

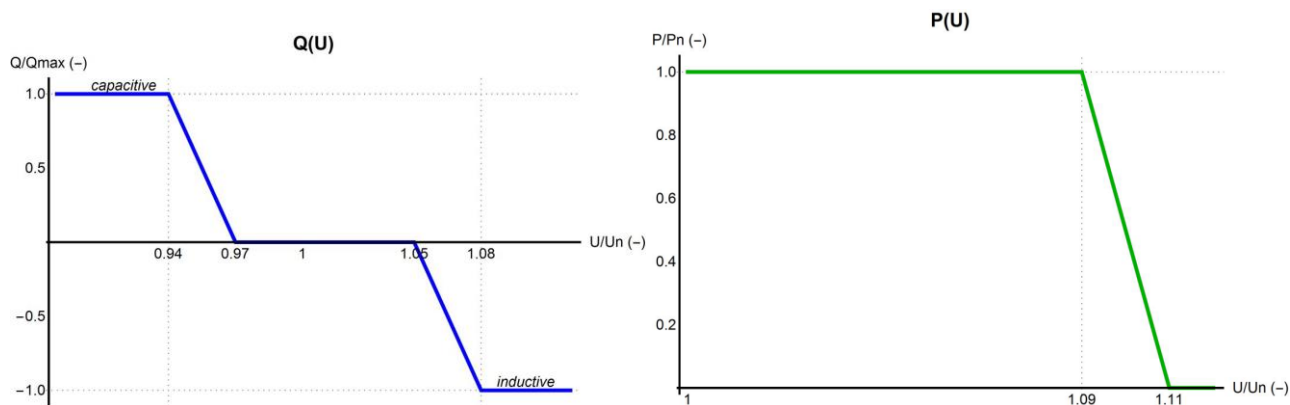
# TESTOVÁNÍ FV STŘÍDAČŮ V LABORATOŘI ČEZ DISTRIBUCE

Tomáš Linhart, Jan Švec, Stanislav Hes, Luděk Frejvald, Jiří Dvořák, ČEZ Distribuce, a. s.

V rámci evropského projektu InterFlex je testován vliv autonomních charakteristik  $Q(U)$  a  $P(U)$  fotovoltaických střídačů na možnost navýšení přípojitelného výkonu výroben do distribuční soustavy. Charakteristiky jsou definovány v příloze č. 4 PPDS a jsou požadovány u nově instalovaných výroben v oblastech ČEZ Distribuce. Pro zachování bezpečnosti a spolehlivosti je nutné, aby byly charakteristiky správně implementovány a střídače správně nastaveny dle všech platných požadavků. ČEZ Distribuce se proto ve své zkušební laboratoři rozhodla postupně testovat střídače nejčastěji připojované v ČR a ověřovat soulad jejich chování s požadavky dle PPDS. Již během prvních testů na několika zapůjčených zařízeních se ukazuje, že chování některých typů střídačů je odlišné a předdefinované nastavení pro ČR ze strany výrobců střídačů nemusí plně vyhovovat PPDS, objevují se dokonce i střídače, kde jsou regulační charakteristiky implementovány zcela opačně. Identifikace těchto nedostatků je důležitá nejen pro provozovatele DS, ale i pro samotné výrobce a dodavatele, kteří na naši zpětnou vazbu mohou okamžitě reagovat a upravit nastavení tak, aby splňovalo všechny podmínky a tyto typy mohly být připojovány k distribuční soustavě ČEZ Distribuce.

## 1. ÚVOD

Nově připojované zdroje do sítě ČEZ Distribuce, a. s. (ČEZd) na hladině nn v souladu s platnými PPDS **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** i technickými normami [2], [3] musejí být vybaveny autonomními regulačními charakteristikami  $Q(U)$  a  $P(U)$ . Tyto regulační funkce mají za úkol měnit jalový, případně činný výkon výroby v závislosti na hodnotě napětí v místě připojení 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. Pro území ČEZd se vyžaduje nastavení těchto regulačních charakteristik dle Obrázek 1.



Obrázek 1 Autonomní regulační charakteristiky v síti ČEZ Distribuce, a. s.

Při napětí blízkém jmenovitému pracuje výroba s neutrálním účínkem. Při výraznějším poklesu napětí přejde výroba do kapacitního režimu a snaží se napětí v síti podpořit (dodává do sítě jalový výkon). Při vyšším nárůstu napětí přejde výroba do induktivního režimu (odebírání ze sítě jalový výkon) a snaží se napětí v síti snižovat. V obou režimech je dle PPDS **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** vyžadován rozsah regulace do účinnosti 0,9. Dojde-li v síti k výraznému nárůstu napětí i přes plnou aktivaci funkce  $Q(U)$ , je aktivováno snižování činného výkonu (funkce  $P(U)$ ). Funkce  $P(U)$  má sloužit jako mezní opatření pro udržení parametrů kvality napětí [4] a neměla by být aktivovaná příliš často i s ohledem na omezení vyráběné energie.

Díky těmto autonomním charakteristikám by bylo možné do sítě nn připojovat více výroben, aniž by byla překročena kritéria napěťové změny ( $\Delta u \leq 3\%$ ), či úrovně napětí ( $U_n \pm 10\%$ ), což jsou nejčastější limitující kritéria pro připojení do sítě nn (za podmínek, že nebudou ovšem překročena ostatní kritéria). Tento přístup a možnost integrovat do sítě nn více zdrojů nad rámec dosavadního výpočtu přípojitelnosti na hladině nn, kde se uvažuje zatím pouze neutrální účinek 1, je testován v rámci jednoho dema evropského projektu Inter-

Flex [5], ve kterém je ČEZd zapojena. Konkrétní přínosy pro připojitelnost popisuje článek [6]. Ovšem abychom mohli plošně přistoupit ke změně výpočtu připojitelnosti, musíme mít jistotu, že valná většina zdrojů v síti nn regulační charakteristiky má a především, že jsou správně nastaveny a chovají se dle požadavků. I z tohoto důvodu ČEZd přistoupila k vlastnímu ověřování, zda FV střídače instalované v ČR nejvíce, požadavky dle PPDS [1] nejen na autonomní charakteristiky splňují a chovají se korektně po standardním nastavení technikem.

