

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vyhodnocení provozu fotovoltaické elektrárny s
akumulačním zařízením**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch SCHOLZ**
Osobní číslo: **E18N0062P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Vyhodnocení provozu fotovoltaické elektrárny s akumulacním zařízením**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování

1. Popište legislativní rámec využití zařízení pro akumulaci elektrické energie v distribučních sítích, možné způsoby jejich použití u distributora či zákazníka s ohledem na očekávaný rozvoj fotovoltaických elektráren (FVE) a akumulacních zařízení.
2. Popište způsoby zapojení a provozu FVE malých výkonů připojovaných do sítí nízkého napětí.
3. Zmapujete dostupné technologie akumulacních baterií využitelných ve FVE a popište pokročilé funkce střídačů fotovoltaických elektráren.
4. Vyhodnoťte provoz střešní FVE s hybridním střídačem a akumulací elektrické energie v bateriích, pracujících v režimu omezení přetoku do sítě, zaměřte se zejména na výkonové toky.
5. Posuďte vliv dané výroby na distribuční síť, do níž je připojena, z hlediska výkonových a napěťových poměrů.

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

Seznam doporučené literatury:

1. Pravidla provozování distribučních soustav, 2019

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



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

L.S.

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

Abstrakt

Diplomová práce se věnuje tématu fotovoltaických elektráren malého výkonu s akumulacním zařízením, které jsou připojeny do distribučních sítí nízkého napětí. Úvodní část práce se zaměřuje na legislativu a technické požadavky na výrobní, které musí pro připojení splňovat. Hlavní část práce se věnuje vyhodnocení provozu výrobní o výkonu 5,2 kWp s omezením přetoku do distribuční sítě NN na 2,6 kW. Na základě měření provedeném v kalendářním roce 2019 byly vyhodnocovány přetoky výkonu do sítě, účinnost baterie a změna její účinnosti v čase, dodržení regulačních charakteristik a normy ČSN EN 50 160, především dodržení odchylek napětí a limitů nesymetrie v síti. V závěru práce jsou analyzovány a posouzeny různé varianty nastavení regulační Q (U) charakteristiky výroben a jejich vliv na napěťový profil a ztráty v síti.

Klíčová slova

Fotovoltaická elektrárna, statistické vyhodnocení, akumulace, regulační charakteristika, přetoky výkonu, řízení výkonu

Abstract

The diploma thesis deals with the topic of low-power photovoltaic power plants with storage equipment, which are connected to low-voltage distribution networks. The first part of the work is focused on legislation and technical requirements for connectivity of generating plants. The main part of the work focuses on to the evaluation of the operation of a 5.2 kWp power plant which output is limited to 2.6 kW. Based on measurements performed in the calendar year 2019, power overflows into the network, battery efficiency and trend of its efficiency over time, compliance with regulation characteristics and the ČSN EN 50 160 standard were evaluated, especially compliance with limits of voltage variations and unbalance. Finally, various Q(U) characteristic setting of LV generating plants and their influence on the voltage profile and losses in the network are analysed and assessed.

Keywords

Photovoltaic power plant, statistical evaluation, accumulation, regulation characteristics, power overflows, power control

Prohlášení

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

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

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych velice rád poděkoval doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. za cenné rady z oblasti fotovoltaických elektráren a distribučních sítí, ale také za věnovaný čas a obsahovou korekci práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Janu Švecovi, Ph.D. ze společnosti ČEZ Distribuce za poskytnuté materiály pro vypracování a čas obětovaný konzultacím této problematiky.

Seznam symbolů a zkratek

BESS.....	Battery Energy Storage System (bateriový úložný systém)
DoD	Depth of discharge (hloubka vybití)
DS	Distribuční soustava
DT.....	Distribuční transformátor
ERU	Energetický regulační úřad
EZ	Energetický zákon
FV	Fotovoltaický, fotovoltaická
HDO	Hromadné dálkové ovládání
HE3DA.....	High Energy 3D Accumulator (vysokokapacitní 3D akumulátor)
LDS.....	Lokální distribuční soustava
MPP	Max Power Point (bod maximálního výkonu)
MPPT.....	Max Power Point Tracking (sledování bodu maximálního výkonu)
NN	Nízké napětí
OM.....	Odběrné místo
OP	Ostrovní provoz
OZ.....	Obnovitelný zdroj
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PDS.....	Provozovatel distribuční soustavy
PPDS.....	Pravidla pro provozování distribuční soustavy
PWM.....	Pulse Width Modulation (pulzně šířková modulace)
SoC	State of Charge (úroveň nabití)
TUV	Teplá užitková voda
VM.....	Výrobní modul
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
ZVN.....	Zvlášť vysoké napětí

Seznam obrázků

Obr. 3.1 – Princip fotovoltaického článku [6].....	17
Obr. 3.2 – Spektrum slunečního záření [6].....	19
Obr. 3.3 – VA charakteristika solárních panelů při různé intenzitě záření [9].....	22
Obr. 3.4 – Příklad odběru rodinného domu během víkendového dne (19. 10. 2019)	24
Obr. 4.1 – Požadavek na jalový výkon při jmenovitém napětí pro VM A1 podle [19]	28
Obr. 4.2 – Požadavek na jalový výkon při proměnném napětí a maximálním výkonu pro VM A [22]	28
Obr. 4.3 – Požadavek na jalový výkon při jmenovitém napětí pro VM A2, B a C podle [19]	29
Obr. 4.4 – Požadavek na jalový výkon při proměnném napětí pro VM B, C a D podle [19]	29
Obr. 4.5 – Požadavek na jalový výkon při $P < P_n$ pro nesynchronní VM B, C a D podle [19].....	30
Obr. 4.6 – Grafické znázornění doby provozu VM při podpětí podle [19].....	31
Obr. 4.7 – Omezení výkonu při nadpětí [23].....	32
Obr. 4.8 – Regulační charakteristika pro $Q(U)$ [23].....	34
Obr. 4.9 – Vliv připojení výroby na velikost napětí u odběratelů	35
Obr. 4.10 – Vliv výroby na velikost napětí v sousední odbočce	35
Obr. 5.1 – Způsoby zapojení výroben bez možnosti akumulace do sítě NN [19].....	38
Obr. 5.2 – Zapojení akumulčního zařízení do sítě NN [19]	39
Obr. 5.3 – Zapojení solárního systému s akumulací [27].....	40
Obr. 6.1 – Průběh měřených veličin v průběhu dvou dní.....	42
Obr. 6.2 – Graf trvání součtového výkonu elektroměru v průběhu roku 2019	43
Obr. 6.3 – Graf trvání součtového výkonu elektroměru v průběhu roku 2019 bez vlivu výroby	44
Obr. 6.4 – Graf trvání součtového výkonu elektroměru v průběhu roku 2019 bez akumulace	45
Obr. 6.5 – Průběh napětí jednotlivých fází 19. 5. 2019.....	46
Obr. 6.6 – Doba trvání hodnot napětí v průběhu roku 2019.....	47
Obr. 6.7 – Počet překročení napětí měřeného v desetiminutových intervalech	48
Obr. 6.8 – Schéma sítě s výrobou	49
Obr. 6.9 – Nesymetrie napětí v závislosti na vyráběné energii	50
Obr. 6.10 – Nesymetrie napětí v týdnech	51
Obr. 6.11 – $P(U)$ charakteristika výroby v roce 2019	52
Obr. 6.12 – Působení $Q(U)$ charakteristiky v roce 2019	53
Obr. 6.13 – Ztrátový výkon výroby v roce 2019	54
Obr. 6.14 – Vývoj účinnosti baterie	56
Obr. 7.1 – Umístění síťových analyzátorů	58
Obr. 7.2 – Napěťový profil pro zimní měření v roce 2019	59
Obr. 7.3 – Napěťový profil sítě pro letní měření v roce 2019.....	59

Obr. 7.4 – Měření 18. 7. 2019	60
Obr. 8.1 – Simulovaná síť se zakreslenými odběry	63
Obr. 8.2 – Průběh zatížení DTR v lednu 2019	64
Obr. 8.3 – Rozložení napětí podél napájecí větve při 85 % zatížení DTR.....	64
Obr. 8.4 – Průběh zatížení DTR v červenci 2019.....	65
Obr. 8.5 – Rozložení napětí podél napájecí větve při 5 % zatížení DTR s výrobou.....	66
Obr. 8.6 – Rozložení napětí podél napájecí větve při 5 % zatížení DTR s výrobou a Q (U)	67
Obr. 8.7 – Rozložení napětí ve fázi s výrobou podél napájecí větve při 5 % zatížení	68
Obr. 8.8 – Použitá síť pro simulaci vlivu Q (U) charakteristik	70
Obr. 8.9 – Q (U) charakteristika - varianta 1	71
Obr. 8.10 – Q (U) charakteristika - varianta 2.....	72
Obr. 8.11 – Q (U) charakteristika - varianta 4.....	74
Obr. 8.12 – Q (U) charakteristika - varianta 5.....	75
Obr. 8.13 – Rozložení napětí podél napájecí větve u jednotlivých variant	76
Obr. 11.1 – Požadavky na výrobný [19].....	82
Obr. 11.2 – Povolené hodnoty vyšších harmonických pro síť NN [19].....	83
Obr. 11.3 – Povolené hodnoty vyšších harmonických pro síť VN [19].....	83
Obr. 11.4 – Povolené hodnoty vyšších harmonických pro síť 110 kV [19].....	83

Seznam tabulek

Tab. 3.1 – Počet cyklů olověných baterií v závislosti na úrovni vybíjení [7]	21
Tab. 4.1 – Rozdělení výroben do kategorií podle výkonu [19].....	25
Tab. 4.2 – Rozsah provozních frekvencí [19]	26
Tab. 4.3 – Rozsah napětí pro výrobní pracující do VN [19]	27
Tab. 6.1 – Mezní hodnoty napětí v absolutních číslech	47
Tab. 8.1 – Iterační kroky pro výrobní V5 a V6	67
Tab. 8.2 – Porovnání ztrát v síti u simulovaných variant	68
Tab. 8.3 – Napětí v nejdálším bodě pro jednotlivé varianty	69
Tab. 8.4 – Hodnoty jednotlivých výroben - běžná Q (U).....	71
Tab. 8.5 – Vzdálenosti jednotlivých fiktivních výroben od DTR	72
Tab. 8.6 – Hodnoty jednotlivých výroben - varianta 1.....	72
Tab. 8.7 – Hodnoty jednotlivých výroben - varianta 2.....	73
Tab. 8.8 – Hodnoty jednotlivých výroben - varianta 3.....	73
Tab. 8.9 – Hodnoty jednotlivých výroben - varianta 4.....	74
Tab. 8.10 – Hodnoty jednotlivých výroben - varianta 5.....	75
Tab. 8.11 – Porovnání jednotlivých variant	76
Tab. 11.1 – Iterace Q (U) charakteristiky pro zatížení v jedné fázi	84

Obsah

1	ÚVOD	14
2	VYUŽITÍ AKUMULAČNÍCH ZAŘÍZENÍ V DISTRIBUČNÍCH SÍTÍCH	15
2.1	PŘIPOJENÍ SAMOSTATNÉHO AKUMULAČNÍHO ZAŘÍZENÍ	15
3	KOMPONENTY FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY S AKUMULACÍ	17
3.1	SOLÁRNÍ PANELE	17
3.1.1	<i>Princip přeměny</i>	17
3.1.2	<i>Typy solárních panelů</i>	19
3.2	AKUMULÁTOR	20
3.2.1	<i>Olověné akumulátory</i>	20
3.2.2	<i>Lithiové akumulátory</i>	21
3.3	REGULÁTORY DOBÍJENÍ	22
3.4	STRÍDAČE	23
3.4.1	<i>Pokročilé funkce</i>	23
4	POŽADAVKY NA PŘIPOJOVANÉ VÝROBNY A PRAVIDLA PRO JEJICH PŘIPOJENÍ	25
4.1	ROZDĚLENÍ VÝROBEN	25
4.2	NORMÁLNÍ PROVOZNÍ PODMÍNKY	26
4.3	PODPORA SÍTĚ	27
4.3.1	<i>Udržování napětí</i>	27
4.3.2	<i>Přizpůsobení činného výkonu</i>	32
4.3.3	<i>Řízení jalového výkonu</i>	33
4.4	ZPĚTNÉ VLIVY NA SÍŤ	34
4.4.1	<i>Zvýšení napětí</i>	34
4.4.2	<i>Nesymetrie napětí</i>	36
4.4.3	<i>Flikr</i>	36
4.4.4	<i>Vyšší harmonické</i>	36
5	ZPŮSOBY PŘIPOJENÍ VÝROBEN DO DS	38
5.1	SYSTÉMY BEZ MOŽNOSTI AKUMULACE	38
5.2	SYSTÉMY S AKUMULACÍ	39
6	VYHODNOCENÍ PROVOZU FV ELEKTRÁRNY S AKUMULACÍ	41
6.1	PRŮBĚH MĚŘENÝCH HODNOT	41
6.2	ANALÝZA PŘETOKŮ DO SÍTĚ	43
6.2.1	<i>Bez vlivu výroby</i>	43
6.2.2	<i>Bez vlivu akumulace</i>	44
6.2.3	<i>Porovnání výsledků</i>	45
6.3	VLIV VÝROBNY NA KVALITU NAPĚTÍ	45
6.3.1	<i>Dodržení limitů napětí podle ČSN EN 50 160</i>	46
6.3.2	<i>Nesymetrie napětí</i>	49
6.4	VLIV FUNKCE OMEZENÍ ČINNÉHO VÝKONU	51
6.5	VLIV FUNKCE ŘÍZENÍ JALOVÉHO VÝKONU	52
6.6	ZTRÁTY NA ZAŘÍZENÍ	53
6.7	SHRNUTÍ	56
7	VLIV VÝROBEN NA NAPĚŤOVÝ PROFIL SÍTĚ	58
7.1	POMĚRY PŘI ZIMNÍM MĚŘENÍ	58
7.2	LETNÍ MĚŘENÍ	59
8	SIMULACE VLIVU VÝROBNY NA DISTRIBUČNÍ SÍŤ	61
8.1	VLIV NA VELIKOST NAPĚTÍ A ZTRÁT V SÍTI PŘI ZATÍŽENÍ	61
8.1.1	<i>Odvození součinitele zatížení</i>	61

8.1.2	Stav maximální odběr a nulová dodávka	63
8.1.3	Stav minimální odběr a maximální dodávka	65
8.1.4	Stav minimální odběr a maximální dodávka s $Q(U)$ funkcí	66
8.1.5	Minimální odběr a maximální dodávka do jedné fáze	67
8.1.6	Zhodnocení výsledků	68
8.2	ROZDÍLNÉ NASTAVENÍ $Q(U)$ CHARAKTERISTIK	69
8.2.1	Bez vlivu $Q(U)$ regulace	70
8.2.2	Běžná $Q(U)$ regulace	70
8.2.3	Varianta 1 – lineární posun omezující charakteristiky	71
8.2.4	Varianta 2 - úprava strmosti podle vzdálenosti	72
8.2.5	Varianta 3 – posun omezující charakteristiky třetí mocninou	73
8.2.6	Varianta 4 – Posunutá běžná charakteristika	73
8.2.7	Varianta 5 – Regulační charakteristika používaná společností E.ON	74
8.2.8	Porovnání jednotlivých variant	75
9	ZÁVĚR	78
10	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	80
11	PŘÍLOHY	82

1 Úvod

Výrobní o malém výkonu pracující do distribučních sítí začínají být velice aktuálním tématem. Aby bylo možné splnit podmínky Evropské unie na pokrytí 32 % spotřeby energie z obnovitelných zdrojů do roku 2030, musí být velká část výroben instalována v distribučních sítích. Některé z nich budou takzvané mikro zdroje, které budou vyrábět elektrickou energii do sítí nízkého napětí s výkonem do 10 kW. V současnosti však v ČR po většinu času převažuje takzvaná centralizovaná výroba, tedy výroba elektrické energie zdroji o vysokém výkonu, který se přenáší po přenosové soustavě. Z té je vždy napájena distribuční soustava (DS), následně lokální distribuční soustava (LDS) a jednotliví spotřebitelé. Částečně decentralizovaná výroba v podobě produkce elektrické energie lokálními zdroji v sítích NN a VN ale zcela změní chování sítě a způsoby její regulace.

V ČR dává smysl jako zdroj malého výkonu uvažovat pouze fotovoltaické elektrárny, jelikož větrné nemají tolik vhodných lokalit a jsou s nimi spojené problémy s úhynem ptactva a hlučností. Fotovoltaické (FV) elektrárny, ale i ostatní obnovitelné zdroje energie (OZE), však trpí jedním velkým problémem. Výroba v některých dnech může být velice nestálá a po západu slunce je dokonce nulová. Proto je u těchto zdrojů nezbytná akumulace pro stabilizaci dodávky elektrické energie do DS.

Tato diplomová práce se bude primárně zabývat analýzou vlivu malých lokálních fotovoltaických výroben na distribuční síť nízkého napětí. Bude zde popsán princip fotovoltaických článků a taky podrobně uvedeno, co musí žadatel splňovat před připojením k síti, ale také jakými regulačními schopnostmi musí výrobní disponovat a to z důvodu omezení negativních vlivů na sítích.

Velká část práce bude věnována statistickému rozboru dat z výrobní umístěné do sítě nn, kde jsou k dispozici data za celý kalendářní rok. Sledované budou hlavně vlivy této výrobní na distribuční síť a dodržení jejích limitů. Půjde například o sledování dodržení kvality napětí, analýzu přetoků do sítě, vliv omezujících funkcí a vyhodnocení ztrát na zařízení. Dále bude využito síťových analyzátorů umístěných na sledovaném vývodu pro pohled na napěťový profil sítě pro období zimy a léta, tedy v době s malou výrobou a s maximální výrobou. Na závěr bude provedena simulace této sítě při uvažování několika fiktivních výroben umístěných na vývodu, pro ověření splnění parametrů a určení ztrát. Toto schéma bude také použito pro vyzkoušení různých možností nastavení $Q(U)$ charakteristik. Porovnávat se bude velikost ztrát a také efekt na regulaci napětí.

Tato kapitola byla zpracována s využitím informací publikovaných v [1].

2 Využití akumulacních zařízení v distribučních sítích

Samostatná akumulacní zařízení začínají mít pro moderní energetiku veliký význam. V zahraničí jsou tyto systémy označovány jako BESS (Battery Energy Storage Systems) hojně využívány a instalovaný výkon se pohybuje v stovkách MW.

Tyto bateriové systémy by mohly sloužit ke zvýšení zabezpečení dodávky elektrické energie a to hlavně pro lepší rozložení výkonu na jednotlivých linkách a také pro okamžitý nástup v případě blackoutu. Dále by tyto systémy instalované v DS mohly sloužit ke stabilizaci dodávky, která bude nezbytná s rozvojem obnovitelných zdrojů nebo jako aktivní kompenzační prvek pro minimalizaci přenášené jalové energie. Velký potenciál mají bateriová úložiště umístěná u nabíjecích stanic elektromobilů v místech, kde je slabá síť a modernizace je velice obtížná. Další oblastí je vznik úplně nové kategorie obchodu s elektřinou.

U zákazníků mají význam hlavně jako účinná záloha pro případ výpadku a pro možnost odebírat energii v době nízkého tarifu a následně ji využívat v době tarifu vysokého. V neposlední řadě může zákazník žádat o nižší rezervovaný výkon v síti z důvodu pokrytí výkonových špiček právě tímto systémem. To by napomohlo i vyšší připojitelnosti bez nutnosti posilování sítě. Do budoucna bude i z důvodu splnění limitů nařízených EU o pokrytí spotřeby obnovitelnými zdroji, které byly zapracovány do [1], dávat smysl hlavně akumulace společně s FV elektrárnou malého výkonu přímo u zákazníků.

2.1 Připojení samostatného akumulacního zařízení

Pokud by byl požadavek na připojení výroby nebo výroby s akumulací, není v tom z pohledu platné legislativy žádný problém. Problém v dnešní době nastává, pokud by si chtěl zákazník zřídit samostatnou akumulaci bez výroby. Aktuálně lze velké akumulacní systémy elektrické energie použít pouze u již postavených tepláren nebo elektráren s turbínou. Tento problém je dán absencí tohoto typu zařízení v energetickém zákoně (EZ) [2]. Energetický regulační úřad (ERÚ) kvůli tomuto aktuálnímu nedostatku nemůže vydávat licence pro samostatné akumulacní zařízení a bez této licence nemůže být vykonávána samostatná podnikatelská činnost, i když je velice podobná přečerpávacím elektrárnám. Přitom tyto systémy by měly dnes velký potenciál jako vyrovnávací prvek k velkým FV elektrárnám. Připravovaná novela EZ však tento termín definovat také nebude, proto má být v polovině roku 2020 předložen návrh na vznik nového ez. Ten současný byl od svého vzniku novelizován již 25 krát a je poměrně nepřehledný.

Původní situace byla taková, že v roce 2018 byla vydána verze, ke které bylo možné psát připomínky do 7. 12. 2018 a do konce března 2019 měly být tyto připomínky vypořádány. Připomínek ovšem bylo takové množství, že Ministerstvo průmyslu a obchodu nestihlo tyto připomínky zapracovat a aby se celý proces alespoň částečně urychlil, byla novela rozdělena na dvě části, kde první část řešila pouze vytýkané vady implementace směrnic, kde se s velkými komplikacemi nepočítalo, a druhá měla řešit

překompensace, novou podporu a akumulaci. V dubnu 2019 byla tato druhá část dokonce odebrána z legislativního procesu.

V současné době lze akumulční zařízení k zákazníkovi připojit pouze za předpokladu, že bude zamezeno přetoku do DS. V tu chvíli se jedná z pohledu sítě o spotřebič a nijak se neliší od systému záložního napájení UPS. Problém by nastal, pokud by chtěl zákazník toto zařízení používat i pro dodávku do sítě, protože v tu chvíli se již jedná z pohledu připojení o akumulční zařízení a to dnešní elektrizační soustava nezná a není tedy možné ho připojit, i když Pravidla pro provozování distribučních soustav (PPDS) již tento termín znají a jsou na tuto problematiku již nějaký čas připravena.

Tato kapitola byla zpracována s využitím informací publikovaných v [2], [3], [4], [5].

3 Komponenty fotovoltaické elektrárny s akumulací

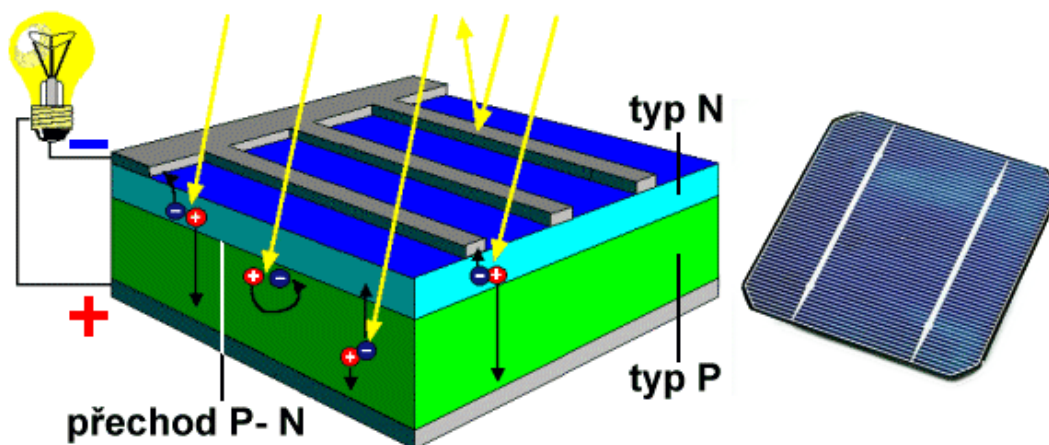
FV výroba s akumulací je poměrně složitý systém, který se skládá ze čtyř základních komponent. Těmito komponenty rozumíme samotný solární panel, regulátor dobíjení, baterii a střídač. Návrh celého systému se odvíjí od potřebného instalovaného výkonu. Podle toho se navrhne potřebné množství panelů. Dále je nezbytné určit, jakým výkonem a po jakou dobu se bude energie dodávat do sítě nebo zde bude využita čistě pro vlastní spotřebu. Dle těchto parametrů se určí kapacita baterie a její maximální nabíjecí a vybíjecí proud. Podle hodnoty nabíjecího proudu a napětí baterie se zvolí ideální typ regulátoru a následně i střídače. Dalším důležitým aspektem při volbě jednotlivých komponent je ekonomická návratnost. Ta je určena hlavně životností jednotlivých komponent.

3.1 Solární panely

Solární panel je zařízení, které slouží k přeměně elektromagnetického vlnění na elektrickou energii. Jeho princip objevil Alexander Edmond Becquerel již v roce 1839. Tento objev byl ve velkém využit a vyvinut až s příchodem kosmonautiky, kde se jedná téměř o jediný možný způsob zisku elektrické energie.

3.1.1 Princip přeměny

Solární panel není nic jiného, než velká fotodioda. Proto je jeho princip stejný. Základem panelu je fotovoltaický článek složený z vrstev dvou polovodičových materiálů a využívá fotoelektrický jev. Jeden materiál solárního článku má přebytek elektronů a označuje se jako polovodič typu N neboli katoda. Pod touto vrstvou je polovodič typu P, který má naopak nedostatek elektronů (přebytek kladně nabitých děr). V místě spojení těchto dvou vrstev vzniká takzvaný P-N přechod. Ten díky vzniklé potenciálové bariéře propouští proud vždy jen jedním směrem. Tento směr je ale opačný než je polarita těchto vrstev, a proto nemůže dojít k samovolnému přechodu elektronů z polovodiče typu N do polovodiče typu P. Tomuto jevu se říká rekombinace. P-N přechod ale nebrání průchodu proudu v opačném směru.



Obr. 3.1 – Princip fotovoltaického článku [6]

Při dopadu elektromagnetického vlnění na fotovoltaický článek dochází k uvolňování elektronů z krystalické mřížky obou materiálů. Takto uvolněné elektrony se hromadí ve vrstvě N a na přechodu vzniká elektrické napětí. To dosahuje hodnoty 0,5 – 0,6 V. Požadovaného napětí lze dosáhnout sériovým řazením takovýchto článků do takzvaných stringů a vyšších hodnot proudu jejich paralelním řazením. V praxi je celý solární panel sérioparalelní kombinací jednotlivých solárních článků.

Aby došlo k vyražení elektronu z polovodičové destičky, musí mít dopadající záření dostatečnou energii. Ta musí být větší než minimální energie potřebná k překonání zakázaného pásma. Zde již záleží na použitém materiálu, ale u nejvíce používaného křemíku se jedná o hodnotu 1,12 eV. Vyjde se ze vztahu pro výpočet energie elektromagnetického záření při znalosti frekvence.

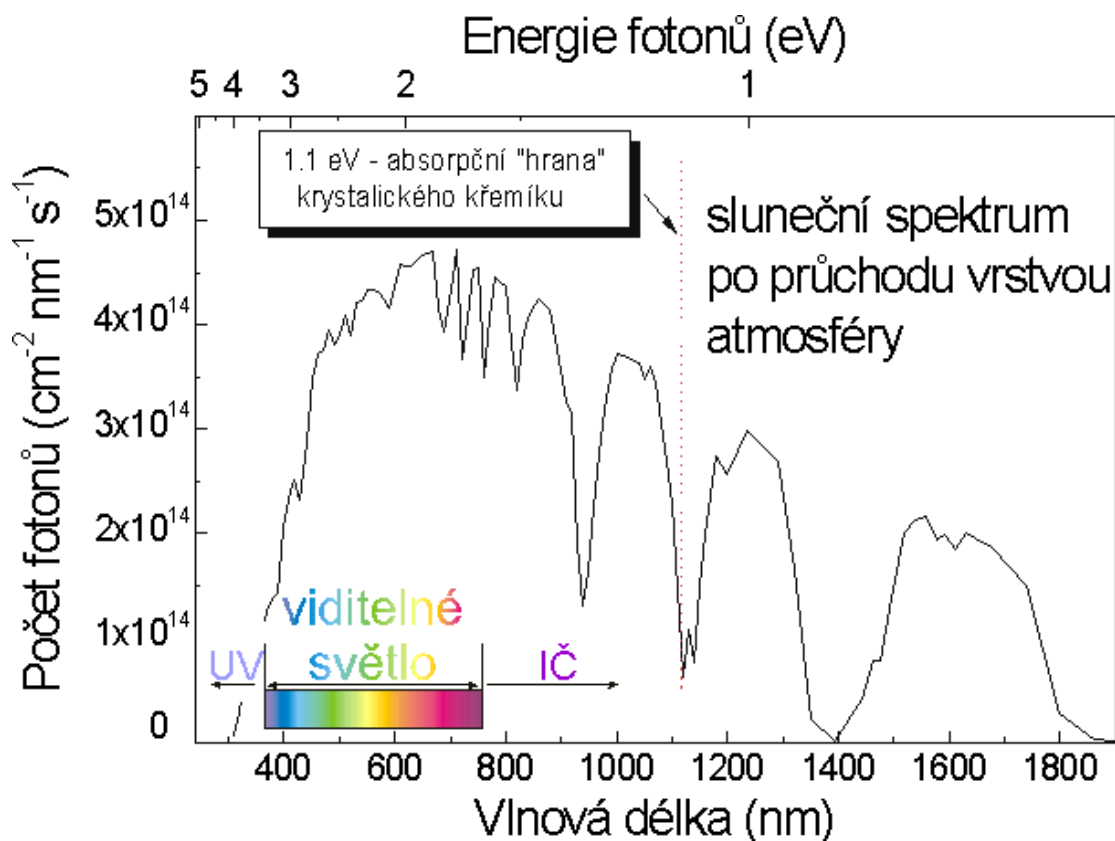
$$E = h \cdot f \quad (3.1)$$

kde **E** je energie elektromagnetického záření v eV

h je Planckova konstanta rovna $4,135\ 667\ 696 \cdot 10^{-15}$ eV/Hz

f je frekvence elektromagnetického záření v Hz

Vyjádřením frekvence a dosazením Planckovy konstanty se zjistí, že vlnění musí mít kmitočet minimálně $2,708 \cdot 10^{14}$ Hz. To odpovídá vlnové délce 1108 nm. Při porovnání této hodnoty se slunečním spektrem (Obr. 3.2), se dá odhadnout, že velikou část energie slunečního záření nelze využít a na povrchu solárních panelů se pouze přemění na teplo a způsobuje nežádoucí oteplení. Toho může být částečně využito kombinovanými panely, které vyrábí elektrickou energii a zároveň slouží pro ohřev teplé užitkové vody (TUV) Navíc elektromagnetické vlnění o značně vyšší frekvenci přechodem pouze projde a je tedy nevyužito. Z těchto důvodů lze využít maximálně asi 50 % energie při použití křemíkových panelů. V praxi se dosahuje hodnoty maximálně okolo 20 %, běžně spíše 15 %. To je způsobeno hlavně odrazem záření z povrchu panelu i přes opatření v podobě antireflexních vrstev. Pokud se vyjde z maximálních hodnot energie dopadajícího slunečního záření na vodorovný povrch během letního období v ČR (1000 W/m^2), zjistí se, že maximální dosažitelný výkon takového panelu je 150 W/m^2 . To může být hlavní ukazatel při návrhu solárního systému a takto lze jednoduše zjistit potřebný počet jednotek.



Obr. 3.2 – Spektrum slunečního záření [6]

3.1.2 Typy solárních panelů

Použitý materiál značně ovlivňuje mnoho parametrů výsledného produktu. V tomto případě se jedná o účinnost, životnost, ale hlavně o cenu.

