



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## STŘÍDAČE PRO FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY

INVERTERS FOR PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jevhen Rusyn

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Procházka, Ph.D.

BRNO 2022

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Jevhen Rusyn

**ID:** 221250

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Střídače pro fotovoltaické elektrárny**

**POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Proveďte literární rešerši na výše uvedené téma.
2. Dle pravidel provozování distribučních soustav proveďte testování a vyhodnocení střídačů FVE dostupných na českém trhu.
3. Změřte a vyhodnoťte výkonové poměry střídače.

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 31.5.2022

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Procházka, Ph.D.

**prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce pojednává o problematice laboratorního ověřování střídačů pro fotovoltaické elektrárny dle současně platných zákonných a úředních předpisů. Práce obsahuje rešerši provedenou literárním řešením fotovoltaických systémů a přípojovacích podmínek střídačů pro FVE. Práce se dále věnuje ověření vlastností střídače RCT Power Tripower DC 6.0, u kterého byla provedena úprava parametrů firmwaru pro splnění přípojovacích podmínek provozovatelů distribučních soustav.

## **Klíčová slova**

FV střídače, podmínky připojení FV střídačů, laboratorní testování střídače pro FVE

## **Abstract**

The bachelor thesis deals with the issue of laboratory verification of converters for photovoltaic power plants according to the currently valid legal and official regulations and standards. In the thesis, a literature search has been conducted on photovoltaic systems and connection conditions of converters for PV plants. The thesis also focuses on the verification of the characteristics of the RCT Power Tripower DC 6.0 inverter, for which firmware modifications were made to meet the connection conditions of the distribution system operators.

## **Keywords**

Photovoltaic convertors, converter connection terms, laboratory testing of convertor for photovoltaic

## **Bibliografická citace**

RUSYN, Jevhen. *Střídače pro fotovoltaické elektrárny*. Brno: 2022. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2022. 46 s., 7 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Petr Procházka, Ph.D.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	<i>Jevhen Rusyn</i>
<b>VUT ID studenta:</b>	<i>221250</i>
<b>Typ práce:</b>	<i>Bakalářská práce</i>
<b>Akademický rok:</b>	<i>2021/22</i>
<b>Téma závěrečné práce:</b>	<i>Střídače pro fotovoltaické elektrárny</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 31. května 2022

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petrovi Procházkovi, PhD. za odborné vedení a poskytnutí cenných odborných rad a informací při zpracování mé bakalářské práce. Dále tímto děkuji pracovníkům laboratoře společnosti ČEZ Distribuce, pobočky Hradec Králové za spolupráci a ochotu při poskytnutí zázemí, jmenovitě Ing. Ludřkovi Frejvaldovi za předmětné rady a připomínky.

V Brně dne: 31. května 2022

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>9</b>
<b>1. FOTOVOLTAIKA.....</b>	<b>11</b>
1.1 SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ .....	11
1.2 FOTOVOLTAICKÝ JEV .....	12
1.2.1 <i>PN přechod</i> .....	12
1.2.2 <i>Fotovoltaický článek</i> .....	13
1.3 KOMPONENTY PRO FVE SYSTÉMY .....	13
1.3.1 <i>Fotovoltaický panel</i> .....	13
1.3.2 <i>Měniče pro FVE</i> .....	13
1.3.3 <i>Akumulátory</i> .....	15
1.4 FOTOVOLTAICKÉ SYSTÉMY .....	15
1.4.1 <i>OFF GRID</i> .....	16
1.4.2 <i>ON GRID</i> .....	16
<b>2. PŘIPOJOVACÍ PODMÍNKY.....</b>	<b>17</b>
2.1 LEGISLATIVA.....	17
2.1.1 <i>Narřízení Komise (EU) 2016/631</i> .....	17
2.1.2 <i>Příloha PPDS</i> .....	17
2.2 PROVOZNÍ PODMÍNKY .....	17
2.2.1 <i>Ochrany</i> .....	18
2.2.2 <i>Podpora sítě</i> .....	18
2.2.3 <i>Přizpůsobení činného výkonu</i> .....	20
2.2.4 <i>Řízení jalového výkonu</i> .....	21
2.2.5 <i>Dálkové řízení</i> .....	21
2.2.6 <i>Automatické opětovné připojení</i> .....	21
<b>3. LABORATORNÍ TESTOVÁNÍ STRÍDAČŮ.....</b>	<b>22</b>
3.1 TESTOVANÝ OBJEKT.....	22
3.2 TESTOVACÍ PRACOVÍŠTĚ .....	24
3.3 METODIKA ZPRACOVÁNÍ ZMĚŘENÝCH HODNOT .....	26
3.4 VÝSLEDKY TESTOVÁNÍ.....	26
3.4.1 <i>Proměření statických regulačních <math>Q(U)</math> a <math>P(U)</math> charakteristik</i> .....	27
3.4.2 <i>Provozní PQ diagram</i> .....	29
3.4.3 <i>Proměření regulačních <math>P(f)</math> charakteristik</i> .....	30
3.4.4 <i>Ověření dynamického chování</i> .....	31
3.4.5 <i>Test restartu střídače</i> .....	33
3.4.6 <i>Testování napěťových a frekvenčních ochran</i> .....	34
3.4.7 <i>Ověření FRT křivek</i> .....	35
3.4.8 <i>Ověření chování střídače při aktivaci HDO</i> .....	37
3.4.9 <i>Test asymetrie</i> .....	38
3.5 SHRUTÍ TESTOVÁNÍ.....	38
<b>LITERATURA.....</b>	<b>42</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>44</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>46</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Fotovoltaický článek [5].....	12
1.2	Sestavování fotovoltaického pole [6].....	13
1.3	Hybridní FV systém [9].....	14
1.4	Nastavení pracovního bodu [6] .....	15
1.5	Schéma OFF GRID systému [13] .....	16
1.6	Schéma ON GRID systému [13] .....	16
2.1	fázorový diagram PQ regulace .....	18
2.2	LVRT křivka .....	19
2.3	HVRT křivka.....	19
2.4	P(U) regulační charakteristika.....	20
2.5	P(f) regulační charakteristika .....	20
2.6	Q(U) regulační charakteristika .....	21
3.1	Uživatelské rozhání aplikace RCT Power App .....	23
3.2	Schéma zapojení testovacího pracoviště .....	24
3.3	Uživatelský program SlowRamps .....	25
3.4	Testovací pracoviště.....	25
3.5	Nastavení pro export hodnot v programu DEWEsoft.....	26
3.6	Příkaz v cmd.exe pro uložení každého 1000. vzorku .....	26
3.7	Test závislosti P a Q na lineárně vzrůstajícím napětí .....	27
3.8	Test závislosti P a Q na lineárně vzrůstajícím napětí na jedné fázi .....	28
3.9	PQ diagram .....	29
3.10	Test P(f) regulační charakteristika, při lineárně vzrůstající frekvenční rampě.....	30
3.11	Test P(f) regulační charakteristika, při skokové změně frekvence.....	31
3.12	Test odezvy P a Q na skokovou změnu napětí .....	32
3.13	Detail odezvy činného výkonu na skokovou změnu napětí.....	32
3.14	Test opětovného připojení po poruše (napětí mimo mez) .....	33
3.15	Test opětovného připojení po poruše (frekvence mimo mez) .....	34
3.16	Test nadpětí 1. stupně.....	35
3.17	Test LVRT .....	36
3.18	Test HVRT .....	36
3.19	Test HDO .....	37
3.20	Test HDO – detail .....	37
3.21	Test asymetrické dodávky .....	38
3.22	Shrnutí dosažených výsledků testování.....	39
3.23	Test LVRT – před úpravou firmwarů.....	40
3.24	Test HDO – detail před úpravou firmwarů.....	40

## SEZNAM TABULEK

2.1	Nastavení ochran výroben s fázovými proudy do 16 A .....	18
3.1	Parametry střídače [19] .....	23
3.2	Tabulka použitých přístrojů.....	24
3.3	Nastavení ochran střídače.....	35

# Úvod

V České republice jsou nejrozšířenějším zdrojem energie fosilní paliva, a to především uhlí, zemní plyn a ropa. Zásoby těchto druhů paliv jsou však limitované. Dle odhadů odborníků dojde k vyčerpání zásob uhlí během příštích 120 let. Vznik uhlí však trval několik milionů let. Dalším neblahým aspektem využívání fosilních paliv je jejich negativní dopad na životní prostředí. Jedná se především o tvorbu skleníkového efektu, který je zapříčiněný procesem spalování fosilních paliv.

Jedním z možných řešení je postupné přecházení k OZE, tedy obnovitelným zdrojům energie. Tyto zdroje jsou v podstatě nevyčerpatelné a jejich zásoba se neustále obnovuje. Mezi obnovitelné zdroje energie řadíme i fotovoltaiku.

Měniče jsou nezbytnou součástí každé fotovoltaické elektrárny. Dá se očekávat, že v budoucnu význam měničů poroste, jelikož umožňují připojení alternativních zdrojů elektrické energie k distribuční síti.

Na měniče, respektive střídače je kladen velký důraz z hlediska dodání elektrické energie o požadovaných parametrech. Před připojením výroby elektrické energie k distribuční síti je tedy nutné ověřit, zda výroba splňuje současně platné úřední předpisy a normy.

Výše nastíněné téma bakalářské práce je členěno do tří základních částí. První kapitola představuje seznámení s fotovoltaickými systémy. Připojovací podmínky nalezneme v kapitole druhé a laboratorní vyhodnocení střídače je uvedeno v kapitole číslo tři.

# 1. FOTOVOLTAIKA

O fotovoltaiku se zajímá spousta vyspělých zemí, včetně některých zemí Evropské unie, jelikož se jedná o vyspělé průmyslové odvětví pro výrobu elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Obnovitelnými zdroji se rozumí obnovitelné nefosilní přírodní zdroje, které se v lidském časovém měřítku přirozeně obnovují. Patří mezi ně uhlíkově neutrální zdroje, jako jsou sluneční záření, větrná, vodní a geotermální energie. Využití energie slunečního záření patří z hlediska vlivu na životní prostředí k nejčistším a nejšetrnějším způsobům výroby elektřiny.

Fotovoltaika je technologie přeměny slunečního záření na stejnosměrný elektrický proud, k čemuž využívá fotoelektrický jev. Přestože je termín fotovoltaika znám již 180 let, pro nízkou účinnost FV článků a vysoké pořizovací náklady byla využívána vzácně (v kosmonautice). V České republice nastal růst mezi lety 2009 – 2010. V tomto období se vyšplhal počet fotovoltaických elektráren z několika stovek na několik tisíc instalací [1].

## 1.1 Sluneční záření

Sluneční energie patří bezesporu k nejdůležitějším formám energie, která se na Zemi nachází a využívá. Tato energie vzniká termonukleární reakcí v jádru Slunce. Během termonukleární reakce dochází k uvolnění velkého množství energie, která je ekvivalentem hmotnostnímu úbytku. Na Slunci se během každé sekundy přemění 700 milionů tun vodíku na 695 milionů tun helia a zbylých 5 milionů tun se přemění z 96 % na elektromagnetické záření a 4 % na elektronová neutrina. Slunce se převážně skládá z vodíku (73,5 %) a helia (24,9 %), ale obsahuje i další prvky jako kyslík, uhlík, železo, nebo neon. Vzhledem k tomu, že vyčerpání zásob vodíku na Slunci je očekáváno nejdříve za 5 miliard let, považuje se tento zdroj za obnovitelný [2].

Sluneční záření je dostupné všude na Zemi, avšak v různé míře. Mezi faktory, které ovlivňují množství dopadající sluneční energie, patří zeměpisná šířka, roční doba, místní klima a orientace dopadající plochy. Přičemž nejvíce slunečního záření dopadá v oblasti rovníku a směrem k pólům značně slábne. Česká republika leží v mírném pásu, což znamená, že množství dopadajícího záření zde kolísá. V zimě je doba slunečního svitu kratší a množství objevujících se oblačností a srážek je vyšší. Při jasném počasí dopadá na zemský povrch skrz atmosféru kolem 75 % slunečního záření, což odpovídá  $1 \text{ kW/m}^2$ . Při špatném počasí se hodnota až 5krát sníží. Pro výpočet solárního záření v dané lokalitě se tak vychází z průměrných statistických údajů z předešlých let. Dalším důležitým faktorem při výstavbě fotovoltaických elektráren je orientace a sklon. Nejvyšší účinností ze slunečního záření lze dosáhnout na ploše kolmé k dopadajícím paprskům. Řešením se zdají být zařízení k otáčení panelů ke slunci, ty se však jeví jako nerentabilní vzhledem ke svým investičním nákladům. Pro celoročně dobré výsledky se doporučuje sklon kolem

45°. Pro zvýšení efektivity v zimě se volí sklon k 60° a v létě naopak k 30°. Vzhledem k tomu, že je v létě intenzita slunečního záření vyšší, volí se obvykle 35° [1].

## 1.2 Fotovoltaický jev

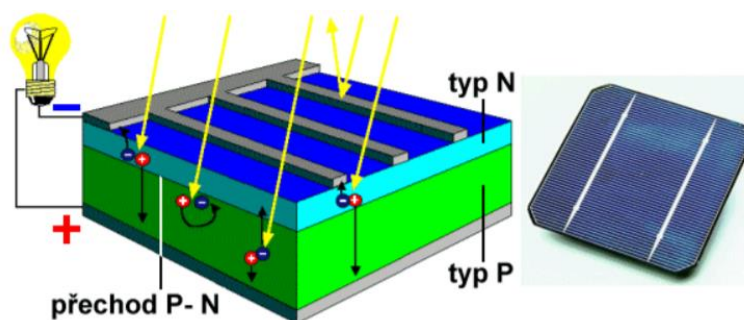
Fotovoltaický jev umožňuje přeměnu slunečního záření na elektrickou energii. K tomu dochází při interakci fotonu s elektronem, kdy dopadající foton předá svou energii elektronu a tím umožní elektronu opustit atom. Vzniká tak elektron a díra. Tyto emitované elektrony jsou označovány jako fotoelektrony a jejich uvolňování se označuje jako fotoemise.

Termínem fotovoltaický jev je označován vnitřní fotoelektrický jev, který lze pozorovat u polovodičových materiálů. Zatímco vnější fotoelektrický jev lze pozorovat u kovu. Hlavní rozdíl mezi fotoelektrickým jevem a fotovoltaickým jevem spočívá v tom, že ve fotoelektrickém jevu jsou elektrony emitovány do otevřeného prostoru, zatímco ve fotovoltaickém jevu vstupují elektrony do jiného materiálu, čímž je generován elektrický proud [3].

### 1.2.1 PN přechod

PN přechod vznikne mikroskopickým spojením polovodiče typu P, kde jsou majoritním nosičem náboje elektronové vakance (díry) a polovodiče typu N kde jsou majoritním nosičem náboje volné elektrony (Obrázek 1.1). Polovodič typu P vznikne, přidáme-li do čistého křemíku, jenž obsahuje čtyři valenční elektrony, prvek se třemi valenčními elektrony, například: bor, galium, nebo hliník). Polovodič typu N vznikne, pokud přidáme do křemíku prvek s pěti valenčními elektrony, například: fosfor, arsen, nebo antimon.

Po vytvoření přechodu dochází k difúzi (rozptýlení) děr z polovodiče typu P do polovodiče typu N. Tyto díry rekombinují (slučují se) s elektrony v polovodiči typu N. U přechodu polovodiče typu P vznikají elektricky nevykompenzované nepohyblivé záporné ionty akceptorů (příjemci elektronu) [4], [5].



Obrázek 1.1 Fotovoltaický článek [5]

## 1.2.2 Fotovoltaický článek

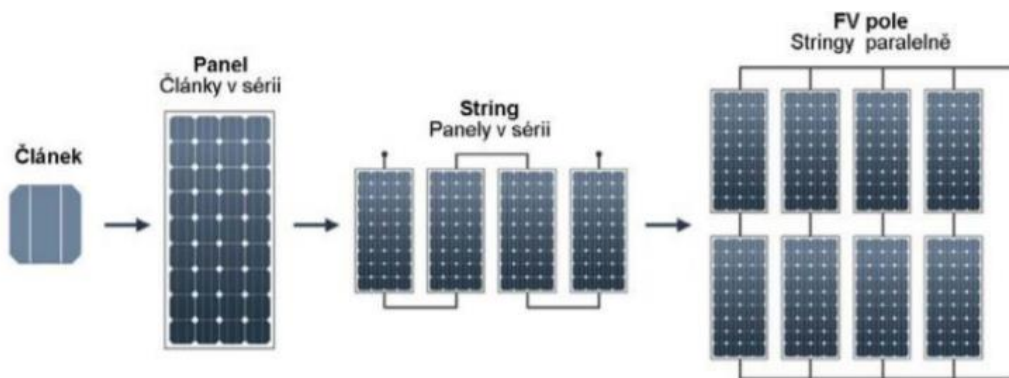
Fotovoltaický článek je polovodičová destička, ve které se vytváří elektrická energie po dopadu světla. Jako materiál je zpravidla používán křemík pro jeho hojný výskyt v zemské kůře. V praxi jsou pak využívány jeho polykrystalické a monokrystalické formy. Výhodou polykrystalické formy je vyšší účinnost při nižší intenzitě záření, tj.: při odklonu článku od nejvhodnější poloh. Monokrystalická forma disponuje vyšší účinností při přímém naklonění ke slunci. Rozdíly mezi jednotlivými formami však nejsou výrazné.