Bohužel testy ukazují že není mnoho typů střídačů, které by po běžném zprovoznění a nastavení fungovaly korektně. Často je pro správné fungování nutná úprava a aktualizace firmwaru, nebo i vzdálený zásah výrobce do střídače, což není při standardní instalaci reálné. Naším cílem je tyto typy střídačů odhalit a navázat dialog s dodavateli a výrobcí a následně nalézt řešení týkající se úprav firmwaru, které by zajistilo, že všechny střídače budou po běžném zprovoznění instalačním technikem požadavky PPDS a technické podmínky připojení splňovat. Může se jednat o vytvoření speciálního nastavení, při jehož výběru v menu střídače se všechny požadované funkce a vlastnosti nastaví a aktivují dle požadavků PPDS a technických podmínek připojení (z našeho pohledu ideální řešení), nebo vytvoření podrobného manuálu, jak daný střídač správně nastavit a uvést do provozu v místě instalace.

## 2. TESTOVÁNÍ V LABORATOŘI ČEZD

### 2.1. LABORATOŘ ČEZD

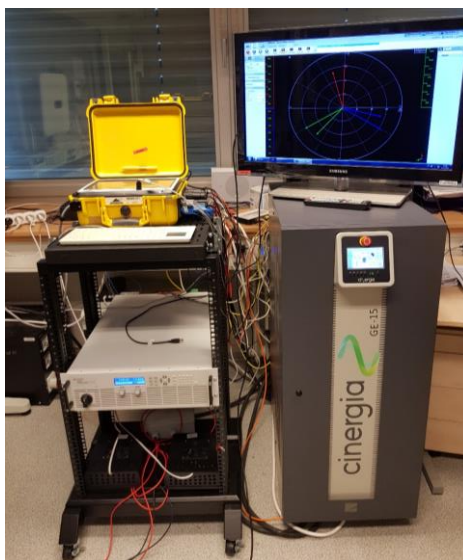
Školící a testovací laboratoř, ve které se FV střídače testují se nachází v Hradci Králové. K výchozímu vybavení laboratoře pro testy střídačů patří

- simulátor sítě 3 kVA,
- 2xDC zdroj po 3 kW (jeden zdroj max 210 V),
- analyzátor sítě Dewetron DEWE-571
- zátěž 700 W.

Z počátku bylo možné testovat FV střídače pouze do velikosti 3 kW. Postupně se ale laboratoř doplňuje a metody i možnosti testů se rozšiřují a zdokonalují. Nyní jsme schopni otestovat střídače do velikosti 15 kW.

Do laboratoře postupně přibýlo:

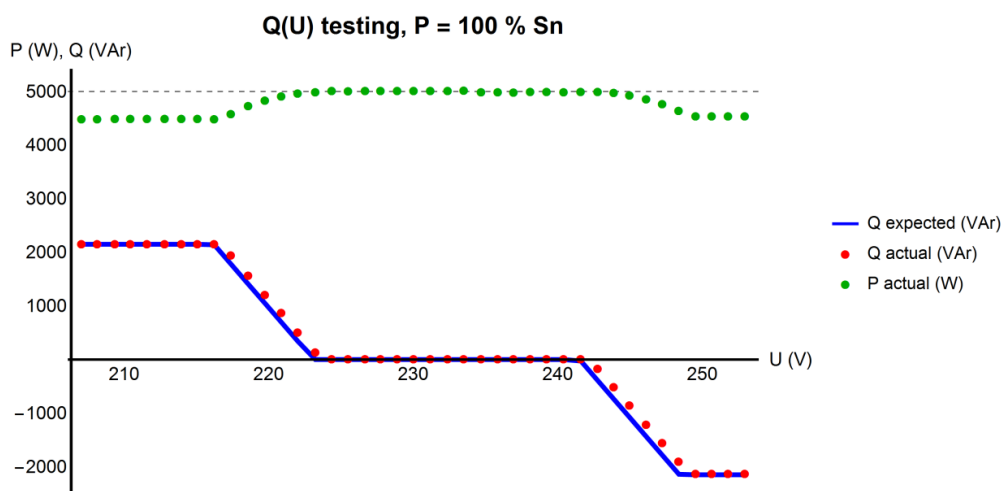
- 3x odporová zátěž 100-3700 W,
- simulátor sítě s rekuperací Cinergia GE-15 (15 kVA, 0-295 V, 10-100 Hz)
- DC zdroj Keysight N8955A (15 kW, 0-765 V, 60 A).



Obrázek 2 Nové vybavení laboratoře

## 2.2. TESTOVANÉ VLASTNOSTI FV STŘÍDAČŮ

Základní testovanou vlastností jsou charakteristiky  $Q(U)$ ,  $P(U)$  a  $P(f)$ , tedy změny dodávaného výkonu v závislosti na odchylkách napětí a frekvence. Cílem těchto testů je proměřit charakteristiky při různých hodnotách dodávaného činného výkonu, a to při hodnotách 100 %, 80 % a 50 %  $P_n$ . Chování při aktivaci  $Q(U)$  regulace se může obecně lišit, proto se měří při více úrovních činného výkonu.  $Q(U)$  charakteristika by měla při plné aktivaci dosáhnout účinnosti 0,9 induktivní i kapacitní. Při  $P_n$  lze očekávat snižování činného výkonu při nenulové dodávce  $Q$ . Naopak při nižší úrovni dodávky činného výkonu může být jalový výkon při plné aktivaci stále stejný, tedy dosaženo nižšího účinnosti.  $P(U)$  charakteristika je chápána jako absolutní, tedy pokles  $P$  nad 109 %  $U_n$  má nastat jen při  $P = P_n$ . Při nižším aktuálním výkonu nastane pokles  $P$  až při vyšším napětí. U charakteristiky  $P(f)$  má zlom začínat na 50,2 Hz s poklesem 40 %  $P/Hz$  (nulový  $P$  při 52,7 Hz). Strmost má záviset na aktuální hodnotě činného výkonu, proto se měří pro dvě úrovně činného výkonu.



