



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

BEZPEČNOST OSTROVNÍHO PROVOZU U HYBRIDNÍCH SYSTÉMŮ

SAFETY OF OFF-GRID HYBRID ENERGY SYSTEM OPERATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Štěpán Orság

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Morávek, Ph.D.

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Štěpán Orság

ID: 203312

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Bezpečnost ostrovního provozu u hybridních systémů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Analýza problematiky ostrovního provozu hybridních systému z hlediska bezpečnosti a koordinace ochranných funkcí a ochranných opatření
2. Analýza současných legislativních požadavků
3. Návrh testovací procedury pro ověření souladu, měření na vybraných vzorcích hybridních střídačů
4. Vyhodnocení a doporučení případných dalších ochranných opatření/postupů pro integraci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 24.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Jan Morávek, Ph.D.

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

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Diplomová práce se zabývá bezpečností hybridních systémů v ostrovním provozu. Jsou zde probrány požadavky na bezpečnost elektrické instalace s fotovoltaickým systémem a ochranu před úrazem elektrickým proudem. Hybridní bateriové systémy mají v ostrovním provozu nižší zkratový výkon, oproti paralelnímu provozu s distribuční sítí, a proto se práce zaměřuje na specifika ostrovního provozu a použití ochran, které jsou součástí fotovoltaického střídače nebo elektrické instalace. Práce obsahuje návrh testovacích procedur a měření na vybraných střídačích s následným vyhodnocením a doporučením dalších ochranných opatření.

Klíčová slova

Hybridní bateriový systém, střídač, přepínač sítí, ostrovní provoz, bezpečnost, nadproudová ochrana, přetížení, zkrat.

Abstract

The thesis deals with the safety of hybrid systems in island operation. The safety requirements for electrical installation with photovoltaic system and protection against electric shock are discussed. Hybrid battery systems have a lower short-circuit performance in islanded operation, compared to parallel operation with the distribution grid, so the thesis focuses on the specifics of islanded operation and the use of protections that are part of the PV inverter or electrical installation. The work includes the design of test procedures and measurements on selected inverters with subsequent evaluation and recommendation of further protection measures.

Keywords

Hybrid battery system, inverter, transfer switch, islanded operation, safety, overcurrent protection, overload, short circuit.

Bibliografická citace

ORSÁG, Štěpán. *Bezpečnost ostrovního provozu u hybridních systémů* [online]. Brno, 2022. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142415>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jan Morávek.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Štěpán Orság</i>
VUT ID studenta:	<i>203312</i>
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	<i>2021/22</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Bezpečnost ostrovního provozu u hybridních systémů</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: 24. května 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Morávkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Také bych rád poděkoval své rodině a blízkým za podporu během celé doby mého studia.

V Brně dne: 24. května 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	10
1. ÚVOD.....	11
2. STŘÍDAČE	12
2.1 TYPY ŘÍZENÍ.....	14
2.1.1 Grid-following	14
2.1.2 Grid-forming	14
2.2 ZPŮSOBY PROVOZU	15
2.2.1 Přímé spojení se sítí, On-Grid	16
2.2.2 Ostrovní systémy, Off-Grid	16
2.2.3 Hybridní systémy	17
2.3 ZPŮSOBY ZAPOJENÍ HYBRIDNÍCH SYSTÉMŮ	17
2.3.1 Třífázový systém.....	18
2.3.2 Jednofázový systém	20
2.4 BEZPEČNOSTNÍ NORMY A PŘEDPISY	21
2.4.1 Požadavky na bezpečnost výrobku a elektrické instalace	22
2.4.2 Požadavky na kvalitu elektrické energie.....	22
3. OCHRANA PŘED ÚRAZEM ELEKTRICKÝM PROUDEM.....	24
3.1 PROSTŘEDKY ZÁKLADNÍ OCHRANY	25
3.2 PROSTŘEDKY OCHRANY PŘI PORUŠE	27
3.3 PROSTŘEDKY ZVÝŠENÉ OCHRANY	29
3.4 PROSTŘEDKY DOPLŇKOVÉ OCHRANY	29
3.5 BEZPEČNOST VÝKONOVÝCH MĚNIČŮ	30
3.5.1 Ochrana pomocí rozhodujícího napětí	30
3.5.2 Ochrana pomocí ochranné impedance	31
3.5.3 Ochrana pomocí omezeného napětí	31
4. OCHRANNÉ FUNKCE A PŘÍSTROJE.....	32
4.1 PROBLÉMY S OCHRANOU BATERIOVÝCH SYSTÉMŮ	33
4.1.1 Zpoždění jisticího přístroje	33
4.1.2 Chybná reakce jisticího přístroje.....	33
4.1.3 Přechod do ostrovního provozu	34
4.2 DETEKCE OSTROVNÍHO PROVOZU.....	35
4.2.1 Aktivní metody	35
4.2.2 Pasivní metody.....	35
4.3 DETEKCE A OMEZENÍ ZKRATOVÉHO PROUDU	36
4.3.1 Paralelní provoz hybridního střídače se sítí	36
4.3.2 Ostrovní provoz hybridního střídače.....	37
4.4 DETEKCE REZISTENCE IZOLACE POLE	40
4.4.1 Detekce rezistence izolace pole u střídačů pro neuzemněná pole	41
4.4.2 Detekce rezistence izolace pole u střídačů pro funkčně neuzemněná pole	41
4.5 MONITOROVÁNÍ REZIDUÁLNÍHO PROUDU.....	41
4.6 JISTICÍ PŘÍSTROJE	43

4.6.1	Jistič	43
4.6.2	Pojistka.....	45
4.7	PROUDOVÝ CHRÁNIČ.....	46
4.8	PŘEPĚŤOVÁ OCHRANA.....	48
5.	TESTOVÁNÍ	51
5.1	ZKOUŠKA PŘETÍŽENÍ A ZKRAT.....	51
5.1.1	Popis zapojení	51
5.1.2	Výsledky měření	52
5.1.3	Vyhodnocení měření	55
5.2	ZKOUŠKA FUNKCE ANTI-ISLAND.....	56
5.2.1	Zkušební zařízení	56
5.2.2	Postup zkoušky	57
5.2.3	Popis zapojení	59
5.2.4	Simulace.....	61
5.2.5	Výsledky měření	62
5.2.6	Vyhodnocení měření	63
5.3	MĚŘENÍ NA PŘEPÍNAČI SÍTÍ.....	64
5.3.1	Výsledky měření	64
5.3.2	Simulace.....	66
5.3.3	Vyhodnocení měření	67
6.	ZÁVĚR.....	67
7.	POUŽITÁ LITERATURA	70
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	73
	SEZNAM PŘÍLOH.....	75

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Blokové zapojení střídačů	12
2.2	Izolované střídače	13
2.3	Neizolované střídače	13
2.4	Funkční diagram grid-following a grid-forming střídačů [3]	14
2.5	Schématické zapojení On-Grid přímý výkup [6]	16
2.6	Schématické zapojení On-grid zelený bonus [6]	16
2.7	Schématické zapojení Off-grid [6]	17
2.8	Třífázový hybridní systém v síti TN-C-S	19
2.9	Třífázový hybridní systém v síti TN-C	20
2.10	Jednofázový hybridní systém v síti TN-S	21
3.1	Celková impedance těla Z_T v závislosti na dotykovém napětí U_T [10]	25
3.2	Přehled opatření před úrazem elektrickým proudem [13]	30
4.1	Upozornění na provedení fotovoltaické instalace na budově [16]	32
4.2	Zpoždění ochrany v důsledku snížení poruchového proudu ze sítě [14]	33
4.3	Chybná reakce ochrany v důsledku proudu ze zdravého obvodu do místa poruchy [14]	34
4.4	Ostrovní provoz v důsledku výpadku napájení ze sítě [14]	34
4.5	Porucha spotřebiče v systému s hybridním střídačem připojeným k síti	37
4.6	Porucha jedné fáze vůči neživé části zálohovaného spotřebiče v instalaci s hybridním střídačem v ostrovním provozu	38
4.7	Dvoufázová porucha spotřebiče v instalaci s hybridním střídačem v ostrovním provozu	39
4.8	Porucha v části instalace s hybridním střídačem v ostrovním provozu	39
4.9	Monitorování reziduálního proudu [21]	42
4.10	Vypínací charakteristika jističů [25]	45
4.11	Typy pojistkových vložek [26]	46
4.12	Principiální schéma RCD [12]	47
4.13	Vypínací charakteristika proudového chrániče [12]	48
4.14	Příklady instalace přepětových ochran v objektu [16]	50
5.1	Schéma zapojení měření přetížení výstupu střídače	52
5.2	Průběhy napětí a proudu při přetížení 150 %	53
5.3	Průběhy napětí a proudu při přetížení 200 %	53
5.4	Průběhy napětí a proudu při přetížení 250 %	54
5.5	Průběhy napětí a proudu při zkratu L-N	55
5.6	Schéma zapojení ověření funkce anti-island	60
5.7	Schéma zapojení R-L-C zátěže pro jednu fázi	60
5.8	Simulace RLC zátěže pro jednu fázi	62
5.9	Efektivní hodnoty napětí a proudu ze střídače a sítě	62
5.10	Průběh napětí a proudu ze střídače	63
5.11	Schéma zapojení pro měření napětí na přepínači sítě	64
5.12	Průběh rozdílného napětí sítě a střídače	65
5.13	Průběhy napětí sítě, střídače a rozdílného napětí v nejhorším stavu	65
5.14	Četnost vzorků v rámci půl hodinového měření	66
5.15	Simulace nesynchronního stavu dvou zdrojů	66
5.16	Průběh rozdílného napětí dvou nesynchronních zdrojů	67

SEZNAM TABULEK

2.1	Ochrany výroben s fázovými proudy do 16 A [4].....	22
3.1	Meze dovoleného proudu a náboje [11]	26
3.2	Maximální doby odpojení [9].....	28
3.3	Klasifikace rozhodujícího napětí [13]	31
4.1	Požadavky na izolaci střídače a uzemnění pole [20]	40
4.2	Meze doby odezvy náhlé změny reziduálního proudu [20].....	42
4.3	Umístění SPD v elektrické instalaci [16]	50
5.1	Podmínky zkoušky [17]	57
5.2	Nevyvážené zatížení pro zkušební podmínku A [17].....	58
5.3	Nevyvážené zatížení pro zkušební podmínky B a C [17].....	59

1. ÚVOD

V moderních domácnostech stále přibývá velká spousta elektrických spotřebičů, které se neobejdou bez dodávky elektrické energie. Elektrická auta, elektrický ohřev teplé užitkové vody a topné vody, osvětlení a další vede společnost k požadavku o nepřetržitou dodávku elektrické energie. Proto bývá častým požadavkem investora vyrábět elektrickou energii v rámci svého objektu a aktuálně nespotřebovanou energii akumulovat. Akumulace elektrické energie představuje možnost být nezávislý na veřejné distribuční síti a s tím související schopnost systému pracovat i při výpadku napájení z distribuční soustavy. V posledních letech je velkou snahou získávání elektrické energie z obnovitelných zdrojů, mezi které patří zejména energie ze slunce či větru. Vzhledem k větší dostupnosti a různým podporám má vyšší penetrace bateriových zdrojů do elektrické soustavy jistá specifika.

Práce se zabývá bezpečností hybridních bateriových systémů v ostrovním provozu, který se liší především svým zkratovým výkonem, oproti paralelnímu provozu se sítí. Je rozdělena do dvou částí.

První část práce je zaměřena na střídače, které dodávají výkon do elektrické instalace v objektu případně do distribuční soustavy. Jsou zde zmíněny typy řízení a možnosti zapojení ať už střídačů mezi sebou, tak vzhledem ke způsobu provozu a konkrétního zapojení. Také je zde probrána legislativa a normy týkající se bezpečnosti a připojení do distribuční soustavy. Smyslem opatření před úrazem elektrickým proudem je snížení rizika a následků při úrazu, proto je třetí kapitola věnována souhrnu prostředků tvořících opatření před úrazem elektrickým proudem, včetně bezpečnostních zásad pro návrh výkonového měniče. Kapitola 4. je věnována ochranným funkcím střídače a přístrojům, které je nutné použít v elektrické instalaci. Jsou zde také zmíněny problémy při ochraně bateriových zdrojů, mezi které spadá i přechod do ostrovního provozu, který se vykazuje nebezpečím pro pracovníky distribuční soustavy a běžných uživatelů. Také je zde přiblížena problematika jištění a chránění. Součástí kapitoly je i schématické naznačení poruchových stavů zátěže hybridního systému při paralelním provozu se sítí a v ostrovním provozu.

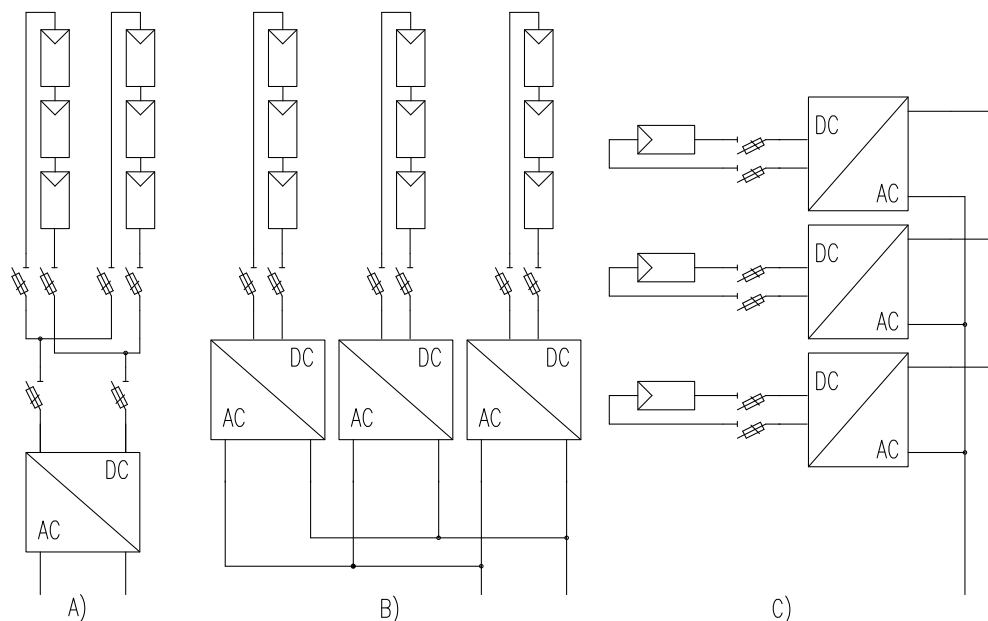
Druhá část práce se zabývá testováním střídačů, na kterých jsou demonstrována bezpečnostní rizika, která mohou v rámci elektrické instalace vzniknout. Jsou navrženy testovací procedury, které vychází z aktuálně platných legislativních požadavků. Výsledkem provedených testů je návrh a doporučení dalších opatření a postupů, které by měly být respektovány.

2. STŘÍDAČE

Střídače, invertory nebo také měniče slouží k přeměně stejnosměrného proudu z energetického zdroje například větrného, fotovoltaického (FV) nebo z baterií na proud střídavý o síťových parametrech. Typický střídač se skládá ze stejnosměrné strany, která obsahuje stejnosměrný meziobvod, spínací výkonové polovodičové součástky (IGBT nebo MOSFET tranzistory) a pasivní filtr na straně sítě k potlačení šíření vyšších harmonických do sítě. Důležitým požadavkem střídačů je převedení elektrického výkonu s nejmenšími ztrátami. Pro optimální provoz bývá součástí střídačů tzv. MPPT (maximal power point tracker). Tato funkce slouží pro hledání vhodného pracovního bodu maximálního výkonu, a to změnou vstupního odporu. Střídač může mít také spoustu dalších funkcí, jako jsou například monitoring sítě a ochranné funkce. Topologie zapojení střídačů je zřejmá z obrázku 2.1 a je možné je rozdělit na:

- centrální (A) – ke každému střídači jsou připojeny stovky až tisíce panelů;
- řetězcové nebo stringové (B) – na každý střídač je připojeno několik fotovoltaických panelů a střídače jsou navzájem propojeny paralelně;
- modulové (C) – ke každému fotovoltaickému modulu připojen jeden invertor.

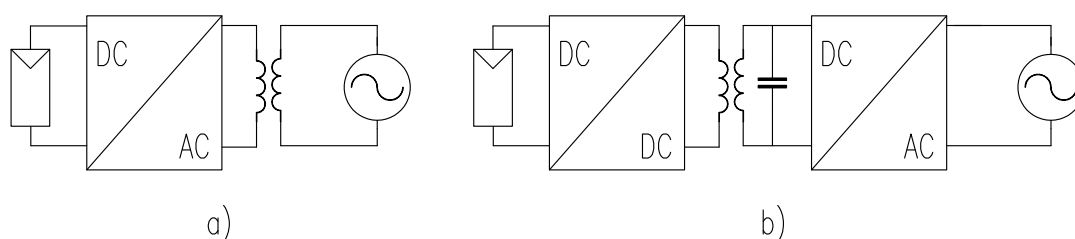
[1]



Obrázek 2.1 Blokové zapojení střídačů

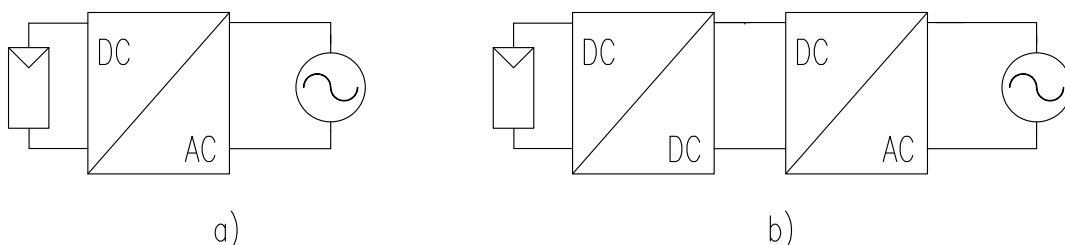
Pro galvanické oddělení a zvýšení bezpečnosti celé instalace bývají střídače vybaveny transformátorem, čímž dojde k oddělení stejnosměrné DC a střídavé AC části instalace. Jsou označovány jako izolované. Další výhodou je použití panelů s tenkovrstvou technologií, která má vyšší energetickou výtežnost. Střídače s transformátorem se

však vykazují vyššími ztrátami a hmotností. V porovnání se střídači bez transformátoru mají horší účinnost až o 1 – 2 %. [1]. Na obrázku 2.2 jsou zobrazeny varianty izolovaných střídačů. V případě a) je stejnosměrný proud z FV panelů převeden na nízkou hodnotu střídavého napětí, které je dále transformátorem zvýšeno na nominální napětí sítě. Výhodou zapojení je jednoduchá konstrukce, stabilní a spolehlivý provoz a potlačení vyšších harmonických. Nevýhodou je velký objem, váha a cena. Příklad b) zmíněnými nevýhodami netrpí, jelikož systém obsahuje DC-DC měnič a vysokofrekvenční transformátor s filtračním kondenzátorem, který značně snižuje ztráty a tím zvyšuje účinnost měniče. [2]



Obrázek 2.2 Izolované střídače

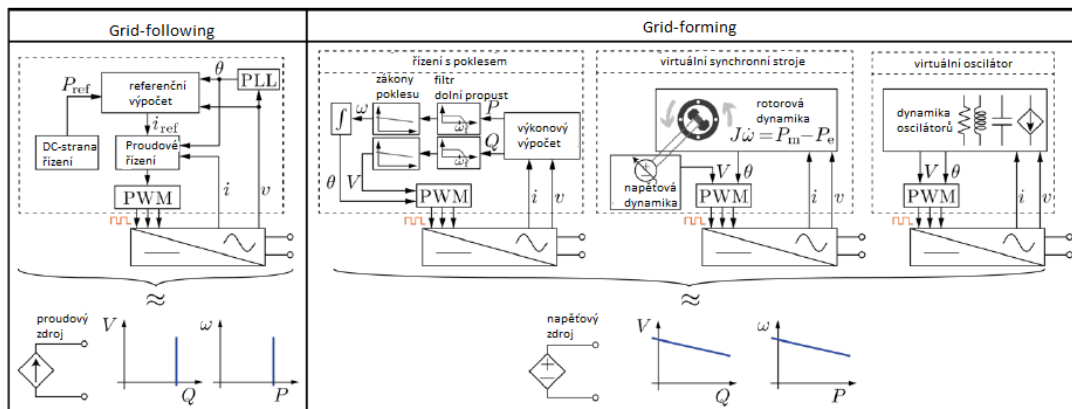
Střídač bývá koncipován jako jednostupňový (varianty a), kdy je zdroj energie připojen přímo na vstup stejnosměrné strany, nebo dvoustupňový (varianty b), kdy je zdroj energie připojen na další zařízení, kterým je DC-DC měnič. Jednostupňový střídač potřebuje vyšší úroveň napětí FV pole, než je amplituda sítového napětí, což klade vyšší nároky na izolaci a řízení měniče pro správnou funkci MPPT, oproti druhé variantě dvoustupňového střídače je na vstup střídače připojeno nižší stejnosměrné napětí pole, které je zvýšeno DC-DC měničem, který pro správnou funkci MPPT udržuje na svém výstupu stejné napětí. Vícestupňový neizolovaný střídač má tu vlastnost, že FV pole a síť nejsou od sebe izolovány a do připojené sítě se může dostat stejnosměrná složka, která může způsobit poškození zařízení v síti nebo způsobit úraz elektrickým proudem. [2] Oba druhy neizolovaných střídačů jsou zobrazeny na následujícím obrázku.



Obrázek 2.3 Neizolované střídače

2.1 Typy řízení

Vzhledem k vyšší penetraci obnovitelných zdrojů připojovaných do distribuční sítě se nyní řeší schopnost mikrosítě pracovat v ostrovním režimu, proto pro smysluplný provoz střídače je v moderních střídačích implementován digitální plně programovatelný regulátor. Rozlišují se střídače sledující síť (grid-following) a střídače schopné vytvářet samostatnou síť (grid-forming). [3] Hybridní střídače standartně pracují v případě připojení k síti jako symetrický zdroj proudu. V ostrovním provozu jsou odpojeny od sítě a jsou schopny vytvořit vlastní síť, chovají se tak jako zdroj napětí.



Obrázek 2.4 Funkční diagram grid-following a grid-forming střídačů [3]

2.1.1 Grid-following

Řídicí systém grid-following spočívá v tom, že každý střídač má přesně definované svorkové napětí, na které se systém fázový závěs PLL Phase-Locked Loop (systém úpravy vstupní a výstupní fáze signálu napětí, který je generován vnitřním oscilátorem, aby se shodovaly) může přichytit a sledovat ho. Tento systém se označuje často jako proudová regulace, protože svou funkcí se chová jako zdroj proudu. Systémové napětí a frekvence jsou regulovány jinými zdroji, připojených k síti. Předpokladem správné funkce je již vytvořená síť za normálního provozu. V rámci podpory sítě jsou ve střídači implementovány funkce, které brání nadměrným změnám odchylky napětí a frekvence. V současné době je většina připojených střídačů založena na tomto principu řízení. [3]

2.1.2 Grid-forming

Regulace typu grid-forming spočívá v regulaci okamžitého svorkového napětí spolu ve funkci se střídači tvořící a sledující síť a synchronními generátory připojeny do společné sítě. Smyslem řízení je možnost vytvoření decentralizovaného systému střídavého napětí, kde jsou napětí a frekvence regulovány společnou interakcí jednotek tvořící síť. Nepotřebují tak pro svou funkci řízení PLL V rámci výzkumu je řešeno spojení výhod vlastností synchronních strojů a vlastností výkonové elektroniky. Podle obrázku 2.4 se

rozlišují tři typy řízení:

- řízení s poklesem: lineární závislost mezi frekvencí a napětí v závislosti na reálném a činném výkonu, podobně jako u synchronních strojů v ustáleném stavu. Systém je řízen na základě síťových interakcí a nastavených charakteristik závislosti činného výkonu na úhlové rychlosti a jalového výkonu na napětí. Z toho vyplývají vlastnosti pro systémovou synchronizaci, aby všechny připojené jednotky dosahovaly stejné frekvence a každá jednotka poskytuje výkon, který je úměrný vlastnímu výkonu;
- virtuální synchronní stroje: řízení měniče emuluje chování synchronního stroje. Vstupní napětí měniče je přivedeno do digitálního modelu synchronního stroje a s uvážením jeho dynamických vlastností (elektromechanické jevy, dynamika kyvů apod.) je provedeno výstupní napětí z měniče v reálném čase;
- virtuální oscilátor: je založeno na emulaci nelineárních oscilátorů. V reálném čase jsou změřené hodnoty přiváděny do vhodného modelu, jehož výstupem je řízen výkonový stupeň střídače. Oscilační obvod generuje impulzy shodné s frekvencí sítě a dále je upravováno nominální napětí.

