

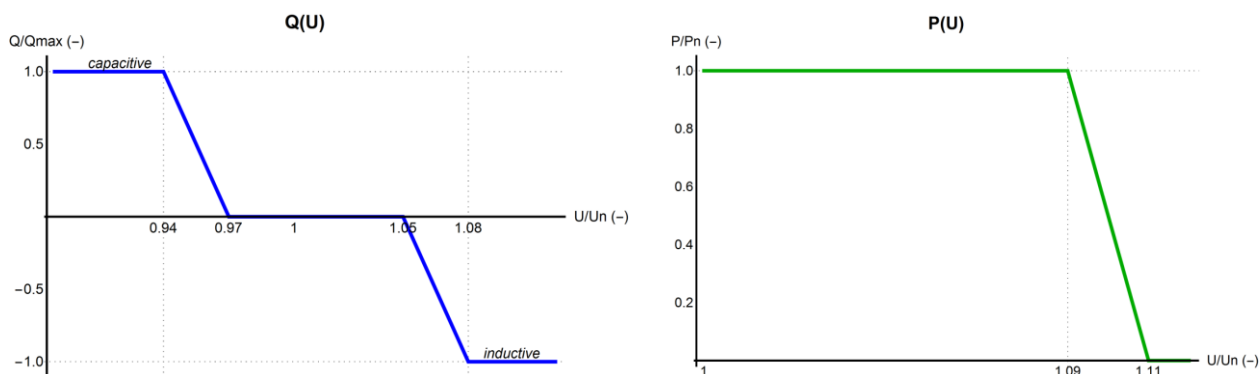
VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ PROVOZU FV STŘÍDAČŮ S POKROČILÝMI FUNKCEMI V DS V PROJEKTU INTERFLEX

Jan Švec, Stanislav Hes, Jan Kůla, Pavel Derner, ČEZ Distribuce, a.s.

Příspěvek se věnuje výsledkům dlouhodobého měření provozu FV střídačů s pokročilými regulačními funkcemi, které jsou v distribučních sítích nn instalovány v rámci evropského projektu InterFlex. ČEZ Distribuce instalovala pro účely testování v projektu InterFlex ve třech lokalitách FV střídače s pokročilými funkcemi o celkovém výkonu vyšším, než by bylo standardně přípustné. Různé analýzy naměřených dat z míst připojení i jiných částí sítě ukazují, že díky správnému fungování autonomních regulací nejsou překročeny limity parametrů kvality elektrické energie a výroba energie z FV zdrojů není nijak významně omežována. Zároveň je na dlouhodobých měřeních ukázáno na reálnou možnost zvýšení připojitelného výkonu výroben na nn díky autonomním regulacím. Rovněž je analyzován vliv omezení přetoků do sítě výroben s akumulací na úroveň napětí i na možnost připojitelnosti do sítě.

1. STŘÍDAČE S AUTONOMNÍMI REGULAČNÍMI FUNKCEMI V PROJEKTU INTERFLEX

Nové decentrální výroby (DECE) na hladině nn, kterých bude dle očekávání do budoucna výrazným tempem přibývat, jsou v souladu s PPDS [1] i technickými normami [2], [3] vybaveny autonomními regulačními funkcemi $Q(U)$ a $P(U)$. Tyto regulační funkce mají za úkol měnit jalový, případně činný výkon výroby v závislosti na hodnotě napětí v místě instalace s cílem stabilizovat napětí v místě připojení, resp. zmírňovat vliv samotné výroby na napětí v síti. Jejich činnost je podmíněna pouze lokálním měřením napětí v místě připojení a není tedy závislá na jakékoliv komunikaci s nadřazenou/centrální regulační jednotkou. ČEZ Distribuce, a.s. (ČEZd) na svém distribučním území vyžaduje od dubna 2017 nastavení těchto regulačních charakteristik dle Obr. 1.



Obrázek 1 Autonomní regulační charakteristiky v síti ČEZ Distribuce

Definování bodů obou charakteristik proběhlo na základě zkušeností ze zahraničí (např. DG DemoNet - Smart LV Grid (<https://www.ait.ac.at/themen/smart-grids/projects/dg-demonet-smart-lv-grid/>), Smart Grid Salzburg – Köstendorf (<http://www.smartgridssalzburg.at/>)) i provozních vlastností distribuční sítě ČEZd. Při napětí blízkém jmenovitému pracuje výroba s neutrálním účinníkem. Při výraznějším poklesu napětí přejde výroba do kapacitního režimu (přebuzení, dodávka Q do sítě) a snaží se napětí v síti zvýšit. Při vyšším nárůstu napětí přejde výroba naopak do induktivního režimu (podbuzení, odběr Q ze sítě) a snaží se napětí v síti snižovat. V obou režimech je dle PPDS [1] vyžadován limit účinníku 0,9. Dojde-li v síti k velmi výraznému nárůstu napětí i přes plnou aktivaci funkce $Q(U)$, je aktivováno snižování dodávaného činného výkonu výroby od aktuální hodnoty. Funkce $P(U)$ slouží zejména jako mezní opatření pro udržení parametrů kvality napětí [4] a neměla by být aktivována příliš často i s ohledem na omezení vyráběné energie.

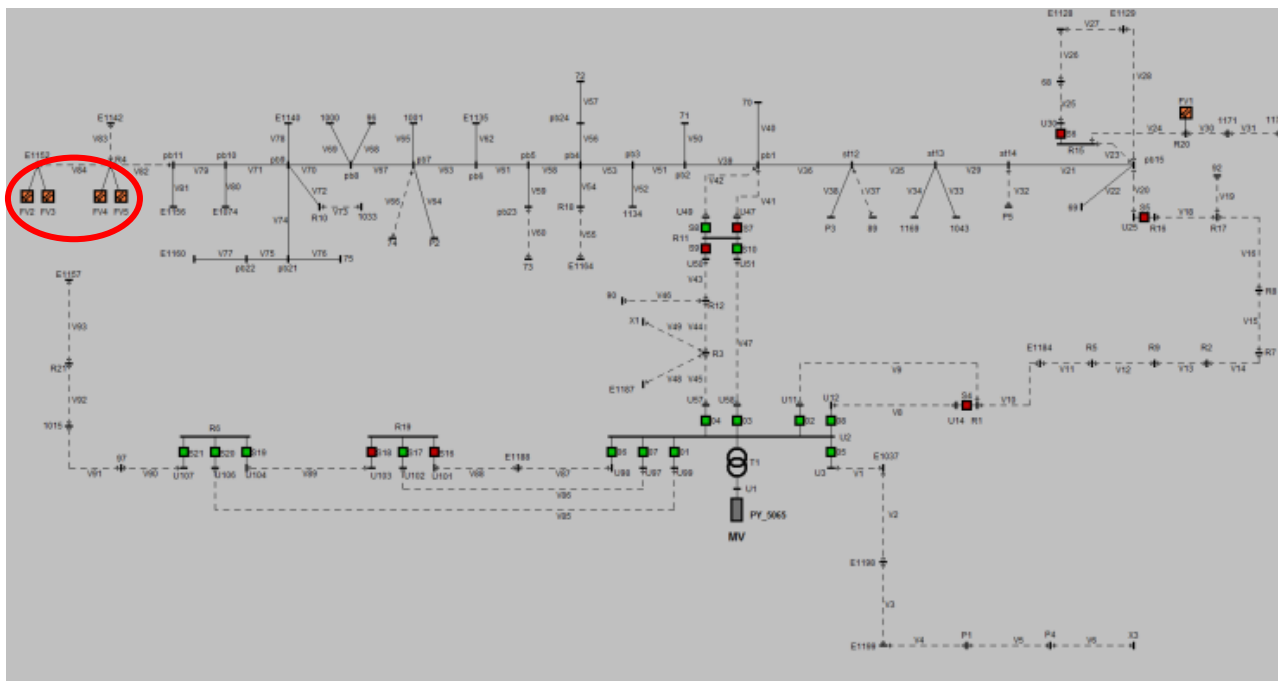
Pro účely testování chování střídačů s autonomními regulačními funkcemi jsou v rámci projektu InterFlex [5] instalovány, provozovány a dlouhodobě monitorovány střídače Fronius Symo (Hybrid). Střídače jsou instalovány ve 3 obcích Divišov, Lužany a Těptín, v nichž se dotčené sítě a vývody nn liší provedením vedení, délkou i rozmístěním FV výroben podél vývodu. Jedná se o střešní FV systémy (v případě Lužan rovněž s domácí bateriovou akumulací) o výkonech cca $3 \div 10$ kW. Ve všech případech se jedná o 3fázové výroby s 3f střídači (jedinou výjimkou je 1f střídač Schneider Electric pro výrobu 3,6 kWp v Lužanech). Aktuálně jsou v těchto sítích instalovány střídače v následujícím rozsahu:

- Těptín – 2 x 10 kW + 2 x 3 kW
- Divišov – 4 x 5 kW
- Lužany – 4 x 5 kW hybrid + 1 x 3,6 kW (1f) hybrid

Střídače dodávají činný i jalový výkon 3f symetricky, Q (U) funkce reaguje na průměrné napětí ze všech fází, P (U) funkce reaguje na maximální napětí ze všech fází. Před instalací do distribučních sítí byly všechny funkce střídačů testovány v laboratořích AIT (Austrian Institute of Technology) ve Vídni. Výsledky těchto testů prokázaly spolehlivé a korektní chování střídačů dle všech požadavků PPDS i technických norem.

V příspěvku jsou prezentovány výstupy a vyhodnocení z dlouhodobého měření ve dvou lokalitách – Těptín a Lužany.