3.1.2.1 Křemíkový solární panel

V současné době je křemík nejpoužívanější materiál pro výrobu solárních panelů. Výhodou této technologie je nižší cena z důvodu využívání křemíku v mnoha jiných oblastech elektrotechniky. Pro výrobu fotovoltaických článků je třeba velmi čistého křemíku. Ten se v přírodě vyskytuje v čistotě 97 – 99 %.

Křemíkové fotovoltaické články se dělí na polykrystalické a monokrystalické. Polykrystalický se vyrábí chemickou metodou a jeho výroba je levnější než výroba monokrystalického článku. Tyto články mají vyšší účinnost při nižší intenzitě záření. Dosahují hodnot v rozmezí 15 – 17 %.

Monokrystalické články se vyrábějí řízenou krystalizací taveniny a mají vyšší účinnost při vysokých intenzitách osvětlení, která dosahuje až 20 %.

3.1.2.2 Tenkovrstvé technologie

Výhodou této technologie je nanášení fotovoltaických článků přímo na nosný materiál, kterým může být prakticky cokoli. Například fasáda domu, čímž dojde k pokrytí velké plochy. Tyto panely mají oproti křemíkovým nižší účinnost i životnost. Jejich výhodou je rostoucí účinnost při klesající intenzitě světla.

3.1.2.3 Nekřemíkové technologie

Dalším z používaných materiálů pro výrobu fotovoltaických panelů je arsenid galia. Ten má znatelně vyšší účinnost oproti křemíkovým (29 %). Výsledný panel je však více křehký, těžší a hlavně znatelně dražší.

Další možností, ale jedná se spíše o otázku budoucnosti, je organický článek. Ten neobsahuje žádné toxické prvky. Využívá geneticky upravené bílkoviny a pracuje na principu obyčejné fotosyntézy. Zde se dosahuje účinnosti okolo 13 %, což není úplně špatné, ale nevýhodou je opět cena. Tyto články jsou asi 200 x dražší než běžně používané křemíkové.

3.2 Akumulátor

Akumulátor neboli baterie je nezbytnou součástí solárního systému, pokud by se jednalo o ostrovní systém. Výrobní mohou pracovat přes výkonový měnič přímo do sítě, ale mohou se stávat zdrojem kolísání napětí v DS během polojasného dne. Tyto výrobní také nemohou zajišťovat dynamickou podporu sítě, když zrovna „nesvítí“.

Jelikož se do akumulátoru může během jasného dne ukládat velké množství energie a během noci využívat, je zde důležitým parametrem účinnost nabíjecího cyklu. Ta ale s počtem těchto cyklů klesá a baterie, jejíž pořizovací náklady nejsou malé, přestává být hospodárná a po čase i funkční. To je velice důležité při počítání návratnosti.

3.2.1 Olověné akumulátory

Olověný akumulátor je z dnes používaných systémů jeden z nejstarších. Jeho historie sahá až do roku 1859, kdy princip objevil francouzský vědec Gastorn Planté. Hojně jsou využívány i dnes, a to z důvodu nízké ceny a vysoké spolehlivosti. Dalším důležitým faktem je, že tyto akumulátory jsou dobře recyklovatelné.

Hlavní částí akumulátoru je mřížka z olověné slitiny. Slitina se používá z důvodu zvýšení pevnosti, protože čisté olovo je příliš měkké. Jako příměsi se používají antimon, vápník, cín nebo selen. Přidání těchto látek má na baterii také negativní vliv. Například antimon a cín zvyšuje spotřebu vody v baterii, ale také zlepšují chování baterie při hlubokých cyklech. Vápník baterii snižuje samovybíjecí efekt, ale způsobuje oxidaci elektrody. Z těchto důvodů je snaha nahrazovat antimon a vápník jinými látkami.

Olověné akumulátory mají například oproti akumulátorům využívajících lithium poměrně nízkou životnost při hlubokých nabíjecích či vybíjecích cyklech (Tab. 3.1). Životnost je ovlivňována zejména korozi a oxidací mřížky na kladné elektrodě. Tyto negativní vlivy lze ovlivnit zejména nabíjecím napětím, tedy nabíjecím proudem a teplotou akumulátoru. Pokud je na nabíjení používáno malé napětí, akumulátor se bude nabíjet velice pomalu a nebude mít pro solární systém dobrou výkonnost. V této situaci také dochází k sulfataci na záporné elektrodě. Naopak při vysokém nabíjecím napětí dochází ke korozi kladné elektrody. Zde je ovšem důležité zmínit, že sulfataci záporné elektrody lze

odstranit a prodloužit tak životnost zdánlivě špatnému akumulátoru procesem zvaným desulfatace, ale koroze kladné mřížky je již trvalá.

Aby akumulátor mohl fungovat, musí být elektrody ponořené do elektrolytu, kterým je v případě olovených akumulátorů kyselina sírová o koncentraci 35 %. Jeden olovený článek akumulátoru má své nominální napětí cca 2 V.

Z hlediska konstrukce se olovené akumulátory rozdělují na dva základní typy. Jedním je startovací akumulátor (známý jako autobaterie), který je uzpůsoben tak, aby byl schopený dodat vysoký nárazový proud i do hodnot 1000 A, ale není vhodný pro hluboké vybíjení, které jeho životnost výrazně snižuje.

Dalším typem je trakční akumulátor, který je konstruován tak, aby mu nevadilo hluboké vybíjení, ale jeho nárazový proud je výrazně nižší. Má tedy vyšší vnitřní odpor. Těchto vlastností je dosaženo tlustšími elektrodami. Počet cyklů ovlivňuje zejména hloubka vybití, neboli DoD (Depth of Discharge), jak ukazuje následující tabulka (Tab. 3.1), která znázorňuje i rozdíl mezi těmito dvěma typy. Akumulátor se považuje za špatný, pokud jeho kapacita klesne na 80 % nominální hodnoty.

Tab. 3.1 – Počet cyklů olovených baterií v závislosti na úrovni vybíjení [7]

Úroveň vybití	Startovací baterie	Trakční baterie
100 %	12 – 15	150 – 200
50 %	100 – 120	400 – 500
30 %	130 – 150	1000+

Pokud by byl na domovní solární systém použit olovený trakční akumulátor a docházelo by k vybíjení do 0 %, rozumné parametry by si akumulátor udržel ani ne rok i při uvažování, že několik dní v roce je zataženo a k nabíjení tedy téměř nedochází. Naopak při využití pouze 50 % kapacity baterie by se mohlo uvažovat s životností asi 2 roky. Pro zvětšení životnosti je možné místo tekutého elektrolytu použít akumulátory, kde je elektrolyt vázán ve speciálním gelu. Ty mají vyšší počet cyklů, ale jsou náchylnější na přetížení.

3.2.2 Lithiové akumulátory

Lithiové akumulátory patří dnes k nejpoužívanějším pro skladování energie ze solárních článků. Klasické Li-Ion akumulátory se značí jako LiCoO₂. Jak už název napovídá, hlavní látkou, která se zde používá, je lithium. To se využívá jako elektrolyt v podobě lithiové soli. Jako anoda se využívá uhlík a na katodu se využívá oxid kovu.

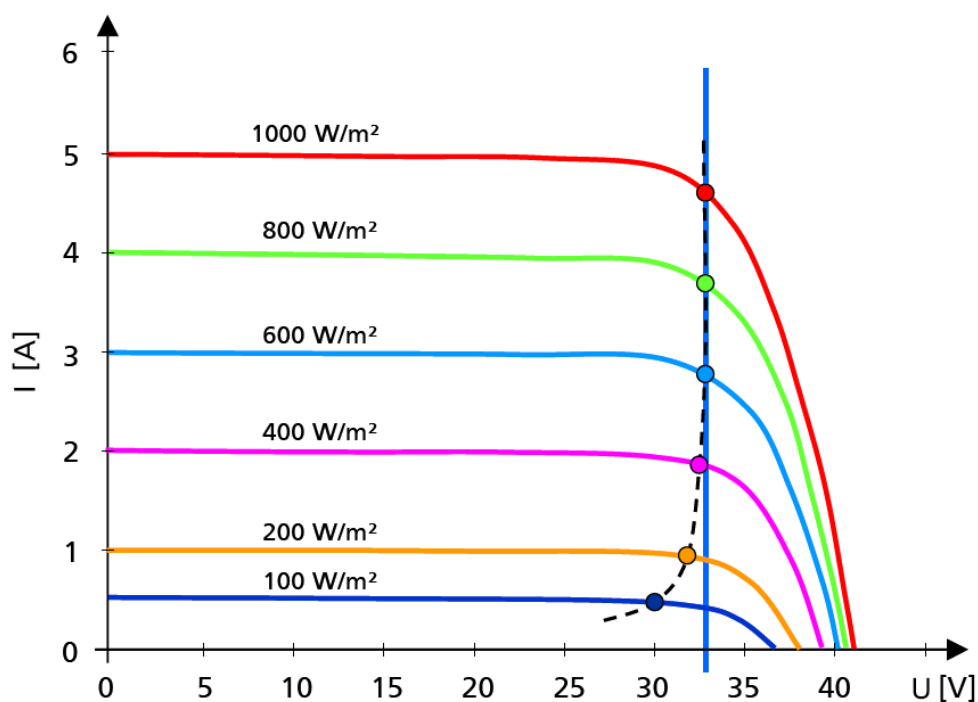
Pro účely energetiky se však používá lehce modifikovaný článek označený vzorcem LiFePO₄ neboli Lithium-železo-fosfátový akumulátor. Ten měl ve svých počátcích nižší elektrickou vodivost než LiCoO₂, ale prorazil si cestu díky nízké ceně, netoxicitě, vysoké dostupnosti železa a dobré tepelné stabilitě. Tento akumulátor je zároveň bezpečnější a problém s nižší vodivostí byl časem odstraněn tím, že se částice LiFePO₄ potáhly vodivými materiály jako je uhlík. Pracovní napětí jednoho takového článku se pohybuje v rozmezí

3 – 3,3 V přičemž je možné ho nabíjet napětím maximálně 3,6 V. Obecně se uvádí, že při hloubce vybíjení do 80 % vydrží tento typ 2000 – 7000 cyklů, což je sice obrovský rozptyl, ale i nejnižší počet cyklů je nesrovnatelně vyšší než u akumulátoru olověného. Tento typ akumulátoru je ovšem oproti olověnému podstatně dražší. Při porovnání aktuálních nabídek je lithiový akumulátor o stejné kapacitě téměř 9x dražší.

Za zmínku v této oblasti jistě stojí nadějně české akumulátory označované HE3DA (High Energy 3D Accumulator) [8]. V tuto chvíli se jeho výroba teprve rozjíždí, avšak výsledky z testů jsou velice nadějně. Akumulátor by měl být naprosto bezpečný, protože je konstruován pomocí tlustých elektrod namísto tenkých jako u klasického lithiového článku. Z důvodu výrazného „třetího“ rozměru elektrody se označuje jako 3D. Namísto stočených svitků folie, jsou elektrody tvořeny pomocí měděných a hliníkových rámců, v kterých jsou vyvrtné díry. Do těchto děr je následně nalisován aktivní materiál ve formě prášku. Tento akumulátor by měl vydržet 5000 cyklů, ale jelikož je dobře recyklovatelný, lze prodloužit regenerací o dalších 5000 cyklů.

3.3 Regulátory dobíjení

Úkolem regulátoru dobíjení je regulovat velikost dobíjecího napětí na baterii, hlídat velikost dobíjecího proudu a také teplotu baterie, podle které tyto dva předchozí parametry upravuje. Z hlediska principu činnosti rozlišujeme dva základní typy regulátorů. Levnější PWM, tedy stejnosměrný měnič, který reguluje hodnotu napětí pomocí pulzně šířkové modulace, a MPPT (Max Power Point Tracking), tedy regulátor, který sleduje přímo bod maximálního výkonu (MPP) na voltampérové charakteristice panelu (Obr. 3.3).



Obr. 3.3 – VA charakteristika solárních panelů při různé intenzitě záření [9]

Zde je vidět, co je hlavní nevýhodou PWM regulátoru. Pokud se bude dobíjet 24 V baterie, může se dobíjet maximálním napětím okolo 29 V. Z Obr. 3.3 je však vidět, že bod s maximální účinností se povětšinou nachází v hodnotě napětí přibližně 33 V.

Zde je výhodou použití MPPT regulátorů, které se chovají jako elektronický zdroj. Napětí rozstřídají, transformují a usměrní. Díky tomu lze neustále udržovat nabíjecí napětí a proud v bodě maximálního výkonu. Tento regulátor má sice menší vlastní účinnost, ale zisk energie je násobně vyšší než jeho ztráty.

3.4 Střídače

Střídač neboli invertor je srdcem celé fotovoltaické elektrárny. Často bývá součástí střídače i regulátor dobíjení, takže do tohoto přístroje přijdou připojit solární panely, baterie a výstup na střídavou síť.

Princip činnosti spočívá v navýšení (nebo i snížení) napětí na hodnotu amplitudy síťové hodnoty a toto stejnosměrné napětí následně rozstřídá pomocí výkonových spínacích součástek. Rozstřídání se většinou provádí modulací tohoto napětí na sinusové napětí pomocí obdélníkových průběhů. Aby tyto průběhy nezpůsobovaly značné zarušení sítě vyššími harmonickými, musí měnič na výstupu obsahovat filtry. Účinnost střídačů se dnes pohybuje až do hodnot 98 %.

Aby mohl být střídač připojen do DS, musí být schopen splňovat všechny regulační charakteristiky, které jsou uvedeny v kapitole 4.3. Problémem však je, že tyto charakteristiky je složité přeměřovat a stává se proto, že se střídače i po zadání správných parametrů chovají v síti jinak, než by měly. Některé regulační charakteristiky nejsou splněny korektně, některé nejsou obsaženy vůbec, ačkoliv by měly být. Dokonce se stává, že regulační charakteristika reaguje zcela obráceně, než je nastavená, tedy například snížením napětí v síti dojde k zvýšení odebírané jalové energie a tím k ještě většímu snížení. [10]

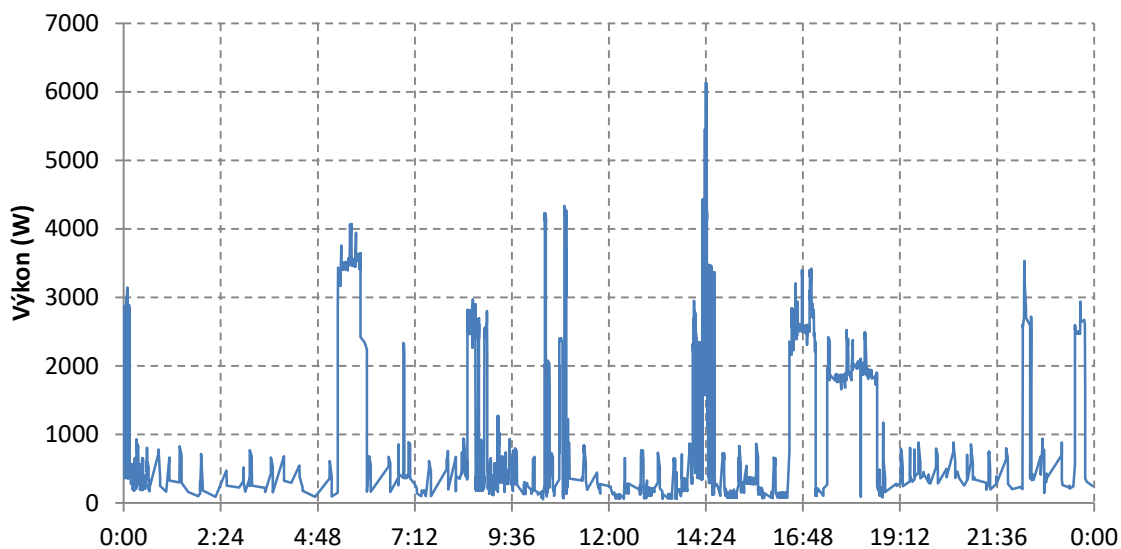
Aktuální problém je, že většina výroben byla uvedena do provozu ještě před zavedením těchto požadavků. Z tohoto důvodu nelze vyžadovat splňování regulačních charakteristik, ale některé je přesto splňují. U těch, které je nesplňují, je problém v tom, že je ve většině případů ani hardwarově neumožňují.

3.4.1 Pokročilé funkce

Mezi pokročilé funkce moderních střídačů se mohou jistě zařadit právě regulační charakteristiky, které starší střídače vůbec neznají. V sítích NN patří mezi ty nejdůležitější funkce $P(U)$ a $Q(U)$, které pomáhají zvyšovat množství zdrojů, které mohou být do sítě připojeny. Tyto funkce budou podrobně popsány v kapitole 4.3. Ve zdroji [11] je také uvedeno, že zdroje vzdálenější od distribučního transformátoru mají vyšší schopnost ovlivnit napětí. To by mělo být respektováno při nastavování, ale mohl by tyto parametry také nastavovat sám střídač změřením impedance sítě. V současnosti je také možnost využít regulační charakteristiku $Q(U, P)$, která v případě, že zdroj neprodukuje žádnou

činnou složku, omezí nebo úplně zamezí přetoku jalového výkonu zpět do sítě. Ta totiž může způsobovat zbytečné ztráty na vedení.

Další funkcí může být omezení výkonových špiček odebíraných spotřebitelem ze sítě a tím možnost navýšení kapacity sítě bez jakékoliv úpravy. Střídač může sledovat aktuální odebíraný výkon z DS a nedovolit překročení nastavené meze tím, že potřebný rozdílový výkon dodá. Nutností pro tuto funkci je dostatek uložené energie v akumulátorech. Na obrázku (Obr. 3.4) lze vidět příklad odběru elektrické energie rodinným domem v průběhu víkendového dne, kde jsou výkonové špičky patrné.



Obr. 3.4 – Příklad odběru rodinného domu během víkendového dne (19. 10. 2019)

Dále může být bateriová stanice se střídačem umístěna v dlouhé a slabé DS a sloužit pouze jako zdroj jalové energie pro stabilizaci napětí v síti během dne, kdy se odběr mění. Výrobná s akumulací či samotná akumulace může také sloužit jako záložní zdroj domácnosti při výpadku sítě.

Další nezbytnou funkcí je podpora sítě během poruchových stavů, hlavně během krátkodobých podpětí. Pokud by došlo k náhlému odpojení během přechodné zkratové poruchy, mohlo by to znamenat výpadek sítě z důvodu náhlého přetížení napájení z nadřazené sítě. S tím souvisí také nutnost odpojení zdroje při výpadku sítě a to hlavně z důvodu bezpečnosti. V tomto případě je nezbytné, aby se zdroj nepřipojil s plným výkonem ihned po obnovení napětí v síti. Buďto musí postupně najíždět nebo se připojit se zpožděním.

Tato kapitola byla zpracována s využitím informací publikovaných v [6], [7], [8], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18].

4 Požadavky na připojované výroby a pravidla pro jejich připojení

Připojením výroby do distribuční sítě provozovatele distribuční soustavy (PDS) dochází ke změně výkonových a napěťových poměrů. Tato změna je nejpatrnější právě v místě připojení výroby. Na změnu těchto poměrů musí být síť dostatečně dimenzována hlavně z důvodu nárůstu zkratového výkonu, který bude muset být v případě poruchy spolehlivě vypnut. To je hlavní důvod, proč je třeba tento záměr konzultovat s PDS již ve stádiu přípravy, v krajním případě při projektování této výroby.

Jednotlivá pravidla, která musí výroby připojené do DS splňovat, jsou definovaná v PPDS v příloze 4, která je shrnutím Nařízení komise EU č. 631 z roku 2016, kde jsou uvedeny podmínky pro připojování, a české technické normy ČSN EN 50438 edice 2, kde jsou sepsány požadavky pro paralelní provoz mikrogenerátorů připojených do DS. V PPDS jsou však také definovány výroby, které nemusí tyto podmínky splňovat. Jedná se o výroby, které slouží pouze pro poskytování záložní elektřiny a k soustavě jsou připojeny nejvýše pět minut během kalendářního měsíce v době, kdy je soustava v normálním provozu. Dále je zde zařazena výroba, která do DS pracuje pouze během údržby nebo před uvedením do provozu během zkoušek. Tato doba se ale ani nezapočítává do pětiminutového měsíčního limitu. Jako poslední se PPDS nevztahují na výroby, které nejsou připojeny ke konkrétnímu místu a které jsou PDS používány k dočasným dodávkám energie při výpadku sítě úplnému či částečnému jako podpůrný prostředek. Aktuální připojovací podmínky samozřejmě neplatí také pro výroby, které jsou již uvedeny do provozu.

4.1 Rozdělení výroben

Pro připojení k DS je nejprve potřeba požádat o připojení PDS, do jehož sítě bude tato výroba připojena. Z hlediska výkonových poměrů jsou výroby děleny do čtyř základních kategorií a podkategorií podle následující tabulky (Tab. 4.1).

Tab. 4.1 – Rozdělení výroben do kategorií podle výkonu [19]

Kategorie	Podkategorie	Hranice PDS	Napěťová hladina
A	A1	≥800 W ≤11 kW	nn ¹
	A2	>11 kW <100 kW	
B	B1	≥100 kW <1 MW	vn ²
	B2	≥1 MW <30 MW	
C	C	≥30 MW <75 MW	
D	D	≥75 MW	110 kV

¹ kategorie A2 výjimečně do vn

² kategorie B1 výjimečně do nn

Pokud je výroba elektrické energie prováděna pomocí synchronního generátoru bez výkonové elektroniky na výstupu, určuje se kategorie těchto výroben podle výkonů jednotlivých výrobních modulů (VM). Do této kategorie spadají například parní, vodní, plynové či větrné elektrárny. Avšak pokud je výkon do sítě dodáván pomocí výkonových elektronických měničů nebo asynchronního generátoru, je výkonová kategorie určována pomocí celkových výkonů všech jednotlivých VM. To mohou být solární, vodní nebo větrné elektrárny s akumulací či bez akumulace. Napěťové hladiny, které jsou uvedeny v jednotlivých kategoriích, mohou být výjimečně zvoleny jinak podle PDS.

Pokud má být výrobní připojena na DS, je nejdůležitější zkontrolovat její vliv (více v 4.4). Zejména jde o zvýšení napětí v místě připojení, které musí být v mezích uvedených v [20] a dále je důležité sledovat zvýšení zkratového výkonu z důvodu odolnosti již instalovaných zařízení u spotřebitelů, vedení, spínacích prvků či transformátorů. Výrobní musí být také schopna dodržovat zadané regulační charakteristiky (více v 4.3), které jsou důležité pro udržení kvality napětí a být vybavena potřebnými prvky (více v 5) s možností dálkového řízení a signalizace.

4.2 Normální provozní podmínky

Aby při změnách frekvence nebo napětí nedocházelo k odpojování výrobní od sítě a aby se tedy výrobní podílela na stabilizaci sítě, je přesně stanoveno, v jakých intervalech musí být výrobní provozována trvale, nebo je stanovena doba, po kterou musí pracovat, než dojde k vypnutí. Následující tabulka (Tab. 4.2) udává tyto rozsahy, které jsou platné pro všechny kategorie výroben a platí i pro výrobní s výkonem do 800 W. Zároveň je však požadováno, aby výrobní spadající do kategorie A – D nebyly odpojeny, pokud je časová změna frekvence sítě, definována jako střední hodnota derivace frekvence v intervalu 500 ms menší než ± 2 Hz/s. Tato hodnota derivace se označuje RoCoF z anglického Rate of Change of Frequency a je klíčovým ukazatelem stability sítě [21]. Tento požadavek však není vyžadován od výroben do 800 W.

Tab. 4.2 – Rozsah provozních frekvencí [19]

Frekvenční rozsah	Doba trvání
47 – 47,5 Hz	20 sekund
47,5 – 48,5 Hz	30 minut
48,5 – 49 Hz	90 minut
49 – 51 Hz	bez omezení
51 – 51,5 Hz	30 minut

Tato tabulka souvisí s požadavky na frekvenci v síti, která je definovaná v [20]. Podle této normy nesmí frekvence měřená v 10–minutových intervalech minout rozsah +4 % až -6 % a po 99,5 % času musí být v rozmezí ± 1 %.

Výrobní spadající do kategorie A musí být schopné provozu při plném výkonu v rozsahu napětí +10 % až -10 %. Pokud hodnota napětí klesne pod tuto hodnotu, může

VM snížit dodávaný výkon o hodnotu, která je dána poměrným úbytkem napětí podle vztahu (4.1).

$$\frac{U_n - U}{U_n} \quad (4.1)$$

Pokud výrobní pracuje do sítě VN nebo 110 kV, tedy výhradně kategorie B a C, je doba, po kterou musí pracovat, dána tabulkou (Tab. 4.3), která udává dobu provozu při sníženém či zvýšeném napětí.

Tab. 4.3 – Rozsah napětí pro výrobní pracující do VN [19]

Napět'ový rozsah	Doba provozu
85 – 90 %	60 minut
90 – 111,8 %	bez omezení
111,8 – 115 %	60 minut

A obdobně i pro výrobní moduly pracující do sítě 110 kV, tedy hlavně kategorie D, kde je doba provozu oproti kategoriím B a C omezena pouze při zvýšení napětí.

4.3 Podpora sítě

Jedním z nejdůležitějších požadavků na výrobní v distribučních soustavách je, aby pokud možno nijak nezhoršovaly kvalitu elektrické energie, která je dodávána jiným zákazníkům. Naopak se od výrobních modulů očekává, že budou tyto parametry zlepšovat a stabilizovat. Proto je v PPDS uvedeno, že veškerá výrobní zařízení musí být schopna podílet se na udržování napětí a frekvence při dodávce elektrické energie do distribuční sítě v hodnotách definovaných v kapitole 4.2. Tyto požadavky jsou popsány v následujících kapitolách.

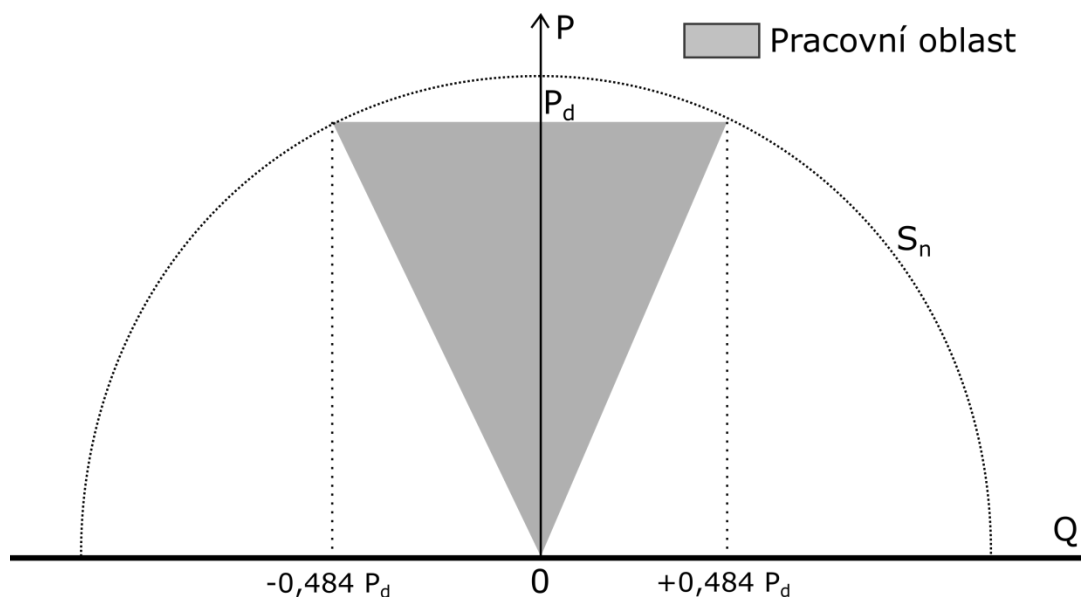
4.3.1 Udržování napětí

4.3.1.1 Statické udržování napětí

Pojmem statické udržování napětí se rozumí udržování napětí ve stanovených mezích v době, kdy je soustava v normálním provozu a nastávají v síti změny pouze pomalého charakteru. Regulace probíhá pomocí změny jalového výkonu v mezích od $0,9_{\text{kap}}$ do $0,9_{\text{ind}}$.

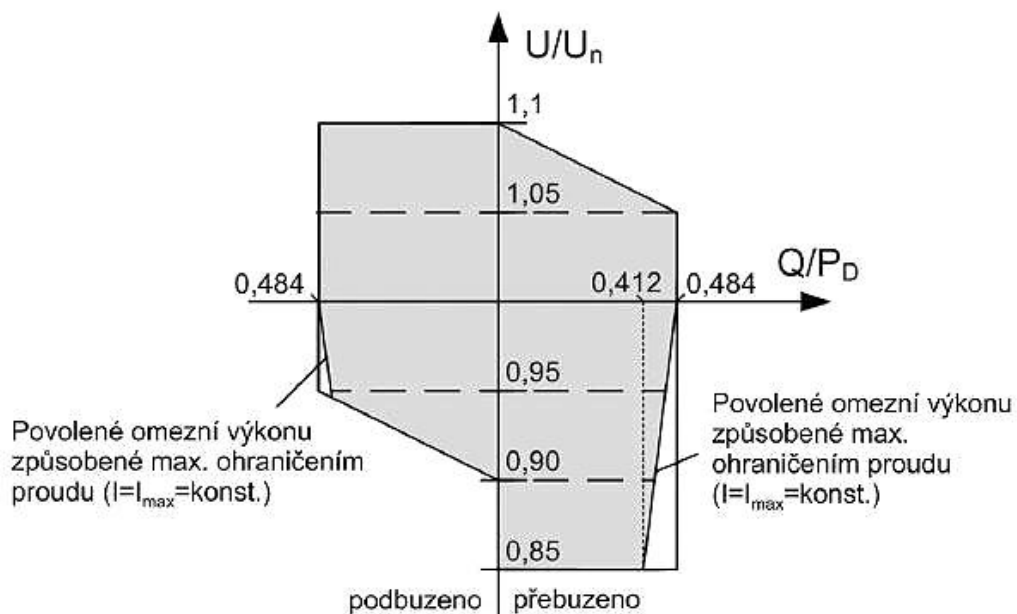
Pro výrobní do 800 W platí, že pokud je dodávaný výkon vyšší než 20 % jmenovitého výkonu, musí být účinník dodávaného výkonu vyšší než $0,95_{\text{ind}}$, aby nedocházelo ke zvyšování napětí nad povolené meze. Pokud by byl výstupní výkon nižší, než 20 %, nesmí být jalový výkon vyšší než 10 % jmenovitého činného výkonu.

Pokud se bude jednat o VM kategorie A1 pracující do sítě nn, je regulační rozsah jalového výkonu dán následujícím obrázkem (Obr. 4.1).