Všechny tři typy řízení mají své výstupní vlastnosti velmi podobné a svým chováním se podobají zdroji napětí s amplitudou a frekvencí, která se mění podle zatížení soustavy. V současné době se střídače s řízením grid-forming vyskytují v mikrosítích a sítích s vysokou spolehlivostí. Moderní grid-forming střídače by mohly být navrženy tak, aby mohly poskytovat schopnost obnovit síť při blackoutu. Klíčovou vlastností střídačů, připojených na síť je i podpora stability sítě. V rámci aktuálních výzkumů se řeší, jak správně detekovat poruchy v síti od běžných výkyvů napětí, z důvodu nižších zkratových proudů ze střídačů, oproti tradičním zdrojům elektrické energie. [3]

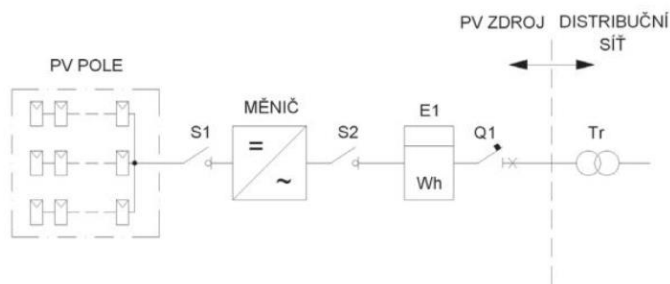
V rámci statického řízení napětí jsou výrobní schopny pomocí jalového výkonu schopny regulovat napětí v síti podle provozního diagramu P-Q. Dynamickou podporou sítě je myšleno udržování napětí při poklesech v síti vvn a zvn, zamezením odpojení výroben v sítích nn, vn a 110 kV, čímž by mohlo dojít k rozpadu sítě. Proto výrobní musí zůstat připojené i při poruchách, protože dochází ke značným poklesům napětí. Nesynchronní moduly (střídače) se podle [4] nesmí odpojit od sítě, pokud se napětí bude nacházet nad definovanou křivkou FRT.

2.2 Způsoby provozu

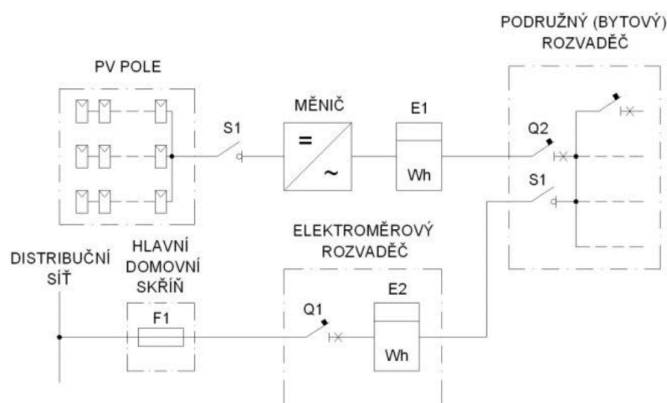
Fotovoltaický systém může být provozován jako paralelní provoz se sítí, izolovaný od sítě, tzv. ostrovní provoz nebo hybridní systém, který je schopen paralelní práce se sítí a v případě výpadku napájení z distribuční sítě přejde do ostrovního provozu a napájí vybrané elektrické spotřebiče. Výběr zálohovaných spotřebičů závisí na prioritě nepřetržitého provozu podle uživatele. Velmi důležité je však brát v potaz celkový výkon spotřebičů vzhledem ke schopnosti dodávky ze zálohovaného výstupu střídače.

2.2.1 Přímé spojené se sítí, On-Grid

Systémy mohou být zapojené jako tzv. přímý výkup (obrázek 2.5) nebo jako zelený bonus (obrázek 2.6). V principu první varianta spočívá v přímém výkupu veškeré vyrobené elektrické energie, která je prodávána za pevnou výkupní cenu do distribuční sítě. Druhá varianta je výhodnější pro objekty s výraznou spotřebou během dne. Vyrobená elektrická energie tak pokrývá aktuální spotřebu a přebytky jsou vykoupeny do distribuční sítě, za které dostane zaplacen tzv. zelený bonus, který se odvíjí na základě odečtu elektroměru. Zelený bonus je dán zákonem č. 180/2005 Sb., který se zabývá podporou obnovitelných elektrických zdrojů. Výše zeleného bonusu se odvíjí od druhu obnovitelného zdroje a jeho výše udává Energetický regulační úřad. Pokud však provozovatel chce prodávat elektrickou energii do sítě, musí se stát podnikatelem a splnit podmínky pro získání licence k provozu elektrárny. [5] Zmíněné termíny způsobu provozu dnes však již nejsou dotovány.



Obrázek 2.5 Schématické zapojení On-Grid přímý výkup [6]

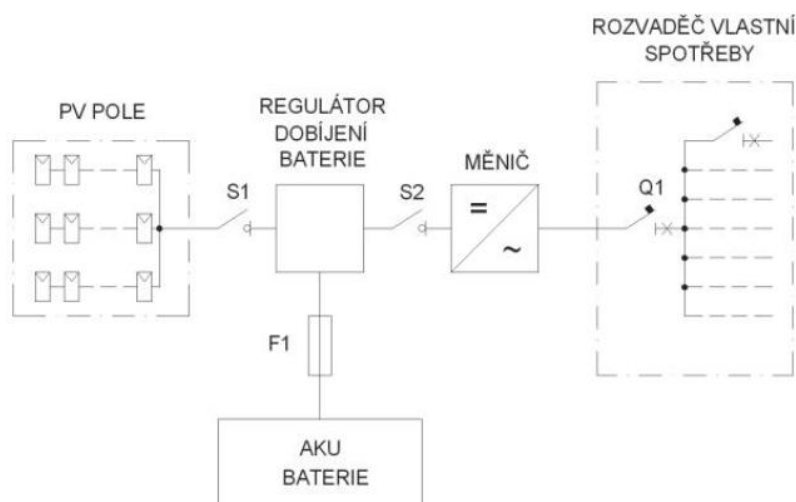


Obrázek 2.6 Schématické zapojení On-grid zelený bonus [6]

2.2.2 Ostrovní systémy, Off-Grid

Využití přináší v místech, kde není možné zrealizovat elektrickou přípojku například z důvodu špatné dostupnosti. Nese s sebou také velkou výhodu nezávislosti na distribuční

síti. Další z důvodů realizace ostrovního systému je vyšší stupeň zajištění dodávky elektrické energie. Vyrobená elektrická energie je využita buď pro aktuální spotřebu objektu nebo je ukládána do akumulátorů. Schématické zapojení ostrovní sítě je na obrázku 2.7. Ostrovní systémy je možné provozovat i v napětových hladinách 12, 24 nebo 48 V DC. Pokud je v systému zapojen střídač, je možné používat běžné elektrické spotřebiče na síťové napětí 230 V o frekvenci 50 Hz. Řešení je velmi výhodné pro krátkodobé rekreační pobyty na chatách nebo pro použití v karavanech a podobně.



Obrázek 2.7 Schématické zapojení Off-grid [6]

2.2.3 Hybridní systémy

Tento systém může pracovat buď v režimu přímého připojení k síti nebo v případě poruchy v distribuční síti přejít do ostrovního provozu. Vyrobená elektrická energie je buďto ihned spotřebovaná aktuální spotřebou objektu nebo je akumulována do akumulčních nádrží nebo baterií, odkud je možné čerpat vlastní vyrobenou elektrickou energii i v případě, kdy dojde k výpadku distribuční sítě nebo ve večerních hodinách. Hlavní komponenty, které tvoří hybridní systém jsou fotovoltaické panely, MPP tracker a hybridní střídač. Velkou výhodou hybridních systému je téměř 100 % využití vyrobené elektrické energie, optimalizace výroby a spotřeby a také, že funguje jako záložní zdroj. [5]

2.3 Způsoby zapojení hybridních systémů

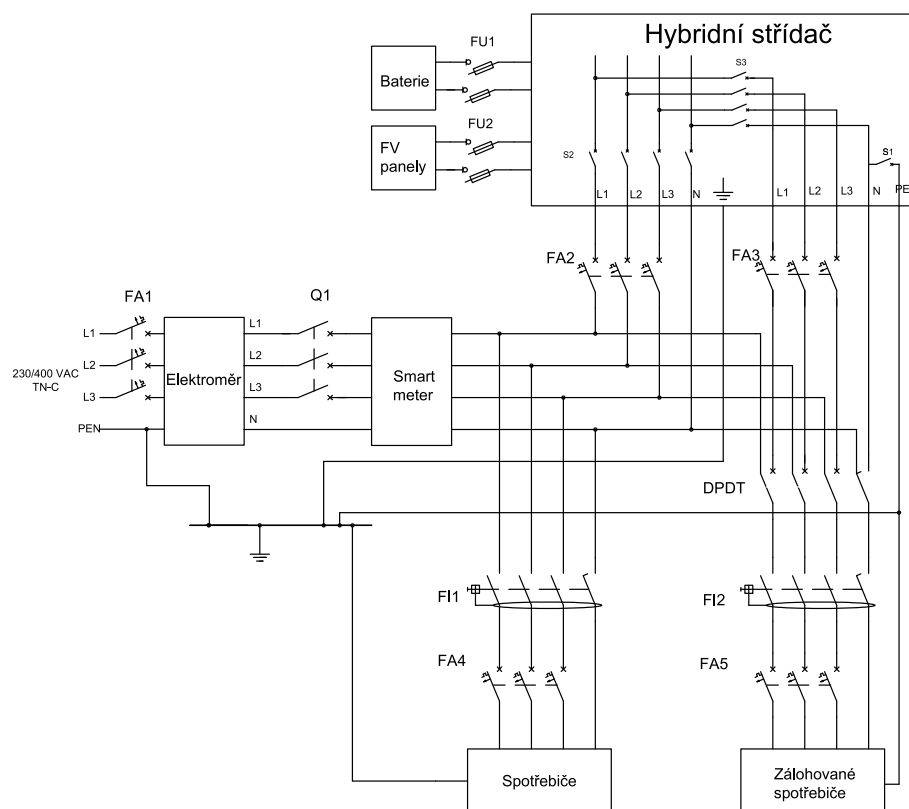
Způsob zapojení hybridních systémů se odvíjí podle konkrétního projektovaného případu. Záleží také na potřebném výkonu pro napájení elektrických spotřebičů. Podle toho lze volit buď jednofázový nebo třífázový systém. Je také možnost kombinace tří jednofázových systémů pro vytvoření tří fází. U tří fázového systému je pak důležité

zvolit správný typ střídače, aby dokázal pracovat i s nesymetrickou zátěží. Po připojení zátěže dodává symetrický střídač do všech tří fází stejnoměrný výkon bez ohledu na to, jaká zátěž je připojena. Například mějme k dispozici třífázový symetrický střídač, který dokáže dodat výkon 6 kW, tedy 2 kW na fázi. Fakturační měření bývá po fázích, a proto pokud připojíme jednofázovou zátěž například 2,5 kW na fázi L1, měnič sice vyrobí 6 kW, ale 0,5 kW je potřeba přidat ze sítě a z dodaného výkonu na zbylých dvou fázích je buď dobíjen akumulátor, nebo jsou přebytky prodávány do sítě za velmi nízkou výkupní cenu. Proto pokud v instalaci převládají jednofázové zátěže, je vhodné použít asymetrický střídač, který dokáže dodat potřebný výkon na konkrétní zatíženou fázi. [7]

Konstrukčně je symetrický dvouúrovňový tří fázový střídač tvořen DC-DC měničem, stejnosměrným meziobvodem s příslušnou kapacitou a společným DC-AC měničem pro všechny fáze. Nesymetrický střídač má pro každou fázi samostatný měnič DC-AC, a proto je schopen dodávky výkonu pro nesymetrické zátěže, bývá však konstrukčně složitější a dražší.

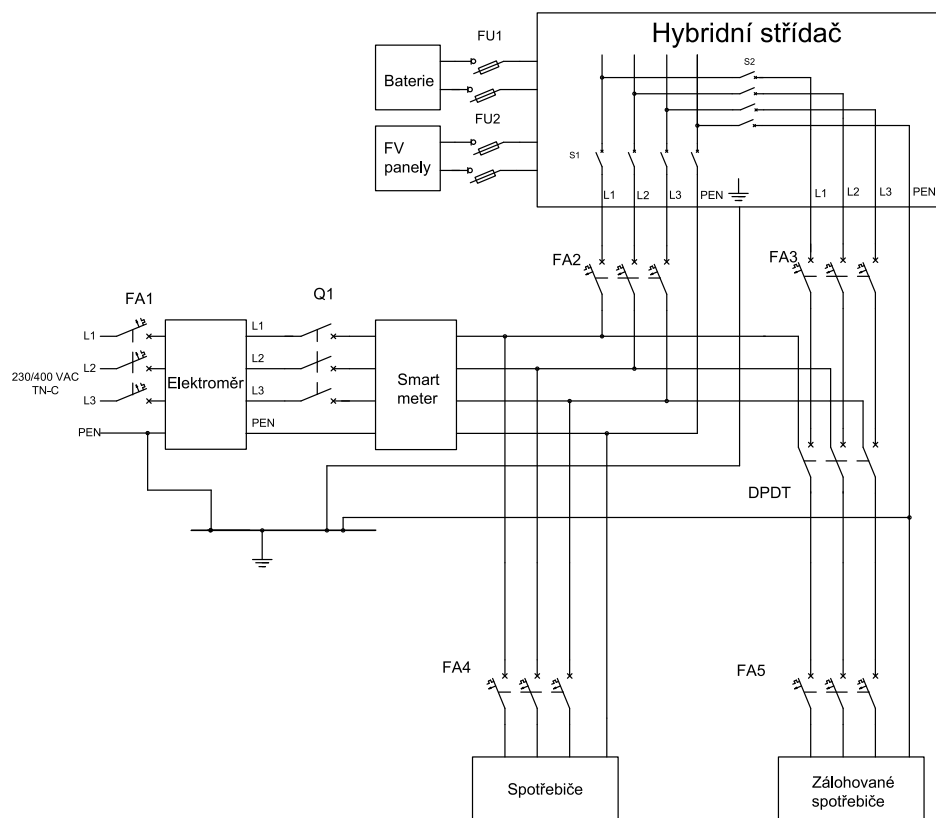
2.3.1 Třífázový systém

Na obrázku 2.8 je znázorněn příklad zapojení hybridního systému. Přístroje označené písmenem FA jsou jističe s vypínací charakteristikou typu B. Jejich jmenovitá hodnota proudu je specifická pro konkrétní sestavu. Přístroje označené FI jsou proudové chrániče, které v případě instalace střídače musí být typu B, viz. kapitola 4.7. Vstupní svorky hybridního střídače (On-Grid) poskytují připojení pracovních vodičů z napájecí distribuční sítě. Pro připojení ochranného vodiče bývá střídač vybaven příslušným šroubem na jeho kovové neživé části. Pro případ ostrovního provozu slouží zálohovaná část, která je připojená na přepínač sítí DPDT (Double Pole Double Throw), který může být buď manuální nebo automatický, buď sestavou navzájem blokových stykačů či pomocí automatického řízení. Představuje tedy místo rozdělení od distribuční sítě. Jeho důležitým požadavkem je, aby byl konstruován na požadovaný jmenovitý proud nadřazených prvků a v případě poruchy snesl průchod zkratového proudu a byl vhodně dimenzovaný na izolační napětí vzhledem k přítomnosti dvou nesynchronních zdrojů. V přechodu do ostrovního provozu jsou vybrané zálohované spotřebiče napájeny ze střídače, který poskytuje elektrickou energii naakumulovanou z baterií nebo také z momentální výroby fotovoltaických panelů. Pokud střídač pracuje v zálohovaném režimu, je nulový vodič N a ochranný vodič PE spojen přes vnitřní relé, které představuje spínač S1. Pokud je systém napojen na síť, je relé S1 a S3 v rozepnutém stavu a S2 je sepnuto. Z důvodu bezpečnosti a nutnosti použití proudového chrániče nemůže být systém zapojen v síti TN-C. V Austrálii nebo na Novém Zélandě toto zapojení nelze použít, jelikož jejich současné legislativa (AS/NZS 3000:2018) nedovoluje oddělení či spínání nulového vodiče. Při přepínání sítí je tedy nutné předejít k rozepnutí nulového vodiče a zároveň se na záložním výstupu měniče nevyužívá svorka PE.



Obrázek 2.8 Třífázový hybridní systém v síti TN-C-S

Na dalším obrázku 2.9 je znázorněno schématické zapojení hybridního střídače do sítě TN-C. Jak již bylo zmíněno, v této síti nelze zapojit proudové chrániče, proto v případě poruchy jsou ochranným prvkem nadproudové přístroje, tedy jističe nebo pojistky. V síti TN-C jsou neživé části spotřebičů třídy I připojeny na společný vodič PEN, který slouží jako ochranný i nulový vodič. Proto je velkým bezpečnostním rizikem v rámci elektrické instalace přerušení vodiče PEN, kdy se objeví nebezpečné dotykové napětí na neživé části elektrického zařízení. Tato problematika je dále probrána v kapitole o ochranných funkcích a zařízeních.

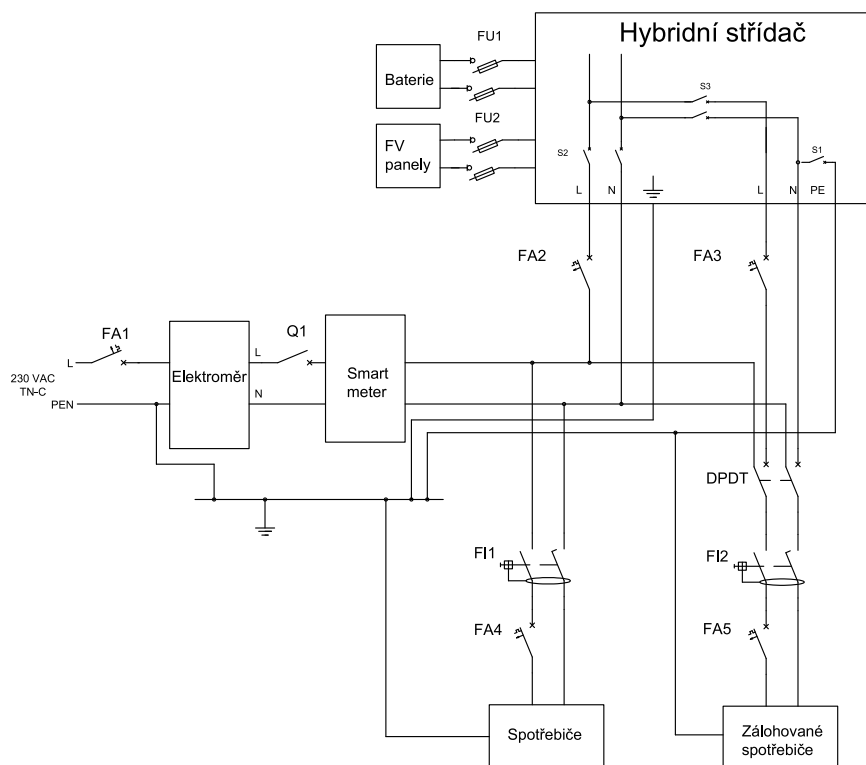


Obrázek 2.9 Třífázový hybridní systém v síti TN-C

2.3.2 Jednofázový systém

Pokud v uvažované elektrické instalaci převládají jednofázové zátěže, je vhodné využít jednofázové hybridní střídače. Pro připojení k distribuční síti je však jejich výkon omezen podle pravidel provozování distribuční sítě 3,7 kVA na fázi. [7]

Na obrázku 2.10 je zobrazen příklad zapojení jednofázového hybridního střídače. Přepnutí do ostrovního provozu lze buď automaticky nebo pomocí mechanického přepínače sítí, který představuje přepínač DPDT. Toto zapojení se vztahuje na většinu zemí a spočívá v přepínání nulového vodiče mezi sítí a výstupem hybridního měniče. V případě zapojení v zemích, jako je Austrálie nebo Nový Zéland nesmí docházet ke spínání nulového vodiče. Proto v zapojení není použit přepínač DPDT, ale přepínání do ostrovního provozu je řešeno automaticky vnitřním zapojením měniče.



Obrázek 2.10 Jednofázový hybridní systém v síti TN-S

2.4 Bezpečnostní normy a předpisy

Hybridní střídače musí splňovat požadavky na bezpečnost a elektromagnetickou kompatibilitu (EMC). Aby mohly být připojeny k distribuční síti, musí splňovat požadavky na kvalitu napětí tak, aby nedocházelo k ovlivňování ostatních uživatelů, připojených do sítě a zároveň, aby nedocházelo k poškození připojených elektrických zařízení. Výrobny mohou být připojeny na základě Pravidel provozování distribuční soustavy (PPDS), které stanovují mimo jiné i opatření na ochranu vlastní výroby, do které spadá nastavení nadproudových ochranných a ochrany před nebezpečným dotykem. V případě hybridního systému musí být zajištěna ochrana i při ostrovním provozu. V rámci ochrany výroby a dalších zařízení je nutné vybavení příslušných spínacích přístrojů při odchylkách napětí či frekvence mimo dovolené meze v odpovídajícím čase. Pro mikrozdroje (výrobny s fázovými proudy do 16 A na fázi) platí následující tabulka.

Tabulka 2.1 Ochrany výrobek s fázovými proudy do 16 A [4]

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 – 15 %
Nadfrekvence	0,5	52 Hz
Podfrekvence	0,5	47,5 Hz

2.4.1 Požadavky na bezpečnost výrobku a elektrické instalace

Pro zařízení, sloužící k přeměně elektrické energie (měniče) využitě ve fotovoltaice slouží norma IEC 62109, která je zaměřena na minimální požadavky pro návrh a výrobu zařízení k přeměně elektrické energie k dosažení bezpečnosti ochrany před úrazem elektrickým proudem, energií, ohněm či mechanickým nebezpečím. První část této normy se zabývá všeobecnými požadavky pro všechny typy zařízení k přeměně elektrické energie. Druhá část obsahuje specifické požadavky pro více druhů výkonových měničů. Českou verzí jsou normy ČSN EN 62109-1/-2. Další normou, která se zabývá bezpečnostními požadavky pro záložní zdroje elektrické energie (UPS) použité v nízkonapětových distribučních systémech je EN IEC 62040-1:2019. Je určena pro instalaci v prostorech, které jsou přístupné běžným osobám a jejich výstupní nebo vstupní napětí nepřekračuje 1000 V AC nebo 1500 V DC. Českou verzí této evropské normy je ČSN EN IEC 62040-1.

Bezpečnost elektrických instalací vychází z normy pro ochranu osob a zvířat před úrazem elektrickým proudem ČSN EN 61140 ed. 3, která uvádí základní principy a požadavky pro elektrické instalace a jejich koordinaci pro všechna napětí nebo proudy. Z této normy také vychází norma ČSN 33 2000-4-41 ed. 3, která se zabývá ochrannými opatřeními pro zajištění bezpečnosti v elektrických instalacích nízkého napětí. Návrhem a prováděním vnitřních elektrických rozvodů silových i sdělovacích v objektech občanské výstavby se zabývá norma ČSN 33 2130 ed. 3., mimo jiné je jejím obsahem také bezpečnost osob, zvířat a majetku. Dále uvádí pravidla pro použití ochranných elektrických zařízení i s ohledem na elektromagnetickou kompatibilitu pro dosažení bezpečné elektroinstalace. Pro fotovoltaické systémy slouží norma ČSN 33 2000-7-712 ed. 2, která platí pro FV zdroje určené k napájení instalace, bez ohledu zda je, či není připojena k distribuční soustavě.

2.4.2 Požadavky na kvalitu elektrické energie

Velmi důležitým a sledovaným parametrem v elektrické síti je kvalita napětí. Podle energetického zákona č. 458/2000 Sb má každý odběratel právo na dodávku kvalitní

elektrické energie, jejíž kvalita je dána křivkami napětí. Podle vyhlášky č. 540/2005 Sb. ve znění vyhlášky č. 41/2010 Sb. je ve druhé části podle §8 standardem kvality distribuce napětí s vyhovujícími parametry velikosti a odchylky napájecího napětí a frekvence. Tyto parametry musí být v souladu s Pravidly provozování přenosové soustavy nebo Pravidly provozování distribuční soustavy, případně musí odpovídat parametrům sjednaným se zákazníkem a provozovatelem distribuční soustavy. Požadavky na EMC jsou popsány v harmonizovaných normách EN 50160, EN 61000-X-Y a dalších. Charakteristiky napětí a meze jejich hodnot v místech připojení uživatelů distribučních sítí nízkého, vysokého napětí vycházejí z normy ČSN EN 50160 ed.3, která uvádí možné odchylky napájecího napětí, kmitočtu sítě, rychlé změny napětí (flickr), nesymetrie napájecího napětí, harmonická a mezipharmonická napětí a další. [8]

3. OCHRANA PŘED ÚRAZEM ELEKTRICKÝM PROUDEM

Následující kapitola se věnuje ochranou před úrazem elektrickým proudem, která vychází ze dvou následujících norem. ČSN EN 61140 se zabývá základními principy a požadavky pro elektrické instalace, sítě a zařízení bez ohledu na velikost proudu a napětí. Zde se však budeme zabývat pouze pravidly pro nízké napětí, tj. AC 1000 V a DC do 1500 V. ČSN 33 2000-4-41 ed. 3 je zaměřena na ochranou před úrazem elektrickým proudem v instalacích nízkého napětí a definuje ochranná opatření pro zajištění bezpečnosti.