Obrázek 3 Ilustrační měření  $Q(U)$  charakteristiky

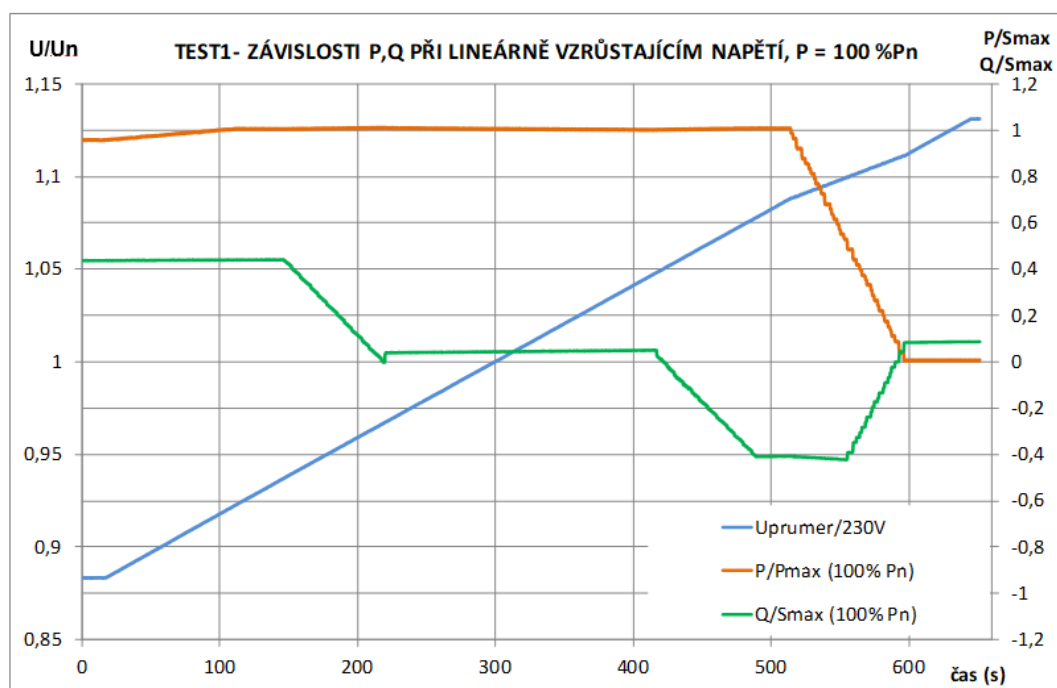
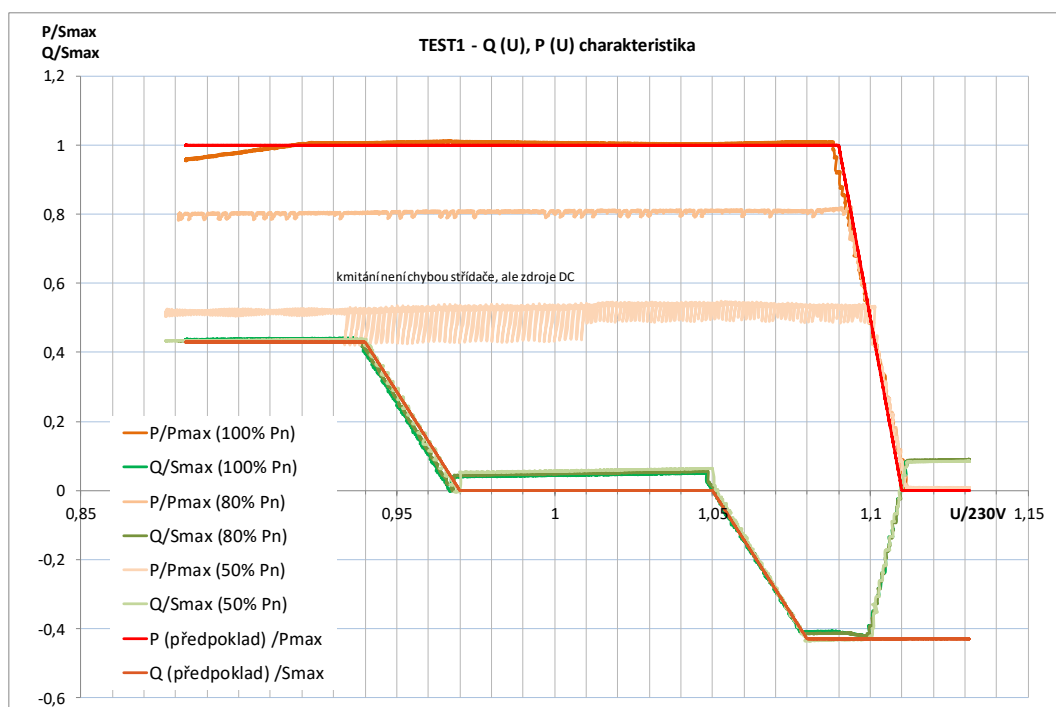
V rámci testování regulačních charakteristik se sleduje i dynamické chování, tedy odezvy na skokové změny napětí nebo frekvence. Taktéž se simuluje různá nesymetrie napětí sítě, abychom identifikovali, na jaké napětí střídač v daném stavu reaguje, zda reaguje na maximální, resp. minimální hodnotu napětí ve fázích, nebo na průměrnou hodnotu. Další ověřovanou vlastností je najíždění střídačů předepsanou rampou a opětovné připojení po výpadku sítě, kdy je testováno, zda střídač sleduje stav sítě a začne najíždět až v případě, že napětí a frekvence jsou v předepsaných mezích ( $U = 85 \div 110 \% U_n$ ,  $f = 47,5 \div 50,05 \text{ Hz}$ ) po dobu 300 s. Dalším bodem je ověřování správné nastavení a chování ochrany jak frekvenčních, tak napěťových dle PPDS [1]. Taktéž se ověřuje regulace činného výkonu externím vstupem (HDO) a možnost nesymetrické dodávky činného výkonu.