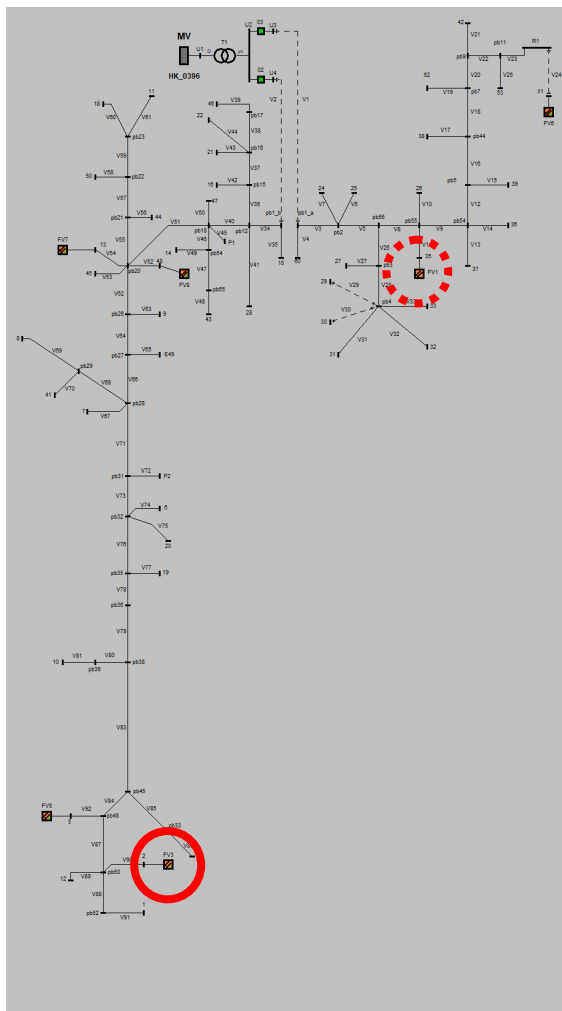
V případě Těptína jde o vyhodnocování autonomních funkcí Q (U) a P (U), které jsou klíčové pro Use Case 1 projektu InterFlex – „Zvýšení připojitelnosti DECE na hladině nn pomocí chytrých střídačů FVE“. Instalovány jsou 4 střídače (viz. Obr. 2) na vývodu cca 600 m od DTS 22/0,4 kV. Celkový instalovaný výkon vyroben činí cca 25,9 kW (2 x 9,81 kW + 2 x 3,12 kW). Standardním výpočtem připojitelnosti ($\cos \varphi = 1$) by bylo připojeno pouze 14,6 kW. Kdybychom uvažovali $\cos \varphi = 0,9$ ind reprezentující Q (U) funkce dle [6], bylo by připojeno 18,2 kW. Došlo tedy k navýšení připojitelného výkonu o 78 %, resp. o 41 %. Přesto dlouhodobé měření neprokázalo jakékoliv překročení limitů kvality elektrické energie v předávacích místech dle [4]. Jako nejkritičtější místo z napěťového hlediska se samozřejmě jeví konec vývodu, kde jsou instalovány 2 FVE po 9,81 kWp (střídač 10 kW). V tomto bodě je 3f napájecí impedance $Z = (0,36 + j0,13) \Omega$, $R/X = 2,75$, zkratový výkon $S_k = 260$ kVA. V další kapitole jsou pak prezentována data měřená přímo na svorkách střídače v tomto koncovém bodě vývodu.



Obrázek 2 FV výroby v lokalitě Těptín

V případě Lužan jde zejména o vyhodnocení dodatečné funkce omezení přetoků výkonu do DS. Systém FVE + baterie má aktivováno omezení přetoku rovné 50 % výkonu instalovanému ve FV panelech. Jedná se o omezení definované součtově přes 3 fáze pro účely Use Case 4 projektu InterFlex – „Chytrá akumulace na straně zákazníka“. Toto omezení je dalším uvažovaným technickým opatřením pro zvýšení připojitelnosti

výroben na nn. Kromě tohoto omezení přetoku jsou střídače rovněž vybaveny aktivními funkcemi Q (U) a P (U), stejně jako pro Use Case 1. Měření je zde analyzováno pro výrobu 5,2 kWp (hybridní střídač 5 kW) s omezením přetoku na 2,6 kW, která je umístěna poblíž konce vývodu cca 900 m od DTS 35/0,4 kV – viz Obr. 3.



Obrázek 3 FV výroby v lokalitě Lužany

Všechna prezentovaná měření jsou průměrné efektivní hodnoty za 1 minutu, jedná se o měření pomocí přenosných PQ monitorů MEG38.

2. VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ AUTONOMNÍCH REGULAČNÍCH FUNKCÍ

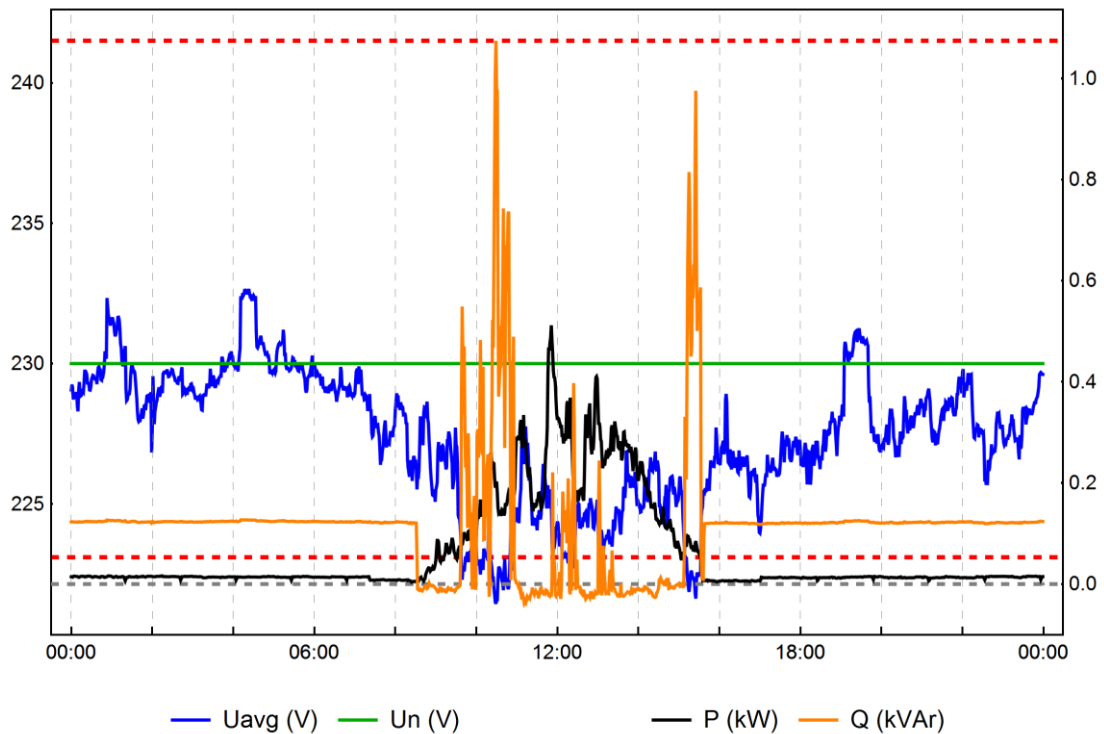
Měření bylo prováděno přímo na svorkách 10 kW střídače Fronius Symo pro FV výrobu 9,81 kWp.

2.1. DENNÍ PRŮBĚHY

Ačkoliv se hlavní přínos autonomních funkcí projeví zejména v období s vysokým slunečním svitem, vzhledem k definovanému tvaru Q (U) charakteristiky je tato aktivována i např. v zimním období při nízkých napětích v síti. Z Obr. 4 je zřejmé, že klesne-li průměrné napětí (modrá) pod zlomový bod Q (U) charakteristiky 0,97 Un (červená čárkovaná), začne střídač dodávat jalový výkon do sítě (pracuje v kapacitním módu - přebuzení), čímž pomáhá napěťově podporovat síť v období nízkého napětí. Je zřejmé, že účinnost je při dodávce cca 1 kVAr velmi nízký. Toto je dáno omezením střídače, který má limit minimálního účinníku 0 (liší se pro různé řady střídačů). Je nutné poznamenat, že v případě síťových nehybridních střídačů je tato podpora k dispozici pouze v denní dobu, protože střídač je v době bez slunečního svitu v neaktivním režimu, tedy bez jakékoliv cílené P, Q výměny se sítí. Z Obr. 4 je rovněž vidět, že střídač v noční dobu (bez slunečního svitu) dodává do sítě malý jalový výkon (cca 120 VAr), což je způsobeno jeho vypnutou Q regulací a přítomností

kapacitních vstupních obvodů. Toto opět platí pouze pro nehybridní střídače, hybridní jsou v aktivním stavu neustále.

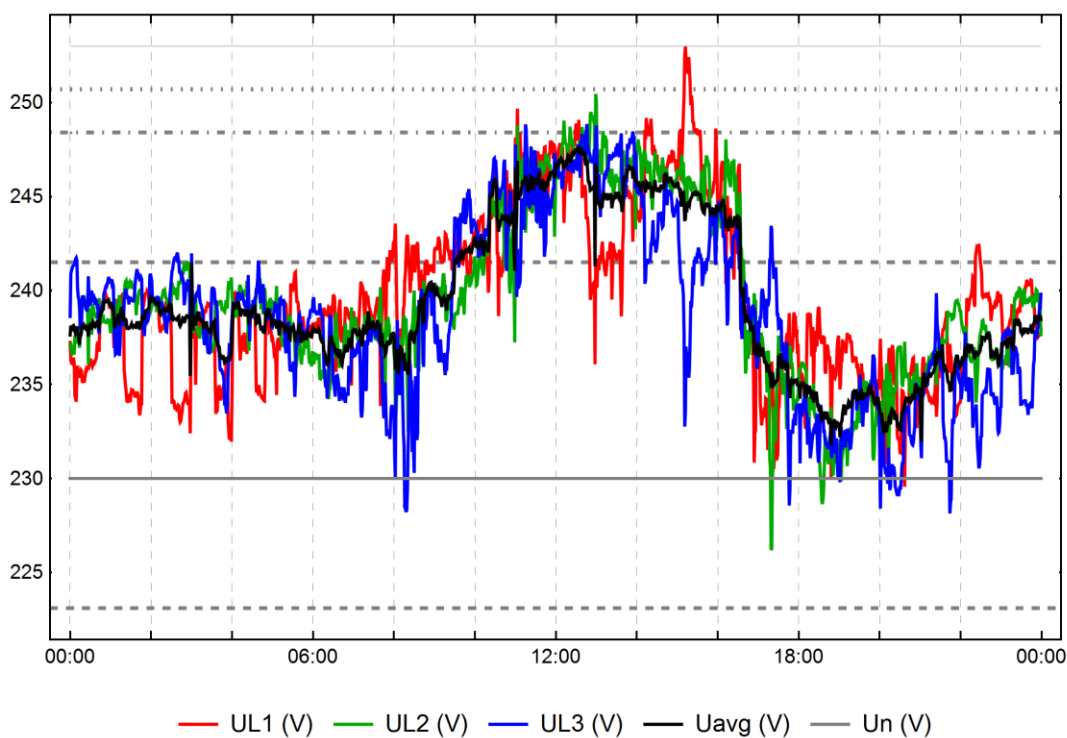
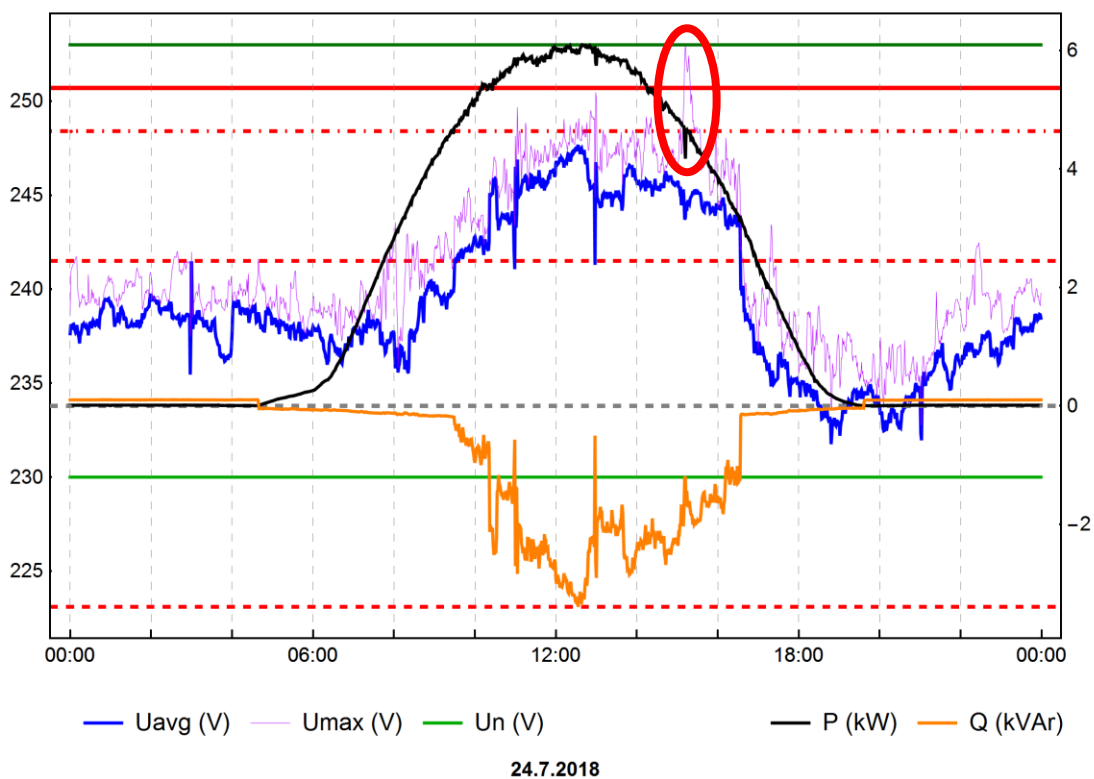
14.1.2018