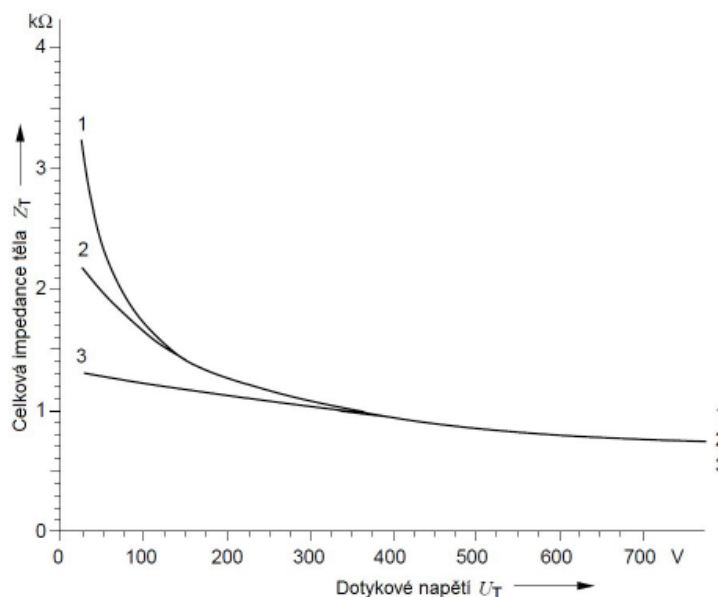
Ze zmíněných norem definujeme ochranné prostředky základní ochrany (ochrana před přímým dotykem), při poruše (ochrana proti nepřímému dotyku) a prostředky zvýšené a doplňkové ochrany. Jejich návrh se volí s uvažováním na vnější vlivy tak, aby po dobu života elektrické instalace byly stále spolehlivě účinné. Kombinací ochranných prostředků se vytváří ochranná opatření. V rámci elektronického měniče jsou při jeho návrhu zohledněny požadavky, které jsou uvedeny na konci této kapitoly.

S uvažováním vnějších vlivů prostředí se v každé části instalace volí vhodná ochranná opatření, která jsou sestaveny z vhodné kombinace ochranných prostředků. Mezi ochranná opatření podle [9] patří:

- automatické odpojení od zdroje;
- dvojitá nebo zesílená izolace;
- elektrické oddělení pro napájení jednoho spotřebiče;
- malé napětí SELV a PELV.

Při úrazu elektrickým proudem je rozhodující velikost proudu, který protéká tělem, který závisí na napětí a celkové impedanci obvodu, který je v případě úrazu uzavřen lidským tělem. Dále pak cesta proudu tělem, doba působení nebezpečného proudu, druh (kmitočet), stupni vlhkosti kůže, fáze srdečního cyklu v okamžiku úrazu, fyzický či psychický stav postiženého a další. Obecně střídavý proud má horší účinky než proud stejnosměrný. Střídavý proud do 500 Hz má nejnepríznivější účinky. Model impedance lidského těla je tvořen z vnitřní impedance Z_i , impedance kůže Z_k , a celkovou impedancí Z_T . Vnitřní impedance má převážně odporový charakter a velikost závisí na dráze průchodu poruchového proudu a ploše kontaktu. Impedance kůže klesá se zvyšujícím se proudem. Je tvořena souborem odporů a kapacit. Pro nižší dotyková napětí impedance kolísá, pro vyšší dotyková napětí se snižuje. Při průrazu kůže je impedance již zanedbatelná. Zvyšujícím se kmitočtem se impedance snižuje. Je závislá na teplotě, podmínkách kůže a další. Celková impedance je souborem odporů a kapacit. Pro nižší dotyková napětí se impedance mění, u vyšších napětí je celková impedance méně závislá na impedanci kůže. Celková impedance pro 50 % populace v závislosti na podmínkách kůže a dotykovém napětí U_T je zobrazena na obrázku 3.1. Jedná se o průchod proudu mezi dvěma rukama pro velké plochy při podmínkách suchých (1), při vodní vlhkosti (2)

a vlhkosti způsobené slanou vodou (3) pro střídavá dotyková napětí od 25 V do 700 V, AC 50/60 Hz. [10]



Obrázek 3.1 Celková impedance těla Z_T v závislosti na dotykovém napětí U_T [10]

3.1 Prostředky základní ochrany

Základní ochrana (ochrana před nepřímým dotykem) musí je tvořena vhodnou kombinací ochranných opatření, které brání před dotykem nebezpečných živých částí za normálních podmínek. V následujících řádcích podkapitoly budou shrnuty jednotlivé prostředky základní ochrany.

Základní izolace

Spočívá v zabránění dotyku nebezpečných živých částí. U zařízení a prvků instalace vysokého napětí se může nebezpečné napětí objevit i na povrchu izolace, a proto je nutné zvážit další opatření. Nebezpečné živé části musí být pokryty izolací, kterou je možné odstranit pouze jejím zničením. Povrchová úprava materiálů, jako je například lakování, smaltování nebo pokrytí oxidů kovů se nepovažuje za základní izolaci.

Přepážky a kryty

Jsou součástí elektrického zařízení a brání dotyku živých částí, přičemž živé části uvnitř krytů nebo za přepážkami zajišťují stupeň krytí alespoň IP XXB (dotyk prstem) nebo IP 2X (těleso s průměrem větším jak 12,5 mm) a vodorovné horní povrchy IP XXD (dotyk drátem) nebo IP 4X (těleso s průměrem větším jak 1 mm). Otevření krytů je možné pouze pomocí klíče nebo nástroje, při odpojení nebezpečných živých částí, kdy lze napájení obnovit pouze při vložení krytů či přepážek zpět nebo lze otevření krytů provést, pokud je uvnitř zařízení stále přepážka, která zajišťuje potřebný stupeň ochrany a lze ji odstranit pouze klíčem nebo nástrojem.

Zábrany

Jejich smyslem je chránit pouze osoby znalé nebo poučené, nikoliv laiky. Musí chránit během práce na elektrických zařízení nízkého napětí před nahodilým dotykem nebezpečných živých částí v běžném provozu. Zábrany lze odstranit pouze úmyslně a bez použitím klíče nebo nástroje. Pokud je zábrana vodivá a opatřená základní izolací, musí být chráněna ochranou při poruše.

Ochrana polohou

Použije se na místech, kde není možné použít jinou ze základních ochrany a to tak, aby se zabránilo u elektrických instalací a zařízení nahodilému současnému dotyku vodivých částí, mezi kterými se může objevit nebezpečný rozdíl potenciálů. V instalacích nízkého napětí se za bezpečnou vzdálenost mezi dvěma částmi instalace považuje 2,5 m. Pro osoby znalé nebo poučené vzdálenost může být menší.

Omezení napětí

Ochrana omezením musí splňovat dvě základní podmínky, které se vztahují na velikost dotykového napětí a zdroje pro sítě SELV a PELV. První podmínka se zabývá dotykovým napětím, jehož efektivní hodnota nesmí překročit 25 V střídavého nebo 60 V stejnosměrného napětí v prostředí, kde se nepředpokládá dotyk lidského těla s živými částmi v suchých prostorech, anebo efektivní hodnotu 6 V střídavého nebo 15 V stejnosměrného napětí ve všech ostatních prostorech. Druhou podmínkou je zaručení bezpečnostní úrovně, pokud budou sítě SELV a PELV napájeny jedním ze zdrojů, mezi které patří bezpečnostní ochranný transformátor, proudový zdroj, který splňuje stejný stupeň bezpečnosti, jako bezpečnostní ochranný transformátor (např. generátor se vznětovým motorem) a elektrochemický zdroj (např. baterie). [11]

Omezení ustáleného dotykového proudu a náboje

Omezení dotykového proudu (energie) na bezpečnou hodnotu tak, abych osoby či hospodářská zvířata nebyly vystaveny takové elektrické energii, která by pro ně byla nebezpečná nebo citelná. Budeme uvažovat, že odpor lidského těla je 2000 Ω , přičemž nesmí dojít k překročení prahu vnímání. Norma [11] uvádí meze ustáleného náboje a proudu tekoucím mezi dvěma místy současného dotyku, viz následující tabulka:

Tabulka 3.1 Meze dovoleného proudu a náboje [11]

	Mezní proud		Mezní uložená energie E (nahromaděný náboj Q)
	AC	DC	
Doporučená hodnota	0,5 mA	2 mA	5 μ J (0,5 μ C)
Hodnota prahu bolesti	3,5 mA	10 mA	0,5 mJ (50 μ C)

3.2 Prostředky ochrany při poruše

Ochrana při poruše je tvořena jedním nebo více prostředky ochrany, které nezávisí na základní ochraně. Chrání před nebezpečným dotykem neživých částí pouze při uvažování jedné poruchy. V sítích TN mohou být pro ochranu při poruše použity nadproudové ochranné přístroje nebo proudové chrániče (RCD). V sítích TT se musí pro ochranu při poruše použít RCD. Pokud je splněna nízká hodnota impedance poruchové smyčky, je možné použít i nadproudové ochranné přístroje.

Přídavná izolace

Je to izolace, která doplňuje izolaci základní. Její dimenzování je obdobné jako u základní izolace.

Ochranné pospojování a uzemnění

Vstupující kovové části do objektu, které nejsou součástí elektrické instalace musí být spojeny s hlavní uzemňovací svorkou, aby nedošlo k nežádoucímu přivedení rozdílu potenciálu. Ochranným pospojováním se docílí toho, aby neživé části, které jsou přístupné současnému dotyku byly v bezporuchovém stavu na potenciálu blízkému neutrální země. Obecně lze říct, že se jedná o vodivé spojení neživých částí s ochranným vodičem, aby se zabránilo nebezpečným dotykovým napětím. Soustava ochranného pospojování sestává z alespoň jednoho prvku či jejich kombinací. Účelem ochranného pospojování a uzemnění je odvedení poruchového proudu ke zdroji. Tím je uzavřena smyčka poruchového proudu. Čím menší je impedance poruchové smyčky, tím je větší poruchový proud a dojde k rychlejšímu vybavení jisticího přístroje. [12]

Ochranné stínění

Jedná se o vodivé stínění, které se vkládá mezi nebezpečné živé části instalace nebo zařízení, které je chráněno. Musí být připojeno k ochrannému pospojování celé instalace. Kladou se na něj stejné nároky, jako na ochranné pospojování.

Automatické odpojení od zdroje

Pro správnou funkci ochrany je nutné, aby v objektu bylo správně provedeno uzemnění a pospojování. Vlivem poruchy na elektrické instalaci nebo zařízení vznikne poruchový proud, který uvádí do činnosti ochranný přístroj. Vybavení ochranného přístroje musí být v odpovídajícím čase. Doba vypnutí závisí na předpokládaném dotykovém napětí na ochranném pospojování. Ochranný přístroj se volí s ohledem na charakteristiku napájení, zátěže a podle impedance smyčky poruchového proudu. [12] Pro koncové obvody, jejichž jmenovitý proud nepřekračuje 63 A, pokud je v nich alespoň jedna zásuvka a 32 A pro pevně připojené spotřebiče platí následující tabulka 3.2. Uvedená napětí jsou jmenovitá střídavá nebo stejnosměrná napětí vodiče vůči zemi.

Tabulka 3.2 Maximální doby odpojení [9]

Sít'	50–120 V	121-230 V		231-400 V		Nad 401 V		Distribuční obvody
	AC (s)	AC (s)	DC (s)	AC (s)	DC (s)	AC (s)	DC (s)	
TN	0,8	0,4	1	0,2	0,4	0,1	0,1	5
TT	0,3	0,2	0,4	0,07	0,2	0,04	0,1	1

V síti TN lze použít jako ochranné přístroje nadproudové ochranné přístroje a proudové chrániče v kombinaci s nadproudovým přístrojem. Pro správný výběr ochranných přístrojů musí impedance poruchové smyčky vyhovovat následující nerovnost:

$$Z_s \cdot I_a \leq U_o, \quad (3.1)$$

kde Z_s (Ω) je impedance smyčky, která obsahuje zdroj, vodiče vedení až do místa poruchy a ochranný vodič od místa poruchy ke zdroji. I_a je poruchový proud, který způsobí vybavení ochranného přístroje ve stanovené době a U_o (V) je jmenovité AC nebo DC napětí proti zemi. [9] Činnost ochrany v sítích TN spočívá v odpojení postiženého elektrického zařízení od zdroje napětí díky ochrannému vodiči. Pro dimenzování ochranných přístrojů je nutné brát ohled na selektivitu, aby byla odpojena jen ta část elektrické instalace, ve které se vyskytne porucha.

Norma [9] definuje prostředky ochrany, pokud není proveditelné automatické odpojení od zdroje z následujících důvodů. V instalacích s elektronickými výkonovými měniči, které mají jmenovité napětí U_o větší než 50 V AC nebo 120 V DC a není možné provést automatické odpojení, tak v případě poruchy mezi živým a ochranným vodičem nebo zemí musí zmíněný zdroj snížit napětí na 50 V AC nebo 120 V DC nebo nižší v předepsané době viz. tabulka 3.2. Další z důvodů, kdy není proveditelné automatické odpojení důsledkem nesplnění požadavku na odpojení ve stanovené době musí být provedeno doplňující ochranné pospojování a zároveň nesmí být překročen napěťový limit 50 V AC a 120 V DC pro místa současně přístupné dotyku.

Jednoduché oddělení

Oddělení obvodů od ostatních obvodů nebo země se provádí základní izolací dle nejvyššího napětí.

Nevodivé okolí

Impedance proti zemi musí být v okolí zařízení 50 k Ω pro jmenovité napětí AC nebo DC do 500 V nebo 100 k Ω pro jmenovité napětí je nad zmíněnou hodnotou 500 V do AC 1000 V nebo DC 1500 V.

Řízení potenciálu

Uplatňuje se u instalace doplňujících zemničů kvůli snížení dotykového a krokového napětí, vzniklé při poruše.

3.3 Prostředky zvýšené ochrany

Účelem prostředků zvýšené ochrany je, aby byla zajištěna základní ochrana a ochrana při poruše. Zároveň je nutné provést takové opatření, aby tyto prostředky nebyly znehodnoceny a také aby byla snížena pravděpodobnost výskytu jedné poruchy.

Zesílená izolace

Na návrh jsou kladeny velké požadavky, aby byla odolná vůči elektrickému, tepelnému a mechanickému namáhání. Také aby vyhovovala vlivům prostředí tak, jako dvojitá izolace (základní a přídatná).

Ochranné oddělení obvodů

Ochranné oddělení obvodů musí být provedeno následujícími způsoby. Dvojitou nebo zesílenou izolací, volenou podle nejvyššího přítomného napětí, ochranným stíněním, které je odděleno od ostatních obvodů základní izolací nebo jejich kombinací.

Zdroj omezeného proudu

Návrh zdroje se musí volit s ohledem na dotykové proudy, které nesmí přesáhnout hodnoty podle tabulky 3.1.

Ochranná impedance

Musí omezovat dotykový proud dle tabulky 3.1 a také musí být odolná vůči elektrickému namáhání i v případě jedné poruchy ochranné impedance.

3.4 Prostředky doplňkové ochrany

Proudový chránič

Uvedení do činnosti je v případě poruchy prostředku základní ochrany nebo prostředku při poruše. V instalacích nízkého napětí se používá jako doplňková ochrana proudový chránič s reziduální proudem nepřesahující 30 mA, kdy je použita jako základní ochrana základní izolace nebo ochranné přepážky, či kryty a ochrana při poruše je ochranným pospojováním a automatickým odpojením od zdroje.

Doplňující ochranné pospojování

Tento prostředek je uplatněn, když je základní ochrana provedena základní izolací nebo ochrannými přepážkami, či kryty a při poruše je provedena ochranným uzemněním, pospojováním a automatickým odpojením od zdroje. Jejím účelem je předejít nebezpečnému dotykovému napětí pospojením předmětů, mezi jehož neživými částmi by se mohlo objevit. Podle vypínacího proudu ochranných prvků a typu provozního napětí sítě musí odpor R mezi vodivými neživými částmi přístupné současnému dotyku splňovat podmínku:

$$R \leq \frac{50 \text{ V}}{I_a} \text{ pro AC síť,} \quad (3.2)$$

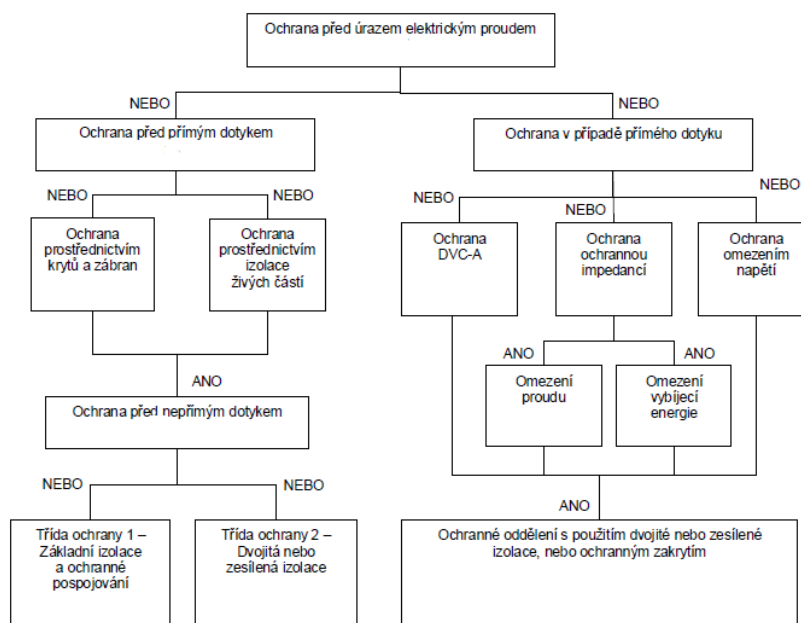
$$R \leq \frac{120 \text{ V}}{I_a} \text{ pro DC síť,} \quad (3.3)$$

kde I_a (A) je vypínací proud ochranných přístrojů. U proudových chráničů je to reziduální proud a u nadproudových jisticích přístrojů odpovídá hodnota proudu, který je potřebný pro odpojení do 5 s. [9]

3.5 Bezpečnost výkonových měničů

Při návrhu a konstrukci měničů je nutné brát v potaz ochranu před úrazem elektrickým proudem, kterým se zabývá norma ČSN EN 62109-1. Ta stanovuje obecné požadavky pro výkonové měniče pro použití ve výkonových fotovoltaických systémech. Druhá část normy klade zvláštní požadavky pro střídače. Podmínky pro snížení nebezpečí úrazu elektrickým proudem se zabývá také norma ČSN EN 62477-1. Ze zmíněných norem budou vybrány důležité části týkající se bezpečnosti.

Ochrana před úrazem elektrickým proudem se vyhodnocuje pro podmínky normální a za podmínek jedné poruchy. Ochrana při přímém a nepřímém dotyku musí být ve shodě s následujícím obrázkem 3.2. Následující rozdělení se bude zabývat ochranou v případě přímého dotyku.



Obrázek 3.2 Přehled opatření před úrazem elektrickým proudem [13]

3.5.1 Ochrana pomocí rozhodujícího napětí

Obvody střídače jsou klasifikovány podle rozhodujícího napětí (DVC). Rozdělení obvodů viz. tabulka 3.3 uvádí minimální požadovanou úroveň ochrany obvodu. Obvody bezpečné na dotyk musí být v souladu s požadavky podle DVC-A. Pokud obvody DVC-

B a C nejsou v souladu podle požadavků ochrany v případě přímého dotyku, nesmí být přístupné dotyku. Při poruchových podmínkách jsou obvody s kategorií DVC-A povoleny až do meze DVC-B po dobu maximálně 0,2 s. Jestliže je v obvodu provedeno ochranné oddělení obvodu DVC-A od B a C, není vyžadována ochrana před přímým dotykem. [13]

Tabulka 3.3 Klasifikace rozhodujícího napětí [13]

Klasifikace rozhodujícího napětí (DVC)	Meze pracovního napětí (V)		
	Střídavé napětí efektivní hodnota	Střídavé napětí vrcholová hodnota	Stejnoseměrné napětí střední hodnota
A	≤ 25	$\leq 35,4$	≤ 60
B	50	71	120
C	> 50	> 71	> 120

3.5.2 Ochrana pomocí ochranné impedance

Ochrannou impedancí dojde k omezení proudu, respektive náboje, který je definován jako integrál proudu za daný čas. Ochrana vodivých částí a obvodů není vyžadována, pokud je spojení s obvody DVC-B a C pomocí ochranné impedance. Ochranná impedance musí být navržena tak, aby za normálních podmínek a podmínek jedné poruchy proud na uzemnění a mezi současně přístupnými částmi, který je měřený na přístupných živých částech nepřekročil hodnotu střídavého proudu 3,5 mA nebo stejnosměrného proudu 10 mA a náboje 50 μC pro omezení energie vybíjení. [13]

3.5.3 Ochrana pomocí omezeného napětí

Jako ochrana omezeného napětí se využívá dělič napětí, který je přímo závislý na ochranném uzemnění. Je proto zakázáno využívání této ochrany u spotřebičů třídy ochrany II nebo u neuzemněných obvodů. Návrh děliče napětí musí být s ohledem i na podmínku jedné poruchy, kdy napětí na výstupu děliče nesmí přesáhnout mez pro klasifikaci DVC-A. [13]

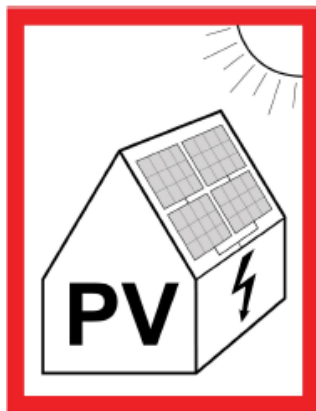
4. OCHRANNÉ FUNKCE A PŘÍSTROJE

V této kapitole budou nejprve probány problémy s ochranou bateriových systémů připojených na síť, mezi které patří i vznik ostrovního provozu, který přináší problémy z hlediska bezpečnosti. Abychom mohli řešit jednotlivá opatření s ohledem na bezpečnost osob a instalace, je potřeba zmínit rizika ostrovního provozu a způsoby detekce ostrovu. Dále budou probány potřebné ochranné přístroje a ochranné funkce střídačů v rámci elektrické instalace v objektu.

Smyslem elektrických ochranných opatření je ochrana spotřebitele, která se nachází za místem připojení. Za její provoz a údržbu je zodpovědný sám spotřebitel. Nejčastějšími ochrannými přístroji jsou malé jističe (MCB), kompaktní jističe (MCCB) a pojistky, dále pak proudové chrániče (RCD) a proudové chrániče v kombinaci s jističem (RCBO). Velmi významnou součástí je také ochrana před přepětím. [14]

Jelikož instalace výrobní nebo záložního zdroje představuje riziko úrazu elektrickým proudem i pro personál údržby či pracovníky veřejné distribuční sítě nebo záchranné složky, platí pro odběrná místa s přímým měřením nutnost instalace vypínacího prvku, který ve svých Připojovacích podmínkách požaduje ČEZ Distribuce a.s. od 1. května letošního roku 2022. Vypínací prvek je určen ke galvanickému oddělení instalace a tím zamezení průchodu zpětných proudů. Instaluje se do měřené části v elektroměrovém rozvaděči. Ke zmíněnému účelu může sloužit mechanický vypínač nebo jistič, který neplní požadavky jisticí schopnosti a selektivity. Důležitým parametrem je hodnota jmenovitého proudu, která musí být rovna alespoň jmenovité hodnotě hlavního jističe před elektroměrem. Prvek musí být řádně označen, aby nedošlo k záměně s hlavním jističem. [15]

Na počátku elektrické instalace, v místě měření elektrické energie nebo na rozvaděči, ke kterému je připojeno napájení měniče musí být pevně umístěna značka, která je na obrázku 4.1. V rozvaděči, ke kterému je připojena živá část DC strany musí mít označení, které upozorňuje, že živá část může být stále pod napětím i při odpojení. [16]



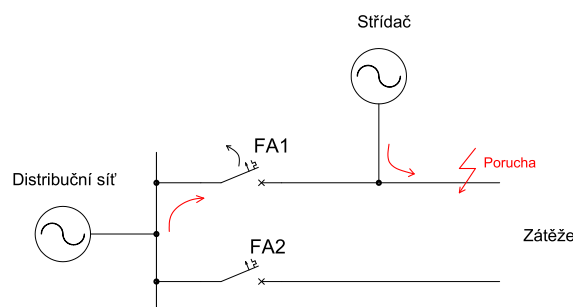
Obrázek 4.1 Upozornění na provedení fotovoltaické instalace na budově [16]

4.1 Problémy s ochranou bateriových systémů

V rámci distribuční sítě mají připojené bateriové systémy přes střídače vliv na síť a spotřebitele. Vlivem poruchového proudu jsou řešeny tři základní problémy. Změna poruchového proudu díky příspěvku ze střídače, čímž může dojít ke zpoždění ochrany, jinými slovy nefunkčnost stávající ochrany v důsledku změny protékajícího proudu ochranným zařízením, dále chybná reakce ochranného přístroje v důsledku proudu ze zdravého obvodu do postiženého. Dalším problémem může být i přechod do ostrovního provozu, který představuje bezpečnostní riziko pro instalaci, distribuční síť i lidské osoby.