Účinnost přeměny sluneční energie v elektrickou je teoreticky až 37 %, v laboratořích však dosahuje kolem 23%. Běžně dostupné články mají účinnost ještě menší (u monokrystalických solárních článků je 14% až 22%, u polykrystalických 14% až 17%) [5], [6].

## 1.3 Komponenty pro FVE systémy

### 1.3.1 Fotovoltaický panel

Fotovoltaický panel se skládá z fotovoltaických článků, které jsou pospojovány sérioparalelně. Napětí na fotovoltaickém článku je dáno použitým polovodičem. U křemíkového solárního článku se tato hodnota pohybuje kolem 0,5 V, ta je ale nízká pro zapojení běžných spotřebičů, proto pro zvýšení napětí a proudu zapojíme více článků sérioparalelně. Fotovoltaický panel pak obvykle obsahuje 36, nebo 72 spojených článků. Jak je patrné z Obrázku 1.2 články tvoří panel, panely se pospojují do série (stringy). FV pole pak tvoří paralelně spojené stringy [4], [7].



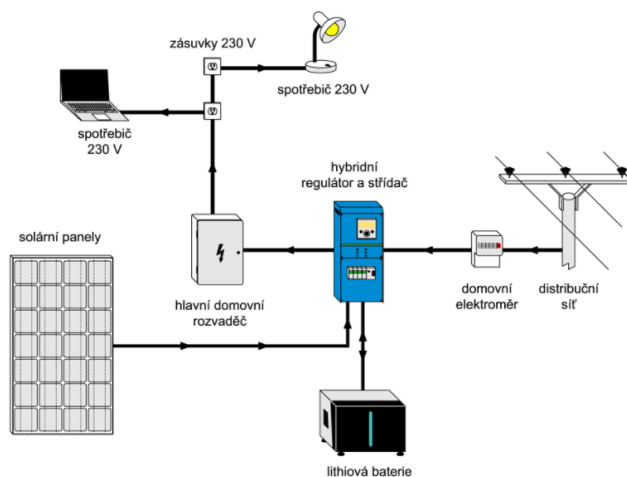
Obrázek 1.2 Sestavování fotovoltaického pole [6]

### 1.3.2 Měníče pro FVE

Měníč je nezbytnou součástí každé fotovoltaické elektrárny. Obecnou funkci měniče, respektive střídače je zajišťování přeměny stejnosměrného napětí z fotovoltaického panelu na napětí střídavé, zpravidla o parametrech rozvodné sítě ( $U_{ef} = \sim 230/400 \text{ V}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ ). Dle technického provedení lze měniče dělit na transformátorové a spínané.

Transformátorové měniče jsou vývojově starší a k změně napětí využívají transformátor. Jejich výroba je nákladnější a jsou těžší, avšak jsou velmi spolehlivé a zajišťují galvanické oddělení. S postupným vývojem výkonových polovodičových součástek přední místo zaujali měniče spínací, u kterých jsou výrobní náklady mnohem nižší, přičemž dosahují velmi dobré účinnosti. Nicméně nezajišťují galvanické oddělení, a proto jsou zde kladené zvýšené nároky na bezpečný provoz.

V dnešní době se u fotovoltaických elektráren využívají tzv. hybridní měniče. Hybridní měniče dokážou dle požadavku synchronizovat proces výroby a spotřeby elektrické energie. Řídí tedy všechny toky energie v objektu a umožňují tím efektivní využití energie v reálném čase přímo z panelu, baterie, či distribuční sítě. Ukládání energie do bateriových uložení, nebo dodávání do DS probíhá v případě přebytků vyrobené energie. Na obrázku 1.3 je zobrazen FV systém s hybridním měničem [8].



Obrázek 1.3 Hybridní FV systém [9]

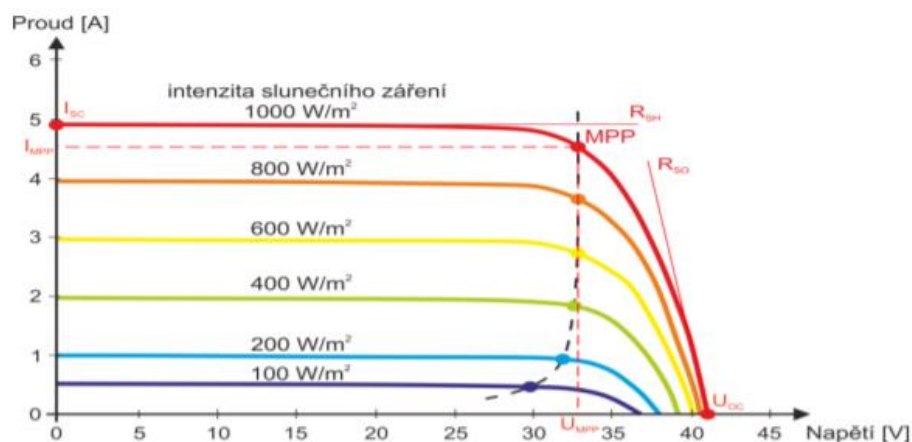
## Účinnost

Při výběru měniče musíme brát v potaz kombinaci několika parametrů. Účinnost měniče bezpochyby spadá mezi ně. V katalogových listech bývají uvedeny dva druhy účinností a to maximální  $\eta_{\max}$  a evropská  $\eta_{\text{eu}}$ . Maximální účinnost bývá z pravidla vyšší než evropská a pohybuje se v rozmezí 90–98 %, přičemž těchto hodnot dosahuje při optimálních podmínkách. Pro Českou republiku je důležitější evropská účinnost, jelikož intenzita osvětlení panelu pro naše geografické podmínky je nestálá. Evropská účinnost se stanoví jako průměr účinností pro různé stupně zatížení měniče (měří se při 5, 10, 20, 30, 50 a 100 % nominálního výkonu měniče) [10].

## MPP tracker

Dalším důležitým parametrem, který ovlivňuje efektivní využití energie je rozsah MPP, který udává rozsah napětí, ve kterém měnič pracuje optimálně. MPP tracker reaguje na měnící se klimatické podmínky, respektive nastavuje pracovní bod měniče pro maximální využití vyrobené energie FV modulem. Nastavení pracovního bodu vychází

z voltampérové charakteristiky fotovoltaických panelů. Na obrázku 1.4 je ukázka nastavení pracovního bodu na VA charakteristice FV modulů pro různé intenzity osvětlení [6], [10].



Obrázek 1.4 Nastavení pracovního bodu [6]

### 1.3.3 Akumulátory

Akumulátory instalované v FV systému slouží k uchování přebytečné elektrické energie, která není v reálném čase spotřebována. Obecně je akumulátor chápán jako technické zařízení, které ukládá elektrickou energii ve svých elektrodách jako energii chemickou (dochází ke změně chemického složení). Nejrozšířenějšími typy baterií pro FV systémy jsou Lithium-iontové a olověné akumulátory. Důležitými kritérii pro výběr akumulátoru jsou kapacita, maximální hloubka vybití (DOD), účinnost nabíjecího a vybíjecího cyklu a životnost. [11].

Elektromobilita představuje nejen současně rostoucí trend ale i budoucnost dopravy. Dokud se ale auta nabíjí běžnou elektřinou z elektrizační sítě, která je získávána především spalováním fosilních paliv, bude potenciál ekologického přínosu elektromobility nevyužit. Řešení představuje nabíjení elektromobilů z fotovoltaik.

V rámci ekonomických a ekologických benefitů se začínají využívat v domácích uložkách pro FV systémy second-life baterie. Základní myšlenkou je opětovné využití baterií z elektromobilů, jejichž kapacita již není dostačující pro využití v elektromobilitě. V rámci domácího stacionárního zdroje je jejich opětovný provoz možný i několik desítek let.

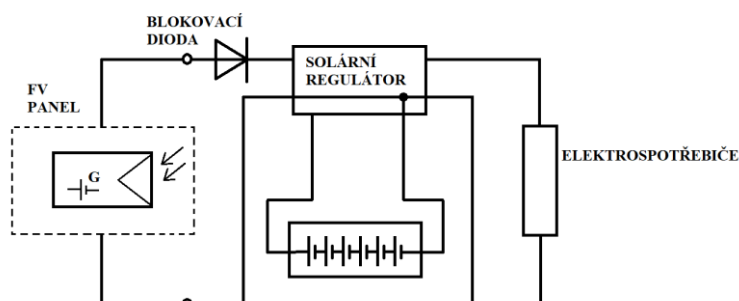
## 1.4 Fotovoltaické systémy

Fotovoltaické elektrárny mohou pracovat na různých systémech a využití vygenerované elektrické energie, záleží tedy za jakým účelem byla vybudována. Nabízí se zde několik variant - od zaměření na prodej až po přímé využití. U fotovoltaických systému rozlišujeme mezi autonomními, tzv. ostrovními systémy (OFF GRID) a síťovými systémy (ON GRID) [9], [12].

### 1.4.1 OFF GRID

OFF GRID systémy nejsou připojené k síti. Tento systém je využíván tam, kde není dostupnost elektrické infrastruktury. Nejčastěji se vyskytují u drobných aplikacích, například v náramkových hodinkách, kalkulačkách, nebo automatech na parkování. Základní nevýhodou je nestabilita produkce, která vždy neumožní pokrytí okamžité spotřeby. K zajištění stále dodávky elektrické energie lze využít bateriový systém nebo systém zahrnující elektrocentrálu. Hlavním předpokladem pro efektivní využití tohoto systému je nízká celková spotřeba objektu.

Na obrázku 1.3 je uveden příklad OFF GRID systému s bateriovým uložištěm. K FV panelům je připojen regulátor, který umožňuje při přebytku vyrobené elektrické energie energii akumulovat, tu následně využívá pro pokrytí odběru elektrospotřebičů při nedostatečné výrobě.

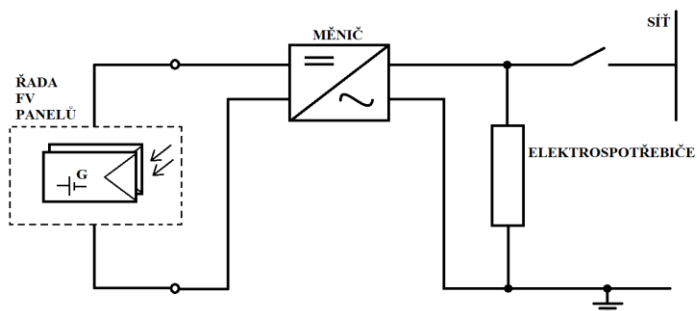


Obrázek 1.5 Schéma OFF GRID systému [13]

### 1.4.2 ON GRID

Pro systémy ON GRID je charakteristické, že musí být připojené k distribuční síti přes elektroměr distribučních společností. V případě velké intenzity slunečního osvětlení může dojít k přebytku vyrobené energie, která je dodávána do sítě. V opačném případě nedostatku elektrické energie je odebírána ze sítě za distribuční poplatky.

Zjednodušené schéma ON GRID systému je zobrazeno na obrázku 1.4., kde systém obsahuje měnič napětí (střídač), který zajišťuje přeměnu elektrického napětí o parametrech v síti.



Obrázek 1.6 Schéma ON GRID systému [13]

## 2. PŘIPOJOVACÍ PODMÍNKY

### 2.1 Legislativa

Při zřizování a provozu výroben elektřiny je zapotřebí dodržovat současně platné zákonné a úřední předpisy a normy. Hlavní směrnice, která determinuje hlavní hlediska pro připojení výrobních modulů k distribuční síti je PPDS – příloha č.4 [14].

Při zřizování a provozu VM je zapotřebí dodržovat:

- Současně platné zákonné předpisy a normy, především [15], [16], [17] a [18]
- Platné normy ČSN, PNE, případně PN PDS
- Předpisy pro ochranu pracovníků a bezpečnost práce
- Nařízení a směrnice PDS

#### 2.1.1 Nařízení Komise (EU) 2016/631

Toto nařízení, ze dne 14. dubna 2016 [15], zavádí kodex sítě, který stanovuje požadavky pro připojení výroben elektřiny k propojené elektrizační soustavě. Přispívá tím k spravedlivým podmínkám hospodářské soutěže na vnitřním trhu s elektřinou, bezpečnosti provozu soustavy a integraci obnovitelných zdrojů energie do elektrizační soustavy. Toto nařízení stanovuje rovněž povinnosti, které mají zajistit, aby provozovatelé soustav využívali schopností výroben elektřiny vhodným, transparentním a nediskriminačním způsobem za účelem zajištění rovných podmínek v celé EU. V této směrnici nalezneme rozdělení požadavků pro příslušné kategorie VM, dle instalovaného výkonu. Nařízení je již zahrnuté V PPDS příloha 4.

#### 2.1.2 Příloha PPDS

Pravidla pro paralelní provoz výroben ze sítí provozovatele distribučních soustav shrnují hlavní hlediska, na která je zapotřebí brát zřetel při připojování výrobních modulů k DS. PPDS slouží pro provozovatele distribučních soustav a výrobce elektřiny jako podklad pro realizování paralelního připojení výroby k distribuční soustavě. PPDS byla zpracována provozovateli distribučních soustav a následně schválena Energetickým regulačním úřadem. V této směrnici jsou již zahrnuté současně platné zákonné a úřední předpisy a normy, které jsou uvedené v následujících kapitolách.

### 2.2 Provozní podmínky

K zajištění bezpečného a spolehlivého provozu elektrické distribuční soustavy je nutné dodržet sjednocené technické parametry a požadavky na chování výroben. V následujících podkapitolách jsou uvedené provozní podmínky na výrobní modul typu A1, jehož výkonové pásmo (do 11 kW), je typické pro fotočláňková zařízení [14].

### 2.2.1 Ochrany

K ochraně výroby a zřízení odběratelů jsou nutná opatření využívajících ochran, které vybaví příslušná spínací zařízení v případě odchylek napětí a proudu. Pro ochrany výroben s fázovými proudy do 16 A (výroby do 800 W a výroby v kategorii A1) provozovaných paralelně s distribuční sítí nn, platí následující tabulka.

Tabulka 2.1 Nastavení ochrany výroben s fázovými proudy do 16 A

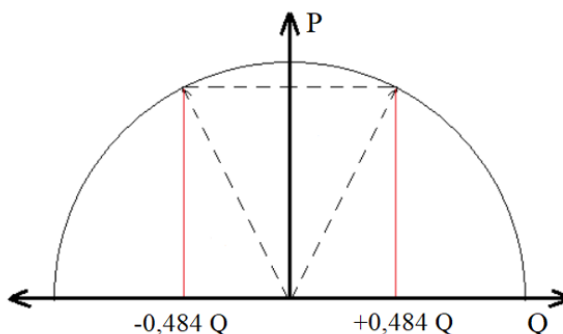
Parametr	Maximální vypínací čas [s]	Nastavení pro vypnutí
nadpětí 1. stupeň	3	230 V + 10 %
nadpětí 2. stupeň	1	230 V + 15 %
nadpětí 3. stupeň	0,1	230 V + 20 %
podpětí	1,5	230 V - 10 %
nadfrekvence	0,5	52 Hz
podfrekvence	0,5	47,5 Hz

Vypínací ochrana pro 1. stupeň nadpětí je založená na průměrné efektivní hodnotě napětí v intervalu 10 minut, přičemž ochrana musí vybavit do 3 s od překročení nadpětí o 10 % jmenovité hodnoty napětí.

### 2.2.2 Podpora sítě

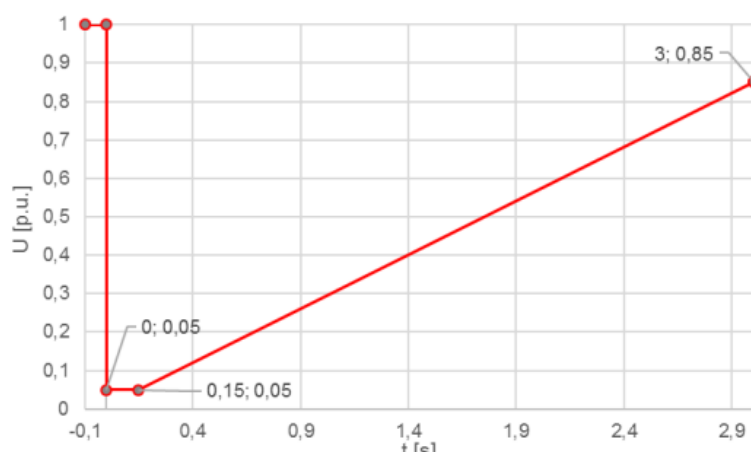
Výroby musí být schopné podílet se na udržování napětí v požadovaných parametrech při dodávce do sítě. Přitom rozlišujeme mezi statickou a dynamickou podporou sítě, které zajišťují automatické řízení ve výrobě.

