České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Bakalářská práce

Rapid shutdown – analýza možností využití v podmínkách ČR

Rapid shutdown – analysis of the possibilities of use in the conditions of Czech Republic

Autor: Tomáš Klčo

Vedoucí práce: Ing. Pavel Hrzina Ph.D.

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Praha 2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Klčo** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **503247**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**

Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**

Specializace: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Rapid shutdown - analýza možností využití v podmínkách ČR

Název bakalářské práce anglicky:

Rapid shutdown - analysis of the possibilities of use in the conditions of the Czech Republic

Pokyny pro vypracování:

1) Proveďte rešerši použití systémů rapid shutdown ve světě
2) Analyzujte jeho vhodnost pro prostředí českých FVE z technického hlediska i z pohledu bezpečnosti
3) Vyhodnoťte ekonomické dopady systému rapid shutdown v podmínkách ČR
4) Realizujte výukovou interaktivní pomůcku pro pochopení základů systému

Seznam doporučené literatury:

[1] 690.12(A&B) Rapid Shutdown of PV Systems on Buildings. ElectricalLicenseRenewal.com [online]. [no date] [viewed 17 December 2023]. Available from: https://www.electricallicenserenewal.com/Electrical-Continuing-Education-Courses/NEC-Content.php?sectionID=379.0
[2] DAMETTO, Joe. What is solar rapid shutdown, and why do I need it? Solar Reviews [online]. 1 March 2022 [viewed 17 December 2023]. Available from: https://www.solarreviews.com/blog/solar-rapid-shutdown
[3] What is Rapid Shutdown and why was it implemented in the United States? - AC Solar Warehouse. AC Solar Warehouse [online]. [no date] [viewed 17 December 2023]. Available from: https://www.acsolarwarehouse.com/news/rapid-shutdown/

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Hrzina, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **01.02.2024** Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Pavel Hrzina, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D. podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání Podpis studenta

Čestné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.“

V Praze dne ....

Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl vyjádřit své hluboké díky všem, kteří mi poskytli podporu během zpracování této práce.

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Pavlu Hrzinovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a cenné rady, které byly zásadní pro dokončení této práce.

Zvláštní poděkování patří mé rodině, která mi byla neustálým zdrojem opory a motivace. Velké díky také směřuji ke svým přátelům za jejich nečekanou a nezištnou pomoc.

Děkuji panu Hlavatému za jeho odborné rady a cenné připomínky, které významně přispěly k úspěchu této práce.

Děkuji všem za jejich čas, trpělivost a věnované úsilí.

Abstrakt

Tato bakalářská práce zkoumá standard rapid shutdown ve fotovoltaických systémech s důrazem na globální aplikace a její případnou vhodnost pro Českou republiku. Analyzuje standardy, bezpečnostní aspekty a ekonomické faktory spojené s tímto standardem. Cílem je poskytnout komplexní pohled na využití rapid shutdown ve světě a zhodnotit jeho přínosy a výzvy v kontextu českého energetického prostředí. Součástí této práce je tvorba praktické školní pomůcky demonstrující funkci rapid shutdown.

Klíčová slova:

Rapid shutdown, Fotovoltaické panely, Bezpečnost fotovoltaiky

Abstract

This bachelor's thesis examines rapid shutdown in photovoltaic systems, with an emphasis on global applications and its potential suitability for the Czech Republic. It analyzes standards, safety aspects, and economic factors associated with this standard. The goal is to provide a comprehensive view of the use of rapid shutdown worldwide and evaluate its benefits and challenges in the context of the Czech energy environment. Part of this thesis is creation of practical school device that demonstates the function rapid shutdown.