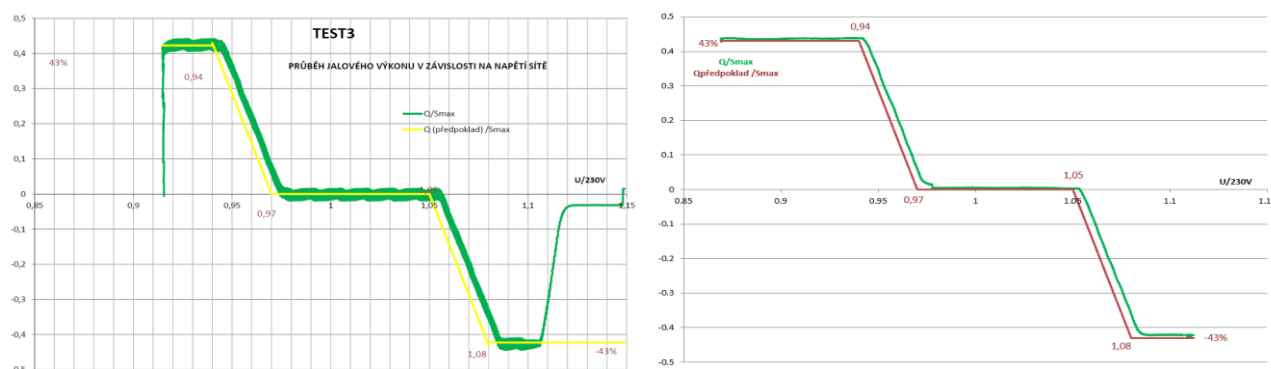
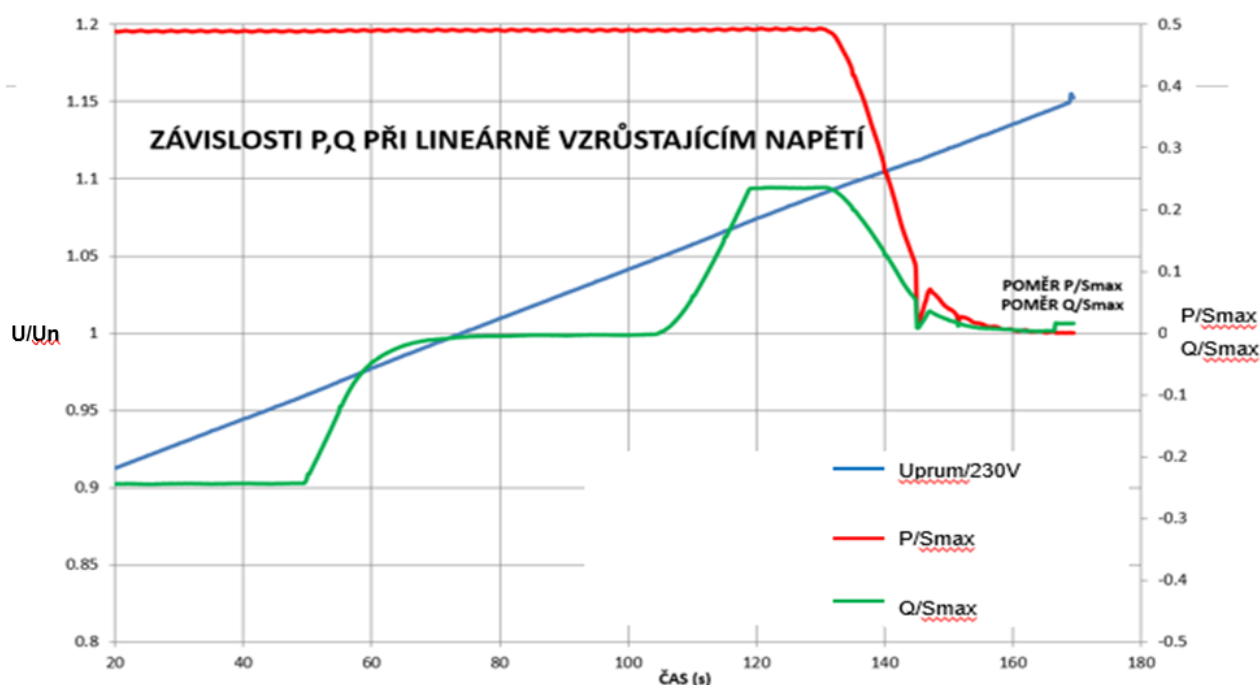
## 2.3. VLASTNÍ TESTY

Vždy se snažíme nejprve ověřit chování ve výchozím nastavení pro naše území a pokud zjistíme, že některá z funkcí nevyhovuje požadavkům, zkusíme upravit nastavení přes servisní menu, a pokud ani to nepomůže, snažíme se ve spolupráci s dodavatelem/výrobcem nalézt správné řešení pro dosažení požadovaného chování. Může se jednat o vzdálený zásah výrobce nebo úpravu firmwaru.

### 2.3.1. $Q(U)$ , $P(U)$ Charakteristiky

Ukázka průběhu testu  $Q(U)$  a  $P(U)$  charakteristik, kdy je napětí sítě měněno po rampě v provozním rozsahu a měřen dodávaný jalový a činný výkon je na Obrázek 4. Podobná měření se provádí pro různé úrovně činné dodávky a pro symetrické i nesymetrické napětí sítě. Následně se výsledky transformují do charakteristik a porovnají s požadavky – Obrázek 5. Je zde vědět téměř přesné splnění požadavku na regulační schopnost. Můžeme si ale všimnout, že v pásmu necitlivosti regulace testovaný typ střídače dodává jalový výkon, cca 350 var.

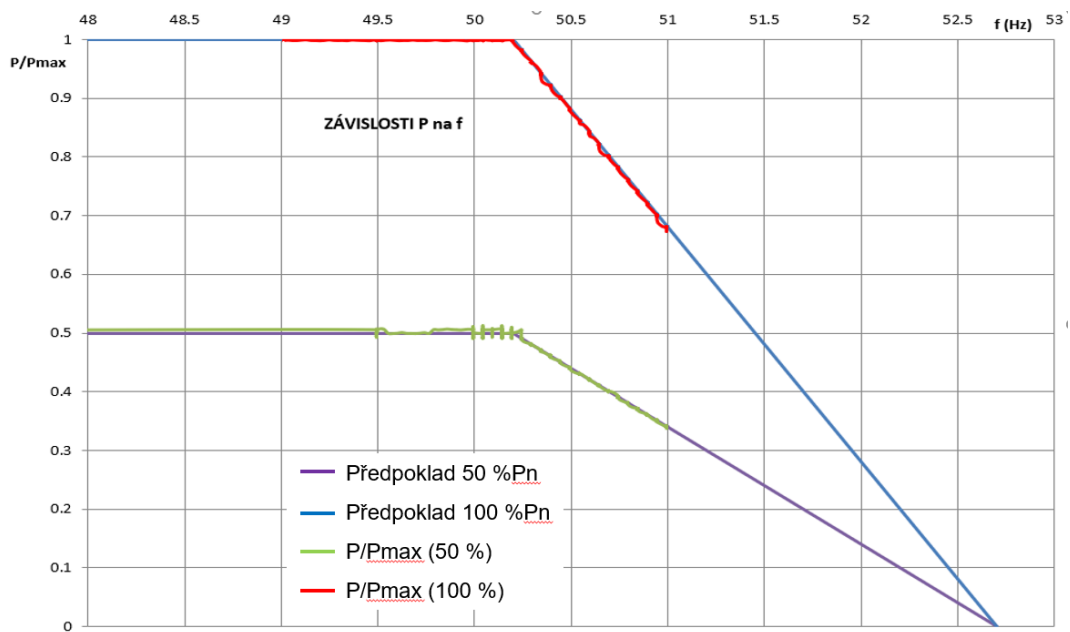
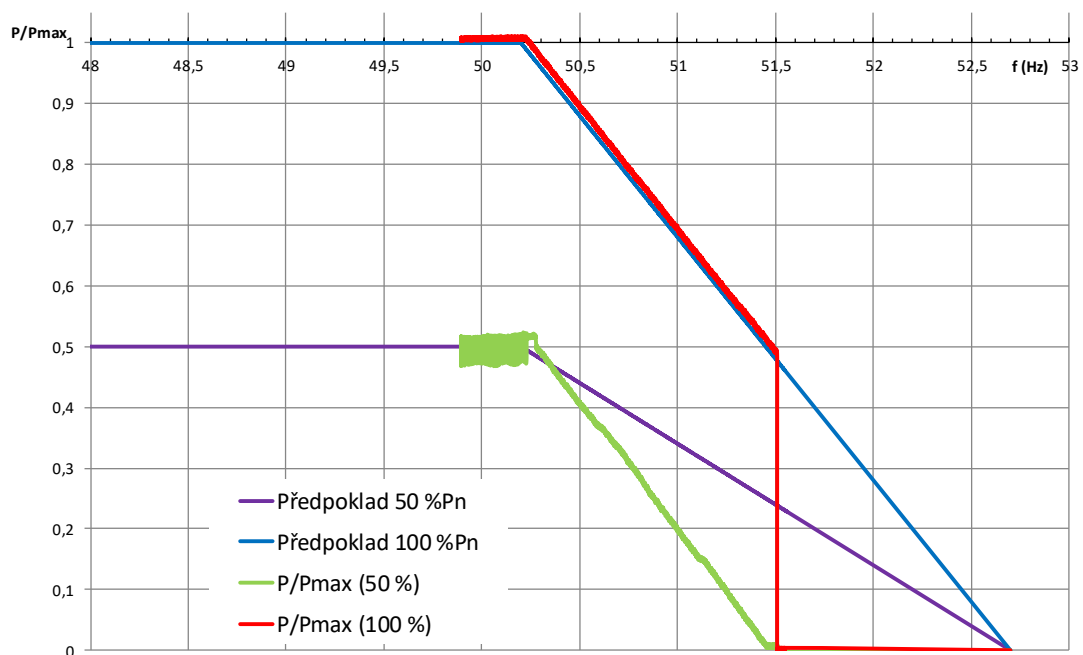
Obrázek 4 Ukázka měření  $Q(U)$  a  $P(U)$  závislostiObrázek 5 Ukázka změřené  $Q(U)$  a  $P(U)$  charakteristiky