Statickým udržováním napětí v síti se rozumí udržování napětí ve smluvně stanovených mezích při normálním provozu v síti při pomalých změnách napětí. Výroby na hladině NN musí být schopné podporovat napětí v síti pomocí dodávek a odběrů jalového výkonu v rozsahu účinníku výroby mezi 0,9 kapacitního (pobuzený stav) a 0,9 inaktivního charakteru (přebuzení stav). Na obrázku 2.1 je zobrazen fázorový diagram PQ regulace.



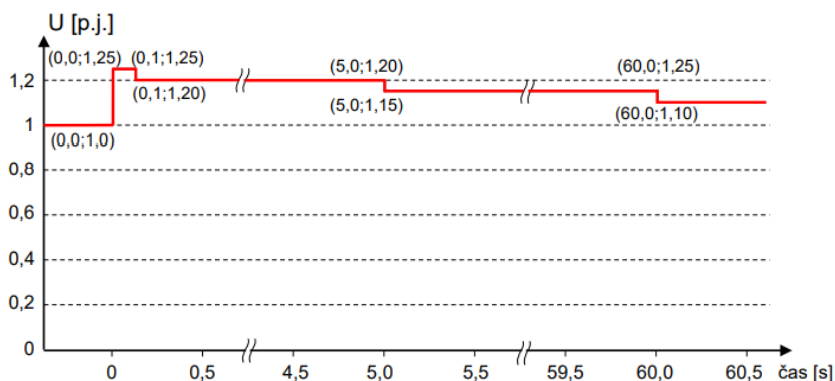
Obrázek 2.1 fázorový diagram PQ regulace

Dynamickou podporou sítě se rozumí udržování napětí při poklesech napětí v nadřazené síti, zamezující nežádoucímu odpojení výkonu napájecí distribuční sítě, které by ve výsledku vedlo k rozpadu sítě. Proto se musí výrobny v sítích NN, VN a 110 kV podílet na dynamické podpoře sítě. To znamená, že musí být schopné zůstat připojené i při poruchách v síti, během kterých dochází k výkyvům napětí. Překlenutí poruchy je definováno FRT křivkami. Tyto křivky stanovují meze, při kterých nesmí dojít k odpojení od soustavy. Na obrázku 2.2 je zobrazeno překlenutí poruchy při krátkodobém poklesu napětí (LVRT – low voltage ride through). Z charakteristiky je patrné, že pokud se napětí bude nacházet pod definovanou křivkou, tak může dojít k odpojení výrobního modulů.



Obrázek 2.2 LVRT křivka

Překlenutí poruchy při krátkodobém nadpětí (HVRT – high voltage ride through) je zobrazeno na obrázku 2.2. Z charakteristiky je patrné, že výrobní musí být schopna provozu až do 120 % síťového napětí v místě připojení po dobu 1 sekundy. V případě 115 % deklarovaného napětí pak musí být schopna provozu po dobu 60 sekund.

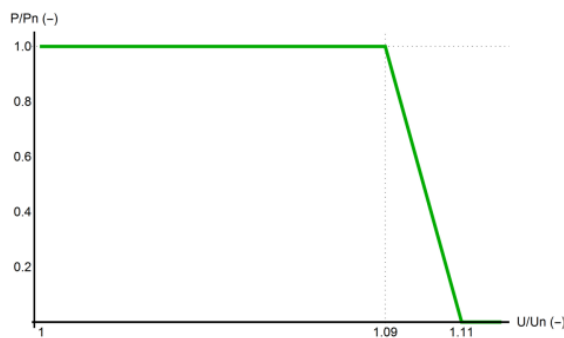


Obrázek 2.3 HVRT křivka

### 2.2.3 Přizpůsobení činného výkonu

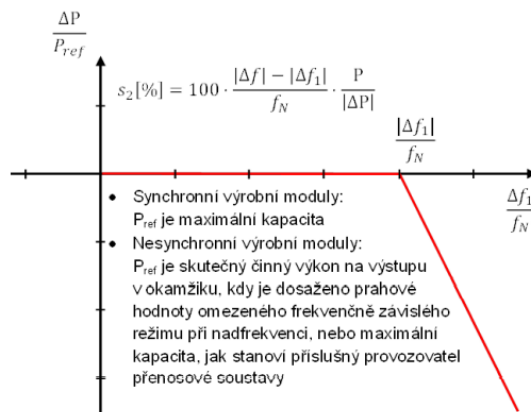
Dle požadavku provozovatelů distribučních soustav výrobní musí být schopné řízení činného výkonu v závislosti na provozních podmínkách. Přičemž přizpůsobení činného výkonu je závislé na frekvenci a napětí v síti v místě připojení.

Všechny výrobní s výkonem do 16 A na fázi, které jsou připojeny pomocí střídače musí být vybaveny autonomní regulační charakteristikou  $P(U)$ . Na obrázku 2.4 je zobrazené nastavení průběhu regulační charakteristiky. Kdy  $P(U)$  charakteristika je chápána jako absolutní, tedy pokles aktuálního činného výkonu při 109 %  $U_n$  má nastat jen při jmenovité hodnotě činného výkonu. Tedy při nižším aktuálním výkonu nastane pokles až při vyšším napětí.



Obrázek 2.4  $P(U)$  regulační charakteristika

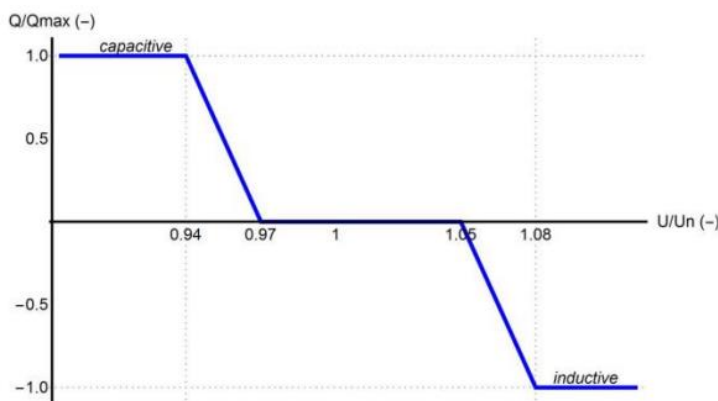
Všechny výrobní moduly, které jsou připojené do DS musí být schopné aktivovat frekvenční odezvu činného výkonu podle obrázku 2.5. Průběh regulační charakteristiky vychází z nastavení prahové hodnoty frekvence a statiky. Defaultní nastavení prahové frekvence v ČR je 50,2 Hz a statika 5 %. Tedy zlom začíná na 50,2 Hz s poklesem 40 %  $P/Hz$  a celkové zatlumení činného výkonu nastane při 51,5 Hz.



Obrázek 2.5  $P(f)$  regulační charakteristika

## 2.2.4 Řízení jalového výkonu

Autonomní regulační charakteristika  $Q(U)$  má za úkol měnit jalový výkon v závislosti na síťovém napětí v místě připojení. Nastavení regulační charakteristiky pro ČR je na obrázku 2.6. Z charakteristiky je patrné, že při napětí, které je blízké jmenovitému, pracuje výrobná s neutrálním účínkem. Při poklesu napětí v síti se výrobná snaží podpořit tím, že přejde do kapacitního režimu (dodává do sítě jalový výkon). Při vyšším napětí přejde výrobná do induktivního režimu (odebírá ze sítě jalový výkon).



Obrázek 2.6  $Q(U)$  regulační charakteristika

## 2.2.5 Dálkové řízení

Výrobní elektřiny do rezervovaného výkonu 1MW, tedy včetně výrobního modulu A1 musí být podle článku 13.6 RfG vybaveny logickým rozhraním (vstupním portem), pro přerušování dodávky činného výkonu do 5 s od obdržení pokynu. Tento požadavek lze splnit zakomponováním HDO.

## 2.2.6 Automatické opětovné připojení

Automatické opětovné připojení je zakázáno v případě aktivního HDO signálu pro ztlumení činného výkonu. V případě, kdy byly výrobní moduly odpojené od sítě z důvodu odchylky napětí nebo frekvence mohou být opětovně automaticky připojeny k distribuční soustavě, pokud jsou dodržena následující kritéria:

1. Frekvence a napětí musí být po dobu 5 min v následujících mezích:
  - a) Napětí v mezi 85–110 % jmenovité hodnoty
  - b) Frekvence v mezi 47,5 – 50,05 Hz
2. Postupné najetí po výkonové rampě s gradientem maximálně 10 %  $P_n$  za minutu.

Není-li výrobná schopna postupného najetí po výkonové rampě dle bodu 2, připojí se výrobná zpět k DS po době o intervalu 0-20 min, kterou stanoví provozovatel DS. V tomto intervalu probíhá kontrola síťového napětí a frekvence dle bodu 1.

### 3. LABORATORNÍ TESTOVÁNÍ STŘÍDAČŮ

Laboratorní testování střídačů je prováděno v souladu s pravidly provozovatelů distribučních soustav, která shrnují současně platné předpisy a normy. Základem testování je ověření statické a dynamické odezvy činného a jalového výkonu v závislosti na odchylkách síťového napětí a frekvence v místě připojení. Rovněž důležitými aspekty testování je ověření napěťových a frekvenčních ochran, jejichž korektní nastavení je zásadní z hlediska koordinace s FRT křivkami pro překlenutí poruchy. V neposlední řadě je nutné ověřit opětovné přifázování střídače k síti po poruše. Nad rámec testování je ověřováno zatlumení činného výkonu po obdržení dálkového pokynu HDO. Pro asymetrické střídače je pak odzkoušena možnost nesymetrické dodávky činného výkonu.

Požadavky na laboratorní testy střídačů:

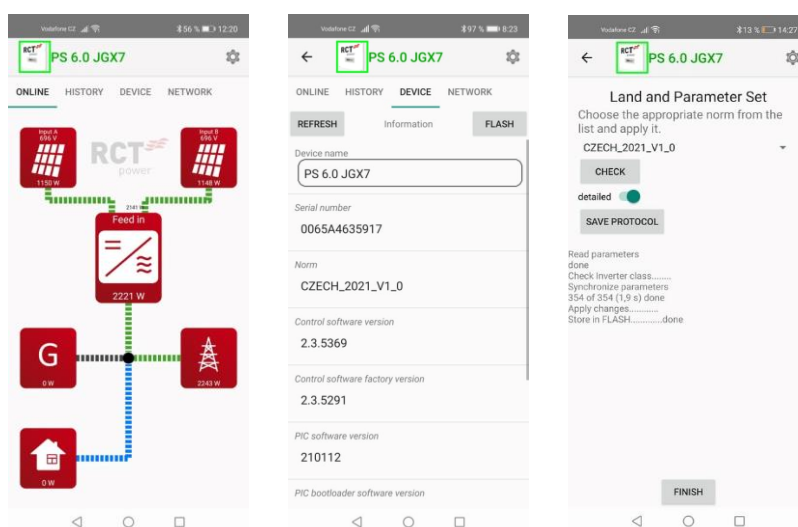
1. Proměření regulačních charakteristik  $Q(U)$  a  $P(U)$  pro hodnoty  $P = 100\%$ ,  $80\%$  a  $50\% P_n$ . Pokud to bude možné, určit, na jaké napětí obě regulační charakteristiky reagují ( $U_{AVG}$ ,  $U_{MAX}$  ze tří fází).
2. Z měření charakteristik získat body do provozního  $P$ - $Q$  diagramu.
3. Proměření regulační charakteristiky  $P(f)$  pro hodnoty  $P = 100\%$  a  $50\% P_n$ .
4. Pro všechny tři regulace  $Q(U)$ ,  $P(U)$  a  $P(f)$  změřit dynamické chování (odezva  $P(t)$ ,  $Q(t)$ ) jako reakce na skok  $U$ , resp.  $f$ .
5. Otestovat restart střídače po výpadku napájecí sítě – doba do opětovného připojení k síti, rychlost nárůstu  $\% P/min$ .
6. Otestovat dodávku do AC sítě při DC výkonu vyšším než  $P_n$ .
7. Proměření frekvenčních a napěťových ochran.
8. Test odolnosti LVRT a HVRT pro střídače nad 16 A/fázi.

#### 3.1 Testovaný objekt

Předmětem testování je třífázový hybridní střídač RCT Power Storage DC 6.0 s asymetrií na fázích, který má velmi dobrou účinnost. Parametry střídače s aktuálním firmwarem jsou uvedené v Tabulce 3.1. Pro nastavení příslušného datového záznamu země a externího monitorování chodu jsou v současné době využívané aplikace, které jsou dostupné na chytrých telefonech nebo tabletech. Na obrázku 3.1 je zobrazené uživatelské rozhraní aplikace RCT Power App, která je dostupná ke střídačům od firmy RCT. Aplikace dále umožňuje export firmwaru do textového souboru, který byl upraven, aby pracoval dle PPDS.

Tabulka 3.1 Parametry střídače [19]

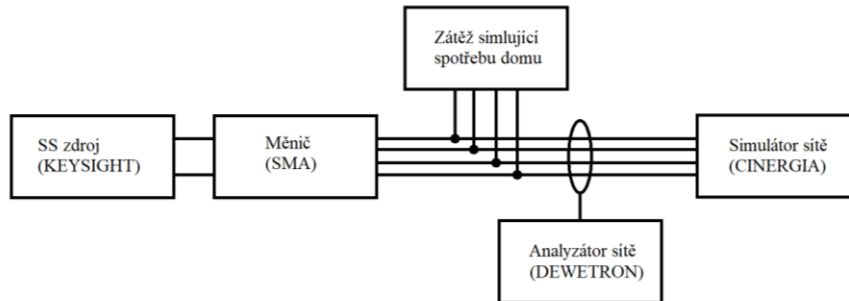
Základní parametry	Výrobce	RCT
	Typ	Power Storage DC 6.0
	Firmware	2.3.5369
	Nastavení	CZECH_2021_V1_0
	Výrobní číslo	0065A4635917
	Počet fází	3
	Hybrid	ANO
	Baterie	ANO
	Evropská účinnost	97,6 %
	Stupeň IP ochrany	42
	Topologie	Beztransformátorová
	DC strana	Max. vstupní výkon
Max. vstupní napětí		1000 V
Rozsah MPPT trackeru		265 V – 800 V
Max. vstupní proud		12 A (24 A v paralelním módu)
AC strana	Max. výstupní činný výkon	6000 W
	Max. výstupní zdánlivý výkon	6300 VA
	Max. výstupní fázový proud	9,1 A
	Jmenovitý výstupní proud	8,7 A
	Rozsah výstupního napětí	180 V – 270 V
	Jmenovité výstupní fázové napětí	230 V
	Jmenovitá frekvence	50 Hz / 60 Hz
Rozsah frekvence	45 Hz - 65 Hz	



Obrázek 3.1 Uživatelské rozhraní aplikace RCT Power App

## 3.2 Testovací pracoviště

Blokové schéma zapojení pracoviště pro testování střídačů je na Obr. 3.2, reálna podoba zapojení pak na Obr. 3.4. Soupis použitých přístrojů je uveden v Tab. 3.2.



Obrázek 3.2 Schéma zapojení testovacího pracoviště

Testovací pracoviště střídačů pro fotovoltaické elektrárny ČEZ, a. s. (pobočka Hradec Králové, Riegrovo náměstí) se sestává ze tří přístrojů a to: stejnosměrného zdroje KEYSIGHT, analyzátoru sítě DEWETRON a simulátoru sítě CINERGIA.

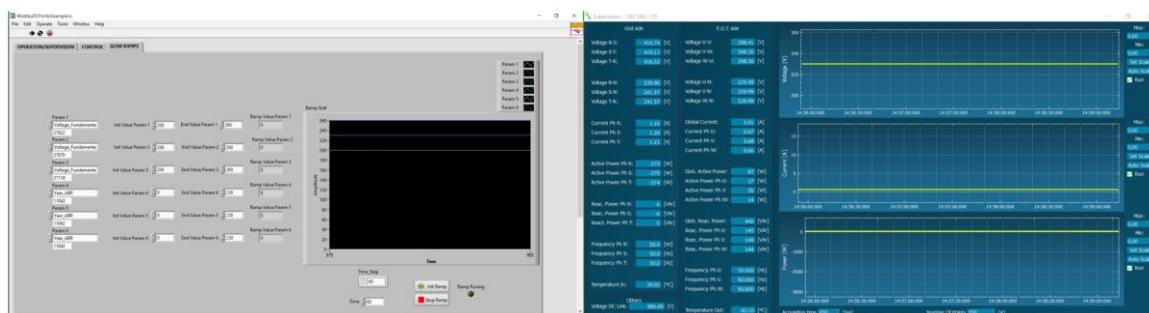
Tabulka 3.2 Tabulka použitých přístrojů

Název	Výrobce	Typ	Výrobní číslo
Stejnoseměrný zdroj	KEYSIGHT	N8955A	DE19104113
Analyzátor sítě	DEWETRON	DEWE-571	40100060
Simulátor sítě	CINERGIA	GE-15	20190228
Střídač	RCT	Power Storage DC 6.0	0065A4635917

Stejnoseměrný zdroj KEYSIGHT N8955A simuluje dodávku napětí z FV panelů. Tento laboratorní zdroj má tvrdou zdrojovou charakteristiku, která neúplně kopíruje voltampérovou charakteristiku FV článků. Dopouštíme se tímto jisté chyby měření, která ve výsledku způsobuje překmity ve výsledných změřených charakteristikách. K redukci chyby způsobené SS zdrojem jsou do série zařazeny dvě odporové dekády o celkové hodnotě  $1\Omega$ , které způsobí změkčení charakteristiky zdroje a ve výsledku zmenšení odchylky od charakteristiky FV panelu. Stejnoseměrný zdroj umožňuje dodávku až 15 kW. Pro naše měření jsou nastaveny limity dodávky pro napětí 750 V a proud pak cca 14 A. Stejnoseměrný zdroj pak umožňuje střídači odběr až  $P_{DC} = 9$  kW, ten však odebírá pouze jmenovitou hodnotu svého příkonu (6 kW). Z tohoto důvodu pak není nutné provádět testování dodávky do AC sítě při DC výkonu vyšším než  $P_n$  [20].