Obrázek 4 Chování FV střídače – zimní den

V období s vysokým slunečním svitem (jaro, léto) je v místě připojení střídače znatelný výrazný nárůst napětí při výrobě P v průběhu dne (Obr. 5 nahoře), což je pochopitelně dáno vyšší impedancí sítě. Zároveň je patrná korektní regulace Q (U), kdy při překročení $1,05 U_n$ (červená čárkovaná) dochází k odebírání jalového výkonu ze sítě (induktivní mód - podbuzení), a tím ke kompenzaci napěťového nárůstu vlivem dodávky P. Tvar denního průběhu Q tak „zrcadlově“ odpovídá tvaru průběhu U v denní dobu. Maximálního odběru Q (43,6 % S_n – odpovídá účinníku 0,9 a $S_n = 1$) je dosaženo, přesáhne-li průměrné napětí U_{avg} hodnotu $1,08 U_n$. V sítích s vyšší napěťovou nesymetrií (zde myšleno s vyššími rozdíly mezi napěťovou úrovní nejvyšší a nejnižší fáze – viz Obr. 5 dole) dochází při regulačních procesech k méně příznivému jevu ze strany zákazníka, kdy průměrné napětí ještě nepřekročí hodnotu $1,08 U_n$, a tedy Q nedosáhne své plné hodnoty, ale nejvyšší napětí (fialová) již přesáhne hodnotu $1,09 U_n$, což vyvolá snížení P při vyšší výrobě. Zapůsobení P (U) funkce není vždy příliš zjevné, nicméně na Obr. 5 je takový okamžik, vyvolaný krátkodobou výraznou nesymetrií napětí, patrný. Reakce P (U) funkce na U_{max} odpovídá požadavku na mezní opatření v případě, že se napětí v jakékoli fázi přibližuje limitům napěťové kvality. Navíc vliv P na napětí je pro R/X poměry běžné v sítích nn výraznější než u Q [6]. Reakce Q (U) funkce na U_{avg} pak odpovídá požadavkům technických norem [2]. Částečně lze daný jev omezit výraznějším odstupem obou charakteristik, vše však záleží na míře nesymetrie napětí a dalších požadavcích na regulaci. Omezení roční výroby energie vlivem P (U) ve standardních případech je pro zákazníka zanedbatelné, jak bude ukázáno dále.

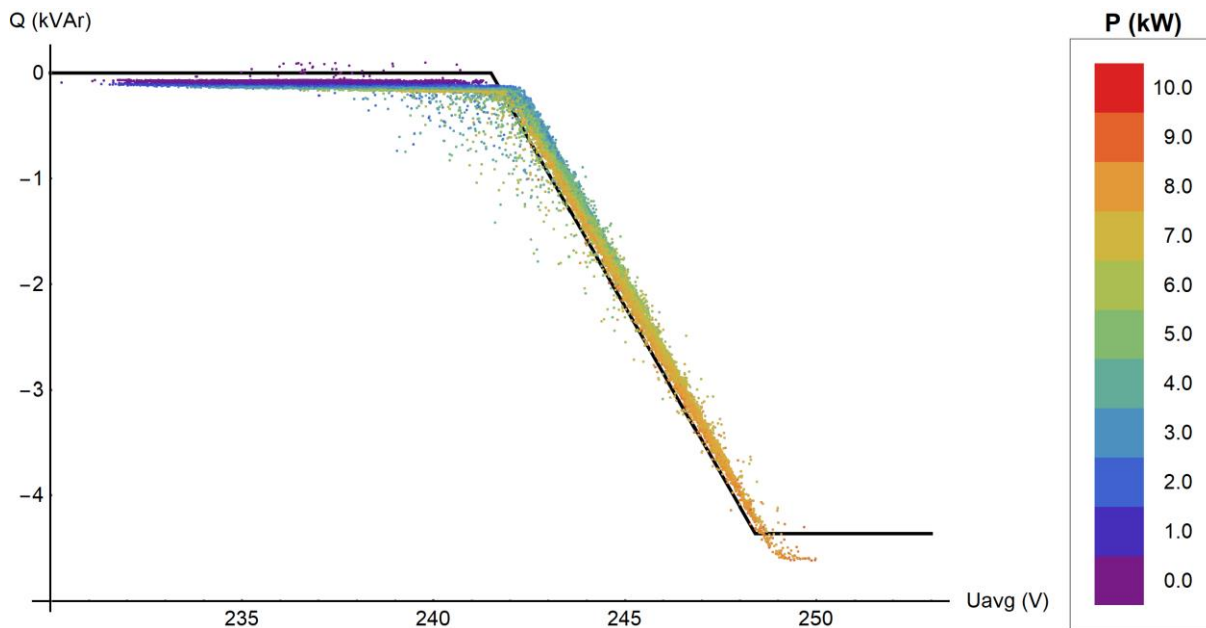
24.7.2018



Obrázek 5 Chování FV střídače – letní den

2.2. MĚSÍČNÍ STATISTIKY

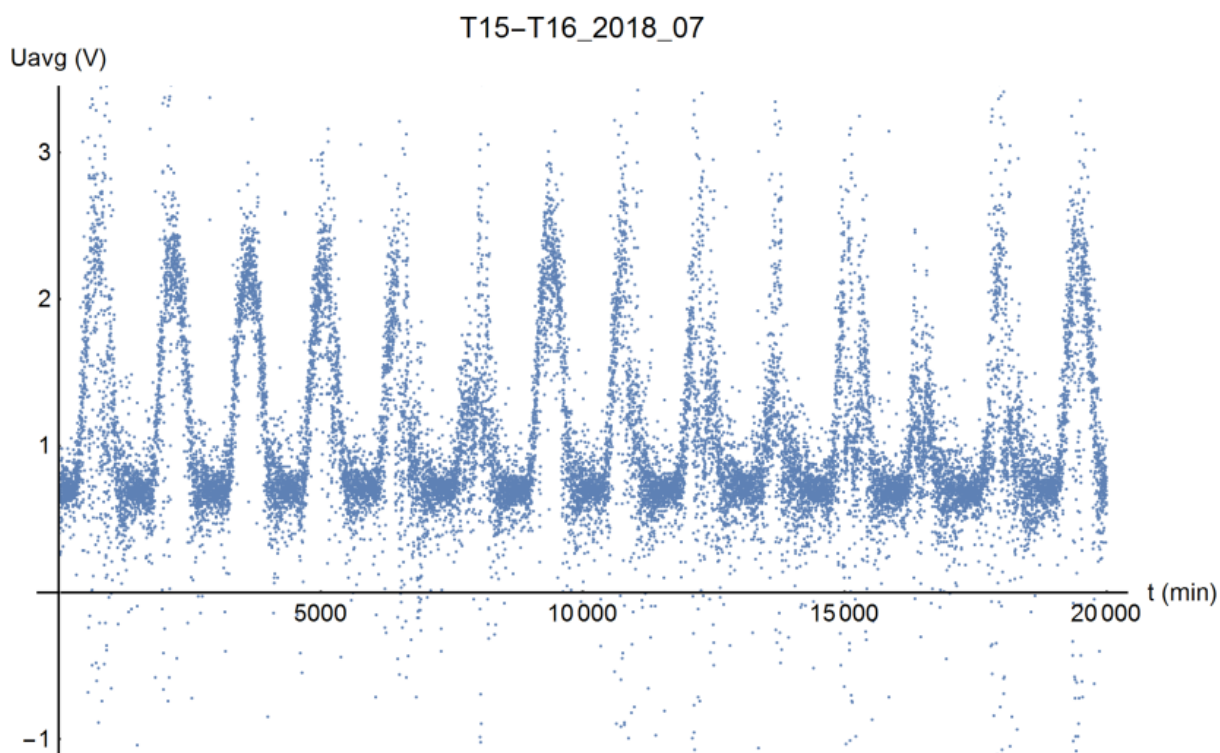
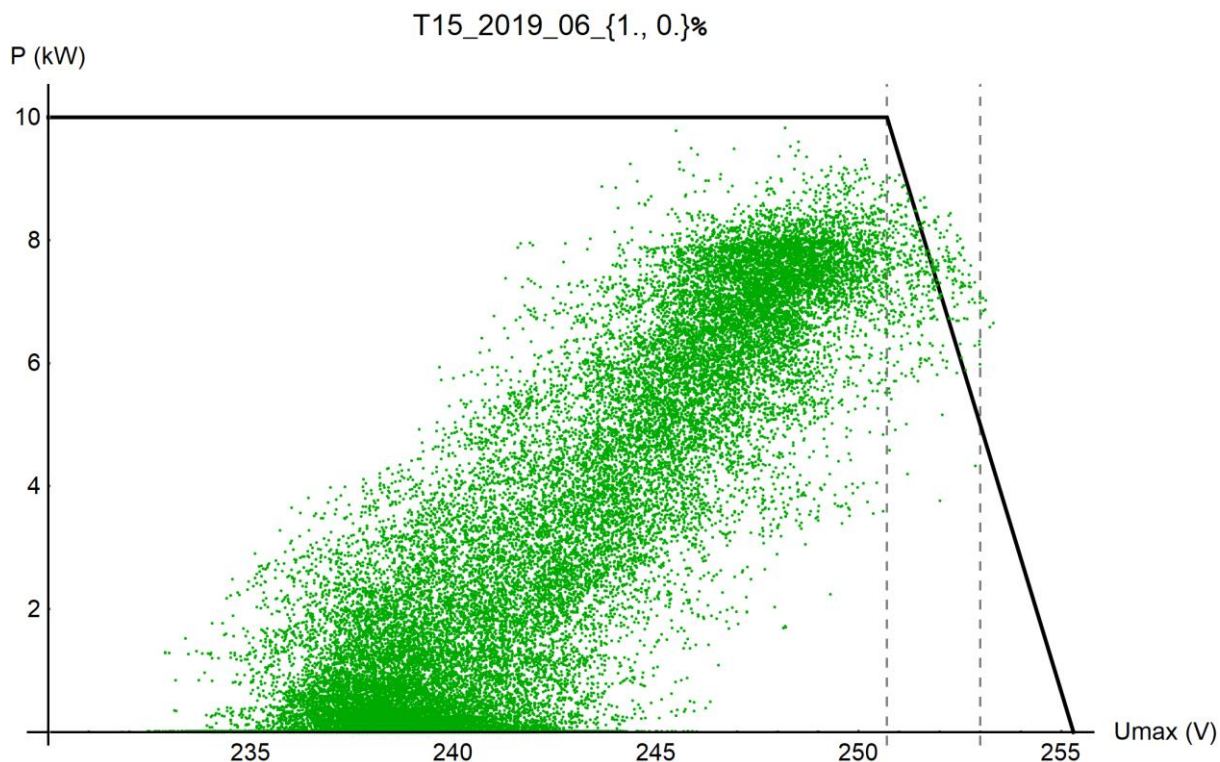
Podíváme-li se na měřená data na svorkách střídače dlouhodobějším pohledem, lze pozorovat celkové chování obou autonomních funkcí v širším napěťovém rozsahu. Následující Obr. 6 a Obr. 7 představují zpracování hodnot P , Q , U_{avg} , U_{max} za červen 2019. Z Obr. 6 je zřejmá spolehlivá regulace Q podle hodnot U_{avg} i vliv dodávky P na napěťovou hladinu. Regulované hodnoty Q jsou velmi blízko očekávané charakteristice. Určité rozdíly je možné pozorovat v okolí „kolena“ charakteristiky, toto je však dáno průměrováním za 1 minutu pro každý měřený vzorek.