Keywords:
Rapid Shutdown, Photovoltaic Panels, Photovoltaic Safety

Obsah

1 Úvod ..... - 13 -

1.1 Zavedení tématu rapid shutdown v FV systémech ..... - 13 -

1.2 Krátké vysvětlení důležitosti rapid shutdown ..... - 13 -

1.3 Cíle a rozsah bakalářské práce ..... - 15 -

2 Teoretické pozadí ..... - 15 -

2.1 Základní principy fotovoltaických systémů ..... - 15 -

2.2 Co je rapid shutdown a jeho technický princip ..... - 16 -

2.3 Možnosti dosažení rapid shutdown ..... - 17 -

2.4 Historický vývoj a současný stav rapid shutdown ..... - 24 -

3 Bezpečnostní aspekty ..... - 26 -

3.1 Požáry ve fotovoltaických systémech ..... - 26 -

3.2 Důležitost rapid shutdown pro bezpečnost FV systémů ..... - 27 -

3.3 Rizika spojená s FV systémy bez rapid shutdown ..... - 27 -

4 Standardy a regulace ..... - 29 -

4.1 Přehled globálních standardů pro rapid shutdown ..... - 29 -

4.2 Specifika české legislativy a standardů FV ..... - 33 -

5 Ekonomické faktory ..... - 37 -

5.1 Náklady a investice rapid shutdown ..... - 37 -

5.2 Ekonomické zhodnocení investic ..... - 43 -

5.3 Pojišťovny ..... - 59 -

6 Případová studie: Aplikace v ČR ..... - 61 -

6.1 Analýza současného stavu FV v ČR ..... - 61 -

6.2 Vhodnost a implementace rapid shutdown v ČR ..... - 64 -
6.3 Možné výzvy a překážky pro adopci v ČR ..... - 69 -
7 Závěr ..... - 70 -
8 Výuková pomůcka ..... - 71 -
8.1 Zadání ..... - 71 -
8.2 Popis pomůcky ..... - 71 -
8.3 Návod na použití pomůcky ..... - 72 -
8.4 Schéma zapojení a program ..... - 73 -
9 Zdroje a citace ..... - 76 -
9.1 Seznam obrázků ..... - 82 -
9.2 Seznam tabulek ..... - 82 -

1 Úvod

1.1 Zavedení tématu rapid shutdown v FV systémech

Fotovoltaické (FV, anglicky PV) systémy hrají klíčovou roli v globálním přechodu k obnovitelným zdrojům energie. S narůstajícím využíváním těchto systémů se zvyšuje i důraz na bezpečnostní aspekty spojené s jejich provozem. Jednou z nejdůležitějších inovací v oblasti bezpečnosti fotovoltaických instalací je rapid shutdown.

Tradiční fotovoltaické systémy jsou až na výjimky spojovány v sérii, vytvářejíce tak PV řetězce – neboli stringy. Každý string může generovat napětí až do 1 500 V, což může být nebezpečné v případě, že je nutné provádět údržbu, nebo v případě požáru. Rapid shutdown systémy jsou navrženy tak, aby v případě potřeby rychle snížily toto napětí na bezpečnou úroveň na úrovni stringů nebo přímo jednotlivých panelů.

Tímto způsobem rapid shutdown poskytuje efektivní ochranu na úrovni samotných panelů, což přináší významné výhody v situacích, kdy je potřeba rychle odpojit fotovoltaický systém od sítě, aby se minimalizovalo riziko úrazu nebo dalšího šíření požáru. Schopnost snížit napětí na úrovni panelů představuje důležitý prvek, který přispívá k celkové bezpečnosti a spolehlivosti fotovoltaických systémů. [1] [2]

1.2 Krátké vysvětlení důležitosti rapid shutdown

Hlavním účelem je ochrana hasičů a záchranných pracovníků, kteří by mohli být vystaveni elektrickému nebezpečí během zásahu u objektů s instalovanými solárními panely. Zároveň při snížení napětí na DC části pod 400 V umožňuje hašení dotčeného objektu vodou, viz Bojový řád jednotek požární ochrany – taktické postupy zásahu: Požáry fotovoltaických elektráren, Metodický list číslo 48 P. [50]

1.2.1 Význam rapid shutdown

Bezpečnost hasičů

Během požáru mohou fotovoltaické panely nadále generovat životu nebezpečné napětí až do 1 500 V, což představuje značné nebezpečí pro hasiče a další záchranné pracovníky. Rapid shutdown systém rychle snižuje napětí v celém systému na bezpečnou úroveň, čímž výrazně zmenšuje riziko elektrického šoku. [3]

DC oblouk

Stejnosměrný oblouk je hlavní příčinou požárů ve fotovoltaických elektrárnách, způsobený často vypadnutím kontaktu, stárnutím zařízení, prasknutím izolace nebo špatným uzemněním. Tento typ oblouku je nebezpečnější než střídavý, jelikož neobsahuje bod nulového průchodu a po vzniku hoří nepřetržitě, což komplikuje jeho uhašení a zvyšuje riziko požáru. S rostoucími specifikacemi fotovoltaických modulů se zvyšuje výkon a proud na stejnosměrné straně, což podle Jouleova zákona $Q = I^2Rt$ znamená čtyřnásobné zvýšení tepelného efektu u místa zkratu, a tím pádem výrazně stoupá riziko vzniku požáru. [4] [5]

1.2.2 Potřeba rapid shutdown

Regulační požadavky

V mnoha zemích, včetně Spojených států, jsou pravidla pro rapid shutdown zakotvena v národních elektrotechnických normách (například National Electrical Code v USA), což činí tento standard nezbytným pro všechny nové instalace fotovoltaických systémů.

Zvyšující se adopce solární energie

S neustále rostoucím počtem instalací fotovoltaických systémů po celém světě se zvyšuje i důležitost jejich zabezpečení. Je nezbytné zajistit, aby tyto systémy byly navrženy a instalovány s ohledem na nejvyšší standardy bezpečnosti. Tím se minimalizují rizika spojená s jejich provozem, a to nejen pro domácnosti a komerční objekty, ale i pro technický personál a záchranné složky. Investice do bezpečnostních technologií, jako technologie umožňující rapid shutdown, zlepšuje zajištění bezpečného a spolehlivého provozu solárních elektráren po celém světě. [1]

1.3 Cíle a rozsah bakalářské práce

Cílem této bakalářského práce je poskytnout komplexní přehled o rapid shutdown, jeho bezpečnostních, technických a ekonomických aspektech, se zvláštním zaměřením na aplikaci a vhodnost pro Českou republiku. Práce má analyzovat globální standardy, porovnávat různé přístupy a hodnotit jejich přínosy a výzvy v kontextu specifik českého energetického prostředí. Součástí této práce je fyzická školní výuková pomůcka demonstrující princip fungování rapid shutdown.