Obrázek 6 Ukázky správně splněných  $Q(U)$  charakteristik u dalších FV střídačůObrázek 7 Ukázka chybné, opačné, regulace  $Q(U)$ 

Na základě poznatků lze říci, že většina testovaných střídačů autonomní  $Q(U)$  a  $P(U)$  regulaci umožňuje, ale jen u některých je v nastavení pro naše území aktivovaná (funkční). Pokud střídač nereguloval často, šlo charakteristiky aktivovat v servisním menu, ale v některých případech byl nutný třeba i vzdálený zásah výrobce pro její zprovoznění. Celkem častou chybou je regulace opačná, jak ukazuje třeba Obrázek 7. To bylo možné většinou opravit přenastavením předdefinovaných hodnot v nastavení střídače.

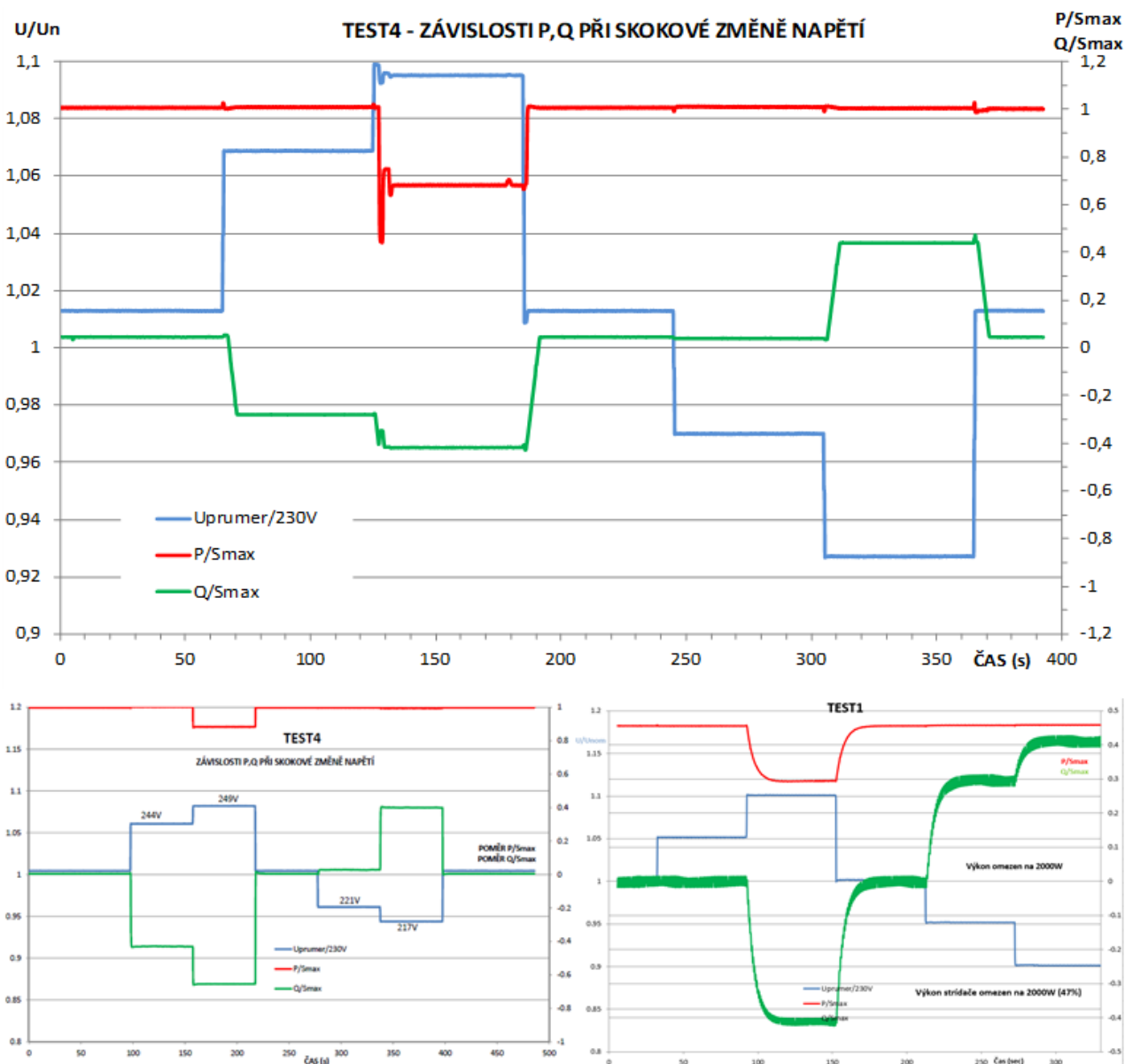
### 2.3.2. $P(f)$ charakteristika

$P(f)$  charakteristika se měří obdobným způsobem, kdy se plynule mění frekvence sítě od jedné meze k druhé a sleduje se odezva činného výkonu střídače. Následně se výsledek vynese do podoby charakteristiky a porovná s požadavkem. Měření se provádí při 100 a 50 %  $P_n$ . Správnou změřenou odezvu ukazuje Obrázek 8. Charakteristika zde ale není proměřena celá, protože daný střídač měl chybně nastavenou mez nadfrekvence a při 51 Hz se již od sítě odpojil. Na dalším obrázku jsou ukázány výsledky měření jiného střídače, zde je opět chybně nastavena nadfrekvenční ochrana, tentokrát na 51,5 Hz, střídač se také odpojí na frekvenci 49,9 Hz, ale také chybně gradient snižování pro nižší hodnoty dodávky  $P$ .