4.1.1 Zpoždění jistícího přístroje

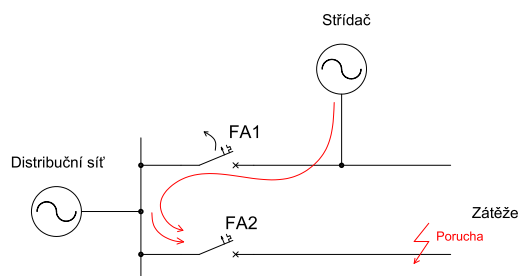
První problém je zobrazen na obrázku 4.2. Na straně zátěže došlo k poruše a poruchový proud je hrazen z místního zdroje (hybridní střídač) a část jde z distribuční sítě. V tomto případě je pravděpodobné zpoždění činnosti jističe FA1, což zvyšuje například riziko poškození instalace a vzniku požáru. Zpoždění vybavení jističe může nastat v důsledku sníženého zkratového příspěvku z distribuční sítě.



Obrázek 4.2 Zpoždění ochrany v důsledku snížení poruchového proudu ze sítě [14]

4.1.2 Chybná reakce jistícího přístroje

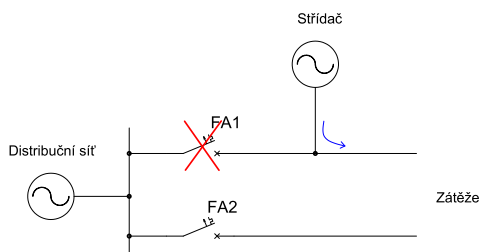
Dalším problémem je falešné odpojení zdravého obvodu, který zahrnuje napájení z bateriového systému. Situace je nepředvídatelná a je způsobena velkým odběrem proudu ze zdroje, kterým je bateriový systém, čímž vybaví příslušný jistič. Dodávaný proud ze střídače je však limitován svým maximálním výkonem, který je schopen střídač dodat a je tak méně pravděpodobné, aby došlo k nežádoucímu vybavení ochrany a lze tak předpokládat, že poruchový proud ze sítě bude značně větší než proud ze střídače. Situace je zobrazena na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3 Chybná reakce ochrany v důsledku proudu ze zdravého obvodu do místa poruchy [14]

4.1.3 Přechod do ostrovního provozu

Posledním problémem je přechod do ostrovního provozu, který nastane při ztrátě napájení z distribuční sítě. Podmínkou správného ostrovního provozu je rovnováha mezi výrobou a spotřebou, což ne vždy je při změně provozu zaručeno a může tak dojít k výchyilkám napětí a frekvence, které mohou způsobit poškození připojených elektrických zařízení. Vznik ostrovního provozu je zřejmý z obrázku 4.4.



Obrázek 4.4 Ostrovní provoz v důsledku výpadku napájení ze sítě [14]

Ostrovní provoz může vzniknout následkem poruchy v elektrizační soustavě, jejíž provozovatel odpojí zařízení, a ukončí jeho provoz, dále například změnou zatížení, přepínání distribuční soustavy, lidskou chybou či úmyslným poškozením nebo vlivem přírodních jevů. Neúmyslný ostrov může být nebezpečný, jelikož provozovatel veřejné elektrizační soustavy nemá dohled na napětím a kmitočtu ostrovu. Ostrovní provoz může způsobovat problémy při obnovení normálního stavu a vytvářet nebezpečí pro pracovníky provozovatele elektrizační soustavy. V místech vyššího výskytu střídačů v síti může docházet k opětnému vypínání vedení či poškození připojených zařízení z důvodu připínání s rozdílným fázovým posuvem. Situace lze vyřešit fungováním střídače pouze v případě, pokud napětí či frekvence elektrizační soustavy je v přijatelných mezích.

Střídače proto bývají vybaveny funkcí anti-ostrovního režimu, jejíž schopnost detekce spočívá v měření ostatních parametrů nebo postupů destabilizujících síť. [17]

Důsledkem odpojení od sítě dochází ke snížení zkratových proudů. Ustálený poruchový proud je pak dán proudem, který je schopen střídač dodat. V případě poruchy je tak pravděpodobné, že dojde ke zpožděné činnosti jističů nebo nevybaví vůbec. Při dlouhodobě trvající poruše tak může dojít k poškození elektroinstalace, zvýšenému riziku úrazu elektrickým proudem nebo požáru. [14]

4.2 Detekce ostrovního provozu

Způsoby detekce ostrovního provozu jsou stále výzkumným problémem a v současnosti je hlavním zájmem provozovatelů elektrických sítí zajistit ekonomickou a účinnou ochranu proti ostrovu. [18]

Obecně se metody detekce dělí na lokální a vzdálené systémy. Lokální systémy se dále dělí na aktivní a pasivní metody. Aktivní metoda spočívá v injektáži malých narušujících proudů a sleduje se odezva sítě. Pokud je systém připojen k síti, není sledovaný signál příliš zkreslen injektovaným signálem. Pasivní systémy jsou založené na pozorování odchylek provozních parametrů systému. Může však dojít k chybné detekci v systému, kde je splněna výkonová bilance mezi výrobou a spotřebou, která nevede ke zhoršení provozních parametrů. Vzdálené systémy pracují na základě komunikační infrastruktury a zpracování signálů mezi rozvodnou sítí a výrobnou. Jsou spolehlivější než lokální metody, avšak dražší a složitější. [18]

4.2.1 Aktivní metody

Spočívají v injektáži malého rušivého signálu do připojené sítě. Pokud se systém nachází v ostrovním provozu, jsou systémové parametry změněny. Nevýhodou aktivních metod je harmonické rušení a zhoršení kvality elektrické energie. Jsou určeny především systémy výroby založené na střídačích. Mezi aktivní metody patří:

- měření impedance IM;
- aktivní frekvenční drift AFD;
- metoda SFS (Sandia frequency shift);
- metoda SVS (Sandia voltage shift);
- frekvenční posun v klouzavém pohybu SMFS. [18]

4.2.2 Pasivní metody

Pasivní metody spočívají v měření parametrů systému jako je napětí, proud, impedance a výkon či frekvence. Tyto parametry jsou neustále monitorovány na svorkách zařízení. Pokud se systém nachází v ostrovním provozu, vykazují zmíněné parametry značné odchylky a systém zareaguje vhodným opatřením na odpojení od sítě. Výhodou pasivních metod je, že nemají žádný vliv na kvalitu elektrické energie a jsou jednodušší na realizaci

a řízení. Nevýhodou je pomalejší reakce s možností chybné detekce ostrovu, viz. výše. Metody jsou založeny na následujících principech:

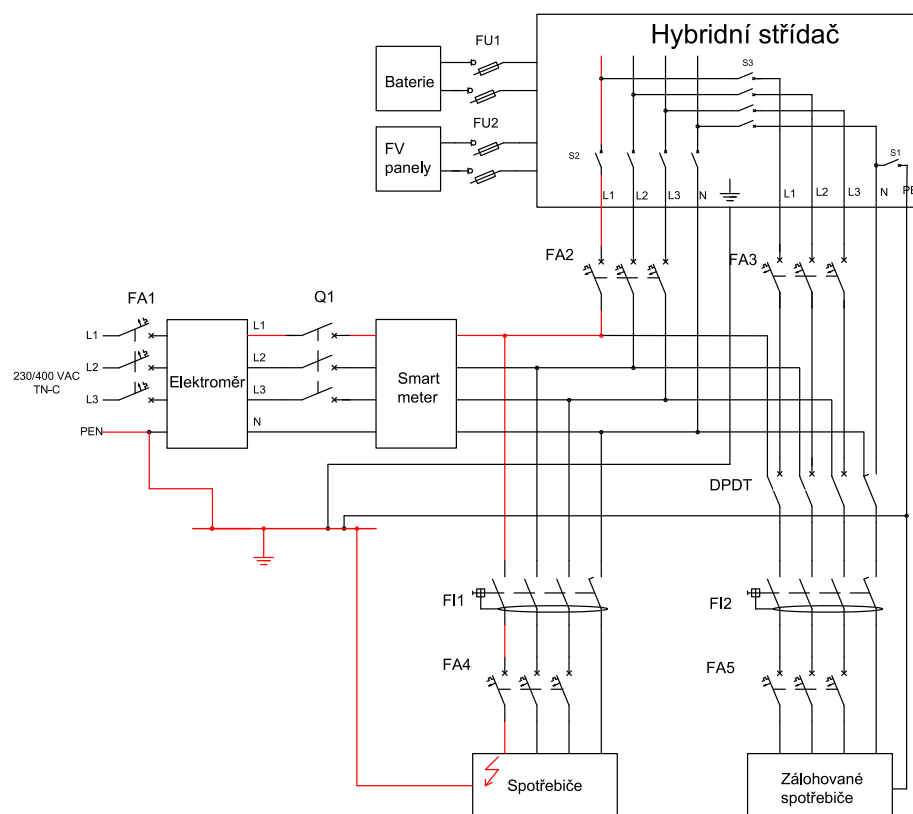
- ochrana proti přepětí nebo podpětí O/UVP;
- ochrana proti nadfrekvenci nebo podfrekvenci O/UFP;
- míra změny frekvence nebo výkonu ROCOF/P;
- detekce fázových skoků PJD. [18]

4.3 Detekce a omezení zkratového proudu

Detekce zkratu musí být velmi rychlá a existují pro to následující metody, které však mají jisté nedostatky. První metodou je měření napětí nasycení kolektoru a emitoru IGBT tranzistoru. Ta však vyžaduje potřebnou dobu na ustálení, který zvyšuje odezvu detekce. Odpojení tranzistorů při této metodě je přibližně 10 μ s, kdy však dochází k vysokému tepelnému a elektrickému namáhání tranzistoru a tranzistor může být poškozen. Další metodou je měření proudu střídače. Při překročení přípustné hodnoty proudu je spuštěn ochranný algoritmus a dojde k vypnutí zařízení, to však také může vést ke zničení zařízení, protože se již střídač nachází mimo bezpečnou pracovní oblast. Mezi další metody ochrany zařízení před zkratem je sledování derivace proudu v čase di/dt , ta však trpí chybnou detekcí zkratových stavů (kvůli vzorkovací frekvenci). Další metodou je využití ochranné cívky se dvěma vinutími. První vinutí slouží k omezení nárůstu zkratového proudu a druhé slouží ke spuštění tyristoru, který poskytuje cestu pro zkratový proud a chrání střídač před poškozením. [19] Velikost a průběh zkratového proudu závisí na napětí zdroje, impedanci poruchové smyčky a okamžiku vzniku.

4.3.1 Paralelní provoz hybridního střídače se sítí

Na obrázku 4.5 je třífázový hybridní střídač připojen do sítě TN-C-S a na straně spotřebičů vznikla porucha v první fázi vůči neživé vodivé části. Přepínač sítě DPDT je zapojen na stranu sítě a uvnitř střídače je spínač S2 v sepnutém stavu. Spínače S1 a S3 jsou v rozepnutém stavu. V bezporuchovém stavu se hybridní střídač pokrývá spotřebu v objektu a Smart meter se snaží udržovat nulový výkon dodávaný do sítě. V případě poruchy je poruchový proud pomocí ochranného vodiče odváděn směrem ke zdroji, kterým je hybridní střídač a distribuční síť. Na poruchový proud by měl v odpovídajícím čase zapůsobit příslušný jistící prvek. Jelikož je střídač v paralelním spojení se sítí, je v případě poruchy k dispozici dostatečný zkratový výkon k vybavení příslušného jistícího prvku nejbližší místu poruchy.



Obrázek 4.5 Porucha spotřebiče v systému s hybridním střídačem připojeným k síti

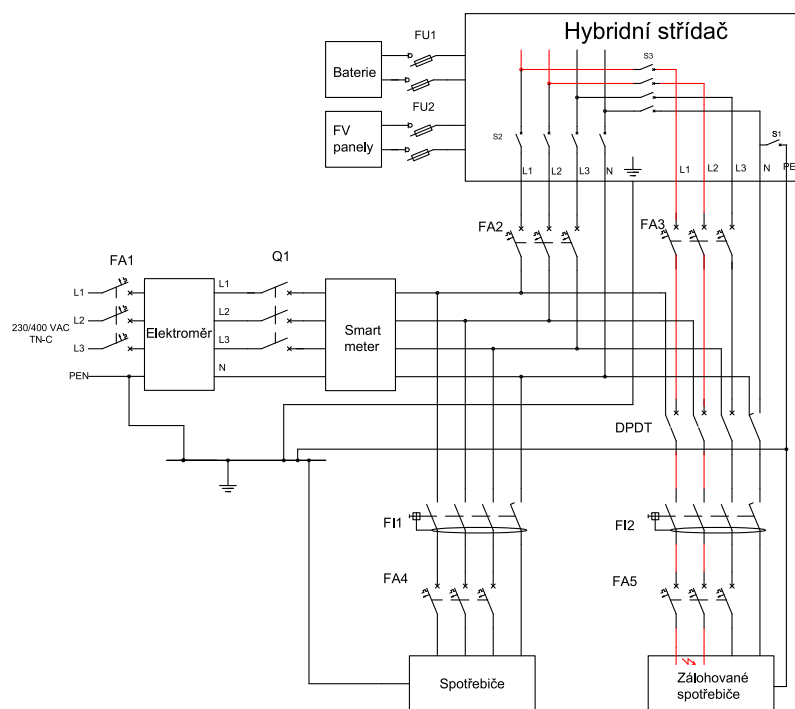
V instalaci může nastat situace, že dojde k přerušení ochranného vodiče PE na spotřebiči třídy ochrany I (vodivá neživá část musí být připojena na ochranný vodič). V případě, že dojde k poruše na spotřebiči (svod nebo zkrat na neživou část), bude na vodiči PE a ostatních neživých částech k němu připojených nebezpečné dotykové napětí, které však nevybaví nadproudové přístroje, jelikož nemůže dojít k uzavření poruchové smyčky. Uzavření nastane až ve chvíli přímého dotyku osoby s postiženou částí spotřebiče, kdy důsledkem překročení reziduálního proudu vybaví proudový chránič FI1. Další rizikovou situací v instalaci může dojít k přerušení nulového vodiče N. V této situaci je napětí zátěží připojených na různé fáze rozděleno v závislosti na jejich vnitřní impedanci a objeví se napětí i na přerušené části vodiče N. V tomto stavu hrozí poškození připojených elektrických spotřebičů vlivem přepětí. Podobná situace nastane v případě sítě TN-C, kde funkci ochranného a nulového vodiče tvoří jeden společný vodič PEN. Jeho přerušením se na neživých částech spotřebičů objeví nebezpečné dotykové napětí.

4.3.2 Ostrovní provoz hybridního střídače

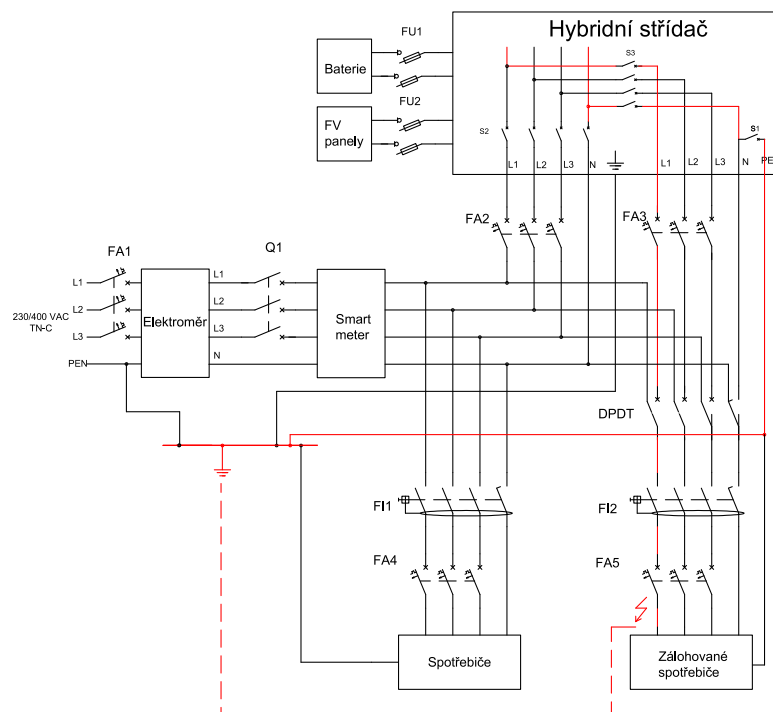
Budou zde uvedeny některé z poruch, které mohou vzniknout. Jedná se o poruchu na zálohovaném spotřebiči, kdy došlo ke spojení fázového vodiče vůči uzemněné neživé části spotřebiče (obrázek 4.6), dvoufázový zkrat (obrázek 4.7) a porucha v části instalace,

Nyní je zdroj elektrické energie pouze hybridní střídač, který je odpojen od distribuční sítě. Spínač S1 a S3 je v sepnutém stavu a S2 v rozepnutém stavu. Přepínač sítí DPDT je přepojen na napájení ze střídače.

38



Obrázek 4.7 Dvoufázová porucha spotřebiče v instalaci s hybridním střídačem v ostrovním provozu



Obrázek 4.8 Porucha v části instalace s hybridním střídačem v ostrovním provozu

4.4 Detekce rezistence izolace pole

Jedná se o ochranu stejnosměrné strany střídače, tedy fotovoltaického pole. Nejdříve je potřeba definovat jaké mohou být způsoby provozu fotovoltaického pole. Uzemněné pole má jeden vodič úmyslně spojený s uzemněním pomocí prostředků, které splňují požadavky na ochranné pospojování za účelem vyšší bezpečnosti. Za systém uzemněného pole se nepovažuje uzemnění síťového obvodu neizolovaného střídače. Je důležité rozlišit funkčně uzemněné pole, které má jeden vodič úmyslně připojený na uzemnění, ale pro jiné účely, než je bezpečnost a pomocí prostředků, které nesplňují požadavky na ochranné pospojování. Uzemnění se provádí přes impedanci nebo jen dočasně z výkonnostních nebo funkčních důvodů, proto systém nemůže být považován za uzemněný. Fotovoltaické pole, které nemá uzemněný žádný z vodičů se považuje za neuzemněné nebo také plovoucí. Všeobecné požadavky na ochranné opatření podle typu izolace střídače a uzemnění pole jsou v tabulce 4.1. [20]

Tabulka 4.1 Požadavky na izolaci střídače a uzemnění pole [20]

Uzemnění pole:	Neuzemněné nebo funkčně uzemněné	Neuzemněné nebo funkčně uzemněné	Uzemněné
Izolace střídače:	Neizolovaný	Izolovaný	Izolovaný
Minimální požadavky na izolaci střídače	-	Základní nebo zesílená izolace a typové zkoušení svodového proudu (nebezpečí úrazu a požáru) pro určení požadavků na rezistenci uzemněného pole a detekce reziduálního proudu	
Měření rezistence izolace uzemnění pole	Před zahájením provozu. Po poruše se signalizuje porucha a nesmí dojít k připojení k síti. Měření je prováděno za normálních podmínek i při zemní poruše v PV poli.	Před zahájením provozu. Po poruše se u izolovaných střídačů s vyhovující izolací, která omezuje svodové proudy signalizuje porucha, u izolovaných střídačů s nevyhovující izolací se indikuje porucha a nedojde k připojení k síti	Není požadováno
Detekce reziduálního proudu pole	Buď je mezi střídačem a sítí RCD s nastaveným reziduálním proudem 30 mA nebo je požadováno nepřetržité monitorování reziduálního proudu i jeho nadměrné změny. Po poruše se střídač vypne, odpojí od sítě a signalizuje poruchu.	Neplatí pro střídače s vyhovující izolací omezující svodový proud. Střídače s nevyhovující izolací vyžadují nepřetržité monitorování reziduálního proudu nebo náhlých změn nebo použití RCD. Po poruše se střídač vypne, odpojí od sítě a signalizuje poruchu.	

Smyslem detekce a odezvy rezistence izolace pole proti uzemnění je snížení nebezpečí vzniku požáru nebo úrazu elektrickým proudem v důsledku nechtěného spojení pole a uzemnění. V případě připojení neizolovaného střídače, který nemá alespoň jednoduché oddělení mezi FV polem a sítí, vlivem zemní poruchy pole vznikne potenciálně nebezpečný proud vzhledem k uzemněnému nulovému vodiči sítě. V takovém stavu nesmí dojít k připojení do sítě. U izolovaného střídače je možné připojení do sítě i v případě jedné zemní poruchy, jelikož vnitřní oddělení střídače neumožní zpětnou cestu poruchového proudu uzemněným nulovým vodičem. Pokud však nastane i druhá zemní porucha, tak již dojde k průchodu poruchového proudu. [20]

4.4.1 Detekce rezistence izolace pole u střídačů pro neuzemněná pole

Pro takto provozovaná FV pole musí být střídače vhodně přizpůsobeny, aby mohly měřit DC izolační rezistenci od FV vstupu k uzemnění. V bezporuchovém stavu platí pro izolační rezistenci následující nerovnost:

$$R > \frac{V_{MAX PV}}{30 mA} (\Omega) , \quad (4.1)$$

kde $V_{MAX PV}$ (V) je maximální napětí FV vstupu a mez dotykového proudu je 30 mA. Pokud je změřená hodnota menší, musí izolovaný střídač signalizovat poruchu, dokud se hodnota neobnoví nad stanovenou mez a jeho provoz je dále povolen. Neizolovaný střídač musí signalizovat poruchu, musí být odpojen od sítě a dále provádí měření, dokud není naměřená hodnota vyšší, než zmíněná mez. [20]

4.4.2 Detekce rezistence izolace pole u střídačů pro funkčně neuzemněná pole

Funkčně uzemněné pole vznikne uzemněním pole pomocí záměrné rezistence, která je součástí střídače. Při jejím návrhu je nutné zvážit, zda přidáním rezistence nevníkne vyšší nebezpečí úrazu elektrickým proudem. Celková rezistence pole je dána úmyslnou rezistencí, očekávanou izolační rezistencí pole vůči zemi a rezistencí jiných sítí spojených s uzemněním a nesmí být menší, než je dána rovnicí (4.1). Pokud toto není splněno, je nutno střídač vybavit vhodnými prostředky detekce za provozu, aby v případě, že celkový proud procházející přes připojenou impedanci a ostatní sítě v paralelním připojení s ní přesáhl hodnoty reziduálního proudu, musí být proud omezen nebo musí být impedance odpojena. V případě neizolovaného střídače musí být střídač odpojen od sítě. [20]

4.5 Monitorování reziduálního proudu

Nebezpečí úrazu elektrickým proudem mohou způsobit neuzemněná pole v případě, že dojde k dotyku živých částí a zároveň existuje cesta pro návrat dotykového proudu. Zároveň pokud se osoba dotkne současně živých částí a uzemnění u neizolovaného střídače nebo střídače, který má izolaci s nedostatečnou schopností omezení dotykového proudu, způsobí připojení sítě k uzemnění zpětnou cestu dotykového proudu. Tomu lze předejít pomocí proudových chráničů nebo monitorováním reziduálního proudu. Neplatí

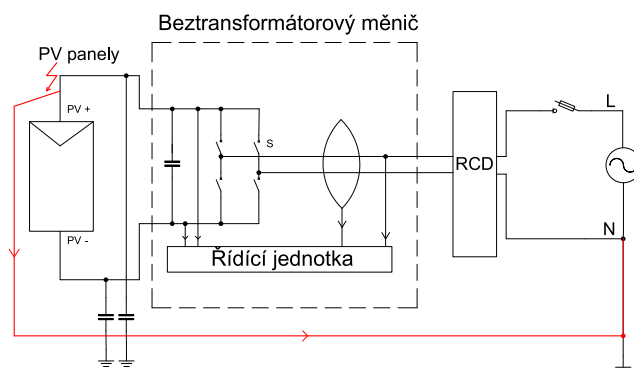
to však pro izolované střídače, které omezují dotykový proud na menší hodnotu než 30 mA. [20]

