme usoudit, že růst instalovaného výkonu FVE bude dále v každém případě růst, proto je do budoucna, pro efektivní rozvoj DS, nezbytné využívání regulačních schopností střídačů, které vylepší napěťové profily sítě a snižují ztráty.

V této práci se budu konkrétně zabývat analýzou regulačních schopností střídačů FVE připojených k distribuční síti nízkého napětí, a proto se budu detailněji zaměřovat na tzv. Grid-on systémy.

1.1 Organizace práce

Úvodní kapitoly 2,3,4,5 této práce jsou typicky teoretické (rešeršní), dále pak následují kapitoly 6,7, které jsou praktické. Týkají se vytvořeného modelu, případové studie a vyhodnocených výsledků.

Kapitola č. 2 se zabývá konverzí sluneční energie, dále pokračuje s vysvětlením principu fungování FVE, včetně popisu částí FVE a zmiňuje nejčastěji používané typy FV článků.

Další kapitola vysvětluje, co je to FV střídač, jaký je princip jeho fungování a jaké druhy existují. První podkapitola rozděluje střídač dle druhu aplikace (Grid-off, Grid-on, bateriové a hybridní) střídače. Druhá dělí střídače z hlediska zapojení v systému FVE (modulové, řetězcové, centrální), dále podle počtu fází a rozdělení výkonu mezi 3 fáze (symetrické, asymetrické). Poté následuje tabulka s hodnotami typických parametrů střídačů a část, která se věnuje speciálním funkcím střídačů FVE (MPPT, anti-islanding).

Kapitola č. 4 zmiňuje problematiku spojenou s dopady FVE střídačů na DS NN, s jejich regulačními schopnostmi pro zachování parametrů DS a popisuje požadavky na výrobní moduly typu A (FVE).

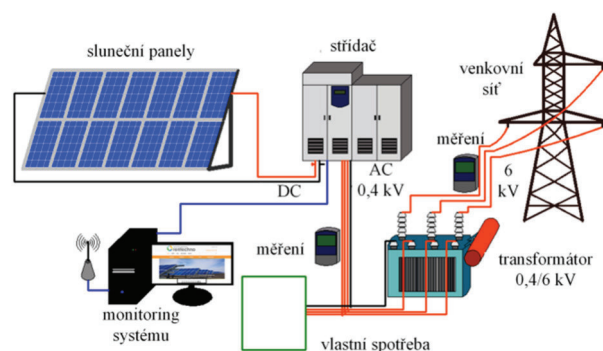
Kapitola č. 5 řeší legislativní povinnosti v kontextu s připojením výroben elektrické energie k DS a okrajově kvalitu elektrické energie.

Vytvořený model DS nízkého napětí s připojenými FVE je popsán v kapitole č. 6. Konkrétně se v této kapitole popisuje, za jakých podmínek (zjednodušujících předpokladů) byl model vytvořen, co reprezentují dílčí bloky modelu a čím byla nahrazena nadřazená VN soustava, přičemž rozlišujeme dvě varianty A a B podle umístění agregované zátěže.

V kapitole č. 7 je uvedena případová studie, ve které jsou vysvětleny jednotlivé druhy prováděných simulací pro období s velkou a malou výrobou z FVE, metodiky zpracování vstupních dat a konečně jejich vyhodnocení s ohledem na napěťové profily a ztráty.

2 Solární elektrárna

Jedná se o obnovitelný zdroj elektrické energie, kdy k její výrobě využíváme energii slunečního záření a fotovoltaického jevu. Existuje přímý a nepřímý druh výroby. Přímý pracuje se fotovoltaickými panely, které generují stejnosměrný proud, který je následně přeměn za pomoci střídače na střídavý proud. Nepřímý je založen na přeměně tepla získaného z energie slunečního záření na energii elektrickou pomocí termočlánků, případně je tato tepelná energie využita v parním cyklu, kde dochází k přeměně na energii mechanickou a následně pomocí alternátoru na elektrickou. Základní schéma fotovoltaické elektrárny je znázorněno na Obr. 2-1. [3]



Obr. 2-1 Schéma fotovoltaické elektrárny [4]

2.1 Princip fungování fotovoltaické elektrárny

K výrobě elektrické energie využíváme FV článku, který je založen na principu fotoelektrického jevu. Je to schopnost určitého materiálu generovat stejnosměrný proud na základě dopadajícího světelného záření, při němž jsou elektrony uvolňovány z látky v důsledku absorpce elektromagnetického záření látkou. Absorpce je způsobena interakcí světla (fotony) s částicemi hmoty (elektrony a jádry). Tuto schopnost splňují fotovoltaické články, které se skládají z vrstev polovodičového materiálu, nejčastěji křemíku. Jednoduše lze říci, že fotovoltaický modul je velkoplošná polovodičová dioda složená z několika fotovoltaických článků, kdy protékající proud je dán množstvím dopadajícího světla; napětí je závislé na druhu použitého polovodičového materiálu, konkrétně na šířce zakázaného pásma. Jednotlivé FV články se sériově spojují a spolu pak tvoří již zmíněný FV modul, jelikož samotné výstupní napětí článku se pohybuje nízko okolo 0,5 V. Standardně se kvůli zvýšení napětí používají moduly s 36/72 články o výstupním napětí 12/36 V. Platí, že čím vyšší je intenzita světla, tím vyšší je tok proudu, a proto je také hlavním parametrem FV článků množství energie, které je generováno při plném slunečním záření neboli kilowatt peak (kWp). [3] Nejpoužívanější jsou křemíkové mono a polykrystalické články, které nabývají účinnosti nad 15 % (obvykle dosahují účinnosti 23 %) a jeví se také jako levná varianta. Pro dosažení vyšších účinností nad 40 % musíme

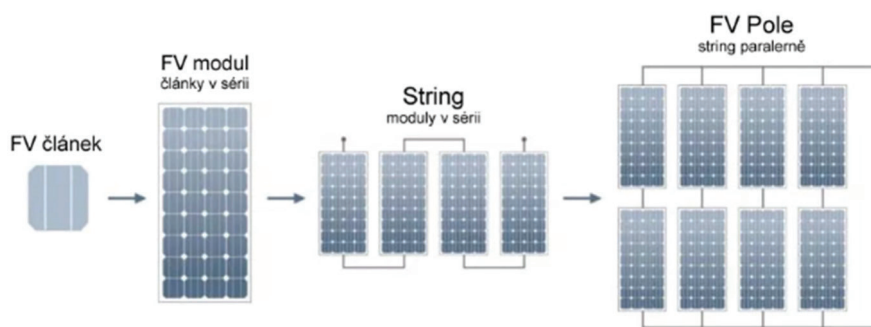
využít články složené z více PN přechodů (kombinace více materiálů, jsou drahé a musí pracovat se solárními koncentrátory).

Dále jsou využívány polykrytalické tenkovrstvé články obsahující sloučeniny selenu, teluru nebo arsenu. Mají nižší hmotnost, lepší mechanické vlastnosti, ale naopak nižší účinnost, okolo 10 %.

Posledním typem článků s velkým potenciálem, které se už začínají pomalu rozšiřovat, jsou Perovskitové články. Jejich výhodou je zejména laditelný zakázaný pás, jednoduchá technologie a poměrně vysoká účinnost (až 25 %). Mezi nevýhody patří nestabilita spojená s vlhkostí a osvětlením.

Mezi typické parametry FV článků vycházející z V-A charakteristiky jsou napětí naprázdno (U_{OC}), proud nakrátko (I_{SC}), napětí v bodě maximálního výkonu (U_{mp}) a proud v bodě maximálního výkonu (I_{mp}).

Na Obr. 2-2 vidíme správné názvosloví částí fotovoltaické elektrárny, jejíž základní částí je FV článek. Spojením článků do série vznikne FV modul, dále String neboli FV panel – jednotlivé moduly v sérii, z kterých se následně vytvoří FV pole.



Obr. 2-2 FV článek, modul a pole [5]

3 Fotovoltaický střídač

Fotovoltaický střídač (FV) nebo také solární invertor je typ výkonového střídače, který slouží pro přeměnu stejnosměrného proudu (DC) fotovoltaického solárního panelu na střídavý proud (AC) požadovaných parametrů, který lze následně dodávat do elektrické sítě, nebo spotřebovat v místě instalace. Solární střídače jsou také vybaveny speciálními funkcemi jako je sledování bodu maximálního výkonu a ochrany proti ostrovnímu provozu (tzv. anti-islanding). Střídač si můžeme zjednodušeně představit jako antiparalelně zapojenou sestavu spínačů, která střídavě připojuje k zátěži kladný nebo záporný pól zdroje a pomocí vhodného řízení (PWM) získáváme na výstupu sinusové průběhy. [3]

3.1 Rozdělení fotovoltaických střídačů

3.1.1 Obecné rozdělení – podle druhu aplikace

1. Samostatné střídače (autonomní, Grid-off)

Tyto samostatné střídače jsou používány v samostatných napájecích systémech, v tzv. ostrovním režimu, bez propojení s rozvodnou sítí, kde se veškerá vyrobená elektrická energie spotřebuje v místě objektu nebo se uloží do baterií. Autonomní systémy proto dále dělíme na systémy bez akumulace energie, kde nastává problém pro období bez slunečního záření a na systémy s akumulací. U systému s akumulací se vyžadují akumulátorové baterie s ochranným obvodem (DC/DC regulátorem), který chrání baterii před nadměrným vybitím nebo přebitím. [3]

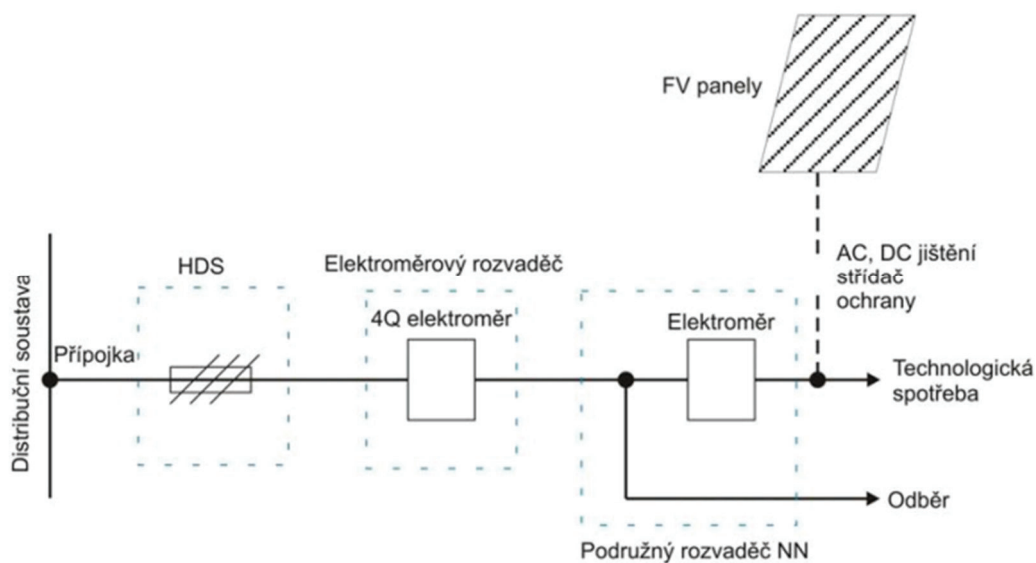
2. Síťové střídače (Grid-on)

Problematikou síťových střídačů se tato práce bude zabývat detailněji. V současnosti je k elektrické síti připojeno asi 99,5 % fotovoltaických systémů. Jsou vyrobeny tak, aby se z bezpečnostních důvodů automaticky vypnuly při výpadku elektrické energie. Obvykle neobsahují žádný záložní zdroj a synchronizují své napětí a frekvenci dle rozvodné sítě, k jaké jsou připojeny.

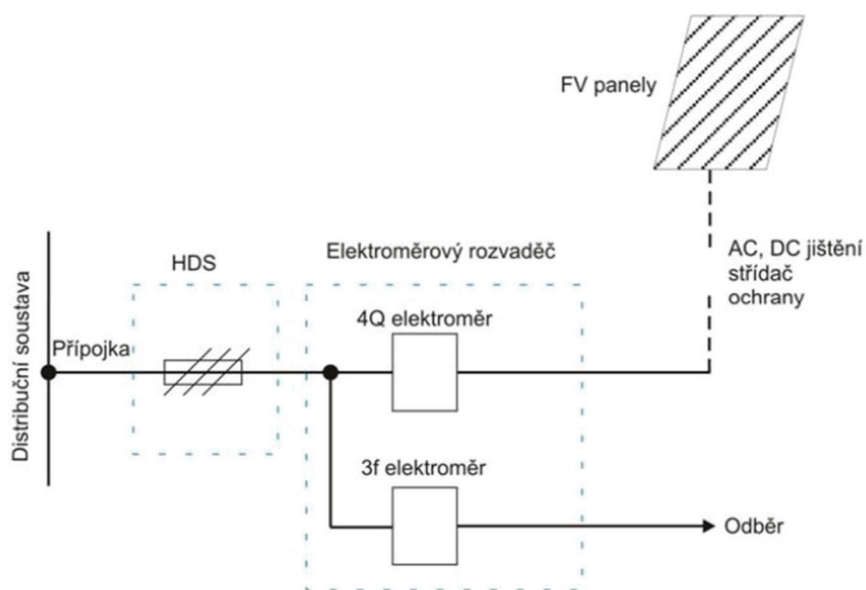
Výhodou systémů připojených k síti je fakt, že veškerá vyrobená elektrická energie se oproti systémům Grid-off může zužitkovat, přebytky elektrické energie jsou dodávány do DS. Tyto systémy se nejčastěji skládají z FV panelů, střídače doplněného o DC/DC měnič kvůli sledování MPPT, zařízení pro měření, regulaci a síťové ochrany. Připojení takových systémů do elektrizační soustavy může být provedeno ve dvou variantách, jak je zobrazeno na Obr. 3-1 a Obr. 3-2. [3]

Zapojení v tzv. Zeleném bonusu ukazuje Obr. 3-1, kde za hlavní domovní skříň (HDS) je umístěn 4kvadrantový elektroměr, dále napojený domovní rozvod, a nakonec FV elektrárna pomocí dalšího elektroměru. Toto zapojení se využívá v případech, kdy je většina vyrobené energie využita pro vlastní spotřebu. [3]

Obr. 3-2 představuje systém v tzv. Výkupním tarifu. FVE je připojena mezi stávající elektroměr a HDS pomocí 4kvadrantového elektroměru. Tento systém se používá v případech, kdy je veškerá vyrobená elektrická energie dodávaná výrobcem do elektrizační soustavy, obvykle elektrárny větších výkonů. [3]



Obr. 3-1 Zapojení systému pro vlastní spotřebu [3]



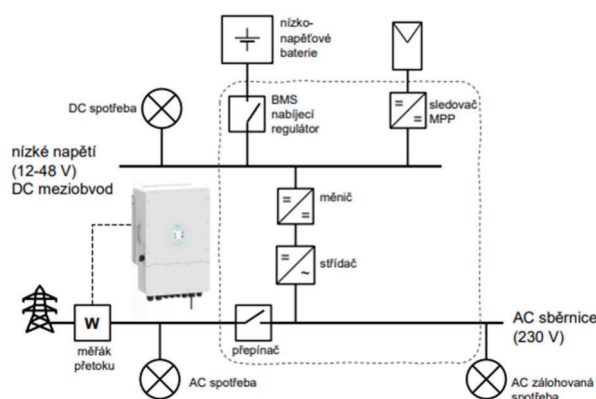
Obr. 3-2 Zapojení systému pro dobývku do sítě [3]

3. Bateriové záložní střídače

Jelikož bateriové záložní střídače obsahují bateriový záložní zdroj, jsou schopny určitým zátěžím dodávat elektrickou energii i při výpadku elektrické energie. Z tohoto důvodu musí být vybaveny ochranou proti ostrovnímu provozu.

4. Inteligentní hybridní střídače

Hybridní střídače představují nejmodernější druh střídačů (all-in-one), který je schopen řídit pole fotovoltaických panelů, bateriové úložiště i rozvodnou síť, jak je znázorněno na Obr. 3-3. Výhodou tohoto systému je částečná nezávislost na DS, navíc umožňuje provoz i v ostrovním režimu. Vyrobená energie se využívá především k pokrytí vlastní spotřeby, přebytečná energie se využívá k nabíjení baterií, a pokud je jí dostatek, je dále posílána do DS. V případě nedostatku vyrobené energie nezbytné pro pokrytí vlastní spotřeby je tento střídač schopný automaticky využít energii uloženou v bateriích, nebo následně z DS. [6]



Obr. 3-3 Blokové schéma hybridního systému [7]

3.1.2 Z hlediska zapojení v systému FVE

1. Modulové střídače

Střídač je připojen pouze k jednomu FV modulu, každý modul má MPPT. MPPT je u těchto případů tvořen výkonovým integrovaným obvodem zabudovaným v modulu. Díky tomuto jsou někdy označovány jako AC moduly, protože modul dodává přímo napětí síťových parametrů. Jsou používány jen zřídka u systémů malých výkonů (50–300 W).

2. Řetězcové (stringové) střídače

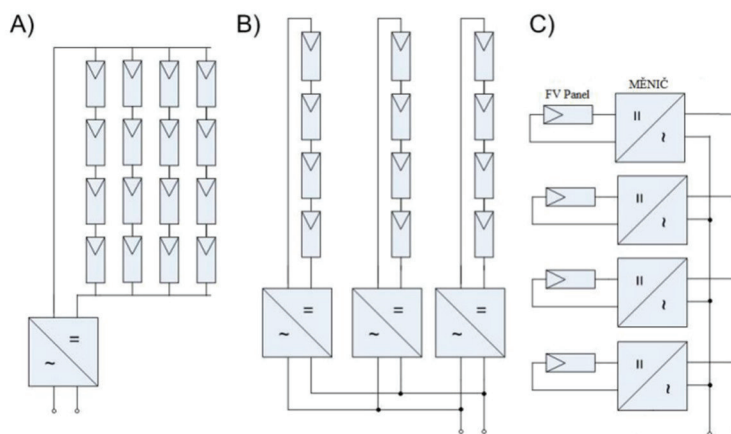
Každý střídač je připojen k několika FV modulům vzájemně propojených do série, popřípadě i paralelně, kdy každý řetězec má MPPT, což zajišťuje větší účinnost. Další výhodou je minimální délka stejnosměrných kabelů, jelikož střídač může být umístěn přímo pod příslušný modul. Využívají je středně velké elektrárny (1–25 kW), tedy i bezlicenční FVE.

3. Centrální střídače

Jsou připojené na stovky až tisíce FV modulů. Moduly jsou zapojeny do série, tvoří tzv. string (řetězec). Stringy jsou poté propojeny mezi sebou paralelně. Obvykle se užívá pro velmi velké výkony (50–500 kW).

Mezi jeho výhody patří vysoká účinnost díky vyššímu napětí (snížení ztrát) a nízká cena vzhledem k velikosti instalovaného výkonu.

Příklady zapojení jednotlivých typů střídačů jsou uvedeny na Obr. 3-4, kde vidíme modulové střídače (A), řetězové (B) a nakonec centrální (C).