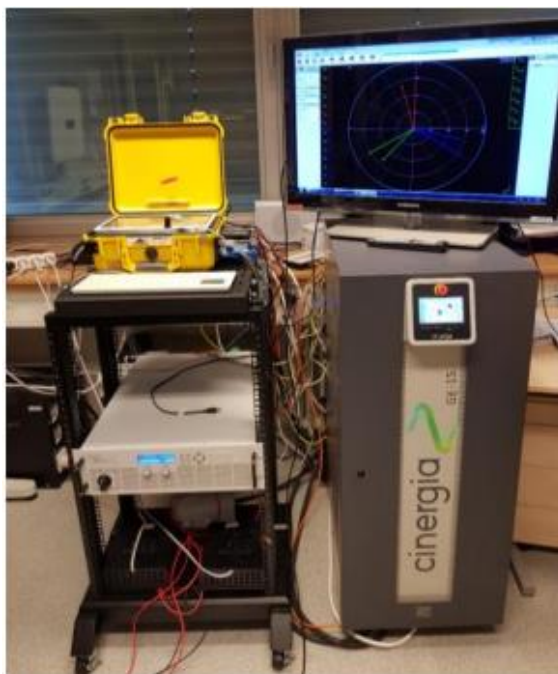
Regenerativní simulátor sítě CINERGIA GE-15 je programovatelný zdroj střídavého napětí, který umožňuje vytvoření stabilních i zkreslených střídavých sítí pomocí uživatelského rozhraní Grid Simulator (GE+). Dostupný software umožňuje nezávislé nastavení efektivních hodnot napětí na jednotlivých fázích, fázové úhly, frekvence a harmonické složky. Navíc díky dodávaným ovladačům ke grafickému

softwaru pro návrh aplikací LabVIEW, je možné vytvořit program pro sekvenci měření. Na obrázku 3.3 je zobrazené grafické rozhraní programu pro nastavení pomalých frekvenčních a napěťových ramp, který byl vytvořen v LabVIEW [21].



Obrázek 3.3 Uživatelský program SlowRamps

Třífázový analyzátor sítě DEWETRON DEWE-571 je vysokokapacitní měřicí zařízení, které je využito k zaznamenání změřených průběhů. Tento čtyř kanálový analyzátor kvality elektrické energie, díky současnému měření napětí a proudu na všech třech fázích a nulovém vodiči, umožňuje sledovat prakticky všechny parametry energetického systému: činný, jalový a zdánlivý výkony, napětí, fázové posuvy, účinník. Tyto měřené veličiny jsou ukládaný s vzorkovací frekvencí 5 kHz, respektive s intervalem 0,2 ms. K měřicímu přístroji je dostupný software DEWESoft7 pro sledování průběhu měření a zpětné analýze změřených hodnot [22].

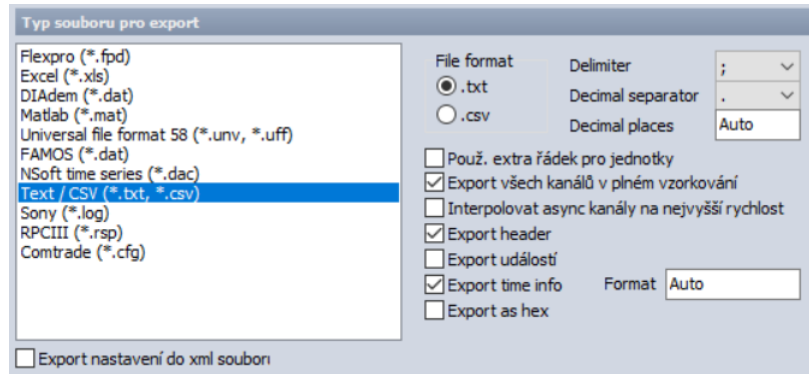


Obrázek 3.4 Testovací pracoviště

### 3.3 Metodika zpracování změřených hodnot

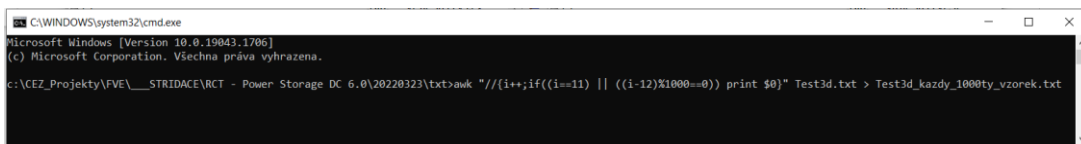
Pro zpracování naměřených hodnot v tabulkovém softwaru byl použit následující postup.

Export naměřených hodnot do textového souboru byl zřízen pomocí softwaru DEWEsoft, který je dostupný k analyzátoru sítě DEWETRON. Zde je nutné dodržet řadu syntaxí pro zachování logického uspořádání hodnot (Obrázek 3.5).



Obrázek 3.5 Nastavení pro export hodnot v programu DEWEsoft

Kvůli nadbytečně velkému množství zaznamenaných hodnot analyzátořem sítě, který zaznamenává hodnoty se vzorkovací periodou 0,2 ms, bylo žádoucí hodnoty zredukovat. Pro přesné vyhodnocení reakcí ochran byla ponechána původní kapacita změřených hodnot. K ověření zbylých požadavků je dostačující množství několika vzorků za sekundu. K tomuto procesu byl využit programovací jazyk AWK s jehož pomocí byl vytvořen příkaz pro uložení každého 1000. vzorku do nového textového souboru (Obr. 3.6).



Obrázek 3.6 Příkaz v cmd.exe pro uložení každého 1000. vzorku

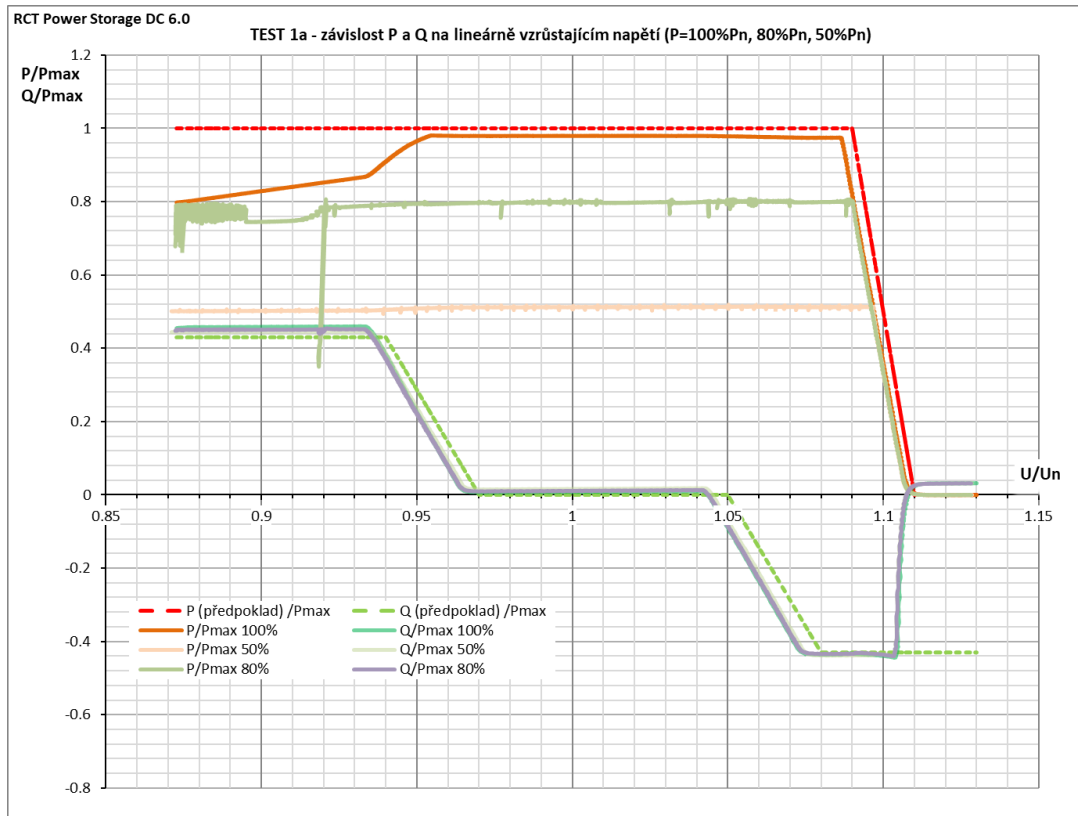
### 3.4 Výsledky testování

Výsledné testování střídače RCT Power Storage DC 6.0 bylo provedeno po úpravě firmwaru, které splňují podmínky provozovatelů distribučních soustav (Příloha A -).

### 3.4.1 Proměření statických regulačních $Q(U)$ a $P(U)$ charakteristik

V souladu s pravidly provozovatelů distribučních soustav (viz. kapitola 2.2.3 a 2.2.4) musí být výrobní, které jsou připojovány k distribuční síti, vybaveny autonomními regulačními charakteristikami  $Q(U)$  a  $P(U)$ . Tyto regulační charakteristiky střídače jsou zásadní z hlediska stabilizace napětí v místě připojení, resp. zmírňují vliv samotné výrobní na síť. Chování regulace se může obecně lišit, proto je měření prováděno pro různé hodnoty dodávaného činného výkonu ( $P = 100\%$ ,  $80\%$  a  $50\%$   $P_n$ ). Dále pokud to bude možné, je třeba stanovit, na jaké napětí obě regulační charakteristiky reagují ( $U_{AVG}$ ,  $U_{MAX}$  ze tří fází).

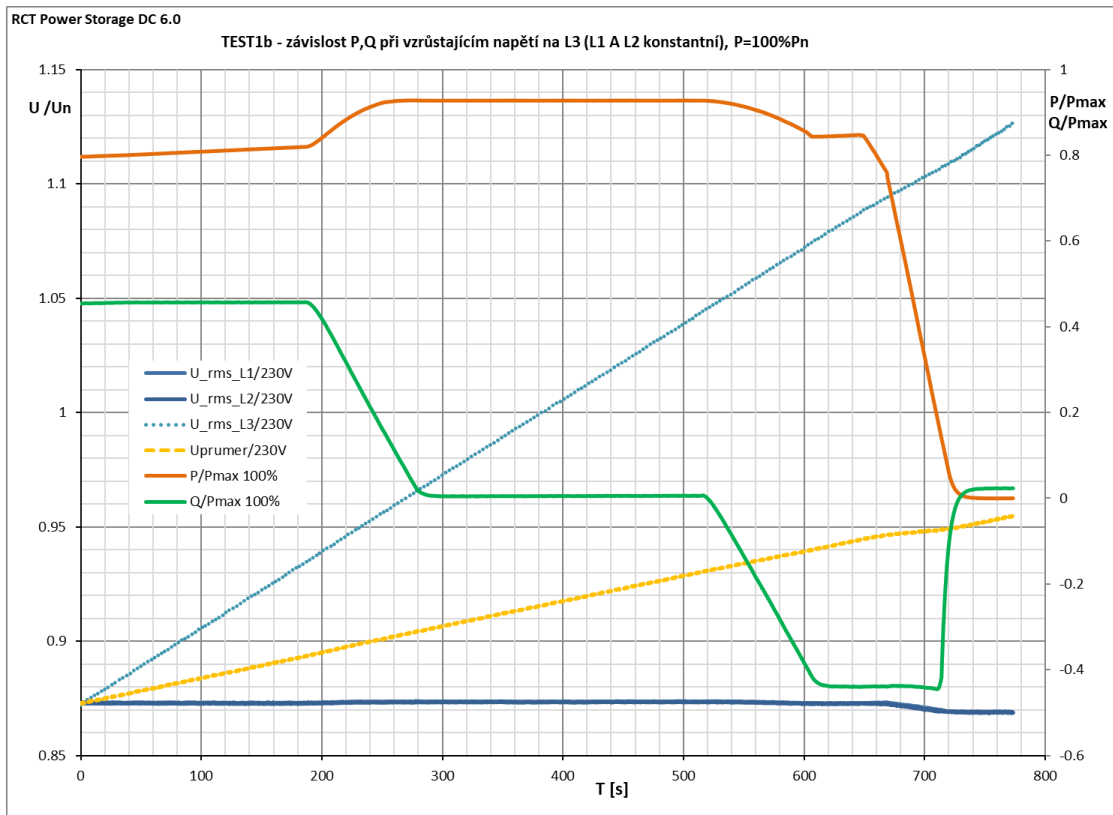
Pro ověření toho požadavku jsou provedena dvě měření. V první části testování jsou ověřovány regulační charakteristiky, tedy chování činného a jalového výkonu při lineárně se zvyšujícím napětí na všech fázích. V druhé části testování je pak zjišťováno, na které napětí regulační charakteristiky reagují.



Obrázek 3.7 Test závislosti P a Q na lineárně vzrůstajícím napětí

Z grafu regulace Obrázek 3.7 je patrné, že průběhy regulačních funkcí odpovídají požadavkům. Kmitání výkonu je způsobeno chybou měřicí metody, kdy MPP tracker střídače obtížně hledá optimální pracovní bod na tvrdé zdrojové charakteristice stejnosměrného zdroje. Regulační funkce  $P(U)$  slouží jako mezní opatření, kde pokles nastane při  $109\%$   $U_n$ . Tato regulační funkce je chápána jako absolutní, tedy při nižším aktuálním činném výkonu pokles má nastat při vyšším napětí. Průběh  $Q(U)$  regulační

funkce je rovněž dle předpokladu, tedy při podpětí v síti střídač pracuje v kapacitním režimu (dodává jalový výkon) a při nadpětí pak přechází do induktivního režimu (odebírá jalový výkon).

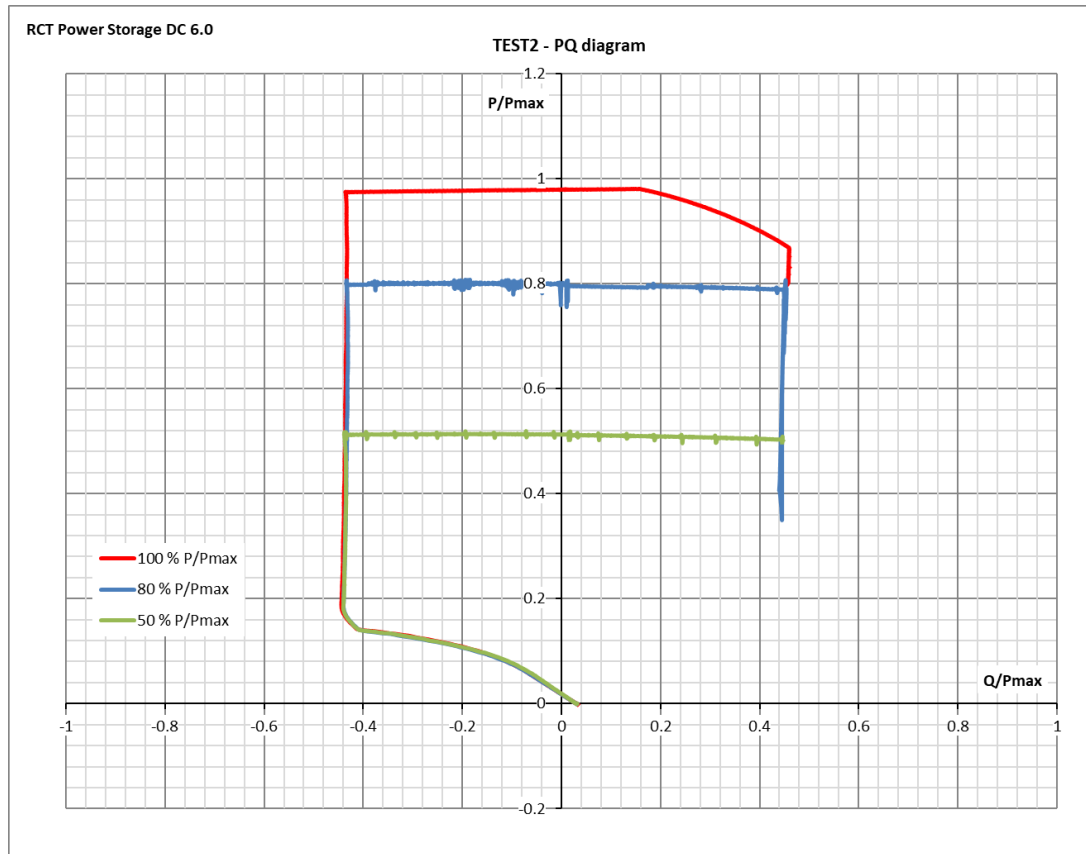


Obrázek 3.8 Test závislosti P a Q na lineárně vzrůstajícím napětí na jedné fázi

V druhé části testování je zjišťováno, na jaké napětí obě regulační charakteristiky reagují. Provozovatele distribučních soustav požadují nastavení, pro  $P(U)$  regulaci, reakci na maximální napětí ze tří fází. Pro  $Q(U)$  regulaci doporučují nastavení reakce na průměrné napětí ze tří fází. K identifikaci je simulována nesymetrie síťového napětí, při které je zvyšováno napětí na fázi L3, přičemž napětí na zbylých dvou fázích L1 a L2 jsou konstantní. Z grafu na Obr. 3.8 lze pozorovat, že  $P(U)$  regulace reaguje korektně na maximální napětí ze tří fází. Nicméně nastavení odezvy  $Q(U)$  regulace není zcela korektní, jelikož reaguje na maximální napětí ze tří fází, přičemž by měla správně reagovat na průměr napětí ze tří fází.