Obrázek 6 Měření $Q(U)$ – červen 2019

Vynesením závislosti činného výkonu na maximálním napětí je zřejmý jednak vliv dodávky P na napětí (vliv mají pochopitelně všechny FVE připojené na daném vývodu) a také působení $P(U)$ funkce. V ideálním případě by všechny naměřené body měly ležet pod tučnou charakteristikou. S ohledem na nepřesnost měření, dynamiku regulace i průměrování jsou nejvyšší hodnoty v okolí skloněné části křivky. Také je vidět, že několik málo bodů (minut) leží za hranicí 110 % U_n . Toto se objevuje i pro další měsíce s vyšším slunečním svitem – za celou sezónu 2019 se jedná o 33 minut. Protože překročení limitu 110 % U_n je dle [4] hodnoceno za 10minutové intervaly, nedošlo k překročení limitu 110 % U_n ani jednou. Zároveň je nutné poznamenat, že dané stavy jsou platné pro penetraci výroben vysoce přesahující hodnotu danou výpočtem připojitelnosti, jak bylo uvedeno v kapitole 1.

V úvahu je potřeba vzít také fakt, kde a jak je do sítě připojen vlastní střídač, na jehož svorkách je měřeno napětí pro vyhodnocení regulačních funkcí. V konkrétním případě měřeného střídače je tento instalován v garáži vedle rodinného domu, což má za následek rozdíl napětí mezi svorkami střídače a předávacím místem zákazníka. Z Obr. 8 je zřejmé, že u střídače je napětí o 2-3 V vyšší než v předávacím místě – v závislosti na konkrétním dodávaném výkonu. Tento fakt dále mírní nebezpečí překročení napěťových limitů z pohledu požadavků kvality napětí.

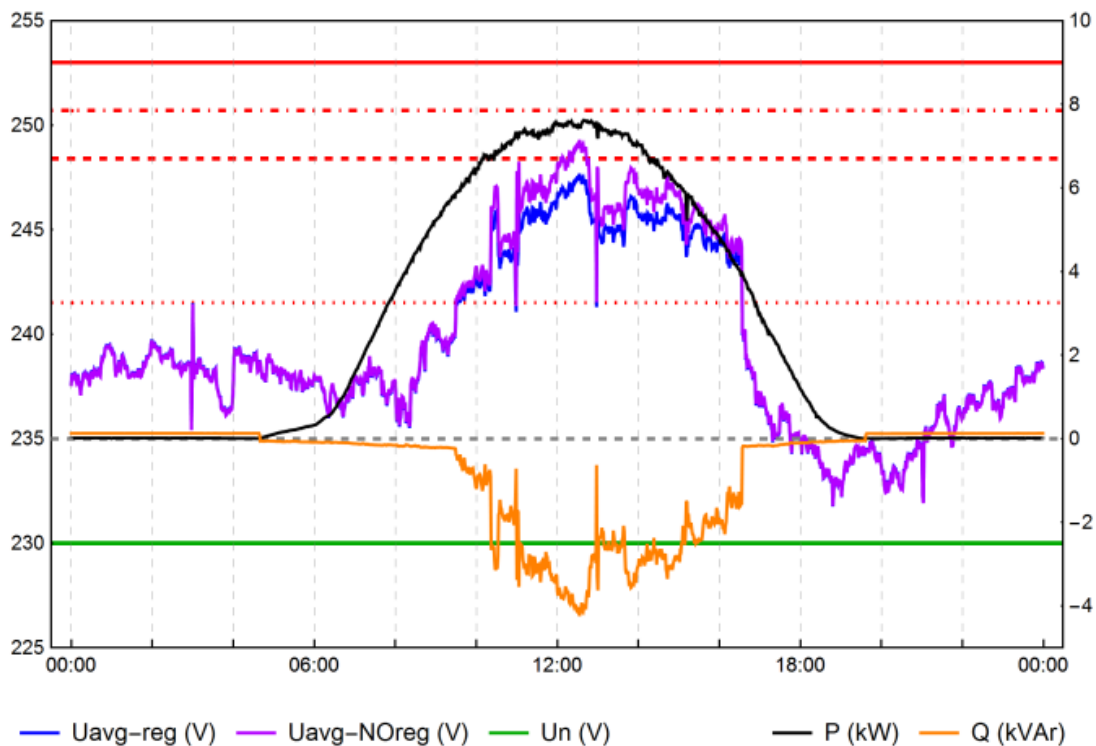


2.3. VÝPOČETNÍ ANALÝZY

Vliv a význam $Q(U)$ regulace lze analyzovat při znalosti parametrů napájecí distribuční sítě a měřených dat. Při znalosti regulačních jalových výkonů všech výroben na vývodu lze odečtením jejich vlivu na napětí (přes napájecí reaktanci) zjistit, jak by vypadal denní napěťový profil bez $Q(U)$ regulace – viz. Obr. 9. Rozdíly mezi

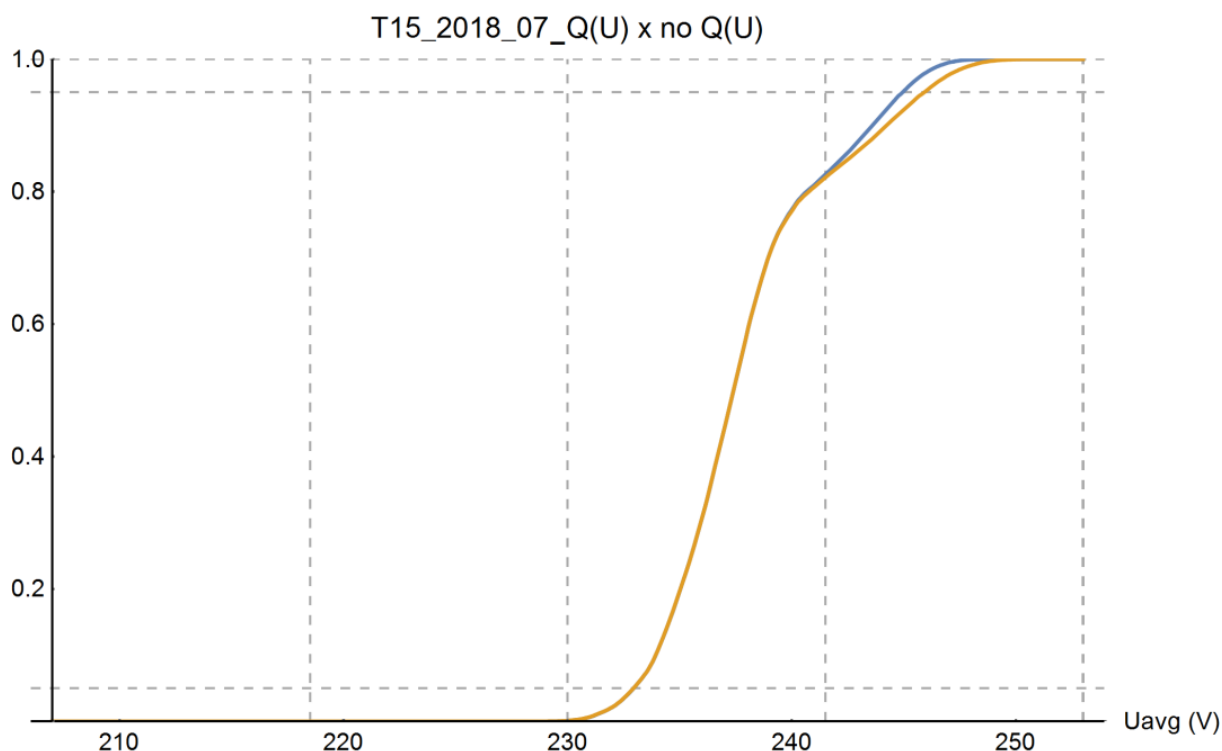
skutečným průměrným napětím (modrá) a vypočteným bez Q (U) regulace (fialová) nejsou výrazné a dosahují max. cca 2 V. To navíc pouze v okamžicích, kdy se hodnoty U_{avg} blíží horní hranici regulace $1,08 U_n$ (červená čárkovaná). To je v souladu s potenciálem nárůstu připojitelného výkonu vlivem Q (U), který pro daný vývod v Těptíně vychází cca 20 % - viz [6].