Obr. 3-4 Příklady zapojení střídačů [3]

3.1.3 Rozdělení střídačů podle počtu fází

1. Jednofázové

Jejich instalovaný výkon v jednom přípojném bodě je omezen na 3,7 kVA na fázi (instalovaný výkon střídače). [8] Používají se v aplikacích menších výkonů do 10 kWp v podmínkách ČR s nízkou spotřebou, kde je dominantní odběr na jedné fázi. [9] Častým příkladem jsou bezlicenční fotovoltaické elektrárny, pro jejichž provoz není v současné době potřeba získat licenci.

2. Třífázové

Používají se obvykle pro výrobní moduly větších výkonů, nad 10 kWp. Dnes už jako standard při FVE instalacích v domácnostech, jelikož došlo ke navýšení maximálního instalovaného výkonu bezlicenční FVE.

3.1.4 Střídače podle rozdělení výkonu mezi tři fáze

1. Asymetrické

Dodávaný výkon je mezi tři fáze rozdělen dle aktuální spotřeby. Pokud se tedy výše spotřeby na jednotlivých fázích liší, je výhodné použití asymetrických střídačů. V ČR je tento typ zatím vysoce žádaný, neboť tak lze předejít problémům spojeným s fázovým měřením elektrické energie. Použitím asymetrického střídače tak eliminujeme problém mezi prodejem a nákupem energie za rozdílnou cenu (v budoucnu snaha o součtové měření a montáž symetrických střídačů). Pokud tedy naším cílem není pouze samotná dodávka

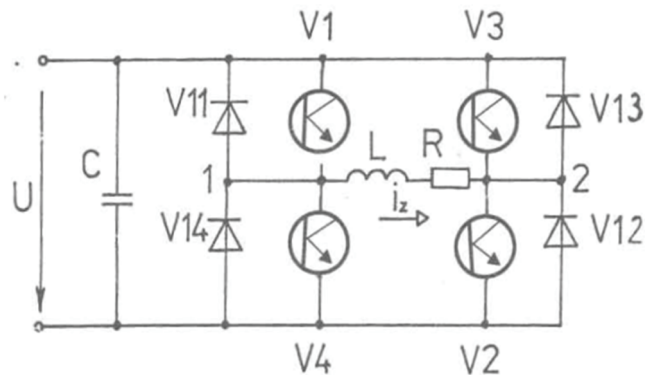
elektrické energie do sítě, je vhodné použití právě asymetrických střídačů, za předpokladu fázového měření, kdy můžeme ušetřit nemalé množství finančních prostředků.

2. Symetrické

Rozdělují energii (dodávaný výkon) rovnoměrně mezi tři fáze a jsou konstrukčně jednodušší. Využití nacházejí hlavně tam, kde je spotřeba elektrické energie měřena součtově nebo je měřena fázově, ale našim primárním cílem je dodávka elektrické energie do sítě.

3.2 Jednofázový napěťový střídač

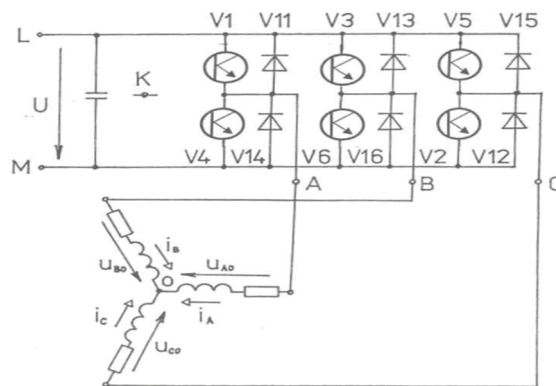
Na obrázku lze vidět schéma zapojení jednofázového střídače, jehož větve jsou tvořeny antiparalelním spojením spínačů V1, V2, V3, V4 a diod V11, V13, V14, V12. Spínače mohou být realizovány výkonovými tranzistory (IGBT). Základní spínací kombinace V1, V2 nebo V3, V4 sepnuté, popřípadě V1, V2, V3, V4 vypnuté. Nežádoucí je spínat kombinace V1, V4 nebo V3, V2 (zkrat meziobvodu). [10]



Obr. 3-5 Základní schéma jednofázového střídače s RL zátěží [10]

3.3 Třífázový napěťový střídač

U třífázového napěťového střídače je stejný princip jako u jednofázového střídače. Schéma třífázového napěťového měniče je na Obr. 3-6. Součástky ve spodní řadě spínají o 180° později než ve stejné větvi nacházející se součástky horní řady. Větev tvoří skupina tranzistorů a diod ležících mezi vývodem fáze a kladným nebo záporným pólem zdroje. Platí, že nikdy nesmí být sepnuty obě vypínatelné součástky jedné větve současně, jelikož by došlo ke zkratu napájecího zdroje. Ke každé vypínatelné součástce je antiparalelně připojena dioda. [10]



Obr. 3-6 Základní schéma zapojení třífázového napěťového střídače s třífázovou RL zátěží [10]

3.4 Typické parametry fotovoltaických střídačů

V Tab. 3-1 jsou srovnány typické parametry 3fázových fotovoltaických střídačů o výkonu 5 kW na základě uvedených datasheetů. Zajímavý je pojem PV point, který je součástí většiny hybridních měničů. Je to funkce, která umožňuje používání střídače jako záložního zdroje v případě výpadku DS (bez přítomnosti externího napájení ze sítě) nebo nepřítomnosti baterie. Srovnávány byly následující typy střídačů od různých výrobců:

- Hybridní 3f měnič GoodWe GW5K-ET Plus [11]
- Hybridní 3f měnič Deye SUN 5 kW [12]
- 3f měnič napětí Solax X3-MIC-5K-G2 [13]
- 3f měnič Fronius Symo Gen24 Plus [14]

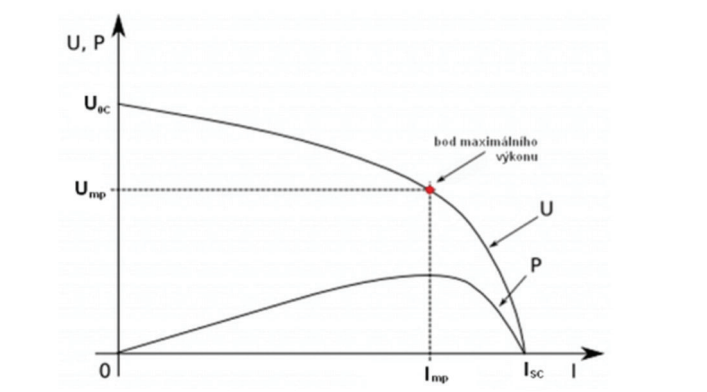
Tab. 3-1 Rozsah parametrů 3fázových střídačů výkonu 5 kW

Rozsah parametrů 3fázových střídačů výkonu 5 kW					
Vstupní údaje	Počet MPP trackerů		2		
	Rozsah vstupního napětí DC	V	80–1000		
	Jmenovité vstupní napětí	V	610–650		
	Spouštěcí napětí dodávky do sítě	V	80–180		
	Využitelný rozsah napětí MPP	V	80–850		
	Rozsah napětí MPP (při jmenovitém výkonu)	V	210–800		
			MPPT1	MPPT2	
	Max. použitelný vstupní proud	A	11–16	11–16	
	Max. zkratový proud pole panelů	A	13,8–20	13,8–20	
	Počet DC přípojek		2	1	
			MPPT1	MPPT2	Součet
	Max. využitelný DC výkon	W	5,2	5,2	5,2
Max. výkon FV generátoru	W _{peak}	6,5	6,5	7,5	
Výstupní údaje	Jmenovitý výkon AC	W	5000		
	Zdánlivý výkon	VA	5000–5500		
	Max. výstupní výkon	VA	5000–10000		
			380 Vac	400 Vac	
	Jmenovitý AC výstupní proud	A	7,6	7,2	
	Síťové připojení	V	3 – NPE 400/230 nebo 3 – NPE 380/220		
	Frekvence (frekvenční rozsah)	Hz	(45–65)		
	Činitel zkreslení (THD proudové)	%	<3		
	Účinnost		0,8–1 ind. / cap.		
Výstupní údaje PV point	Jmenovitý výstupní výkon	VA	3		
	Síťové připojení	V	1 – NPE 220/230		
	Doba přepnutí	s	<23		

Všeobecné údaje	Rozměry (výška x šířka x hloubka)	mm	410–700 x 470–520 x 156–280
	Hmotnost	kg	16–35
	Krytí		IP 66 / IP 65
	Třída ochrany		1
	Spotřeba v noci	W	<10
	Koncepce střídače		beztransformátorový
	Chlazení		pasivní / aktivní
	Montáž		vnitřní / venkovní (na zeď)
	Provozní teploty	°C	–35–60
	Přípustná vlhkost vzduchu	%	0–100
	Hluk	dB	do 35
	Max. nadmořská výška	m. n. m	3000–4000
Účinnost	Max. účinnost	%	98–98,5
	Euro účinnost	%	97–97,8
	Účinnost přizpůsobení MPP	%	> 99,9
Ochrany	Anti – islanding		ano
	Ochrana proti přepólování		ano
	Ochrana proti přetížení AC výstupu		ano
	Ochrana proti zkratu AC výstupu		ano
	Ochrana proti přepětí AC výstupu		ano
	Detekce izolačního odporu		ano
Rozhraní	Komunikace s portálem		WIFI
	Komunikace s BMS		RS 485
	Emergency stop		ano
	Digitální vstupy/výstupy		pro příjem signálu HDO

3.5 Speciální funkce střídače

Speciální funkce střídačů vycházejí z voltampérové charakteristiky FV článku, která nám podává základní informace o činnosti fotovoltaických panelů. Významnými body na charakteristice jsou napětí naprázdno (U_{oc}) a proud nakrátko (I_{sc}). Napětí naprázdno představuje maximální napětí, kterého je možné dosáhnout v případě, že ke článku není připojen žádný spotřebič. Proud nakrátko je maximální proud (zkratový), který může fotovoltaický článek při konkrétní intenzitě slunečního záření dodávat. Na průběh voltampérové charakteristiky má vliv především hodnota intenzity slunečního záření a teplota. [3]



Obr. 3-7 Voltampérová charakteristika FV článku [3]

3.5.1 Sledování bodu maximálního výkonu (MPPT)

Výkon fotovoltaického článku je dán součinem proudu a napětí. Pro každý FV článek existuje pracovní bod na charakteristice, ve kterém je možné získat maximální možný výkon článku tak, aby byla zajištěna maximální účinnost přenosu elektrické energie bez ohledu na proměnné ozáření, teplotu, nebo změnu zátěže. Jedná se tedy o nelineární systém. Tento bod je označován jako bod maximálního výkonu (MPP) a je charakterizován napětím U_{mp} a proudem I_{mp} . Pro výkon P FV článku lze napsat rovnici (3.1). [3]

$$P = U_{mp} \cdot I_{mp} \quad (3.1)$$

Výkon solárního panelu závisí na mnoha faktorech, např. na množství dostupného slunečního záření, zastínění, teplotě solárního panelu a elektrických vlastnostech zátěže. Tím, jak se tyto parametry mění, se mění již zmíněná, voltampérová charakteristika, která poskytuje nejvyšší účinnost přenosu výkonu. [15] S rostoucí intenzitou slunečního záření roste maximální výkon v bodě MPP, naopak vlivem zvýšené teploty maximální výkon klesá.

Dalšími charakteristickými provozními hodnotami FV článků jsou činitel plnění (FF – fill factor) a účinnost (η).

Účelem systému MPPT je vzorkovat výstup článků a určit odpor (zátěž) pro získání maximálního výkonu pro dané podmínky prostředí. [3] To zajišťuje činitel plnění FF, který charakterizuje nelineární elektrické chování článku. Je definován jako poměr maximálního výkonu v bodě MPP a maximálního výkonu definovaného pomocí maximálního napětí U_{OC} a maximálního proudu I_{SC} při nezátženém článku. Proto můžeme napsat rovnici (3.2).

$$FF = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (3.2)$$

Často se používá pro odhadnutí maximálního výkonu solárního článku vztah (3.3).

$$P = FF \cdot U_{OC} \cdot I_{SC} \quad (3.3)$$

Pro účinnost FV článku můžeme napsat rovnici (3.4), ze které je zřejmé, že účinnost je definována jako podíl maximálního výkonu článku v bodě MPP a výkonu dopadajícího slunečního záření P_{in} .

$$\eta = \frac{U_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}} \quad (3.4)$$

Všechny tyto vztahy jsou odvozeny za standardních testovacích podmínek, tedy při teplotě PN přechodu 25 °C, intenzitě slunečního záření $I = 1000 \text{ W m}^{-2}$ a koeficientu atmosférické masy $AM = 1,5$ (spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou). [3]

3.5.2 Ochrana proti ostrovnímu provozu (anti-islanding)

Ostrovní provoz je stav, ve kterém fotovoltaický střídač (měnič) napájí odběrné místo i bez propojení s externí elektrickou sítí. V dnešní době musí být každý měnič vybaven ostrovní ochranou a při ztrátě spojení s distribuční sítí se musí v řádu milisekund od sítě odpojit. Díky tomuto ošetření nikdy nemůže nastat stav, že měnič bude při výpadku vnější energie připojen k síti, což býval dříve problém. Pokud dojde k obnovení dodávek z rozvodné sítě, měnič zjistí přítomnost napětí a postupně se sfázuje se sítí. [16] Nepříjemnou záležitostí je, že může být narušena rovnováha mezi zátěží a generací v ostrovním obvodu, pokud nebude docházet ke kontrole frekvence. Z těchto důvodů musí generátory elektrické energie detekovat tento stav a okamžitě se odpojit od obvodu. [17].

4 Dopad fotovoltaických střídačů na distribuční soustavu nízkého napětí

Velký počet fotovoltaických elektráren (FVE), obecně výrobních modulů elektrické energie v distribuční síti, může mít za následek nežádoucí účinky na vybrané parametry kvality elektrické energie. Jedním z hlavních kritérií pro zajištění bezpečného připojení výrobních modulů do elektrické sítě je udržení přijatelné velikosti napětí, když dojde k rušení (např. 90 až 110 % U_n). Navíc platí, že vyvolaná změna současným připojením či odpojením všech zdrojů v dotčené části DS nízkého napětí nesmí v předávacím místě (PCC) přesáhnout 3 %. Volbu způsobu regulace napětí, jalového výkonu nebo účinníku včetně rozsahu určuje provozovatel distribuční sítě (PDS) v technických podmínkách připojení v souladu s Přílohou č. 4. Pravidla provozování distribučních soustav (PPDS). Výrobní elektrické energie musí udržovat napětí sítě, a to pomocí dynamické nebo statické podpory sítě. [8] Ke zmírnění změn velikosti napětí v důsledku různých intenzit slunečního záření v rámci dne existuje systém založený na řízení jalového výkonu FV střídačů. Hlavním regulačním členem je PI regulátor, který upravuje dodávku jalového výkonu střídače tak, aby mohl dynamicky řídit napětí ve společném napájecím bodě (PCC) na požadovanou hodnotu.

Distribuční společnosti mají díky rostoucímu množství připojených fotovoltaických elektráren k síti vážné obavy o spolehlivost dodávky elektřiny. Přerušovaná a nedisponibilní (je náročné vyrábět, když zrovna potřebujeme) výroba reálného výkonu fotovoltaických panelů vede ke značným výkyvům napětí. Změny napětí jsou úměrné výrobě výkonu fotovoltaických elektráren, v nejhorším případě to může vést k porušení mezních hodnot ČSN EN 50160 ($\pm 10\%$). [8] Tyto mezní hodnoty má PDS za povinnost udržovat dle ČSN EN 50160 na všech odběrných místech. Z tohoto důvodu jsou zavedeny normy [18] a [19] pro řízení jalového výkonu. Nejnovější fotovoltaické střídače mají možnost regulačních schopností, zejména generovat činný a jalový výkon nezávisle na sobě, pokud není překročen maximální jmenovitý zdánlivý výkon (S_{max}). [20]

Hlavní regulační schopnosti střídače vychází z lineární Q-V droop funkce na Obr. 4-1, která je rozdělena na dva případy a to s tzv. mrtvým pásmem (deadband) a bez tohoto pásma kolem jmenovitého napětí. Kromě toho rozlišujeme dvě doporučené pracovní oblasti, pracovní oblast omezenou účinníkem a bez omezení. Hodnotu účinníku navrhuje normy IEC 61850-7-420 [18] a IEEE 1547.8 [19]. Těmito vlastnostmi se bude zabývat následující kapitola.

4.1 Regulační schopnosti střídačů FVE

Účelem již zmiňovaných způsobů regulace je prostřednictvím jalového výkonu udržovat napětí v dovořených mezích. Přitom se rozlišuje mezi statickou a dynamickou podporou sítě. Požadované hodnoty a charakteristiky pro podporu sítě udává PDS a dodržování zadaných hodnot zajišťuje automatické řízení ve výrobně elektrické energie. [8]

4.1.1 Statické řízení napětí

Statické udržování napětí je udržování napětí ve smluvně dovořených mezích. Výrobní moduly musí být schopny přispívat k tomuto požadavku během normálního provozu sítě. Pokud to vyžadují podmínky v síti, a PDS tento požadavek uplatní, musí se výrobní zařízení podílet na udržování napětí pomocí jalového výkonu v rozsahu účinníku mezi 0,9 kapacitní a 0,9 induktivní. [8]

Lineární Q-V řízení

V Lineárním Q-V režimu řízení vycházejícího z Obr. 4-1 se rozlišují dva případy, bez tzv. mrtvého pásma (deadband) a s tímto pásmem. V prvním případě dochází k podpoře napětí pomocí jalového výkonu, kdy fotovoltaický střídač odebírá nebo dodává jalový výkon na základě rozdílu napětí U_{PCC} oproti U_{ref} , které se obecně předpokládá ve výši 1,0 p.j. Jalový výkon, generovaný střídačem (Q_{out}), je v režimu bez deadband funkcí U_{PCC} , jak je uvedeno v rovnici (4.1). [20]

$$\begin{aligned}U_{PCC} < 0,95 : Q_{out} &= Q_{max} \\0,95 \leq U_{PCC} \leq 1,05 : Q_{out} &= Q_{max} - \frac{Q_{max}}{0,05} \cdot (U_{PCC} - 0,95) \\U_{PCC} > 1,05 : Q_{out} &= -Q_{max}\end{aligned}\tag{4.1}$$

Kde U_{PCC} je napětí v místě předávání výkonu mezi odběrným místem a DS, Q_{max} je maximální dostupný jalový výkon měniče.