### 3.4.2 Provozní $PQ$ diagram

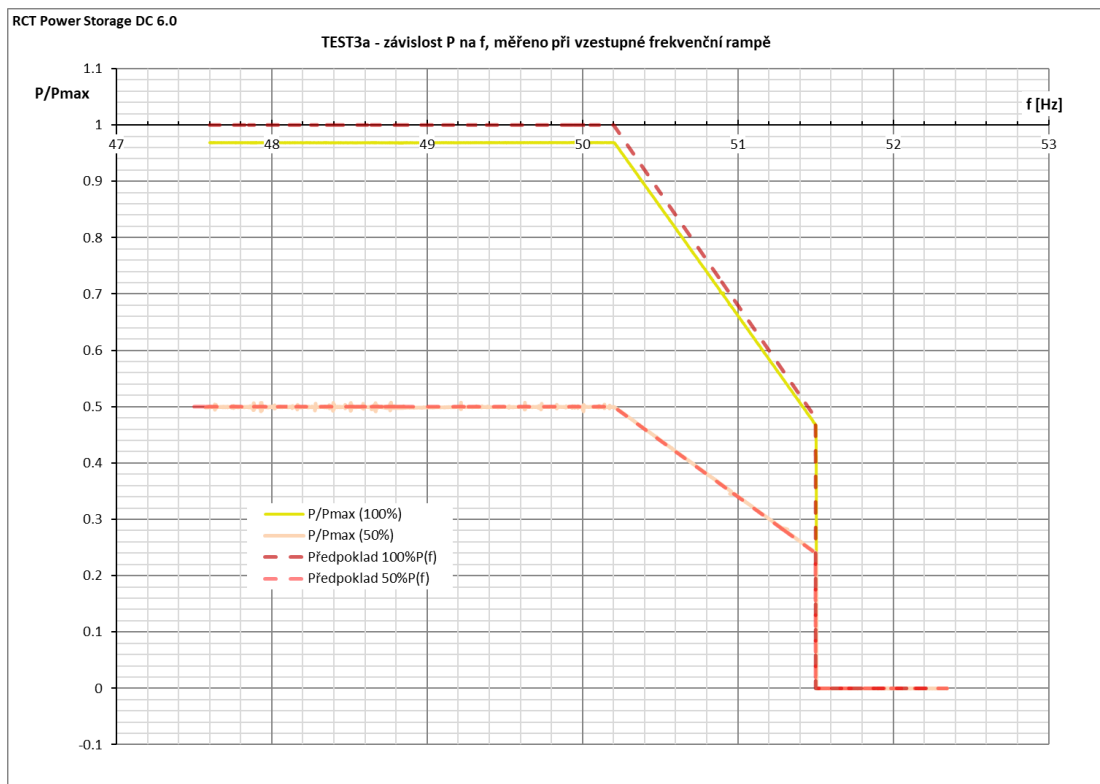
Na základě naměřených hodnot z předchozího měření byl vynesena  $PQ$  diagram pro tři hodnoty dodávky činného výkonu. Provozní  $PQ$  diagram slouží jako prvotní ukazatel výkonové regulace v pracovní oblasti výroby. Z grafu Obr. 3.9 lze usoudit, že pracovní oblast výroby se nachází v tolerančním pásmu prvního a druhého kvadrantu. V prvním kvadrantu se výroba nachází v přebuzeném stavu, dodává tedy do sítě jalový i činný výkon. V druhém kvadrantu se výroba nachází v podbuzeném stavu, přičemž dochází k spotřebě jalové energie ze sítě.



Obrázek 3.9  $PQ$  diagram

### 3.4.3 Proměření regulačních $P(f)$ charakteristik

Výrobní moduly, které jsou připojovány k distribuční soustavě musí být vybaveny regulační funkcí  $P(f)$ . Měření je provedeno pro 100 % a 50 % jmenovitého výkonu (viz. kapitola 2.2.3). Změřené průběhy regulace splňují požadavky provozovatelů distribučních soustav (Obrázek 3.10). Pro ověření přípustného snížení činného výkonu v závislosti na frekvenci byla simulována plynule se měnící frekvenční rampa (47,6 Hz – 52,7 Hz). Omezování činného výkonu nastalo korektně při prahové frekvenci 50,2 Hz. Zatlumení činného výkonu na nulu nastalo při dosažení mezní frekvence 51,5 Hz. Střídač má rovněž správně nastavenou statiku, která určuje strmost. Při dodávce s nižším aktuálním výkonem bude strmost mírnější.



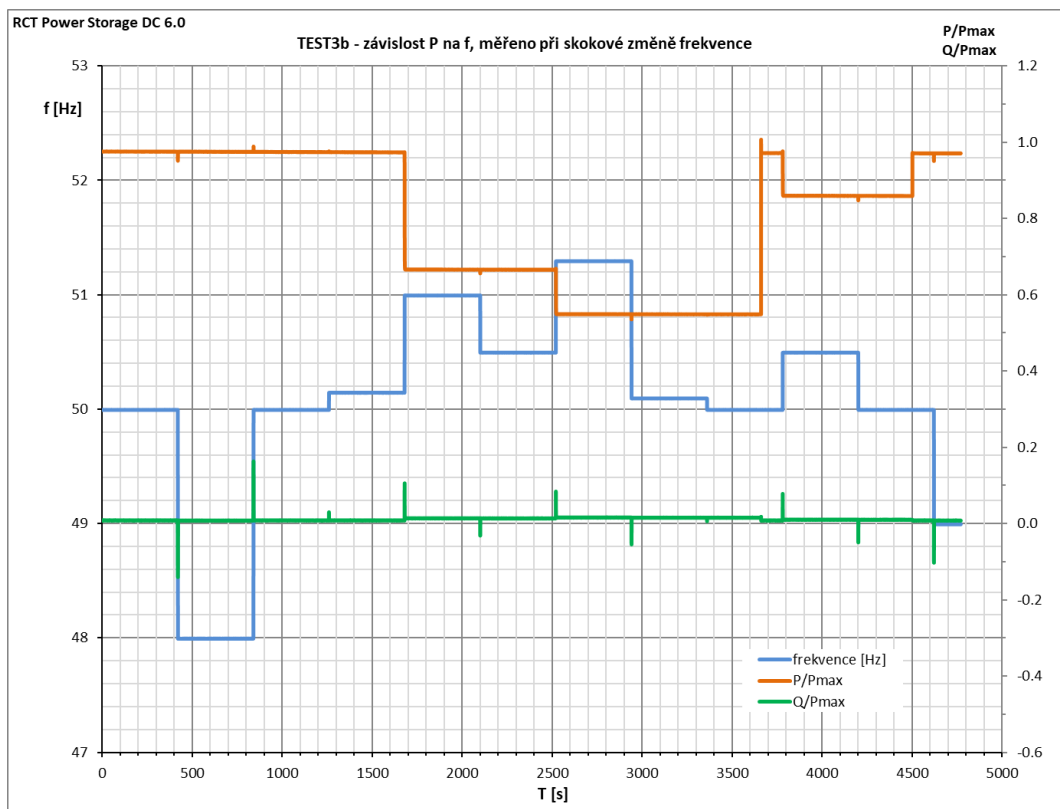
Obrázek 3.10 Test  $P(f)$  regulační charakteristika, při lineárně vzrůstající frekvenční rampě

### 3.4.4 Ověření dynamického chování

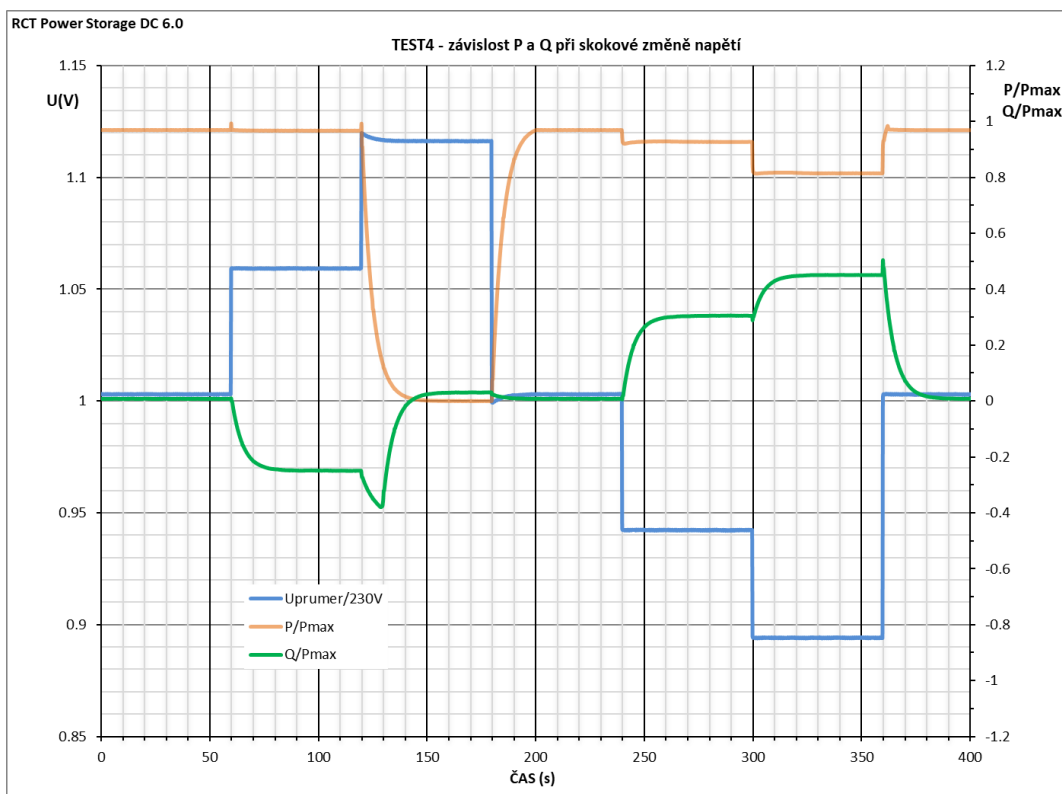
V rámci testování je sledováno i dynamické chování střídače, respektive reakce dodávky činného a jalového výkonu na sérii skokových změn napětí a frekvence.

V první části testování (Obrázek 3.11) je zobrazena dynamická odezva činného výkonu na frekvenční skoky. Z přehledu změřených hodnot je možné pozorovat jedno nestandardní chování regulace činného výkonu, kdy při skokové změně frekvence z 50,1 Hz na 50 Hz, došlo ke zpožděné reakci pro obnovení dodávky (cca 4,5 minuty). V pravidlech provozovatelů distribučních soustav není definován časový interval, ve kterém střídač musí obnovit dodávku, chování tedy není chybné.

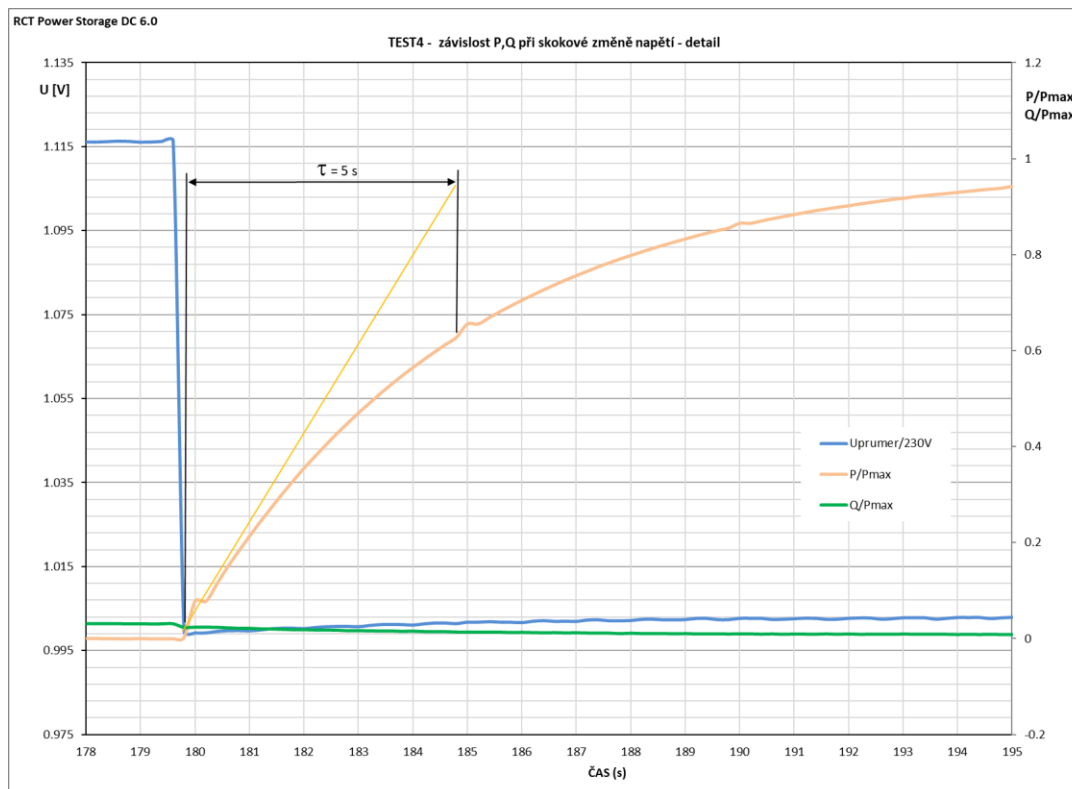
V druhé části měření (Obrázek 3.12) jsou pak zobrazeny průběhy regulace činného a jalového výkonu v reakci na skokové změny napětí. Pro určení časové konstanty a typu regulace je pak zobrazen detail na Obrázků 3.13. Z grafu je patrné, že regulace probíhá po exponenciálně s časovou konstantou  $\tau = 5$  s.