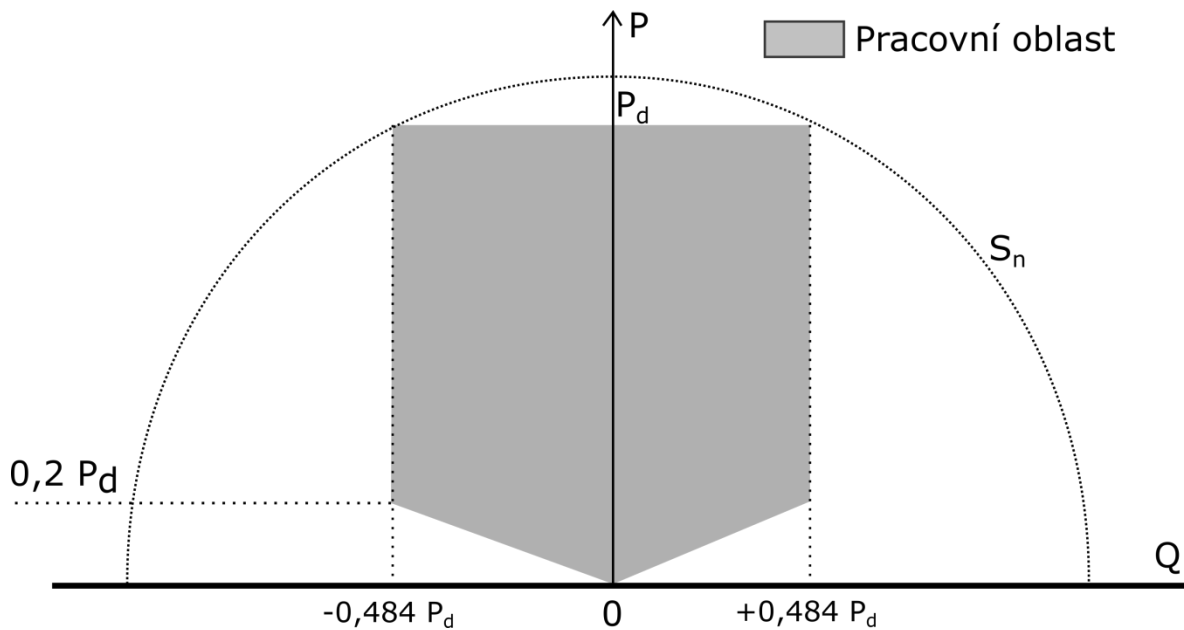
Obr. 4.1 – Požadavek na jalový výkon při jmenovitém napětí pro VM A1 podle [19]

Toto však platí pouze při jmenovitém napětí sítě. Pokud by toto napětí bylo proměnlivé, je třeba tuto charakteristiku definovat na základě změny napětí. Takto je to uvedeno na obrázku (Obr. 4.2).



Obr. 4.2 – Požadavek na jalový výkon při proměnném napětí a maximálním výkonu pro VM A [22]

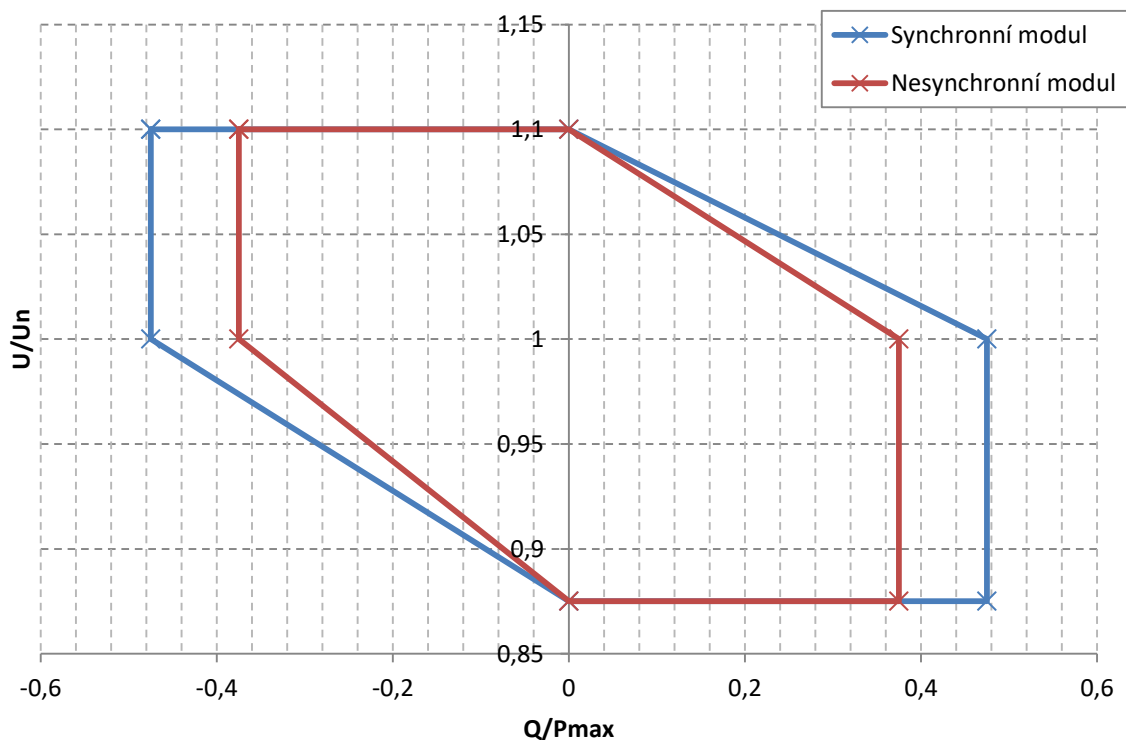
Pro VM spadající do kategorií A2, B a C platí pro regulaci jalového výkonu při jmenovitém napětí následující charakteristika (Obr. 4.3). Oproti kategorii A1 je znát, že regulační rozsah se výrazně zvětšil.



Obr. 4.3 – Požadavek na jalový výkon při jmenovitém napětí pro VM A2, B a C podle [19]

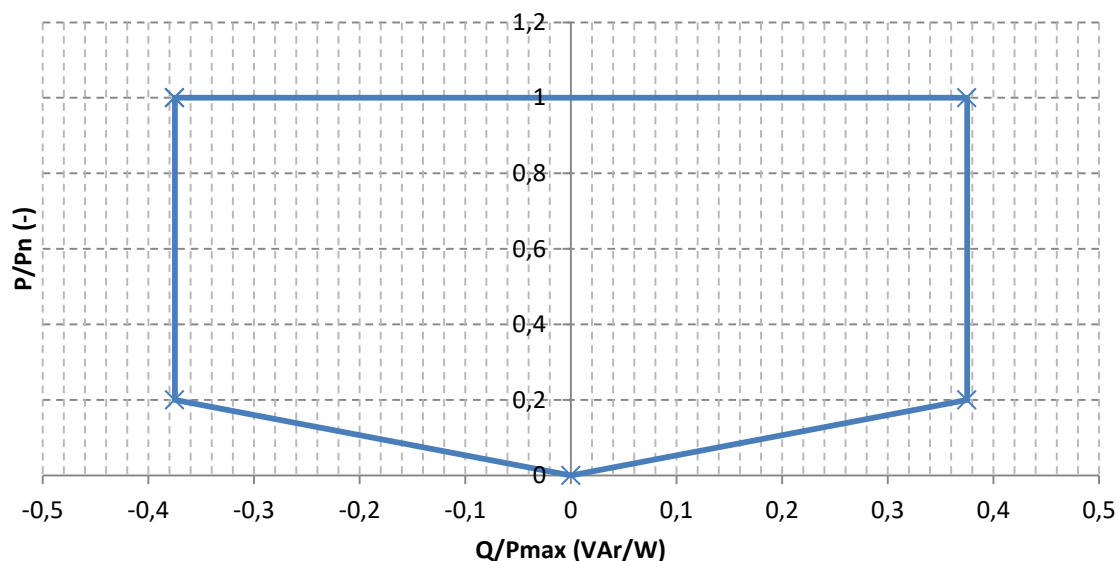
Pokud se v těchto kategoriích budeme bavit o synchronních VM, je zde podmínka dodávky/odběru dodatečného jalového výkonu, který slouží pro kompenzaci nabíjecího výkonu přívodního vedení nebo kabelu mezi vysokonapěťovým transformátorem a VM. Pro nesynchronní modul platí totožné podmínky, ale hodnoty dodávaného/odebíraného výkonu se od modulu synchronního liší a jsou nižší.

Pokud výrobní A2, B a C pracuje při konstantním maximálním dodávaném činném výkonu, musí VM pracovat v diagramu definovaném následujícím obrázkem (Obr. 4.4) na kterém jsou vidět rozdíly mezi požadavky na synchronní a nesynchronní modul.



Obr. 4.4 – Požadavek na jalový výkon při proměnném napětí pro VM B, C a D podle [19]

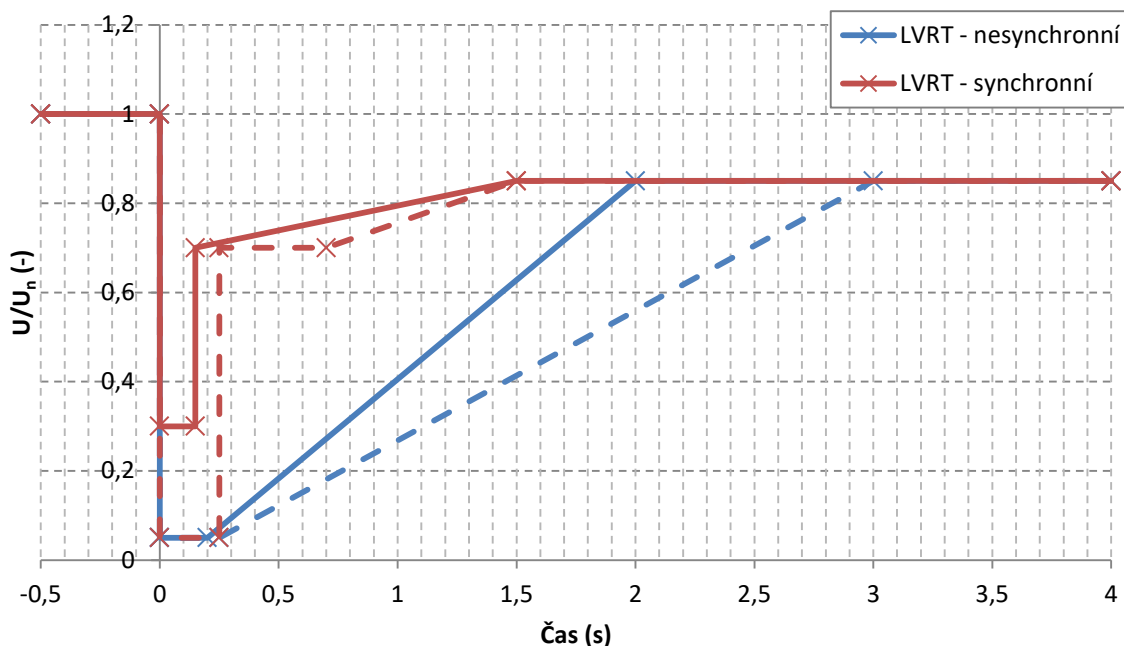
Pokud výrobní A2, B a C nepracuje při maximálním činném výkonu, je pro nesynchronní moduly definována další charakteristika pro dodávku/odběr jalového výkonu. Ta je znázorněna na následujícím obrázku (Obr. 4.5).



Obr. 4.5 – Požadavek na jalový výkon při $P < P_n$ pro nesynchronní VM B, C a D podle [19]

4.3.1.2 Dynamická podpora sítě

Dynamickou podporou sítě se rozumí, že zdroje připojené do hladiny NN, VN a 110 kV musí zůstat připojené po dobu předepsanou v PPDS při krátkodobém poklesu napětí. Ten může být způsoben například zkratem na hladině VVN a ZVN. Pokud by došlo k okamžitému odpojení zdrojů z důvodu podpětí, mohlo by z důvodu náhlého odepnutí mnoha VM dojít k přetížení vedení nebo dokonce rozpadu sítě. Nastavení této podpory je znázorněno na následujícím obrázku (Obr. 4.6), kde v oblasti nad určenou charakteristikou nesmí dojít k odepnutí zdroje. Hodnota napětí se hodnotí primárně jako nejnižší fázová hodnota. Tato funkce se označuje zkratkou LVRT (Low Voltage Ride Through), tedy překlenutí podpětí. Limitní hodnoty se liší pro VM synchronní a nesynchronní, tedy připojené pomocí střídače. Přerušovaná čára představuje nejpřísnější požadavek a plná požadavek standardní.



Obr. 4.6 – Grafické znázornění doby provozu VM při podpětí podle [19]

V PPDS se také uvádí, jak se musí výroba chovat při krátkodobém nadpětí. Zde je definováno, že výrobní moduly musí zůstat připojeny, pokud napětí nepřesáhne hodnotu $1,2 \cdot U_n$, po dobu 1 s a až 60 s, pokud napětí nepřekročí $1,15 \cdot U_n$. Pokud se jedná o síť vybavenou systémem OZ, musí k odpojení výroby v případě nadpětí i podpětí, dojít v době beznapěťové přestávky. Které zdroje se musí podílet na dynamické podpoře a úroveň přesnosti stanoví PDS na základě předpokládaných technických možností.

Pokud je po zdroji požadováno, že musí překlenout krátkodobý pokles napětí, znamená to, že musí do sítě dodávat poruchový proud. V PPDS je definováno, že porucha začíná, pokud hodnota sdruženého napětí klesne pod hodnotu $0,9 \cdot U_n$ a končí, pokud nad tuto hodnotu napětí naroste. Po dobu trvání poruchy je proud, který musí výroba dodávat definován následujícím vztahem.

$$i = k \cdot \frac{U - U_n}{U_n} \quad (4.2)$$

kde i je požadovaný poruchový proud jako poměrná hodnota jmenovitého proudu

k je koeficient, který je závislý na u_k transformátoru obvykle v rozmezí 2 – 6

Zároveň je stanoveno, že doba odezvy musí být do 30 ms a doba ustálení tohoto proudu do 60 ms.

4.3.1.3 Schopnost startu ze tmy

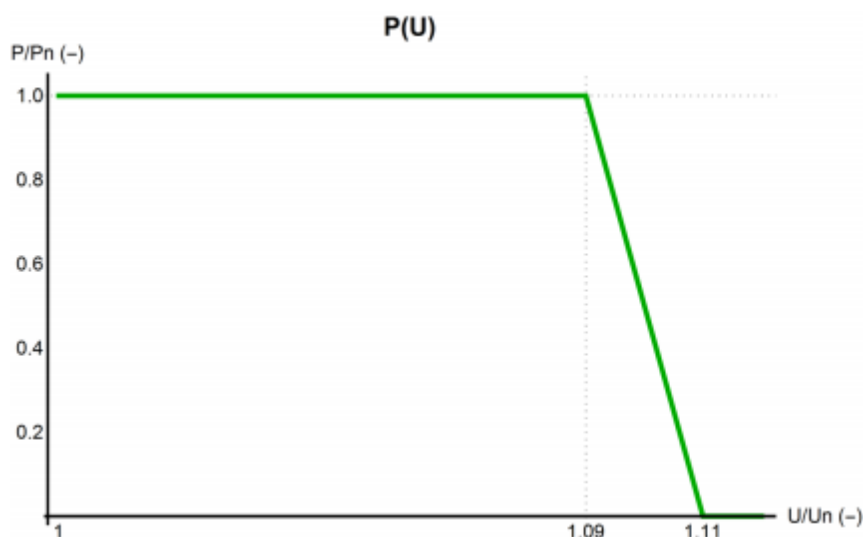
Tato schopnost není pro výroby povinná, ale může být s provozovatelem výroby sjednána smluvně. Smysl dává hlavně pro výroby kategorie C a D. Pokud mají výroby těchto kategorií toto smluvně sjednáno, musí být schopny zajistit dodávku činného výkonu do stanovené části DS během 30 minut a to bez jakékoliv vnější energie.

4.3.2 Přizpůsobení činného výkonu

Všechny výrobní, které jsou připojené do DS, musí provádět regulaci činného výkonu automaticky a to dle frekvence v síti, poměrů v síti nebo povelu z dispečinku. Musí být také schopné automaticky se od DS odpojit. Hlavním účelem regulace činného výkonu je udržování frekvence v síti na jmenovité hodnotě 50 Hz.

4.3.2.1 Snížení činného výkonu podle napětí

Důvodem této regulace je snaha zabránit zbytečnému odpojování výroben od sítě při nadpětí ale i omezení vzniků nadpětí u spotřebitele. Touto funkcí musí disponovat všechny výrobní připojené do sítě NN pomocí střídače s proudem na fázi do 16 A a všechny výrobní včetně synchronních s proudem na fázi nad 16 A připojené rovněž do sítě nn. Výrobní, které mají tuto funkci aktivovanou, musí regulaci provádět plynule a bez kmitání výstupního výkonu.



Obr. 4.7 – Omezení výkonu při nadpětí [23]

4.3.2.2 Řízení výkonu v mimořádných stavech

Omezování výkonu obvykle není vyžadováno, pokud je napětí a frekvence v povolených mezích a jsou tedy splněny základní podmínky pro dodržení kvality napětí. Toto právo se tedy aplikuje pouze v mimořádných stavech, kterými mohou být nutné práce na zařízeních nebo předcházení stavu nouze. V těchto případech dochází k řízenému omezování výroby fotovoltaických elektráren, kdy moduly kategorie A musí být schopny se od sítě pouze odpojit. Moduly B, C a D musí umět snižovat svůj výkon podle výkonových stupňů (100 %, 60 %, 30 % a 0 %), kdy při nulovém výkonu musí stále zůstat přifázované, ale bez dodávky do sítě.

Výrobní také musí řídit svůj výkon podle frekvence sítě, kde při nadfrekvenci musí výrobu omezit a naopak při podfrekvenci, kdy by bylo nežádoucí, aby se zdroje odepínaly, udržet výrobu výkonu pokud možno maximální. Je tedy definována oblast, ve které se v tomto případě mohou pohybovat.

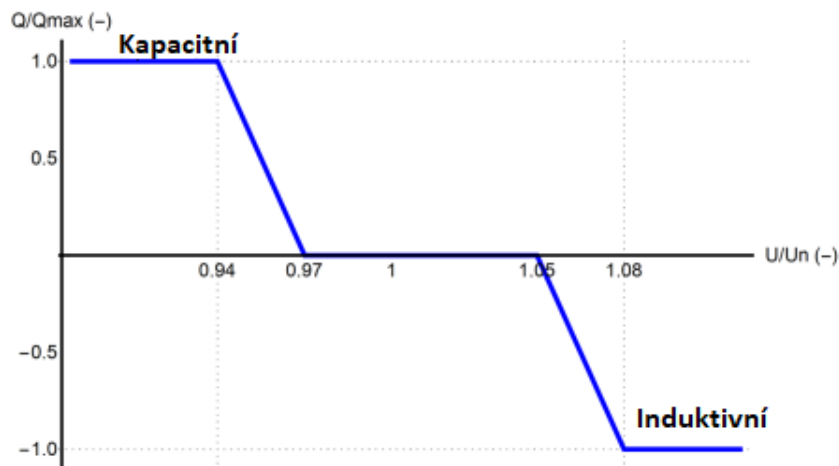
4.3.3 Řízení jalového výkonu

Řízení jalového výkonu je důležitý prvek výroby, kterým můžeme v síti regulovat napětí, případně síť kompenzovat co nejlépe spotřebiteli a regulovat tím ztráty na přenosových a distribučních linkách. Jak už bylo uvedeno v kapitole 4.3.1.1, řízení jalového výkonu probíhá v mezích od $0,9_{\text{kap}}$ do $0,9_{\text{ind}}$. Výroby do 100 kVA instalovaného výkonu, tedy kategorie A, nemusí tuto hodnotu udržovat na konkrétní hodnotě, ale postačí, když ji udrží v požadovaných mezích. Ovšem výroby nad 100 kVA musejí být schopné tuto hodnotu udržovat na konkrétní požadované. Tento požadavek lze udat sedmi způsoby.

- Hodnota jalového výkonu závislá na napětí $Q(U)$
- Zadaná hodnota napětí $U=\text{kons.}$
- Pevná hodnota účinníku $\cos \varphi=\text{kons.}$
- Hodnota jalového výkonu závislá na činném výkonu $Q(P)$
- Hodnota účinníku závislá na činném výkonu $\cos \varphi(P)$
- Hodnota účinníku závislá na napětí $\cos \varphi(U)$
- Fixní hodnoty jalového výkonu $Q=\text{kons.}$

Výběr regulace a její nastavení určuje PDS. Ten buď tuto funkci definuje v zařízení pevně, dohodne se smluvně s majitelem na harmonogramu, nebo pokud to vyžaduje provoz sítě, může tuto hodnotu řídit dálkově. Regulace musí reagovat do určitého času. Například pokud se zadává hodnota účinníku v závislosti na činném výkonu, musí být dosažena ustálená požadovaná hodnota do 10 s. V praxi společnost ČEZ Distribuce používá u výrobních modulů A – C $Q(U)$ regulaci (výjimečně $\cos \varphi=\text{kons.}$ a $U=\text{kons.}$) a regulaci na fixní hodnotu napětí pro moduly D. U regulace jalového výkonu závislé na napětí musí být tato doba nastavitelná v rozmezí 10 s až 1 minuta (jak určí PDS). Vše může být také posouzeno individuálně. Jedná-li se o výrobu se silně proměnným výkonem (větrné, solární), musí být regulátor dostatečně rychlý, aby výroba nezhoršovala kvalitu napětí. Pokud jde o výrobu, která jalový výkon reguluje pomocí kompenzačních kondenzátorů, musí být zajištěno, že tyto kondenzátory nebudou k síti připojené před zapnutím generátoru. Při vypínání musí být odpojeny současně. Zároveň kompenzační zařízení musí být vhodně navrženo, aby nezpůsobovalo filtraci frekvence HDO v daném místě.

Nejdůležitější funkcí, která omezuje dodávku/odběr jalového výkonu a stabilizuje napětí v místě připojení je $Q(U)$ regulace. Jedná se současně o nejčastěji vyžadovanou funkci pro zdroje. Je však nutné vzhledem k velkému očekávanému počtu blízkých zdrojů v síti tuto funkci koordinovat. Funkce jako taková je definována čtyřmi body, které určí PDS podle lokálních podmínek nebo studie připojitelnosti. Znázornění této funkce je na následujícím obrázku (Obr. 4.8), kde jsou uvedeny i typické hodnoty vyžadované společností ČEZ Distribuce.



Obr. 4.8 – Regulační charakteristika pro Q (U) [23]

Z tohoto obrázku je patrné, že pokud poměrná hodnota napětí klesne pod hodnotu 0,94, výrobná musí do sítě dodávat induktivní jalový výkon, tedy chovat se jako připojená kapacita. V tuto chvíli dochází k redukci jalové složky proudu/výkonu, který se přenáší v síti a tedy ke zvýšení napětí podle vzorce (4.3), jelikož nevzniká úbytek na podélné indukčnosti vedení.

$$\Delta U_f = R \cdot I_\zeta + X \cdot I_j = R \cdot \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U} + X \cdot \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (4.3)$$

V oblasti mezi body 0,94 a 0,97, ale i 1,05 a 1,08 dochází lineárně ke změně požadavku na jalový výkon výrobný. V oblasti 0,97 až 1,05 je požadavek na nulový jalový výkon, tedy provoz výrobný s účínkem 1. V části, kde poměrná hodnota napětí je větší, než 1,08, dochází k odběru jalového induktivního výkonu, úbytek napětí v síti roste a klesá tím hodnota napětí v místě připojení.

Největším problémem je, že dříve připojené výrobný nemusí tyto charakteristiky vůbec splňovat. Například pro fotovoltaické elektrárny bylo do roku 2016 uvedeno, že se kompenzace účínku pro zdroje (vesměs kategorie A1) vůbec nevyžaduje a pro vyšší byly definovány pouze meze, kde se musí účíník udržovat. To může aktuálně způsobovat veliké problémy. Od dubna 2017 musí i mikrozdroje splňovat regulační charakteristiky.

4.4 Zpětné vlivy na síť

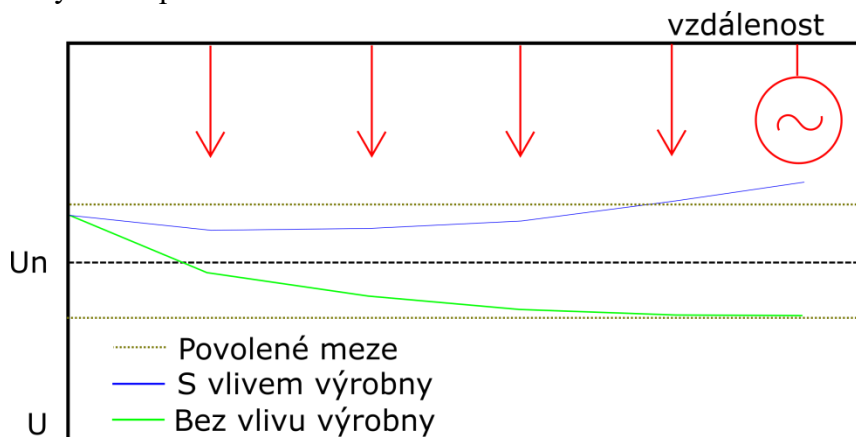
Jak už zde bylo napsáno, výrobná připojená do DS nesmí výrazně zhoršovat kvalitu elektrické energie, jejíž limity jsou uvedeny v [20]. Aby bylo možné tyto vlivy výrobný objektivně posoudit, je v příloze 4 PPDS uvedeno několik základních parametrů a jejich limity, které musí být ověřeny ještě před připojením výrobný. Zpravidla jsou součástí Studie připojitelnosti a jsou nezbytné pro její posouzení.

4.4.1 Zvýšení napětí

Jedním ze sledovaných parametrů je změna hodnoty napětí, která vznikne jako důsledek připojení této výrobný. Je logické, že připojením výrobný dojde ke zvýšení napětí z důvodu změny výkonových toků a tím i úbytků napětí na vedení. Jelikož napětí je

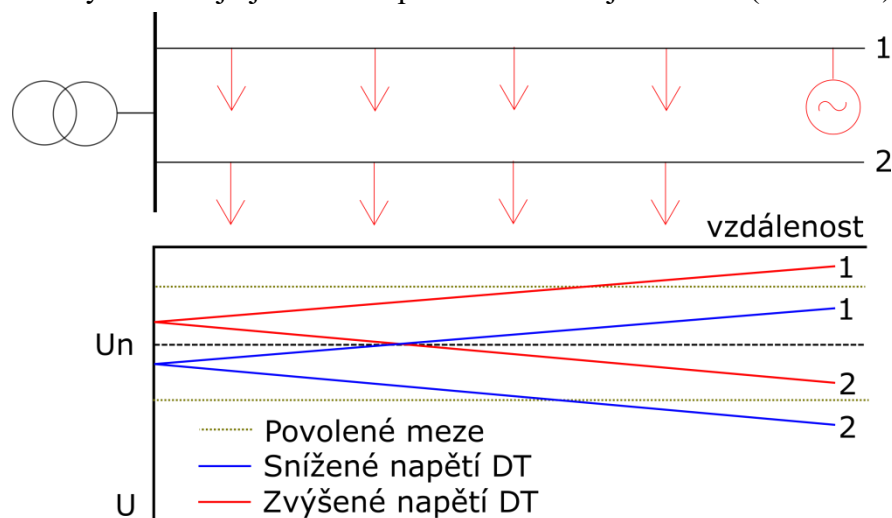
sledovaná veličina a sousední odběratelé by mohly po PDS požadovat finanční kompenzaci, jedná se o důležitou podmínku.

Maximální přírůstek napětí je definován v PPDS a má rozdílný limit pro sítě NN a ostatní (VN, 110 kV). Pro sítě NN musí platit, že přírůstek $\Delta u_{NN} \leq 3\%$. U sítí VN a 110 kV je limit ještě přísnější a povoluje maximálně $\Delta u_{VN,110} \leq 2\%$. Tento přírůstek se musí posuzovat jako přírůstek od skutečné hodnoty napětí v připojovacím místě a ne jako přírůstek od jmenovité hodnoty. Pro sítě na hladině VN je v mimořádných případech (náhradních dodávkách) povoleno provozovat výrobu až do hodnoty zvýšení 5%. Takto nízké přírůstky jsou vyžadovány hlavně z důvodu velké proměnlivosti obnovitelných zdrojů (OZ), aby nedocházelo v síti k náhlému zvyšování a snižování napětí, což by mohlo vést k nedodržení limitů na odchylky napětí definovaných v [20]. Na následujícím obrázku (Obr. 4.9) je znázorněn vliv výroby na velikost napětí u jednotlivých odběratelů při nelimitování zvýšení napětí.



Obr. 4.9 – Vliv připojení výroby na velikost napětí u odběratelů

Jelikož ale zvýšení napětí sledováno je, tento jev by nastávat neměl. Problém avšak může nastat, pokud je z distribučního transformátoru (DT) napájeno více odboček, kde v některých je instalována vnořená výroba a v některých ne. Pro odbočky se zdroji je totiž potřeba nastavit nižší napětí na DT proto, aby mohl tento zdroj dodávat při dodržení mezí napětí. U odbočky bez zdrojů je to však opačně. To ukazuje obrázek (Obr. 4.10).



Obr. 4.10 – Vliv výroby na velikost napětí v sousední odbočce

Stejné limity platí i pro zvýšení napětí během spínání, ovšem pokud bude frekvence spínání nižší než jednou za 90 s. Pro vyšší frekvenci spínání platí limity jiné. S ohledem na minimalizaci zvyšování napětí během spínání je vhodné, aby se výrobní moduly výrobní spínaly postupně a zároveň koordinovat spínání více výroben připojených do stejného místa.

Pro síť 110 kV platí, že nesmí při spínání jednotlivého výrobního modulu (jedna větrná turbína, ...) dojít ke zvýšení napětí o 0,5 % a u celého připojovaného objektu (větrný park, ...) o 2 %.

4.4.2 Nesymetrie napětí

Nesymetrie napětí v síti způsobená připojením výrobní se týká především výroben, které jsou do DS připojené jednofázově. Tento limit je určen normou [20], která uvádí, že maximální hodnota zpětné složky napětí musí být v rozsahu 0 – 2 % složky sousledné. Tedy:

$$U^{(2)} \leq 0,02 \cdot U^{(1)} \quad (4.4)$$

To se týká napětí v celé síti. Pro jednotlivé odběry platí, že nesmí způsobovat nesymetrii takovou, aby hodnota zpětné složky napětí byla větší než 0,7 % složky sousledné. V PPDS je rovněž uvedeno, že zvýšení napětí při jednofázové dodávce je až šestinásobné oproti zvýšení při třífázové dodávce stejného výkonu.

4.4.3 Flikr

Vlivem nestálosti slunečního svitu může být fotovoltaické elektrárna zdrojem flikru. To je dáno zvýšením napětí během dodávky a následným poklesem v době bez výroby elektrické energie. Zde je nutné dodržet limity uvedené v PPDS, které definují maximální míru dlouhodobého vjemu flikru $P_{lt} \leq 0,46$ způsobenou zdrojem. Ta lze orientačně spočítat jako:

$$P_{lt} = c \cdot \frac{S_n}{S_k} \quad (4.5)$$

kde c je činitel flikru

S_n je jmenovitý výkon výrobní

S_k je zkratový výkon v místě připojení

4.4.4 Vyšší harmonické

Tento problém se týká především výroben se střídačem nebo měničem kmitočtu na výstupu. Veškerá výkonová elektronika totiž způsobuje emisi vyšších harmonických, které ruší citlivá zařízení a obecně zhoršují výsledný tvar napětí. PPDS uvádí maximální hodnotu proudu pro každou harmonickou vztaženou na zkratový výkon soustavy pro různé napěťové hladiny. Tabulky s povolenými hodnotami jsou uvedeny v příloze na obrázcích (Obr. 11.2, Obr. 11.3, Obr. 11.4).