V druhém případě (s deadband) je jalový výkon generovaný střídačem (Q_{out}) funkcí U_{PCC} , dle rovnice (4.2).

$$\begin{aligned}U_{PCC} < 0,95 : Q_{out} &= Q_{max} \\U_{PCC} > D_{Bmin} \ \&\& \ U_{PCC} < D_{Bmax} : Q_{out} &= 0 \\U_{PCC} \geq 0,95 \ \&\& \ U_{PCC} \leq D_{Bmin} : Q_{out} &= \frac{-1}{0,03} \cdot (U_{PCC} - D_{Bmin}) \\U_{PCC} \leq 1,05 \ \&\& \ U_{PCC} \geq D_{Bmax} : Q_{out} &= \frac{-1}{0,02} \cdot (U_{PCC} - D_{Bmax}) \\U_{PCC} > 1,05 : Q_{out} &= -Q_{max}\end{aligned} \tag{4.2}$$

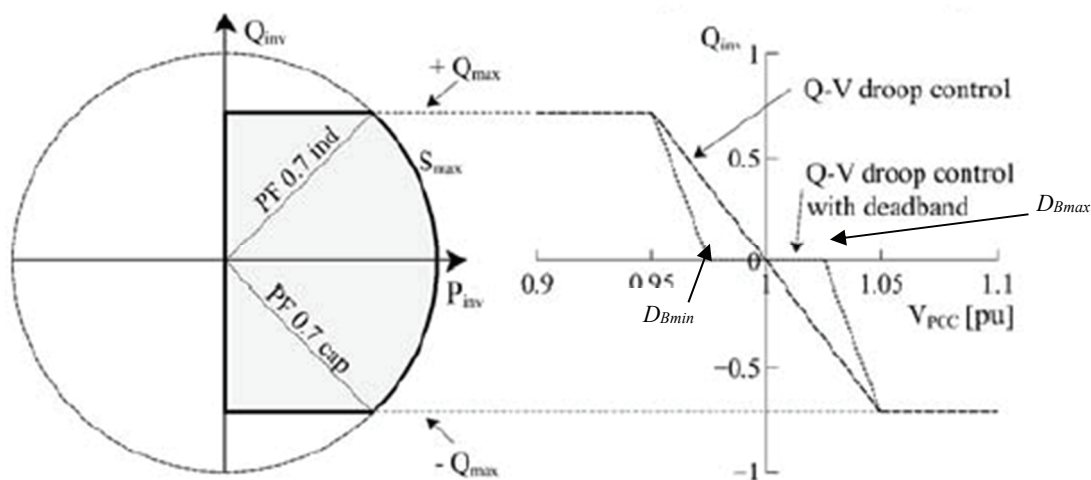
Dále rozlišujeme dle charakteru FV střídače jeho doporučenou pracovní oblast na omezenou účíníkem a bez (plná pracovní oblast). Pro plnou pracovní oblast bez omezení účíníkem je jalový výkon dostupný z měniče během zátěžných dnů a také noci, kdy není žádná výroba z FVE (činný výkon je nulový), dle rovnice (4.3). [20] Reálná výroba výkonu fotovoltaického střídače využívá jeho plnou kapacitu pouze po dobu několika hodin, a to v závislosti na počasí, ročním období a uspořádání samotných panelů.

$$Q_{dostupný}(t) = \sqrt{S_{max}^2 - P_{akt}^2(t)} \quad (4.3)$$

Kde $Q_{dostupný}$ je jalový výkon, který je možné dostat ze střídače v závislosti na P_{akt} , což je činný výkon dodávaný z FV panelů. S_{max} je maximální zdánlivý výkon střídače.

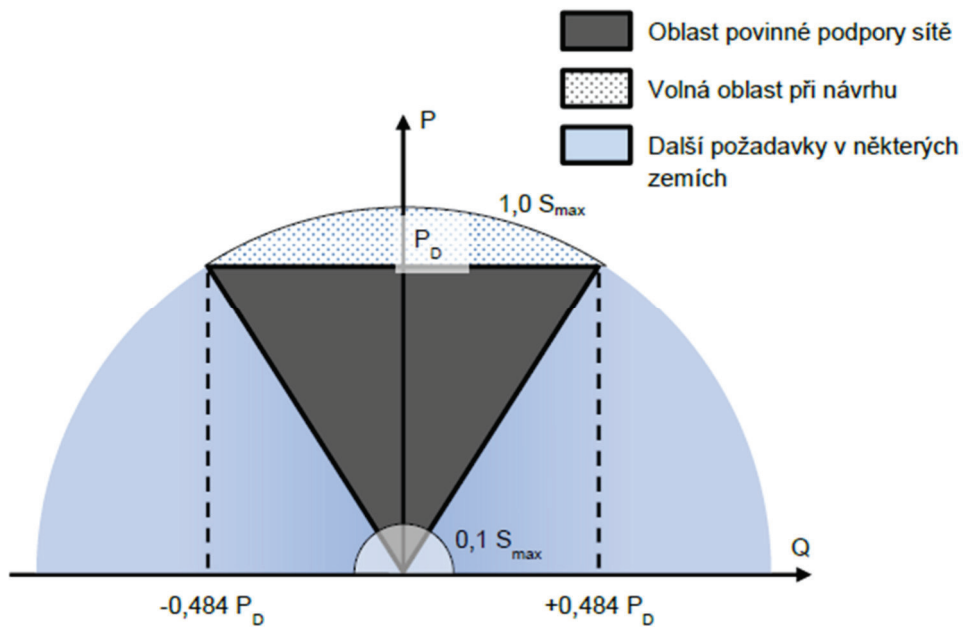
Možnost regulace i za nulového činného výkonu považujeme za poměrně velkou výhodu, neboť s použitím druhé pracovní oblasti (omezené účíníkem) není schopen střídač v noci nebo v časech s nízkou výrobou regulovat (vyrovnat napěťový profil) například při poklesu napětí vlivem zatížení.

Pro pracovní oblast omezenou účíníkem je dostupný jalový výkon fotovoltaického střídače omezen právě maximálním účíníkem (PF) střídače. Většina fotovoltaických střídačů má mezní hodnoty PF kolem 0,7–0,85 (induktivní nebo kapacitní). V P-Q diagramu na Obr. 4-1, budeme uvažovat hodnotu účíníku 0,7 (induktivní i kapacitní). [20]



Obr. 4-1 P-Q charakteristika střídače a Q-V droop řízení [20]

Obr. 4-2 znázorňuje výšeč Obr. 4-1, tedy pracovní oblast střídače, kde je krásně znázorněná oblast povinné podpory sítě a lze vidět, že je menší než maximálně teoreticky plná oblast neomezená účínkem.

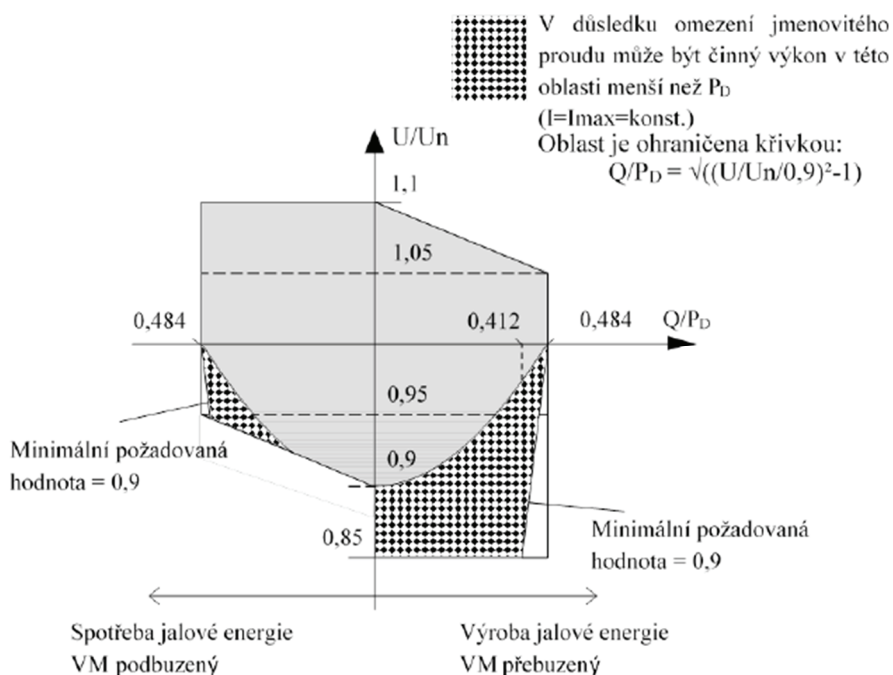


Obr. 4-2 Grafické znázornění minimálních i nepovinných požadavků dodávky/odběru jalového výkonu při jmenovitém napětí [8]

Hodnota $0,484 P_D$ odpovídá maximální hodnotě jalového výkonu měniče Q_{max} a P_D je navrhovaný výkon výroby.

Pro výrobny od 800 W podle normy ČSN EN 50 438 [21] s přímo připojeným výrobním modulem (VM) s měničem platí, že VM musí být schopen pracovat za normálních ustálených provozních podmínek v předepsaném tolerančním pásmu jmenovitého napětí při účinních $\cos \varphi = 0,90$ – odběr jalové energie do 0,90 – dodávka jalové energie, když je činný výkon VM větší nebo roven 20 % jmenovitého činného výkonu.

Pro napětí odlišná od jmenovitého, ale uvnitř rozsahu napětí pro trvalý provoz jsou uvedeny meze pro minimální požadavky pro VM A1, A2 (pro FVE) na následujícím obrázku Obr. 4-3. [8]



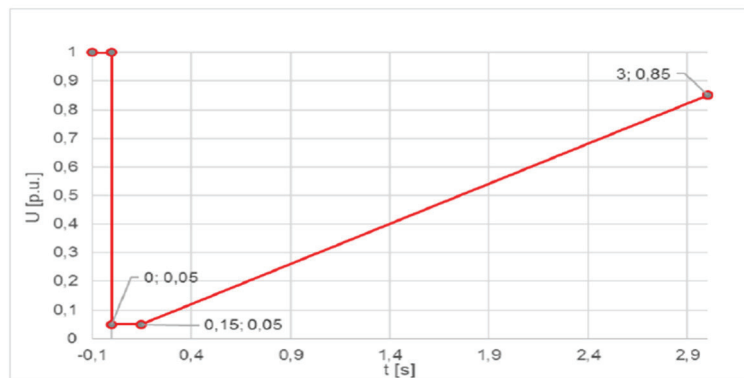
Obr. 4-3 Jalový výkon VM pro $P = P_D$ [8]

4.1.2 Dynamické řízení napětí

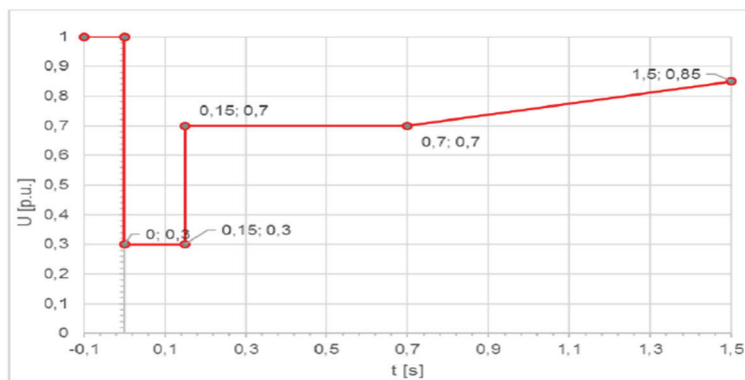
Dynamickou podporou sítě se rozumí udržování napětí při poklesech napětí v síti VVN a ZVN, zamezující nežádoucímu odpojení výkonů napájejících sítě NN, VN a rozpadu sítě. To znamená, že VM musí být technicky schopné zůstat připojené i při poruchách v síti, při kterých dochází k poklesům napětí. Toto se týká zejména všech druhů zkratů v elektrizační soustavě. Pokud tedy bude zvolena metoda řízení jalového výkonu v závislosti na napětí, budou napětí ovlivňovat daleko více ty zdroje elektrické energie, které jsou nejdále od distribučního transformátoru, kdy je odchylka napětí největší.

Nesynchronní výrobní moduly A1, A2 se nesmí odpojit od soustavy v případě poklesu napětí definované FRT (překlenutí poklesu napětí „fault-ride-through“) křivkou na Obr. 4-4. V případě, že se napětí bude nacházet pod definovanou křivkou, výrobní modul se může odpojit.

Synchronní výrobní moduly A1, A2 se nesmí odpojit od soustavy při poklesu napětí definovaném FRT křivkou na Obr. 4-5. V případě, že se napětí bude nacházet pod definovanou křivkou, může se výrobní modul odpojit. [8]



Obr. 4-4 Časový průběh napětí v místě připojení za podmínek poruchy pro nesynchronní výrobní moduly kategorie A1, A2 (FRT křivka) [8]



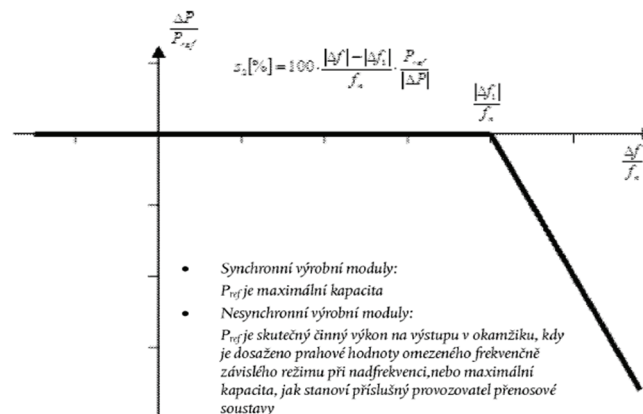
Obr. 4-5 Schopnost překlenutí poruchy synchronních VM A1, A2 [8]

4.2 Obecné požadavky na výrobní moduly typu A

Obecné požadavky na výrobní moduly typu A (malé fotovoltaické elektrárny) vycházejí z nařízení komise (EU) 2016/631 ze dne 14. dubna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě, přesněji z Kapitoly 1 Obecné požadavky, článku 13. [22]

Výrobní moduly typu A (FVE) musí splňovat následující požadavky na frekvenční stabilitu:

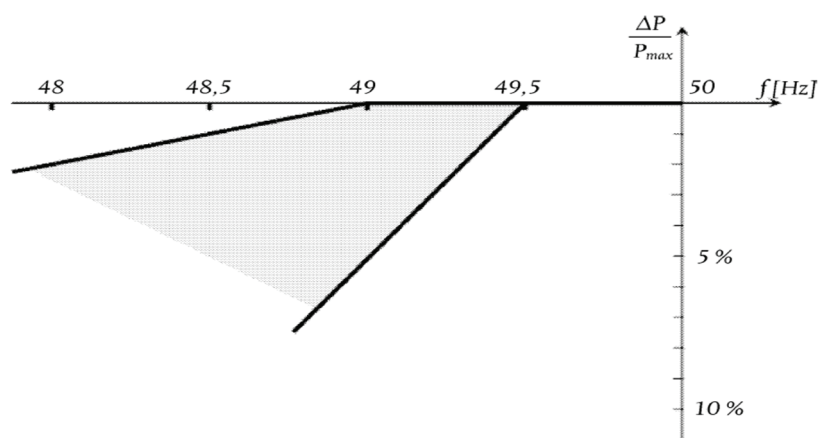
- Výrobní modul musí být schopen zůstat připojený k soustavě a pracovat v rozsazích po dobu, jak je uvedeno v Tab. 4-1.
- Vlastník výroby elektrické energie se může dohodnout s provozovatelem distribuční soustavy na širších rozsazích frekvencí, delších minimálních dobách provozu tak, aby mohly být co nejlépe využívány technické charakteristiky výrobního modulu.
- S ohledem na schopnost zdroje musí být schopen zůstat připojen k síti při rychlé změně frekvence až po hodnotu stanovenou PPDS, pokud odepnutí od sítě nebylo vyvoláno ochranou při odpojení sítě.
- Pokud jde o omezený frekvenčně závislý režim při nadfrekvenci, pro svou regulační oblast stanoví příslušný PPS, aby byl zajištěn minimální dopad na sousední oblasti.
- Výrobní modul musí na základě změny frekvence upravit hodnotu činného výkonu podle Obr. 4-6 při prahové hodnotě frekvence a nastavení statiky.



Obr. 4-6 Schopnost frekvenční odezvy činného výkonu u výrobních modulů v omezeném frekvenčně závislém režimu při nadfrekvenci [22]

Kde P_{ref} je činný výkon na výstupu při dosažení prahové frekvence Δf_i , Δf je odchylka frekvence v soustavě, ΔP značí změnu činného výkonu, f_n je jmenovitá frekvence sítě a s_2 je statika (poměrná změna frekvence).

- Prahová hodnota frekvence musí být mezi 50,2 Hz a 50,5 Hz včetně.
- Nastavení statiky PPS musí být mezi 2 % až 12 %.
- Výrobní modul musí aktivovat frekvenční odezvu činného výkonu za co nejkratší dobu.
- Výrobní modul musí být schopen udržovat konstantní výkon na své cílové hodnotě činného výkonu nezávislé na změnách frekvence, kromě případů, kdy je nutné upravit výkon na základě změn stanovených v bodech 2 a 4 této části.
- Příslušný PPS určí míru snížení činného výkonu z maximálního výkonu s klesající frekvencí, jako míru snižování nacházející se v mezích na Obr. 4-7, kde je oblast vyznačena plnými čarami.



Obr. 4-7 Snižování maximálního výkonu s klesající frekvencí [22]

- Pod 49 Hz klesá o 2 % maximální kapacity při 50 Hz na každý pokles frekvence o 1 Hz.
- Pod 49,5 Hz klesá o 10 % maximální kapacity při 50 Hz na každý pokles frekvence o 1 Hz.
- Výrobní modul musí obsahovat logické rozhraní, aby do pěti sekund od obdržení pokynu na vstupním portu byl schopen přerušit dodávku činného výkonu na výstupu. [22]

Tab. 4-1 Provozní frekvenční rozsah FVE v síti NN pro kontinentální Evropu [22]

Rozsah frekvence	Minimální doba provozu
47,5–48,5 Hz	Bude stanovena jednotlivými provozovateli přenosových soustav, avšak nejméně 30 min.
48,5–49 Hz	Bude stanovena jednotlivými provozovateli přenosových soustav, avšak nejméně stejná doba jako pro rozsah 47,5 Hz–48,5 Hz.
49–51 Hz	Neomezeně
51–51,5 Hz	30 min

Jelikož hodnota frekvence dynamicky klesá či roste z důvodu nedostatku nebo přebytku elektrické energie vzhledem k aktuální poptávce, výrobní moduly A1, A2 nesmí být odpojeny od sítě v případě těchto časových změn frekvence sítě do hodnoty ± 2 Hz/s. [8]

4.3 Rozsah trvalého provozního napětí

Výrobní elektrické energie do 800 W a výrobní s VM A1, A2, tedy v tomto případě FVE musí být schopny trvalého provozu, pokud se napětí v místě připojení s časem dynamicky mění a je tedy v rozsahu U_n od -15% až do $U_n +10\%$. Jestliže je napětí nižší než hodnota U_n , dochází ke snížení výstupního výkonu odpovídající relativní změně napětí $(U_n - U)/U_n$. Rozsahy napětí jsou uvedeny v poměrných jednotkách (p.j.), aby je bylo možné zohlednit pro všechny hladiny napětí. [8]

Tab. 4-2 Rozsahy napětí pro výrobní s připojením do sítě VN [8]

Rozsah napětí	Doba provozu
0,85 p.j.–0,90 p.j.	60 minut
0,90 p.j.–1,118 p.j.	Neomezená
1,118 p.j.–1,15 p.j.	60 minut

5 Podmínky pro připojení výrobních modulů k distribuční síti

Pro připojování výrobních modulů k elektrizační soustavě jsou stanovena harmonizovaná pravidla. Je tak vymezen jasný právní rámec pro připojování k soustavě, usnadněn obchod s elektřinou v celé EU, zajištěna bezpečnost provozu soustavy, usnadněna integrace obnovitelných zdrojů elektřiny a umožněno účinnější využívání soustavy zdrojů, což bude prospěšné pro spotřebitele.