Obrázek 3.11 Test  $P(f)$  regulační charakteristika, při skokové změně frekvence



Obrázek 3.12 Test odezvy P a Q na skokovou změnu napětí



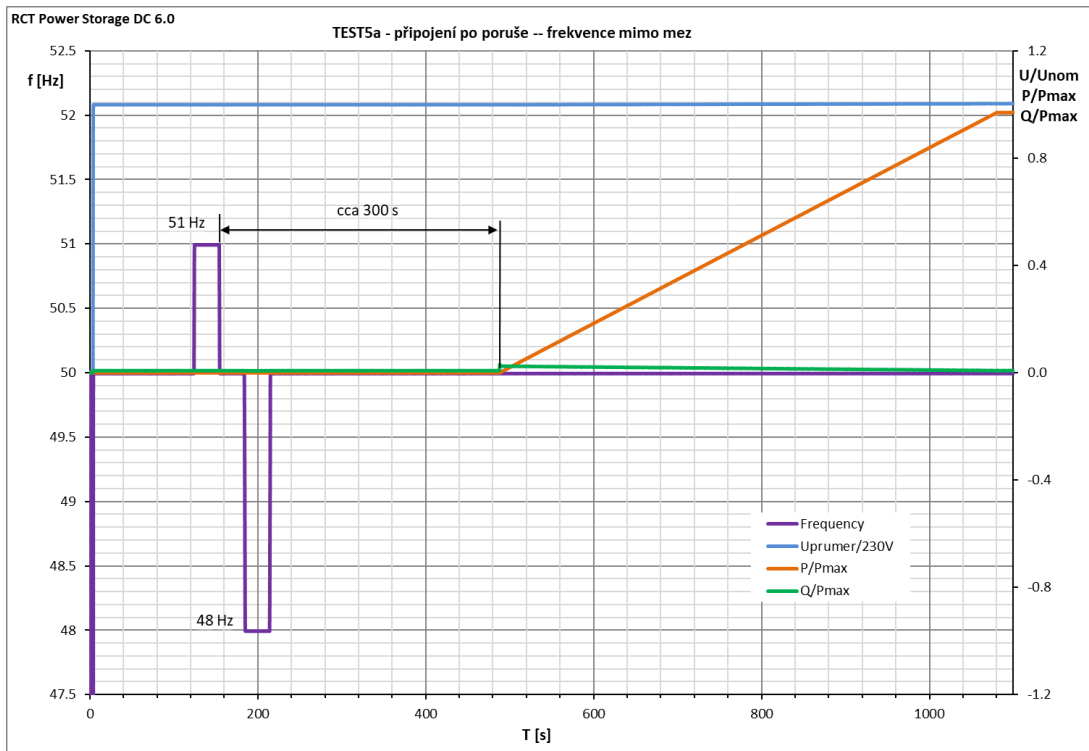
Obrázek 3.13 Detail odezvy činného výkonu na skokovou změnu napětí

### 3.4.5 Test restartu střídače

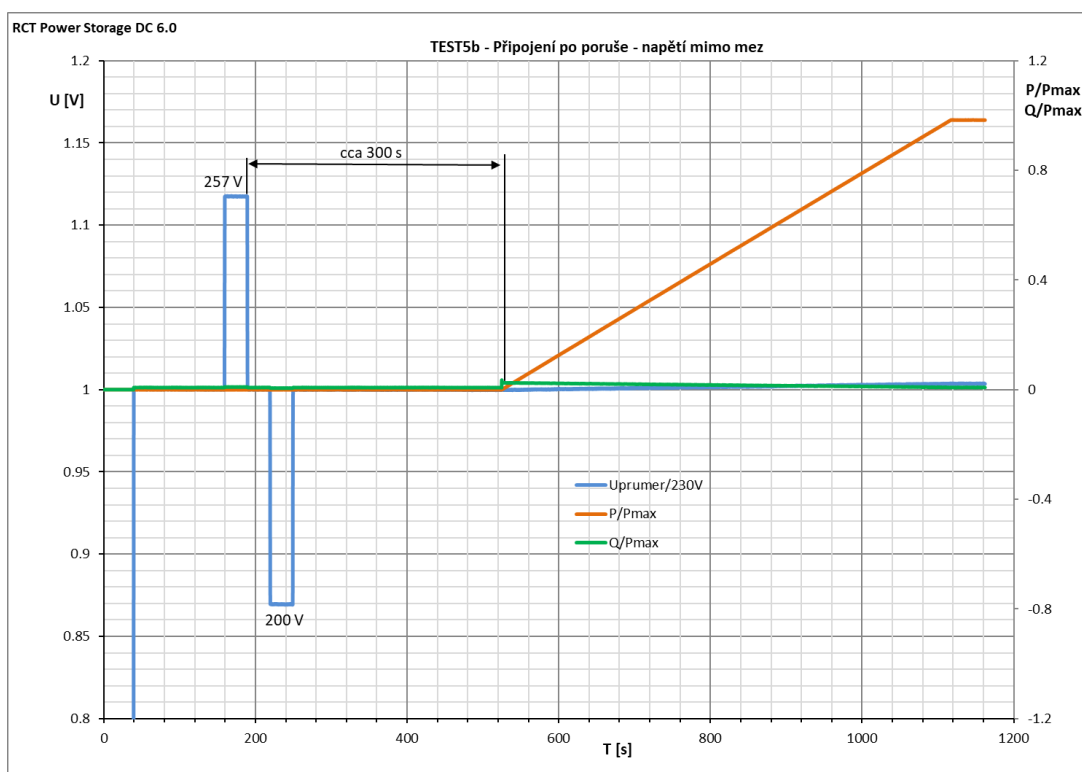
V rámci testování je také ověřováno automatické opětovné připojení k síti po výpadku nebo poruše (viz. kapitola 2.2.6). K opětovnému připojení může dojít, pokud jsou napětí a frekvence po dobu pěti minut v předepsaných mezích ( $U = 85 - 110 \% U_n$  a  $f = 47,50 - 50,05 \text{ Hz}$ ).

V první části testování (Obrázek 3.14) je ověřováno opětovné připojení, během kterého jsou simulovány výkyvy frekvence (51 Hz a 48 Hz). Z charakteristiky je patrné, že při prvním frekvenčním skoku, jenž byl mimo předepsanou mez, nastalo vyresetování 300sekundového odpočtu. Po uplynutí kontrolního času zahájil střídač dodávku dle předepsané rampy rychlostí  $10 \% P_n$  za minutu.

V druhé části testování (Obrázek 3.15) je rovněž ověřované připojení střídače, přičemž jsou simulovány skokové výkyvy napětí ( $U_{\text{MIN}} = 195,5 \text{ V}$ ;  $U_{\text{MAX}} = 253 \text{ V}$ ). Obdobně jako u předchozího testu je z charakteristiky patrné, že při prvním napětěovém skoku, který byl mimo předepsanou mez, nastalo vyresetování 300sekundového odpočtu. Po uplynutí tohoto kontrolního času střídač zahájil dodávku dle předepsané výkonové rampy rychlostí  $10 \% P_n$  za minutu.



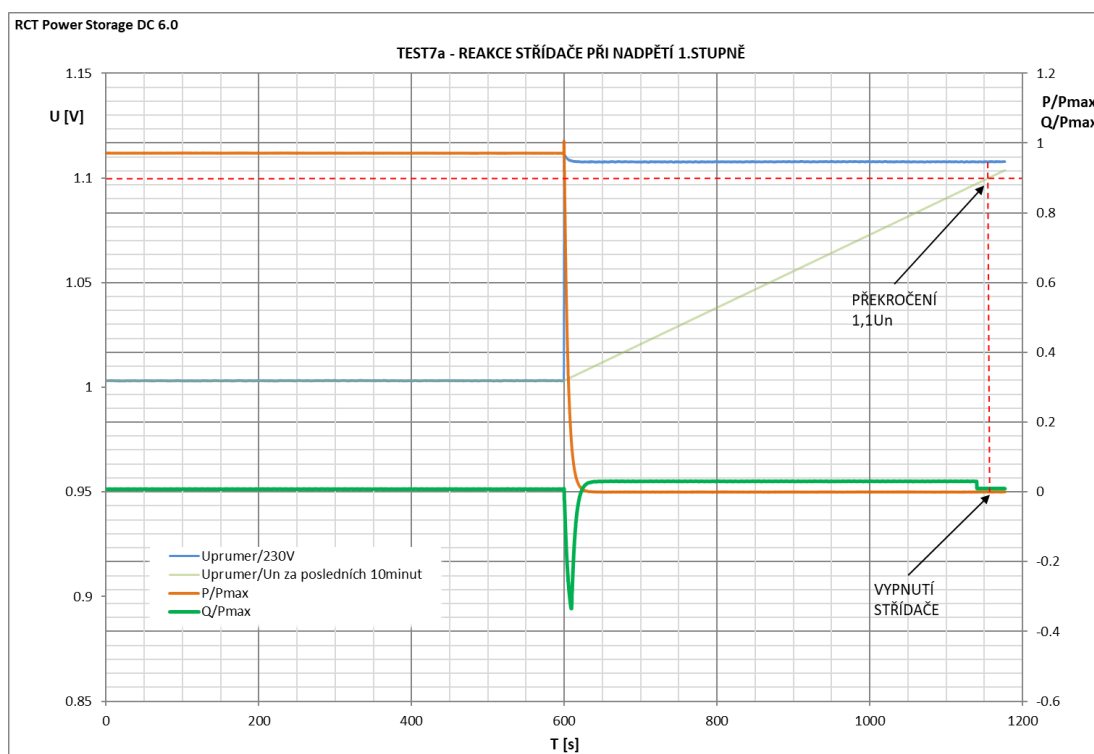
Obrázek 3.14 Test opětovného připojení po poruše (napětí mimo mez)



Obrázek 3.15 Test opětovného připojení po poruše (frekvence mimo mez)

### 3.4.6 Testování napěťových a frekvenčních ochran

V rámci testování je nutné ověřit nastavení vypínacích časů frekvenčních a napěťových ochran (viz. kapitola 2.2.1). Vypínací časy nastavených a změřených ochran, které jsou shrnuté v Tab. 3.3, odpovídají požadavkům PPDS. Vyhodnocení vypínacího času pro první stupeň nadpěťové ochrany je založeno na průměrné hodnotě napětí v desetiminutovém intervalu. Z grafu (Obrázek 3.16) lze pozorovat nekorektní odpojení střídače při překročení průměrné hodnoty napětí o 10 % jmenovitého napětí. Nepřesnost byla způsobena chybou měření střídače, jehož nepřesné měření v desetiminutovém intervalu způsobí odchylku 13,4 sekundy. Tento výsledek lze považovat za správný, jelikož u střídačů se tato odchylka pohybuje i v rozmezí minuty.



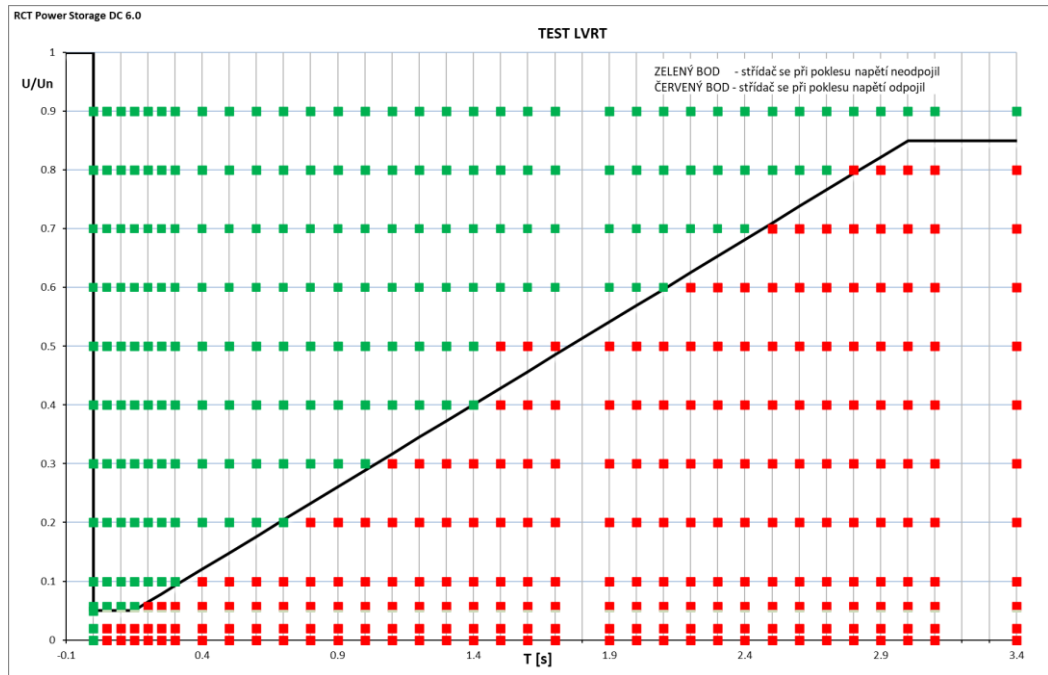
Obrázek 3.16 Test nadpětí 1. stupně

Tabulka 3.3 Nastavení ochran střídače

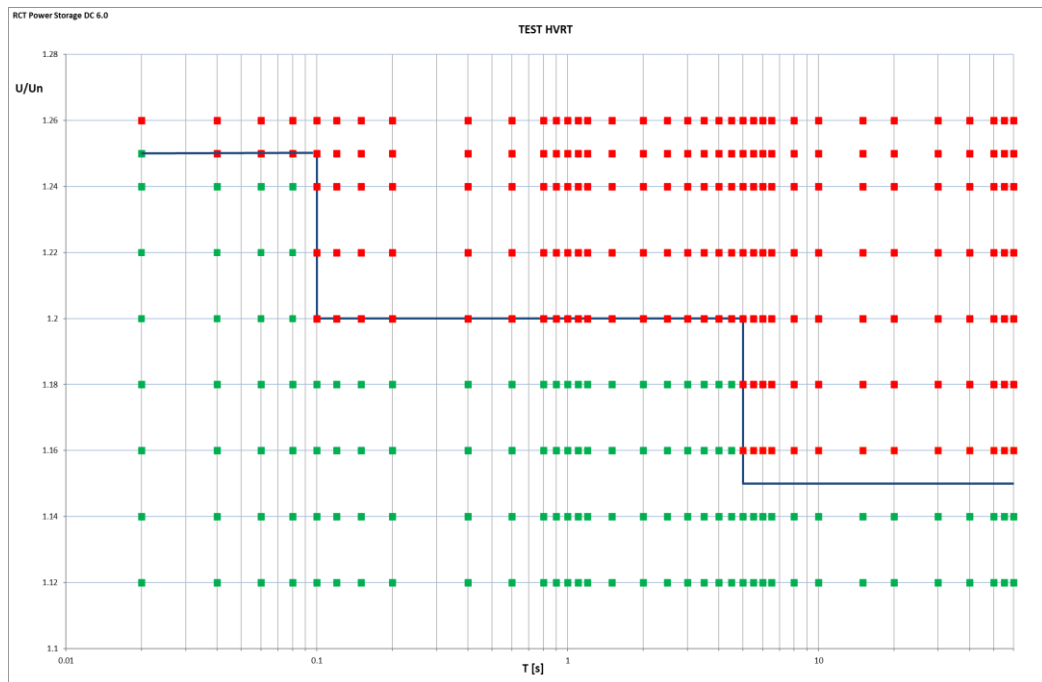
Parametr	Maximální vypínací čas [s]	Nastavení pro vypnutí	Změřené vypínací časy [s]
nadpětí 1. stupeň	3	230 V + 10 %	16,4
nadpětí 2. stupeň	1	230 V + 15 %	1,004
nadpětí 3. stupeň	0,1	230 V + 20 %	0,104
podpětí	1,5	230 V - 10 %	1,496
nadfrekvence	0,5	52 Hz	0,388
podfrekvence	0,5	47,5 Hz	0,385

### 3.4.7 Ověření FRT křivek

Připojované výroby musí zůstat připojené i v průběhu výkyvu síťového napětí v místě připojení. Hranice, při které může odejít k odpojení střídače od sítě, definují FRT křivky. Jedná se o velice časově náročné měření, kdy měření pro každou úroveň podpětí končí výpadkem. Na Obrázku 3.17 je patrné správné překlenutí poruchy při krátkodobých poklesech napětí, které definuje LVRT křivka. Nastavení překlenutí poruchy při krátkodobém nadpětí, které je zobrazené na Obrázku 3.18, je správné.