Obrázek 8 Změřená  $P(f)$  charakteristikaObrázek 9 Nesprávně definovaný gradient snižování  $P$ 

### 2.3.3. Dynamické chování

Kromě odezvy na plynulé změny se zkouší dynamické chování, tedy odezva na skokové změny napětí a sleduje se doba ustálení a strmost odezvy. Ukázka z dvou různých střídačů a odlišné dynamické chování je ukázáno na Obrázek 10. Na horním grafu je odezva  $Q$  na skokové změny lineární a odezva  $P$  skoková s překmitem. V levém dolním obrázku je odezva  $P$  i  $Q$  na změny skoková bez překmitů. V pravém dolním obrázku je odezva exponenciální.

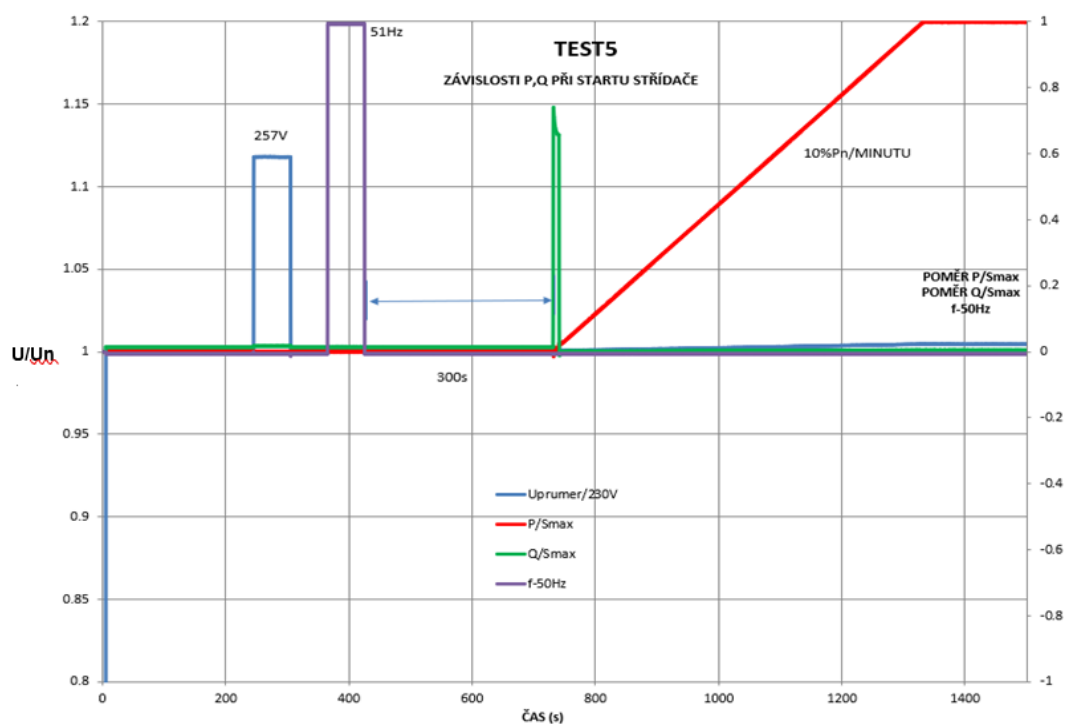


Obrázek 10 Ukázky odlišné dynamické odezvy FV střídačů na skokové změny napětí

#### 2.3.4. Test opětovného připojení a najíždění

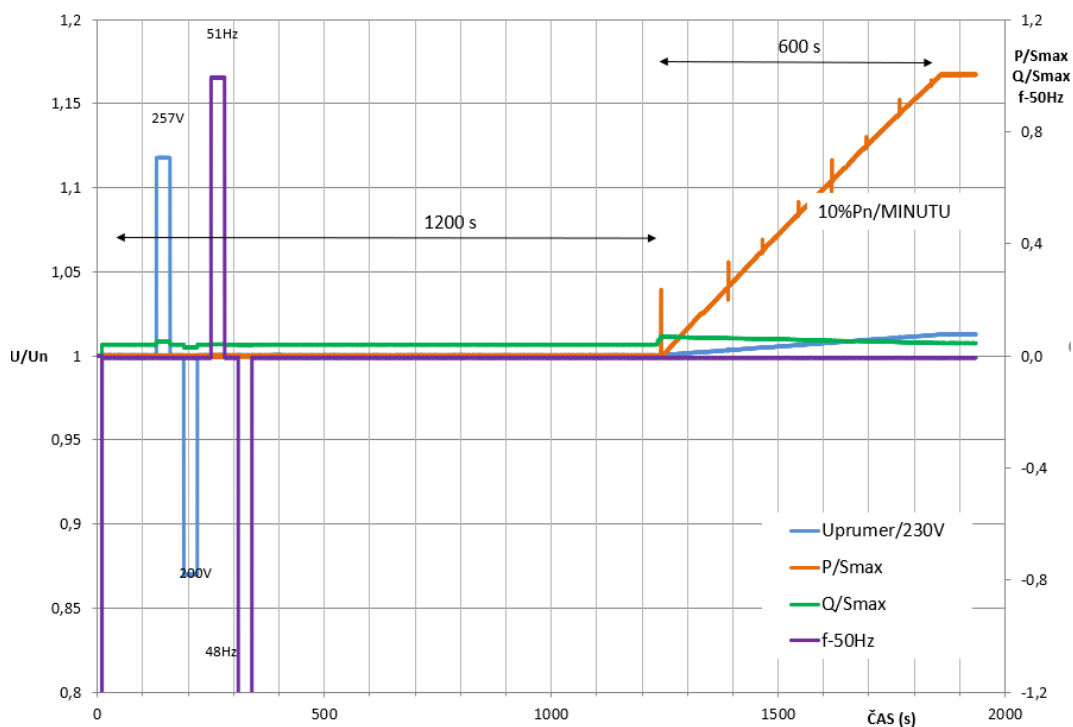
Ověřuje se najížděcí rampa střídače a způsob opětovného připojení k síti po výpadku. Dle PPDS [1] může k automatickému opětovnému připojení dojít, pokud jsou napětí a frekvence po dobu 300 s v předepsaných mezích ( $U = 85-110 \% U_n$ ;  $f = 47,50-50,05 \text{ Hz}$ ), potom může střídač zahájit dodávku činného výkonu s gradientem  $10 \% P_n/\text{min}$ . V rámci testu se střídač připojí k síti a sleduje se čas, za jaký střídač začne dodávat činný výkon, během této doby se simulují výkyvy napětí a frekvence mimo hlídané předepsané meze a sleduje se reakce střídače na ně.