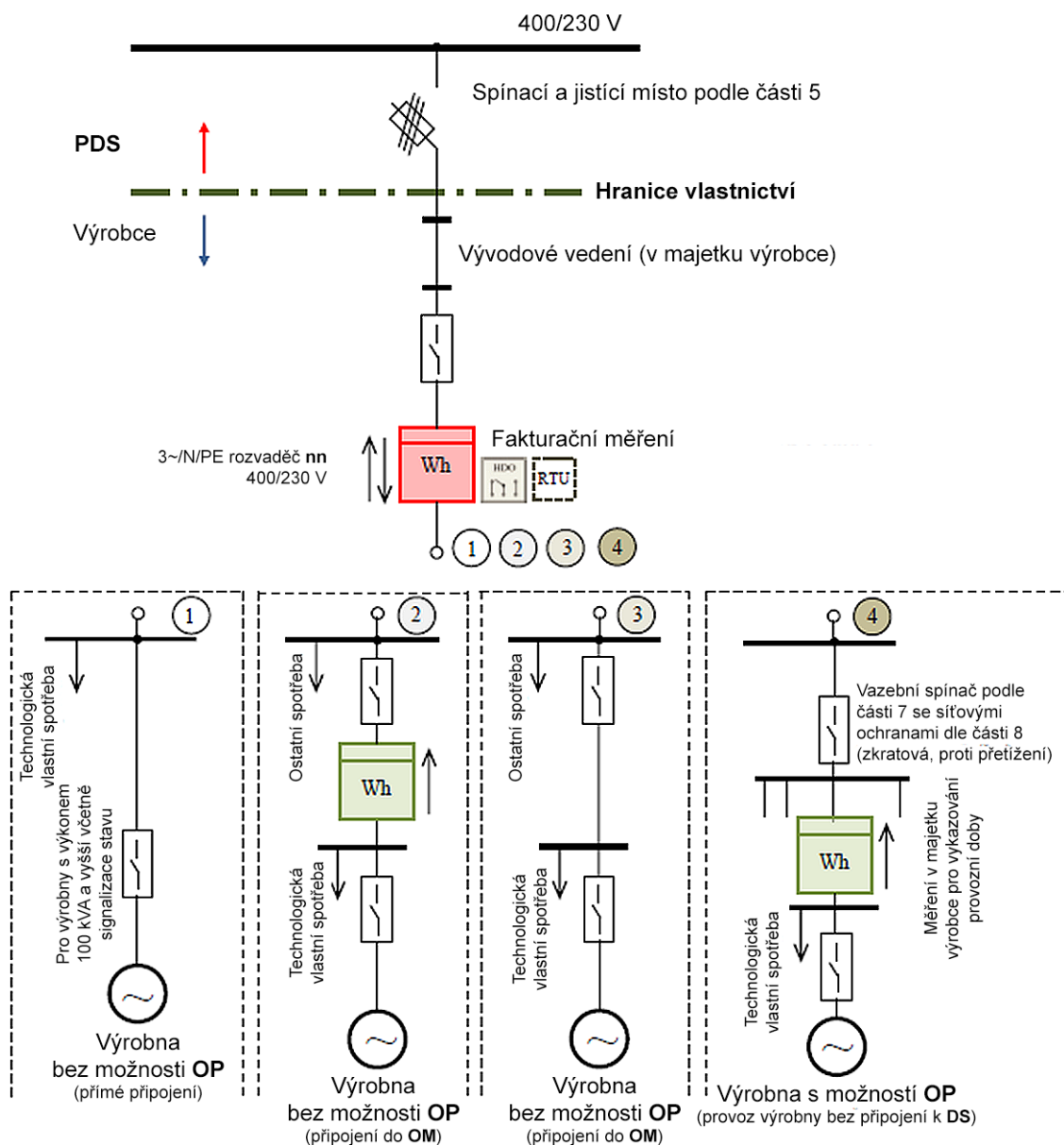
Zdroje musí splňovat dalších mnoho požadavků jako je například možnost dálkové komunikace, neovlivnění signálu HDO. Všechny tyto požadavky jsou uvedeny v PPDS příloha 4.

Tato kapitola byla zpracována s využitím informací publikovaných v [19], [20], [22], [23], [24], [25], [26].

5 Způsoby připojení výroben do DS

V předchozí kapitole 3 byly popsány základní prvky solární elektrárny. V této kapitole budou předvedeny možnosti zapojení těchto prvků. Jelikož je tato práce věnována analýze vlivu výroby na DS nízkého napětí, bude dále rozebíráno pouze zapojení do této napěťové hladiny.

5.1 Systémy bez možnosti akumulace



Obr. 5.1 – Způsoby zapojení výroben bez možnosti akumulace do sítě NN [19]

Tento obrázek (Obr. 5.1) znázorňuje všechny základní možnosti připojení výroby do DS. Je z něho také patrné veškeré vybavení daného vývodu výroby. Horní část obrázku je pro všechny čtyři varianty společná. Z přípojného bodu je veden vodič na jističí prvek odbočky z vedení. Ten je ve vlastnictví PDS a slouží k jistění vedení. Dále se

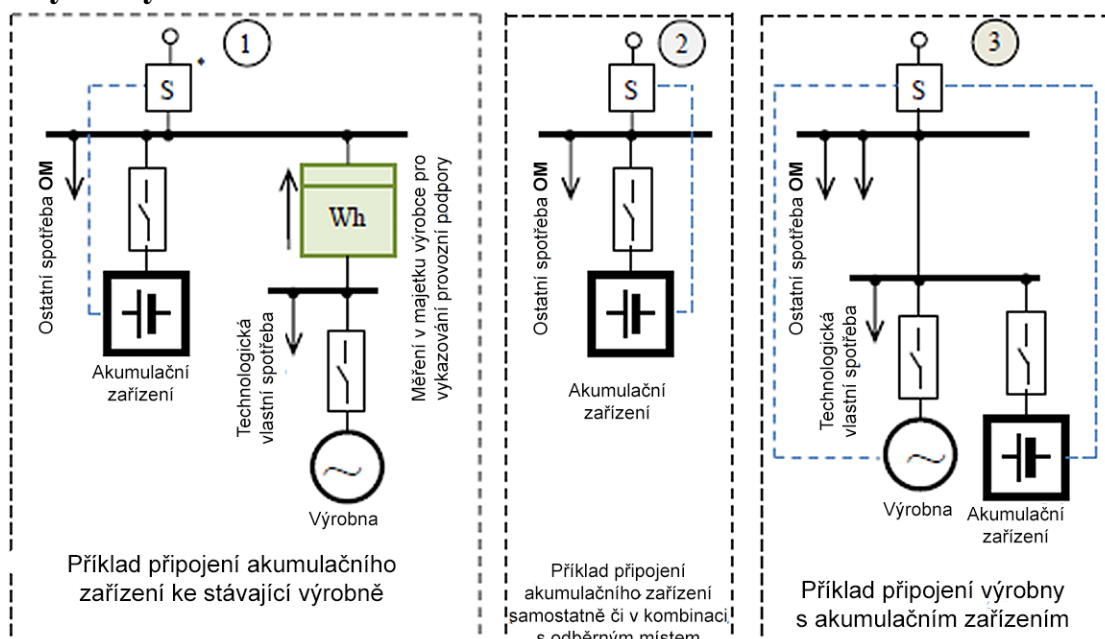
pokračuje vývodovým vedením k hlavnímu spínacímu a jističímu prvku (hlavní jistič) v objektu provozovatele výroby. Poté již následuje fakturační měření objektu.

V případě varianty 1 je výroba připojena přes generátorový vypínač do DS. Jedná se tedy o objekt, sloužící pouze k výrobě elektřiny a spotřeba je možná pouze pro vlastní spotřebu výroby. Připojování a odpojování výroby je prováděno pomocí generátorového vypínače.

Další variantou je varianta 2 a 3. Zde je výroba připojena pouze do odběrného místa (OM) přes generátorový vypínač. Rozdílem oproti první variantě je možnost napájení vlastní spotřeby, pokud musí být výroba odpojena od DS pomocí vazebního vypínače. Pořád ale nemůže být provozován ostrovní provoz (OP), protože po odepnutí vazebního vypínače se běžná spotřeba objektu odpojí od výroby. Provozování vlastní spotřeby však nedává velký smysl, pokud se jedná o solární elektrárny. Tato možnost je více důležitá pro točivé generátory, které mohou zůstat na otáčkách, být nadále nabuzené na jmenovité napětí a mohou být tedy kdykoliv připojeny zpět k síti. Rozdílem mezi variantou 2 a 3 je měřicí zařízení PDS. To slouží pro prokazování podpory sítě a je tedy zbytečné, pokud tuto funkci výroba nepodporuje.

Poslední je varianta 4, kdy je vazební vypínač umístěn z pohledu výroby až za vývody pro běžnou spotřebu objektu. Pokud tedy dojde k nucenému odpojení od sítě vazebním vypínačem, spotřeba objektu je následně napájena přímo výrobním zařízením. Tato varianta tedy podporuje ostrovní provoz. Pokud ale bude výroba v ostrovním režimu, je nemožné splnit podmínku, že zpětné připojení bude provedeno při nulovém výkonu při postupném najíždění. V tomto případě může být výroba připojena zpět až po 20 minutách odpojení.

5.2 Systémy s akumulací

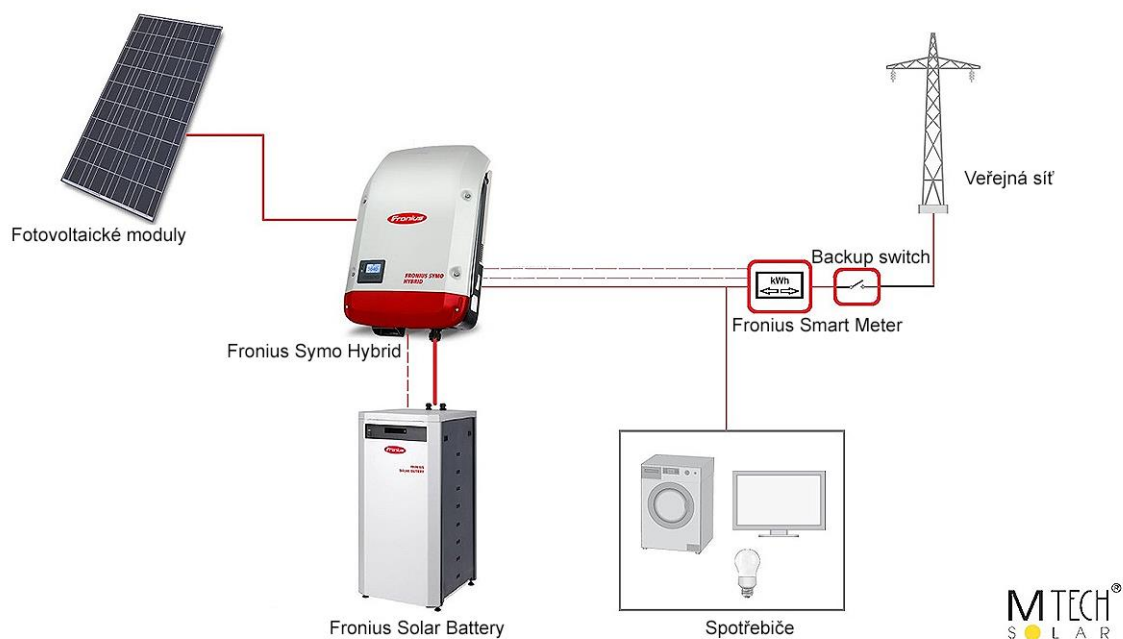


Obr. 5.2 – Zapojení akumulčního zařízení do sítě NN [19]

Na obrázku (Obr. 5.2) jsou uvedeny 3 varianty připojení akumulčního zařízení do stávajícího objektu. První varianta znázorňuje možnost zapojení akumulčního zařízení k již existující výrobně připojené přímo do DS. V tuto chvíli akumulční zařízení pracuje naprosto samostatně od výroby. Výrobna i akumulční zařízení mají vlastní vývodový vypínač.

Varianta 2 znázorňuje možnost připojení samostatné akumulce do objektu, ve kterém není provozována výrobna a to například pro vykrytí výkonových špiček nebo jako záložní zdroj v důležitých podnicích.

Třetí varianta znázorňuje nejpoužívanější způsob připojení výroby s akumulací k DS a OM, alespoň co se týká fotovoltaické elektrárny. V tuto chvíli výrobna pracuje paralelně s akumulací a takto pracují společně do OM a DS. V praxi se používá kombinace měniče a akumulčního zařízení v jednom přístroji. Tento přístroj má pouze jeden vypínač a jeden střídač, protože baterie se dobíjejí ze stejnosměrného vedení od solárních panelů. Výsledná konfigurace, která je primárně použita i v rámci projektu Interflex, může být provedena podle obrázku (Obr. 5.3).



Obr. 5.3 – Zapojení solárního systému s akumulací [27]

Tato kapitola byla zpracována s využitím informací publikovaných v [19].

6 Vyhodnocení provozu FV elektrárny s akumulací

V této části bude vyhodnocována FV elektrárna s akumulací pracující do DS nízkého napětí. Výrobná je umístěna na střeše rodinného domu na vesnici. Zdrojem energie pro celý systém jsou fotovoltaické panely o maximálním špičkovém výkonu 5,2 kWp. Co se baterie týče, je zde použita technologie Li-ion o kapacitě 9,6 kWh a výkonu 6,4 kW. Srdcem celého systému je měnič Fronius Symo Hybrid, který je řízen charakteristikami $P(U)$ a $Q(U)$. Výstupní součtový výkon je omezen na 50 % instalovaného špičkového výkonu, tedy 2,6 kW. Střídač však pracuje symetricky, což se projeví na nesymetrickém zatížení fází vlivem nerovnoměrného zatížení spotřebiči objektu. Spojení střídače, akumulacního zařízení je provedeno pomocí takzvaného DC-COUPLINGu, tedy stejnosměrnou spojkou. Názorně lze toto vidět na předchozím obrázku (Obr. 5.3) případně na variantě C z příkladů zapojení s akumulací (Obr. 5.2). Střídač měří v pětiminutových intervalech průměrné hodnoty následujících veličin.

- Fázové napětí každé fáze
- Výkon dodávaný střídačem
- Výkon dodávaný solárními panely
- Úroveň nabití baterie
- Výkon spotřebovávaný objektem
- Výkon odebíraný/dodávaný do sítě
- Výkon dodávaný/odebíraný z baterie
- Činný výkon všech fází
- Zdánlivý výkon všech fází

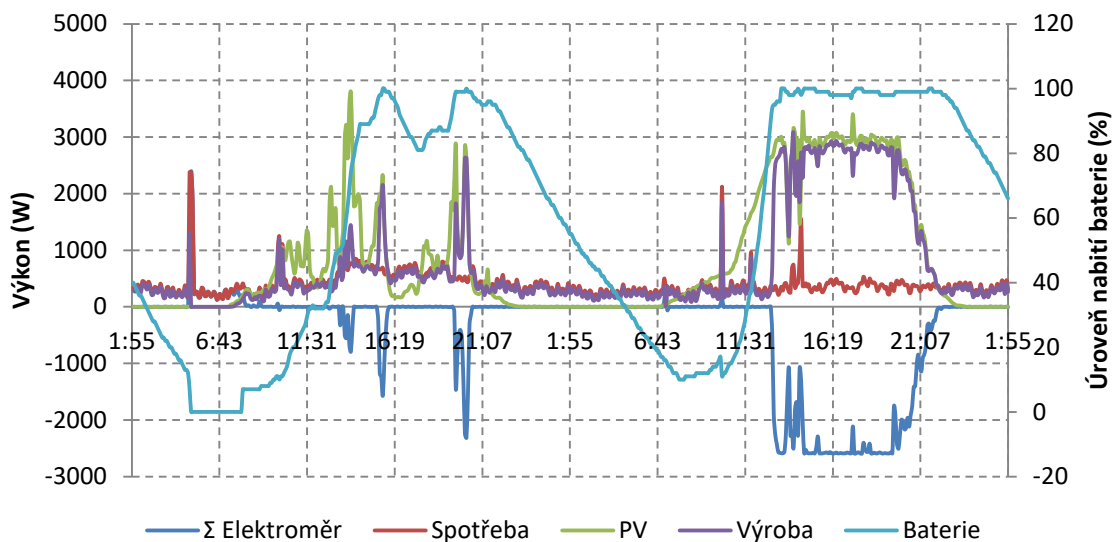
V přípojném místě je instalován síťový analyzátor, který měří u jednotlivých fází napětí a proud, činný, jalový a zdánlivý výkon a harmonické zkreslení THD proudů i napětí. Veškeré tyto hodnoty jsou logovány v minutových intervalech. Vždy je možné zobrazit maximální, minimální a průměrnou hodnotu. Lze tedy i usuzovat chování dané veličiny v tomto minutovém intervalu.

Pro následující vyhodnocování jsou dostupná data za celý kalendářní rok 2019. Pouze pro síťový analyzátor chybí data za období cca dvou měsíců z důvodu poruchy přístroje. Zpracování těchto dat bude probíhat v tabulkovém procesoru Microsoft Excel.

6.1 Průběh měřených hodnot

Výroba fotovoltaické elektrárny má jednu hlavní nevýhodu. Její výkon není v průběhu dne stálý. V některých dnech však může být výroba nestálá i během dne, kdy normálně dodává plný výkon. Jelikož se jedná o výrobní sloužící k odlehčení sítě, je prioritou, aby byl odebíraný výkon nulový. Z tohoto důvodu výrobná začíná energii dodávat do DS až v době, kdy je baterie téměř nabitá, protože klesne maximální nabíjecí proud a výkon z fotovoltaických panelů nelze jinak zužitkovat v objektu. V tuto dobu

dodává pouze to, co vyrobí fotovoltaické panely, tedy do sítě se nedodává z baterie. Toto lze vidět na následujícím obrázku (Obr. 6.1), kde jsou výkony orientovány spotřebičově, tedy záporná hodnota znamená dodávku do DS. Tmavomodře je zde znázorněn součet výkonů všech tří fází na elektroměru. Červeně je znázorněn výkon odebíraný objektem, který je po většinu času pokrýván výkonem vyráběným střídačem. Světle modře je znázorněna úroveň nabití baterie.



Obr. 6.1 – Průběh měřených veličin v průběhu dvou dní

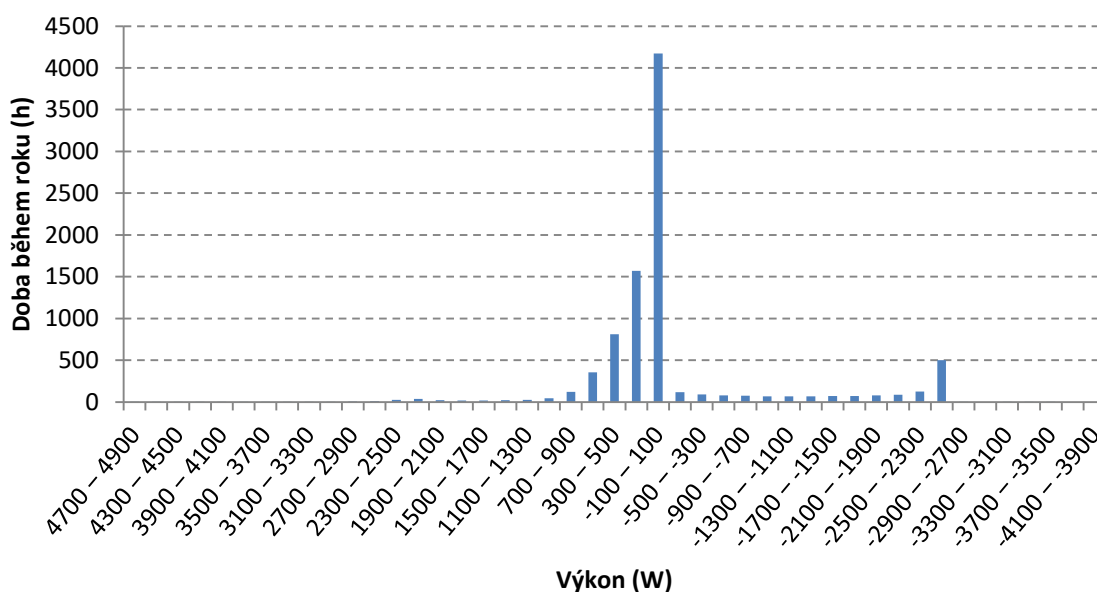
Tento fakt může mít za následek to, že v případě nestálého slunečního svitu v průběhu dne může docházet k častým změnám v dodávaném výkonu a tím i zvyšování flickru v síti. Je zde však patrné, že i ve dnech s menším slunečním svitem je odběr energie z DS nulový a ve chvílích, kdy je výroba vyšší a baterie nabita, je energie do DS dodávána.

Z uvedeného grafu je rovněž viditelné, že kapacita instalované baterie je navržena tak, že nabíjecí cyklus probíhá ve většině případů od 100 % do méně než 10 %. To může ve dnech, kdy se baterie tolik nenabije případně je vyšší odběr (víkend) způsobit nedostatek uložené energie a objekt začne energii ze sítě odebírat. Je ovšem nutné podotknout, že se jedná o den 16. a 17. 6. 2019, což je neděle a pondělí. Funkce omezení přetoku výkonu do DS je zde na první pohled patrná a je také znatelné, že nikde nebyla překročena. Více se tomuto problému bude věnovat kapitola 6.2.

Je zde také znát, že v případě dodávky elektrické energie do DS nedochází k okamžitému připnutí zdroje, ale nárůst je pozvolný, což je velice důležité z hlediska omezení flickru, tedy skokového nárůstu napětí v síti. Problémům s napětím v síti se bude věnovat kapitola 6.3. Dále může být zavádějící, že v době, kdy je součtový výkon na elektroměru rovný nule je spotřeba vždy větší, než je výroba. To není způsobeno chybou měření, ale tím, že ve spotřebě jsou započítány také ztráty, které na střídači vznikají. Tomuto problému se bude věnovat kapitola 6.6.

6.2 Analýza přetoků do sítě

Z předchozího obrázku je vidět, že hodnota součtového výkonu elektroměru byla vždy buď nulová, nebo záporná, tedy objekt se vždy choval jako zdroj. Jak je to s tokem výkonu na elektroměru v průběhu celého roku 2019 ukazuje následující obrázek (Obr. 6.2). Ten byl vytvořen zpracováním dat ze střídače. Ze všech hodnot byla určena četnost naměřených výkonů v rozmezí hodnot po 200 W. Jelikož se jedná o pětiminutové intervaly, lze po vydělení počtu hodnot daného intervalu číslem 12 získat dobu trvání tohoto výkonu v průběhu roku v hodinách. Například výkon z intervalu -100 W až 100 W včetně se v datech vyskytuje 50074 krát, což odpovídá téměř 4172 h.



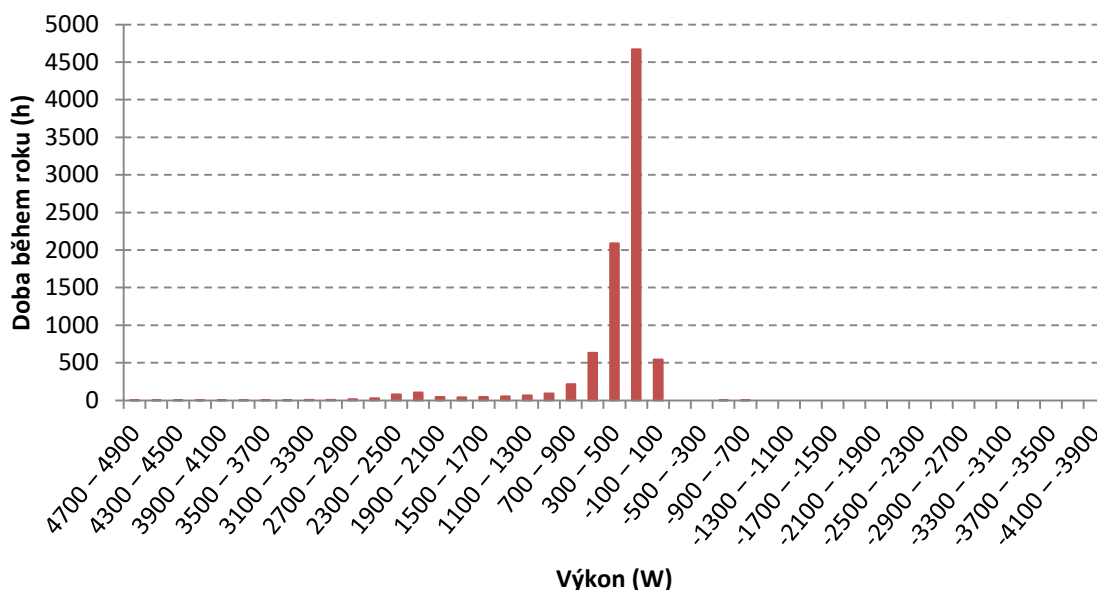
Obr. 6.2 – Graf trvání součtového výkonu elektroměru v průběhu roku 2019

Zde je jasně patrné to, co plyne z logiky nastavení střídače. Jelikož je požadováno pokrytí spotřeby rodinného domu, má nejdelší trvání v průběhu roku nulová hodnota výkonu. Ta trvala s rozsahem ± 100 W téměř 48 % roku. Další velice znatelnou částí tohoto rozložení výkonu je odběr objektu do hodnoty 1 kW. To je dáno hlavně slabým a proměnlivým svitem v zimním období případně velkou energetickou náročností například o víkendových dnech, kdy energie z fotovoltaických panelů na pokrytí rodinného domu nestačí. Dalším významným bodem je hodnota maximálního dodávaného výkonu, tedy 2,6 kW. Tento výkon byl dodáván do DS téměř 6 % času v roce. Poslední částí je rozsah výkonů mezi výkonovou nulou a maximálním dodávaným výkonem. To je způsobeno tím, že energie z baterie není využívána pro dodávku do sítě a sluneční svit je poměrně nestabilní nebo se z velké části jedná o období, kdy slunce zapadá a výkon solárních článků postupně klesá.

6.2.1 Bez vlivu výroby

Při pohledu na chování objektu za celý rok z pohledu vyrobené/odebrané energie, se zjistí, že objekt do distribuční sítě dodal 1228,5 kWh. To je dáno tím, že plný výkon byl dodáván sice kratší dobu, než odebírané výkony, ale byl násobně vyšší. Z tohoto důvodu

bude zajímavé podívat se na stejný graf, kdy se odebere vliv výroby. K hodnotě výkonu na elektroměru se pro každý pětiminutový interval přičte hodnota výkonu dodávaného střídačem. Tímto lze snadno získat pohled na stejný rodinný dům, ve kterém není zdroj instalován.

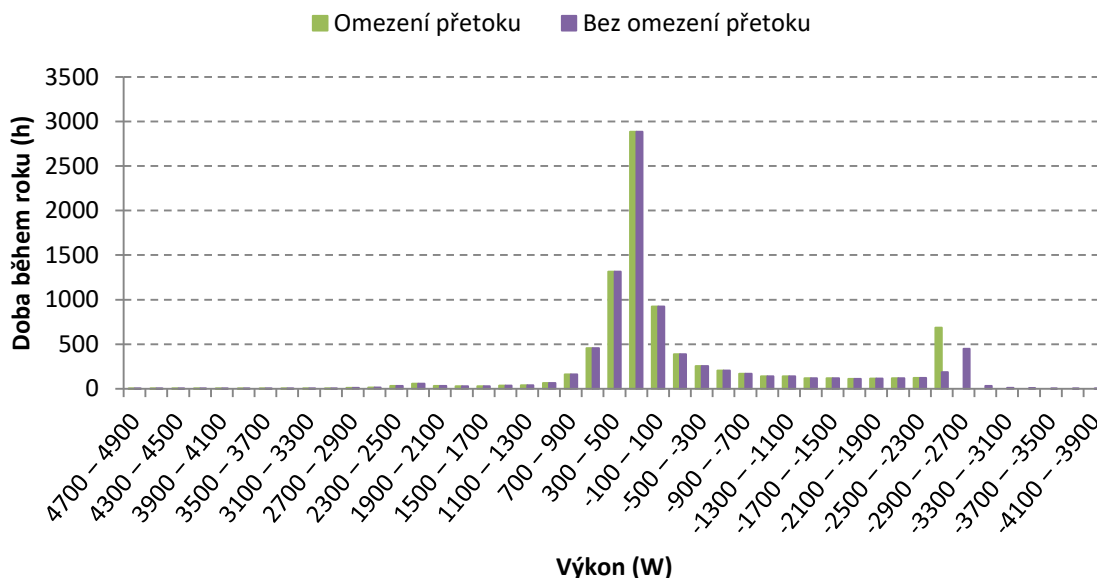


Obr. 6.3 – Graf trvání součtového výkonu elektroměru v průběhu roku 2019 bez vlivu výroby

Z tohoto grafu je patrné, že výkon, který rodinný dům odebíral nejčastěji, byl v intervalu od 100 do 300 W. Tento výkon se odebíral 4671 hodin v roce, tedy po 53,3 % roku. To není nic nečekaného, jelikož v rodinných domech se nachází spousta spotřebičů, které běží neustále (síťové prvky, kamery, lednice, mrazák, TV, ...). Co je ale na grafu viditelné a pro toto vyhodnocení patrné je, že bez vlivu výroby objekt z DS odebírá po značnou část roku vyšší výkon, který je nutné pro tento objekt v síti rezervovat. Pomocí FV výroby lze dosáhnout připojení více odběratelů bez zásahu do DS. Největší nárůst doby trvání výkonu je okolo hodnoty 2,3 kW, což odpovídá běžným výkonným spotřebičům v RD, které se používají nárazově. Tím je hlavně rychlovarná konvice, elektrický vařič a ohřev TUV.

6.2.2 Bez vlivu akumulace

Dalším velice zajímavým pohledem může být vyřazení akumulace z této výroby pro porovnání jejího vlivu na DS. Je jasné, že akumulace způsobí stabilizaci výkonu odebíraného z DS. Protože výstupní výkon je normálně omezen na hodnotu 2,6 kW, provede se toto omezení pro porovnání také u této analýzy. Z vnitřního měření je možné k tomuto účelu využít výkon dodávaný FV panely. Z předchozího porovnání je k dispozici výkon odebíraný RD bez uvažování výroby. Od těchto hodnot postačí odečíst hodnotu výkonu, která je dodávána těmito panely, jelikož dodávka je symbolizována záporným výkonem.



Obr. 6.4 – Graf trvání součtového výkonu elektroměru v průběhu roku 2019 bez akumulace

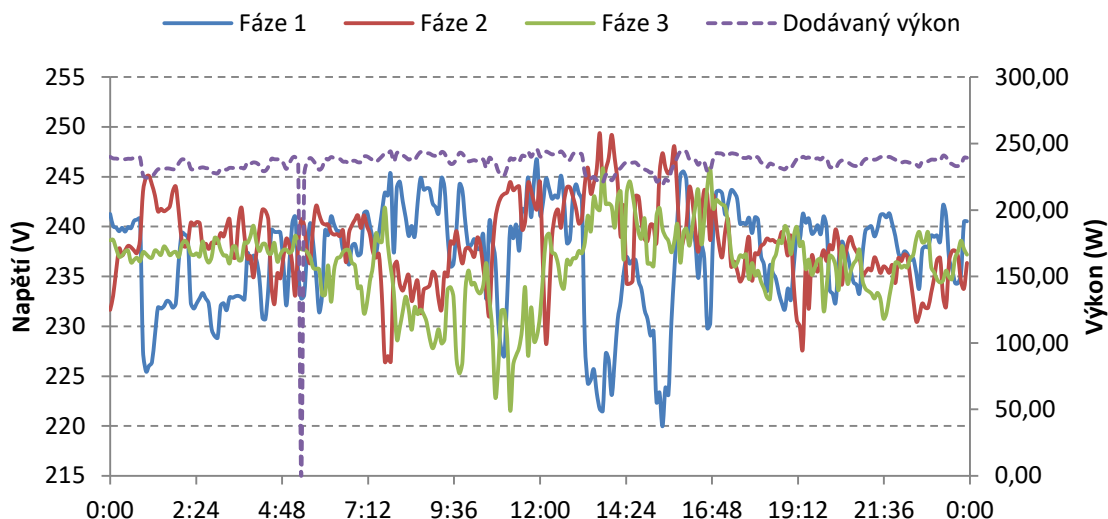
Z tohoto porovnání je jasně viditelné, že výrobní by snížila výkonové špičky a podstatně snížila dobu odebrání výkonu ze sítě, ale dodávka by probíhala v celém výkonovém pásmu téměř rovnoměrně. Ovšem z důvodu absence baterie, která dorovnávala výkonové špičky odběru lze očekávat, že změna dodávaného výkonu ze sítě by byla mnohem více proměnlivá a objekt by se stal větším zdrojem flikru. Navíc by došlo k značné ztrátě energie při omezení na 2,6 kW, protože energie by nebyla kam ukládat.