Izolace střídače musí vyhovovat mezím svodového proudu, který může způsobit nebezpečí požáru nebo úraz elektrickým proudem. Pokud tyto meze nejsou splněny, je vyžadováno podle tabulky 4.1 monitorování reziduálního proudu, které musí fungovat vždy, když je střídač připojen k síti. Sleduje se trvalý reziduální proud, při jehož překročení se musí střídač odpojit od sítě do 0,3 s, pokud je maximální reziduální proud 300 mA u střídačů do jmenovitého výstupního výkonu 30 kVA nebo 10 mA na každou 1 kVA u střídačů s výkonem nad 30 kVA. Další měření jsou náhlé změny reziduálního proudu, kdy podle jejich velikostí norma určuje maximální dobu odpojení střídače od sítě, které jsou v tabulce 4.2. U některých systémů mohou být požadovány oba způsoby detekce. [20]

Tabulka 4.2 Meze doby odezvy náhlé změny reziduálního proudu [20]

Náhlá změna reziduálního proudu	Maximální doba odpojení střídače od sítě
30 mA	0,3 s
60 mA	0,15 s
150 mA	0,04 s

Na obrázku 4.9 je uveden příklad neizolovaného střídače s připojeným neuzemněným polem, který je připojen do sítě s uzemněným nulovým vodičem, který slouží jako zpětná cesta poruchového proudu, který vznikl při zemní poruše na DC straně, přes neizolovaný střídač. Monitorovací systém RCMU uvnitř střídače tento proud detekuje a vyhodnotí jako poruchu, pokud přesahuje proudy podle tabulky 4.2. Pokud střídač konstrukčně neomezuje stejnosměrné reziduální proudy na 6 mA nebo méně, je nutné pro ochranu elektrické instalace zvolit proudový chránič typu B, tuto nutnost by měl uvádět výrobce v příslušné dokumentaci. Vnitřní systém RCMU slouží k chránění PV pole a nemůže tak nahrazovat funkci proudového chránič na střídavé straně. [21]



Obrázek 4.9 Monitorování reziduálního proudu [21]

4.6 Jistící přístroje

Jištění fotovoltaických zdrojů lze rozdělit do dvou částí, na jištění na stejnosměrné a střídavé straně, z nichž každé má své specifika. Na stejnosměrné straně je důležité jištění modulů proti zpětnému proudu, který může vzniknout při poruše na fotovoltaických panelech. Ve většině případů v ČR je stejnosměrná strana FV zdrojů provozována jako izolovaná, a proto například v případě dvojnásobného zemního spojení, jsou řetězce namáhány zpětným proudem, který vlivem tepelných účinků může vážně poškodit FV moduly. Tomu lze předejít použitím pojistkové vložky, jejíž jmenovitý proud bývá předepsán výrobcem nebo je stanoven velikostí zpětného proudu. Ochranu proti zpětnému proudu lze provést nejen pojistkami, ale i jističi nebo diodami, které jsou zapojeny v závěrném směru, vzhledem k zpětnému proudu. V praxi bývají řetězce modulů spojeny paralelně do skupiny pomocí stejnosměrného vedení a jsou chráněny pojistkami řetězců, které chrání vedení proti přetížení a zároveň moduly proti zpětným proudům. [6]

Na střídavé straně slouží jistící přístroje k zajištění podmínek ochrany automatickým odpojením od zdroje v případě poruchy a také k ochraně proti nadproudům (přetížení, zkrat) v samotné elektroinstalaci spotřebitele. Velmi důležitou součástí návrhu jistících přístrojů je selektivita. Selektivita spočívá v tom, že v případě poruchy dojde vlivem nadproudu k vybavení jistícího přístroje v té části elektrického rozvodu, kde došlo k poruše. Selektivitu uvádí ČSN 33 2000-1 ed.2. v části 314: „Každé elektrické zařízení a elektroinstalace musí mít obvody členěné do více částí s cílem zabránit nebezpečí a nejmenší možnou míru omezit potíže v případě poruchy.“ Jednotlivé jistící přístroje se nazývají směrem blíže ke zdroji jako předřazené a blíže k poruše přiřazené. Selektivitu lze posuzovat pouze v určité oblasti nadproudů vzájemnou polohou vypínacích charakteristik. Při vyšších nadproudech je selektivita vyšetřována na základě provedených zkoušek. [6]

Jištění střídače proti nadproudu k uzemnění není požadováno v případě zařízení, které nemá připojení k uzemnění nebo má dvojitou či zesílenou izolaci mezi živými částmi a všemi ostatními, které jsou připojené na uzemnění. V návodu pevně instalovaného střídače musí být uvedena specifikace potřeby pro požadovanou ochranu před zkratem či přetížením. [22]

4.6.1 Jistič

Z důvodu komfortu obsluhy a častému vypínání byl vyvinut jistič jako náhrada za pojistky. Jeho velkou výhodou je, že při vybavení lze opět zapnout, kdežto pojistku je po jejím přetavení nutno vyměnit. Po jeho zapnutí je schopen vést proudy a v případě poruchy ve stanovené době samočinně vypínat proudy až do mezí své vypínací schopnosti. Pro detekci nadproudu slouží u jističe spoušť, která podle jeho velikosti zapůsobí vypínací mechanismus ve stanovené době na západku volnoběžky. Jedná se o klasickou spoušť tepelnou, tvořenou bimetalem a elektromagnetickou, která rychle

reaguje na zkrat. Větší jističe mají elektronickou spoušť, která je řízena mikroprocesorem. Jistič obsahuje zhášecí systém ve formě komory, která je tvořena kovovým roštem. Při rozpojení obvodu vznikne elektrický oblouk, který je vlivem magnetického pole vháněn do komory, kde je rozdělen na několik částí kovovým roštem, čímž dojde k jeho uhasnutí. V této kapitole se budeme zabývat především malými jističi (MCB), kterými se zabývá norma EN 60898-1. Své uplatnění nachází především v domovních instalacích. Jejich jmenovité proudy jsou do 125 A. [23]

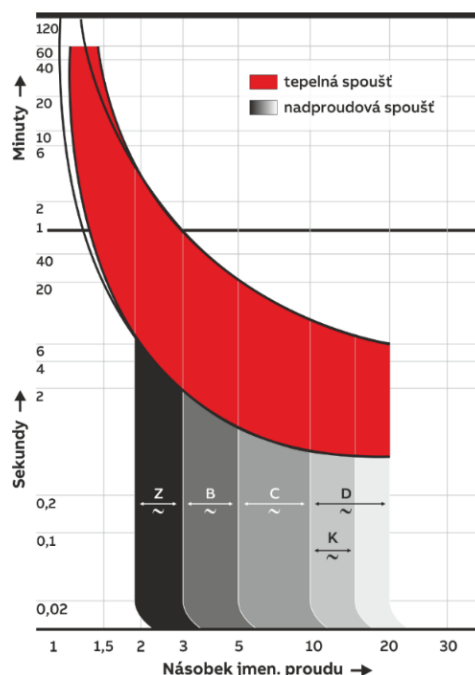
Chování jističe při nadproudech je zaznamenáno v jeho příslušné vypínací nebo též charakteristice. Jinými slovy udává za jak dlouho daný jistící prvek vypne konkrétní nadproud. Udává se ve studeném stavu, tedy bez předchozího zatížení přístroje. Malé jističe mají podle normy působení tepelné spouště předepsáno několika smluvenými dobami pro jističe se jmenovitým proudem I_n do 63 A:

- smluvený nevypínací proud jističe, jistič nesmí vypnout při $1,3 \times I_n$ po dobu 1 h;
- smluvený vypínací proud jističe, jistič musí vypnout $1,45 \times I_n$ do doby 1 h.

Dále pak musí jistič se jmenovitým proudem do 32 A včetně vypnout proud $2,55 \times I_n$ ve vymezeném čase od 1 do 60 s a jistič se jmenovitým proudem nad 32 A musí vypnout v rozmezí 1 a 120 s. [24]

Vypínací charakteristiky jističů jsou na obrázku 4.10. Liší se nastavením zkratové spouště, které se podle účelu dělí na typ B, C, D, K a Z. Rozdělení je následující:

- typ B – určené pro jištění vedení nebo elektrických obvodů bez proudových rázů. Jedná se o běžné jističe v domovních instalacích. Jejich zkratová spoušť je nastavena na $(3 \div 5) \times I_n$;
- typ C – pro jištění elektrických obvodů, které způsobují proudové rázy. Zkratová spoušť působí na $(5 \div 10) \times I_n$;
- typ D – jištění vedení a elektrických obvodů, které způsobují vysoké proudové rázy, určena například pro jištění motorových zátěží. Spoušť je nastavena na $(10 \div 20) \times I_n$;
- typ K – jištění motorů s velkými proudovými rázy. Zkratová spoušť je nastavena na $(10 \div 14) \times I_n$;
- typ Z – použití pro citlivá elektronická zařízení. Zkratová spoušť působí při $(2 \div 3) \times I_n$.



Obrázek 4.10 Vypínací charakteristika jističů [25]

4.6.2 Pojistka

Jsou to nejstarší přístroje, které slouží k přerušení nadproudů. Pojistkou se nazývá kompletní přístroj, který se skládá z pojistkové vložky (část pro výměnu) a pojistkového spodka, což je pevná část pojistky, která obsahuje kontakty a svorky. Princip spočívá v přetavení tavného vodiče, který představuje nejslabší místo v chráněném obvodu. Při jeho přetavení dochází ke vzniku elektrického oblouku, který je účinně chlazen křemičitým pískem a deionizuje výboj, až dojde k následnému uhašení a tím se přeruší elektrický obvod. U jednoduchých trubičkových pojistek se používá jako hasivo vzduch, u výkonových pojistek je nejčastěji použito zrnité hasivo, které představuje křemičitý písek o různé zrnitosti a jeho míry hutnění, která je dána jmenovitým proudem. Pro velmi rychlé přetavení velkých proudů se provádí úprava tavného vodiče pomocí zkratových můstků, které jsou dány napětím. U malých nadproudů se používá úprava cínovou pájkou. Průchodem nadproudu dojde k roztavení pájky a difuzi do materiálu tavného vodiče. Slitina tak má větší odpor a menší teplotu tavení. Typy pojistkových vložek lze vidět na obrázku 4.11. Zleva se nachází trubičková pojistka, dále pak pojistka, která je určena pro nekvalifikované osoby, a nakonec pojistky určené kvalifikovaným osobám.



Obrázek 4.11 Typy pojistkových vložek [26]

Rozdělení pojistkových vložek podle rozsahu vypínání:

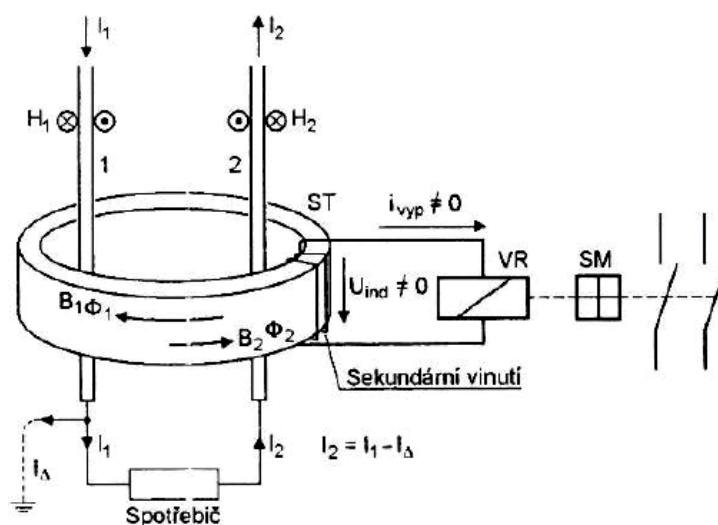
- třída g – je určena pro vypínání všech typů nadproudů, obsahují cínovou pájku;
- třída a – přerušuje proudy mezi minimální hodnotou až její vypínací schopností, proto jsou určeny především pro ochranu proti zkratu.

Typy vložek podle kategorie užití:

- třída G/L – určené pro všeobecné použití;
- třída M - jištění motorových obvodů;
- třída R – jištění polovodičů, velká omezovací a vypínací schopnost;
- třída Tr – jištění distribučních transformátorů.

4.7 Proudový chránič

Proudový chránič (RCD) je elektrický přístroj, který je součástí prostředků ochrany při poruše a doplňkové ochrany. Není však určen k vypínání nadproudů. Jeho srdcem je součtový transformátor, jímž prochází všechny pracovní vodiče. V bezporuchovém stavu je vektorový součet proudů pracovních vodičů roven nule, v důsledku toho je i magnetický tok v jádře nulový. Pokud však dojde k poruše, kdy je proud odváděn mimo pracovní vodiče, tj. například lidským tělem při dotyku předmětu pod napětím nebo ochranným vodičem vznikne tzv. reziduální neboli poruchový proud, který vyvolá v součtovém transformátoru nerovnováhu magnetického toku a na jeho sekundární cívce naindukuje napětí, na kterém je připojeno velmi citlivé relé, které zapůsobí na vybavovací mechanismus silových kontaktů. Z jeho principiálního schématu je zřejmé, že nesmí být použit v sítích TN-C. V sítích TT se musí použít jako ochrana při poruše. Vnitřní zapojení proudové chrániče je zřejmé z následujícího obrázku 4.12. V AC sítích je proudový chránič, jehož reziduální proud nepřekračuje 30 mA považován jako doplňková ochrana před úrazem elektrickým proudem a iniciací požáru. Jeho citlivost je dána velikostí reziduálního proudu. [27]



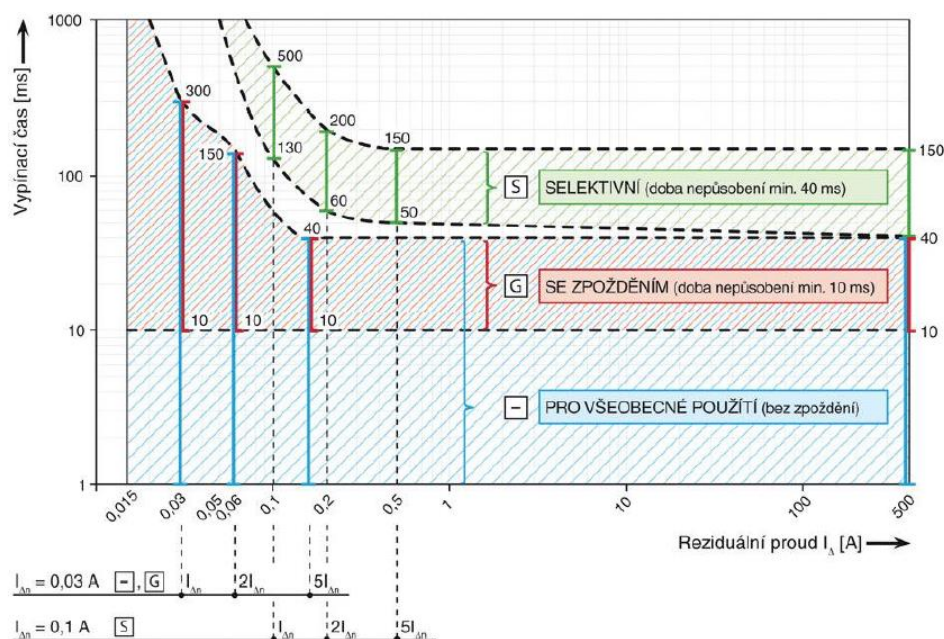
Obrázek 4.12 Principiální schéma RCD [12]

Proudové chrániče se rozlišují podle citlivosti na různé druhy reziduálních proudů:

- typ AC – reaguje pouze na střídavé sinusové reziduální proudy;
- typ A – reaguje na střídavé i pulsující stejnosměrné reziduální proudy;
- typ B – reaguje na všechny proudy jako typ A včetně hladkých stejnosměrných proudů.
- typ F - reaguje i na reziduální proudy vyšších frekvencí, ale až při vyšších hodnotách, jelikož proudy vyšších frekvencí nejsou tak nebezpečné, jako na nominální frekvenci;
- typ B+ - reaguje na reziduální proudy stejně jako typ B, ale při vyšších frekvencích reagují při nižších násobcích reziduálního proudu;

Dále se dělí podle zpoždění při vypínání, respektive minimální doby nepůsobení a rázové odolnosti:

- typ - - všeobecné použití, bez zpoždění;
- typ G – rázově odolný, má stanovenou minimální dobu nepůsobení na 10 ms;
- typ S – označován jako selektivní, minimální doba nepůsobení je 40 ms, své využití nachází při selektivním řazení více chráničů za sebou. [27]



Obrázek 4.13 Vypínací charakteristika proudového chrániče [12]

V domovních elektroinstalacích je nutné pro zásuvky užívané laiky do 32 A včetně použít proudové chrániče s reziduálním proudem nepřevyšujícím 30 mA. V případě světelných okruhů v občanské výstavbě nesmí chránič chránit více jak jeden světelný obvod. Pro iniciaci požáru ve stavbách zcela nebo z části ze dřeva je nutné použít proudový chránič s reziduálním proudem nepřevyšující 300 mA. Dále pak je nutné použití RCD například pro obvody napájející karavany na parkovacích místech v kempech. [12]

U měničů, které nemají alespoň jednoduché oddělení mezi DC a AC, je nutné na výstupu použít proudový chránič typu B, který reaguje i na nezměnný stejnosměrný proud, který by se v případě poruchy mohl objevit na střídavé straně měniče. Zmíněné oddělení je zajištěno střídačem, který je vybaven oddělovacím transformátorem. Takto konstruovaný střídač je považován za izolovaný, jelikož představuje oddělení mezi síťovými a PV obvody. [16] Před zahájením provozu střídače je nutné v celé instalaci vyměnit nevyhovující typy chrániče. Pokud je provedena změna v ověřeném rozvaděči, je nutné provést nové ověření včetně kusové zkoušky. Pouze v případě, že je rozvaděč považován za úplný kryt, se nemusí provádět kusová zkouška.

4.8 Přepět'ová ochrana

Vzhledem k vysokým pořizovacím cenám fotovoltaických elektráren je velmi důležitou součástí při projektování celého systému i návrh ochrany před účinky bleskového proudu a přepětí. Ochrana proti účinkům bleskového proudu (LPS) se dělí na vnější a vnitřní ochranu. Vnější ochrana sestává z jímacího zařízení, svodu a uzemnění a jejím úkolem je

bezpečné svedení bleskového proudu do země. Vnitřní ochrana sestává z přepětových ochran SPD (svodič bleskového proudu nebo svodič přepětí). Tvoří potřebná opatření proti nebezpečným účinkům bleskového proudu a jeho elektromagnetického pole. Přepětová ochrana funguje na principu vyrovnání potenciálu uvnitř budovy. V bezporuchovém stavu se vykazují svým vysokým izolačním odporem. Při výskytu přepětí svůj odpor sníží na velmi malou hodnotu, čímž je vysoká energie přepětí odvedena do obvodu ochranného pospojení v objektu a sníží tak přepětí na dovolenou mez. Správná volba ochrany je na základě výpočtu rizik podle normy ČSN EN 62305-2 ed.2. Rozlišují se tři stupně přepětové ochrany podle ochranné hladiny U_p :

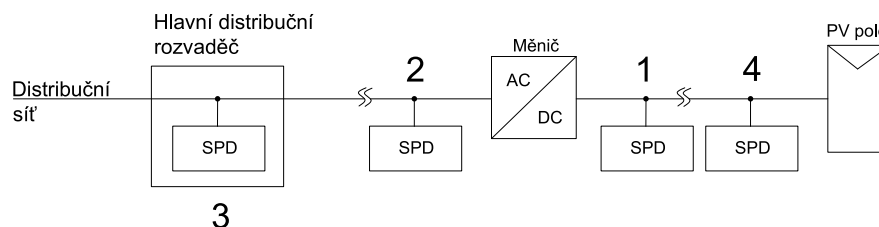
- Stupeň T1 (třída B): funkčním prvkem je jiskřiště (větší impulsní proudy) nebo varistor (menší impulsní proudy), snižuje přepětovou hladinu 4 kV;
- Stupeň T2 (třída C): funkčním prvkem je varistor, ochranná hladina 2,5 kV;
- Stupeň T3 (třída D): funkčním prvkem je varistor nebo supresorové diody, ochranná hladina 1,5 kV.

Pro zajištění správné funkce musí být při řazení přepětových ochran zajištěna koordinace mezi jednotlivými stupni. Stupně T3 musí být instalovány co nejbližně chráněnému zařízení, přičemž vzdálenost mezi stupněm T2 a T3 musí být minimálně 5 metrů. Pokud se chráněné zařízení nachází ve vzdálenosti 10 metrů od třídy ochrany T3 je nutné ochranu opakovat. Koordinace mezi prvním a druhým stupněm v odděleném provedení je zajištěna, pokud jejich vzájemná vzdálenost je minimálně 10 metrů. Existují i přepětové ochrany v kombinovaném provedení třídy T1 a T2, kdy je koordinace mezi stupni zajištěna technologií elektronické zapalovací spouště.

Pokud má daný objekt systém vnější ochrany před bleskem musí všechny silové, i datové kabely či kabelové trasy být odděleny od všech částí vnější ochrany. K tomu je nutné vypočítat a dodržet dostatečnou přeskokovou vzdálenost podle normy ČSN EN 62305-3. Pokud tato podmínka nemůže být dodržena, musí být FV instalace galvanicky spojena mezi vnější ochranou a rámy či nosnou konstrukci FV panelů. Jelikož se může bleskový proud dostat do instalace, je nutné instalovat SPD typu T1 nebo kombinované provedení T1+T2. Pokud je dodržena dostatečná přeskoková vzdálenost nebo objekt neobsahuje vnější ochranu před bleskem, postačuje použití SPD třídy T2. Volba přepětových ochran na DC straně musí být na základě maximálního napětí naprázdno FV pole, které bývá nejvyšší za mrazivých slunečních dnů. [16]

Ochrana střídavé AC strany chrání proti přepětí, které může přicházet z veřejné distribuční sítě. Pokud je střídač alespoň 10 m od místa instalace, musí být přepětové ochrany instalovány v blízkosti měniče. Volba typu a umístění přepětových ochran závisí na způsobu přívodního vedení do objektu, míře rizika příčin atmosférického přepětí, instalaci vnější ochrany před bleskem a další. Musí být vždy na vstupu do budovy či v hlavním rozvaděči. Vzdálenost mezi SPD na straně AC a DC umístěné v samostatných rozvaděcích musí být co nejmenší. Měděný vodič spojující SPD k ochranné svorce musí

mít pro typ ochrany T1 průřez 16 mm² a T2 6 mm². [16] Příklady použití přepět'ových ochran jednotlivých místech elektrické instalace je možné vidět na následujícím obrázku.



Obrázek 4.14 Příklady instalace přepět'ových ochran v objektu [16]

Podle provedení vnější ochrany před bleskem a dodržení bezpečné vzdálenosti se odvíjí správná volba třídy SPD, viz. následující tabulka.

Tabulka 4.3 Umístění SPD v elektrické instalaci [16]

Umístění	SPD v místě 3	SPD v místě 2	SPD v místě 1 a 4
Instalace SPD v případě objektu bez LPS	SPD třídy T2, podle EN 61643-11, vyžadováno HD 60364-5-53	SPD třídy T2, podle EN 61643-11	SPD třídy T2, podle EN 50539-11
Instalace SPD v případě objektu s LPS, dodržení vzdálenosti s	SPD třídy T1, podle EN 61643-11, vyžadováno HD 60364-5-53	SPD třídy T2, podle EN 61643-11	SPD třídy T2, podle EN 50539-11
Instalace SPD v případě objektu s LPS, nedodržení vzdálenosti s	SPD třídy T1, podle EN 61643-11, vyžadováno HD 60364-5-53	SPD třídy T1, podle EN 61643-11	SPD třídy T1, podle EN 50539-11

5. TESTOVÁNÍ

K ověření požadavků na bezpečnost střídače a elektrické instalace fotovoltaického systému s hybridním střídačem bude představena řada testů, na kterých bude demonstrováno chování střídače při poruchách, které mohou vzniknout v rámci instalace v ostrovním provozu. Dále bude představena problematika testování detekce ostrovního provozu a závěr kapitoly je věnován měření na přepínači sítí, na kterém bude poukázáno na rizika ohrožující bezpečnost. Výstupem testovacích procedur bude ověření souladu s normami předepisující bezpečnost elektrické instalace, případné doporučení úpravy či doplnění ochranných opatření ke zvýšení bezpečnosti celého systému.