Funkčnost soustavy za abnormálních provozních podmínek závisí zvláště na odezvě výrobních modulů na odchylkách od referenčních hodnot napětí odpovídajících jedné poměrné jednotce a od jmenovité frekvence.

Požadavky na výrobní moduly typu A odpovídající malým fotovoltaickým elektrárnám by měly být stanoveny tak, aby docházelo k výrobě s omezenou automatizovanou odezvou a s minimální regulací ze strany provozovatele soustavy. Tyto požadavky by měly zajistit, aby v provozních rozpětích soustavy nedocházelo k velkým ztrátám výroby a minimalizoval se vznik kritických událostí. Kvůli zajištění bezpečnosti provozu soustavy by měly být výrobní moduly v každé synchronně propojené oblasti propojené soustavy schopny setrvat v provozu při stanovených mezích frekvence a napětí.

Proto, aby provozovatelé soustav mohli udržovat stabilitu a bezpečnost soustavy, je nutné provádět odpovídající výměnu informací mezi provozovateli soustav a vlastníky výroben elektřiny. Během nouzových situací, které by mohly ohrozit stabilitu a bezpečnost soustavy, by měli mít provozovatelé možnost úpravy výkonu výrobních modulů.

Rozsahy napětí by mezi propojenými soustavami měly být koordinovány, jelikož jsou klíčové pro bezpečnost plánování a provozu elektrizační soustavy v rámci synchronně propojené oblasti. [22]

5.1 *Obecné ustanovení*

Toto ustanovení zavádí nařízení, tzv. kodex sítě, který stanoví požadavky na připojení výroben elektřiny, konkrétně synchronních výrobních modulů, nesynchronních výrobních modulů k propojené elektrizační soustavě. Je to nezbytné k zajištění spravedlivých podmínek hospodářské soutěže na vnitřním trhu s elektřinou, k zajištění bezpečnosti provozu soustavy, integraci obnovitelných zdrojů energie do soustavy a k usnadnění obchodu s elektřinou v celé EU.

Navíc má toto nařízení přispívat k tomu, aby provozovatelé soustav využívali vyrobenou elektřinu z výrobních modulů vhodným, ekonomickým a nediskriminačním způsobem. [22]

5.2 Všeobecné podmínky

Při zřizování fotovoltaické elektrárny (výroben elektrické energie) a akumulčních zařízení je třeba dodržet platná nařízení, vhodná především pro paralelní provoz s distribuční sítí, aby tak bylo vyloučeno zpětného rušivého působení na síť.

Při zřizování a provozu elektrických zařízení je zapotřebí dodržet následující podmínky:

- Současně platné předpisy, nařízení a směrnice PDS,
- platné normy ČSN, PNE, popřípadě PN PDS,
- předpisy pro ochranu práce, bezpečnost práce.

Pro výstavbu výroby elektrické energie je nutné vypracovat projektovou dokumentaci, kterou by měla provést kvalifikovaná osoba, stejně tak jako samotnou výstavbu a následné připojení výroby k síti. Připojení je nutné předem projednat s provozovatelem distribuční soustavy. [8]

5.3 Žádost o připojení

Pokud máme výrobu elektrické energie zrealizovanou, musíme včas předat PDS žádost o připojení a dále doložit následující dokumenty:

- Katastrální mapu s vyznačením pozemku, na kterém se výroba nachází,
- výpis z katastru nemovitostí a z obchodního rejstříku,
- informace o zkratové odolnosti předávací stanice,
- popis ochrany s konkrétními údaji o výrobcu, zapojení a funkci,
- příspěvek výroby ke zkratovému proudu v místě připojení k síti, jeho trvání a tvar průběhu,
- zkušební protokol k očekávaným harmonickým a meziharmonickým proudům.

V žádosti o připojení musí být také odhad minimální a maximální velikosti zkratového příspěvku v místě připojení uvedený v megavoltampérech (MVA), jako zkratový ekvivalent soustavy S_{ks} .

Základní náležitosti majitele o připojení elektrárny k distribuční soustavě jsou uvedeny v Přílohách vyhlášky [23] a v PPDS č 3.8.3. [8]

Součástí dokumentů dále jsou:

- Souhlas obce a vlastníků nemovitostí dotčených výstavbou výroby,
- požadovaná hodnota rezervovaného výkonu a příkonu za uvážení všech provozních stavů,
- stávající hodnota rezervovaného příkonu a výkonu.

5.4 Posouzení žádosti o připojení výrobný

PDS po obdržení žádosti do 30 dnů nebo ve lhůtě stanovené ve vyhlášce č. 16/2016 Sb. o podmínkách připojení k elektrizační soustavě rozhodne dle charakteru výrobný, zda je připojení možné s ohledem na:

- Rezervovaný výkon P_{rez} předávacího místa mezi PS/DS,
- volnou distribuční kapacitu na úrovni transformace 110 kV/VN.

Základem pro určení mezního (tj. maximálního) připojitelného výkonu v dané oblasti je vztah (5.1).

$$P_{MEZ} = \left(\sum P_{i(N-1)} \cdot k_{TR} + P_{BILANCE} \right) \cdot k_E \quad (5.1)$$

Kde $\sum P_{i(N-1)}$ je součet instalovaných výkonů transformátorů 110 kV/VN s vyloučením stroje o největším výkonu (kritérium N-1). V případě transformoven obsahující jeden transformátor je třeba uvažovat 50% P_i transformátoru, není-li PDS stanoveno jinak.

Redukční koeficient k_{TR} zohledňuje optimální zatížení transformátoru (volí se 0,9), $P_{BILANCE}$ je výkonová bilance oblasti a k_E je redukční koeficient zohledňující drobnou rozptýlenou výrobu (volí se 0,9).

Volná přenosová kapacita v transformační vazbě PS/DS se určí ze vztahu (5.2).

$$P_{VOLNÁ KAPACITA} = P_{MEZ} \cdot P_{AKTIVNÍ} \quad (5.2)$$

Kde $P_{AKTIVNÍ}$ je součet instalovaných výkonů výroben a elektrických akumulacních zařízení, které byly v dané oblasti PDS odsouhlaseny, ale doposud nebyly uvedeny do provozu. [8]

5.5 Studie připojitelnosti výroby

Studie připojitelnosti výroby musí obsahovat technické posouzení o připojitelnosti výroby s ohledem na:

- Zkratovou odolnost zařízení,
- napěťové poměry ve všech posuzovaných uzlech sítě při jejím maximálním a minimálním zatížení,
- zatížitelnost jednotlivých prvků sítě,
- dodržení parametrů zpětných vlivů na DS – konkrétně změny napětí vyvolané trvalým provozem výroby, změny napětí při spínání, útlumu signálu HDO, flikru, harmonických a dalších dle charakteru výroby.

U všech distributorů na území ČR je posouzení o připojitelnosti výroby podobné.

Náklady na vyhotovení studie připojitelnosti hradí žadatel. Posouzení studie se provádí postupy uvedenými v podnikové normě PNE 33 3430-0 s cílem dosáhnout co nejmenších zpětných vlivů na DS při určeném provozním režimu všech zařízení. [8]

5.6 Projektová dokumentace

Projektová dokumentace dle vyhlášky [24], předložená PDS musí obsahovat následující základní požadavky:

- Délka, typy a průřezy vedení mezi výrobnou a místem připojení k DS,
- jednopólové schéma,
- parametry použitých transformátorů,
- typy a parametry použitých elektrických ochran,
- parametry a provedení řízení činného a jalového výkonu,
- popis provedení zařízení pro snížení útlumu signálu HDO,
- potřebné údaje k rozhraní pro dálkové ovládání, měření a signalizaci pro vazbu na řídicí systém DS,
- návrh provedení fakturačního měření a jeho umístění,
- zařazení elektrického zařízení do tříd a skupin,
- popis funkcí ochran a automatik výroby, které mají vliv na provoz a dynamickou podporu provozu DS.

K projektové dokumentaci vystaví PDS do 30 dnů vyjádření, jehož součástí bude požadavek na předložení zprávy o revizi výroby elektrické energie, jejího připojení k DS, ochran souvisejících s DS a místních provozních předpisů.

5.7 Připojení k síti

Nově připojené výroby do DS musí mít možnost instalace dálkového ovládání (dálkového ovládání mezi elektroměrovým rozvaděčem a výrobnu). Připojení k síti PDS probíhá v místě připojení s oddělovací funkcí, jaké pro jednofázové výroby s maximálními instalovaným výkonem v jednom přípojním bodě do 3,7 kVA a trojfázové výroby do 30 kVA obsahuje zařízení pro sledování stavu sítě s určitým spínacím prvkem. U výroben s instalovaným výkonem větším než 100 kVA musí být spínač s oddělovací funkcí vybaven dálkovým ovládním a signalizací stavu. Sledování stavu sítě probíhá na základě změny impedance, fázového napětí či změně fázoru napětí.

Výroby, které mají být paralelně provozovány se sítí PDS, je nutné připojit k síti ve vhodném předávacím místě. Způsob, místo připojení, napět'ovou hladinu a výši rezervovaného výkonu stanoví PDS s ohledem na síťové poměry, požadovaný výkon a způsob provozu výroby. Tím se zajistí, že výroba bude provozována bez rušivých účinků, neohrozí napájení ostatních odběratelů nebo dodávky jiných výrobců.

O posouzení připojení z hlediska zpětných vlivů na síť rozhoduje impedance sítě (zkratový výkon) v místě připojení. [8]

Výrobu elektrické energie lze tedy připojit:

- Přímo k DS,
- v odběrném místě,
- v předávacím místě jiné výroby.

5.8 Kvalita elektrické energie

Kvalitu elektrické energie značnou měrou ovlivňují zejména malé (bezlicenční) fotovoltaické elektrárny na střechách rodinných domů, jejichž maximální instalovaný výkon v jednom přípojném bodě (instalovaný výkon střídače) nepřesahuje 3,7 kVA a jsou připojeny na jednu fázi sítě. Nemají nutné požadavky na řízení jalového výkonu, a tak dodávají pouze čistě činný výkon.

Požadavky na kvalitu elektrické energie v místě připojení odběratelů (místě předání výkonu) z distribučních sítí určuje norma ČSN EN 50160. Mezi normou garantované parametry elektrické energie v síti České republiky patří definovaná velikost napětí, frekvence, sinusový průběh napětí a symetrie mezi jednotlivými fázemi v třífázové soustavě. Snahou výrobců a distributorů elektrické energie proto musí být udržování těchto parametrů na požadované úrovni. Pro nízké napětí (230 V) proti zemi norma nařizuje, že 95 % efektivních hodnot napětí měřené v deseti minutových intervalech musí být v rozmezí $\pm 10 \% U_N$. Kolísání napětí v síti je způsobeno připojováním a odpojováním různých zátěží. [25]

Touto problematikou se také zabývá norma PNE 33 3430, která se zabývá parametry elektrické energie dodávané odběrateli do sítě, tak aby byla norma ČSN EN 50 160 provozovateli sítí splněna. Jedná se zejména o zpětné vlivy na distribuční síť, z hlediska EMC, které jsou s rostoucím využíváním výkonové elektroniky značné. [26]

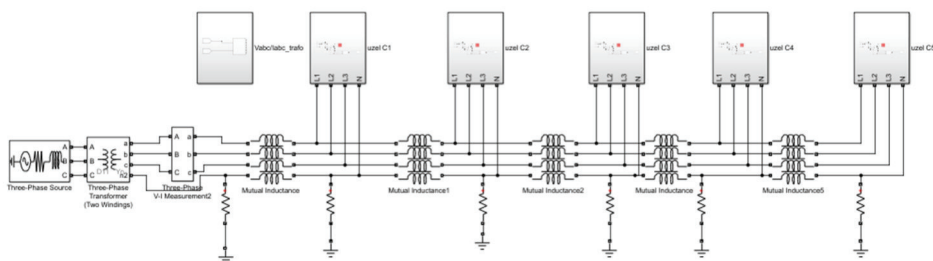
Jak již bylo zmíněno, v distribuční síti je potřeba, aby v místě předání výkonu u odběratelů byly splněny požadavky dle PNE 50 160. K tomu, aby toho bylo dosaženo, je zapotřebí určitého plánování a dodržování zásad dle normy PNE 50 160. Klíčem k dosažení naplnění požadavků PNE je volba zařazení adekvátních parametrů k danému typu sítě, nejčastěji pomocí tlumivek a kondenzátorů. V případě problematických případů pak použití přídatných technologických opatření, jako jsou filtračně kompenzační zařízení.

6 Popis modelu distribuční sítě nízkého napětí s připojenými FVE

Model vytvořený v softwaru Matlab Simulink s využitím knihovny Simpower systems znázorňuje FVE se síťovým střídačem (Grid-on) připojeným k distribuční síti TN-C pro dodávky elektrické energie. Je vytvořen pro univerzální použití, neboť správným nastavením parametrů lze snadno vytvořit 1fázový model FVE (u ostatních fází zvolíme $P = 0$ a $Q = 0$). Pokud bude modelována vícefázová síť Obr. 6-1, stačí daný blok pouze zkopírovat a každý uzel nakonfigurovat dle potřeby. Střídač je v modelu reprezentován pomocí proudového zdroje. Nahrazení střídače proudovým zdrojem, řízeného řídicím signálem I_{ref} , bylo umožněno z důvodu nevyžadování vysoké dynamiky od daného modelu. Tato práce zkoumá dopad dodávaného výkonu FVE do distribuční sítě na napětí. Zabývá se tedy změnou elektrických parametrů v dané síti, kde provádí statické výpočty s nízkou dynamikou, na které ekvivalent proudového zdroje postačuje. Parametry sítě byly zkoumané po 1minutových intervalech pro jednotlivé roční období a denní dobu.

6.1 Distribuční soustava

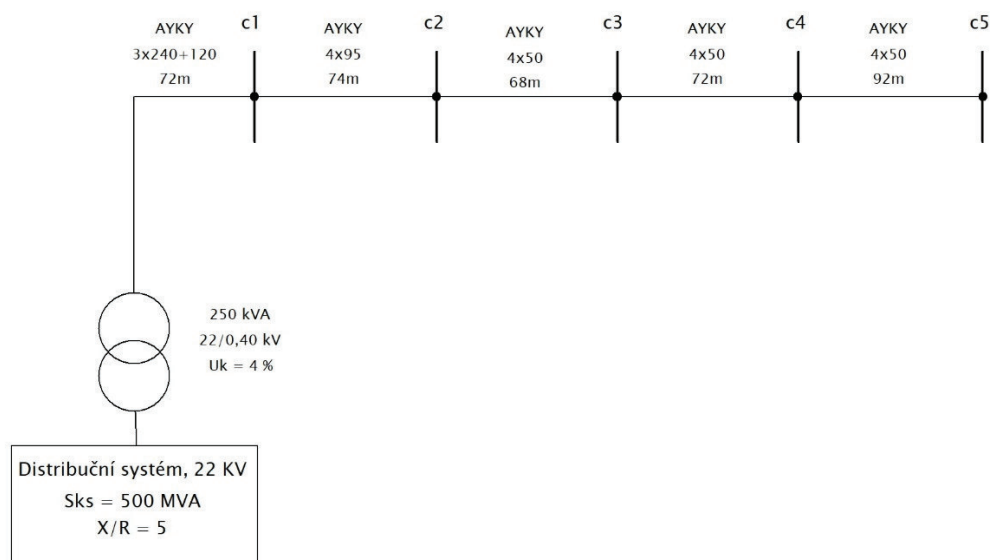
Pro posouzení vlivu FVE na DS byl využit vytvořený model sítě na Obr. 6-1, který obsahuje 5 uzlů (c1 až c5), do kterých jsou připojeny různé zátěže a výroby FVE, jak bude vysvětleno dále. Distribuční soustava je vytvořena na napěťové hladině 22/0,4 kV a obsahuje různě dlouhá vedení, která jsou reprezentována parametry indukčností L a odpory R (bloky vzájemných indukčností – mutual inductance). Napájení DS je zde nahrazeno zkratovým ekvivalentem S_{ks} , který reprezentuje nadřazenou soustavu vysokého napětí (VN), přes 3fázový transformátor na hladině 22/0,4 kV o zdánlivém výkonu 250 kVA. Výpočty parametrů 3fázového distribučního transformátoru jsou uvedeny v příloze B – Výpočet parametrů 3fázového distribučního transformátoru. Součástí DS je také několik bloků měření, pomocí kterých bylo následně vyhodnoceno chování sítě pro jednotlivé případy, které budou uvedeny níže. Všechny tyto případy se budou týkat dvou rozdílných modelů sítě lišících se umístěním uzlu c5 s agregovanou (koncentrovanou) zátěží bez FVE. V prvním případě, varianta A, bude uzel c5 s agregovanou zátěží umístěn na začátku sítě (do místa uzlu c1) – ihned za transformátorem. Ve druhém případě, varianta B, bude uzel c5 umístěn na konci vedení (na místo uzlu c5).



Obr. 6-1 Schéma třífázové distribuční sítě

6.2 Jednopolové schéma modelu DS

Pro lepší znázornění použitého schéma sítě a přehlednost je na Obr. 6-2 zakresleno jednopolové schéma DS s vyznačenými uzly a popisy použitých kabelů, včetně jednotlivých délek vedení. Nadřazená soustava (VN) je zde nahrazena distribučním systémem se zkratovým ekvivalentem S_{ks} o hodnotě 500 MVA.



Obr. 6-2 Jednopolové schéma modelu distribuční sítě

7 Případová studie

7.1 Metodika zpracování vstupních dat

Tab. 7-1 a Tab. 7-2 slouží k vysvětlení metodiky použité při zpracování vstupních dat potřebných pro vyhodnocení jednotlivých případů simulací, jejichž typy jsou popsány v následující kapitole. Data byla převzata z databáze s názvem Data Platform. [27] Jedná se o hodnoty energií v kWh naměřené v oblasti jižního Německa po 1minutových intervalech. Takto zpracovaná data, především 1minutové intervaly, se pro ČR nepovedlo nikde bohužel dohledat. Každopádně s přijetím zjednodušujících předpokladů je možné využití pro tuto případovou studii. Z těchto dat byl následně vybrán jeden konkrétní den v dubnu roku 2016 a v lednu roku 2017 tak, aby byly vyhodnoceny dny z hlediska vysoké a nízké výroby FVE. Tento zdroj bylo mimo jiné výhodné použít, jelikož obsahoval naměřená data různých odběrných míst (domácností – Residential 1,3,4,6). To dále umožnilo náhodně rozmístit tato lišící se odběrná místa do uzlů vytvořeného modelu. Aby tak bylo možno učinit, bylo nejdříve nutno převést vstupní data, v podobě energií naměřených po 1minutových intervalech, z kWh na průměrné výkony v kW odebírané po 1minutě. Následně byly spotřeby (zátěže) dostupných spotřebičů rozmístěny do třech fází a spotřeby třífázových spotřebičů byly rozděleny symetricky na jednotlivé fáze. Nakonec byla určena konstanta potřebná pro vynásobení výkonu zátěže tak, aby byl odebíráván výkon s účinníkem $\cos\varphi = 0,95$ (zjednodušující předpoklad). Tímto byly získány odběrové diagramy pro konkrétní odběrná místa, ze kterých byla vždy určena dominantní fáze, nejvíce zatížená tak, aby právě na tuto fázi byla připojena výroba z FVE. Díky této metodice bude docíleno minimálních ztrát, neboť množství přenášené elektrické energie DS bude minimální, protože velká část spotřeby bude v ideálním případě pokryta právě z FVE.