6.2.3 Porovnání výsledků

Z provedených analýz a vytvořených grafů trvání výkonu je patrné, že umístění výrobní s akumulací napomůže odlehčení sítě velice znatelně. Rodinný dům se z dlouhodobého hlediska choval jako zdroj, čímž jistě napomohl odlehčení celé napájecí větve tím, že dodal energii nejbližším objektům na co nejkratší vzdálenost. Akumulace jako taková napomohla k vyrovnání výkonových špiček objektu a z velké části roku se objekt stal na DS nezávislý, což může být vhodné i při výpadku sítě při poruchách. Pro dosažení soběstačnosti i v zimním období by pravděpodobně stačilo navýšení kapacity akumulátoru, protože úroveň nabití baterie byla téměř plně vyčerpávána i v letních měsících. Energie uložená v slunných dnech nebo dnech s malým odběrem objektu by mohla napomoci překlenout zatažené dny případně dny s velkým odběrem elektrické energie.

6.3 Vliv výrobní na kvalitu napětí

Jelikož střídač dodává energii do sítě symetricky, je jasné, že na zlepšování symetrie napětí se podílet nebude. Ovšem každopádně se bude podílet na zvyšování napětí a to podle již dříve uvedeného vzorce (4.3). Pokud tedy výrobní dodává výkon do DS, otočí se směr toku výkonu a dojde ke zvýšení napětí. Tento jev je patrný na následujícím grafu (Obr. 6.5).

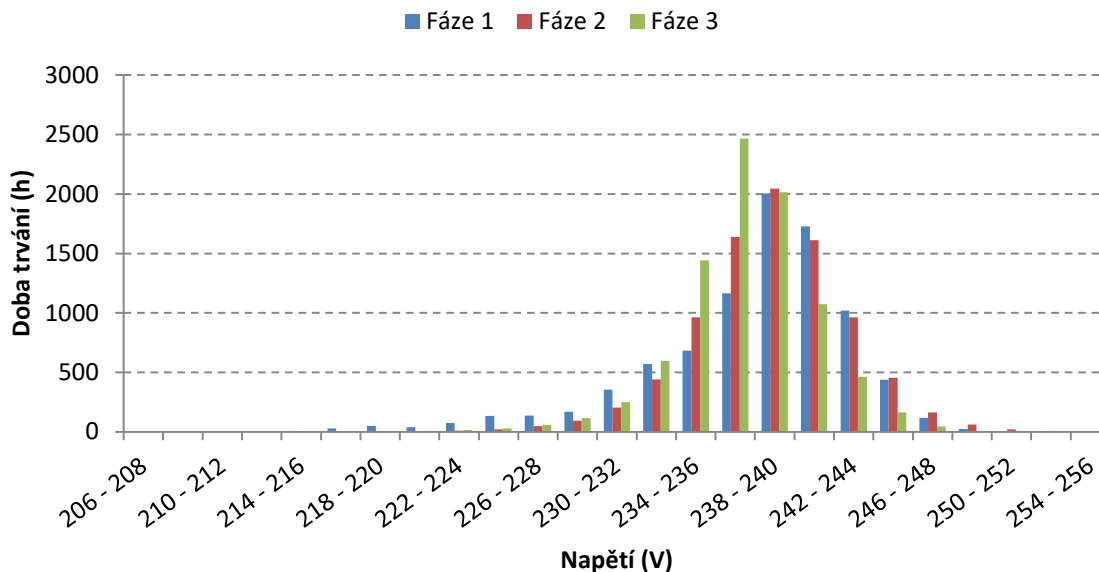


Obr. 6.5 – Průběh napětí jednotlivých fází 19. 5. 2019

Na tomto obrázku je patrný vztah mezi výkonem do DS dodávaným a velikostí napětí. Ke zvýšení v druhé a třetí fázi dochází ve chvíli, kdy zdroj dodává výkon, o přibližně 5 V. Naopak je zde i krásně vidět pokles napětí v první fázi při skokovém nárůstu odebíraného výkonu. Tento pohled na hodnoty napětí by se hodil pro vyhodnocování flikru, ale jelikož se jedná o pětiminutové intervaly, nebyly by data vypovídající.

6.3.1 Dodržení limitů napětí podle ČSN EN 50 160

Norma ČSN EN 50 160 definuje jako jmenovité napětí sítě NN hodnotu 230 V efektivní hodnoty. Aby toto napětí vyhovovalo z hlediska jeho kvality je nutné, aby jeho hodnota byla po 95 % času v intervalu $\pm 10\%$ a po 100 % času v intervalu $+10/-15\%$. Toto měření se provádí v desetiminutových intervalech za období jednoho týdne. Během těchto desetiminutových intervalů se měří průměrná hodnota jmenovitého efektivního napětí. Tato metoda tedy nesleduje krátkodobé děje a změny napětí způsobené poruchami v síti či spínacími přepětími případně poklesy při spínání nelineárních zátěží. Tyto hodnoty by byly předmětem zkoumání při analýze flikru. Pro první pohled se vykreslí doba trvání hodnot napětí jednotlivých fází v roce. Toto je znázorněno na následujícím grafu (Obr. 6.6).



Obr. 6.6 – Doba trvání hodnot napětí v průběhu roku 2019

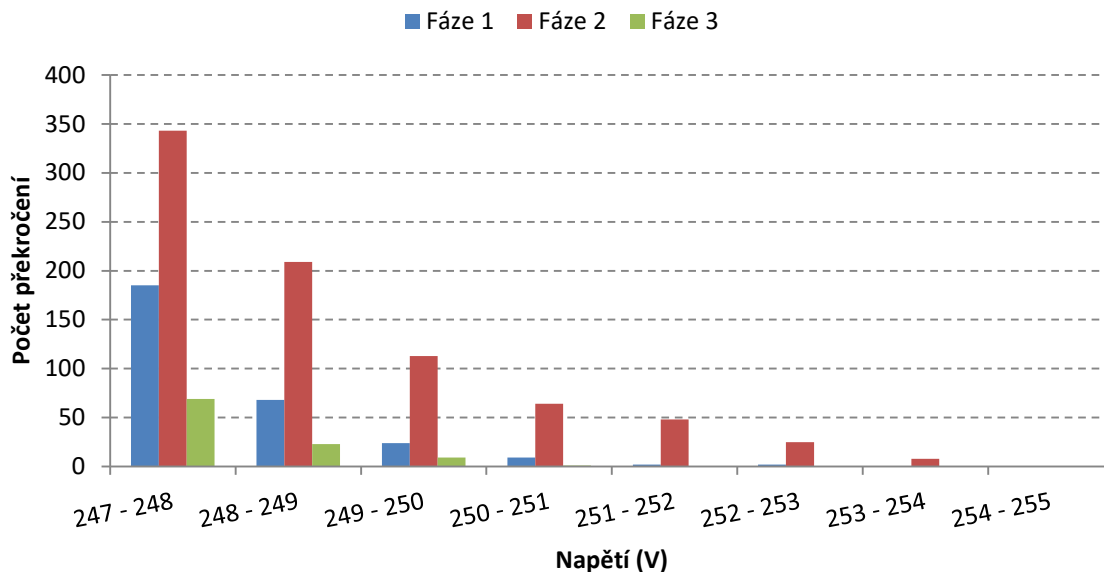
Pro vyhodnocení velikostí napětí je nejprve nutné určit číselně mezní hodnoty napětí.

Tab. 6.1 – Mezní hodnoty napětí v absolutních číslech

+10 %	253 V
-10 %	207 V
-15 %	195,5

Už z tohoto grafu (Obr. 6.6) je patrné, že pod hodnotu napětí 195,5 V se nikdy nedostaneme a jelikož nás zajímá vliv výroby, která napětí zvyšuje, není to ani předmětem tohoto porovnávání. Jelikož všechny hodnoty napětí, které jsou v grafu zakreslené, se v datech vyskytují, lze s jistotou říci, že hodnota 253 V překročena byla. Je však třeba zdůraznit, že norma definuje desetiminutové intervaly a data obsahují intervaly pětiminutové. Může tedy nastat situace, že v jednom intervalu bude napětí překročeno a v následujícím bude nízké natolik, že průměrná hodnota limit splňovat bude. Proto je třeba vždy dva po sobě jdoucí intervaly zprůměrovat a teprve poté sledovat dodržení kvality napětí coby do jeho velikosti.

Zde již lze dostat zajímavé výsledky. Jen pro zpřesnění, metodika výpisu četnosti hodnot napětí spočívá v tom, že například hodnota 250 V znamená počet hodnot menších nebo rovných 250 V a zároveň větších než 249 V. Jde tedy o to, že tato hodnota nebyla překročena. Výsledky této analýzy jsou na následujícím grafu (Obr. 6.7).

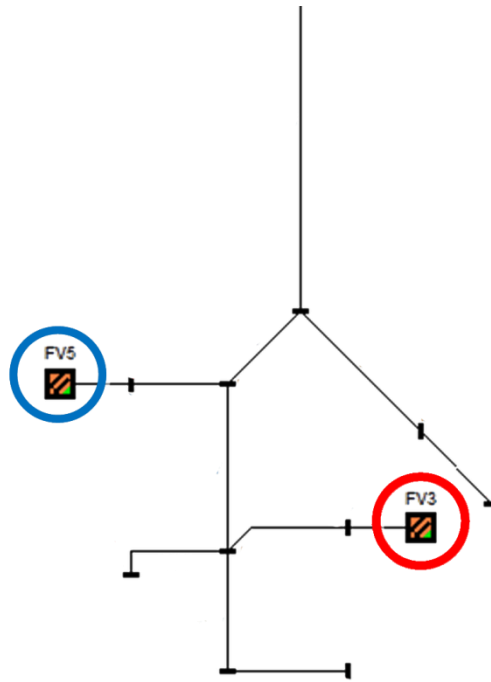


Obr. 6.7 – Počet překročení napětí měřeného v desetiminutových intervalech

K překročení došlo pouze v druhé fázi a to celkem osmkrát v průběhu roku. Zajímavější je ovšem pohled na data, kdy k překročení došlo. Jedná se o tyto dny a hodiny.

- 23. 2. 13:40
- 24. 2. 13:40
- 27. 2. 15:40
- 20. 3. 14:20
- 30. 3. 13:40
- 20. 4. 13:40
- 17. 5. 2:10
- 19. 9. 13:50

Zde je nejvíce zajímavé, že k překročení napětí dochází až na jeden případ v jarních nebo podzimních měsících a ne během léta, kdy je dosažitelný výkon největší. Ve dnech 23. a 24. 2. se jedná o víkend s velice nestálým špičkovým odběrem. Pravděpodobně se jedná o pomalou dynamiku střídače. V obou těchto dnech nastalo překročení v době, kdy došlo ke skokovému odběru v první fázi a vlivem symetrické dodávky střídače a omezení součtovým výkonem došlo k zvýšení dodávky do zbývajících dvou fází. Stejně je tomu ve dnech 20. a 30. 3. kdy docházelo k výkonovým špičkám v první fázi. Ovšem překročení dne 27. 2. nemůže být způsoben touto výrobou, ale výrobou umístěnou nedaleko, jelikož zde v tuto dobu nedošlo k žádnému nárůstu výkonu v některé fázi a měnič dodával do DS konstantní plný výkon. V blízkosti analyzované výroby (označena červeně) se totiž nachází další výroba (označena modře). Výřez sítě je znázorněn na obrázku (Obr. 6.8). Stejně tomu bylo dne 20. 4. a 19. 9. jelikož v objektu k ničemu zvláštnímu nedocházelo. Nejzajímavější je den 17. 5., kdy došlo ke zvýšení v noci, konkrétně ve 2:10. To je způsobeno tím, že došlo k extrémnímu propadu napětí v první fázi až na hodnotu 215 V.



Obr. 6.8 – Schéma sítě s výrobou

Celkem tedy v průběhu roku došlo k nedodržení kvality napětí podle normy ČSN EN 50 160 sedmkrát, protože 23. a 24. 2. je jeden týden a norma kvalitu posuzuje v rámci týdenního měření. Z toho však 3x došlo ke zvýšení vlivem jiné výroby. Tato výroba tedy nedodržela normu celkem čtyři týdny v roce.

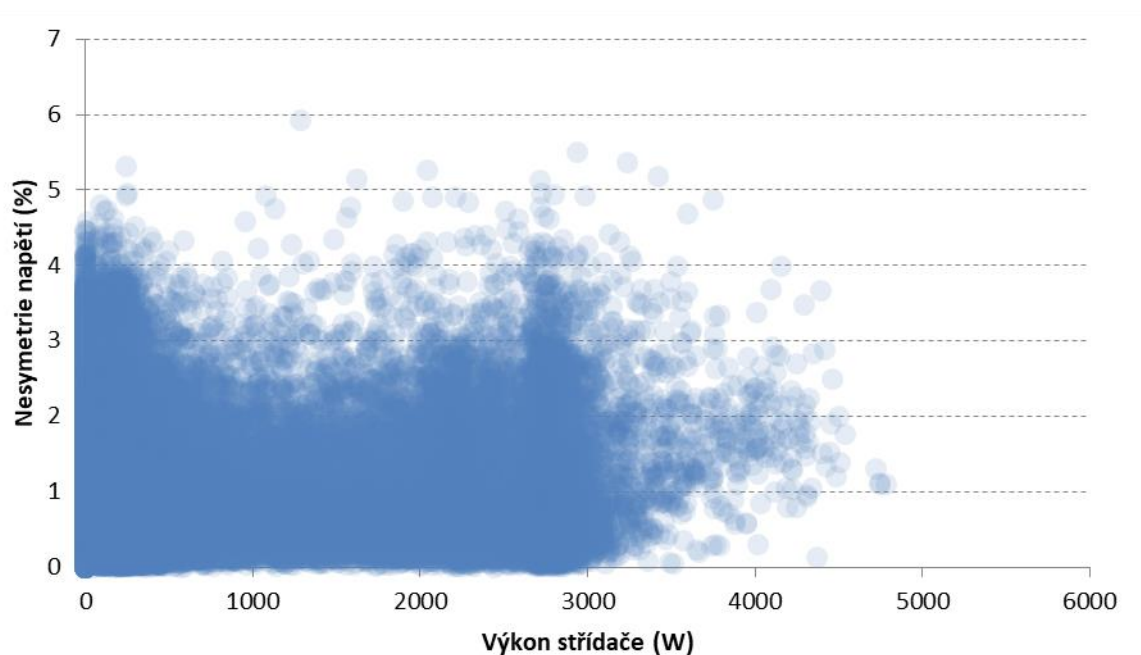
6.3.2 Nesymetrie napětí

Dle normy ČSN EN 50 160 musí být 95 % desetiminutových středních hodnot zpětné složky napětí v rozsahu 0 až 2 %. Jelikož však není známa informace o fázové poloze jednotlivých napětí, budeme uvažovat, že mezi každým fázorem je posun 120° a soustava se liší pouze její velikostí. Jelikož při tomto výpočtu se pracuje s komplexními čísly, je vhodné tento výpočet provést ve výpočetním programu Matlab a do programu Excel tyto hodnoty pouze zpětně naimportovat.

Nesymetrie se podle normy určí jako $\frac{u_2}{u_1}$ kde hodnou těchto složek napětí se určí jako:

$$\begin{bmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{u}_2 \\ \bar{u}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

kde \bar{a} je komplexní jednotka $-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$



Obr. 6.9 – Nesymetrie napětí v závislosti na vyráběné energii

Na obrázku (Obr. 6.9) je znázorněno v jakých hodnotách se pohybuje nesymetrie napětí v závislosti na energii vyráběné střídačem. Už z tohoto je vidět, že hodnota 2 % byla překročena velice často, ale toto nedává žádnou informaci o tom, jak je to s dodržáním normy. Lze však již nyní usuzovat, jak je to s ovlivněním nesymetrie samotným střídačem. Obrázek potvrzuje to, co je zřejmé už při uvědomění si, že střídač dodává do sítě symetricky. Závěrem je, že střídač nesymetrii napájecího napětí neovlivní, jelikož se největší nesymetrie vyskytuje jak ve chvíli, kdy měnič nevyrábí, tak i při vysokých výkonech.

Pro získání procentní hodnoty překročení limitní nesymetrie se použije tento PHP script, který spočítá kolik procent času ve všech 52 týdnech roku 2019, byla hodnota dodržena. Začíná se dnem 31. 12. 2018, protože tento den spadá do prvního týdnu roku 2019. Jelikož pro tento den nejsou k dispozici data, nelze brát první týden za průkazný. Je také nutné opět připomenout, že není známa přesná poloha fázorů pro výpočet nesymetrie, tudíž výsledky nemusí být vypovídající.

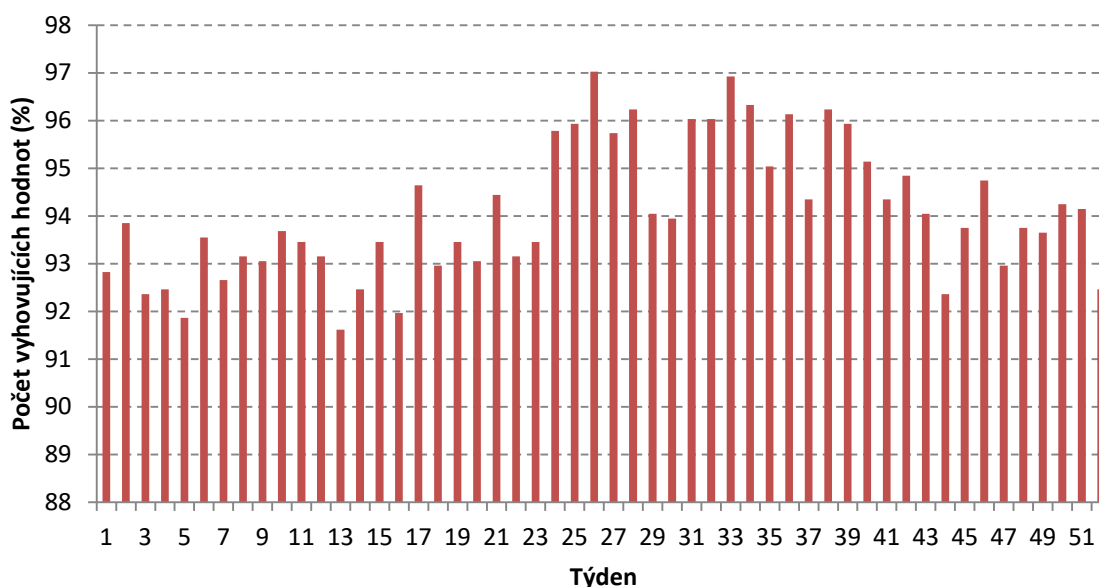
```
for ($i = 0; $i < 52; $i++) {
    $from = date('Y-m-d H:i:s', strtotime('2018-12-31 00:00:00 + ' . $i . ' week'));
    $to = date('Y-m-d H:i:s', strtotime('2018-12-31 00:00:00 + ' . ($i + 1) . ' week'));
    $count = 0;
    $ko = 0;
    $query = mysqli_query($con, "SELECT * FROM nesymetrie WHERE `date` >=
'$from' AND `date` < '$to'");
    while ($row = mysqli_fetch_object($query)) {
        $count++;
    }
}
```

```

if ($row->nesymetrie > 2)
    $ko++;
}
echo ($i + 1) . ";" . (($count - $ko) / $count * 100) . "<br>";
}

```

Výsledkem je potom následující graf (Obr. 6.10).



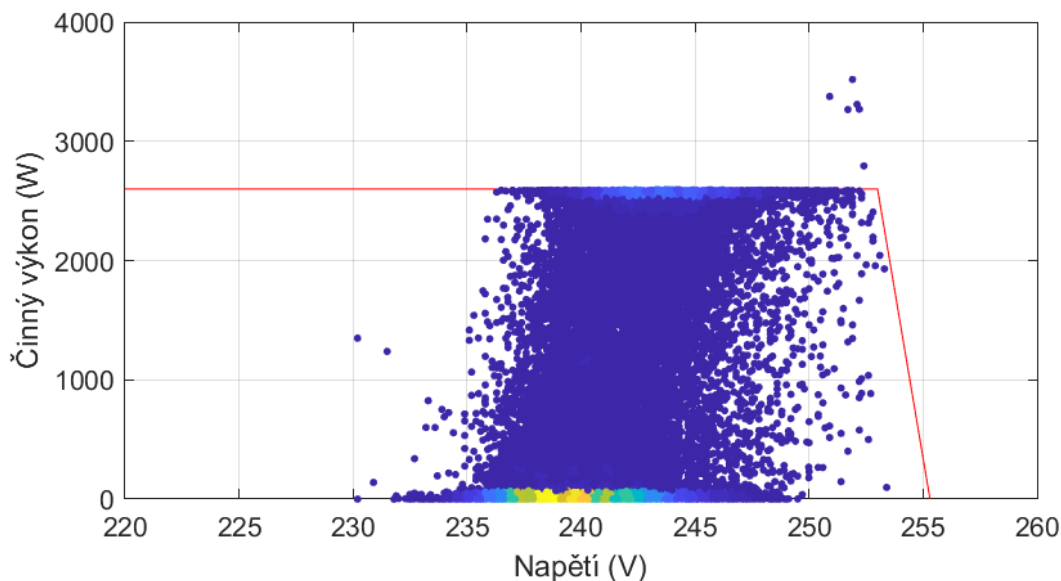
Obr. 6.10 – Nesymetrie napětí v týdnech

Na tomto grafu je patrné, že norma byla dodržena pouze ve 14 týdnech z celkových 52 tedy v 27 %, což není dobrý výsledek. Zajímavější je ovšem, že k dodržení limitů došlo pouze v letních týdnech, kdy je maximální výroba. Jelikož však měnič nesymetrii neovlivňuje téměř vůbec. Problém bude v tom, že daná síť je velice měkká a není docíleno vhodného rozložení zátěže mezi všemi fázemi v objektech připojených do této napájecí sítě. To, že největší nesymetrie je právě v době zimy, je pravděpodobně dáno zvýšeným jednofázovým odběrem elektrické energie na vytápění objektů.

6.4 Vliv funkce omezení činného výkonu

Základní funkcí výroby musí být funkce omezení činného výkonu při překročení napětí. Tato funkce byla popsána v kapitole 4.3.2.1 a jedná se opravdu o základní a nezbytnou funkci výroby. Jejím úkolem je omezení výkonu při překročení určité hodnoty napětí a tím zabránit jeho dalšímu zvyšování, které probíhá podle vzorce (4.3) z kapitoly 4.3.3. Jelikož v sítích NN převažuje činný odpor nad reaktancí, jedná se o účinnější regulaci napětí než například podle $Q(U)$ charakteristiky. Omezování výroby je ale nežádoucí, proto jsou limity napětí ve společnosti ČEZ Distribuce nastaveny na 109 % pro počátek omezování výroby a 111 % pro úplné omezení. Funkce tedy neslouží pro regulaci napětí, ale spíše pro nouzové zastavení. Omezování od 109 % platí pro maximální výkon

měníče, který je 5,2 kW. Při omezení na výstupní výkon 2,6 kW začíná omezování činného výkonu až při hodnotě napětí 253 V, tedy 110 % U_n .

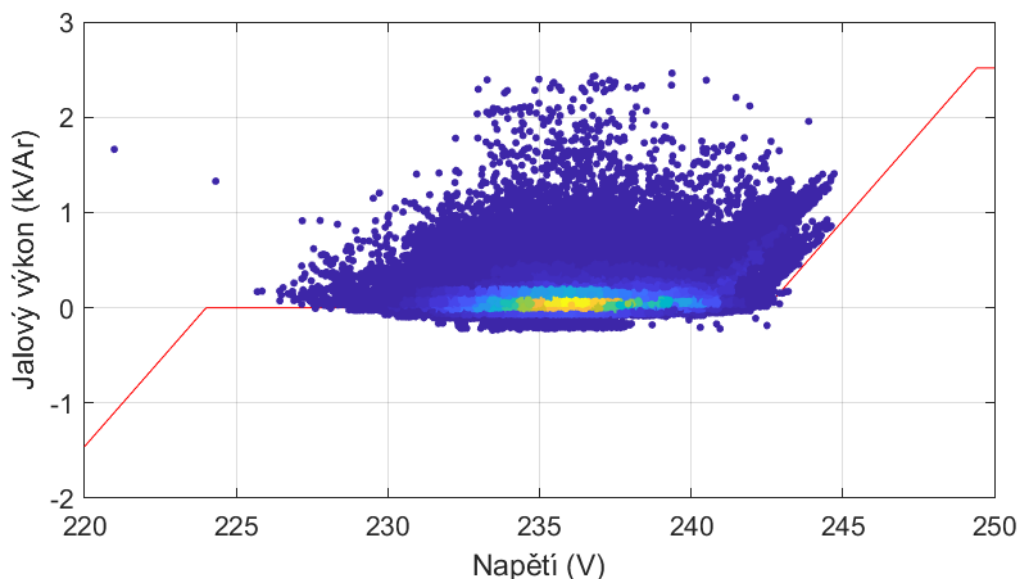


Obr. 6.11 – P (U) charakteristika výroby v roce 2019

Na tomto obrázku lze vidět, v jaké oblasti nastavené P (U) charakteristiky se výkon v předávacím místě pohybuje. Obrázek je typu tepelná mapa, tedy nízký výskyt je znázorněn modře a nejvyšší výskyt červeně. Je zde názorně vidět omezení výkonu na 2,6 kW, ale i působení omezovací charakteristiky. V tomto grafu byla každému výkonu přiřazena ta hodnota fázového napětí, která byla v tom okamžiku největší. Je zde vidět i několik bodů, kdy byla hodnota maximálního výkonu 2,6 kW překročena. Tyto hodnoty již byly popisovány v kapitole 6.2. Je zde i názorně vidět vliv zvýšení napětí při vyšší dodávce činného výkonu do sítě. Závislost odpovídá i vzorci pro úbytek napětí (4.3) a je tedy lineární.

6.5 Vliv funkce řízení jalového výkonu

Řízení jalového výkonu je velice důležité pro dodržení kvality napětí. Oproti řízení činného výkonu má výhodu v tom, že nedochází k omezování výroby elektrické energie z obnovitelného zdroje. Je třeba si uvědomit, že vše, co teče do DS je přebytek výroby, který by jinak využit nebyl. Měníč je omezen na výstupní činný výkon do sítě 2,6 kW. To je ale pouze omezení pro přetok, nikoliv pro výrobu a jalový výkon tímto omezen není. Maximální jalový výkon střídače je podle kapitoly 4.3.1.1 definován jako 0,484 násobek výstupního činného výkonu, který je 5,2 kW. To odpovídá jalovému výkonu 2,5168 kVAr. Tato regulace se řídí podle charakteristiky uvedené v kapitole 4.3.3. Začíná tedy působit při hodnotě napětí 241,5 V a na maximální hodnotu vyroste při hodnotě 248,4 V. Data z celého roku 2019, kromě přibližně dvouměsíční pauzy způsobené chybou přístroje, jsou vykreslena na následujícím obrázku (Obr. 6.12), kde je regulační charakteristika reprezentována červenou barvou.

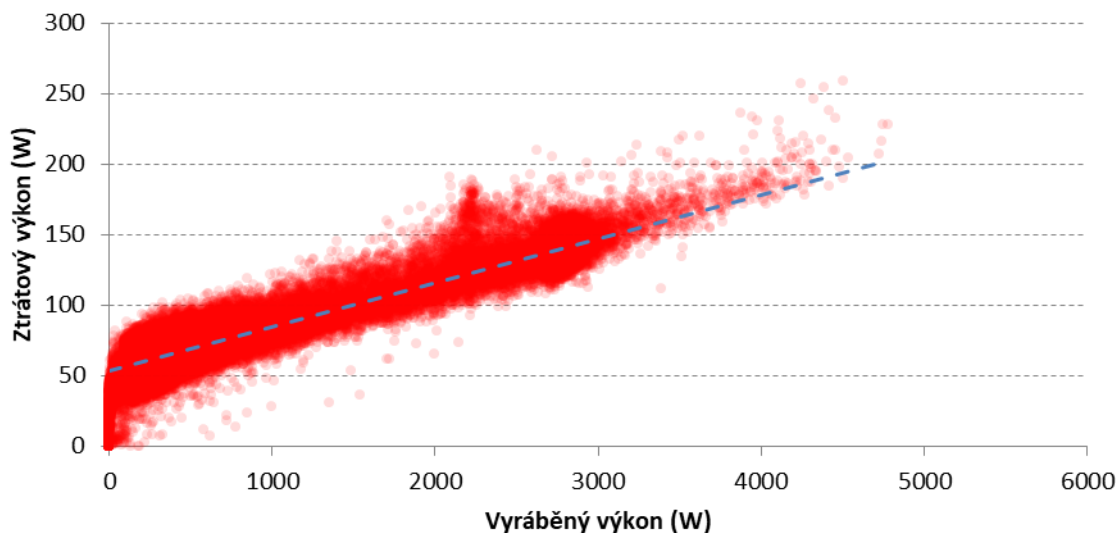


Obr. 6.12 – Působení Q (U) charakteristiky v roce 2019

Na tomto grafu je patrné, že k působení omezovací charakteristiky docházelo velice znatelně až do hodnoty přibližně poloviny maximálního jalového výkonu. Tato charakteristika měla určitě svůj význam, ale pouze jako funkce omezení napětí shora, tedy jako odběr jalové energie. Spodní hranice, která má sloužit jako podpora pro podpětí v síti, nebyla za celý rok využita. Je zde však i mnoho bodů, které se pohybují v oblastech velkého odběru jalové energie ze sítě. To není způsobeno střídačem, který v této oblasti vůbec nereaguje, ale pouze přirozeným odběrem spotřebičů v domácnosti. Jelikož mnoho vysokých odběrů s hodnotou okolo 1,5 kVAr bylo prováděno o víkendů a téměř symetricky, lze usuzovat, že byly způsobeny připojením nějakého točivého stroje, jako je například cirkulární pila. Zde by stálo za úvahu, zda by se střídač nemohl starat také o aktivní kompenzaci jalového výkonu, který je odebírán objektem, čímž by došlo k odlehčení sítě.

6.6 Ztráty na zařízení

Z vnitřních dat výroby lze zjistit také hodnotu spotřebované energie přímo a ne jako tomu bylo v kapitole 6.2.1. Tyto hodnoty však zahrnují veškerou spotřebu objektu včetně ztrát na střídači a regulátoru dobíjení. Toho lze využít pro zjištění ztrátového výkonu v každém pětiminutovém intervalu. Pro výpočet se použijí hodnoty z výše zmíněné kapitoly, které jsou získány jako součet sumy výkonů na elektroměru a výkonu, který je dodáván střídačem. Ty respektují pouze spotřebu zařízení objektu. Po odečtení těchto hodnot od hodnot přímo udávané spotřeby, ve které jsou zahrnuty i ztráty, lze získat hodnotu ztrátového výkonu výroby. Po vztahování na aktuálně vyráběný výkon dostáváme následující obrázek (Obr. 6.13).