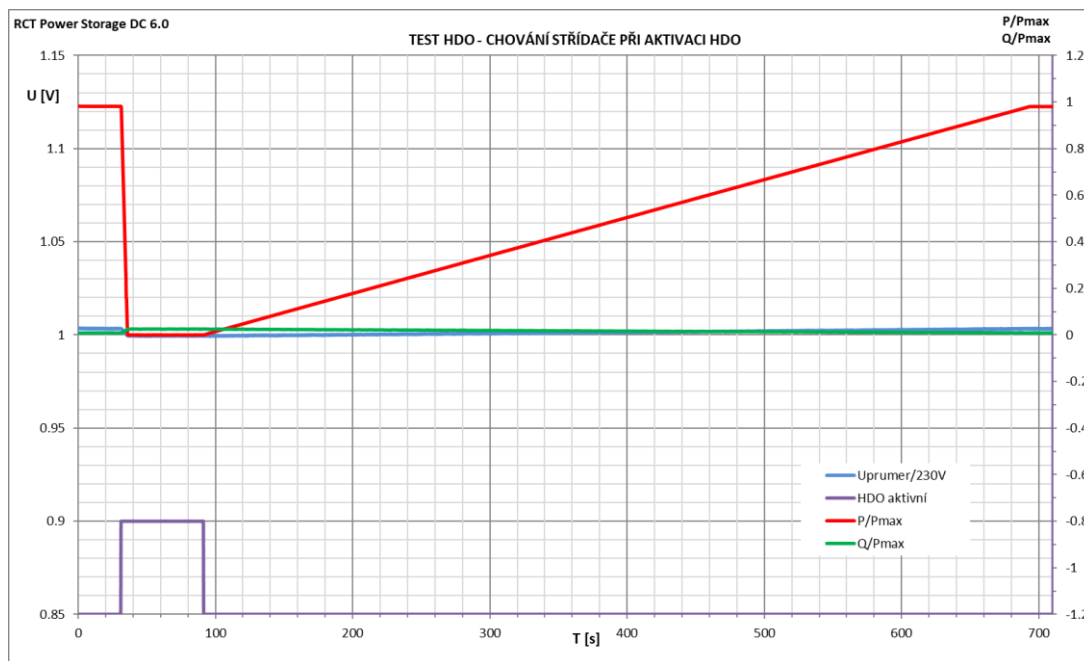
Obrázek 3.17 Test LVRT



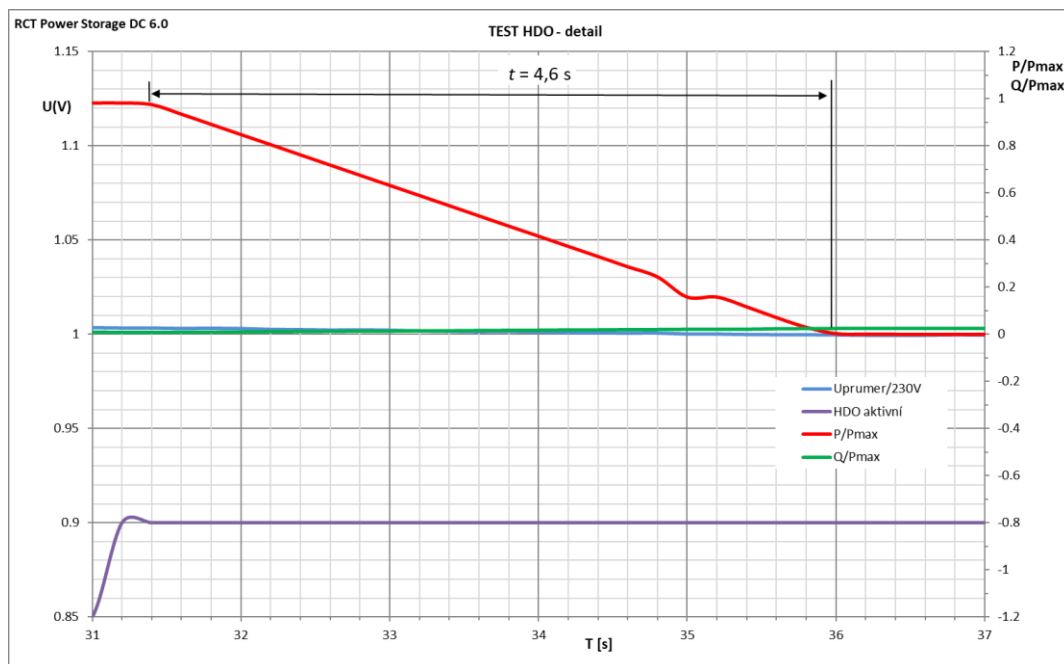
Obrázek 3.18 Test HVRT

### 3.4.8 Ověření chování střídače při aktivaci HDO

V rámci testování je také prováděno ověřování zatlumení činného výkonu. Z detailu grafu lze pozorovat korektní zatlumení činného výkonu 4,6 sekund od obdržení dálkového pokynu (Obrázek 3.20). Po ukončení dálkového pokynu zahájil střídač dodávku do sítě dle předepsané výkonové rampy rychlostí 10 %  $P_n$  za minutu (Obrázek 3.19).



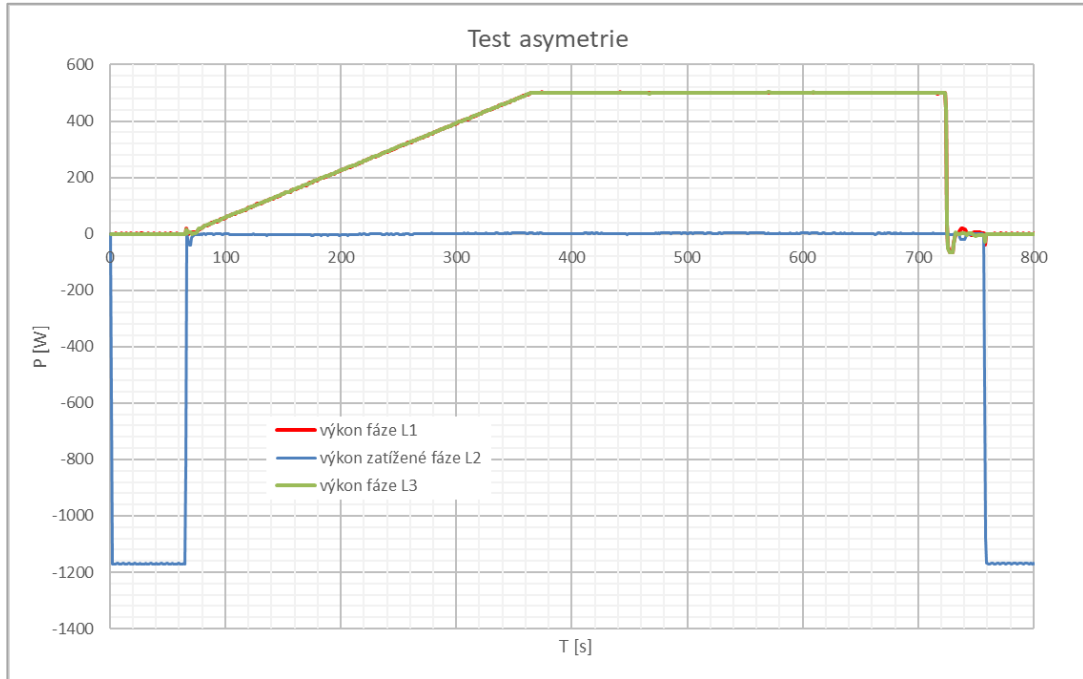
Obrázek 3.19 Test HDO



Obrázek 3.20 Test HDO – detail

### 3.4.9 Test asymetrie

Při testování asymetrické dodávky střídače byla fáze L2 zatížena odporovou zátěží s odběrem 1200 W. Z grafu (Obrázek 3.21) je patrné, že střídač dokáže asymetricky dodávat výkon do jednotlivých fází, přičemž nejprve podpoří fázi L2, která odebírá výkon ze sítě.



Obrázek 3.21 Test asymetrické dodávky

## 3.5 Shrnutí testování

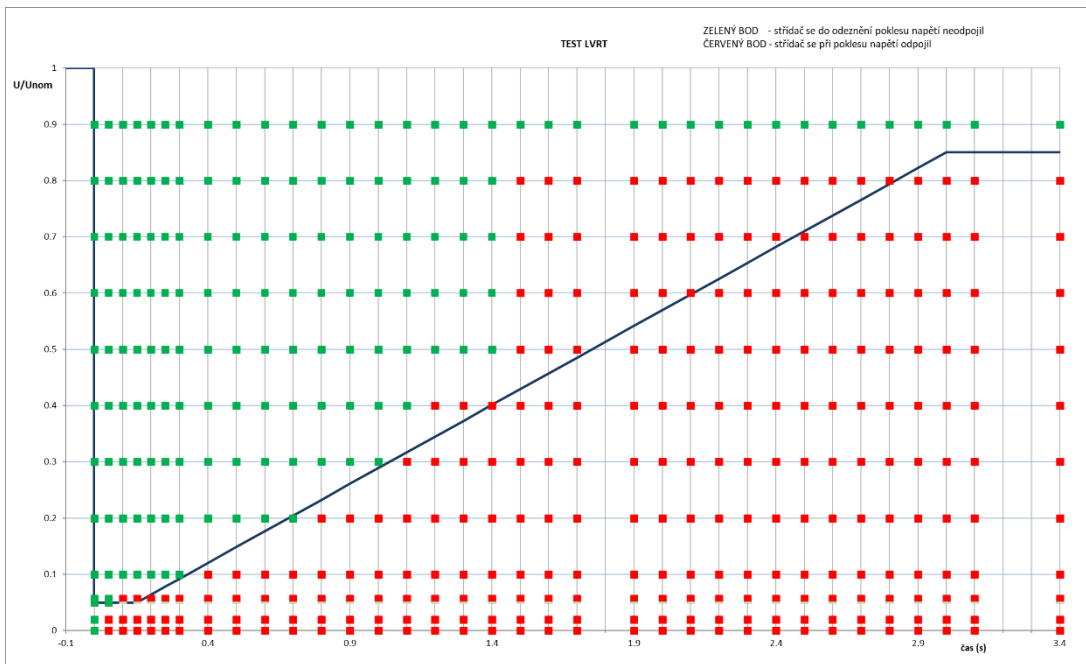
Shrnuté výsledky testování jsou zobrazené na Obrázku 3.22. V průběhu testování střídače RCT Power Tripower DC 6.0 bylo zjištěno několik chybně nastavených parametrů firmwaru.

V prvním případě se jednalo o špatně nastavený gradient poklesu činného výkonu při aktivaci dálkového pokynu HDO (zatlumení přetoku přes logický vstup). Z obrázku 3.24 je zřejmé, že k zatlumení došlo po 9,8 s. Provozovatelé distribučních soustav nařizují zatlumení činného výkonu do 5 s od obdržení pokynu. Po úpravě parametru firmwaru (Power descent gradient), střídač vyhověl požadavkům PPDS.

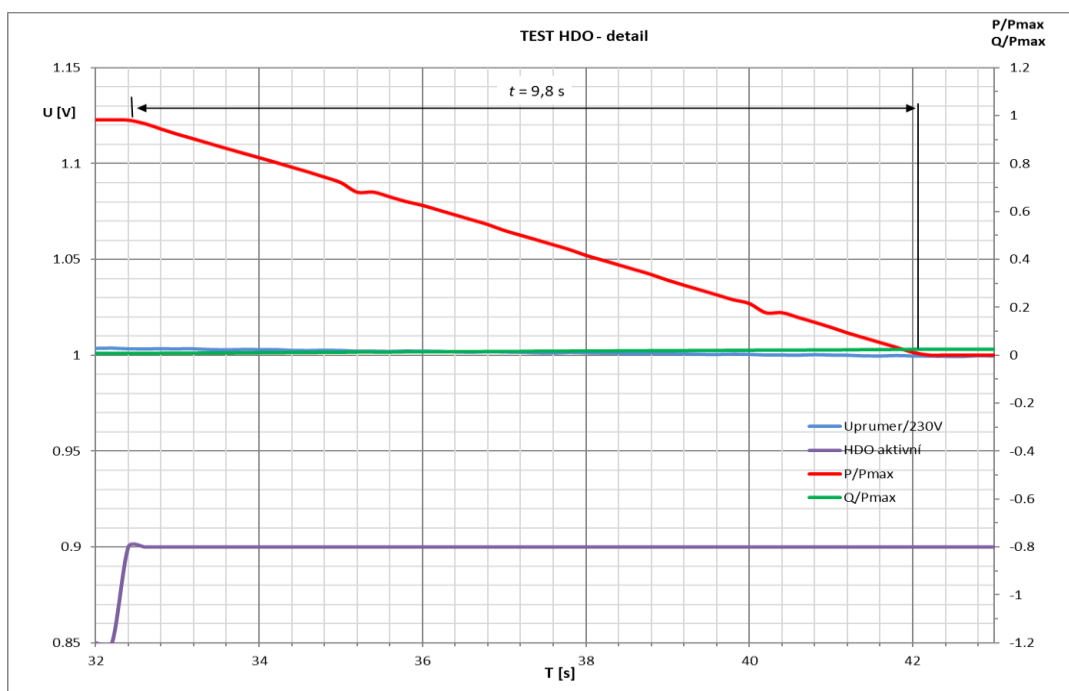
V druhém případě se jednalo o špatně nastavené parametry LVRT křivky, která definuje překlenutí poruchy při krátkodobém síťovém podpětí. Z Obrázku 3.23 lze usoudit chybně předčasné odpojení střídače. Například při síťovém podpětí  $0,8 U_n$  (184 V) došlo k odpojení střídače v čase 1,5 s, přičemž by měl zůstat připojen po dobu tří sekund.

Test:	Typ simulace:	Výsledky testování:		
1a	Linárně vzrůstající napětí na všech třech fázích	Průběh $P(U)$ regulace je správný.		
		Průběh $Q(U)$ regulace je správný.		
1b	Linárně vzrůstající napětí na jedné fázi, zbylé fáze konstantní	$P(U)$ regulace reaguje správně na maximální napětí na fázích.		
		$P(U)$ regulace reaguje na maximální napětí z fází, přičemž by měla reagovat na průměrné ze tří fází. Toto nastavení je však doporučující.		
2	Vynesení závislosti činného a jalového výkonu z předchozího měření	Pracovní oblast střídače se nachází správně v tolerančním pásmu výrobního modulu A1.		
3	Linárně vzrůstající frekvenční rampa	Průběh $P(f)$ regulace je správný. Správně nastavena statika (5 %), mezní frekvence počátečního zlomu (50,2 Hz) a mezní frekvence (51,5 Hz) pro úplné zatlumení činného výkonu.		
4	Skokové změny frekvence	$P(f)$ regulace je v pořádku.		
	Skokové změny napětí	$P(U)$ a $Q(U)$ regulace je v pořádku, reguluje po exponenciále s časovou konstantou $t = 5$ s.		
5	Skokové změny frekvence (1. mimo limit, 2. v limitu)	Střídač správně zahájil 300 sekundový odpočet po odeznění mimolimitní nadfrekvence (51 Hz). Poté korektně zahájil dodávku do sítě dle předepsané rampy rychlostí 10 %/ $P_n$ .		
	Skokové změny napětí (1. mimo limit, 2. v limitu)	Střídač správně zahájil 300 sekundový odpočet po odeznění mimolimitního nadpětí (257 V). Poté korektně zahájil dodávku do sítě dle předepsané rampy rychlostí 10 %/ $P_n$ .		
6	V průběhu všech testování je střídači umožněn odběr vyšší ( $P_{DC} = 9$ kW) než jmenovitý příkon ( $P_n = 6$ kW). Střídač správně odebírá ze SS zdroje pouze jmenovitý příkon.			
Ochrany	Parametr	Maximální vypínací čas [s]	Nastavení pro vypnutí	Změřené vypínací časy [s]
	230 V + 10 %	3	230 V + 10 %	16,4
	230 V + 15 %	1	230 V + 15 %	1,004
	230 V + 20 %	0,1	230 V + 20 %	0,104
	230 V - 10 %	1,5	230 V - 10 %	1,496
	52 Hz	0,5	52 Hz	0,388
47,5 Hz	0,5	47,5 Hz	0,385	
LVRT	krátkodobé podpětí	LVRT křivka po úpravě firmwaru fungovala správně.		
HVRT	krátkodobé nadpětí	HVRT křivka fungovala správně.		
HDO	Aktivace HDO	Střídač po úpravě firmwaru správně přerušil dodávku do 5 s. Po odeznění HDO signálu po 30 s začal správně zahájil dodávku dle předepsané rampy rychlostí 10 %/ $P_n$ .		
Asymetrie	Zatížení 1200 W odběrem fází L2	Střídač umožňuje asymetrickou dodávku.		

Obrázek 3.22 Shrnutí dosažených výsledků testování



Obrázek 3.23 Test LVRT – před úpravou firmwarů



Obrázek 3.24 Test HDO – detail před úpravou firmwarů

## Závěr

Cílem této práce bylo shrnout požadavky provozovatelů distribučních soustav, na které je zapotřebí brát zřetel při připojování fotovoltaických elektráren k elektrizační soustavě. Pro zachování bezpečného a spolehlivého stavu a navýšení připojitelného výkonu fotovoltaických výroben je nutné, aby střídače byly správně nastaveny dle všech platných požadavků.

V úvodu práce proběhlo seznámení s všeobecnou problematikou FV systémů pro lepší pochopení dané problematiky. Následně došlo ke zhodnocení legislativních požadavků pro připojení fotovoltaických střídačů k distribuční síti.

Na základě měření proběhlo testování funkčnosti střídače RCT Power Storage DC 6.0., přičemž výsledky neodpovídaly daným předpokladům, jelikož při testování LVRT docházelo k předčasnému odpojení. Dále při testování HDO docházelo ke zpožděnému zatlumení činného výkonu. Výše zmíněné nedostatky byly vyřešeny úpravou parametrů firmwaru střídače.

V rámci testování byly ověřovány autonomní regulační charakteristiky střídače  $P(U)$ ,  $Q(U)$  a  $P(f)$ , které mají za úkol měnit jalový, případně činný výkon, v závislosti na napětí, respektive frekvenci, s cílem stabilizovat napětí v místě připojení. Při vyhodnocení bylo zjištěno, že regulace  $P(U)$  reaguje správně na maximální napětí ze třech fází. Regulace  $Q(U)$  reaguje rovněž na maximální napětí ze třech fází, přičemž provozovatelé DS doporučují nastavení reakce na průměrnou hodnotu ze tří fází. Jelikož se jedná pouze o doporučení, nelze tuto skutečnost považovat za chybnou. Na základě porovnání změřené  $P(f)$  regulační funkce s předepsanou funkcí lze konstatovat správné nastavení statiky a mezní frekvence. V rámci testování dynamického chování střídače bylo zjištěno, že regulace probíhá po exponenciálně s časovou konstantou  $\tau = 5$  s.