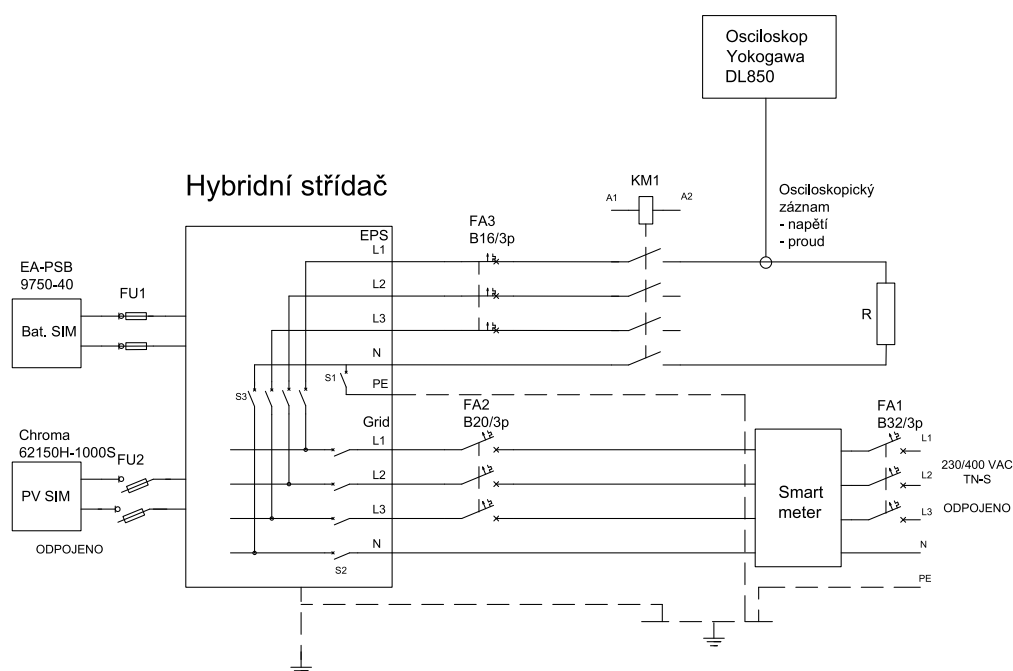
5.1 Zkouška přetížení a zkrat

Všeobecné podmínky a požadavky na zkoušení střídačů pro konkrétní druh nebezpečí vychází z normy ČSN EN 62109-1 a ČSN EN 62477-1. V tomto případě se budeme zabývat přetížení a zkratem na výstupu. Uvedená norma předepisuje zkušební postupy pro zmíněné poruchy pro nejnepríznivější podmínky. Přetížení bude testováno do okamžiku zhroucení napětí na výstupu, kdy střídač přejde do řízení proudového zdroje. Zkrat bude proveden mezi jednou fází a nulovým vodičem a budou zaznamenány efektivní a vrcholové hodnoty proudu a napětí. Doba trvání zkratu je od okamžiku připojení poruchy do doby přerušení provozu střídače nebo jistícím prvkem.

Účelem následujícího měření je představení chování hybridního střídače při poruše, který je odpojen od distribuční sítě a pracuje v ostrovním provozu. Výstup střídače bude postupně zatěžován odporovou zátěží, která je nastavena pro zajištění přetížení 150%, 200 % a 250 % vzhledem ke jmenovitému výkonu na fázi zálohovaného výstupu střídače. Uvedené přetížení demonstruje poruchu na zálohované straně. Posledním testem je zkrat mezi fází L1 a nulovým vodičem N. Výsledkem měření bude záznam průběhu napětí a proudu v jedné fázi. Dále bude specifikován čas poruchy, přenesený náboj do poruchy a s tím související elektrická energie poruchy a také parametry napětí a proudu do poruchy.

5.1.1 Popis zapojení

Testovaným střídačem je hybridní střídač s beztransformátorovou koncepcí. Zálohovaná část výstupu hybridního střídače má jmenovitý výkon 6000 VA, jmenovitý proud 8,7 A a špičkový výkon 12000 W po dobu 60 s. Nominální výkon na fázi je tedy 2000 VA. Schéma zapojení vychází z obrázku 5.1. Zapojení obsahuje nadproudové jistící přístroje a stykač KM1 pro připojení poruchy a tím stanovení počátku doby poruchy. Zátěž demonstrující přetížení byla provedena vhodně nastaveným odporem pro konkrétní hodnotu přetížení. Výpočet zátěžného odporu vychází z rovnice (5.12). Pro demonstraci chování střídače při poruše nebyly v obvodu zapojeny proudové chrániče.



Obrázek 5.1 Schéma zapojení měření přetížení výstupu střídače

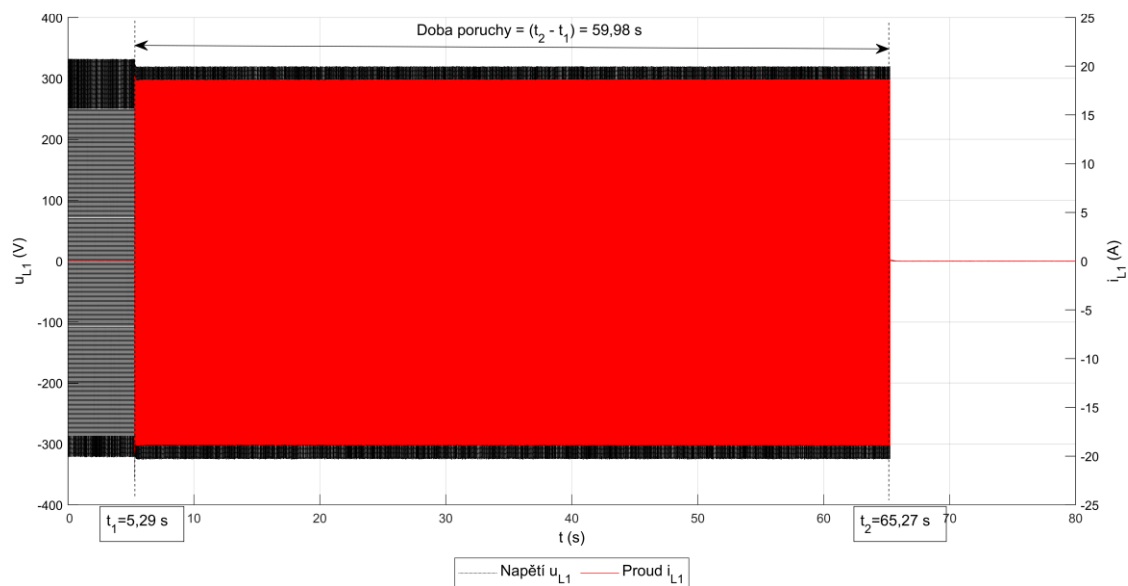
5.1.2 Výsledky měření

Naměřené hodnoty byly zaznamenány osciloskopem a zpracovány ve výpočetním programu Matlab. Zpracování naměřených dat z měřicích přístrojů je součástí přílohy B.1. Na základě údajů o průběhu poruchového proudu byl pomocí integrační programové funkce *trapz* vypočten celkový přenesený náboj do poruchy a s tím související energií poruchy. Nejprve byla nastavena zátěž na simulátoru zátěže a poté bylo provedeno připojení zátěže pomocí stykače KM1.

Jako první měření bylo provedeno přetížení výstupu střídače na úroveň 150 % vzhledem ke jmenovitému zatížení výstupu. Výsledné okamžité hodnoty napětí a proudu v první fázi lze pozorovat na obrázku 5.3. Z naměřených průběhů lze pozorovat, že efektivní hodnota napětí se příliš nezměnila od jmenovité efektivní hodnoty.

Parametry poruchy přetížení 150 %:

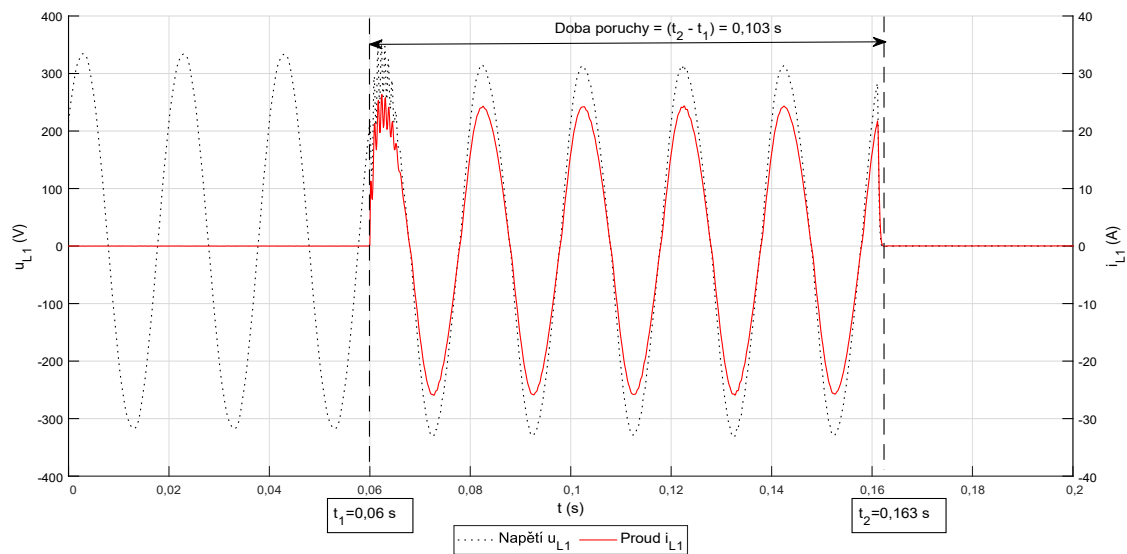
- Čas poruchy: 59,98 s;
- Maximální okamžitá hodnota proudu: 19,1 A;
- Efektivní hodnota proudu: 13,1 A;
- Maximální okamžitá hodnota napětí: 327,1 V;
- Efektivní hodnota napětí: 225,3 V;
- Náboj poruchy: 702,59 C;
- Energie poruchy: 176977,2 J.



Obrázek 5.2 Průběhy napětí a proudu při přetížení 150 %

Parametry poruchy přetížení 200 %:

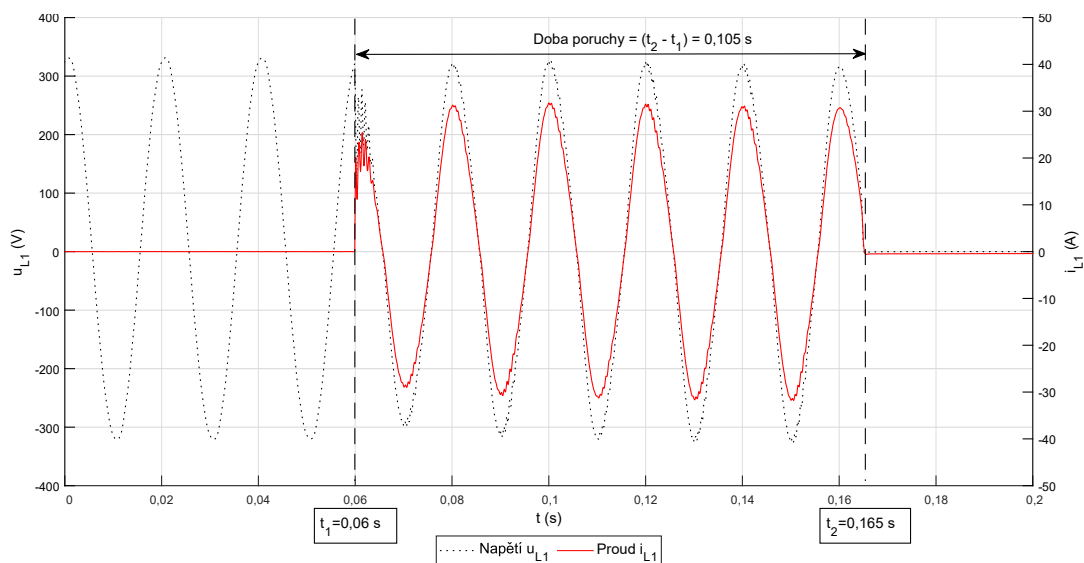
- Čas poruchy: 0,103 s;
- Maximální proud: 26,3 A;
- Efektivní hodnota proudu: 17,3 A;
- Maximální napětí: 356,8 V;
- Efektivní hodnota napětí: 222,1 V;
- Náboj poruchy: 1,58 C;
- Energie poruchy: 393,7 J.



Obrázek 5.3 Průběhy napětí a proudu při přetížení 200 %

Parametry poruchy přetížení 250 %:

- Čas poruchy: 0,105 s;
- Maximální proud: 31,78 A;
- Efektivní hodnota proudu: 21,26 A;
- Maximální napětí: 326,7 V;
- Efektivní hodnota napětí: 218,7 V;
- Náboj poruchy: 2 C;
- Energie poruchy: 489 J.



Obrázek 5.4 Průběhy napětí a proudu při přetížení 250 %

Posledním měřením byl zkrat mezi fází L1 a nulovým vodičem N, který je zobrazen na obrázku 5.5. Pro popis chování byly průběhy rozděleny do dvou částí, z nichž druhá část se dále opakovala čtyřikrát, kdy se střídač snažil znovu připojit. Došlo již ke zhroucení napětí a střídač přešel do režimu proudového řízení.

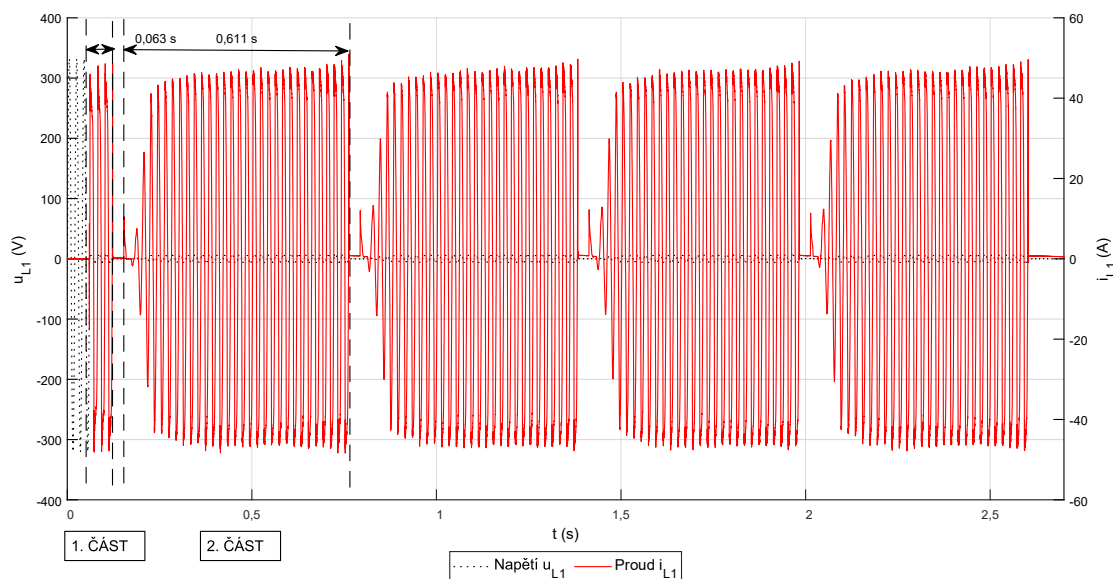
Parametry první části:

- Čas poruchy: 0,063 s;
- Maximální proud: 48,8 A;
- Efektivní hodnota proudu: 34,8 A;
- Maximální napětí: 7,4 V;
- Efektivní hodnota napětí: 4,7 V;
- Náboj poruchy: 10,35 C;
- Energie poruchy: 10,4 J.

Parametry druhé části:

- Čas poruchy: 0,611 s;
- Maximální proud: 51 A;
- Efektivní hodnota proudu: 33,9 A;
- Maximální napětí: 7,5 V;

- Efektivní hodnota napětí: 4,4 V;
- Náboj poruchy: 91,8 C;
- Energie poruchy: 91,8 J.



Obrázek 5.5 Průběhy napětí a proudu při zkratu L-N

5.1.3 Vyhodnocení měření

Při testu přetížení výstupu hybridního střídače nedošlo k výraznému vychýlení efektivní hodnoty napětí, která byla stále v povolených mezích. V případě přetížení 150 % střídač dodával do zátěže potřebný výkon a po době 60 s vyhodnotil přetížení a vypnul se. U přetížení 200 % a 250 % střídač správně detekoval přetížení a odpojil se ve stanovené době, která je podle tabulky 3.2 pro síť TN 0,4 s. Z provedených testů byla v případě přetížení 250 % naměřena doba poruchy 0,105 s. Ani v jednom z provedených testů přetížení nezareagoval jistící prvek, jelikož poruchový proud nedosáhl dostatečné hodnoty pro vybavení.

Z měření zkratu lze pozorovat snahu o opětovné připojení střídače i v případě pokračování zkratového stavu na výstupu střídače. Efektivní hodnota napětí byla snížena na hodnotu 4,4 V a efektivní hodnota proudu byla 33,9 A. Doba poruchy však překročila v tomto případě limity pro odpojení od zdroje v požadované době. Jelikož má střídač omezenou zkratovou schopnost, která odpovídá konstrukci měniče, nebyl střídač schopen dodat potřebný zkratový proud pro vybavení jističe. Norma [9] uvádí možnost uplatnění prostředků ochrany, pokud automatické odpojení od zdroje není možné. Pokud jsou v instalaci výkonové elektronické měniče, jejichž jmenovité napětí překračuje mez efektivní hodnoty střídavého napětí 50 V nebo stejnosměrného 120 V, musí se v případě poruchy napětí mezi živým a ochranným vodičem či zemí snížit na napětí nižší než 50 V střídavého a 120 V stejnosměrného napětí v odpovídajícím čase. Tento požadavek

byl při měření zkratu splněn, jelikož napětí na výstupu střídače bylo sníženo pod efektivní hodnotu 50 V téměř okamžitě. Z hodnot vypočteného náboje a energie poruchy lze konstatovat, že střídač nemůže plnit funkci základního ochranného opatření omezením ustáleného dotykového proudu a náboje, viz. tabulka 3.1. Velikost procházejícího proudu je značná a to může mít vliv na životnost instalace a zvýšení rizika požáru, jelikož určení místa poruchy v rámci celé instalace může být problematické.

Z provedených měření by bylo vhodné použít pro jištění střídavé strany jistič s vypínací charakteristikou „Z“, jehož zkratová spoušť reaguje již při 2 až 3 násobku jmenovitého proudu. V případě, že by nebylo dosaženo ochranné opatření automatickým odpojením od zdroje v odpovídající době, nařizuje norma [9] použití doplňujícího ochranného pospojování, aby napětí mezi současně přístupných předmětů nedosáhlo hodnoty střídavého napětí 50 V a stejnosměrného 120 V.

5.2 Zkouška funkce Anti-island

Postup zkoušky vychází z normy ČSN EN 62116 ed. 2. V případě výpadku napájení ze sítě se musí střídač odpojit v požadované době od distribuční sítě. Ve většině případů lze ostrovní stav detekovat monitorováním napětí a kmitočtu elektrizační soustavy. Může však nastat situace, kdy místní výroba odpovídá zatížení do takového stavu, kdy parametry napětí a frekvence nejsou změněny. Tento stav může přetrvávat po dobu, kdy generování a zatížení je téměř přizpůsobeno. I přesto, že je zmíněný stav málo pravděpodobný, představuje velkou bezpečnostní hrozbu. Nejúčinnějším prostředkem je specifické schéma anti-ostrovního režimu, který je součástí střídače. [17]

5.2.1 Zkušební zařízení

Měřicí přístroj pro sledování tvaru vlny je možné použít přístroj s paměťovou funkcí, digitální osciloskop nebo vysokorychlostní systém sběr dat, aby bylo možné zaznamenat celý průběh od začátku zkoušky ostrovního provozu do chvíle, kdy dojde k odpojení střídače. Pro vícefázová zařízení je nutné monitorovat všechny fáze. Je potřeba monitorovat proud, fázová či sdružená napětí, kmitočet a průtok činného a jalového výkonu na základní harmonické pro správné vyvážení obvodu.

Zdroj stejnosměrného proudu musí poskytnout potřebný výkon, který je specifikován pro daný krok zkoušky. Jako zdroj stejnosměrného proudu je možné použít simulátor PV pole, PV pole nebo stejnosměrný zdroj proudu s omezující sériovou rezistancí. Pokud je střídač schopen pracovat v paralelním propojení se sítí s akumulací baterií, je možné její vstup nahradit stejnosměrným zdrojem proudu, jehož výkon nesmí být limitující, vzhledem ke vstupnímu proudu střídače.

Na střídavé straně je připojena paralelní RLC zátěž, která je symetricky připojena na každou z fází střídače. Je možné použít i elektronicky řízená zatížení, pokud je prokazatelné, že jejich chování odpovídá pasívním prvkům RLC. Následující rovnice činitele kvality Q_f jsou odvozeny pro ideální sestavu pasívních prvků. Z toho důvodu je

nutné při sestavení zátěže použít neindukční rezistory, nízkoztrátové tlumivky a kondenzátory s nízkou sériovou efektivní rezistancí.

Činitel kvality:

$$Q_f = R \sqrt{\frac{C}{L}}, \text{ kde} \quad (5.1)$$

- Q_f činitel kvality
- R rezistance činné zátěže;
- C kapacita jalové zátěže;
- L indukčnost jalové zátěže.

V rezonančním obvodu je možné vyjádřit činitel kvality:

$$Q_f = \frac{1}{P} \sqrt{|Q_L| \cdot |Q_C|}, \text{ kde} \quad (5.2)$$

- P činný výkon ve W;
- Q_L jalový výkon ve var;
- Q_C jalový výkon ve var.

5.2.2 Postup zkoušky

Zkouška se provádí při připojené RLC zátěži, která je naladěná na rezonanční kmitočet, který odpovídá kmitočtu napájecí sítě. Velikost RLC zátěže je přizpůsobena výkonu střídače pro každý krok zkoušky. Vztahuje se pro jednofázové i vícefázové střídače. Shoda s požadavky dle zmíněné normy je posuzována podle doby ostrovního provozu, která musí být při každém měření kratší než 2 s.

- 1) Určí se výstupní výkon střídače podle následující tabulky 5.1 pro podmínky A, B, C.

Tabulka 5.1 Podmínky zkoušky [17]

Podmínka	Výstupní výkon P_{EUT}	Vstupní napětí	Nastavení vypínacích odchylek
A	Maximum	> 75 % rozsahu jmenovitého	Nastavení vypínacích odchylek napětí a kmitočtu podle PDS
B	50 % až 66 % maxima	50 % rozsahu jmenovitého $\pm$ 10 %	Nastavení vypínacích odchylek napětí a kmitočtu podle PDS
C	25 % až 33 % maxima	< 20 % rozsahu jmenovitého	Nastavení vypínacích odchylek napětí a kmitočtu podle PDS

- 2) Vstupní zdroj se nastaví na požadovaný výkon P_{EUT} a změří se výstupní jalový výkon Q . Střídač se připojí k síti spínačem KM1 a RLC zátěž je odpojena spínačem KM2. Změří se průtok činného a jalového výkonu do sítě P_{AC} a Q_{AC} na základním kmitočtu. V dalších krocích bude Q_{AC} označováno jako Q_{EUT} .
- 3) Vypne se střídač a rozpojí se stykač KM1.

4) Nyní proběhne nastavení RLC zátěže tak, aby $Q_f = 1 \pm 0,05^3$:

a. Indukční zátěž se nastaví podle následujícího vztahu

$$Q_L = Q_f \cdot P_{EUT} = 1,0 \cdot P_{EUT} \quad (5.3)$$

b. Jako první prvek se připojí tlumivka s nastavenou induktancí na Q_L .

c. Dalším paralelním prvkem je kondenzátor. Nastaví se tak, aby

$$Q_C + Q_L = -Q_{EUT} \quad (5.4)$$

d. Posledním prvkem je rezistance, která spotřebuje elektrickou energii, která je rovna P_{EUT} .

5) Připojí se nastavená RLC zátěž stykačem KM2. Proběhne připojení sítě stykačem KM1 a zkontroluje se nastavení prvků tak, aby v ustáleném stavu byl proud stykačem KM1 v každé fázi 0,0 A s tolerancí ± 1 %. Tedy vynulování činného a jalového výkonu na základním kmitočtu.

6) Rozpojením stykače KM1 je zahájena zkouška a měří se doba ostrovního provozu okamžikem rozpojení od sítě do chvíle, kdy poklesne výstupní proud střídače pod úroveň 1 % jmenovitého proudu.

7) Dále se pro podmínku A nastaví činné zatížení a pouze jedna z jalových složek zatížení (C nebo L) na každou z podmínek nevyváženého zatížení (pouze zastíněné varianty) z následující tabulky 5.2, která představuje procentuální změnu činného a jalového zatížení vzhledem ke jmenovitému výstupnímu výkonu. V tabulce jsou hodnoty činného a jalového výkonu do sítě, kdy kladná hodnota udává směr toku od střídače do sítě. Po každém nastavení proběhne zkouška ostrovu a zaznamená se čas odpojení. Pokud je nějaká zaznamenaná doba delší než při jmenovitém vyvážení (bod 6), vyžaduje se měření zastíněných kombinací.