Z Tab. 7-1 lze tedy pozorovat, že do uzlu c1 této distribuční soustavy je připojena spotřeba a výroba odpovídající rezidenční domácnosti 1, kde spotřeba na jednotlivých fázích je rozdělena dle výše zmíněného postupu a výroba FVE je v tomto případě připojena na všechny 3 fáze. Totéž platí pro uzel c2, kde je ovšem připojena výroba pouze na dominantní fázi L2, v uzlu c3 na L1 a v c4 na L3. Hodnota 3,7 (3,7 kW) odpovídá maximálnímu vyvedenému výkonu z FVE na jednu fázi dle PPDS. V posledním uzlu c5, který reprezentuje odběrné místo s agregovanou zátěží bez FVE, je zřejmé, že je zde pouze spotřeba elektrické energie. Data pro tento uzel byla převzata z webu OTE TDD 6 (operátor trhu s elektřinou) [28] pro shodné období s ostatními daty. Z tohoto zdroje byly pro jednotlivá období získány typové odběrové diagramy s hodinovým rozlišením, které bylo nutné pomocí lineární interpolační funkce s přidáním náhodného zašumění (pro reprezentaci reálných podmínek) interpolovat na 1440 hodnot, aby bylo možné získat 1minutové intervaly.

Tab. 7-1 Použité metodiky při rozložení vstupních dat do modelu DS varianty A

Použitá data	Data FVE	Uzel	Výroba			Spotřeba			Data spotřeby
			L1	L2	L3	L1	L2	L3	
duben 2016, leden 2017	Bez výroby	c1	0	0	0	Data z OTE TDD 6			
	Residential 3	c2	0	3,7	0	Dle výpočtu			Residential3
	Residential 4	c3	3,7	0	0	Dle výpočtu			Residential4
	Residential 6	c4	0	0	3,7	Dle výpočtu			Residential6
	Residential 1	c5	3,7	3,7	3,7	Dle výpočtu			Residential1

Tab. 7-2 Použité metodiky při rozložení vstupních dat do modelu DS varianty B

Použitá data	Data FVE	Uzel	Výroba			Spotřeba			Data spotřeby
			L1	L2	L3	L1	L2	L3	
duben 2016, leden 2017	Residential 1	c1	3,7	3,7	3,7	Dle výpočtu			Residential1
	Residential 3	c2	0	3,7	0	Dle výpočtu			Residential3
	Residential 4	c3	3,7	0	0	Dle výpočtu			Residential4
	Residential 6	c4	0	0	3,7	Dle výpočtu			Residential6
	Bez výroby	c5	0	0	0	Data z OTE TDD 6			

7.2 Popis provedených simulací

Aby bylo možné vyhodnotit regulační schopnosti střídače zapojeného jako zdroj výroby elektrické energie do distribuční sítě, bylo nutné provést několik typů simulací uvedených v Tab. 7-3. Z této tabulky lze vyčíst, že jednotlivé případy byly zkoumány pro dvě různá období během jednoho dne, a to pro duben 2016 a leden 2017. Duben 2016 reprezentuje období s velkou výrobou z FVE, a naopak leden období s minimální výrobou z FVE, jelikož slunečního záření bylo minimum.

Jako první byl zkoumán základní případ, kdy v jednotlivých uzlech sítě je pouze spotřeba elektrické energie. Dále zapojení s výrobou FVE ve všech uzlech, kromě již zmíněného uzlu s agregovanou zátěží varianty A a B. V této variantě byl implicitně nastaven jalový výkon střídače Q na nulu, což zabránilo projevení regulačních schopností FV střídačů, tj. střídače dodávaly pouze činný výkon. Nakonec byly zkoumány případy se zapojenou FVE, stejně jako v předchozím stavu, ovšem s regulací jalového výkonu Q , která byla prováděna třemi různými způsoby.

Za prvé (varianta V1) na základě Lineárního řízení s využitím P-Q diagramu na Obr. 4-1 Obr. 4-1 P-Q charakteristika střídače a Q-V droop řízení, kde Q_{max} byl stanoven jako

$$Q_{max} = \sqrt{1 - \left(\frac{P_{akt}}{S_{max}}\right)^2}, \quad (7.1)$$

kde S_{max} bylo stanoveno na 4000 VA.

Za druhé (varianta V2) stejný způsob jako výše, ale s využitím funkce dynamické saturace, která omezí rozsah Q_{max} dle regulované hodnoty Q , a nakonec regulace Q (varianta V3) vycházející z Obr. 4-2, který nám říká, že pokud je požadována dodávka nebo odběr Q měničem, musí s tím být dodáván nebo odebírán činný výkon P , jehož hodnota je dána mezemi účinníku, jak lze vidět z rov. (7.2) a (7.3).

Pokud $\cos\varphi \geq \cos\varphi_{krit}$ pak

$$Q_{max} = \sqrt{S_{max}^2 - P_{akt}^2} \quad (7.2)$$

kde $\cos\varphi_{krit} = 0,7$.

Pokud $\cos\varphi < \cos\varphi_{krit}$ pak

$$Q_{max} = P \cdot \sqrt{\frac{1}{\cos\varphi_{krit}^2} - 1}. \quad (7.3)$$

Nikdy nemůže být odebírán nebo dodáván plný činný výkon P a nulový jalový výkon Q. Pracovní oblast v diagramu P-Q je oproti předchozímu případu omezena hodnotou mezního účinníku. Účinník nabývá hodnot od 0 do 1, je dán poměrem činného a zdánlivého výkonu a udává, jak velkou část zdánlivého výkonu lze přeměnit na užitečnou energii – činný výkon. Pokud stanovený účinník nesplníme, měnič není schopen pracovat. K zamezení nadbytečných ztrát na vedení je právě nutné minimalizovat jalový výkon tak, aby se účinník blížil jedné.

Všechny tyto způsoby regulace Q mají za úkol korigování napěťového profilu. Pokud tedy nebude využito regulačních schopností FV střídačů, může dojít k vzrůstu hodnot napětí v DS. Určitým způsobem také ovlivňují činné ztráty na vedení, jak je možné vidět dále.

Tab. 7-3 Tabulka provedených simulací

Číslo simulace	Varianta	Období
1	Bez FVE – Bez výroby FVE ve všech uzlech	duben 2016 – pracovní den
2	Bez FVE – Bez výroby FVE ve všech uzlech	leden 2017 – pracovní den
3	FVE – S výrobou FVE ve všech uzlech, kde implicitně nastaveno $Q = 0$	duben 2016 – pracovní den
4	FVE – S výrobou FVE ve všech uzlech, kde implicitně nastaveno $Q = 0$	leden 2017 – pracovní den
5	V1 – S výrobou FVE ve všech uzlech, kde regulace Q probíhá na základě P-Q diagramu (pracovní oblast neomezená $\cos\varphi$)	duben 2016 – pracovní den
6	V2 – S výrobou FVE ve všech uzlech, kde regulace Q probíhá na základě funkce dynamické saturace	duben 2016 – pracovní den
7	V3 – S výrobou FVE ve všech uzlech, kde regulace Q probíhá na základě P-Q diagramu (pracovní oblast omezená $\cos\varphi$)	duben 2016 – pracovní den
8	V1 – S výrobou FVE ve všech uzlech, kde regulace Q probíhá na základě P-Q diagramu (pracovní oblast neomezená $\cos\varphi$)	leden 2017 – pracovní den
9	V2 – S výrobou FVE ve všech uzlech, kde regulace Q probíhá na základě funkce dynamické saturace	leden 2017 – pracovní den
10	V3 – S výrobou FVE ve všech uzlech, kde regulace Q probíhá na základě P-Q diagramu (pracovní oblast omezená $\cos\varphi$)	leden 2017 – pracovní den

7.3 Vyhodnocení provedených simulací

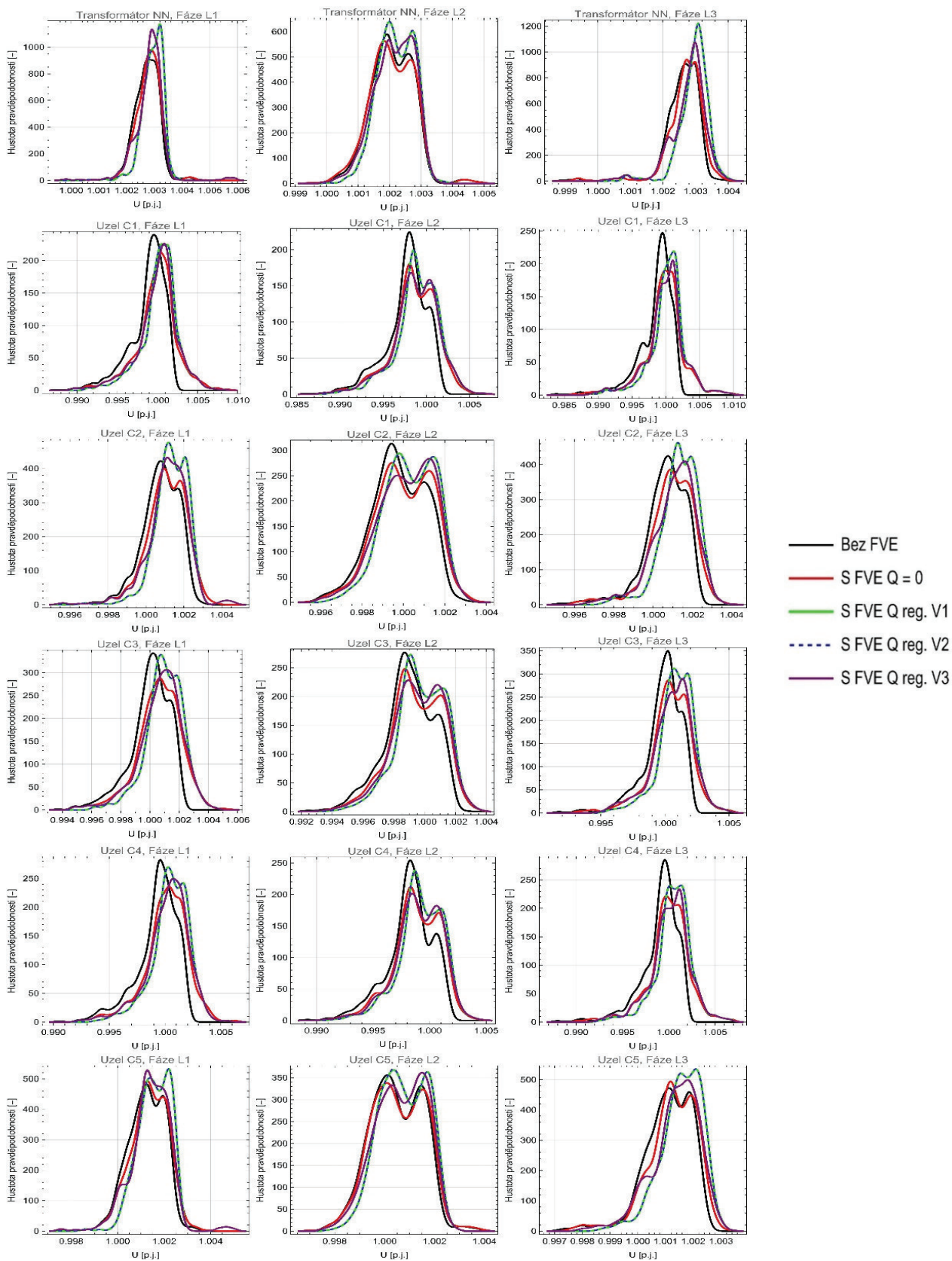
V této kapitole je popsáno vyhodnocení uvedených případů simulací z pohledu tvarů statistik napětí a ztrát.

1. Z pohledu tvarů statistik napětí

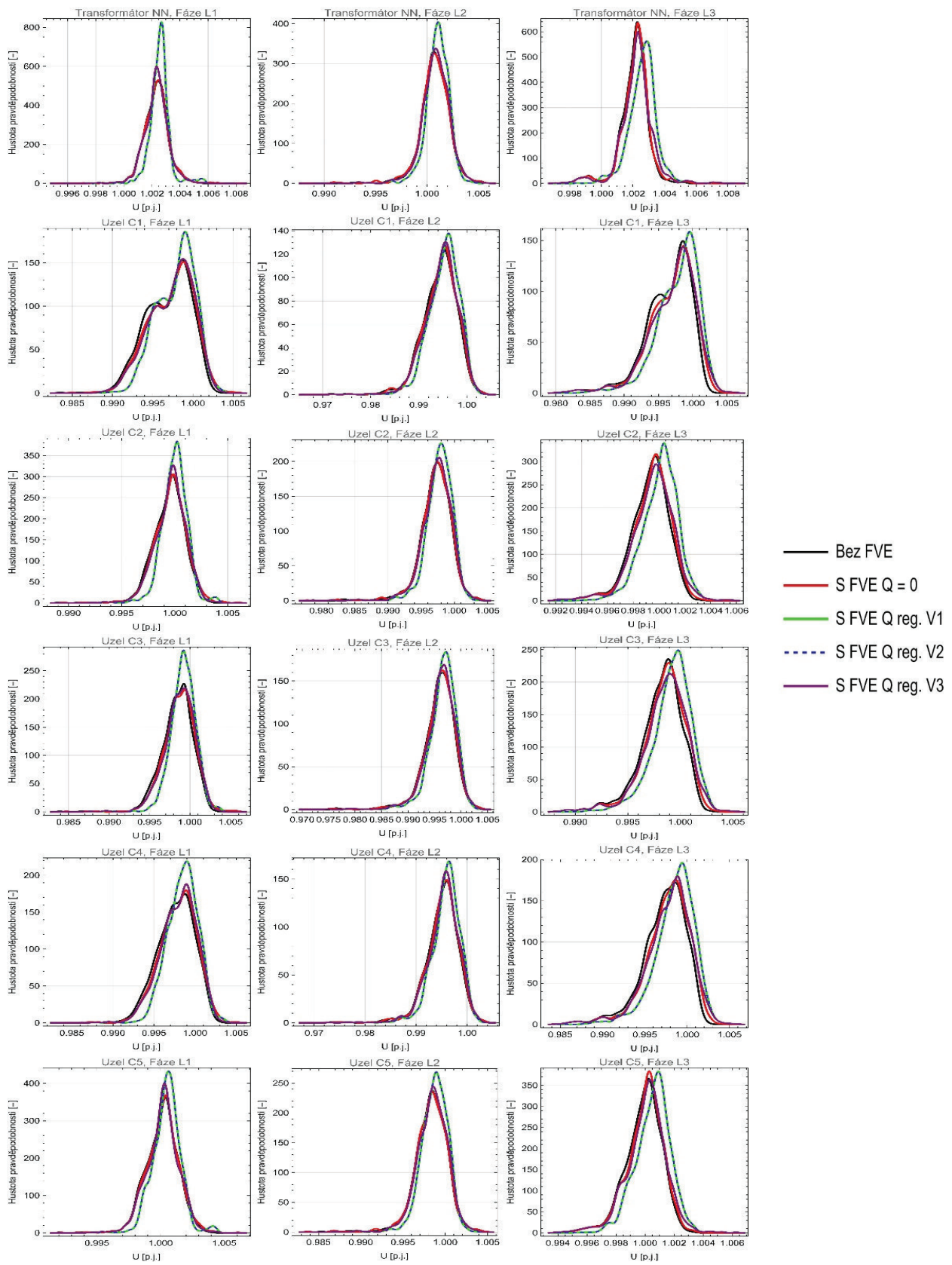
Na obrázcích níže lze vidět tvary statistik napětí rozdělené na varianty A, B (agregovaná zátěž na začátku, agregovaná zátěž na konci vedení) pro období dubna a ledna, kde jsou pro každý tento případ zobrazeny tvary statistik napětí každého uzle DS s jednotlivými druhy simulací.

Na základě těchto sestrojených grafů si lze nejvýraznějších změn všimnout na fázi L1, na které byl největší instalovaný výkon ze všech ostatních fází. Konkrétně v případě dubnové varianty B. Pomocí dorovnání referenční hodnoty napětí na 1 p.j. (230 V) je v tomto případě nejvýraznější u způsobu regulace V3, kde je pracovní oblast střídače omezená, kromě jiného, účínkem. Dále je zřejmé, že pro případ bez FVE a variantu B je průběh napětí posunut směrem doleva, což naznačuje dosažení nejnižší hodnoty napětí na konci vedení.

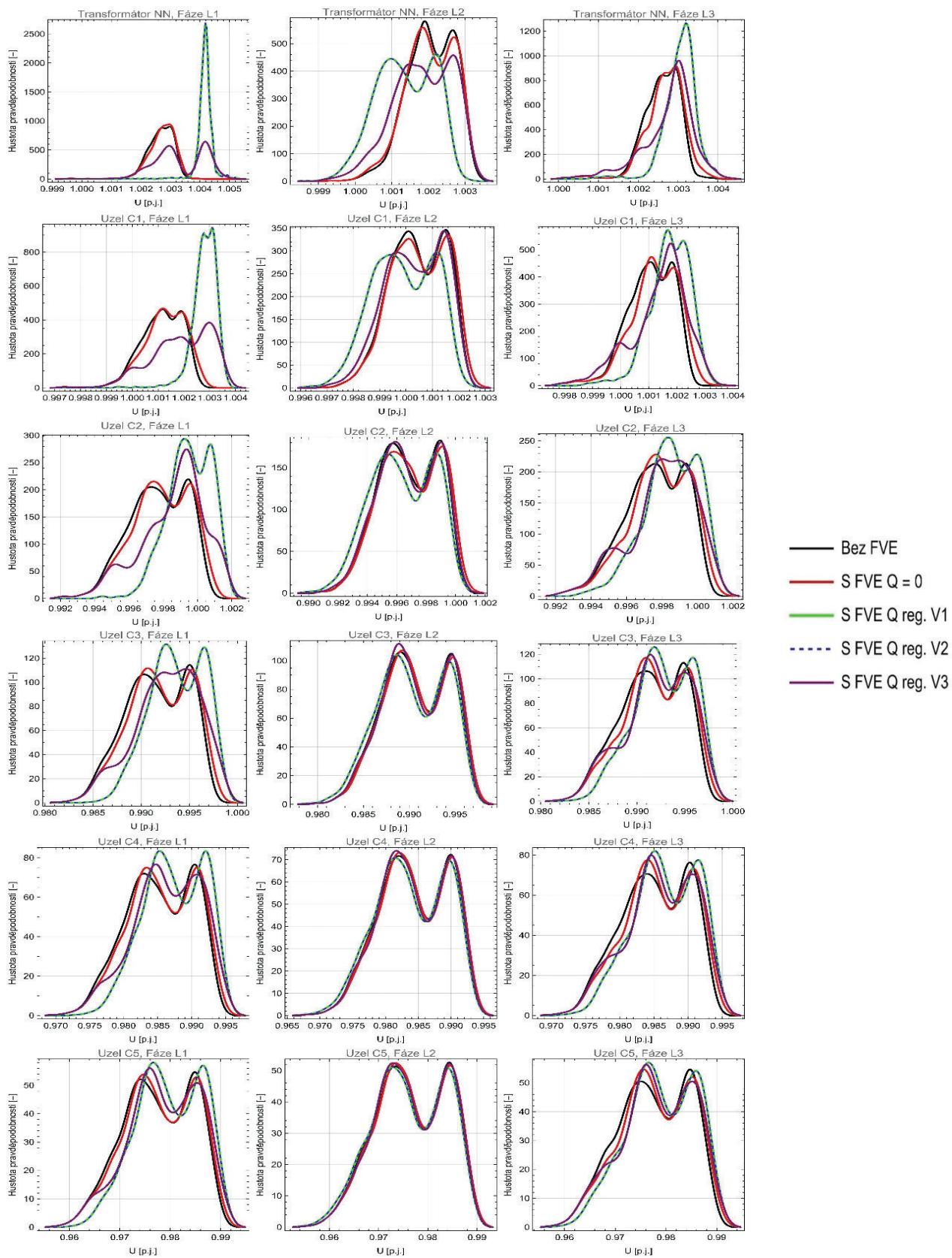
Na níže uvedených tvarech statistik napětí, kde probíhala regulace jalového výkonu Q, lze pozorovat, že regulace V3 se nejvíce ze všech ostatních možností posouvá k 1 p.j., jelikož má Q hodně omezené a dokáže působit pouze tehdy, když je tam současně nějaký činný výkon P, jak je popsáno výše. Regulace měničem V1, V2 mají širší diagram P-Q (není omezen mezním účínkem) a napětí je tak schopno dosahovat mnohem užších intervalů napětí (pásem). V případě měkčí a delší sítě by se tato schopnost projevila daleko více.