24.7.2018



Obrázek 9 Vliv Q (U) regulace na denní průběh napětí

Obdobně se na uvedený rozdíl můžeme opět podívat na základě měsíční statistiky (Obr. 10), kdy rozdíl stavů bez regulace (žlutá) a s regulací (modrá) je sice malý, málo četný pro celé období, ale podstatný právě v okamžicích s vysokou výrobou, resp. nejvyššími úrovněmi napětí.

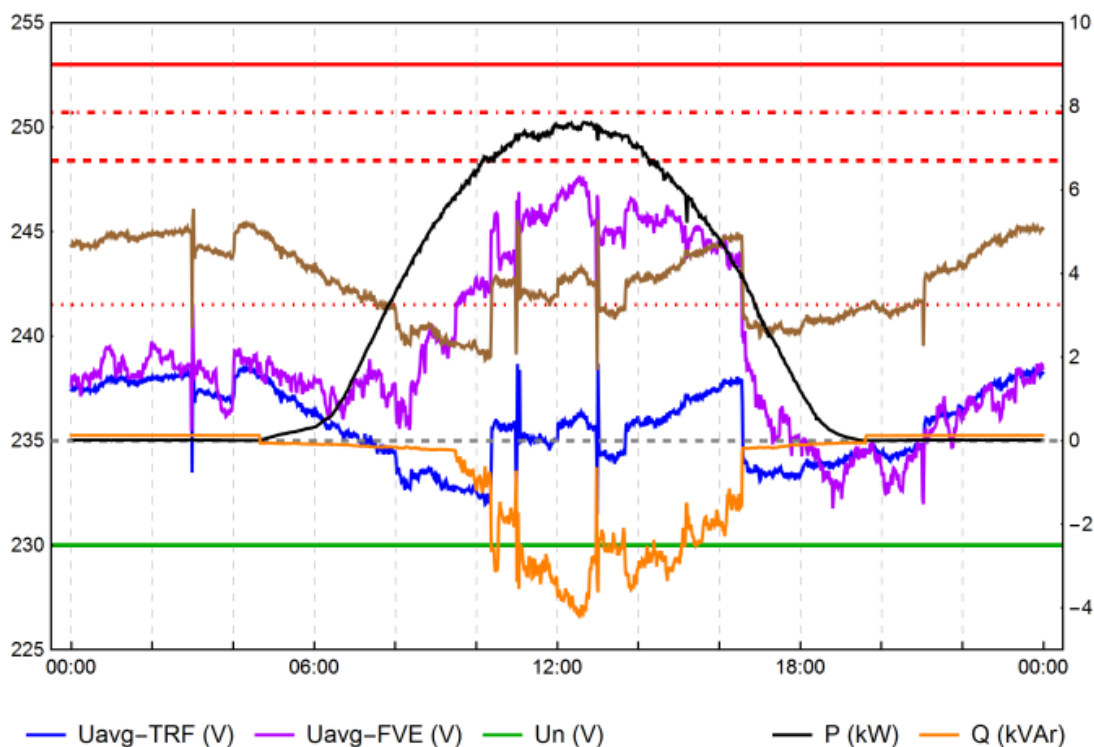


Obrázek 10 Vliv $Q(U)$ regulace na měsíční statistiku napětí

Dalším pohledem na napěťovou problematiku je analýza napěťové změny pro stavy bez výroben a s výrobnami, která je dle PPDS omezena na 3 % v jakémkoliv místě dotčené nn sítě. Uvedenou změnu napětí můžeme na základě dat z měření nahradit rozdílem napětí na svorkách distribučního transformátoru a v místě připojení střídače. Protože v mezních stavech vysoké FV výroby je zatížení transformátoru dostatečně nízké, a tedy úbytek na impedanci TRF také nízký, je možné napětí na jeho nn svorkách uvažovat jako napětí vn ekvivalentu (napájecího uzlu) – v poměrných hodnotách, což odpovídá napětí před připojením výroben (ve všech uzlech sítě pro standardní stav naprázdno). Napětí v místě střídače pak uvažujeme jako napětí po připojení výroben. Reálná distribuční síť je sice zatížená, tedy napětí bude nižší než pro stav naprázdno (tedy i dU bude nižší), toto však kompenzujeme faktem, že měříme napětí na střídači, a nikoliv v předávacím místě (viz. Obr. 8).

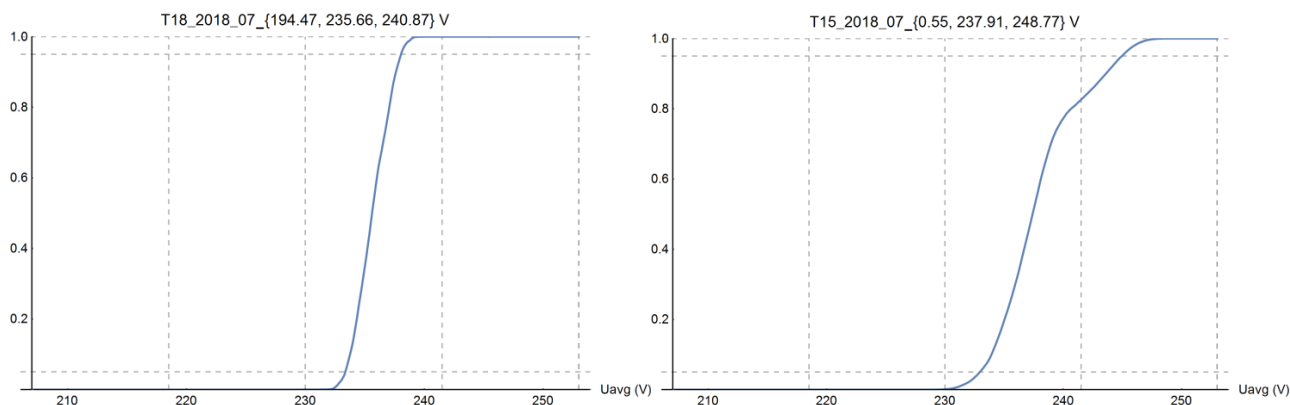
Takto můžeme definovat „dynamický napěťový limit“, který zohlední požadavek na napěťovou změnu. Jedná se o prostý součet napětí na TRF (modrá) a dovolené změny 3 % U_n – hnědá křivka na Obr. 11. Je zřejmé, že skutečné napětí na střídači (fialová) překračuje tento limit celkem často a hodně. Nejvyšší rozdíl mezi napětím transformátoru a střídače dosahuje cca 5 % U_n . Nicméně toto neznamena žádné překročení limitů kvality napětí, protože maximální U_{avg} nepřesahuje hodnotu 108 % U_n (červená čárkovaná). Toto je dáno nižší napěťovou hladinou v místě transformátoru (cca 102 % U_n), což vede k nižší aktivaci $Q(U)$ u většiny výroben. Vyšší napěťovou změnu je tedy třeba vnímat v kontextu s absolutní hodnotou napětí. V uvedených provozních podmínkách nepředstavuje žádné nebezpečí pro limity úrovně napětí.

24.7.2018



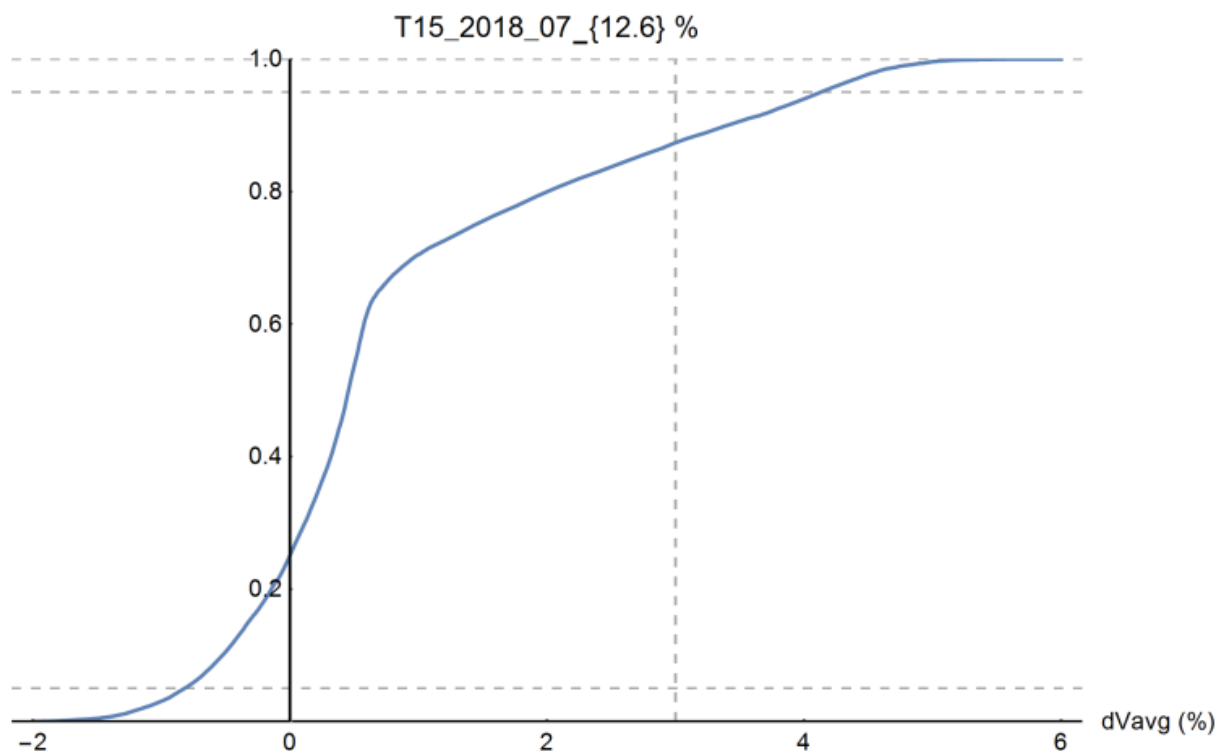
Obrázek 11 Rozdíl napětí mezi transformátorem a střídačem

Obdobnou analýzu můžeme provést pro měsíční statistiku – konkrétně za červenec 2018. Obr. 12 ukazuje distribuční funkci minutových hodnot napětí na distribučním transformátoru (vlevo) a v místě připojení střídače na konci vývodu (vpravo). V případě transformátoru jsou téměř všechny hodnoty napětí pod 103,5 % regulace Q (U) tedy bude pracovat v podobném režimu jako při analýze denního průběhu. V případě střídače dosahuje 1minutové maximum U_{avg} hodnoty cca 108,2 % U_n , 99procentní percentil je pak pod 106,5 % U_n . Obdobné hodnoty se objevují i pro další měsíce během FV sezóny.