Obr. 6.13 – Ztrátový výkon výroby v roce 2019

Z tohoto grafu je vidět téměř lineární závislost ztrátového výkonu na vyráběném výkonu. Je zde také patrný nárůst v počátku grafu. Ten je způsoben ztrátami při nabíjení baterie při minimální výrobě, tedy odběru objektu. Z grafu lze vyčíst, že největší ztráty, které byly způsobeny logicky při nejvyšší výrobě, dosáhly hodnoty přibližně 250 W, což není zanedbatelné. Ztrátový výkon by se dal vyjádřit pomocí následující rovnice vzniklé lineární aproximací bodů.

$$P_Z = 0,0357P_P + 45 \text{ (W; W)} \quad (6.2)$$

kde P_P je výkon produkovaný

P_Z je výkon ztrátový

Zajímavým údajem by také mohly být ztráty na zařízení za celý kalendářní rok 2019, tedy výkon, který byl vyprodukován solárními panely, ale byl zmařen. Tato energie činí 443 kWh, což odpovídá průměrným ztrátám 50 W po celý rok.

Dále bude přínosné, podívat se, jak se mění účinnost bateriového cyklu v průběhu celého roku. Tato data bude nezbytné spočítat pro každý den, ale opět na to nebude stačit Excel. Použije se následující script v PHP.

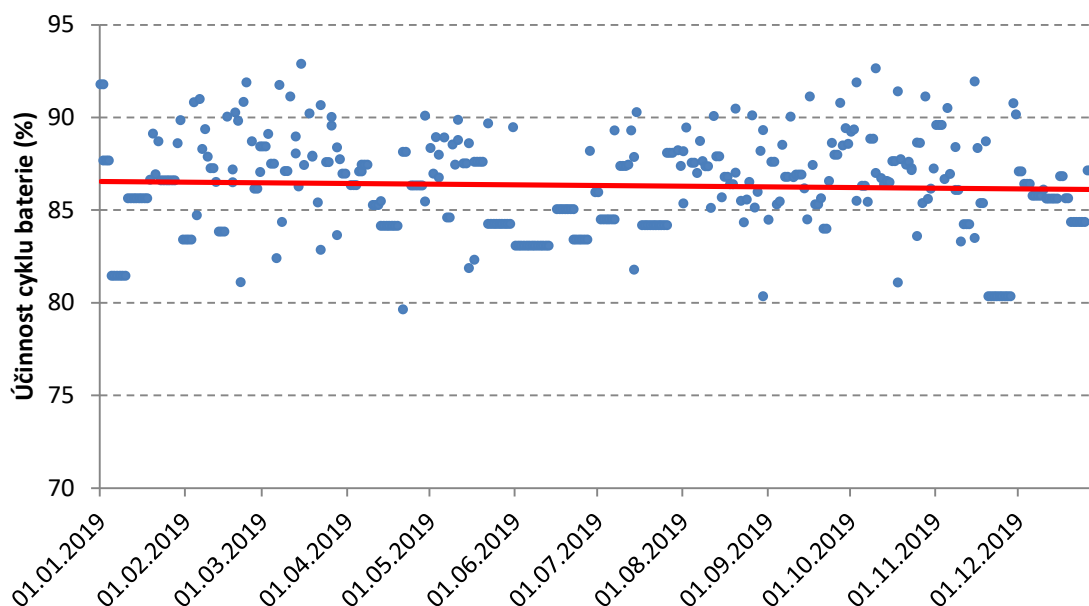
```

$start = 0;
$stop = 0;
$start_time = 0;
$stop_time = 0;
$energy_to = 0;
$energy_from = 0;
$query = mysqli_query($con, "SELECT * FROM odber_s_aku");
while ($row = mysqli_fetch_object($query)) {
    if ($row->baterka == 0 && $start == 1 && $stop == 1) {
        $ucinnost = ($energy_from / $energy_to * 100);
    }
}

```

```
$start = 0;
$stop = 0;
$stop_time = strtotime($row->date);
$pocet = round(($stop_time - $start_time) / (60 * 60 * 24));
for ($i = 0; $i < $pocet; $i++) {
    echo date('Y-m-d', strtotime(date('Y-m-d', $start_time) . "+" . $i . " days")) . ";" .
($energy_from / $energy_to * 100) . "<br>";
}
$energy_to = 0;
$energy_from = 0;
} else {
    if ($row->baterka > 30)
        $stop = 1;
    if ($start == 0)
        $start_time = strtotime($row->date);
    $start = 1;
    $energy_to += $row->vykon_do_baterie;
    $energy_from += $row->vykon_z_baterie;
}
}
```

Tento script začne sčítat energii dodanou do baterie a odebranou z baterie a to až do doby, kdy úroveň nabití (SoC) klesne na nejnižší možnou hodnotu (ve skutečnosti neklesne na úplnou nulu, protože by došlo k zničení baterie). Po tomto poklesu zjistí délku intervalu ve dnech a po dobu tolika dnů tuto hodnotu vypíše, aby byla dodržena váha dané hodnoty. Následně začne opět sčítat. Tím se dostane hodnota účinnosti tohoto cyklu za každý den v roce a vytvoří se následující obrázek (Obr. 6.14).



Obr. 6.14 – Vývoj účinnosti baterie

Na grafu je po lineární aproximaci bodů patrné, že účinnost baterie má klesající trend, ale pokles za rok 2019 není ani o procento. Z grafu je také částečně patrné, že v průběhu léta je účinnost nižší a to z důvodů vyšších nabíjecích proudů.

6.7 Shrnutí

Celkem v této kapitole bylo provedeno zkoumání šesti různých vlivů metodikou analýzy historických dat. Prvně bylo zjištěno, že fotovoltaický systém příznivě přispívá k omezení výkonových špiček, ale v zimních měsících, kdy není dostatek slunných dní, dochází k vyčerpání baterie a výroba neplní svůj význam. Avšak následující slunný den se baterie stihne nabít a z důvodu malé kapacity již začíná do sítě dodávat výkon. To může způsobovat veliký rozptyl výkonových toků a tím i napětí mezi jednotlivými dny. Tento vliv by se dal částečně eliminovat větší kapacitou baterie, která by zvládla pokrýt při malé výrobě z fotovoltaických panelů alespoň dva dny. Funkce omezení přetoku výkonu do DS byla ověřena.

Dále se zkoumalo dodržení limitů napětí podle ČSN EN 50 160, kdy k poklesu pod hodnotu -10 % nedošlo za celý rok 2019 ani jednou. Avšak k zvýšení napětí nad hodnotu +10 % došlo v průběhu roku celkem v sedmi týdnech, kdy 3x z toho vyvolala zvýšení pravděpodobně sousední výroba. Ke zvýšení dochází při výrazném jednofázovém odběru vlivem symetričnosti střídače k dodávce do zbývajících dvou fází a tím k navýšení jejich napětí. Z toho plyne i další možnost omezení zvyšování napětí, a to asymetrická výroba střídače.

Dále se ověřovala nesymetrie v síti, kdy se došlo k překvapivému zjištění, že síť nevyhovuje z hlediska dodržení tohoto parametru v 73 % týdenních měření v roce 2019. Toto ale není zapříčiněno přímo střídačem, protože dodává do sítě symetricky, ale kdyby dodával asymetricky, mohl by tento jev zlepšovat.

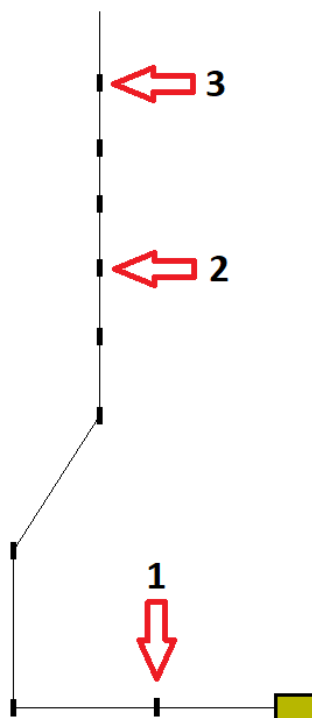
Funkce omezení činného výkonu fungovala korektně. Došlo zde k několika bodům, kdy byla překročena maximální hodnota povoleného přetoku do sítě, ale i tyto body by splnily omezovací charakteristiku $P(U)$ při pomyslném prodloužení, protože bod zakreslený v grafu platí pouze pro výkon 2,6 kW. Funkce řízení napětí jalovým výkonem fungovala naprosto korektně, ale i zde by se produkce jalového výkonu mohla používat i pro kompenzaci objektu z důvodu zlepšení parametru napětí v síti.

Naposled se řešily ztráty na zařízení, které v průběhu roku odpovídaly průměrnému konstantnímu ztrátovému výkonu 50 W. Při pohledu na celkovou energii vyrobenou fotovoltaickými panely, která činí 5282 kWh, se jedná o ztráty 8,4 % na celém výrobním a akumulacním cyklu (regulátor, střídač, baterie). Samotné ztráty na baterii však činí 13,4 %. Je tedy vidět, že velká část energie tekla z panelů přímo do sítě, tedy přes prvky, které mají účinnost výrazně lepší než baterie. Účinnost celého výrobního procesu je tedy 91,6 %.

Tato kapitola byla zpracována s využitím dat ze zdroje [28].

7 Vliv výroben na napěťový profil sítě

Jak už bylo dříve zmíněno, projekt Interflex se věnuje analýze vlivu výroben na slabou distribuční síť s účelem posílit ji a umožnit připojení vyššího výkonu při zachování kvality napětí bez jakéhokoliv zásahu do vedení. Z důvodu této analýzy byly nainstalovány další dva analyzátory podél vývodu. Na následujícím obrázku (Obr. 7.1) je možno vidět zjednodušené zakreslení této části sítě bez zakreslení jednotlivých odboček a to z důvodu, že na těchto odbočkách nejsou žádná měření a také z důvodu anonymizace dat.

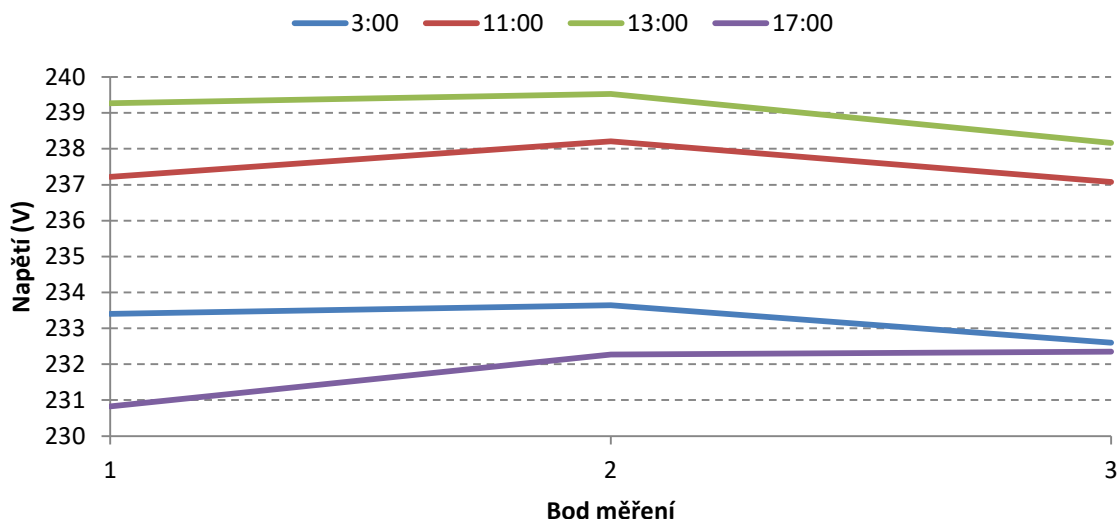


Obr. 7.1 – Umístění síťových analyzátorů

Výrobná je na obrázku znázorněna žlutým čtverečkem. V přípojném bodě této výrobní je instalován síťový analyzátor označený číslem 1. Do dalšího přípojného bodu je připojena sousední výrobní, která také ovlivňuje měřené parametry. Další analyzátor je umístěn 400 m od výrobní a poslední, který je označen číslem 3, je umístěn 600 m od výrobní. Analyzátory však nejsou nainstalovány přímo na napájecí lince, ale u zde připojených odběratelů, takže může být údaj zkreslen úbytkem napětí na vedení k odběrateli.

7.1 Poměry při zimním měření

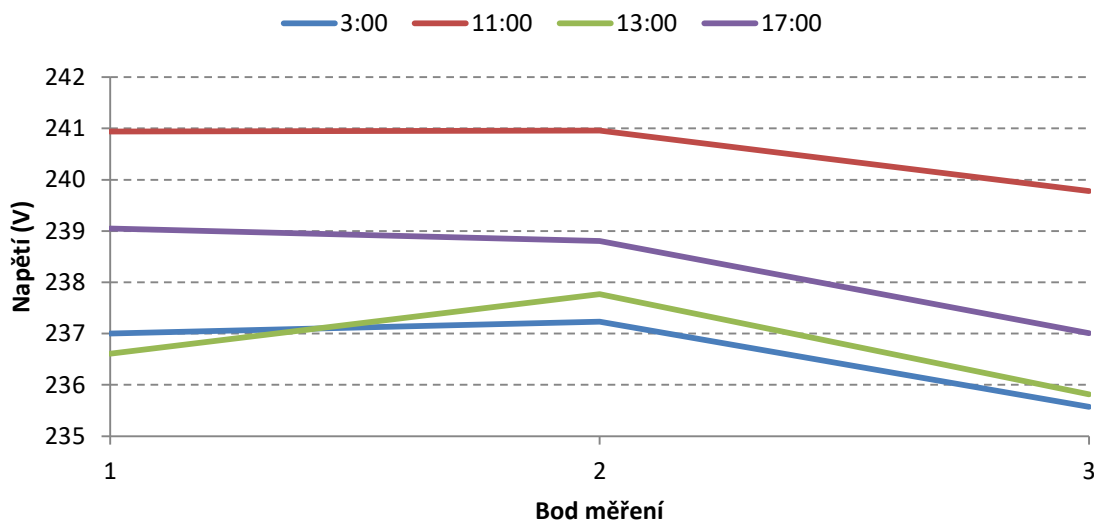
Takto je možné se podívat, co se děje s napětím podél napájecí větve. Pro zajímavost se zvolí den zimního a letního měření. Zimní měření se provádí vždy třetí lednovou středu v 3 h, 11 h, 13 h a 17 h a slouží následně jako referenční hodnota pro studii připojitelnosti odběratele. Letní měření se provádí obdobně třetí červencovou středu ve stejné časy jako zimní měření a hodnota změřená v 13 h slouží pro studii připojitelnosti výroben, jelikož je v tuto dobu minimální odběr a předpokládá se maximální výroba. Na rok 2019 to připadalo na dny 16. 1. a 17. 7.



Obr. 7.2 – Napětový profil pro zimní měření v roce 2019

Na výše uvedeném grafu (Obr. 7.2) je zakreslen průběh průměru napětí ze všech tří fází na napájecí větví v průběhu zimního měření. Jsou zde vidět poměrně velké rozdíly mezi slunnou částí dne a dobou, kdy už je v tomto období tma. To je dáno tím, že v době produkce elektrické energie výroba pokryje spíše spotřebu vlastního objektu a v průběhu noci se baterie vybíjí a objekt začne elektrickou energii odebírat. Větší propad je ale také způsoben vyšším odběrem okolních objektů, které vytápí elektrickou energií, a také odlehčením celé sítě dalšími výrobkami v blízkosti distribučního transformátoru.

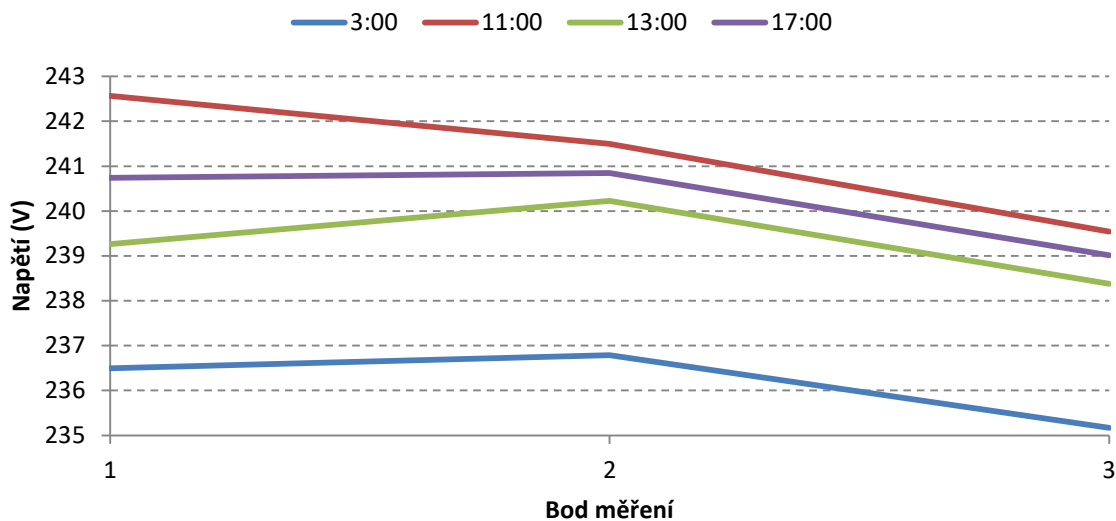
7.2 Letní měření



Obr. 7.3 – Napětový profil sítě pro letní měření v roce 2019

U letního měření (Obr. 7.3) je znát dosažení vyšších maximálních napětí a je také vidět jasný směr toku výkonu. Jsou zde znatelně menší rozdíly mezi dnem a nocí, ale je zde také zachycen velice zvláštní průběh napětí ve 13 h. Je však nutné podotknout, že výroba FV panelů byla v ten den velice nestálá a nastavení sousední výroby není známé. Tam může být povolena dodávka také z baterie, tedy v době, kdy se sledovaná výroba

chovala jako spotřebič, tato mohla dodávat. Dále je možné, že se jedná pouze o odběr všech a měření v bodě 3 je ovlivněno úbytkem napětí na napájecí větvi k odběrateli.



Obr. 7.4 – Měření 18. 7. 2019

Z důvodu zvláštního chování napětí ve 13 h letního měření se lze podívat třeba na následující den (Obr. 7.4), kde už se průběh napětí chová dle očekávání.

Tato kapitola byla zpracována s využitím dat ze zdroje [28].

8 Simulace vlivu výroby na distribuční síť

V síti, která bude předmětem následujících simulací, se nachází celkem 50 odběrných míst včetně šesti výroben, které jsou rozmístěny po celé síti. Jedná se o reálnou síť spravovanou společností ČEZ Distribuce. Simulace budou prováděny v programu E-Vlivy 2 od české společnosti EGC – EnerGoConsult. Jedná se o starší verzi programu, které postrádá například regulační charakteristiky zdrojů, ale i toto lze obejít. O síti jsou známy veškeré dostupné parametry, ale z důvodu omezení simulačního programu na 50 prvků se přesně namodeluje pouze hlavní napájecí větev se sledovanou výrobnou. Druhá napájecí větev bude pouze nahrazena jedním vedením, ke kterému budou připojeny dvě výroby a jeden odběr, který bude respektovat všechny zde připojené. Odbočky k odběratelům budou nahrazeny adekvátní náhradou o délce 30 m. K dispozici jsou také data ze síťového analyzátoru, který je umístěn na distribučním transformátoru a měří všechny základní veličiny (napětí, proud, činný výkon, jalový výkon, ...) ve všech fázích v minutových intervalech a vždy maximální, minimální a průměrnou hodnotu.

Předmětem simulací bude simulace stavu sítě v extrémních stavech a také vliv regulační charakteristiky na ztráty v této síti. Dále také možnosti nastavení regulačních charakteristik výroben na DS rozdílně pro sledování vlivu této změny na ztráty v síti a hodnotu napětí.

Výsledky těchto analýz by mohly být použity pro efektivnější nastavování regulačních Q (U) charakteristik, ale také pro nastavování odboček transformátoru tak, aby byl napěťový profil co možná nejlepší a nejstálejší.

8.1 Vliv na velikost napětí a ztrát v síti při zatížení

8.1.1 Odvození součinitele zatížení

Z důvodu anonymizace dat nejsou známy rezervované výkony jednotlivých objektů, které budou potřebné pro následující simulace sítě. Bude tedy nutné určit součinitel zatížení β , pomocí něhož budou určeny odběry v síti.

$$\beta = \frac{k_s \cdot k_v}{\eta_m \cdot \eta_s} \quad (8.1)$$

kde k_s je součinitel současnosti

k_v je součinitel využití

η_m je účinnost spotřebičů

η_s účinnost napájecí soustavy

Součinitel současnosti respektuje to, že ne všechny objektu budou odebírat svůj rezervovaný výkon ve stejnou dobu. Tento součinitel lze určit jako:

$$k_s = 0,2 + (1 - 0,2) \cdot \sqrt{n} = 0,2 + 0,8 \cdot \sqrt{50} = 0,31314 \quad (8.2)$$

kde n je počet odběrných míst

Dále při uvažování běžného součinitele využití 0,4, který respektuje to, že po většinu času nebude objekt odebírat svůj maximální rezervovaný výkon, a účinnostmi rovnými jedné lze určit součinitel zatížení jako:

$$\beta = 0,31314 \cdot 0,4 = 0,1253 \quad (8.3)$$

Tyto vztahy lze ověřit následující úvahou. Ideální zatížení distribučního transformátoru (DTR) o výkonu 0,1 MW je přibližně 70 % a nejčastější rezervovaný výkon je daný vstupním jističem 3x16 A. Potom rezervovaný výkon všech objektů se spočte jako:

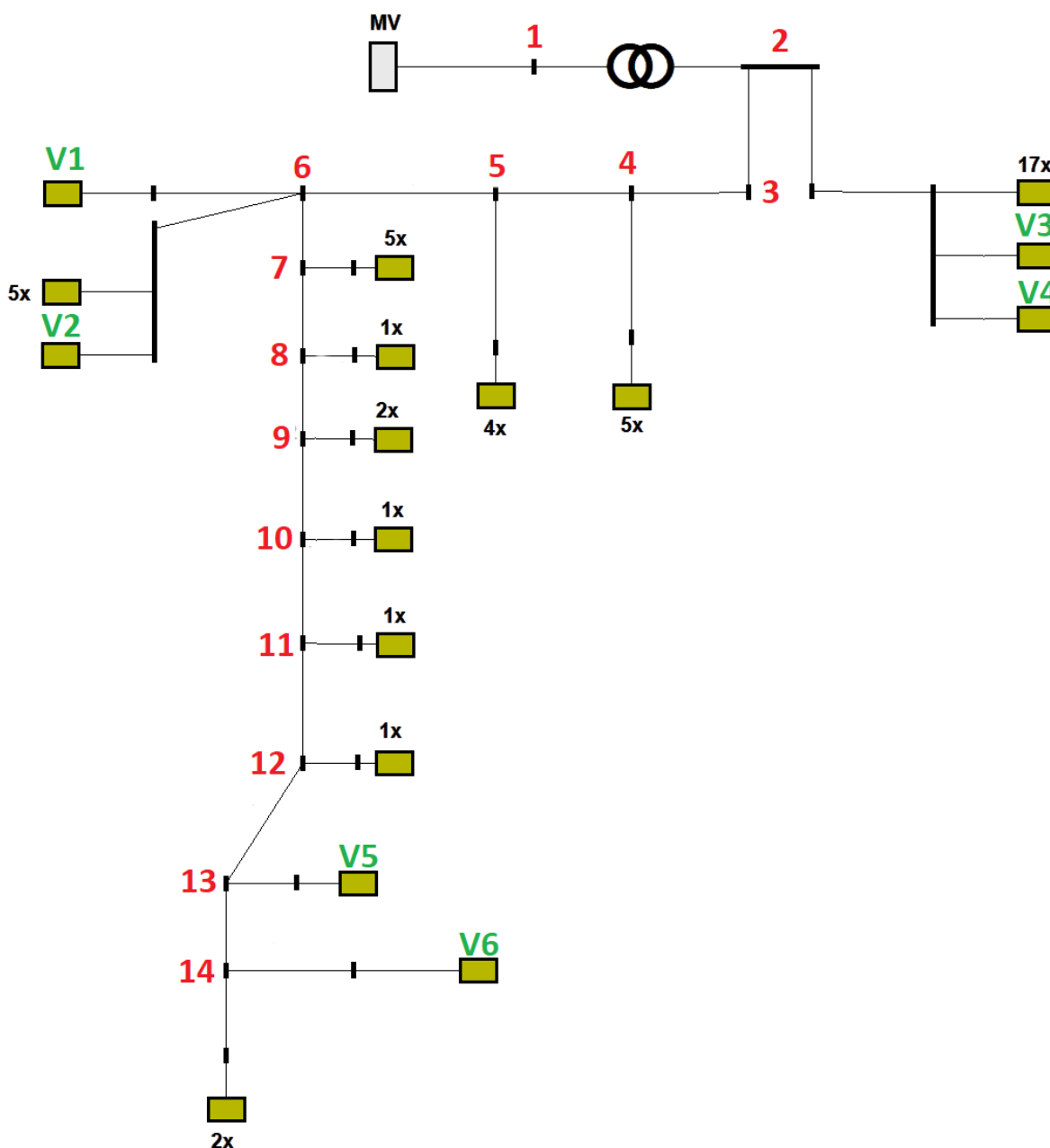
$$P_{rez} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot n = \sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 16 \cdot 50 = 554,25 \text{ (kV, A; kW)} \quad (8.4)$$

Maximální výkon odebíraný transformátorem o výkonu 0,1 MW tedy 100 kW při zatížení na 70 % je právě 70 kW. Pro součinitel zatížení tedy platí:

$$\beta = \frac{P_{max}}{P_{rez}} = \frac{70}{554,25} = 0,1263 \quad (8.5)$$

Součinitelé zatížení jsou téměř totožné a lze tedy říct, že lze uvažovat jako průměrný rezervovaný výkon jističem právě 3x16 A tedy 11 kW. Pro výpočet při zatížení transformátoru na 70 % by byl uvažován proud pro jeden objekt 3x2 A, tedy 1,4 kW. Jelikož se jedná o rodinné domy, bude uvažován účinník rovný 1.

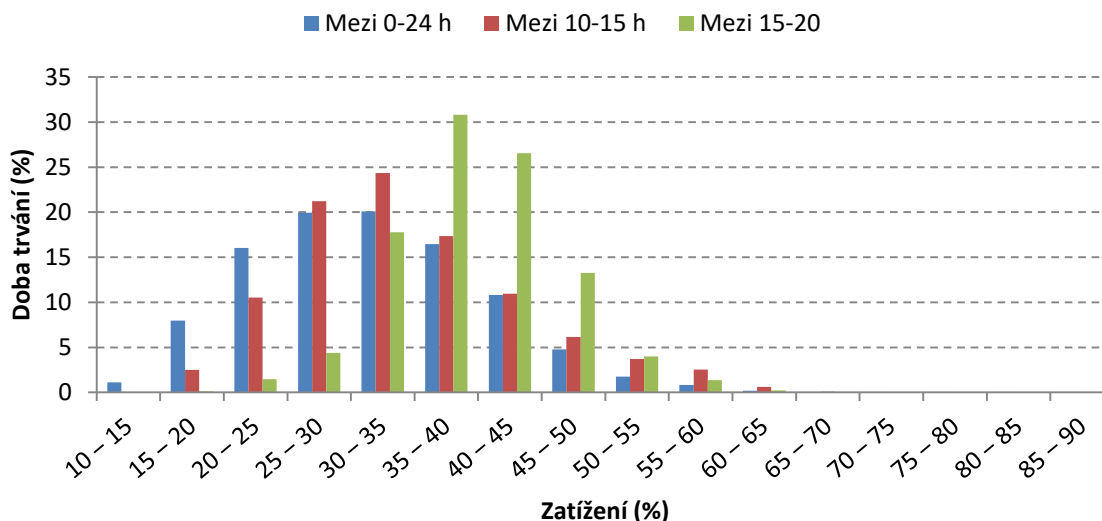
Síť používaná pro simulace není zakreslena zcela podrobně, a to jak z důvodu limitu prvků v simulačním programu ale také aby nebylo možné určit, o jakou reálnou síť se jedná. Podrobně je zakreslena pouze hlavní napájecí větev se sledovanou výrobnou. Druhá větev je již zakreslena pouze jako jedno vedení, ke kterému jsou připojeny odběry a výroby. Na hlavní napájecí větvi jsou vedení k odběratelům řešena jednotně, kde do dvou odběrů je použitý závěsný kabel AYKYz 4x16 o délce 30 m a pro více odběrů AYKYz 4x25. Jmenovité napětí nadřazené sítě je 35 kV, provozní 36,7 kV. Pro všechny prvky typu odběr bude uvažován účinník rovný 1. Vytvořená síť je na následujícím obrázku (Obr. 8.1).



Obr. 8.1 – Simulovaná síť se zakreslenými odběry

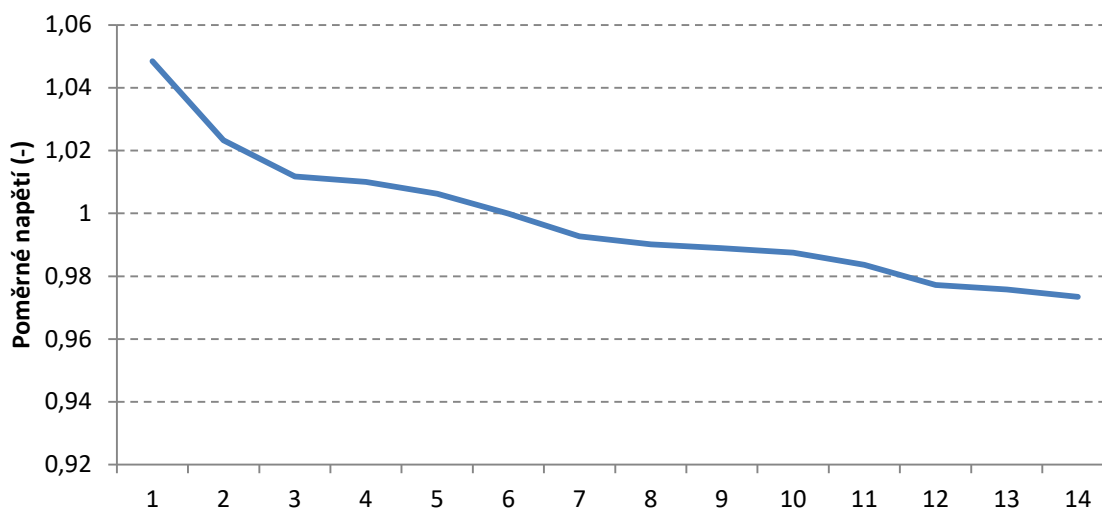
8.1.2 Stav maximální odběr a nulová dodávka

V této simulaci se ověří, jak je na tom daná síť s úbytky napětí při vysokém odběru a téměř žádné dodávce. Vzhledem k histogramu napětí z celého roku 2019 (Obr. 6.6) se nepředpokládá, že by tento stav způsoboval nějaké problémy. Aby bylo možné určit pokud možno co nejpřesnější data, lze se podívat na zatížení distribučního transformátoru. Pro potřeby simulace tohoto stavu je optimální zvolit zimní měsíc alespoň po 15. hodině, kdy je výroba již téměř minimální a zároveň je z důvodu vytápění či jiných tepelných spotřebičů, které mají v zimě vyšší zastoupení, vysoký odběr. Nejlépe bude použít pro tyto účely měsíc leden, který je pro tyto účely používán právě pro zjišťování zatížení sítě v době zimního měření, jak bylo podrobně rozepisováno v kapitole 7.1.