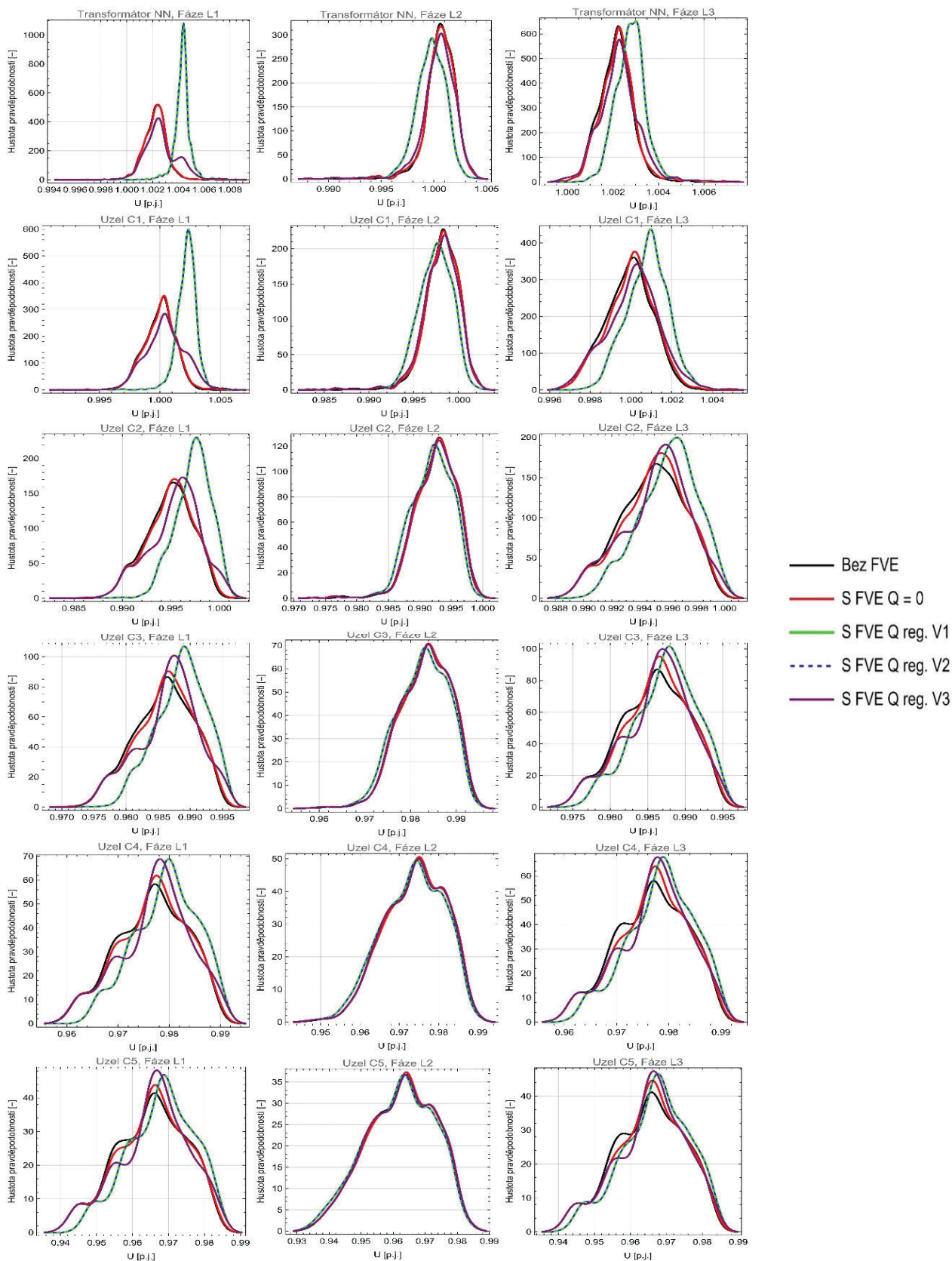
Obr. 7-1 Dubnové statistiky napětí s agregovanou zátěží na začátku vedení



Obr. 7-2 Lednové statistiky napětí s agregovanou zátěží na začátku vedení



Obr. 7-3 Dubnové statistiky napětí s agregovanou zátěží na konci vedení



Obr. 7-4 Lednové statistiky napětí s agregovanou zátěží na konci vedení

2. Z pohledu ztrát

Porovnání mezi jednotlivými případy je provedeno na základě absolutní energie ztrát, které lze vidět v Tab. 7-4. Varianta A má koncentrovaný odběr na začátku vedení a varianta B na konci vedení. Celková energie ztrát (celkové ztráty) v kWh je rovna rozdílu celkové dodané energie do rozvodu přes distribuční transformátor a součtu energií spotřeb v jednotlivých uzlech. Celkovou energii ztrát bereme jako součet za všechny 3 fáze.

Z provedeného srovnání lze prohlásit, že se zapojením FVE se ztráty snížily oproti referenčnímu případu bez FVE. Dále je navíc patrné, že s možností regulace Q se ztráty snížily ještě o něco více, ovšem u případu V1, V2 na úkor regulace během nočních hodin, kdy střídač nedodává (činný výkon je nulový). Nejmenších ztrát je dosaženo u varianty A typu V2 v dubnu, a naopak největších u varianty B typu bez FVE v lednu.

Tab. 7-4 Porovnání celkových ztrát mezi jednotlivými případy

	Období	02.01.2017		07.04.2016	
	Varianta	Celkové ztráty (kWh)	Rozdíl (%)	Celkové ztráty (kWh)	Rozdíl (%)
Varianta A	Bez FVE	2,29	0,00	1,10	0,00
	FVE	2,20	-3,95	0,97	-11,84
	V1	2,12	-7,42	0,93	-15,25
	V2	2,12	-7,43	0,93	-15,24
	V3	2,17	-5,01	0,95	-13,52
Varianta B	Bez FVE	31,20	0,00	14,24	0,00
	FVE	30,91	-0,93	13,95	-2,05
	V1	29,91	-4,13	13,50	-5,18
	V2	29,91	-4,14	13,50	-5,19
	V3	30,72	-1,54	13,78	-3,25

8 Závěr

S rostoucí penetrací obnovitelných zdrojů energie, a tedy i fotovoltaických elektráren, se budeme častěji setkávat s problémy v distribuční soustavě, které vznikají zejména díky nepředvídatelnosti výroby těchto zdrojů, a bude je nutno řešit. Tato práce se zabývá analýzou regulačních funkcí střídačů malých (bezlicenčních) FVE připojených do distribuční sítě nízkého napětí. První část této práce je zaměřena na teoretické znalosti, s důrazem na princip fungování běžné fotovoltaické elektrárny připojené do distribuční sítě nízkého napětí a problematiku okolo fotovoltaických střídačů. Zejména na jejich rozdělení ať už z pohledu druhu aplikace, počtu fází nebo způsobu zapojení ve fotovoltaické elektrárně. Dále jsou zmíněny dopady fotovoltaických střídačů na distribuční soustavu a jejich způsoby řízení, které mají úkol podpory sítě, především dorovnávat napětí a snižovat ztráty. Poslední významný úsek teoretické části řeší legislativní požadavky na připojení nových výroben elektrické energie typu A1, A2 a v krátkosti se zabývá situací spojenou s kvalitou elektrické energie na vedení.

Další části jsou pojaty prakticky a zabývají se popisem a podrobnostmi okolo vytvořeného modelu distribuční sítě s připojenými fotovoltaiky. První část je zaměřena na vysvětlení použitých bloků modelu a využitých zjednodušujících předpokladů. Například bylo popsáno, čím byla nahrazena nadřazená soustava vysokého napětí a jaký typ distribučního transformátoru byl použit. Výpočet parametrů distribučního transformátoru je uveden v příloze B této práce. V druhé části je vytvořena případová studie, v které jsou popsány provedené simulace, metodika zpracování vstupních dat a jsou uvedeny závěrečné výsledky.

V praktické části bylo zjištěno, že provoz fotovoltaické elektrárny má některé negativní vlivy na provoz a stabilitu distribuční soustavy, jmenovitě pak na napěťové profily v síti a ztráty na vedení. Proto je nutné využití regulačních schopností střídačů, na které byla tato práce zaměřena, jelikož jsou schopné zlepšit napěťové profily a snížit ztráty. Je třeba si také uvědomit, že uvedené typy regulací mají zásadní dopad na účinek samotných regulací. Například v případě varianty, kde je pracovní oblast střídače vymezená navíc účinníkem (varianta V3), se regulační schopnosti výrazně snižují, neboť není možné dodávat jalový výkon při nulovém výkonu činném (především v noci), kdy může dojít k poklesu nebo nárůstu napětí vlivem připojení/odpojení zátěže.

Do budoucna by tato práce mohla být rozšířena o provedení s rozsáhlejší distribuční sítí (více uzlovou) a s připojenými fotovoltaikami větších výkonů, jelikož nedávná novela energetického zákona umožnila navýšení instalovaného výkonu fotovoltaické elektrárny z původních 10 kW na 50 kW.

9 Reference

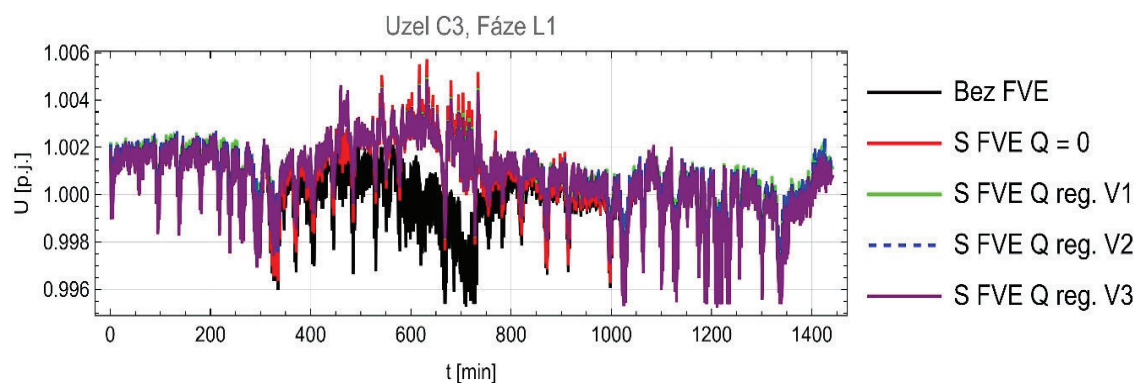
- [1] „Zákon č.458/2000 Sb. Zákon o podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon)". [Online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-458>
- [2] „Poslanci podpořili instalaci 50 kWp fotovoltaiky bez licence a rychlejší výstavbu OZE v roce 2023", TZB-info. Viděno: 19. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/24747-poslanci-podporili-instalaci-50-kwp-fotovoltaiky-bez-licence-a-rychlejsi-vystavbu-oze-v-roce-2023>
- [3] P. Mastný, *Obnovitelné zdroje elektrické energie*, Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011.
- [4] „Elektroenergetika - přednáška 04 - Výroba, přenos a rozvod elektrické energie",
- [5] „FOTOVOLTAIKA | Specializovaný prodejce solárních systémů STORION SMILE - All-in-one řešení fotovoltaických elektráren.", fvesystemy.cz. Viděno: 17. březen 2024. [Online]. Dostupné z: https://www.fvesystemy.cz/Terminologie-a5_0.htm
- [6] P. com s.r.o, „Hybridní měniče", FVE-MP. Viděno: 17. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.fve-mp.cz/eshop/hybridni-10010>
- [7] „Autonomní FVE systémy", Praha, 2023. [Online]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/452300/mod_resource/content/0/B1M13ASS-05%20Autonomni%20FV%20systemy%2C%20sledovac%20MPP%202023-10-23.pdf
- [8] „Pravidla provozování distribučních soustav". Provozovatelé distribučních soustav. [Online]. Dostupné z: https://www.egd.cz/sites/default/files/2022-09/priloha_4_pravidla_pro_paralelni_provoz_vyroben_a_akumulacnich_zarizeni_09_2022.pdf
- [9] J. Drápela, „Optimalizace a simulace provozu bezlicenční fotovoltaické elektrárny v podmínkách ČR", Diplomová práce, ČVUT, Praha, 2021. [Online]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/95266/F3-DP-2021-Drapela-Jan-Optimalizace_a_simulace_provozu_bezlicencni_fotovoltaicke_elektrarny_v_podminkach_CR.pdf?sequence=-1&isAllowed=y
- [10] „vykonova-elektronika-Cerovsky-Pavelka.pdf". Viděno: 17. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <http://cvut.falconis.cz/semestr-4/ve1/vykonova-elektronika-Cerovsky-Pavelka.pdf>
- [11] P. com s.r.o, „Hybridní 3f měnič GoodWe GW5K-ET Plus", FVE-MP. Viděno: 17. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.fve-mp.cz/eshop/p/goodwe-gw5k-et-plus-0-266>
- [12] „Deye SUN-5K nízkonapěťový 3-fázový hybridní měnič/střídač - SolarEco.cz". Viděno: 17. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://eshop.solareco.cz/home/1115-deye-sun-5kw-3-fazovy-hybridni-menic-stridac.html>
- [13] „Třífázový měnič napětí Solax X3-MIC-5K-G2 WiFi 3.0 | ECOprodukt". Viděno: 17. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://ecoprodukt.cz/p/87773-trojfazovy-menic-napatia-solax-x3-mic-5k-g2-40800>
- [14] „Fronius Symo GEN24 5.0 Plus". Viděno: 17. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/solarni-energie/instalacni-firmy-a-partneri/technicke-udaje/vsechny-vyrobyk/stridac/fronius-symo-gen24-plus/fronius-symo-gen24-5-0-plus>
- [15] „Maximum power point tracking", *Wikipedie*. 12. březen 2024. Viděno: 17. březen 2024. [Online]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Maximum_power_point_tracking&oldid=1213327889
- [16] „i4wifi.cz | GridFree - Často kladené otázky (FAQ) - Různé časté dotazy". Viděno: 17. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.i4wifi.cz/cs/stranky/120-gridfree-faq-ruzne>
- [17] „Islanding", *Wikipedie*. 27. červenec 2023. Viděno: 17. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Islanding&oldid=1167399746>

- [18] „IEC 61850-7-420:2021 | Internetový obchod IEC | LVDC (LVDC)". Viděno: 17. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://webstore.iec.ch/publication/34384>
- [19] D. L. Bassett, „Update of the status of IEEE 1547.8, expanding on IEEE Standard 1547", in *PES T&D 2012*, kvě. 2012, s. 1–3. doi: 10.1109/TDC.2012.6281453.
- [20] S. Nowak, M. S. Metcalfe, W. Eberle, a L. Wang, „Comparison of voltage control methods in distribution systems using Q-V based PI and droop controls of solar inverters", in *2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Chicago, IL: IEEE, čvc. 2017, s. 1–5. doi: 10.1109/PESGM.2017.8273969.
- [21] eStudio.cz, „ČSN EN 50438 ED.2 (330127)". Viděno: 17. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-50438-ed-2-330127-179978.html#>
- [22] „NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2016/ 631 - ze dne 14. dubna 2016, - kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě".
- [23] A. C.- info@aion.cz, „16/2016 Sb. Vyhláška o podmínkách připojení k elektrizační soustavě", *Zákony pro lidi*. Viděno: 17. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-16>
- [24] A. C.- info@aion.cz, „499/2006 Sb. Vyhláška o dokumentaci staveb", *Zákony pro lidi*. Viděno: 17. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-499>
- [25] „ČSN EN 50160 : mojeEnergie". Viděno: 17. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.mojeenergie.cz/cz/csn-en-50160>
- [26] „PNE 33 3430:2009 : mojeEnergie". Viděno: 17. březen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.mojeenergie.cz/cz/pne-33-3430-2009>
- [27] „Datová platforma – Open Power System Data". Viděno: 4. květen 2024. [Online]. Dostupné z: https://data.open-power-system-data.org/household_data/
- [28] „Normalizované TDD", OTE, a.s. Viděno: 15. květen 2024. [Online]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/typove-diagramy-dodavek-elektriny/normalizovane-tdd>