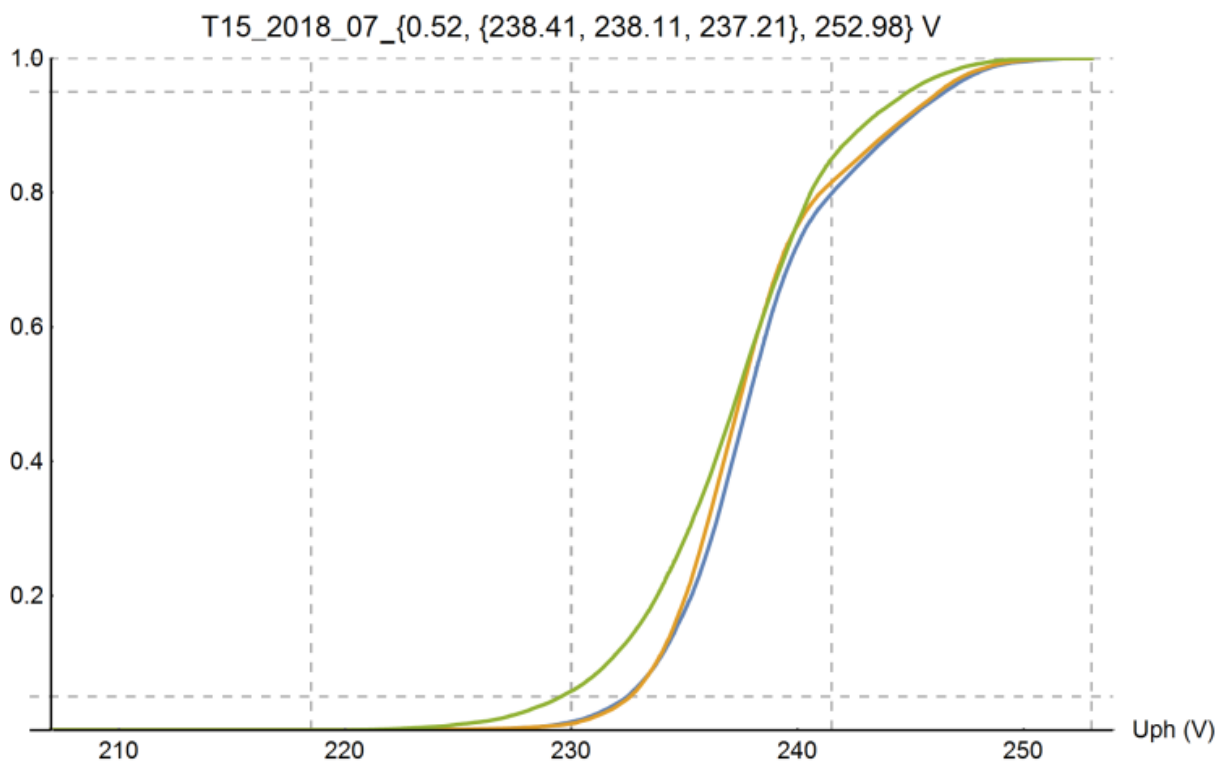
Obrázek 12 Měsíční rozložení napětí na distribučním transformátoru a v místě připojení střídače

Vypočteme-li pro každý časový okamžik (minutu) rozdíl mezi napětím střídače a transformátoru, dostaneme rozložení na Obr. 13. Záporné hodnoty odpovídají stavům vyššího zatížení vývodu, vyšší kladné hodnoty jsou zjevně spojeny s FV výrobou. 12,6 % vzorků překračuje standardní limit 3 % U_n , nicméně limity úrovně napětí nejsou překročeny díky autonomním regulačním funkcím.



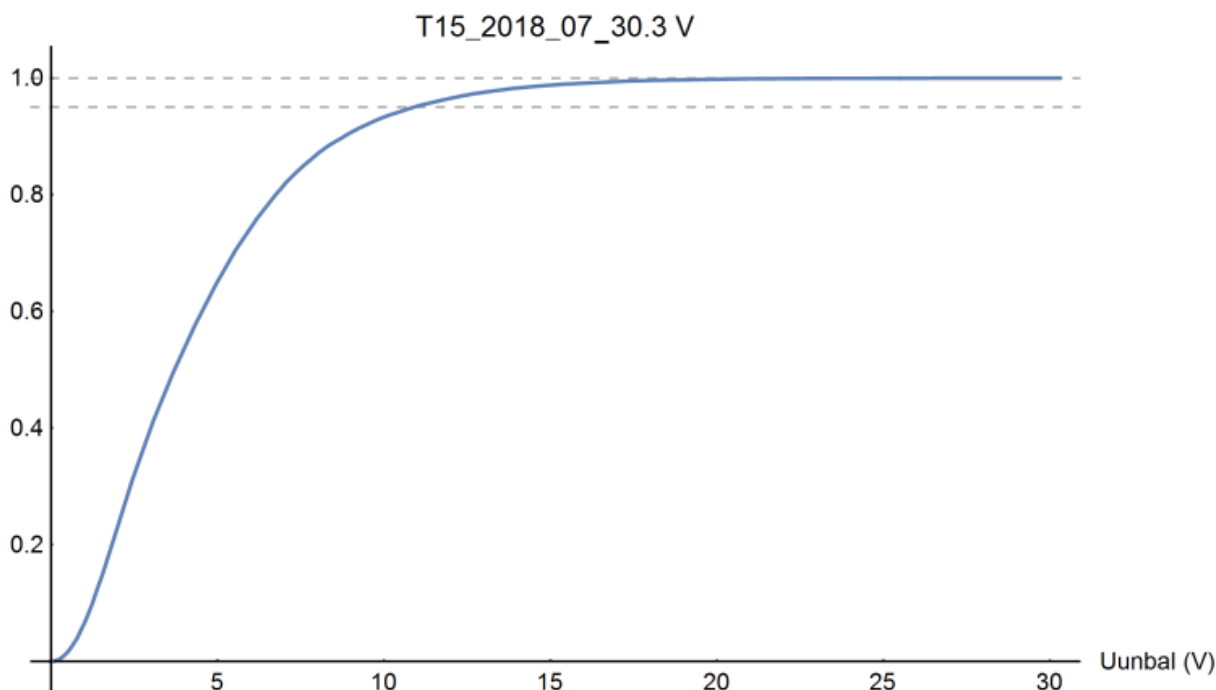
Obrázek 13 Rozdíl napětí mezi transformátorem a střídačem – červenec 2018

Pro korektní zhodnocení úrovní napětí z pohledu limitů kvality je třeba sledovat všechna tři fázová napětí. Napětí na transformátoru je velmi symetrické, ale napětí na konci vývodu vykazuje vysokou míru nesymetrie z důvodu nesymetrického zatížení i parametrů vývodu. Měsíční rozložení fázových napětí na střídači je na Obr. 14, kde jsou zřejmé rozdíly mezi fázemi i maximální hodnota pohybující se na hranici 110 % U_n .



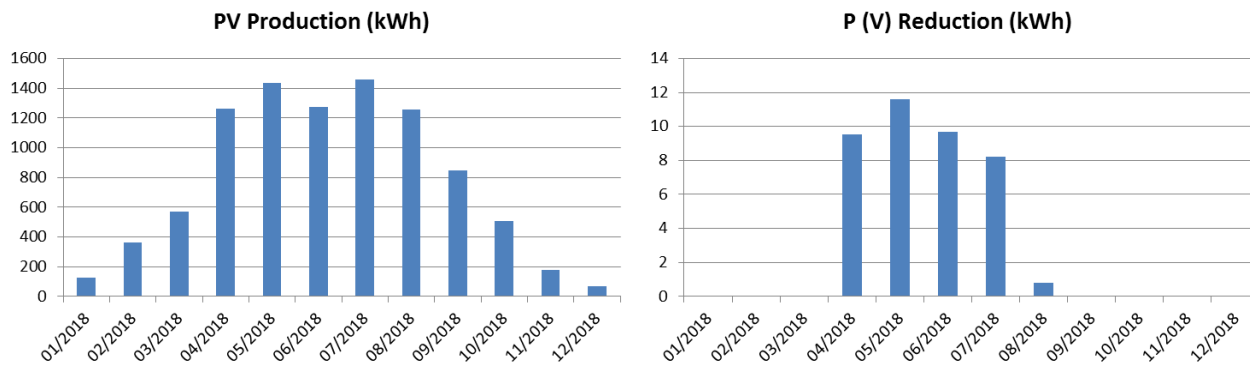
Obrázek 14 Měsíční rozložení fázových napětí v místě připojení střídače

Spočteme-li pro každou minutu v měsíci rozdíl mezi napětím nejvyšší a nejnižší fáze, dostaneme rozložení na Obr. 15. Rozdíly dosahují hodnot až $10 \div 15 \text{ V}$ ($4 \div 7 \% U_n$).



Obrázek 15 Měsíční rozložení rozdílu nejvyššího a nejnižšího napětí v místě připojení střídače

Blíží-li se nejvyšší fázová hodnota úrovni $110 \% U_n$, je aktivována regulační funkce $P(U)$ (nad $109 \% U_n$), která významně brání překročení limitních úrovní napětí. Jak bylo uvedeno, pouze několik minut ročně překročilo úroveň $110 \% U_n$ a to při nadstandardně vysoké penetraci výroben. Regulační funkce tedy reagovaly spolehlivě, což je potřeba vnímat jako přínos pro distributora i pro zákazníka. Na druhou stranu mohou u zákazníků existovat obavy z příliš vysokého omezení roční výroby energie vlivem funkce $P(U)$. Provedeme-li sumární analýzu dat ze zmíněného střídače na konci vývodu, vidíme na Obr. 16 vlevo obvyklý průběh měsíční výroby v průběhu roku. Celková roční výroba za rok 2018 činila 9,34 MWh (pro výrobu 9,81 kWp). Snížení vyrobené energie vlivem $P(U)$ funkce není ve střídači nikde zaznamenáváno, musí být tedy vypočteno (odhadnuto) na základě měřených dat. Nedodaná energie byla počítána jako rozdíl mezi teoretickým maximálním výkonem 9,81 kW a aktuálním výkonem pro každou minutu s nejvyšším fázovým napětím přes $109 \% U_n$. Takto získáme teoretické maximum (viz. Obr. 16 vpravo), které činí cca 0,4 % celkové roční výroby, opět pro nadlimitní penetraci FV výroben v dané síti. Reálné omezení však bude podstatně nižší, protože maximálního výkonu dosahuje FV výroba jen velmi zřídka za ideálních podmínek.