Tabulka 5.2 Nevyvážené zatížení pro zkušební podmínku A [17]

% změna v činném (M), jalovém (N) zatížení vzhledem ke jmenovitému výstupnímu výkonu				
-10, +10	-5, +10	0, +10	+5, +10	+10, +10
-10, +5	-5, +5	0, +5	+5, +5	+10, +5
-10, 0	-5, 0		+5, 0	+10, 0
-10, -5	-5, -5	0, -5	+5, -5	+10, -5
-10, -10	-5, -10	0, -10	+5, -10	+10, -10

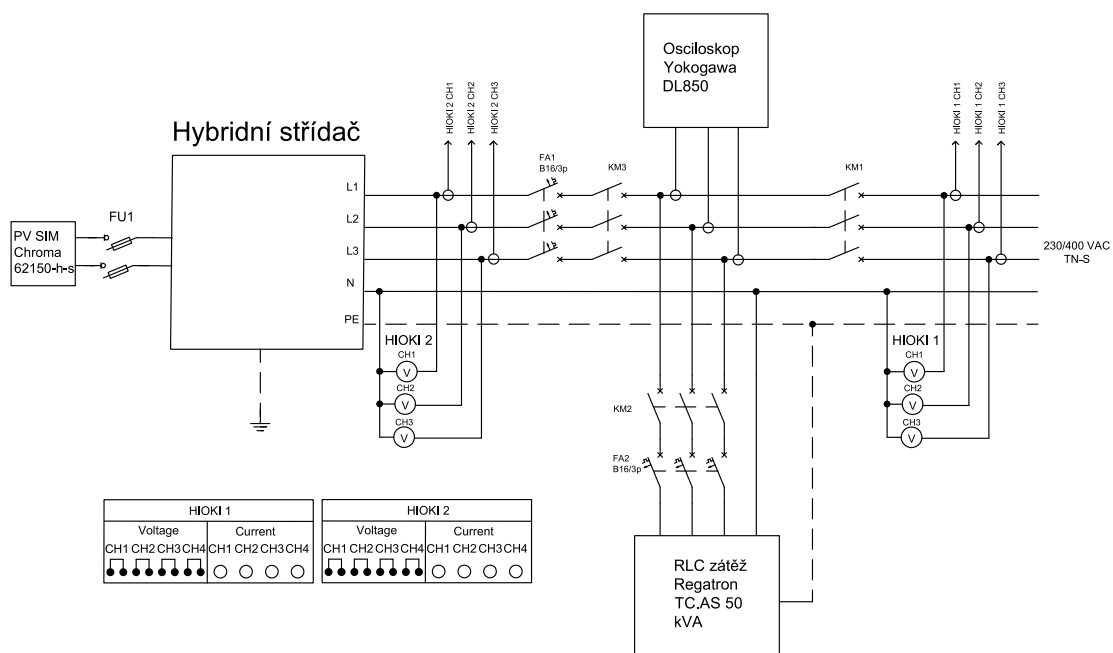
8) Pro podmínky B a C se nastavuje pouze jedna složka jalového zatížení (C nebo L) po cca 1 % od 95 % do 105 %. Po každém nastavení proběhne zkouška ostrovu a zaznamená se doba ostrovu. Pokud se na bodech 95 a 105 % stále zvyšuje, musí se použít další nárůsty po 1 %, dokud časy nezačnou klesat. Pro podmínku C je výhodnější využít řízení střídače omezením výstupního výkonu než omezit vstupní DC zdroj. Nastavení probíhá podle následující tabulky 5.3.

Tabulka 5.3 Nevyvážené zatížení pro zkušební podmínky B a C [17]

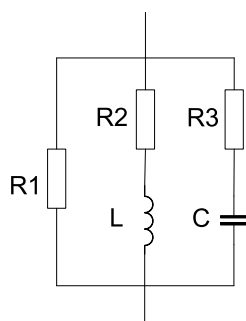
% změna v činném (M), jalovém zatížení (N) vzhledem ke jmenovitému výstupnímu výkonu
0, -5
0, -4
0, -3
0, -2
0, -1
0, 1
0, 2
0, 3
0, 4
0, 5

5.2.3 Popis zapojení

Zapojení vychází z normy [17]. Sestává z hybridního střídače s aktivní funkcí anti-island, jistících prvků FA a stykačů KM. Jako zdroj stejnosměrného proudu byl použit simulátor fotovoltaického pole Chroma 62150H-1000S. Pro osciloskopický záznam bylo použito zařízení Yokogawa DL850. Pro měření proudů a napětí na straně zátěže a sítě byly použity analyzátory sítě HIOKI 3390. Pro účely detekce ostrovního provozu byla jako zátěž použita sériová a paralelní kombinace prvků R, L a C, kterou představovalo zařízení Regatron TC.AS 50 kVA, viz. schéma zapojení na následujících obrázcích 5.6 a 5.7. Každý R-L-C obvod byl zapojen symetricky, tedy na každou fázi a byl navržen tak, aby pokryl celkový činný a jalový výkon. Norma ČSN uvádí pro testování použití ideálních prvků, jejichž ideálních vlastností není možné při reálné sestavě dosáhnout. Proto v nastavení obslužného programu ACS Control byla zvolena topologie sériové a paralelní kombinace prvků, která se nejbližší podobá předepsanému zapojení. Jedná se o reálné zapojení pasivních prvků v rezonančním obvodu, pro jejichž výpočet nelze využít zjednodušené vzorce, které uvádí výchozí norma pro postup zkoušky.



Obrázek 5.6 Schéma zapojení ověření funkce anti-island



Obrázek 5.7 Schéma zapojení R-L-C zátěže pro jednu fázi

Pro účel nastavení jednotlivých prvků byl vytvořen výpočet v programu Matlab, který je součástí přílohy A.1. V první části je nutné zadat vstupní parametry, mezi které patří činný výkon, který odpovídá tabulce 5.1 pro konkrétní podmínku, faktor kvality, který je normativně zadán, frekvenci, napětí a velikost odporů, které jsou v sérii s prvky indukčnosti a kapacity. Velikost indukčnosti a kapacity vychází ze vzorců (5.10) a (5.11), ve kterých vystupuje jalový výkon na příslušných větvích. Jeho velikost je dána rovnicí (5.2). Výpočet je řešením kvadratických rovnic (5.5) a (5.6). Výpočet velikosti odporu R_1 je však komplikovanější, jelikož činný výkon hraje roli ve všech třech větvích zátěže. Řešení spočívá v převedení sériové kombinace prvků R-L a R-C na paralelní kombinaci, tomu odpovídají rovnice (5.8) a (5.9). Ze znalosti celkového odporu rovnice (5.10),

odpovídajícímu pro zadaný činný výkon, lze dopočítat velikost odporu R_1 . Nastavené hodnoty prvků, které byly nastaveny pro účely měření, jsou součástí uvedené přílohy.

$$Q_L = \frac{2\pi f L \cdot U^2}{R_2^2 + (2\pi f L)^2} \text{ (var)} \quad (5.5)$$

$$Q_C = \frac{\frac{U^2}{2\pi f C}}{R_3^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C}\right)^2} \text{ (var)} \quad (5.6)$$

$$R_c = \frac{U^2}{P} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (5.7)$$

$$R_{2p} = \frac{R_2^2 + (2\pi f L)^2}{R_2} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (5.8)$$

$$R_{3p} = \frac{R_3^2 + \left(\frac{1}{2\pi f C}\right)^2}{R_3} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (5.9)$$

Odvozené parametry RLC obvodu:

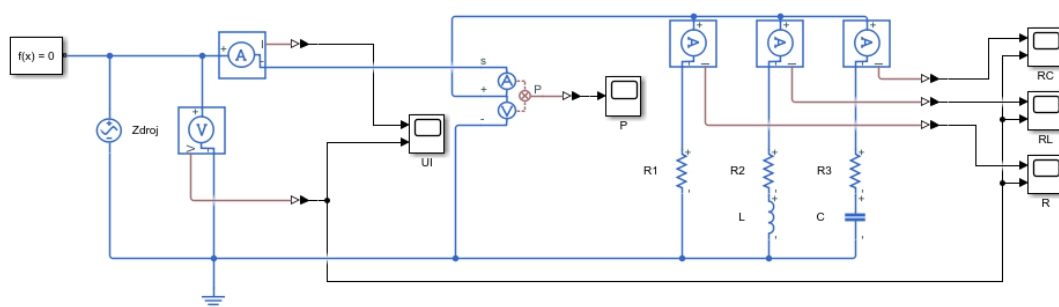
$$L = \frac{U^2 + \sqrt{U^4 - 4 \cdot Q_L^2 \cdot R_2^2}}{2 \cdot Q_L \cdot 2\pi f} \text{ (H)} \quad (5.10)$$

$$C = \frac{U^2 - \sqrt{U^4 - 4 \cdot Q_L^2 \cdot R_3^2}}{2 \cdot Q_L \cdot 2\pi f \cdot R_3^2} \text{ (F)} \quad (5.11)$$

$$R_1 = \frac{R_c \cdot R_{2p} \cdot R_{3p}}{R_{2p} \cdot R_{3p} - R_c \cdot R_{3p} - R_c \cdot R_{2p}} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (5.12)$$

5.2.4 Simulace

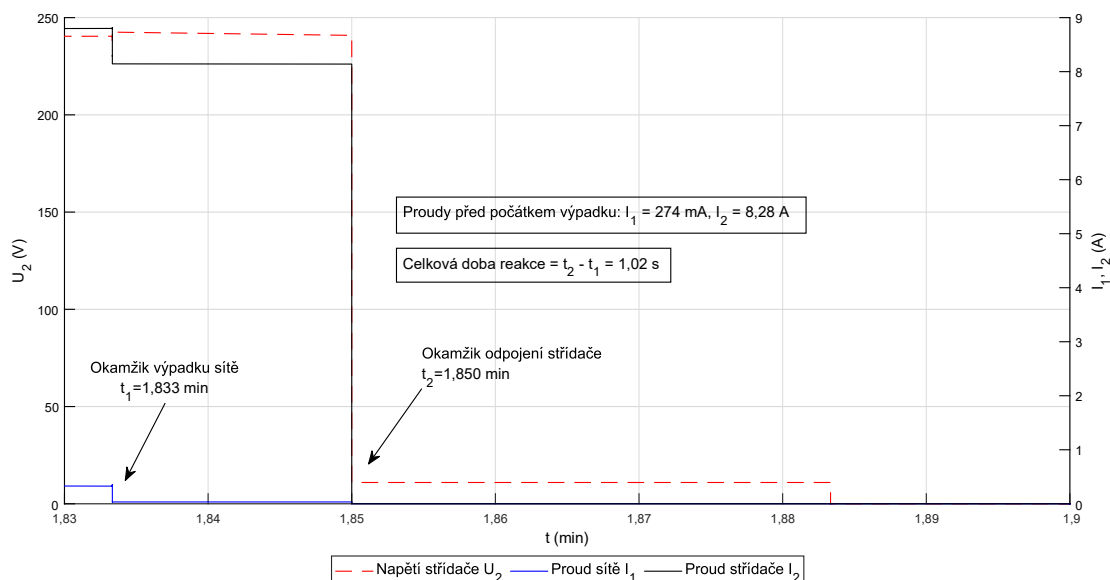
V programu Simulink byla vytvořena simulace navrženého jednofázového RLC obvodu, která poskytuje údaje pro ověření správnosti návrhu prvků (obrázek 5.9). Simulace obsahuje jednofázový zdroj střídavého napětí, ve kterém lze upravovat parametry sinusového průběhu, jako je amplituda, frekvence a fázový posuv. Model se dále skládá z parametrizovaných prvků, kde v každé z jeho větví je možné sledovat průběhy napětí a proudu. Pro ověření stavu rezonance, kdy napětí přiložené na simulovaný obvod a proud protékající obvodem jsou ve fázi slouží blok *Scope*, který je označen pod názvem „UI“. Součástí obvodu je také měření činného výkonu, jehož výstupní údaje lze sledovat.



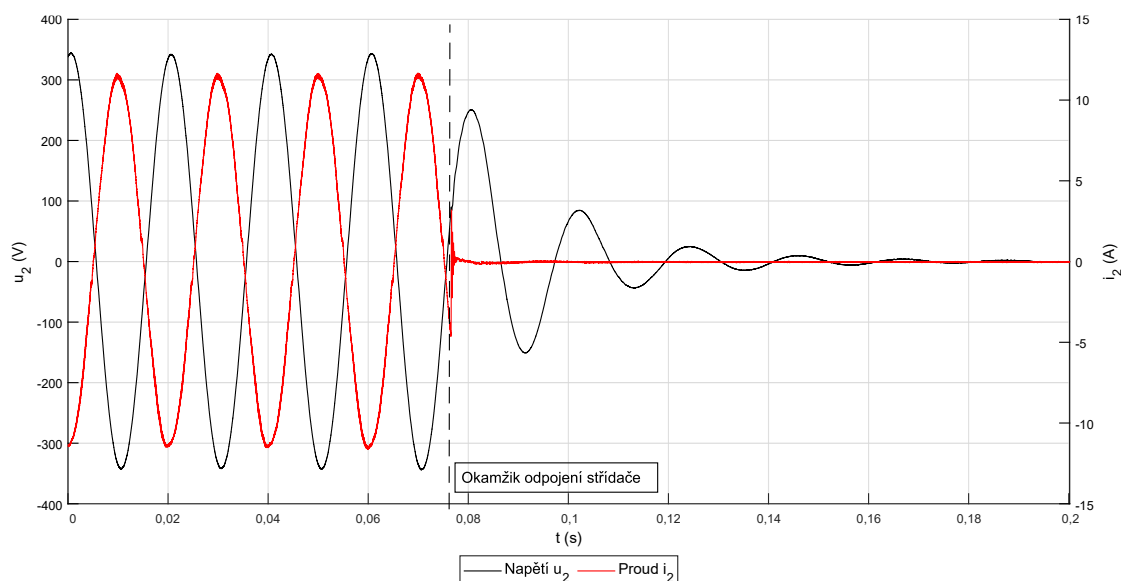
Obrázek 5.8 Simulace RLC zátěže pro jednu fázi

5.2.5 Výsledky měření

Testování funkce anti-island bylo provedeno na hybridním střídači se jmenovitým činným výkonem 6 kW. Bylo provedeno měření při podmínce A z tabulky 5.1 se jmenovitým vyvážením. Nastavení simulátoru FV pole bylo na napětí 600 V DC a proud 10 A. Nastavení prvků zátěže podléhalo dokumentaci pro testování detekce ostrovu pomocí simulátoru zátěže Regatron, který vychází ze standardů DIN V VDE 0126-1-1, VDE-AR-N 4105 a IEEE 1547. V uvedené dokumentaci je čas odpojení do 5 s a činitel kvality větší nebo roven 2, avšak tato podmínka neodpovídá požadavku z normy ČSN EN 62116 ed.2, kde je požadavek na hodnotu 1. Z důvodu omezení velikosti parametrů zátěže nebylo možné provést měření podle zmíněné normy, ale bylo provedeno pro hodnotu 3. Odpojením od sítě stykačem KM1 byl zahájen test detekce ostrovu a výsledné chování střídače pro fázi L1 je zřejmé z obrázků 5.9 a 5.10.



Obrázek 5.9 Efektivní hodnoty napětí a proudu ze střídače a sítě



Obrázek 5.10 Průběh napětí a proudu ze střídače

5.2.6 Vyhodnocení měření

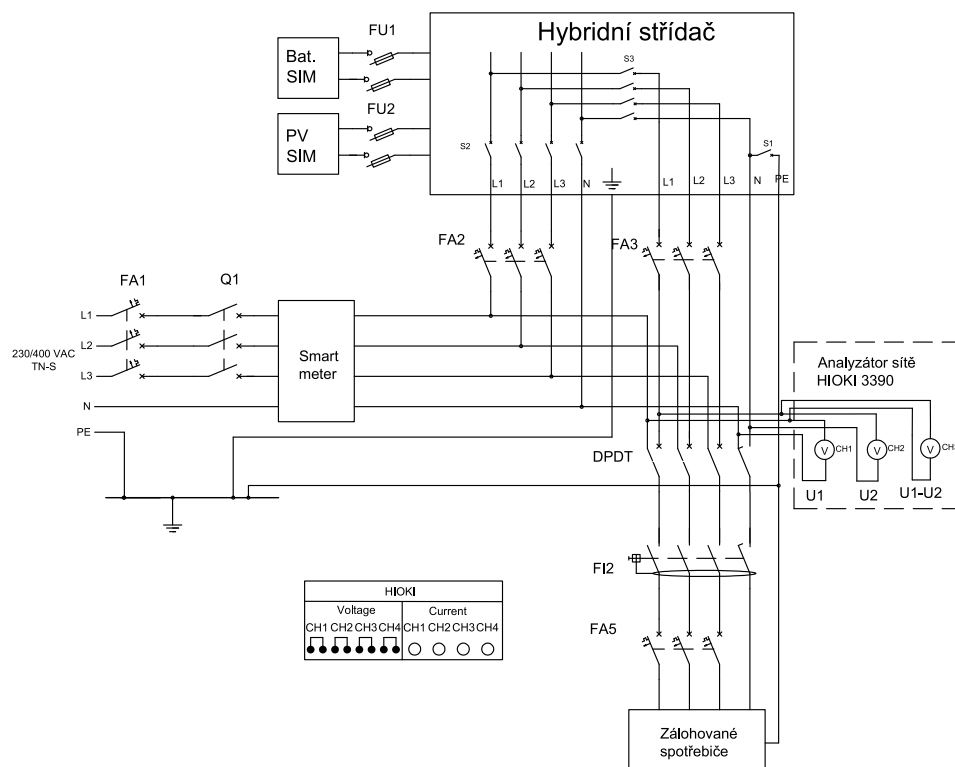
Ověření testu anti-island nebylo možné provést pro odpovídající činitel kvality, z důvodu technických omezení nastavení příslušné zátěže. Provedené měření tedy neodpovídalo skutečným požadavkům, a proto jej lze považovat pouze za demonstrativní příklad testované funkce střídače. Na obrázku 5.9 je údaj proudu ze strany sítě vykreslený na základní harmonické ve fázi L1. Na straně zátěže byly zaznamenány hodnoty proudu a napětí v celém spektru, což je důležité brát v potaz při čtení grafu. Značným problémem způsobovalo ladění připojené zátěže tak, aby bylo podle normy dosaženo nulového proudu do sítě s tolerancí 1 %. Před počátkem odpojení od sítě byl proud ze střídače 8,28 A a do sítě 274 mA, ale jak již bylo výše zmíněno, jedná se o hodnoty proudu měřené pro různé části spektra. Výsledkem měření bylo odpojení střídače v době 1,02 s, čímž byla splněna podmínka pro čas odpojení vycházející z normy ČSN i podle výchozí dokumentace. Nedílnou součástí zkoušky funkce anti-island je příloha B.2, která obsahuje výpočtový skript pro návrh prvků zátěže, simulaci pro její ověření a zpracování naměřených dat z měřicích přístrojů.

Jelikož se jedná o časově zdlouhavé a komplikované měření, bylo by vhodné testovací sekvenci zautomatizovat. Pro tyto účely by bylo nutné upravit program pro nastavení prvků ACS Control, který by poskytoval údaje o nastavení jednotlivých prvků v závislosti na vstupních parametrech podle podmínky měření a zároveň zohlednit požadovaný činitel kvality. Testovací pracoviště by mělo mít synchronizované všechny měřicí přístroje pro zajištění přesných měřených údajů ve sledovaný okamžik.

5.3 Měření na přepínači sítí

Účelem následujícího měření je demonstrace situace, kdy přepínač sítí DPDT je připojen k zálohované zátěži a hybridní střídač pracuje v ostrovním provozu z důvodu výpadku napájení z distribuční sítě. Situace se však komplikuje faktem, že na druhém vstupu přepínače sítí je již k dispozici napětí distribuční sítě. Obě sítě pracují v nesynchronním režimu při minimálních odchylkách pracovní frekvence a napětí. Důsledkem těchto skutečností dochází k vzájemným posuvům průběhů napětí, jehož rozdílným napětím jsou namáhány kontakty přepínače, na které jsou obě sítě připojeny.

Bude zaznamenán průběh nesynchronních napětí sítě a střídače a jejich rozdílu. Schéma zapojení s vyznačeným místem měření je na obrázku 5.11. Schéma vyplývá z typického zapojení instalace s hybridním měničem. Pro názornější ukázkou sledovaného stavu je na konci kapitoly provedena simulace ve výpočetním programu Simulink.

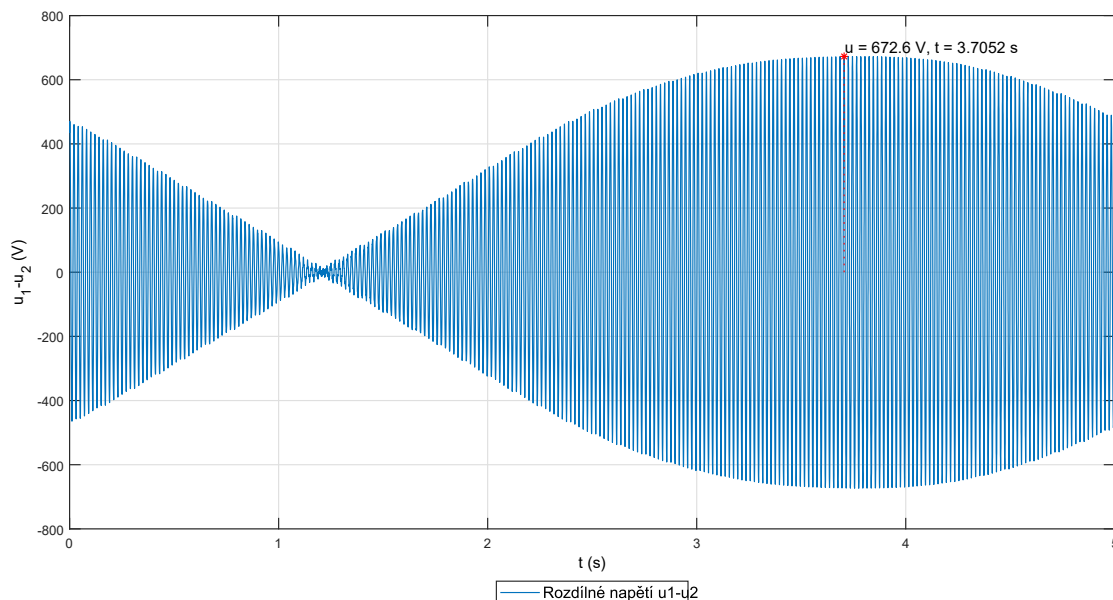


Obrázek 5.11 Schéma zapojení pro měření napětí na přepínači sítí

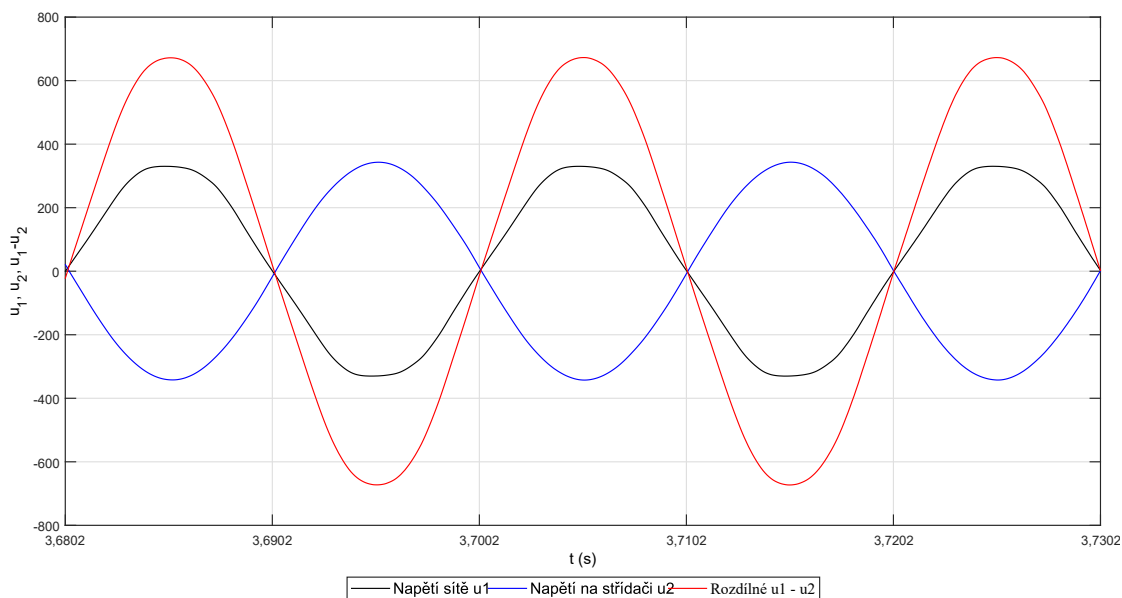
5.3.1 Výsledky měření

Prvním výstupem z měření je průběh okamžitých hodnot rozdílného napětí mezi sítí a střídačem v rámci pěti sekundového měřicího okna. Na obrázku 5.12 je vykreslena postupná změna nesynchronních napětí. Špičková hodnota napětí byla až 672,6 V. Na dalším obrázku je znázorněna nejhorší situace, kdy jsou napětí sítě a střídače v proti-fázi. Posledním výstupem je histogram četnosti vzorků pro různá napětí. Z celkového měření,

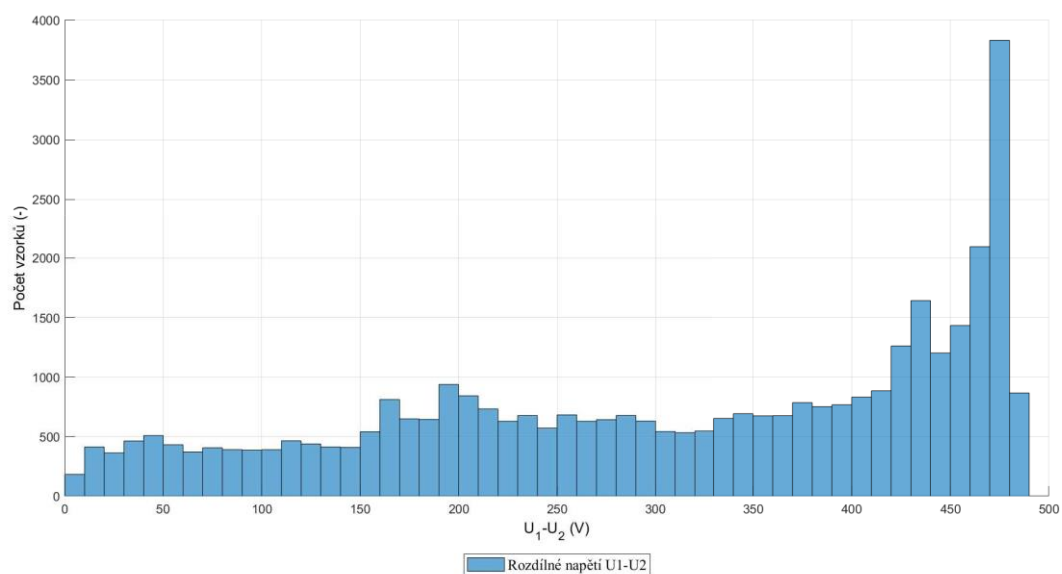
které trvalo 30,85 minut byla efektivní hodnota rozdílného napětí 440 V překročena v době 7,6 minut, což je 25,5 %. Napětí sítě se udržovalo v rozmezí 237 V až 238 V. Napětí na střídači bylo nastaveno na 243 V. Ke konci měření bylo napětí střídače sníženo na spodní hranici 195 V (hranice podpěťové ochrany – 15 % jmenovitého napětí), čímž bylo demonstrováno možné chování v síti. Efektivní hodnota největšího rozdílného napětí v rámci celého měření byla 481,9 V.