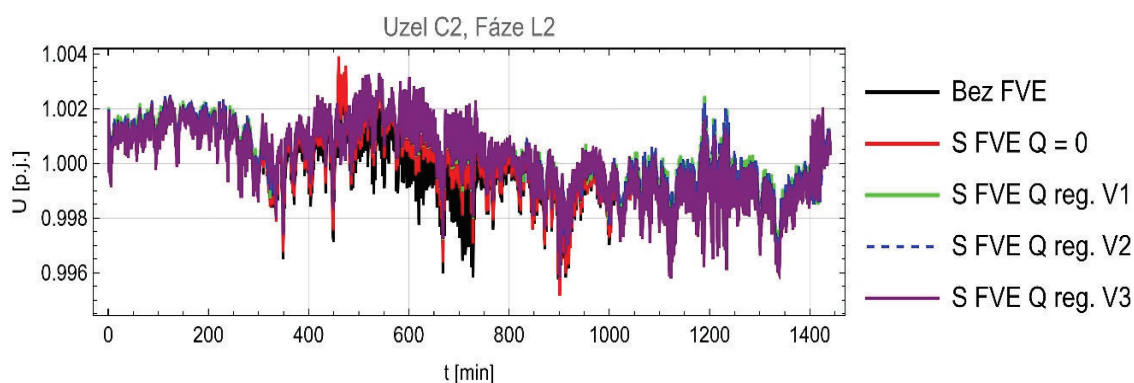
Seznam příloh

10 Příloha A – Vybrané průběhy napět'ových profilů

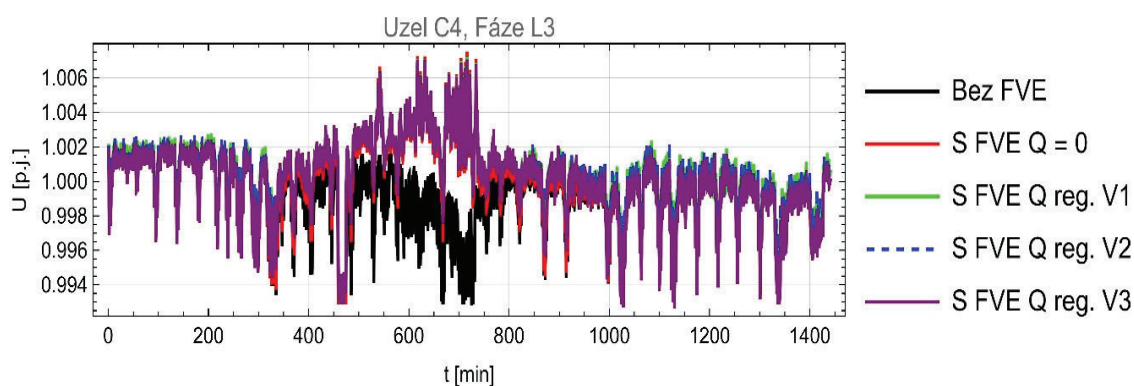
10.1 Varianty A – 07.04.2016



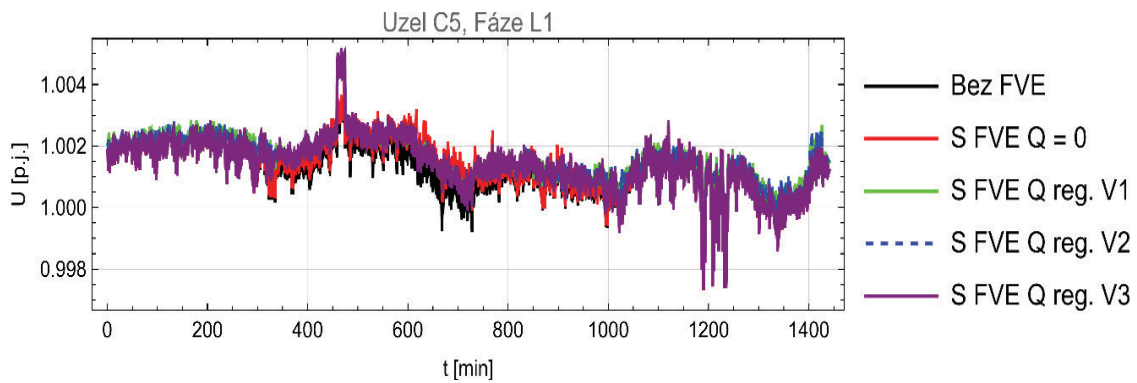
Obr. 10-1 Časové průběhy napětí varianty A – 07.04.2016



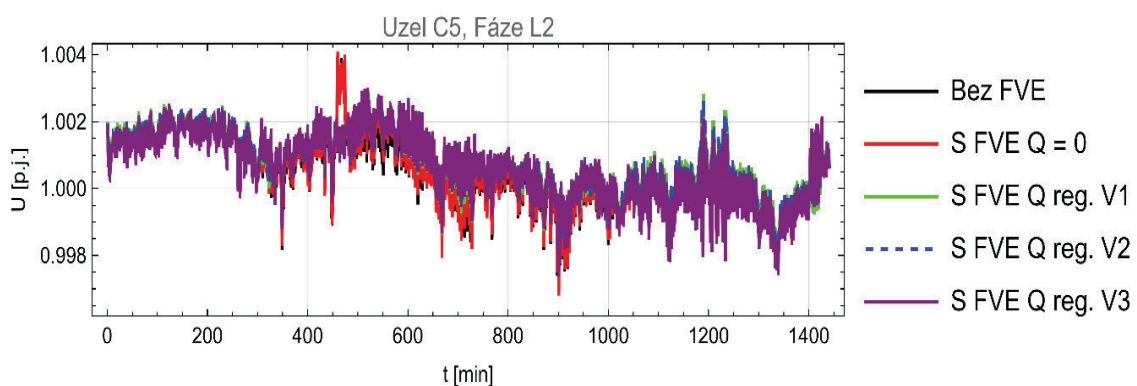
Obr. 10-2 Časové průběhy napětí varianty A – 07.04.2016



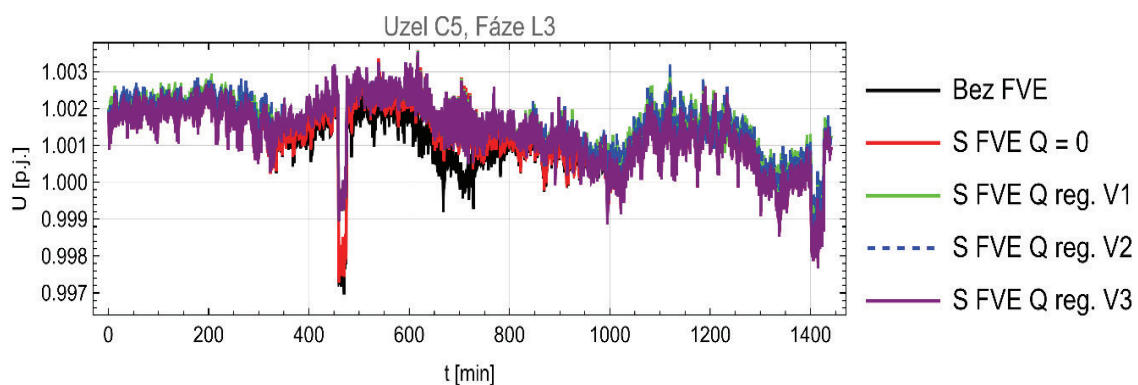
Obr. 10-3 Časové průběhy napětí varianty A – 07.04.2016



Obr. 10-4 Časové průběhy napětí varianty A – 07.04.2016

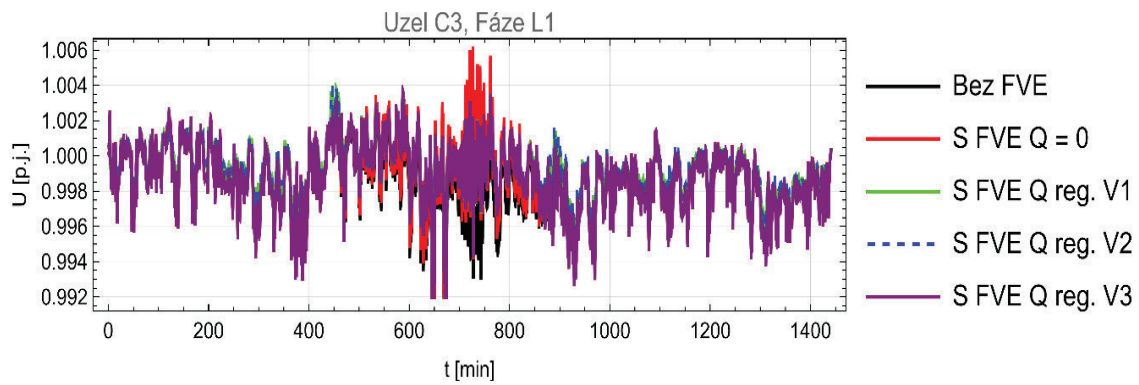


Obr. 10-5 Časové průběhy napětí varianty A – 07.04.2016

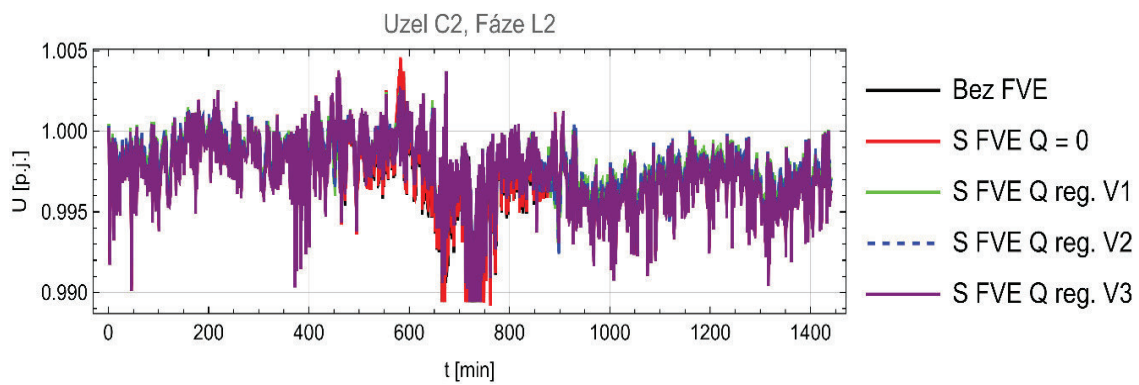


Obr. 10-6 Časové průběhy napětí varianty A – 07.04.2016

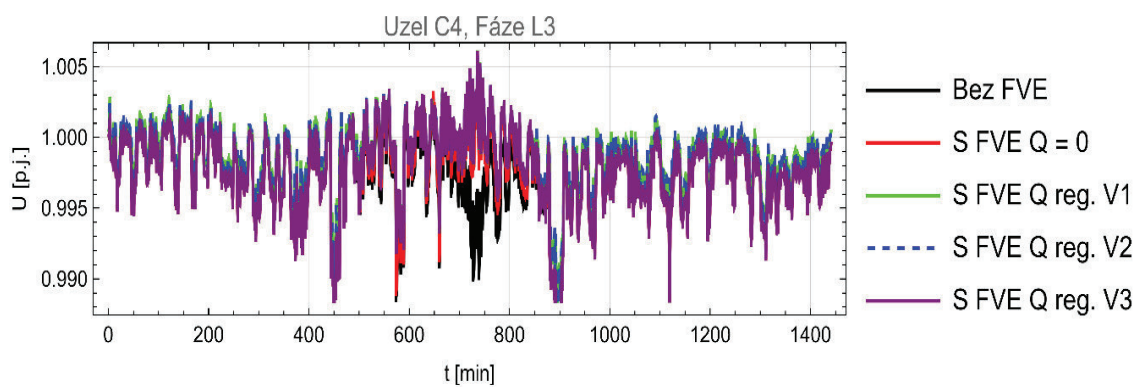
10.2 Varianty A – 02.01.2017



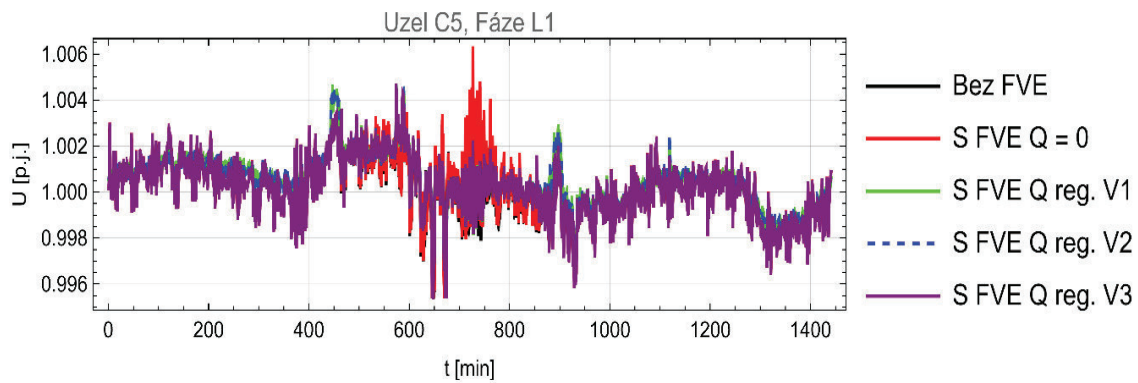
Obr. 10-7 Časové průběhy napětí varianty A – 02.01.2017



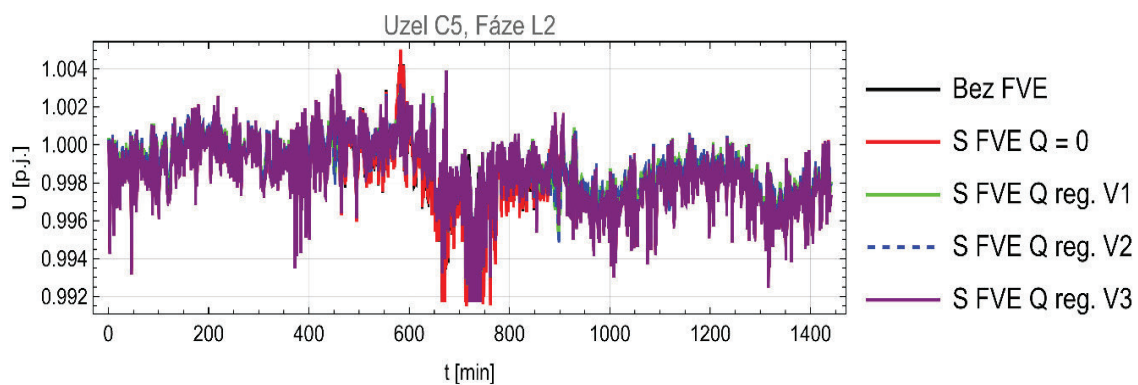
Obr. 10-8 Časové průběhy napětí varianty A – 02.01.2017



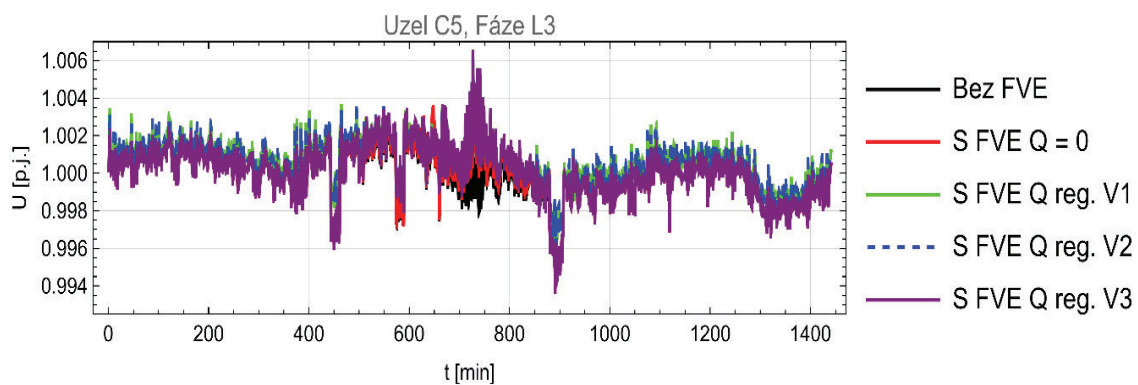
Obr. 10-9 Časové průběhy napětí varianty A – 02.01.2017



Obr. 10-10 Časové průběhy napětí varianty A – 02.01.2017

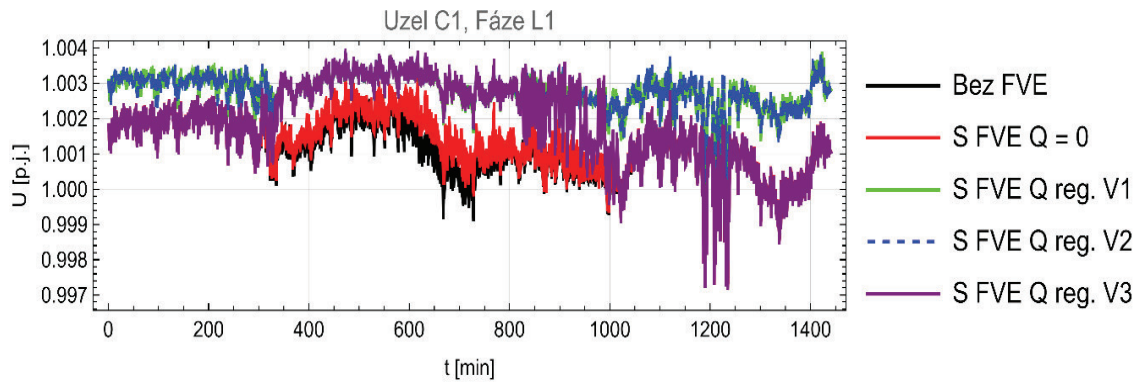


Obr. 10-11 Časové průběhy napětí varianty A – 02.01.2017

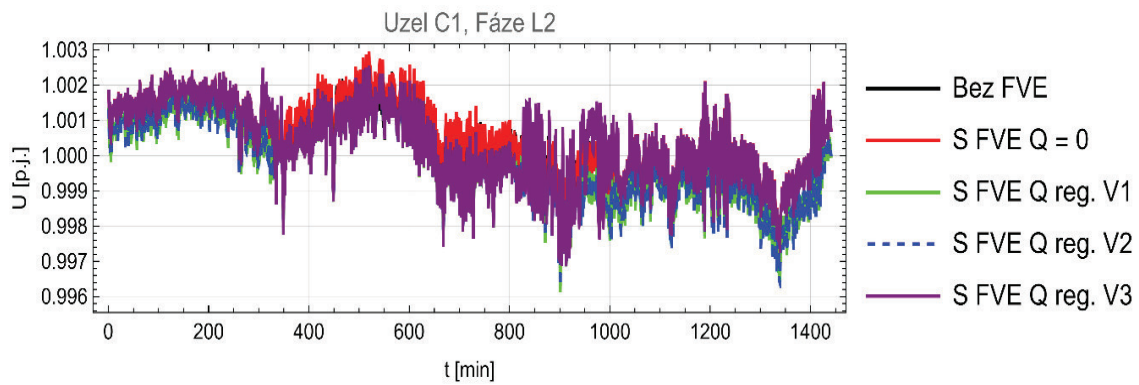


Obr. 10-12 Časové průběhy napětí varianty A – 02.01.2017

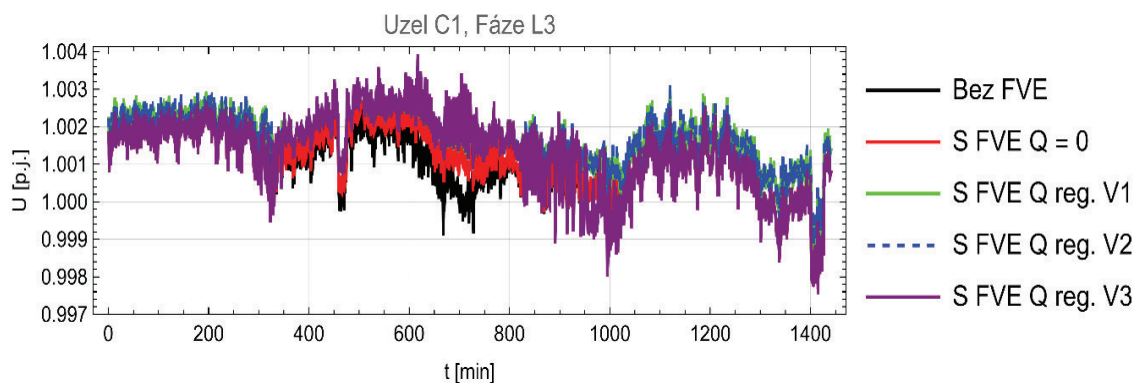
10.3 Varianty B – 07.04.2016



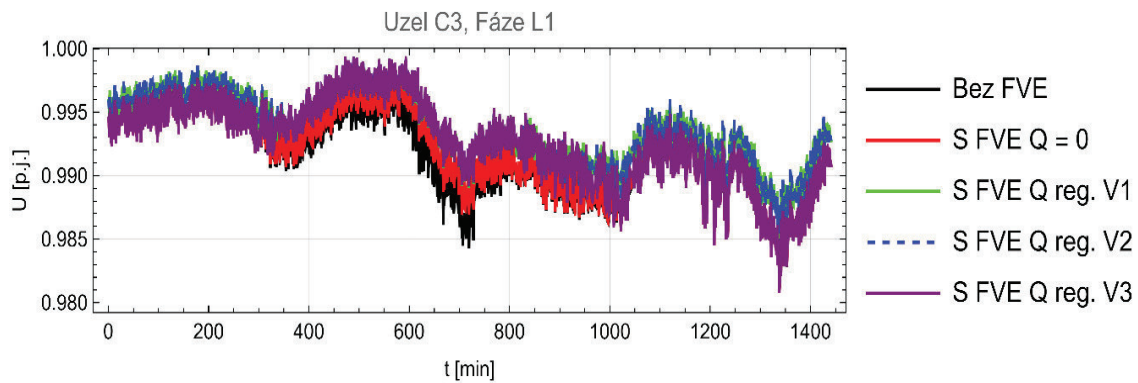
Obr. 10-13 Časové průběhy napětí varianty B – 07.04.2016