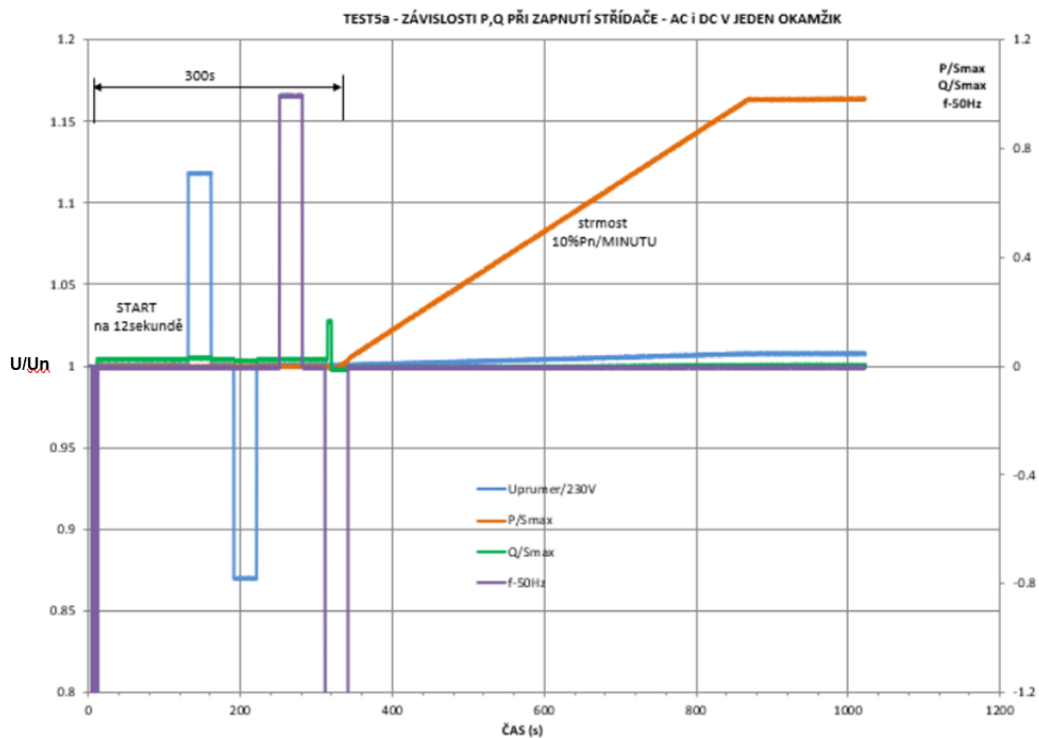
Obrázek 11 Správné chování při opětovném připojení k síti

Střídač, jehož průběh opětovného připojení je na následujícím Obrázek 12, nesledoval dovolené meze  $U$  a  $f$  (z tohoto obrázku to není zcela patrné) a najížděl předepsanou rampu po 20 minutách od připojení (nastaveno bez možnosti změny).