Obrázek 16 Roční vyrobená energie a omezení vlivem $P(U)$ funkce (2018)

3. VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ OMEZENÍ PŘETOKU DO SÍTĚ

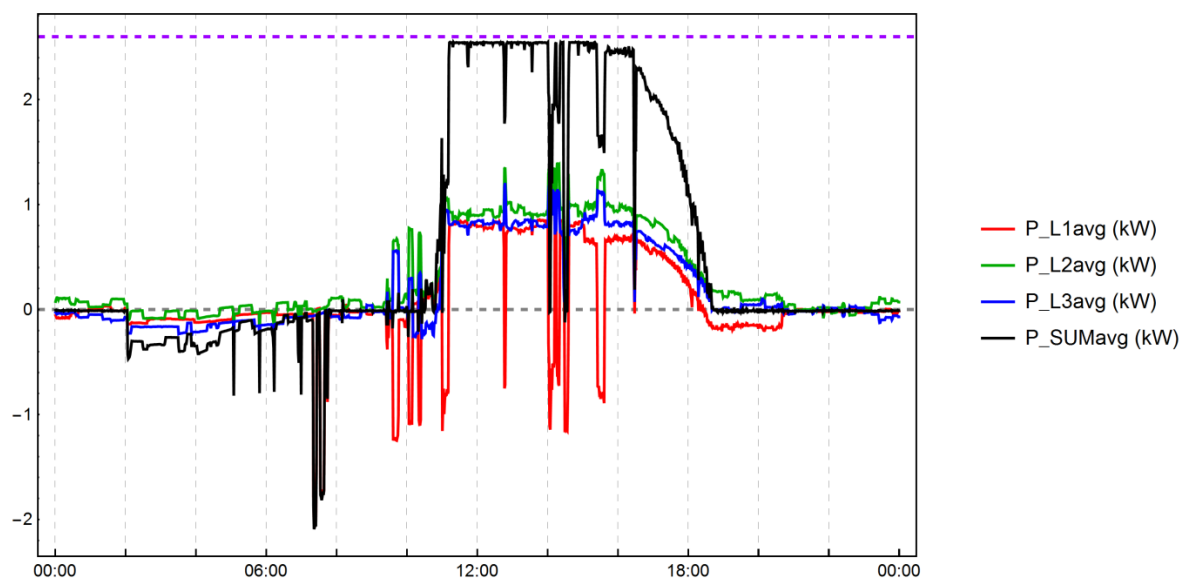
Měření bylo prováděno v předávacím místě zákazníka s 5 kW střídačem Fronius Symo Hybrid pro FV výrobu 5,2 kWp a bateriovou akumulací s kapacitou 4,5 kWh jmenovitě, resp. 3,6 kWh využitelně.

3.1. DENNÍ PRŮBĚHY

Obr. 17 představuje typický denní průběh výkonů v předávacím místě. Limit přetoku 50 % P_n panelů (2,6 kW součtově přes 3 fáze - černá) byl spolehlivě dodržen pro každou měřenou minutu. Pouze rozborem absolutních maxim pro všechny dílčí 200 ms vzorky v průběhu každé minuty bychom našli překročení mezního výkonu. Toto je dáno omezenou rychlostí regulace a vyhodnocovacím oknem, pro požadavky distributora s ohledem na vliv na napětí to však nepředstavuje žádný problém. Protože se jedná o systém s baterií, je evidentní typický průběh dobíjení baterie v dopoledních hodinách a následná dodávka do sítě po jejím plném nabití.

Střídač na svých AC svorkách dodává výkon vždy symetricky. Vlivem nesymetrického zatížení domácnosti pak není dodávka do sítě symetrická, jak je patrné z fázových výkonů na Obr. 17 (červená, zelená, modrá). Tento fakt vede k situacím, kdy při výraznějším nárůstu domácího zatížení jedné nebo dvou fází může střídač na svých svorkách 3f vyrábět vyšší výkon než limit 2,6 kW, aniž je tento limit součtově překročen v předávacím místě.

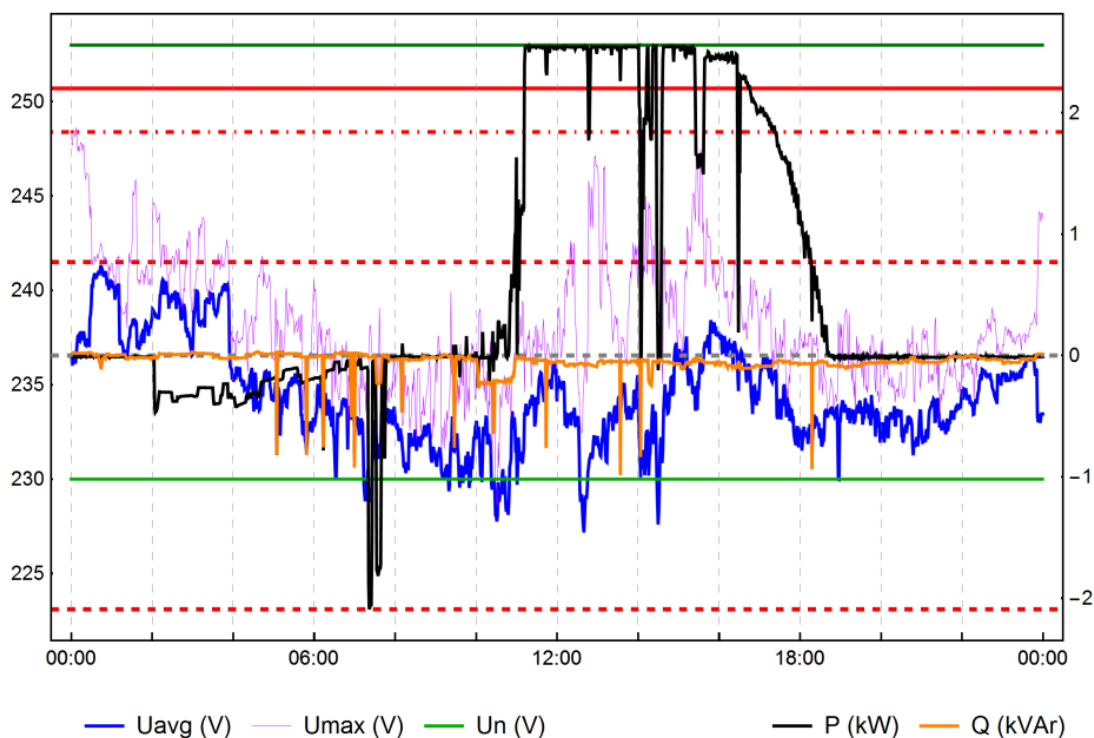
16.6.2018



Obrázek 17 Dodávka do sítě ze střídače s baterií a funkcí omezení přetoku

Kromě funkce omezení přetoku jsou na těchto střídačích také aktivní autonomní regulační funkce Q (U) a P (U). Jejich aktivace bude opět výrazně ovlivněna nesymetrií napětí (rozdílem velikostí fázových napětí), která je v síti v Lužanech ještě vyšší než v předchozím případě. Ilustraci podává Obr. 18, kde je znatelný rozdíl mezi maximálním napětím (fialová) a průměrným (modrá).

16.6.2018



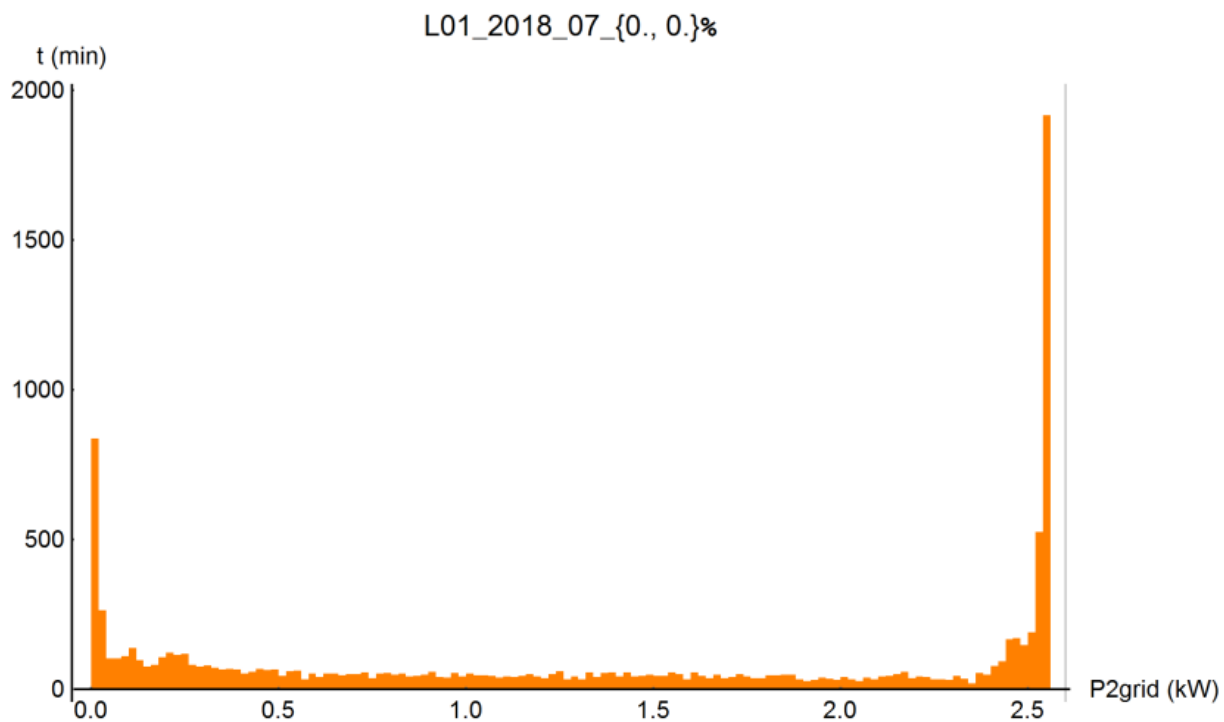
Obrázek 18 Dodávka do sítě ze střídače s baterií a funkcí omezení přetoku