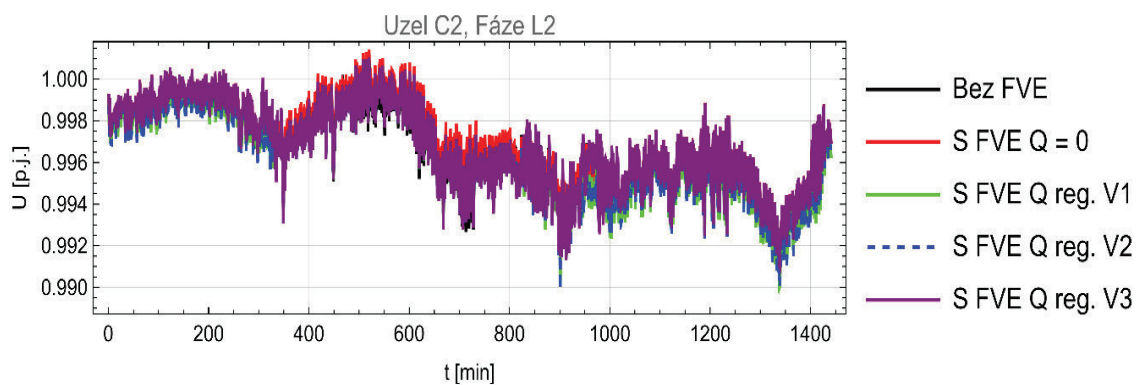
Obr. 10-14 Časové průběhy napětí varianty B – 07.04.2016



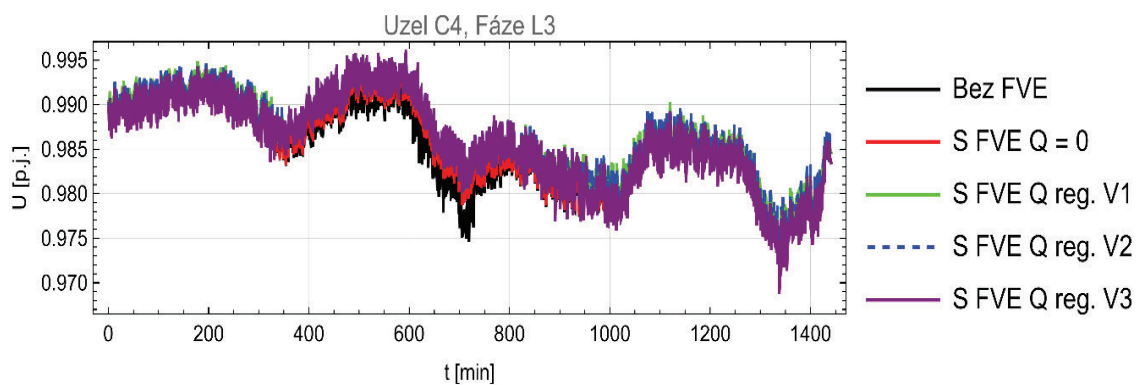
Obr. 10-15 Časové průběhy napětí varianty B – 07.04.2016



Obr. 10-16 Časové průběhy napětí varianty B – 07.04.2016

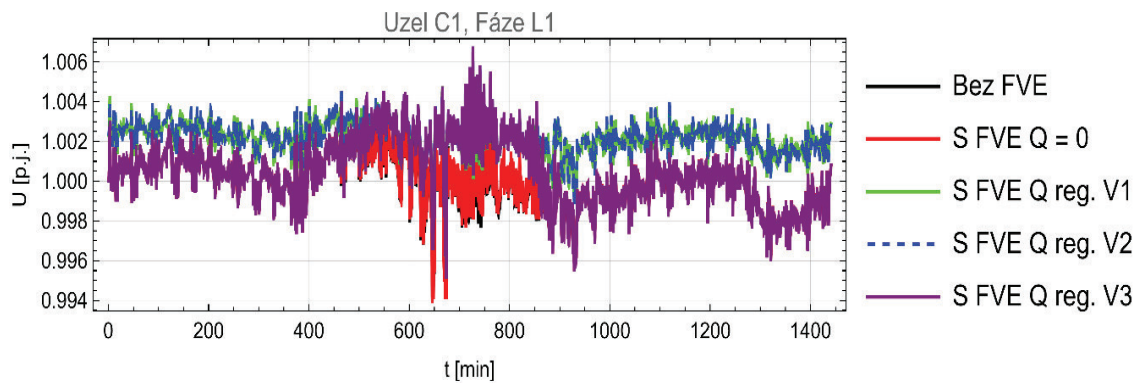


Obr. 10-17 Časové průběhy napětí varianty B – 07.04.2016

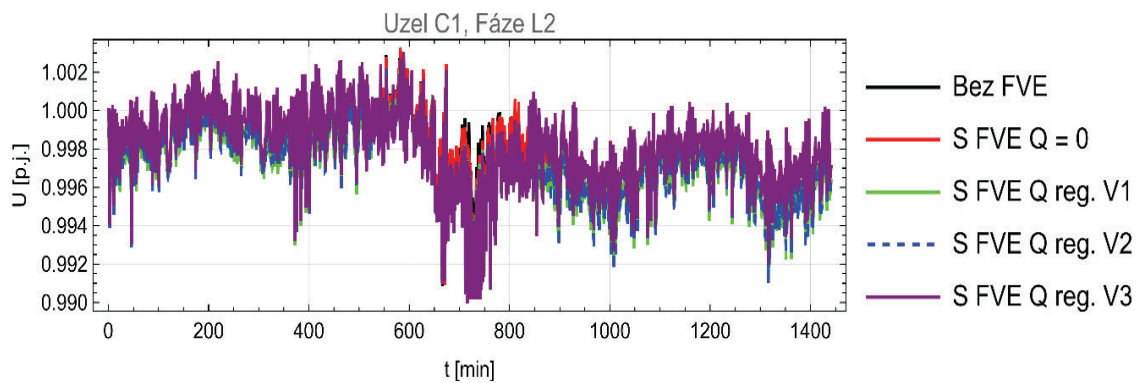


Obr. 10-18 Časové průběhy napětí varianty B – 07.04.2016

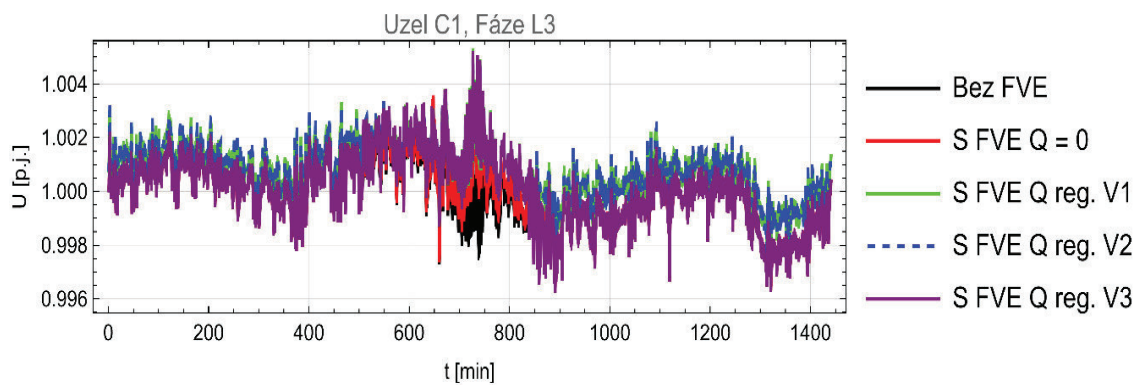
10.4 Varianty B – 02.01.2017



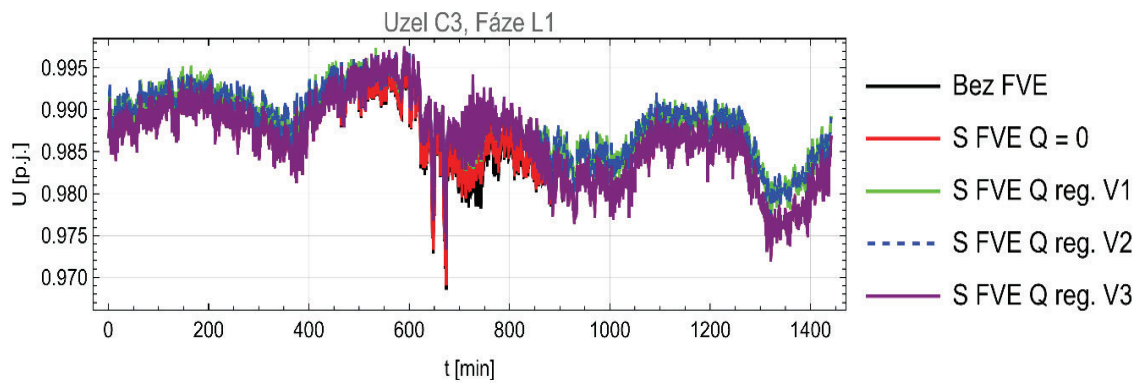
Obr. 10-19 Časové průběhy napětí varianty B – 02.01.2017



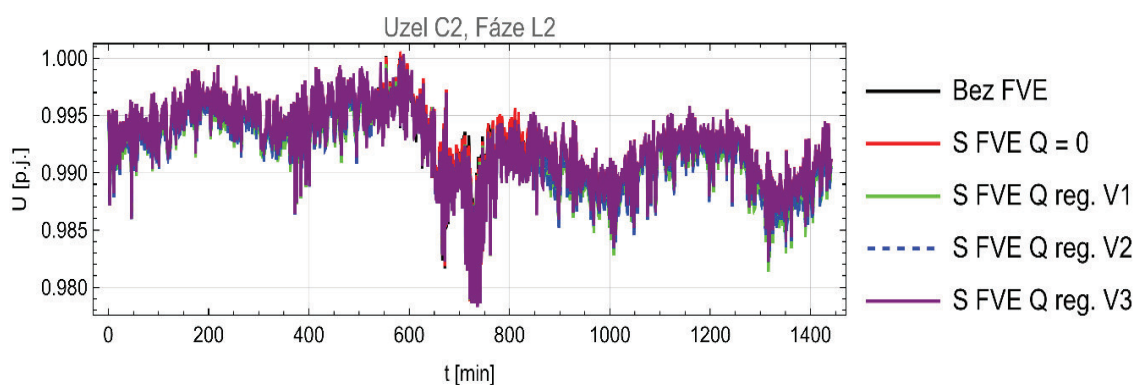
Obr. 10-20 Časové průběhy napětí varianty B – 02.01.2017



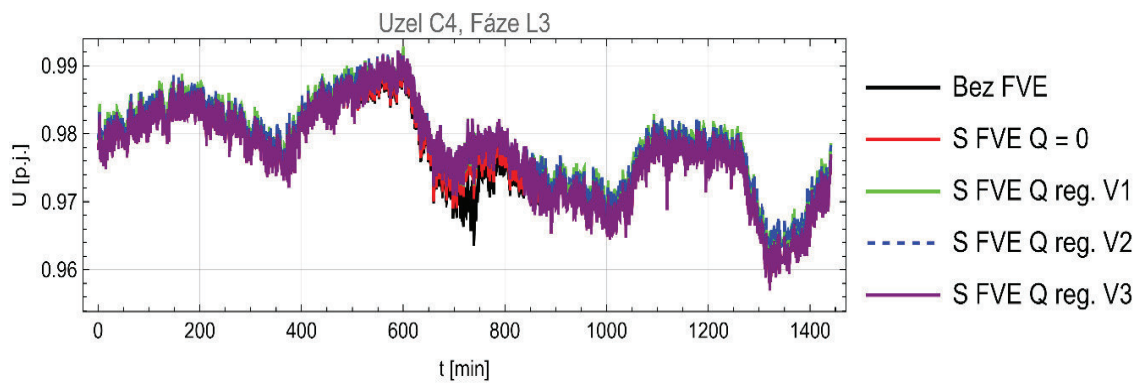
Obr. 10-21 Časové průběhy napětí varianty B – 02.01.2017



Obr. 10-22 Časové průběhy napětí varianty B – 02.01.2017



Obr. 10-23 Časové průběhy napětí varianty B – 02.01.2017



Obr. 10-24 Časové průběhy napětí varianty B – 02.01.2017

11 Příloha B – Výpočet parametrů 3fázového distribučního transformátoru

Uvedené výpočty jsou odvozené za zjednodušených předpokladů. Při výpočtu parametrů odvozených z měření transformátoru naprázdno zanedbáváme proud větve sekundárního vinutí. Transformátorem poté protéká proud naprázdno I_0 . U výpočtů odvozených ze zapojení transformátoru nakrátko zanedbáváme příčnou větev, jelikož jí teče zanedbatelně malý proud a transformátorem tak protéká proud nakrátko I_k .

Tab. 11-1 Šítkové hodnoty transformátoru (p.j. = poměrná jednotka)

	Označení	Jednotka	Hodnota	Označení Matlab	
Šítkové hodnoty	f_n	Hz	50	f_n (Hz)	jmenovitá frekvence
	U_{n1}	V	22000	V1 Ph-Ph (Vrms)	jmenovité sdružené napětí primáru
	U_{n2}	V	420	V2 Ph-Ph (Vrms)	jmenovité sdružené napětí sekundáru
	S_n	VA	400000	P_n (VA)	jmenovitý výkon
	u_k	p.j.	0,06		napětí nakrátko
	i_0	p.j.	0,002		proud naprázdno
	p_k	W	3850		zkratový výkon
	p_0	W	430		výkon naprázdno

Výpočet parametrů podélné větve

$$r = \frac{P_k}{S_n} = \frac{3850}{400000} = 9,63 \cdot 10^{-3} [pu] \quad (11.1)$$

$$r_1 = \frac{r}{2} [pu] \quad (11.2)$$

$$r_2 = \frac{r}{2} [pu] \quad (11.3)$$

Odpor primárního vinutí

$$R_1 = \frac{r_1 \cdot U_{n1}^2}{S_n} [\Omega] \quad (11.4)$$

Odpor sekundárního vinutí

$$R_2 = \frac{r_2 \cdot U_{n2}^2}{S_n} [\Omega] \quad (11.5)$$

$$x = \sqrt{u_k^2 - r^2} [pu] \quad (11.6)$$

$$x_1 = \frac{x}{2} [pu] \quad (11.7)$$

$$x_2 = \frac{x}{2} [pu] \quad (11.8)$$

Rozptylová reaktance primárního vinutí

$$X_1 = \frac{x_1 \cdot U_{n1}^2}{S_n} [\Omega] \quad (11.9)$$

Rozptylová reaktance sekundárního vinutí

$$X_2 = \frac{x_2 \cdot U_{n2}^2}{S_n} [\Omega] \quad (11.10)$$

Rozptylová indukčnost primárního vinutí

$$L_1 = \frac{X_1}{2\pi f} [H] \quad (11.11)$$

Rozptylová indukčnost sekundárního vinutí

$$L_2 = \frac{X_2}{2\pi f} [H] \quad (11.12)$$

Výpočet parametrů příčné větve

Poměrná hodnota příčné vodivosti

$$g = \frac{P_0}{S_n} [pu] \quad (11.13)$$

Náhradní odpor příčné (magnetizační) větve v poměrných jednotkách

$$r_{Fe} = \frac{1}{g} [pu] \quad (11.14)$$

Odpor příčné (magnetizační) větve

$$R_{Fe} = \frac{r_{Fe} \cdot U_{n1}^2}{S_n} [\Omega] \quad (11.15)$$

Poměrná hodnota magnetizační susceptance

$$b = \sqrt{i_0^2 - g^2} [pu] \quad (11.16)$$

Reaktance příčné větve v poměrných jednotkách

$$x_\mu = \frac{1}{b} [pu] \quad (11.17)$$

Reaktance příčné větve

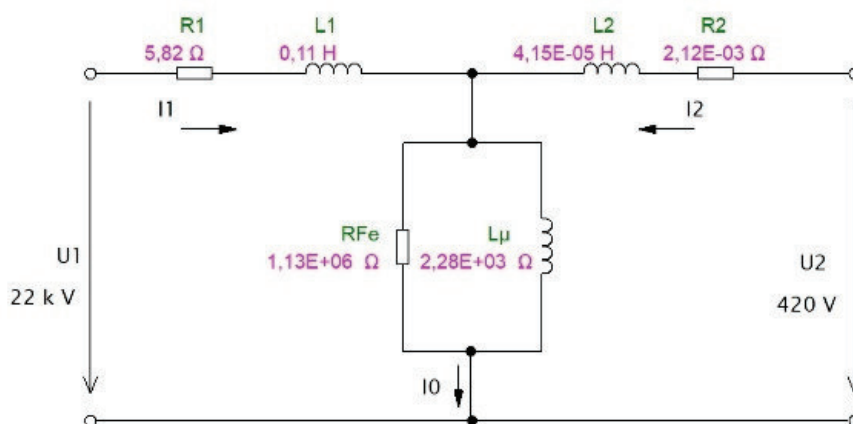
$$X_\mu = \frac{x_\mu \cdot U_{n1}^2}{S_n} [\Omega] \quad (11.18)$$

Indukčnost příčné (magnetizační) větve

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{2\pi f} [H] \quad (11.19)$$

Indukčnost magnetizační větve pro netočivou složku

$$L_0 = \frac{X_\mu}{2\pi f} [H] \quad (11.20)$$



Obr. 11-1 Náhradní schéma transformátoru s vypočtenými parametry

12 Příloha C – Vytvořený model distribuční sítě nízkého napětí s připojenými FVE

Viz Elektronická příloha.