Obrázek 5.12 Průběh rozdílného napětí sítě a střídače

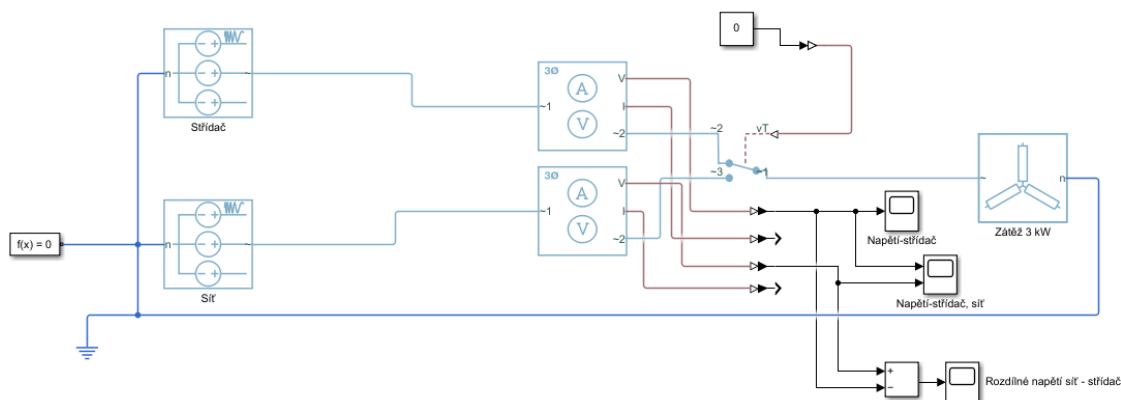


Obrázek 5.13 Průběhy napětí sítě, střídače a rozdílného napětí v nejhorším stavu



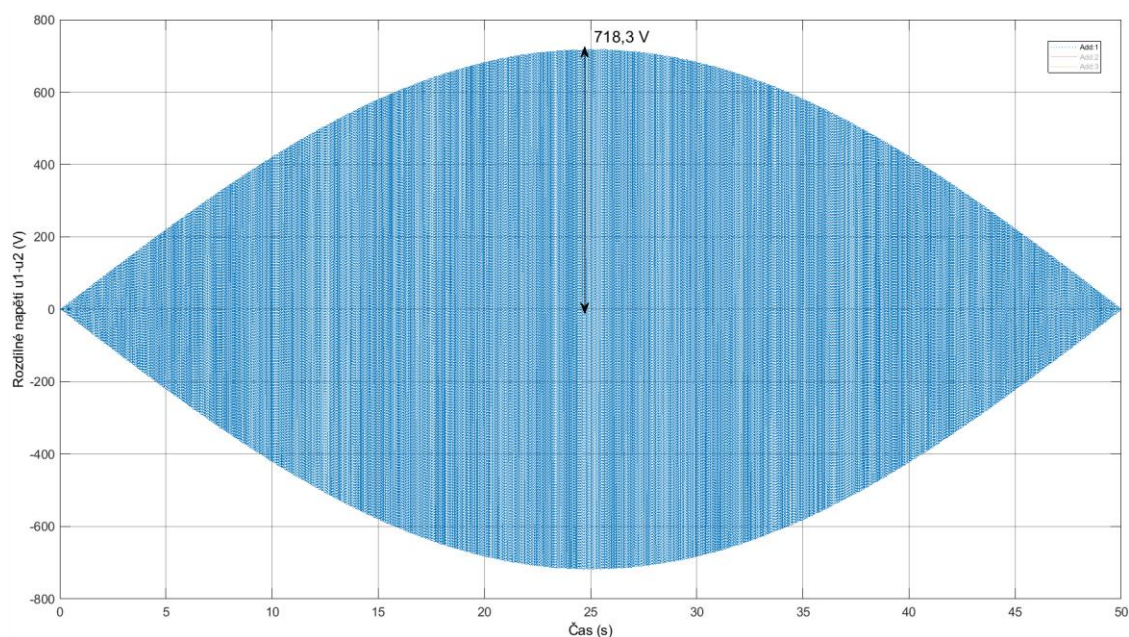
Obrázek 5.14 Četnost vzorků v rámci půl hodinového měření

5.3.2 Simulace



Obrázek 5.15 Simulace nesynchronního stavu dvou zdrojů

Pro názornější ukázkou byl v programu Simulink vytvořen model dvou zdrojů, sítě a střídače, jejichž napětí bylo nastaveno na horní hranici dovolené odchylky napětí + 10 % jmenovitého napětí. Aby došlo k nesynchronnímu provozu obou zdrojů, byla frekvence střídače nastavena na 50 Hz a frekvence sítě na 49,98 Hz. Špičková hodnota napětí dosáhla velikosti až 718,3 V, což je 507,9 V efektivní hodnoty.



Obrázek 5.16 Průběh rozdílného napětí dvou nesynchronních zdrojů

5.3.3 Vyhodnocení měření

Přepínač sítí by neměl představovat riziko požáru či úrazu elektrickým proudem v důsledku nesynchronního provozu. [20] Provedené měření má poukázat na možné bezpečnostní riziko, které může vzniknout přítomností napětí z nesynchronních zdrojů na přepínači sítí. Někteří výrobci mechanických přepínačů sítí uvádějí izolační napětí 440 V. Z provedeného půl hodinového měření bylo zjištěno, že tato hranice rozdílného napětí byla překročena ve 25,5 % z celkového času. Tento fakt by mohl mít za následek vznik poruchy spojením pracovních vodičů dvou nesynchronních zdrojů v důsledku přeskočení elektrického výboje mezi kontakty přepínače sítí, zejména pokud vezmeme v potaz možné znečištění přeskokové dráhy, kterým se snižuje izolační stav zařízení. Z toho důvodu je vhodné při výběru systému přepínání sítí vzít v potaz zmíněné bezpečnostní riziko a zvolit přístroj s vyšším izolačním napětím. Zpracování naměřených dat a simulace je součástí přílohy B.3.

6. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byla analýza problematiky ostrovního provozu u hybridních systémů s ohledem na současné legislativní požadavky. Na základě teoretických znalostí o bezpečnosti instalace a chování střídače v síti byly provedeny testovací procedury, jejichž výsledkem jsou doporučená opatření a postupy pro další testování.

V první části práce je proveden teoretický rozbor problematiky bezpečnosti hybridních systémů. V rámci kapitoly o střídačích byly probrány typy střídačů, které se liší svou konstrukcí, což má vliv zejména na funkčnost a bezpečnost instalace, do které je hybridní systém implementován a různé typy řízení, které mají vliv na chování střídače v připojené síti. Opatření před úrazem elektrickým proudem jsou tvořeny prostředky, které jsou vedeny jako základní ochrana, při poruše, zvýšená a doplňková ochrana. Dalším probraným tématem jsou ochranné funkce střídače a přístroje, které je nezbytné v elektrické instalaci správně použít. Součástí této kapitoly jsou uvedeny bezpečnostní rizika ostrovního provozu. Je zde také uveden aktuální požadavek použití vypínacího prvku v elektroměrovém rozvaděči, vyplývající z Připojovacích podmínek ČEZ Distribuce a.s. Velmi důležité je také použití proudových chráničů požadovaného typu, čímž je proveden zásah do zapojení domovního rozvaděče a je nutné provést změny v jeho dokumentaci.

Druhá část obsahuje návrhy testování střídačů, které vznikly na základě současné legislativy. Každá zkouška obsahuje podrobný popis měřené funkce, výsledky měření a vyhodnocení včetně doporučení dalších ochranných opatření.

Z výsledků měření přetížení a zkratem lze konstatovat, že při přechodu do ostrovního provozu vzniká riziko nevybavení předepsaných jisticích přístrojů v odpovídajícím čase. Při přetížení 150 %, vzhledem ke jmenovitému výstupnímu výkonu, došlo k vypnutí střídače za 60 s. V dalších testech 200 % a 250 % střídač vyhodnotil přetížení a vypnul se ve stanovené době pro odpojení podle tabulky 3.2. Z testu zkratu na svorkách mezi fázovým vodičem L1 a středním vodičem N lze pozorovat, že se napětí na výstupu snížilo pod bezpečnou mez danou normou [9] a střídač se pokoušel o opětovné připojení, kdy dodával do poruchy maximální proud. Z toho lze usuzovat, že opatření při nedodržení automatického odpojení od zdroje jsou nedostatečná, jelikož se zvyšuje pravděpodobnost úrazu elektrickým proudem a požáru. Řešením by mohlo být použití jisticích přístrojů s citlivější zkratovou vypínací charakteristikou. Dále je nutné v instalaci zavést doplňující ochranné pospojování. Z vypočteného náboje a energie poruchy střídač nemůže plnit funkci základního ochranného opatření omezením ustáleného dotykového proudu a náboje, viz. tabulka 3.1. Zpracovaná naměřená data jsou součástí vytvořených skriptů v příloze B.1.

Ověření funkce anti-island nebylo možné z technických důvodů provést v plném rozsahu. Výchozí norma ČSN pro testování neodpovídá normám, ze kterých vycházel návrh simulátoru zátěže Regatron TC.AS 50 kVA a zároveň obsahuje nedostatky pro

určení parametrů reálné zátěže. V provedeném měření pro faktor kvality 3 však střídač vyhověl a odpojil se v požadované době. Součástí práce je výpočet prvků reálné RLC zátěže, jehož zdrojový kód je uveden příloze A.1 a výpočet je v příloze B.2. Pro účely ověření návrhu prvků je vytvořena simulace v programu Simulink, která je součástí přílohy B.2. Součástí zmíněné přílohy jsou také skripty pro zpracování naměřených dat. Jelikož se jedná o poměrně zdlouhavé měření bylo by vhodné upravit program ACS Control, který by poskytoval údaje o nastavení jednotlivých prvků v závislosti na vstupních parametrech, které odpovídají dané podmínce měření. Dále by byla potřeba veškeré měřicí přístroje synchronizovat pro zajištění přesných měřených údajů v daný okamžik.

Měření na přepínači sítí představuje situaci, kdy jsou na kontaktech přepínače přítomny současně napětí z distribuční sítě a ze střídače, která pracují nesynchronně, a to způsobuje proměnlivé rozdílné napětí. Z půl hodinového záznamu měření 25,5 % vzorků překročilo izolační napětí 440 V, které uvádějí někteří výrobci mechanických přepínačů sítí. Ze simulace při nejhorších podmínkách bylo dosaženo rozdílné napětí až 508 V efektivní hodnoty. Uvedený jev by mohl mít za následek přeskok elektrického výboje mezi kontakty přepínače sítí, zejména pokud se vezme v potaz znečištění přeskokové dráhy, čímž se snižuje izolační stav zařízení nebo krátkodobé zvýšení napětí. Při výběru vhodného přepínače sítí je proto nutné dbát na tento parametr. Pro grafické znázornění situace byla vytvořena simulace dvou střídavých zdrojů s rozdílnou frekvencí a maximální odchylkou napětí, která je v příloze B.3. Příloha také obsahuje skripty pro výpočet charakteristických hodnot a vykreslení naměřených dat.

7. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MASTNÝ, Petr, Jan MORÁVEK a Jiří PITRON. *Malé zdroje elektrické energie* [online]. Brno, 2015 [cit. 2021-11-02]. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně.
- [2] GAO, Zhiqiang, Song LI, Xuesong ZHOU a Youjie MA. *An Overview of PV System* [online]. China, 2016. Key Research Laboratory for Control Theory & Applications in Complicated Systems. Complicated Systems Tianjin University of Technology.
- [3] LIN, Yashen, Joseph ETO, Brian JOHNSON et al. *Research Roadmap on Grid-Forming Inverters* [online]. 2020 [cit. 2021-11-19]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/73476.pdf>. NREL/TP-5D00-73476. National Renewable Energy Laboratory.
- [4] *PRAVIDLA PROVOZOVÁNÍ DISTRIBUČNÍCH SOUSTAV: PŘÍLOHA 4: PRAVIDLA PRO PARALELNÍ PROVOZ VÝROBEN A AKUMULAČNÍCH ZAŘÍZENÍ SE SÍTÍ PROVOZOVATELE DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY* [online]. 2021 [cit. 2021-11-30]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/webpublic/file/edee/distribuce/pripojovacipodminkyenn.pdf>. ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD.
- [5] Legislativa. In: *SVP Solar* [online]. [cit. 2021-11-02]. Dostupné z: <https://www.svp-solar.cz/fotovoltaika/legislativa/>
- [6] FALTUS, Ivo. *Příručka elektrotechnika - Jistící přístroje II: Jištění fotovoltických zdrojů* [online]. Letohrad: OEZ, 2012 [cit. 2021-11-11].
- [7] BŘÍZA, Martin. Jak vybrat hybridní měnič pro rodinný dům. In: *Solární asociace* [online]. 2019 [cit. 2021-11-02]. Dostupné z: <https://www.solarniasociace.cz/cs/aktualne/15410-jak-vybrat-hybridni-menic-pro-rodinny-dum>
- [8] DRÁPELA, Jiří. *Kvalita elektrické energie a EMC* [online]. Brno, 2020 [cit. 2021-11-04]. Přednášky. Vysoké učení technické v Brně.
- [9] ČSN 33 2000-4-41 ed. 3: *Elektrické instalace nízkého napětí – Část 4-41: Ochranná opatření pro zajištění bezpečnosti – Ochrana před úrazem elektrickým proudem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [10] ČSN IEC 60479-1: *Účinky proudu na člověka a domácí zvířectvo – Část 1: Obecná hlediska*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

- [11] ČSN EN 61140 ed. 3: *Ochrana před úrazem elektrickým proudem - Společná hlediska pro instalaci a zařízení*. Praha: Vydal Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [12] KADLEC, Radim a Miloslav STAINBAUER. *Bezpečná elektrotechnika* [online]. Brno, 2015 [cit. 2021-10-19]. Vysoké učení technické v Brně.
- [13] ČSN EN 62109-1: *Bezpečnost výkonových měničů pro použití ve výkonových fotovoltaických systémech – Část 1: Všeobecné požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [14] SANTOS, Ricardo. *Protection and safety of storage systems: Sensible – DELIVERABLE* [online]. [cit. 2021-11-02].
- [15] *PŘIPOJOVACÍ PODMÍNKY NN: pro osazení měřicích zařízení v odběrných místech napojených z distribuční sítě nízkého napětí* [online]. 2022 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z:
<https://www.cezdistribuce.cz/webpublic/file/edee/distribuce/pripojovacipodminky.pdf>. ČEZ Distribuce, a. s.
- [16] ČSN 33 2000-7-712 ed. 2: *Elektrické instalace nízkého napětí – Část 7-712: Zařízení jednoúčelová a ve zvláštních objektech – Fotovoltaiické (PV) systémy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [17] ČSN EN 61116 ed.2: *Fotovoltaiické střídače připojené do elektrizační soustavy – Postup zkoušky opatření zabraňujících ostrovnímu provozu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [18] MIN-SUNG, Kim, Haider RAZA, Cho GYU-JUNG, Kim CHUL-HWAN, Won CHUNG-YUEN a Chai JONG-SEO. *Comprehensive Review of Islanding Detection Methods for Distributed Generation Systems* [online]. 2018 [cit. 2021-11-30]. Balochistan University of Engineering and Technology, Sungkyunkwan University.
- [19] KOSEOGLU, Cem, Necmi ALTIN, Fevzi ZENGİN, Hasan KELEBEK a Ibrahim SEFA. *A Hybrid Overload Current Limiting and Short Circuit Protection Scheme: A Case Study on UPS Inverter* [online]. Turkey, 2019 [cit. 2021-11-30]. Gazi University.
- [20] ČSN EN 62109-2: *Bezpečnost výkonových měničů pro použití ve výkonových fotovoltaických systémech – Část 2: Zvláštní požadavky pro střídače*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [21] KUMAR, K. a Jim EICHNER. *Guidance on proper residual current device selection for solar inverters* [online]. 2013 [cit. 2021-11-18]. Dostupné z:
https://www.se.com/cz/cs/download/document/998-2095-12-31-13AR0_EN/. Technická příručka. Schneider Electric.

- [22] ČSN EN 62477-1: *Bezpečnostní požadavky pro systémy a zařízení výkonových elektronických měničů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [23] VALENTA, Jiří. *Diagnostika a jištění elektrických zařízení: Jističe a další nadproudové jisticí prvky* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-11-11]. Dostupné z: E-learning. Přednášky. Vysoké učení technické v Brně.
- [24] ČSN EN 60898-1: *Elektrická příslušenství - Jističe pro nadproudové jištění domovních a podobných instalací - Část 1: Jističe pro střídavý provoz (AC)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.
- [25] VAŠINKA, Jiří. *Vypínací charakteristika jističe: jednoduše a srozumitelně* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://nizke-napeti.cz.abb.com/blog-vypinaci-charakteristika-jistice-jednoduse-a-19643>
- [26] VALENTA, Jiří. *Diagnostika a jištění elektrických zařízení: Pojistky* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-11-11]. Dostupné z: E-learning. Prezentace. Vysoké učení technické v Brně.
- [27] BUŠOV, Bohuslav, Jiří VALENTA, Petr DOHNAL a Lukáš DOSTÁL. *Laboratorní a numerická cvičení z elektrických přístrojů* [online]. Brno, 2015 [cit. 2021-11-11]. Dostupné z: E-learning. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FV	Fotovoltaika, fotovoltaický
IGBT	Insulated gate bipolar transistor
MOSFET	Metal oxide semiconductor field effect transistor
MPPT	Maximal power point tracker
DC	Direct current
AC	Alternate current
PLL	Phase-Locked Loop
FRT	Fault ride through
DPDT	Double pole double throw, přepínač sítí
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
PPDF	Pravidla provozování distribuční soustavy
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise
HD	Harmonizační dokument
DIN	Německá průmyslová norma
VDE	Svaz německých elektrotechniků
IEEE	Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství
UPS	Zdroj nepřerušného napájení
SELV	Safety extra low voltage
PELV	Protective extra low voltage
IP	Ingress protection
DVC	Klasifikace rozhodujícího napětí
PEN	Vodič slučující funkci ochranného a středního vodiče
PE	Ochranný vodič
N	Střední vodič
L	Fázový vodič
RCD	Proudový chránič
FI	Proudový chránič
FA	Jistič
Q	Vypínač
KM	Stykač
MCB	Malý jistič
MCCB	Kompaktní jistič
RCBO	Proudový chránič v nadproudovou ochranou
IM	Impedance measurement
AFD	Active frequency drift

SFS	Sandia frequency shift
SVS	Sandia voltage shift
SMFS	Sliding mode frequency shift
O/UDP	Over/under voltage protection
O/UPF	Over/under frequency protection
ROCOF/P	Rate of change of frequency/power
PJD	Phase jump detection
ČR	Česká republika
RCMU	Monitorovací jednotka reziduálního proudu
LPS	Systém ochrany před bleskem
SPD	Svodič přepětí
ERÚ	Energetický regulační úřad
RfG	Evropský síťový kodex Requirements for generators
PNE	Podniková norma pro energetiku
PN	Podniková norma
PDS	Provozovatel distribuční soustavy
nn	nízké napětí
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké
zvn	zvlášť vysoké napětí

Symboly:

U_T	dotykové napětí	(V)
Z_i	vnitřní impedance těla	(Ω)
Z_k	impedance kůže	(Ω)
Z_T	celková impedance těla	(Ω)
Z_s	impedance kůže	(Ω)
I_a	poruchový proud	(A)
U_o	jmenovité napětí proti zemi	(V)
R	elektrický odpor	(Ω)
I_n	jmenovitý proud	(A)
U_p	ochranná hladina	(V)
L	indukčnost	(H)
C	kapacita	(F)
R_c	celkový odpor	(Ω)
Q_f	činitel kvality	(-)
P	činný výkon	(W)
Q_C	jalový výkon	(var)
Q_L	jalový výkon	(var)

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - ZDROJOVÉ KÓDY.....	76
PŘÍLOHA B - CD	77

Příloha A - Zdrojové kódy

A.1 Výpočet prvků zátěže R-L-C

```
clc
clear all
close all
%zadávané parametry
P=2000;
Qf=3;
f=50;
U=230;
R2=0.25;
R3=1;
M=1; %procentuální změna činného zatížení, (1=100% -> jmenovité zatížení)
N=1; %procentuální změna jalového zatížení, (1=100% -> jmenovité zatížení)
%výpočet
P=P*M;
QL=(sqrt(Qf^2)*P)*N;
QC=QL;
RC=U^2/P;
L=(U^2+sqrt(U^4-4*QL^2*R2^2))/(2*QL*2*pi*f);
C=(U^2-sqrt(U^4-4*QC^2*R3^2))/(2*QC*2*pi*f*R3^2);
R2p=(R2^2+(2*pi*f*L)^2)/R2;
R3p=(R3^2+(1/(2*pi*f*C))^2)/R3;
R1=(RC*R2p*R3p)/(R2p*R3p-RC*R3p-RC*R2p);
%kontrola parametrů navrženého RLC obvodu
fr_k=(1/(2*pi))*sqrt((1/(L*C))+(L-R2^2*C)/(L-R3^2*C)); %rezonanční frekvence obvodu
P_k=(U^2/R1+(R2*U^2)/(R2^2+(2*pi*f*L)^2)+(R3*U^2)/(R3^2+(1/(2*pi*f*C))^2)); %činný výkon
Qf_k=((2*pi*f*L)/(R2^2+(2*pi*f*L)^2))/(1/R1+R2/(R2^2+(2*pi*f*L)^2)+R3/(R3^2+(1/(2*pi*f*C))^2)); %činitel kvality
%výstup
sprintf('R1 = %10.2f Ohm', R1)
sprintf('R2 = %10.2f Ohm', R2)
sprintf('L = %10.2f mH', L*1e3)
sprintf('R3 = %10.2f Ohm', R3)
sprintf('C = %10.2f uF', C*1e6)
```

```
ans =
'R1 =      46.39 Ohm'
'R2 =      0.25 Ohm'
'L =      28.04 mH'
'R3 =      1.00 Ohm'
'C =     365.80 uF'
```

[Published with MATLAB® R2021b](#)

Příloha B - CD

B.1 Zkouška přetížení a zkrat

B.2 Zkouška funkce anti-island

B.3 Měření na přepínači sítí