3.2. MĚSÍČNÍ STATISTIKY

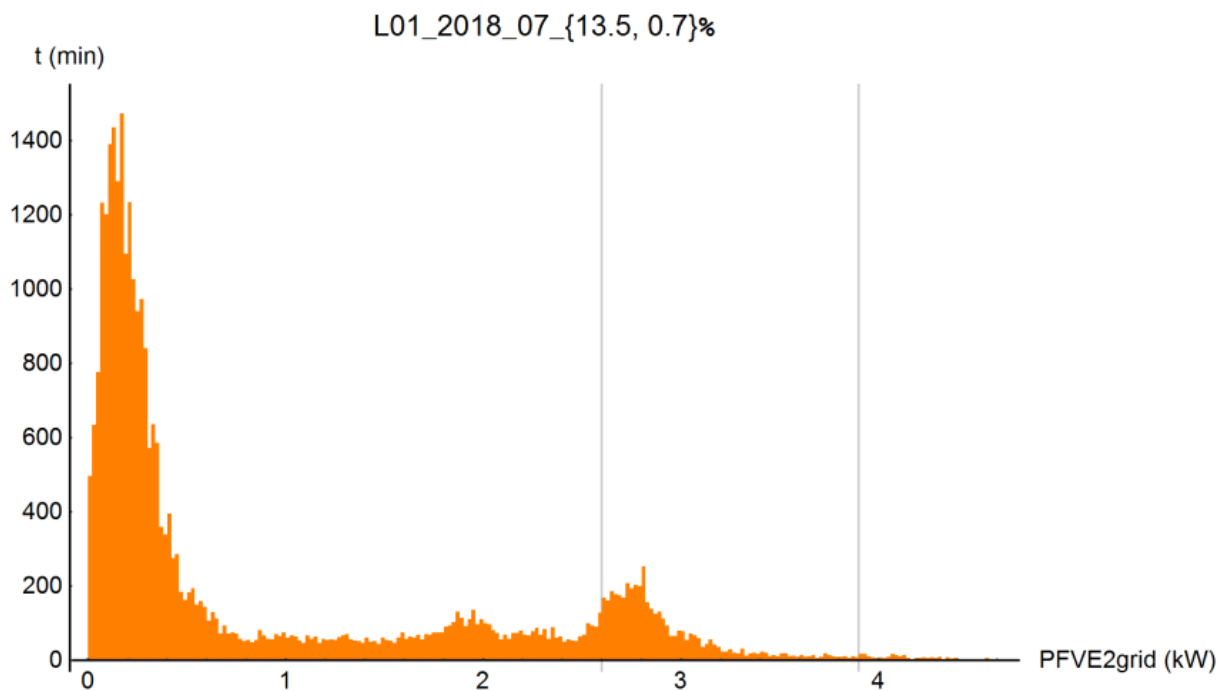
Provedeme-li opět statistický pohled na chování uvedené výroby za celý měsíc (červenec 2018), získáme histogram výkonů dodávaných v předávacím místě (hodnoty pro $P > 0$) – Obr. 19. Opět je zřejmá spolehlivá funkce omezení přetoku do sítě. Dále jsme z dat měření v předávacím místě provedli přibližný výpočet hodnot výkonu střídače z maximálních fázových výkonů do sítě za předpokladu, že v této fázi je domácí zatížení velmi nízké až limitně nulové a střídač vyrábí 3f symetricky. Výsledný histogram výkonů střídače je pak na Obr. 20 (skutečné hodnoty budou na základě uvedených předpokladů mírně vyšší). Je zde patrné, že díky nesymetrickému odběru domácnosti dodává střídač i výkon vyšší než 50 % P_n , konkrétně se jedná o 13,5 % vzorků. Naopak mez 75 % P_n je překročena jen v 0,7 % případů.

Zásadní je nyní porovnat tento histogram s výrobou FVE bez funkce omezení přetoku. Toto bylo možné, protože ve stejné lokalitě se taková výroba (4,6 kWp) nachází. Obdobnou analýzou pak na Obr. 21 vidíme její histogram měsíční výroby, který je zcela odlišný. Vyráběný výkon 50 % P_n je překročen cca pro 25 % vzorků, výkon 75 % P_n pak cca pro 13 % vzorků s výrazným maximem okolo 80÷85 % P_n .

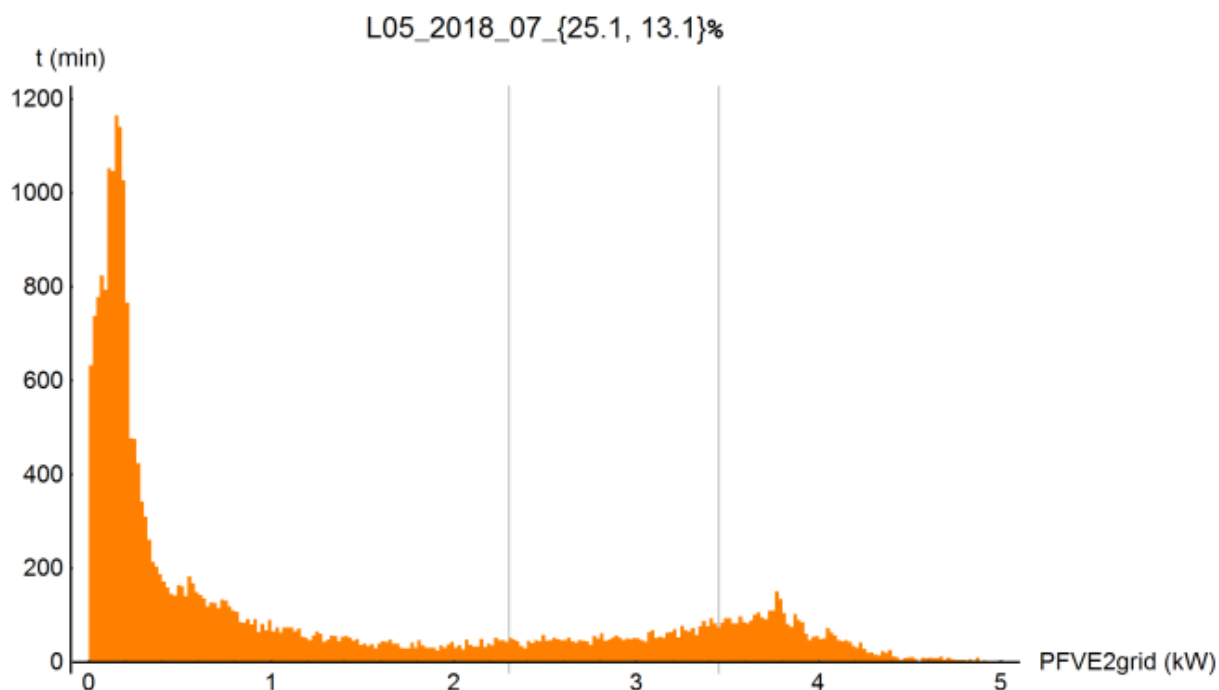
Vyústěním tohoto porovnání jsou úvahy o případné změně přístupu k výpočtu připojitelnosti, pokud budou FV výroby vybaveny uvedenou funkcí omezení přetoku do sítě, samozřejmě za současné aktivaci automatických regulačních funkcí $Q(U)$ a $P(U)$, které zajistí dodržení napěťových limitů.



Obrázek 19 Histogram dodávky do sítě ze střídače s baterií a funkcí omezení přetoku



Obrázek 20 Histogram dodávky na svorkách střídače s baterií a funkcí omezení přetoku



Obrázek 21 Histogram dodávky na svorkách střídače klasické FVE

4. ZÁVĚR

Cílem příspěvku bylo prezentovat, vyhodnotit a analyzovat data z dlouhodobého měření v nn sítích, kde jsou v rámci projektu InterFlex instalovány FV střídače s autonomními regulačními funkcemi Q (U) a P (U), či hybridní střídače s doplňkovou funkcí omezení výkonových přetoků do sítě. Všechna měření prokázala spolehlivou funkčnost uvedených regulací po dobu déle než 1 rok v reálných provozních podmínkách.

Autonomní regulační funkce efektivně přispívají k navýšení připojitelného výkonu decentrálních výroben v sítích nn a zabezpečují dodržení limitů úrovně napětí dle technických standardů. Požadavky na kvalitu napětí byly dodrženy i pro konfigurace, kdy v sítích byl instalován vyšší výkon výroben, než by byl dovolen při stávajícím postupu výpočtu připojitelnosti. Vzhledem k tvarům regulačních charakteristik je posuzování kritéria napěťové změny silně závislé na globální napěťové úrovni celé sítě a jeho překročení vůbec neznamená nebezpečné překročení limitních úrovní napětí.

Doplňková funkce omezení přetoku do sítě v případě hybridních střídačů s bateriovou akumulací může vést k dalšímu potenciálu pro navýšení připojitelného výkonu takovýchto výroben do sítě.

5. LITERATURA

- [1] Pravidla provozování distribučních soustav 2018, Příloha 4: Pravidla pro paralelní provoz výroben a akumulačních zařízení se sítí provozovatele distribuční soustavy
- [2] ČSN EN 50438 ed.2: Požadavky na paralelní připojení mikrogenerátorů s veřejnými distribučními sítěmi nízkého napětí
- [3] PNE 33 3430 - 8 – 1: Požadavky pro připojení generátorů nad 16 A na fázi do distribučních sítí - Část 8 - 1: Sítě nn
- [4] ČSN EN 50160: Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí
- [5] InterFlex project. [Online]. Dostupný z: <http://interflex-h2020.com/>. [cit. 2018-01-19].
- [6] J. Švec, P. Derner, S. Hes, J. Kůla: Možnosti zvýšení připojitelnosti výroben s autonomními regulačními charakteristikami na hladině nn. Konference ČK CIREĐ 2018, Tábor 6.-7.11.2018

**Ing. Jan Kůla**

Autor je absolventem ČVUT FEL obor Elektroenergetika a od roku 2013 je zaměstnanec ve společnosti ČEZ Distribuce, a. s. Zastával pozice analytika v oblasti řízení a hodnocení distribučních aktiv a investičního plánování. Od roku 2015 je specialistou v úseku Strategie a věnuje se projektům, aplikacím a vlivu nových technologií v DS, aktuálně zejména v oblasti elektromobility, Business Intelligence a pokročilých metod hodnocení stavu aktiv. Je členem technologického výboru ve sdružení EDSO4SG a Eurelectric.

Tel.: +420 211 042 815, e-mail: jan.kula@cezdistribece.cz

**Ing. Pavel Derner**

Absolvent ČVUT Fakulty elektrotechnické, studium ukončil v roce 1990. U energetické společnosti (VČE později ČEZ Distribuce) pracuje od r. 1991, kde se věnoval rozvoji vn, ekonomickému hodnocení staveb a později koncepci sítí vvn. V současné době pracuje ve společnosti ČEZ Distribuce, a.s., oddělení Modelace a analýzy jako specialista legislativy a OZE.

Tel.: +420 492 112 297, e-mail: pavel.derner@cezdistribece.cz

**Ing. Stanislav Hes**

V roce 2010 absolvoval Fakultu elektrotechnickou Českého vysokého učení technického v Praze, obor Elektroenergetika. Od roku 2010 působil v ČEZ Obnovitelné zdroje na pozici specialista rozvoje. Od roku 2013 pracuje ve společnosti ČEZ Distribuce, kde se zabývá možnostmi integrace decentrálních výroben do distribuční soustavy a vedením demonstračních aktivit v rámci mezinárodních pilotních projektů zaměřených na smart grids (InterFlex a GRID4EU). Od roku 2017 je vedoucím oddělení Modelace a analýzy.

Tel.: +420 211 042 826, e-mail: stanislav.hes@cezdistribece.cz

**Ing. Jan Švec, Ph.D.**

V roce 2004 absolvoval magisterské studium a v roce 2009 doktorské studium na ČVUT v Praze, FEL, obor Elektroenergetika. Působil jako odborný asistent na katedře elektroenergetiky ČVUT FEL se zaměřením na provoz a řízení elektrizačních soustav. Od roku 2017 pracuje ve společnosti ČEZ Distribuce jako specialista modelací v útvaru Strategie. Věnuje se výpočtům, modelování a analýzám v distribučních sítích se zaměřením na integraci nových prvků, technologií a metod řízení do DS.

Tel.: +420 211 042 873, e-mail: jan.svec@cezdistribece.cz



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement n° 731289