Obr. 8.2 – Průběh zatížení DTR v lednu 2019

Na tomto obrázku jsou uvedeny výkonové poměry na DTR. V obrázku je toto také rozděleno na tři kategorie. První (modře) představuje rozložení výkonu na transformátoru průběhu celého měsíce. Druhá kategorie (červeně) ukazuje rozložení v lednu, ale pouze mezi 10:00 – 14:59, tedy v době, kde je odběr nižší, jelikož v tuto dobu je většina lidí během všedních dnů v práci, ale také dobu, kdy výrobní produkují elektrickou energii. Poslední část (zeleně) tvoří doba mezi 15:00 – 19:59. V tuto dobu je již výroba nulová a spotřeba maximální. Z výkonového profilu je však patrné, že nejčastější zatížení v tuto dobu bylo mezi 35 – 40 % výkonu transformátoru, tedy 30 – 40 kW. Jelikož tato část má simulovat stav při maximální spotřebě a nulové výrobě, vezme se z této analýzy hodnota maximálního výkonu, která byla dosažena. Tato hodnota činí 85 % zatížení transformátoru, tedy 85 kW. Pro toto zatížení se bude jednat o proud jednoho odběru včetně výroby 2,45 A nebo výkon 1,7 kW.



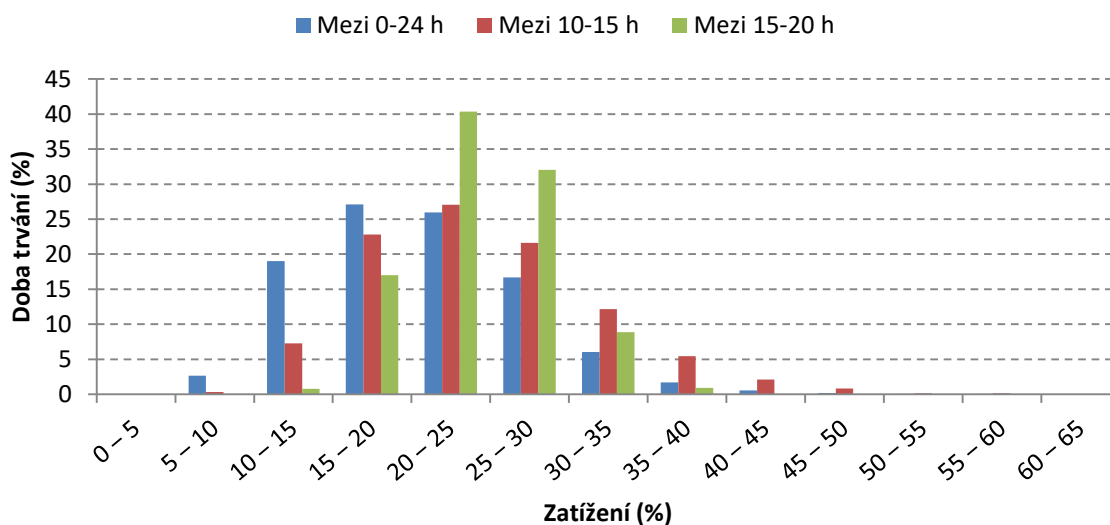
Obr. 8.3 – Rozložení napětí podél napájecí větve při 85 % zatížení DTR

Jak už bylo zmíněno dříve, napětí v žádném bodě nebylo pod dolní povolenou odchylkou. Z obrázku (Obr. 8.3) je také vidět, že pro tento provoz sítě je odbočka na DTR nastavena zcela optimálně, jelikož zde budou částečně patrné ještě úbytky napětí na

přípojce k zákazníkovi. Záporný úbytek zde znamená nárůst napětí od jmenovité hodnoty 0,4 kV. Celkový výkon, který pokrývá činné ztráty v síti, činí 5,9 kW. Z toho 2,5 kW jsou ztráty na transformátoru. Jalové ztráty jsou 7 kVAr, ale z principu se jedná z velké části o ztráty na transformátoru a to 6,1 kVAr.

8.1.3 Stav minimální odběr a maximální dodávka

Pro určení předběžného zatížení sítě se použije graf výkonů na DTR v měsíci červenci (Obr. 8.4), kdy zároveň probíhá letní měření. Je logické, že delší doby trvání byly zaznamenány u nižších hodnot zatížení.



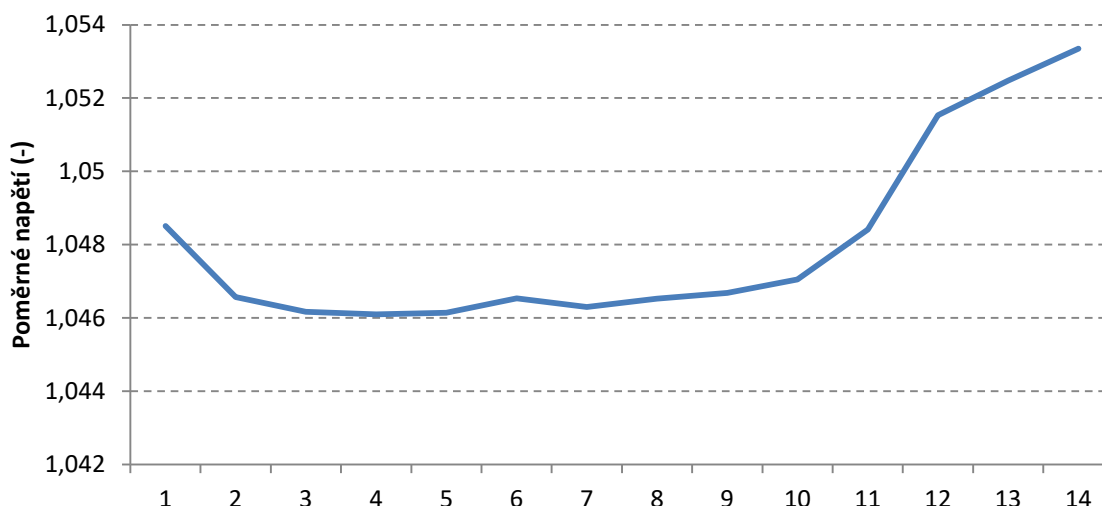
Obr. 8.4 – Průběh zatížení DTR v červenci 2019

Zde je vidět, že maximální doba trvání se přesunula na zatížení mezi 20 – 25 % DTR. To je způsobeno menšími nároky na tepelné spotřebiče, ale samozřejmě také výrobou nebo alespoň sníženým odběrem z důvodu nabitých baterií. Je patrné, že zatížení transformátoru nepřesáhlo 50 %, tedy není natolik využito.

Nejnižší naměřený výkon v době mezi 10 – 15 h byl 5 kW. Tato hodnota bude použita pro určení odběru objektů. Bude se předpokládat, že všech 6 výroben ve stejnou dobu dodávalo plný výkon 2,6 kW. Aby bylo možné určit výkon odebíraný objekty, je nejprve třeba k hodnotě 5 kW připočítat dodávaný výkon od všech výroben, tedy:

$$P_{odb} = P_{DTR} + P_{FV} = 5 + 6 \cdot 2,6 = 20,6 \text{ kW} \quad (8.6)$$

Tento výkon se rozdělí mezi odběrná místa, která neslouží jako výrobní. Těch bude 46, což odpovídá přibližně 0,45 kW na jedno odběrné místo.



Obr. 8.5 – Rozložení napětí podél napájecí větve při 5 % zatížení DTR s výrobou

Oproti plnému zatížení bez výroby je vidět očekávaný jev, kdy napětí na konci napájecí větve je vyšší než na počátku u DTR. Stále však nedojde k překročení normy ČSN EN 50 160, tedy nebyla překročena hodnota 110 % U_N . Je však viditelné, že došlo k otočení toku výkonu v rámci větve. Oproti stavu s maximální spotřebou bez výroby došlo k výraznému snížení činných i jalových ztrát. Činné ztráty jsou pouze 0,586 kW, kde DTR je zastupuje hodnotou 0,538 kW. Jalové ztráty jsou pouze 3,269 kVAr, kde transformátor způsobuje 3,257 kVAr. Nutno také zdůraznit, že zatím není uvažována $Q(U)$ charakteristika, tedy jalový výkon odebíraný/dodávaný výrobnou je nulový. Proto se provede další simulace, kde se bude s touto funkcí počítat, protože při nárůstu o více než 5 % již začíná působit (více v 4.3.3).

8.1.4 Stav minimální odběr a maximální dodávka s $Q(U)$ funkcí

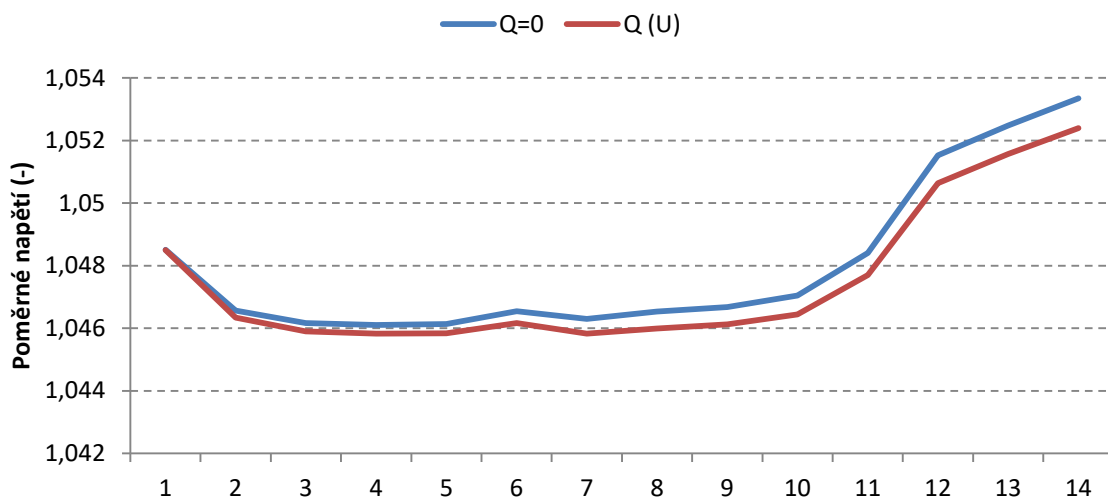
Simulační program E-Vlivy 2 nepodporuje zadávání regulačních funkcí pro FV elektrárny. Této funkce lze docílit manuálním zadáváním odebíraného činného a jalového výkonu. Výrobná je tedy reprezentována jako obecná zátěž se záporným odebíraným činným výkonem. Pro první iterační krok je u všech výroben nastavena hodnota jalového výkonu nulová a jmenovité napětí 0,4 kV sdružených. Po spočítání tohoto problému se získají nové hodnoty napětí a tím i požadavek na jalový výkon podle $Q(U)$ charakteristiky. Tento postup byl validován v programu DnCalc, který zadávání regulačních charakteristik podporuje.

U výroben V1 – V4 se hodnota napětí nedostala k takové hodnotě, aby $Q(U)$ charakteristika zapůsobila. K působení došlo pouze u výroben V5 – V6. Zde bylo provedeno 6 iterací, které jsou znázorněny v následující tabulce (Tab. 8.1).

Tab. 8.1 – Iterační kroky pro výroby V5 a V6

U (kV)	U _f (V)	U/U _n	Q (kVAr)	Q/Q _{max}
V5				
0,42139	243,2896	1,0535	0,2915	0,1158
0,42095	243,0356	1,0524	0,1992	0,0792
0,4211	243,1222	1,0528	0,2307	0,0917
0,42102	243,076	1,0526	0,2139	0,0850
0,4211	243,1222	1,0528	0,2307	0,0917
0,42102	243,076	1,0526	0,2139	0,0850
V6				
0,42156	243,3878	1,0539	0,3272	0,1300
0,4211	243,1222	1,0528	0,2307	0,0917
0,42125	243,2088	1,0531	0,2622	0,1042
0,42118	243,1684	1,0530	0,2475	0,0983
0,42125	243,2088	1,0531	0,2622	0,1042
0,42118	243,1684	1,0530	0,2475	0,0983

Je patrné, že v šesté iteraci již došlo k opakování a tuto hodnotu lze považovat za konečnou. U výroby V5 je tato regulace využita na 9 % a u výroby V6 na 10 %. Činné ztráty v síti jsou 0,588 kW a jalové 3,27 kVAr. Zajímavé bude, jak hodně tato charakteristika změnila napěťový profil oproti stavu, kdy nebyla aktivována. To znázorňuje následující obrázek (Obr. 8.6).



Obr. 8.6 – Rozložení napětí podél napájecí větve při 5 % zatížení DTR s výrobou a Q (U)

Q (U) charakteristika způsobila pokles napětí podél celé napájecí větve. Ovšem tento pokles není nijak výrazný, ale regulace také není naplno využita.

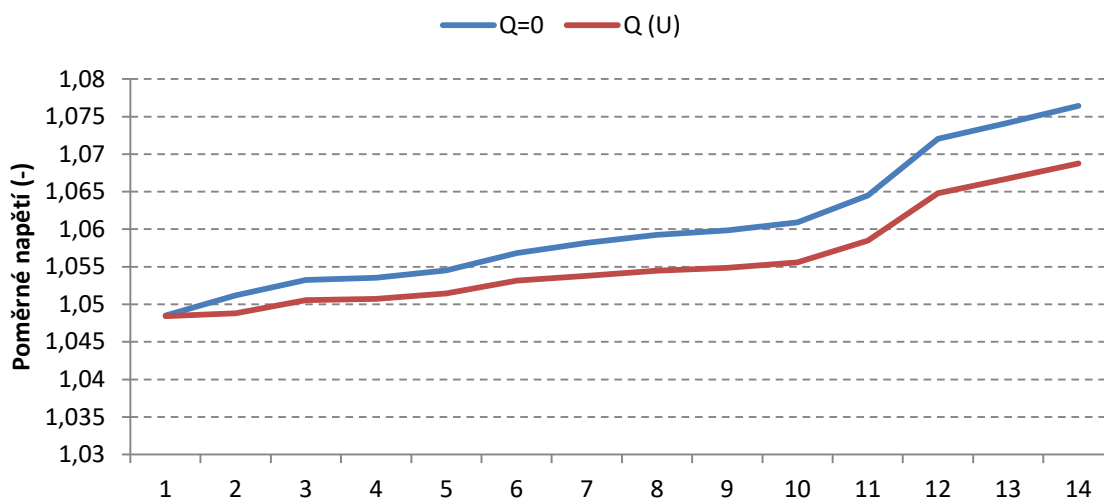
8.1.5 Minimální odběr a maximální dodávka do jedné fáze

Jelikož střídač dodává do sítě symetricky, může při nulovém nebo trojfázovém symetrickém odběru dodávat výkon maximálně 2,6 kW, což je hodnota, na kterou je přetok omezen. To odpovídá 0,87 kW na fázi. Toto je stav, který se simuloval doteď. Může však nastat stav, kdy je odběr jedné fáze nulový a zbylé dvě fáze odebírají výkon 1,3 kW. V tuto chvíli dodává střídač do sítě pouze 2,6 kW, ale ve dvou zatížených fázích se jedná o výkon

0,43 kW a v nezatížené 1,73 kW, což je maximální možný výkon dodávaný do jedné fáze. Jedná se o dvojnásobek v této fázi oproti symetrickému odběru.

Protože simulační program nepracuje spolehlivě s jednofázovou dodávkou/odběrem, provede se simulace pro symetrický odběr 5,2 kW. To je hodnota třífázového výkonu při výkonu 1,73 kW na fázi. Z tohoto důvodu lze tuto simulaci využít pouze pro porovnání napěťových poměrů nikoli pro porovnání ztrát. Výpis iteračních kroků je uveden v příloze v tabulce (Tab. 11.1).

Je jasné, že při větším nárůstu napětí působí Q (U) charakteristika více. Zde bylo dosaženo využití na 66 % a to u výroby V6, která je umístěna nejdále na napájecí větvi. Zatímco u symetrického maximálního zatížení dokázala Q (U) charakteristika snížit napětí o přibližně 0,1 %, zde toto snížení bylo již téměř 0,8 %.



Obr. 8.7 – Rozložení napětí ve fázi s výrobou podél napájecí větve při 5 % zatížení

Ve fázi, do které probíhá maximální výroba, je zvýšení napětí již téměř 8 %. Pokud by došlo k náhlému odlehčení sítě nebo zvýšení napětí v napájecím uzlu, mohlo by snadno dojít k překročení 10 % hranice udávané normou.

8.1.6 Zhodnocení výsledků

Při zatížení 85 % byly ztráty největší oproti menšímu zatížení, což je předvídatelné. Působení Q (U) charakteristiky způsobilo slabý nárůst ztrát, což je dáno pouze velice malým jalovým regulačním výkonem oproti odebíranému výkonu.

Tab. 8.2 – Porovnání ztrát v síti u simulovaných variant

	Zatížení 85 %	Zatížení 5 % bez Q (U)	Zatížení 5 % s Q (U)
Činné ztráty (kW)	5,900	0,586	0,588
Jalové ztráty (kVAr)	7,000	3,269	3,270

Ztráty způsobené tímto proudem se projeví výrazněji na činném odporu sítě. To je dáno charakterem sítě nízkého napětí, kdy činný odpor je větší než reaktance vedení. Ztráty se poté spočítají jako:

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I^2 \tag{8.7}$$

$$\Delta Q = 3 \cdot X \cdot I^2 \quad (8.8)$$

Závisí tedy na celkovém zatížení sítě bez ohledu na charakter přenášeného výkonu/proudu a velikosti jednotlivých složek. Ve sledované síti se velikost činného odporu pohybuje v rozmezí cca $(1,5 \div 20) \cdot X$.

Dobrym výsledkem je, že přírůstek napětí nikdy nepřesáhl hranici stanovenou normou. Ovšem u jednofázové nesymetrické dodávky již mnoho nechybělo. Z uvedených obrázků (Obr. 8.6, Obr. 8.7) je možné si povšimnout, že největší nárůst napětí je mezi body 10 a 12. Bylo by tedy vhodné z důvodu eliminace tohoto jevu posílit tuto část sítě. Zároveň pro stav maximální výroby snížit napětí na transformátoru. Tuto činnost by bylo nejlepší provádět dynamicky nebo nastavit odbočky fixně, ale rozdílně na období zimy a léta.

Tab. 8.3 – Napětí v nejdálším bodě pro jednotlivé varianty

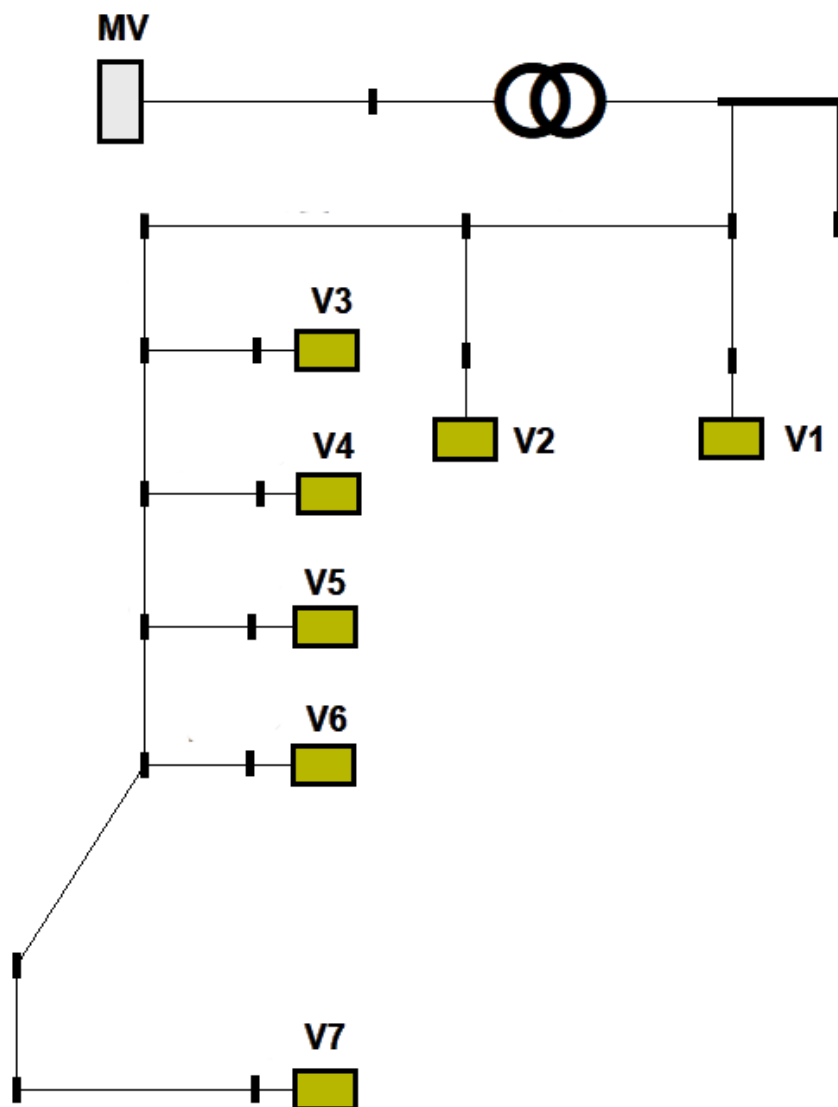
Zatížení	85 % bez výroby	5% bez Q (U)	5% s Q (U)	5 % 1f bez Q (U)	5 % 1f s Q (U)
U/U _n (-)	0,973	1,053	1,052	1,076	1,069

V této tabulce je porovnání velikosti úbytku napětí v bodě 14 pro jednotlivé varianty. Je zde jasné vidět, že při symetrické dodávce regulační charakteristika téměř nereaguje, ale u nesymetrické dodávky je její vliv již zásadní. Navíc regulační Q (U) charakteristika funguje, i když výroba zrovna do sítě nemá žádný přetok, takže může posloužit i pro snižování nárůstu napětí, na který nemá vliv.

8.2 Rozdílné nastavení Q (U) charakteristik

Tato kapitola si klade za cíl určit možné lepší nastavení regulačních charakteristik pro dosažení větší regulace napětí při potřebě co nejmenšího množství dodaného jalového výkonu. Myšlenka je částečně založena na odborném článku uvedeném ve zdroji [11]. Podle tohoto článku mají výroby umístěné dále od DTR větší možnost regulovat napětí, což vychází ze vzorce (4.3). Na základě těchto informací se provede úprava horní hranice regulační Q (U) charakteristiky podle vzdálenosti výroby od DTR.

Pro simulace bude využita již používaná síť. Ta bude zjednodušena pouze na jeden vývod, kde je i dříve sledovaná výroba. Na tento vývod bude umístěno celkem 7 fiktivních výroben, kdy každá bude dodávat do DS činný výkon o hodnotě 2,6 kW. Odběr výkonu v síti bude nulový. Tato síť odpovídá reálným parametrům sítě.



Obr. 8.8 – Použitá síť pro simulaci vlivu Q (U) charakteristik

8.2.1 Bez vlivu Q (U) regulace

První zkoumání se zaměří na to, jak to dopadne s napětím a ztrátami v síti bez působení této regulační charakteristiky. Všechny odběry jsou simulovány s účinníkem rovným 1, tedy čistě činný odebíraný výkon. Napětí na výrobně V7 vzroste na hodnotu $1,075 U_n$. To je hodnota, kdy už Q (U) regulace funguje téměř v plném rozsahu. Zajímavé bude, jak napětí běžně nastavovaná Q (U) charakteristika sníží.

8.2.2 Běžná Q (U) regulace

Při této simulaci se provede vliv působení běžně nastavované Q (U) charakteristiky, která je uvedena v kapitole 4.3.3. Po pěti provedených iteracích se dojde k následující tabulce.

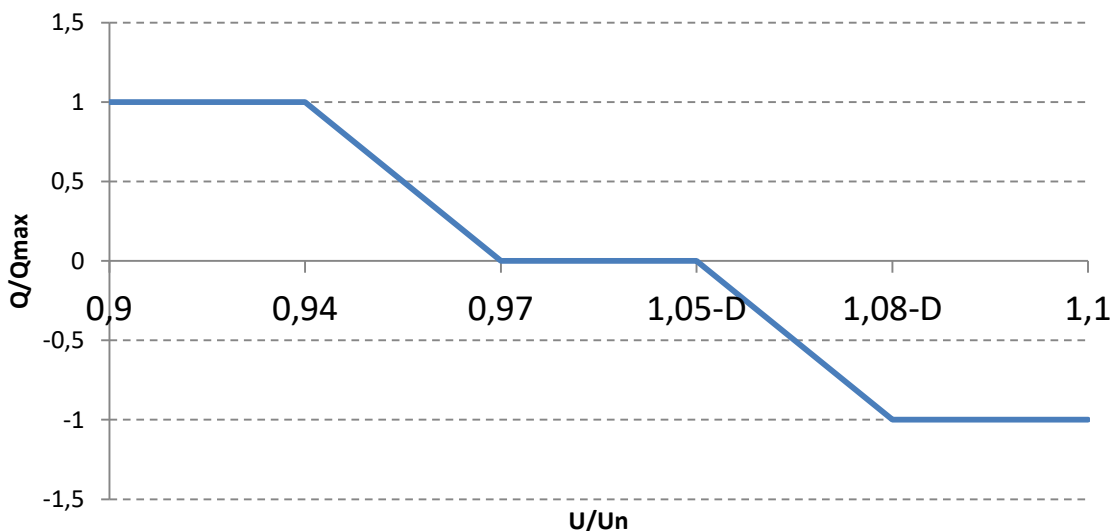
Tab. 8.4 – Hodnoty jednotlivých výroben - běžná Q (U)

Prvek	U (kV)	U _f (V)	U/U _n	Q (kVAr)	Q/Q _{max}
V1	0,4217	243,4628	1,0542	0,3544	0,1408
V2	0,4222	243,7515	1,0555	0,4593	0,1825
V3	0,4238	244,6580	1,0594	0,7886	0,3133
V4	0,4244	245,0101	1,0609	0,9165	0,3642
V5	0,4247	245,2238	1,0619	0,9941	0,3950
V6	0,4264	246,1764	1,0660	1,3402	0,5325
V7	0,4268	246,4246	1,0671	1,4304	0,5683

Při tomto nastavení i ta nejbližší umístěná výroba odebírá ze sítě jalový induktivní výkon a snaží se snížit napětí, zatímco nejvzdálenější výroba nevyužívá regulaci naplnu, ale pouze na 57 %.

8.2.3 Varianta 1 – lineární posun omezující charakteristiky

Tato varianta bude mít za úkol posunout body charakteristiky individuálně pro každou výrobu a to lineárně v závislosti na vzdálenosti přípojného bodu od DTR. Provedeno to bude tak, že výroby umístěné za polovinou vzdálenosti nejvzdálenější výroby budou regulovat dříve a výroby před tímto bodem později. Lze to vyjádřit následujícím obrázkem.



Obr. 8.9 – Q (U) charakteristika - varianta 1

Zde je posun upraven parametrem D, který se spočte podle následujícího vzorce.

$$D = \frac{l - l_{střed}}{l_{střed}} \cdot k \quad (8.9)$$

kde **k** je konstanta posunu zvolená 0,01

l je vzdálenost výroby od DTR

l_{střed} je polovina celkové délky vývodu, tedy $l_{V7}/2$

Platí tedy, že pro výrobu připojenou přímo k DTR se body charakteristiky upravují na 1,06 a 1,09. Pro nejvzdálenější výrobu na 1,04 a 1,07. To způsobí to, že

blízká výrobná nebude tolik regulovat napětí, zatímco nejbližší nejvíce. V následující tabulce jsou uvedeny vzdálenosti přípojních bodů jednotlivých výroben.

Tab. 8.5 – Vzdálenosti jednotlivých fiktivních výroben od DTR

Prvek	Vzdálenost od DTR (m)
V1	136
V2	183
V3	366
V4	456
V5	533
V6	788
V7	868

Po takovéto změně bodů charakteristiky se získá následující tabulka.

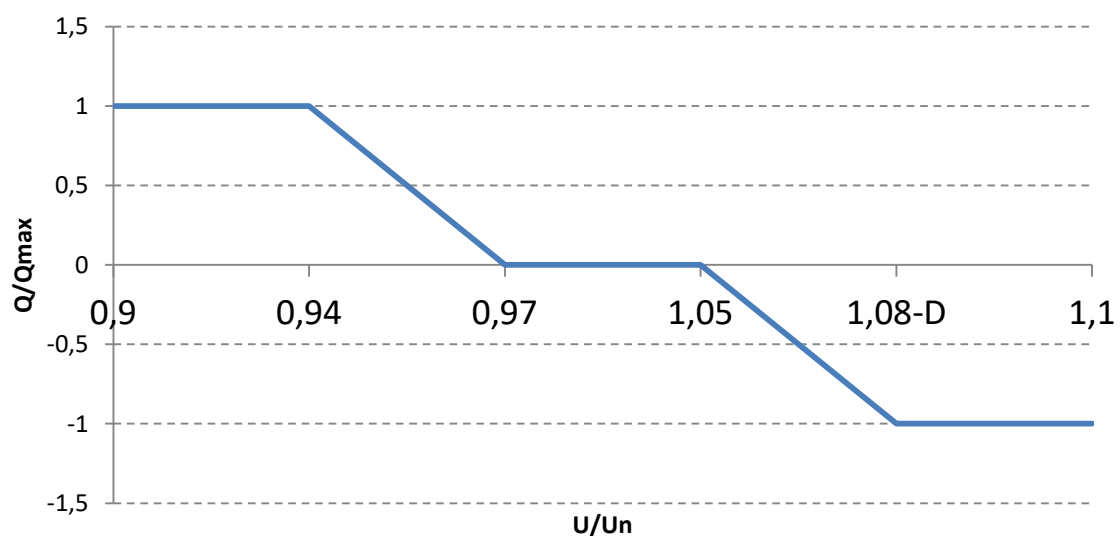
Tab. 8.6 – Hodnoty jednotlivých výroben - varianta 1

Prvek	U (kV)	U _f (V)	U/U _n	Q (kVAr)	Q/Q _{max}
V1	0,4216	243,3993	1,0540	0,0389	0,0155
V2	0,4221	243,6765	1,0552	0,0000	0,0000
V3	0,4235	244,4905	1,0587	0,5963	0,2369
V4	0,4240	244,7850	1,0600	0,8773	0,3486
V5	0,4243	244,9582	1,0607	1,0890	0,4327
V6	0,4257	245,7780	1,0643	1,8798	0,7469
V7	0,4261	246,0032	1,0652	2,1162	0,8408

Je patrné, že došlo k částečnému snížení maximálního dosaženého napětí, ale změna není až tak značná, jak by se čekalo.

8.2.4 Varianta 2 - úprava strmosti podle vzdálenosti

Tato varianta je velice podobná té první, ale dochází zde pouze k posunu posledního modu charakteristiky. Mění se tedy její strmost.



Obr. 8.10 – Q (U) charakteristika - varianta 2

Zde dochází k úpravě podle stejného vzorce (8.9), ale upravuje se pouze poslední bod. To způsobí to, že nejbližší výrobní nejsou tolik z regulace vyřazeny a vzdálenější mají větší nárůst a tím pádem i vliv na regulaci.

Tab. 8.7 – Hodnoty jednotlivých výroben - varianta 2

Prvek	U (kV)	U _f (V)	U/U _n	Q (kVAr)	Q/Q _{max}
V1	0,4215	243,3416	1,0537	0,2526	0,1004
V2	0,4220	243,6129	1,0549	0,3429	0,1362
V3	0,4234	244,4270	1,0584	0,6697	0,2661
V4	0,4239	244,7330	1,0597	0,8299	0,3297
V5	0,4242	244,9120	1,0605	0,9534	0,3788
V6	0,4257	245,7491	1,0641	1,6275	0,6467
V7	0,4260	245,9743	1,0651	1,9002	0,7550

Dosaženo bylo o něco většího regulačního efektu, než ve variantě 1. Rozdíl je však nepatrný.