Vyhodnocení vypínacích časů ochrany střídače lze považovat za správné, přestože při vyhodnocení nadpětíové ochrany 1. stupně došlo k vybavení s nepřesností 13,4 s, což bylo zapříčiněno chybou měření střídače, která v desetiminutovém měřicím intervalu značně naroste. V praxi je u střídačů tato míra nepřesnosti běžná a je tolerována v minutovém intervalu.

Automatické přifázování střídače k distribuční síti po restartu, respektive poruše, probíhalo korektně. Nejprve probíhala kontrola kritérií po dobu 5 minut, poté došlo k přifázování s gradientem 10 %  $P_n$  za minutu. U střídače rovněž nedocházelo k dodávce výkonu vyššího než  $P_n$ , i při nastavení hodnoty  $P_{DC}$  vyšší než  $P_n$ .

Během testování bylo odhaleno několik nesprávně implementovaných nastavení střídače. Tyto chyby však nebyly fatální a bylo možné je odstranit úpravou parametrů firmwaru. Takto upravený firmware splňuje všechny platné předpisy a je tedy možné jej využít u všech střídačů RCT Power Storage DC 6.0.. Výhrady k úpravě firmwaru byly komunikovány s výrobcem. Takto upravený firmware je nyní u střídačů tohoto typu v praxi využíván.

## LITERATURA

- [1] Czech RE Agency: Fotovoltaika pro každého. [online]. 2009 [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/>
- [2] Slunce. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Slunce#J%C3%A1dro>
- [3] Khan Academy. Fotoelektrický jev [online]. © 2022 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://cs.khanacademy.org/science/obecna-chemie/xfed2aace53b0e2de:atomy-a-jejich-vlastnosti/xfed2aace53b0e2de:fotoelektronova-spektroskopie/a/photoelectric-effect>
- [4] Nejpoužívanější pojmy ve fotovoltaike [online]. 2014 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11772-nejpouzivanejsi-pojmy-ve-fotovoltaike>
- [5] Solární (fotovoltaičné) články [online]. [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>
- [6] VANĚK, J., KŘIVÍK, P.. Obnovitelné zdroje energie [online]. Brno, 2014 [cit. 2021-10-24]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=96366](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=96366)
- [7] Encyklopedie fyziky: Fyzikální podstata přechodu PN [online]. 2006 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/265-fyzikalni-podstata-prechodu-pn>
- [8] SVOZIL, Bc. MAREK. RACIONALIZACE KONCEPTU PŘIPOJENÍ FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY. BRNO, 2015. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Doc. Ing. PETR BLAHA, Ph.D.
- [9] Energy czech s.r.o.: Hybridní fotovoltaičné elektrárny [online]. © 2022 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://www.envienergyczech.cz/druhy-systemu/hybridni-systemy>
- [10] Společnost: Czech RE Agency, o.p.s. Fotovoltaičný střídač - účinnost není vše [online]. 20.4.2009 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5571-fotovoltaicky-stridac-ucinnost-neni-vse>
- [11] Genius FVE s.r.o. Jak vybrat nejlepší baterii pro fotovoltaiku [online]. © 2022 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://geniusfve.cz/2022/01/17/jak-vybrat-baterii-pro-fotovoltaiku/>
- [12] Fotovoltaičné elektrárny. Stavebnictvi3000.cz [online]. 12. 7. 2018 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/fotovoltaicke-elektrarny>
- [13] SOLARTEC: Schéma systému připojeného na elektrickou síť [online]. 2016 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://www.solartec.eu/rodinne-domy-a-strechy/fotovoltaika/schema-moznych-pripojeni>

- [14] Pravidla provozu distribučních soustav Příloha 4 Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítě provozovatele distribuční soustavy. E distribuce [online]. 2021 [cit. 2021-10-29]. Dostupné z: [https://www.cezdistribuce.cz/webpublic/file/edee/distribuce/ppds/ppds-2021\\_priloha-4.pdf](https://www.cezdistribuce.cz/webpublic/file/edee/distribuce/ppds/ppds-2021_priloha-4.pdf)
- [15] Vyhláška ERU 51/2006 Sb o podmínkách připojení k elektrizační soustavě [online]. 1. 2016 [cit. 2021-10-30]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/pripojovaci-sitove-kodexy>
- [16] Vyhláška č. 16/2016 Sb. [online]. Energetický regulační úřad, 2016 [cit. 2021-11-02]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-16#Top>
- [17] Zákon č. 458/2000 Sb. [online]. Parlament ČR, 2000 [cit. 2021-11-02]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-458#f2114341>
- [18] ČSN EN 50160. 3rd ed. Česká agentura pro standardizaci, 2020.
- [19] Datasheet střídače RCT Power Storage DC [online]. © 05/2018 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: [https://cz.krannich-solar.com/fileadmin/content/pdf/czech/Data\\_Sheet\\_RCT\\_Power\\_Storage\\_DC.pdf](https://cz.krannich-solar.com/fileadmin/content/pdf/czech/Data_Sheet_RCT_Power_Storage_DC.pdf)
- [20] Datasheet SS zdroje KEYSIGHT [online]. © 2022 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-04041/data-sheets/5991-2818.pdf>
- [21] Datasheet simulátoru sítě CINERGIA [online]. 2020 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.cinergia.coop/wp-content/uploads/2019/12/GE-vAC-v7-ePLUS-Low-3.pdf>
- [22] Datasheet analyzátoru sítě DEWETRON [online]. © 2013 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <http://www.dewetron.cz/produkty/merici-systemy-dewetron/>

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

EU	Evropská unie
DS	Distribuční soustava
nn	Nízké napětí
vn	Vysoké napětí
vvn	Velmi vysoké napětí
zvn	Zvláště vysoké napětí
PPDS	Pravidla provozování distribučních soustav
PDS	Provozovatel distribuční soustavy
PNE	Podniková norma energetiky
EN	Evropská norma
ČSN	Česká státní norma
RfG	NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2016/631
VM	Výrobní modul
1f	1-fázový
3f	3-fázový
AC	Alternating current – střídavý proud
DC	Direct current – stejnosměrný proud
FV	Fotovoltaický
MPPT	Maximum power point tracker - hledání maximálního výkonového bodu
FRT	Fault ride through - překlenutí poklesu napětí
LVRT	Low voltage ride through – krátkodobé podpětí
HVRT	High voltage ride through – krátkodobé nadpětí
HDO	Hromadné dálkové ovládání

Symboly:

$f$	frekvence	(Hz)
$T$	perioda	(s)
$t$	čas	(s)
$\tau$	časová konstanta	(s)
$U$	napětí	(V)
$I$	proud	(A)
$P$	3-fázový činný výkon	(W)
$P_1, P_2, P_3$	1-fázový činný výkon	(W)
$P_{DC}$	výkon dodávaný SS zdrojem	(W)
$P_n$	jmenovitý výkon	(W)
$Q$	3-fázový jalový výkon	(VAr)
$Q_1, Q_2, Q_3$	1-fázový jalový výkon	(VAr)
$S$	3-fázový zdánlivý výkon	(VA)
$S_1, S_2, S_3$	1-fázový zdánlivý výkon	(VA)
$\cos \varphi$	účinník	(-)

# **SEZNAM PŘÍLOH**

<b>PŘÍLOHA A - FIRMWARE STRÍDAČE RCT POWER STORAGE DC 6.0.....</b>	<b>47</b>
--	-----------

# Příloha A - Firmware střídače RCT Power Storage DC 6.0

External power reduction based on solar plant peak power [0..1]: 1,000

Max. allowed grid feed-in power [W]: 6000

Device name: PS 6.0 JGX7

Serial number: 0065A4635917

IP Address: 0.0.0.0

Norm: CZECH\_2021\_V1\_0

Solar plant peak power [Wp]: 6000

Control software version: 2.3.5369

Last update date: 08.06.2021 10:23:25

battery\_placeholder[0].soc\_update\_since: 10000,000000

power\_mng.n\_batteries: 2

Control software factory version: 2.3.5291

Production date: 08.06.2021 10:15:20

PIC software version: 210112

Actual date/time: 07.04.2022 10:30:13

Bit coded functions: 527

PIC bootloader software version: 150224

\*\*\*\*\*

\* Control

\* Settings

\* Interfaces

\* External active power reduction

\*\*\*\*\*

Delay for new K4..K1 data [s] = 1,0

Power descent gradient [P/Pn/s] = 0,220000 (norm 0.1)

Power rise gradient [P/Pn/s] = 0,001660

\*\*\*\*\*

\* Control

\* Settings

\* Interfaces

\* External active power reduction

\* K4..K1: active power reducing table

\*\*\*\*\*

K4..K1: 0000 = 1,00

K4..K1: 0001 = 1,00

K4..K1: 0010 = 0,60

K4..K1: 0011 = 1,00

K4..K1: 0100 = 0,30

K4..K1: 0101 = 1,00

K4..K1: 0110 = 1,00

K4..K1: 0111 = 1,00

K4..K1: 1000 = 0,00

K4..K1: 1001 = 1,00

```

K4..K1: 1010 = 1,00
K4..K1: 1011 = 1,00
K4..K1: 1100 = 1,00
K4..K1: 1101 = 1,00
K4..K1: 1110 = 1,00
K4..K1: 1111 = 1,00
*****
* Control
* Settings
* Interfaces
* RS485
*****
RS485 working mode = Modbus master (default 0)
*****
* Control
* Settings
* Normative Parameters
* AC levels
*****
Max. frequency level 1 [Hz] = 51,50
Max. frequency switch-off time level 1 [s] = 0,47
Min. frequency level 1 [Hz] = 47,50
Min. frequency switch-off time level 1 [s] = 0,47
Max. voltage level 1 [V] = 264
Max. voltage switch-off time level 1 [s] = 0.97
Min. voltage level 1 [V] = 196
Min. voltage switch-off time level 1 [s] = 1.47
Max. frequency level 2 [Hz] = 51,50
Max. frequency switch-off time level 2 [s] = 0,47
Min. frequency level 2 [Hz] = 47,50
Min. frequency switch-off time level 2 [s] = 0,47
Max. voltage level 2 [V] = 276
Max. voltage switch-off time level 2 [s] = 0,07
Min. voltage level 2 [V] = 196
Min. voltage switch-off time level 2 [s] = 1.47
*****
* Control
* Settings
* Normative Parameters
* AC levels
* Averaging
*****
Max. voltage [V] = 253
Timeframe = 600
*****
* Control
* Settings
* Normative Parameters

```

```

* Switch on conditions
*****
Max. frequency = 50,05
Min. frequency = 47,50
Max. voltage = 252
Min. voltage = 196
Test time = 300,0
Switching on time after any grid fault [s] = 0,0
Max additional random switching on time after any grid fault [s] = 0,000000
*****
* Control
* Settings
* Normative Parameters
* NSM
*****
Min line voltage [V] = 150,000000
Max line voltage [V] = 458,100006
Switch off time line voltage [s] = 0,200000
Active power mode = P(f)
Reactive power mode = Q(U)
Startup gradient [P/(Pn*s)] = 0,001667
Startup gradient after fault [P/(Pn*s)] = 0,001667
Reactive Power Mode lock-in power [P/Pn] = 0,180
Reactive Power Mode lock-out power [P/Pn] = 0,150
Minimum allowed cos(phi) [0..1] = 0,400000
Cos phi constant value (positive = overexcited) = 1,00
Constant reactive power [var] (positive = overexcited) = 0
*****
* Control
* Settings
* Normative Parameters
* NSM
* Cos phi(P)
*****
Cos phi(P) is not active
Cos phi(P) lock in Voltage [V] = 0
Cos phi(P) lock out voltage [V] = 0
*****
* Control
* Settings
* Normative Parameters
* NSM
* Cos phi(P)
* Cos phi(P) curve
*****
Point 1 [P/Pn] = 0,00
Point 1 [cos(phi)] (positive = overexcited) = 1,00
Point 2 [P/Pn] = 0,20

```

Point 2 [cos( $\varphi$ )] (positive = overexcited) = 1,00  
Point 3 [P/Pn] = 0,50  
Point 3 [cos( $\varphi$ )] (positive = overexcited) = 1,00  
Point 4 [P/Pn] = 1,00  
Point 4 [cos( $\varphi$ )] (positive = overexcited) = -0,90  
\*\*\*\*\*

\* Control  
\* Settings  
\* Normative Parameters  
\* NSM  
\* P(f)  
\*\*\*\*\*

P(f) is active  
Entry frequency for P(f) over-frequency mode [Hz] = 50,20  
Exit frequency for P(f) over-frequency mode [Hz] = 50,05  
Delay time after P(f) [s] = 300,000  
Power decrease gradient for P(f) mode [P/(Pn\*s)] = 0,400000  
Hysteresis mode = 1  
Power increase gradient after P(f) restriction [P/(Pn\*s)] = 0,001660  
Entry frequency for P(f) under-frequency mode [Hz] = 0,00  
Exit frequency for P(f) under-frequency mode [Hz] = 0,00  
Power rise gradient for P(f) under-frequency mode without battery [1/Pn\*Hz] = 0,400000  
Power rise gradient for P(f) under-frequency mode with battery [1/Pn\*Hz] = 1,000000  
By over-frequency in P(f) use Pmax instead of Pmom (instant P). = 0  
\*\*\*\*\*

\* Control  
\* Settings  
\* Normative Parameters  
\* NSM  
\* Q(U)  
\*\*\*\*\*

Q(U) is active  
Voltage selection = Maximum  
Curve with hysteresis = 0  
Qmax at upper voltage level [var] (positive = overexcited) = -2747 (norm -2747.0)  
Qmax at upper voltage level relative to Smax (positive = overexcited) = -0,4360  
Qmax at lower voltage level [var] (positive = overexcited) = 2747 (norm 2747.0)  
Qmax at lower voltage level relative to Smax (positive = overexcited) = 0,4360  
Low voltage min. point [V] = 216  
Low voltage max. point [V] = 223  
High voltage min. point [V] = 241  
High voltage max. point [V] = 248  
Time const for filter [s] = 5,000000  
\*\*\*\*\*

\* Control  
\* Settings  
\* Normative Parameters  
\* NSM

```

* P(U)
*****
P(U) active = 1
P(U) mode 0: Pn 1: Pload = 0
Time const for filter [s] = 5,000000
*****
* Control
* Settings
* Normative Parameters
* NSM
* P(U)
* P(U) table
*****
Point 1 P/Pn = 1,000000
Point 1 voltage [V] = 251,000000
Point 2 P/Pn = 0,500000
Point 2 voltage [V] = 253,000000
Point 3 P/Pn = 0,000000
Point 3 voltage [V] = 255,000000
Point 4 P/Pn = 0,000000
Point 4 voltage [V] = 300,000000
*****
* Control
* Settings
* Normative Parameters
* NSM
* FRT
*****
Enable FRT = 0 (norm 1)
FRT begin overvoltage threshold [V] = 264,500000
FRT begin undervoltage threshold [V] = 184,000000
FRT end overvoltage threshold [V] = 253,000000
FRT end undervoltage threshold [V] = 195,500000
*****
* Control
* Settings
* Normative Parameters
* NSM
* FRT
* FRT overvoltage curve
*****
Point 1 time [s] = 0,000000
Point 1 voltage [V] = 287,500000
Point 2 time [s] = 0,100000
Point 2 voltage [V] = 276,000000
Point 3 time [s] = 5,000000
Point 3 voltage [V] = 264,500000

```

```

*****
* Control
* Settings
* Normative Parameters
* NSM
* FRT
* FRT undervoltage curve
*****
Point 1 time [s] = 0,000000
Point 1 voltage [V] = 11, 500000 (norm. 34,5)
Point 2 time [s] = 0,150000
Point 2 voltage [V] = 11, 500000 (norm. 34,5)
Point 3 time [s] = 3,000000
Point 3 voltage [V] = 195,500000
*****
* Control
* Settings
* Normative Parameters
* RCD parameters
*****
RCD 30 mA threshold [A] = 0,030
RCD 30 mA switching off time [s] = 0,290
RCD 60 mA threshold [A] = 0,060
RCD 60 mA switching off time [s] = 0,150
RCD 150 mA threshold [A] = 0,150
RCD 150 mA switching off time [s] = 0,030
RCD 300 mA threshold [A] = 0,300
RCD 300 mA switching off time [s] = 0,030
*****
* Control
* Settings
* Normative Parameters
* DC-component
*****
Max. DC-component of Iac [A] = 0,900
Max. slow DC-component of Iac [A] = 0,047
Time for slow DC-component of Iac [s] = 1,00
*****
* Control
* Settings
* Normative Parameters
* Island Detection
*****
Enable active island detection = 0
*****
* Control
* Settings
* Device settings

```

```
*****
Solar plant peak power [Wp] = 6000 (default 6100.0)
Allow asymmetrical feed = 1
*****
* Control
* Settings
* Device settings
* Advanced settings
*****
Minimum allowed insulation resistance [Ohm] = 400000

done
```