Obrázek 12 Chování střídače při opětovném připojení

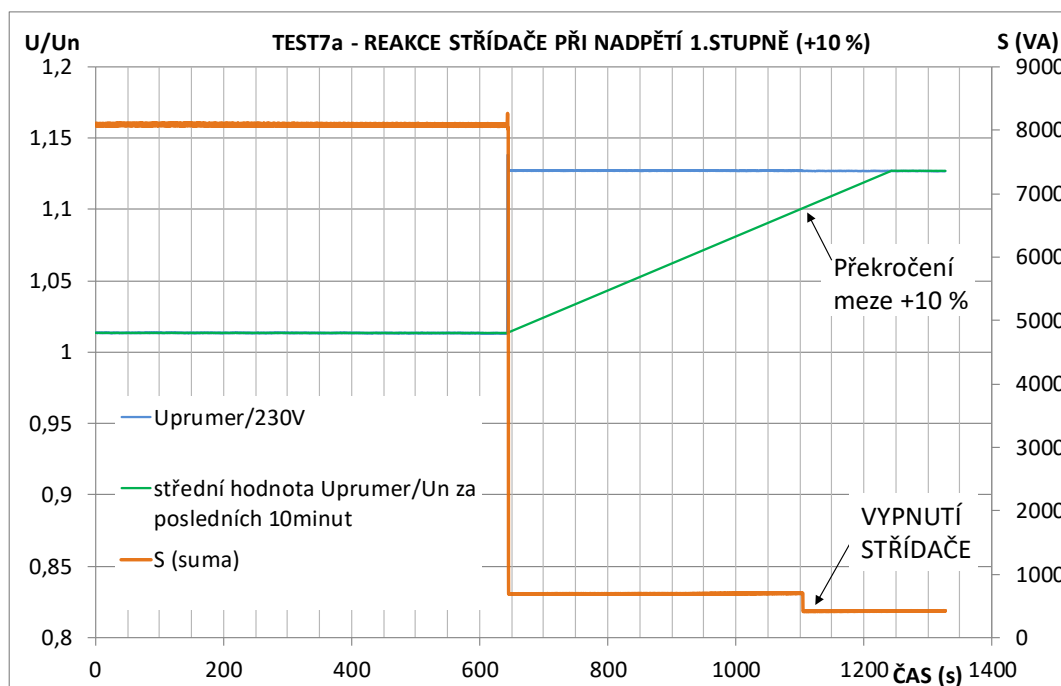




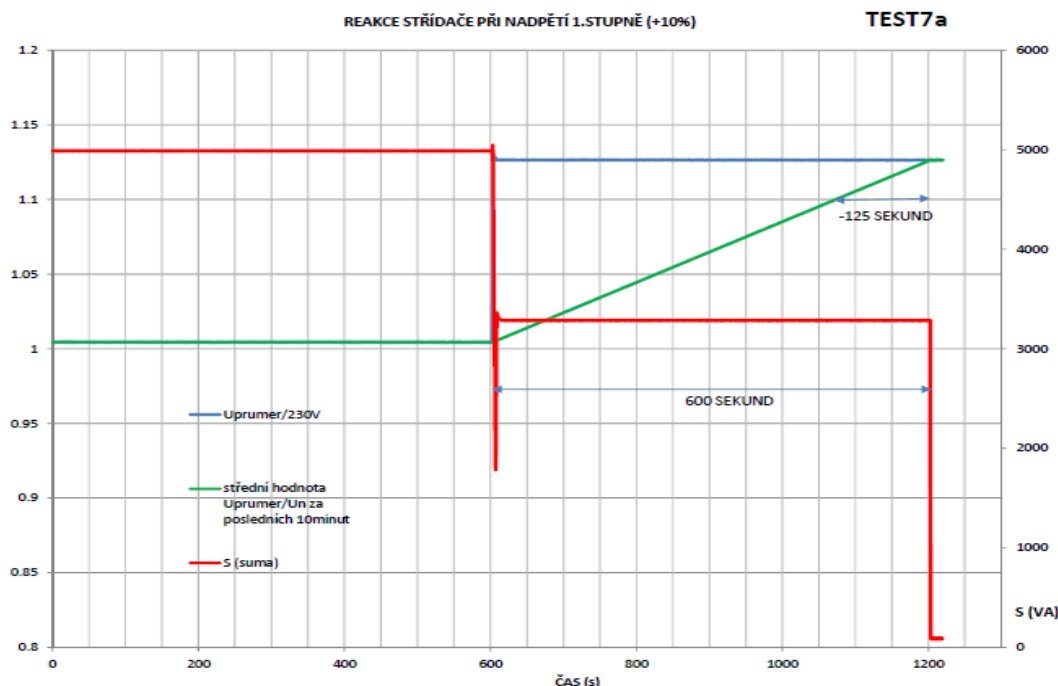
Obrázek 13 Chování střídače při opětovném připojení, kdy nesleduje stav sítě

### 2.3.5. Testování frekvenčních a napěťových ochran

V rámci testování probíhají zkoušky nastavení jednotlivých stupňů ochran a měří se časy vypnutí. Již dříve byly zmíněny zjištěné nedostatky týkající se nastavení frekvenčních ochran. U napěťových ochran bývá častý problém v prvním stupni, kdy se vyhodnocuje průměr napětí za 10minutové klouzavé okno. Reakce střídače se správným přístupem je na Obrázek 14.



Obrázek 14 Správné chování 1.stupně přepětové ochrany



Obrázek 15 Nesprávné chování 1.stupně přepětové ochrany

Obrázek 15 ukazuje chování střídače, kdy v 1. stupni přepětové ochrany vypíná 10 minut po překročení měřeného napětí nad 110 % $U_n$ , v tomto případě to znamená o 125 s později, než by měl dle definovaného 10minutového klouzavého průměru napětí.

### 3. ZÁVĚR

Na základě detailnějšího odzkoušení a seznámení se s některými typy střídačů dodávaných na český trh je jasné, že toto ověřování má pro budoucí rozvoj DECE velký přínos. Jen velmi malý podíl zapůjčených střídačů po vlastním oživení a standardním nastavení pro ČR fungoval správně a plnil všechny požadavky stanovené PPDS pro připojení do sítě. Přestože dodavatel deklaruje, že podmínky PPDS splňují a že stačí zvolit pouze dané národní nastavení, naše zkušenosti říkají, že velmi často jsou nastaveny nesprávné meze, charakteristiky nejsou funkční nebo jsou charakteristiky implementovány naprosto opačně a situaci v síti tak zhoršují. Často bylo nutné meze ve výchozím nastavení upravovat, nebo dané charakteristiky musel aktivovat až vzdáleně technik přímo od výrobce a často bylo nutné upravovat firmware střídače, což se při běžném uvádění těchto zařízení do provozu techniky instalačních firem u zákazníků realizovat nebude. Proto v rámci těchto testů aktivně spolupracujeme vždy s dodavatelem daného střídače, či přímo s výrobcem, a snažíme se dostat daný FV střídač do stavu, aby všechny podmínky dané PPDS a technickými podmínkami připojení splňoval. Z tohoto důvodu se snažíme vytvořit nebo vyladit dané specifické nastavení, po jehož zvolení ze strany instalačních techniků pomocí menu střídače by při uvedení do provozu byly všechny funkce správně nastaveny a aktivovány, případně vytvořit vyhovující verzi firmwaru tak, aby všechny následně dodávané FV střídače již plnily všechny požadavky ve „výchozím“ stavu.

## 4. 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>
- [6] J. Švec, P. Derner, S. Hes, J. Kůla: Možnosti zvýšení připojitelnosti výroben s autonomními regulačními charakteristikami na hladině nn – příspěvek na ČK CIRED 2018, Tábor, 2018. Dostupný ve sborníku konference.



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

**Ing. Tomáš Linhart**

V roce 2013 absolvoval Fakultu elektrotechnickou Českého vysokého učení technického v Praze, obor Elektroenergetika. Od roku 2013 působil ve společnosti ČEPS, a.s. jako specialista odd. Analýz PS se zaměřením na řízení napětí a jalových výkonů, obnovu soustavy po blackoutu a dynamickou stabilitu. Od roku 2018 pracuje ve společnosti ČEZ Distribuce, a.s. 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.: +420 492 112 156, e-mail: [tomas.linhart01@cezdistribuce.cz](mailto:tomas.linhart01@cezdistribuce.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, a.s. 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@cezdistribuce.cz](mailto:jan.svec@cezdistribuce.cz)

**Ing. Stanislav Hes**

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, a.s. 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.: +420 211 042 826 e-mail: [stanislav.hes@cezdistribuce.cz](mailto:stanislav.hes@cezdistribuce.cz)