8.2.5 Varianta 3 – posun omezující charakteristiky třetí mocninou

V této variantě dojde k posunu charakteristiky na stejném principu jako ve variantě 1, ale posunutí bude podle třetí mocniny násobku konstanty posunu **k**, který bude zvolen 0,02.

$$D = \left(\frac{l - l_{střed}}{l_{střed}} \right)^3 \cdot k \quad (8.10)$$

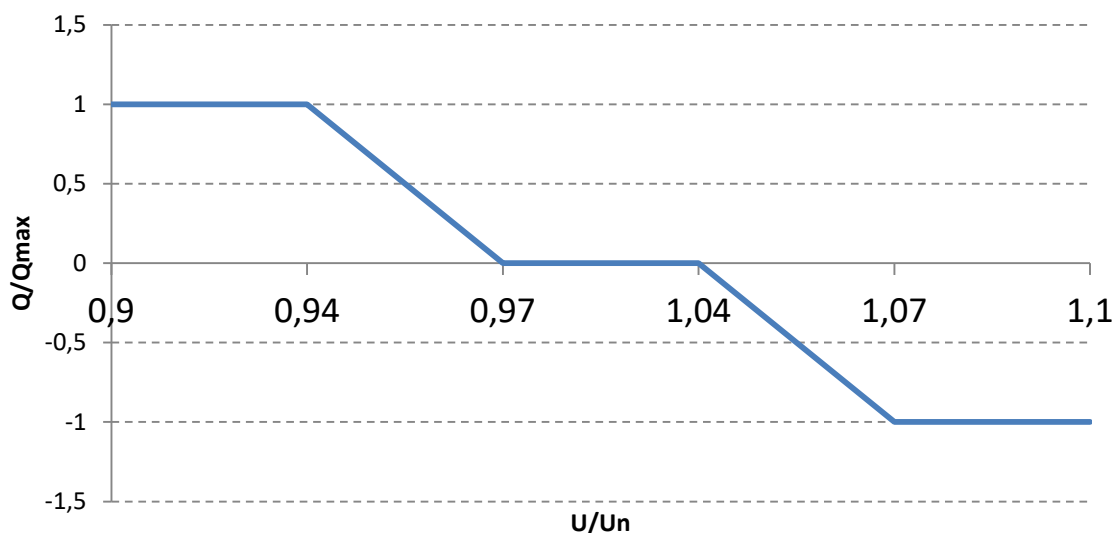
Posun bude tedy výraznější a z důvodu třetí mocniny dojde k vyzdvižení nejbližších výroben a potlačení nejbližších. Výrobní umístěné v okolí střední vzdálenosti budou řízeny téměř nezměněnou běžnou Q (U) charakteristikou.

Tab. 8.8 – Hodnoty jednotlivých výroben - varianta 3

Prvek	U (kV)	U _f (V)	U/U _n	Q (kVAr)	Q/Q _{max}
V1	0,4215	243,3647	1,0538	0,0000	0,0000
V2	0,4220	243,6360	1,0550	0,0928	0,0369
V3	0,4234	244,4270	1,0584	0,6983	0,2774
V4	0,4239	244,7157	1,0597	0,8098	0,3218
V5	0,4241	244,8773	1,0604	0,8882	0,3529
V6	0,4255	245,6452	1,0637	2,0578	0,8176
V7	0,4258	245,8588	1,0646	2,5168	1,0000

8.2.6 Varianta 4 – Posunutá běžná charakteristika

V této variantě se nebude provádět posun bodů regulační charakteristiky podle vzdálenosti, ale dojde pouze k jednoduché úpravě posunutím o hodnotu napětí 0,01. Výsledná charakteristika vypadá následovně.



Obr. 8.11 – Q (U) charakteristika - varianta 4

Lze předpokládat, že v tuto chvíli bude ze sítě odebírán vyšší jalový výkon, a tím narostou i ztráty. To je znázorněné v následující tabulce.

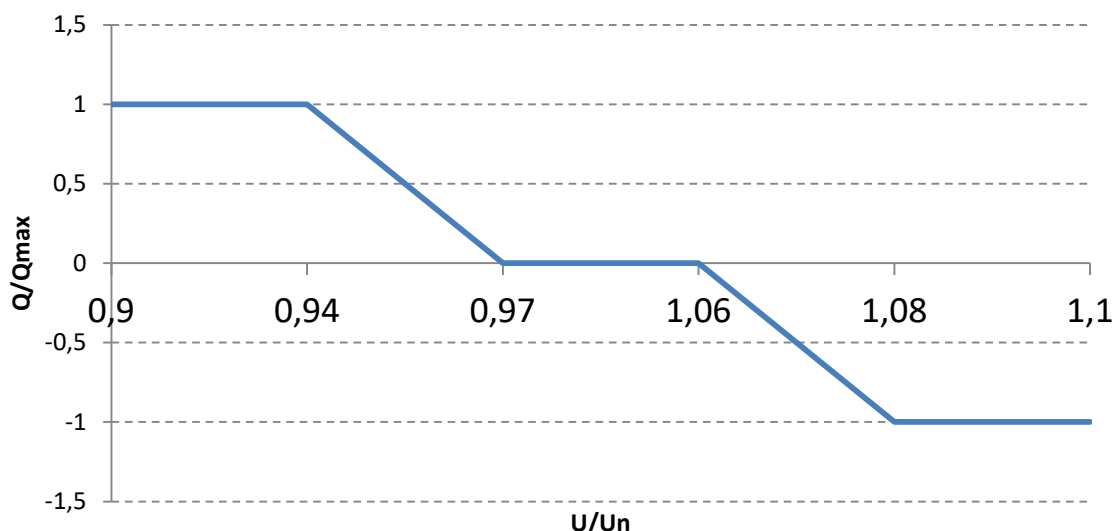
Tab. 8.9 – Hodnoty jednotlivých výroben - varianta 4

Prvek	U (kV)	U _f (V)	U/U _n	Q (kVAr)	Q/Q _{max}
V1	0,4209	243,0298	1,0524	1,0361	0,4117
V2	0,4213	243,2608	1,0534	1,1200	0,4450
V3	0,4226	243,9767	1,0565	1,3800	0,5483
V4	0,4231	244,2538	1,0577	1,4807	0,5883
V5	0,4234	244,4270	1,0584	1,5436	0,6133
V6	0,4248	245,2815	1,0621	1,8540	0,7367
V7	0,4253	245,5182	1,0631	1,9400	0,7708

Tato varianta musí vycházet nejlépe z pohledu snížení napětí, ale ztráty budou výrazné. Regulace je navíc využita na více než 40% u všech výroben.

8.2.7 Varianta 5 – Regulační charakteristika používaná společností E.ON

V této variantě se pro zajímavost provede porovnání s Q (U) charakteristikou používanou společností E.ON [29], která reguluje až od vyšších hodnot napětí.



Obr. 8.12 – Q (U) charakteristika - varianta 5

Společnost E.ON totiž začíná regulovat až od hodnoty napětí vyšší než $1,06 U_n$ na rozdíl od společnosti ČEZ Distribuce, která reguluje od $1,05 U_n$. Obě společnosti mají poslední bod charakteristiky stejný. Charakteristika E.ONu je tedy strmější.

Tab. 8.10 – Hodnoty jednotlivých výroben - varianta 5

Prvek	U (kV)	U_f (V)	U/U_n	Q (kVAr)	Q/Q_{max}
V1	0,4222	243,7284	1,0554	0,0000	0,0000
V2	0,4227	244,0575	1,0568	0,0000	0,0000
V3	0,4245	245,0736	1,0612	0,1510	0,0600
V4	0,4252	245,4605	1,0629	0,3618	0,1437
V5	0,4256	245,6914	1,0639	0,4876	0,1937
V6	0,4273	246,6729	1,0681	1,0225	0,4062
V7	0,4277	246,9269	1,0692	1,1609	0,4612

Zde je jasné, že regulace nebude tolik výrazná, jelikož první 2 výroby se na regulaci nepodílejí vůbec a další 2 také příliš ne.

8.2.8 Porovnání jednotlivých variant

Z provedených variant vznikla následující tabulka, ve které jsou uvedeny jak hodnoty napětí a využití regulace jednotlivých výroben, tak i hodnoty potřebného regulačního výkonu a ztráty.

Tab. 8.11 – Porovnání jednotlivých variant

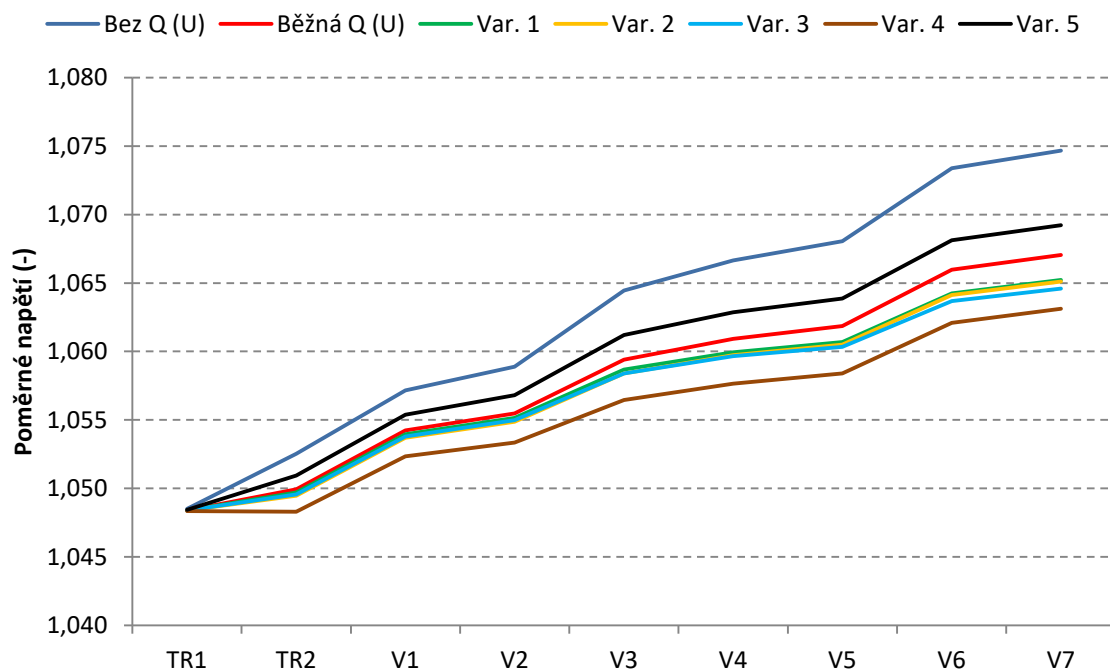
Vzdálenost od DTR (m)	Prvek	U/U _n (-)						
		Bez Q (U)	Běžná Q (U)	Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 4	Var. 5
-	TR1	1,049	1,048	1,048	1,048	1,048	1,048	1,048
-	TR2	1,053	1,050	1,050	1,049	1,050	1,048	1,051
136	V1	1,057	1,054	1,054	1,054	1,054	1,052	1,055
183	V2	1,059	1,055	1,055	1,055	1,055	1,053	1,057
366	V3	1,064	1,059	1,059	1,058	1,058	1,056	1,061
456	V4	1,067	1,061	1,060	1,060	1,060	1,058	1,063
533	V5	1,068	1,062	1,061	1,061	1,060	1,058	1,064
788	V6	1,073	1,066	1,064	1,064	1,064	1,062	1,068
868	V7	1,075	1,067	1,065	1,065	1,065	1,063	1,069
ΣQ (kVAr)		0,000	6,284	6,598	6,576	7,064	10,355	3,184
ΔP (kW)		0,846	0,905	0,931	0,934	0,945	0,977	0,878
ΔQ (kVAr)		3,502	3,537	3,554	3,555	3,561	3,587	3,519

kde ΣQ je suma jalového výkonu odebíraného jednotlivými výrobkami

ΔP jsou činné ztráty v síti

ΔQ jsou jalové ztráty v síti

V uvedené tabulce je jasně vidět, že v jakékoliv variantě došlo k zvýšení potřebného výkonu a také ke zvýšení ztrát oproti běžné charakteristice. Co se napětí týče, výsledek bude lépe patrný na následujícím grafu.



Obr. 8.13 – Rozložení napětí podél napájecí větve u jednotlivých variant

V tomto grafu lze názorně vidět, že ke snížení napětí vlivem provedených variant skutečně došlo a to ne úplně zanedbatelně. Vše je ovšem nutné porovnávat také z hlediska ztrát a to se jeví jako nejlepší běžná Q (U) charakteristika. Pokud by se měl udělat

kompromis mezi ztrátami a regulací napětí, vyšla by nejlépe varianta 1, tedy lineární posun oblasti regulace.

Charakteristika společnosti E.ON (varianta 5) má sice poloviční spotřebu jalového výkonu, ale regulace napětí je značně nižší. Použití posunuté charakteristiky (varianta 4) se zdá být zbytečné, jelikož dodaný jalový výkon je již značně vyšší.

Tato kapitola byla zpracována s využitím dat ze zdroje [28].

9 Závěr

Tématem této práce byly fotovoltaické elektrárny o malém výkonu s akumulací. Prvně byly popsány aktuální problémy v oblasti legislativy týkající se samostatných akumulacních zařízení, kde nyní nelze takovéto zařízení provozovat z důvodu neznalosti tohoto termínu v Energetickém zákoně. Pro lepší pochopení dané problematiky byl podrobně vysvětlen princip jednotlivých komponent, které výrobná obsahuje. Velká část práce je také věnována podmínkám, které musí jednotlivé výrobné splňovat. Ty se liší podle jejich kategorie. Ta je určena jejich výkonem, který také určuje, do jaké napěťové hladiny má být připojena. Hlavně zde byly uvedeny regulační charakteristiky, které mají pomoci udržet parametry napětí definované v normě ČSN EN 50 160. Těmto podmínkám se věnují PPDS příloha 4, kde jsou také uvedeny limity zpětných vlivů na síť. V další části byly uvedeny typické případy zapojení výrobné a akumulacního zařízení.

Velice podstatnou částí této práce je vyhodnocení dat o provozu fotovoltaické elektrárny za rok 2019. Ta je zde instalována, aby zamezila výkonovým špičkám a primárně napájela objekt v němž je umístěna. Do elektrické sítě tedy dodává až ve chvíli, kdy energii z fotovoltaických panelů není možné spotřebovat nebo uložit do baterií. I tak je zde přetok omezen na 50 % instalovaného výkonu střídače, tedy 2,6 kW. Bylo zjištěno, že výrobná téměř dokonale zabránila odběru vysokých výkonů ze sítě a po velkou část roku do elektrické sítě energii dodávala o výkonu 2,6 kW, na který byla omezena. Zatímco s výrobnou byl maximální odebíraný výkon okolo 1 kW, bez výrobné by to bylo skoro 3 kW, což může být podstatné ušetření na rezervovaném výkonu v síti a tím i na možnosti připojení více odběratelů, ale i ušetření za pevnou platbu za velikost jističe.

Dále se sledovalo dodržení limitů na velikost napětí podle normy ČSN EN 50 160 a došlo se k závěru, že napětí bylo překročeno celkem v sedmi týdnech roku a to vždy v druhé fázi a bylo by tedy vhodné tuto fázi více zatěžovat. Ovšem pouze 4 týdenní překročení pravděpodobně způsobila sledovaná výrobná. K poklesu pod povolenou hodnotu nedošlo ve sledovaném období ani jednou. V další části se ověřoval vliv výrobné na nesymetrii. Z principu tato výrobná nemůže způsobit nesymetrii, protože dodává symetricky, ale lze tuto analýzu provést pro zjištění, jak je na tom konkrétní síť. Byly však známy pouze hodnoty napětí a nikoliv i jejich vzájemné úhly natočení, proto nelze tuto analýzu brát zcela věrohodně. Zjištěno bylo, že síť vyhovuje z důvodu nesymetrie v 27 % roku, což není zrovna pozitivní výsledek, ale také tato metoda nemá dostatek vstupních dat.

Dále se ověřoval vliv $P(U)$ charakteristiky, která po celý rok byla dodržena. Co nebylo dodrženo a bylo názorně v této analýze vidět, je omezení přetoku do sítě, ale pouze v případě pěti hodnot. Jednalo se tedy buďto o chybu regulace nebo bylo s měničem v tu chvíli manipulováno. Ovšem i zde byla dodržena tato charakteristika. $Q(U)$ charakteristika byla také splněna a je vidět, že odběr jalového výkonu byl i v době, kdy tato charakteristika nereagovala. Největší byl o víkendech, kdy je s největší pravděpodobností používán nějaký

indukční motor. Ovšem při dosažení hodnot napětí, kdy tato regulace reaguje, jalový výkon neklesl pod požadovanou úroveň.

Celkové ztráty na výrobně dosáhly za rok hodnoty 443 kWh. Dále byla vyhodnocována účinnost baterie a její závislost na době provozu. Výpočet se prováděl na základě informace o energii dodané do baterie a energii z ní odebrané vždy od úplného vybití do dalšího úplného vybití. Účinnost v čase byla určena lineární aproximací jednotlivých účinností. Za rok 2019 klesla účinnost o necelé procento.

Další kapitola se věnovala pohledu na napětí podél vývodu v době zimního a letního měření. Zde byl viditelný vliv zimního počasí na nabíjení baterií, kdy v tomto období jsou hodnoty napětí v 11:00 a 13:00 nejvyšší vlivem výroby nebo alespoň snížené spotřeby. Napětí v tuto dobu je nejvyšší a naopak v 3:00 nebo v 17:00 je výrazně nižší. V době letního měření není tento rozptyl takový, ale je zde vidět výrazné zvýšení napětí v místě s instalovanými zdroji.

Poslední část se věnovala simulaci vlivu výroben na danou DS. Zde se potvrdilo to, co ukázaly předchozí kapitoly, ale i to, co by mělo vycházet ze studií připojitelnosti. Napětí je tedy ve všech simulovaných variantách v povolených mezích. Pro dosažení lepších hodnot by bylo vhodné snížit hodnotu napětí na DTR pro letní období, kdy je výroba vyšší a spotřeba nižší. Další část se věnovala rozdílnému nastavení regulačních charakteristik, pro zjištění, zda je používána charakteristika ta nejlepší. Porovnávány byly výsledky celkem šesti variant, kdy se porovnávala již používaná $Q(U)$ charakteristika s charakteristikami laděnými podle vzdálenosti výroby od DTR, ale i charakteristikou používanou společností E.ON. Bylo zjištěno, že lepších výsledků lze dosáhnout při rozdílném nastavení podle vzdálenosti, ale zde by mohl být problém, že o regulaci by se starali výhradně nejvzdálenější zákazníci, kteří by napětí v síti stabilizovali svoji vyrobenou energií. To by také způsobovalo větší ztráty na jejich zařízeních a tím menší možnost prodávat vyrobenou energii. Například charakteristika E.ONu vyšla oproti charakteristice používané společností ČEZ Distribuce jako znatelně horší z hlediska regulace napětí, ale potřebuje přibližně pouze polovinu regulačního jalového výkonu. Všechny varianty však přispěly kladně k regulaci a napětíový profil byl pozvolnější.

10 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] **Ministerstvo průmyslu a obchodu.** Národní akční plán pro chytré sítě 2019 - 2030. [Online] 9 2019. [Citace: 10. 3 2020.] https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/narodni-akcni-plan-pro-chytre-site/2019/9/Aktualizace_NAP_SG_2019-2030.pdf.
- [2] Zákon č. 458/2000 Sb. [Online] 29. 12 2000. [Citace: 1. 12 2019.] <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-458#cast1>.
- [3] **Fousek, Mgr. Jan.** PERSPEKTIVY ROZVOJE AKUMULACE ENERGIE. *AKU-BAT CZ*. [Online] 24. 1 2019. [Citace: 3. 3 2020.] <http://static.tot.s9.upgates.com/w/w5c4b23ccc6fcf-05-fousek.pdf>.
- [4] SEF (2): Dojde již brzy k zakotvení akumulace energie v novém energetickém zákoně? *Solární novinky*. [Online] 1. 12 2019. [Citace: 1. 12 2019.] <http://www.solarninovinky.cz/?zpravy/2019113003/sef-2-dojde-jiz-brzy-k-zakotveni-akumulace-energie-v-novem-energetickem-zakone>.
- [5] **Maňák, Martin.** Aktuální stav novely Energetického zákona a Zákona o podporovaných zdrojích energie. *Frank Bold Advokáti*. [Online] 25. 6 2019. [Citace: 9. 4 2020.] <https://www.fbadvokati.cz/cs/clanky/2821-aktualni-stav-novely-energetickeho-zakona-a-zakona-o-podporovanych-zdrojih-energie>.
- [6] Fotovoltaické elektrárny - princip funkce a součásti, elektrárny v ČR. *oEnergetice.cz*. [Online] 16. 12 2016. [Citace: 13. 11 2019.] <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/fotovoltaicka-elektrarna-princip-funkce-a-soucasti>.
- [7] Jak funguje olověný akumulátor? *TBZ-info*. [Online] 2. 8 2017. [Citace: 20. 11 2019.] <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elekriny/16090-jak-funguje-oloveny-akumulator>.
- [8] Baterie HE3DA – výroba, zátěž, zkrat a crash test. *TBZ-info*. [Online] 12. 2 2018. [Citace: 22. 11 2019.] <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elekriny/16935-baterie-he3da-vyroba-zatez-zkrat-a-crash-test>.
- [9] Fotovoltaické systémy s východo-západní orientací a pouze jedním střídačem. *TBZ-info*. [Online] 18. 3 2013. [Citace: 23. 11 2019.] <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/9667-fotovoltaicke-systemy-s-vychodo-zapadni-orientaci-a-pouze-jednim-stridacem>.
- [10] **Tomáš Linhart, Jan Švec, Stanislav Hes, Luděk Frejvald, Jiří Dvořák.** *TESTOVÁNÍ FV STŘÍDAČŮ V LABORATOŘI ČEZ DISTRIBUCE*. Tábor : CIRED, 2019.
- [11] **Kolektiv.** Evaluation of the Voltage Support Strategies for the Low Voltage Grid Connected PV. [Online] 2010. [Citace: 2. 12 2019.] <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5617937>.
- [12] Jak funguje fotovoltaický neboli solární panel? *E.ON Solar*. [Online] 7. 5 2018. [Citace: 13. 11 2019.] <https://www.eon-solar.cz/blog/1-jak-funguje-fotovoltaicky-panel>.
- [13] Slunce a jeho energie. *TBZ-info*. [Online] 27. 4 2004. [Citace: 13. 11 2019.] <https://oze.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/1948-slunce-a-jeho-energie>.
- [14] **Soukup, Jan.** *Solární regulátor nabíjení*. [Online] 2013. [Citace: 13. 11 2019.] <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/21118/F3-DP-2014-Soukup-Jan-prace.pdf>.

- [15] Li-ion baterie: principy, provoz, rady (1.část). *Cnews.cz*. [Online] 15. 4 2011. [Citace: 22. 11 2019.] <https://www.cnews.cz/li-ion-baterie-principy-provoz-rady-1-cast/>.
- [16] **Doležal, Michal**. Lithium-železo-fosfátové akumulátory – budoucnost domácí výroby a spotřeby elektriny. *Nazeleno.cz*. [Online] 25. 3 2014. [Citace: 22. 11 2019.] <https://www.nazeleno.cz/lithium-zelezo-fosfatove-akumulatory-budoucnost-domaci-vyroby-a-spotreby-elektriny.aspx>.
- [17] Baterie. *Solar-Eshop*. [Online] [Citace: 22. 11 2019.] <https://www.solar-eshop.cz/c/fotovoltaika-1/solarni-akumulatory/>.
- [18] **Kolektiv**. *GRID-FRIENDLY OPERATION OF A HYBRID BATTERY STORAGE SYSTEM*. Madrid : CIRED, 2019.
- [19] ČEZ Distribuce. *Pravidla provozování distribuční soustavy (PPDS) 2019*. [Online] 2018. [Citace: 8. 10 2019.] https://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/ppds-2018_priloha-4.pdf.
- [20] ČSN EN 50160 ED.3 (330122) - Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě. místo neznámé : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [21] *ROCOF*. [Online] [Citace: 15. 10 2019.] <http://www.rocofmetrology.eu/>.
- [22] **ČEZ Distribuce, E.ON ČR, PREDistribuce, E.ON distribuce**. PNE 33 3430-8-1 - Požadavky pro připojení generátorů nad 16 A na fázi do distribučních sítí - Část 8-1: Sítě nn. *Podnikové normy | České sdružení regulovaných elektroenergetických společností*. [Online] 1. 1 2015.
- [23] **Hes, Stanislav**. Implementation of solution. *Interflex*. [Online] [Citace: 12. 11 2019.] https://interflex-h2020.com/wp-content/uploads/2019/01/D6.2-Implementations-of-solution_CezDistribuce_InterFlex_v1.0.pdf.
- [24] ČSN EN 50438 ED.2 (330127) - Požadavky na paralelní připojení mikrogenerátorů s veřejnými distribučními sítěmi nízkého napětí. místo neznámé : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [25] **ČEZdistribuce, E.ONdistribuce, E.ONČR, PRE distribuce, ČEPS**. PNE 33 3430-0 ed.5 - VÝPOČETNÍ HODNOCENÍ ZPĚTNÝCH VLIVŮ ODBĚRATELŮ A ZDROJŮ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV. *Podnikové normy | České sdružení regulovaných elektroenergetických společností*. [Online] 1. 1 2015.
- [26] NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2016/631 . *Právo EU - EUR-Lex*. [Online] 27. 4 2016. [Citace: 9. 10 2019.] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0631&from=EN>.
- [27] Fronius SYMO Hybrid. *MTECH SOLAR*. [Online] [Citace: 26. 11 2019.] <https://www.mtechsolar.cz/menice-fronius-ig-15-60-hv>.
- [28] **ČEZ Distribuce**. Data poskytnuta společností ČEZ Distribuce. 2019.
- [29] **Tesařová, Miloslava**. *Requirements for generating plants in the Czech Republic*. University of West Bohemia (Západočeská univerzita v Plzni) : Department of Electrical Power Engineering, 2019.

11 Přílohy

Článek RfG	Požadavky RfG	Typ výrobního modulu					
		A1	A2	B1	B2	C	D
13.1a	Frekvenční rozsahy a časové limity pro VM	X	X	X	X	X	X
13.1b	Hodnota rychlosti změny frekvence (RoCoF)	X	X	X	X	X	X
13.6	Logické rozhraní pro přerušení dodávky činného výkonu ⁴	X	X	X	X		
13.7	Podmínky pro automatické připojení k soustavě	X	X	X	X	X	
14.2	Rozhraní pro snížení činného výkonu		X	X			
14.5d	Komunikace a výměna informací		X	X	X	X	X
15.2a,b	Regulovatelnost činného výkonu			X	X	X	X
15.2g	Komunikace a výměna informací o režimu FSM					X	X
15.5a	Schopnost startu ze tmy				X ⁵	X	X
15.5b	Schopnost ostrovního provozu					X	X
15.5c	Rychlé opětovné přifázování					X	X
15.6a	Kritéria pro detekci ztráty úhlové stability nebo ztráty regulace					X	X
15.6b	Přístrojové vybavení			X	X	X	X
15.6c	Simulační modely				X	X	X
15.6e	Minimální a maximální limity rychlosti změn činného výkonu				X	X	X
16.2b	Doby připojení VM k soustavě v případě přepětí a podpětí						X
16.2c	Automatické odpojení na základě hodnoty napětí						X
16.4	Nastavení synchronizačních zařízení						X
17.2a	Dodávka jalového výkonu			X			
18.2	Dodávka jalového výkonu				X	X	X
20.2a	Dodávka jalového výkonu u nesynchronních VM		X	X			
20.2b,c	Rychlý poruchový proud v případě poruchy			X	X	X	X
21.3b,c	Dodávka jalového výkonu				X	X	X
21.3d	Režimy regulace jalového výkonu				X	X	X

Obr. 11.1 – Požadavky na výrobní [19]

Řád harmonických ν, μ	Přípustný vztažný proud $i_{\nu, \mu}$ [A/MVA]
3	3
5	1,5
7	1
9	0,7
11	0,5
13	0,4
17	0,3
19	0,25
23	0,2
25	0,15
$25 < \nu < 40$	$0,15 \cdot 25/\nu$
$\mu < 40^a$	$0,15 \cdot 25/\nu$
sudé	$1,5/\nu$
$\mu < 40$	$1,5/\nu$
$42 < \mu, \nu < 178^b$	$4,5/\nu$
a liché.	
b Celočíselné a neceločíselné v pásmu šířky 200 Hz od střední frekvence ν Měření podle ČSN EN 61000-4-7	

Obr. 11.2 – Povolené hodnoty vyšších harmonických pro sítě NN [19]

Řád harmonické μ, ν	Přípustný vztažný proud harmonických $i_{\mu, \nu}$ [A/MVA]		
	síť 10 kV	síť 22 kV	síť 35 kV
5	0,115	0,058	0,033
7	0,082	0,041	0,023
11	0,052	0,026	0,015
13	0,038	0,019	0,011
17	0,022	0,011	0,006
19	0,016	0,009	0,005
23	0,012	0,006	0,003
25	0,01	0,005	0,003
>25 nebo sudé	$0,06/\nu$	$0,03/\nu$	$0,017/\nu$
$\mu < 40$	$0,06/\mu$	$0,03/\mu$	$0,017/\mu$
$\mu > 40$	$0,16/\mu$	$0,09/\mu$	$0,046/\mu$

Obr. 11.3 – Povolené hodnoty vyšších harmonických pro sítě VN [19]

Řád ν, μ	Přípustný vztažný proud harmonických $i_{\nu, \mu}$ v A/GVA
5	2,6
7	3,75
11	2,4
13	1,6
17	0,92
19	0,70
23	0,46
25	0,32
> 25 nebo sudé	$5,25 / \nu$
$\mu < 40$	$5,25 / \mu$
$\mu > 40^{10}$	$16 / \mu$

Obr. 11.4 – Povolené hodnoty vyšších harmonických pro sítě 110 kV [19]

Tab. 11.1 – Iterace Q (U) charakteristiky pro zatížení v jedné fázi

U (kV)	U _f (V)	U/U _n	Q (kVAr)	Q/Q _{max}
V3 a V4				
0,4227	244,04596	1,0568	0,5663	0,2250
0,4212	243,16261	1,0529	0,2454	0,0975
0,4220	243,62449	1,0549	0,4132	0,1642
0,4216	243,42819	1,0541	0,3419	0,1358
0,4218	243,5148	1,0545	0,3733	0,1483
0,4217	243,45129	1,0542	0,3503	0,1392
V1				
0,4235	244,51939	1,0588	0,7383	0,2933
0,4214	243,27231	1,0534	0,2852	0,1133
0,4224	243,89585	1,0561	0,5117	0,2033
0,4220	243,63604	1,0550	0,4174	0,1658
0,4222	243,75151	1,0555	0,4593	0,1825
0,4221	243,67645	1,0552	0,4321	0,1717
V2				
0,4233	244,40392	1,0583	0,6963	0,2767
0,4211	243,09333	1,0526	0,2202	0,0875
0,4221	243,72264	1,0554	0,4488	0,1783
0,4217	243,46284	1,0542	0,3544	0,1408
0,4219	243,57253	1,0547	0,3943	0,1567
0,4218	243,49748	1,0544	0,3670	0,1458
V5				
0,43273	249,83678	1,0818	2,5168	1,0000
0,4261	246,00895	1,0653	1,2794	0,5083
0,42816	247,19829	1,0704	1,7114	0,6800
0,42734	246,72486	1,0684	1,5394	0,6117
0,42772	246,94426	1,0693	1,6191	0,6433
0,42749	246,81147	1,0687	1,5709	0,6242
V6				
0,43101	248,84374	1,0775	2,3092	0,9175
0,42652	246,25144	1,0663	1,3675	0,5433
0,42862	247,46387	1,0716	1,8079	0,7183
0,42778	246,9789	1,0695	1,6317	0,6483
0,42817	247,20406	1,0704	1,7135	0,6808
0,42794	247,07127	1,0699	1,6653	0,6617