2 Teoretické pozadí

2.1 Základní principy fotovoltaických systémů

Fotovoltaické systémy využívají fotovoltaický jev, objevený v 19. století, který spočívá v přeměně sluneční energie na elektrickou energii. Tento jev zahrnuje absorpci fotonů (částic světla) polovodičovými materiály, nejčastěji křemíkem, který je dopovaný nečistotami pro vytvoření p-n přechodu. Struktura p-n přechodu je klíčová pro generování elektrického proudu, protože umožňuje oddělení a pohyb generovaných nosičů náboje – elektronů a děr. Když fotony slunečního záření dopadají na fotovoltaický článek, dodají dostatečnou energii valenčním elektronům, aby je vytrhly z atomového jádra a vytvořily elektron-děrový pár. Tyto náboje jsou pak odděleny elektrickým polem v p-n přechodu, přičemž elektrony směřují ke katodě a díry ke kladné elektrodě, což vede k vytvoření elektrického proudu.

Elektrody, obvykle vyrobené z vodivých kovů, jako je hliník nebo měď, umožňují sběr a transport elektrického proudu z fotovoltaických článků do externího obvodu. Fotovoltaické články jsou dále spojovány do větších jednotek zvaných panely, které jsou následně spojovány do řetězců, nebo stringů. Jednotlivé panely jsou zapojeny do série, aby bylo dosaženo vyššího napětí, což je nezbytné pro efektivní přenos energie a připojení ke střídači. Napětí jednoho fotovoltaického modulu typicky dosahuje okolo 30 V, ale sériové zapojení panelů může vygenerovat celkové napětí systému až přes 1000 V DC, v závislosti na počtu a typu modulů v sérii.

Fotovoltaický systém generuje stejnosměrný proud (DC), který je přeměněn střídači na střídavý proud (AC), standardně používaný v domácnostech a připojený k elektrické síti. Některé střídače, známé jako hybridní, navíc umožňují dobíjení bateriových úložišť, což zvyšuje efektivitu a energetickou nezávislost systému, zejména pokud vyrobená energie není okamžitě spotřebována. Tyto hybridní střídače jsou často používány v rodinných domech pro optimalizaci spotřeby energie.

Podle normy ČSN 33 2000-7-712 jsou fotovoltaické systémy kategorizovány na základě napětí v DC části na systémy s napětím do 120 V DC a nad 120 V DC, s různými požadavky na konstrukci a bezpečnost. Hodnota 120 V DC rovněž souvisí s hranicí malého napětí, ale neimplikuje automaticky bezpečnostní hranici napětí.

Napětí modulů je také ovlivněno teplotním koeficientem, který určuje, jak se napětí modifikuje s měnící se teplotou okolí – při nižších teplotách dochází k zvýšení napětí, zatímco vyšší teploty mohou vést k jeho poklesu. [6] [7]

2.2 Co je rapid shutdown a jeho technický princip

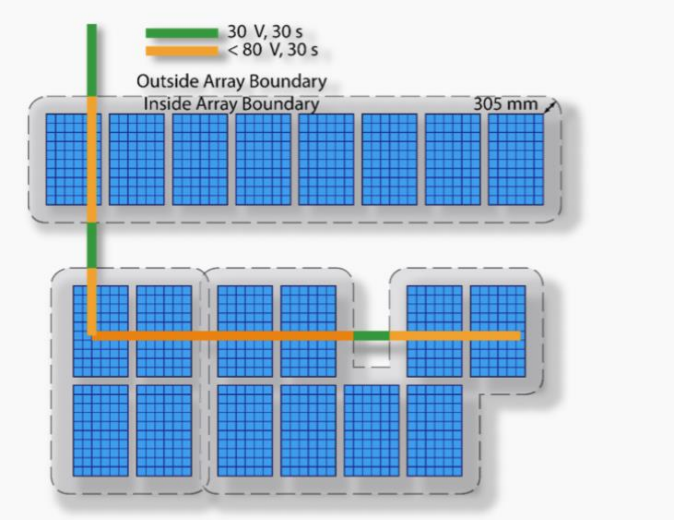
Definice Rapid Shutdown NEC 690.12

Rapid shutdown je bezpečnostní funkce vyžadovaná pro fotovoltaické systémy instalované na nebo ve stavbách. Tato funkce umožňuje rychlé snížení napětí ve fotovoltaických obvodech na bezpečnou úroveň během 30 sekund od její aktivace. Jejím hlavním účelem je snížení rizika elektrického šoku pro hasiče při zásazích na střechách budov s fotovoltaickými systémy. [8]

Je důležité si uvědomit, že předpisy pro rapid shutdown specifikují pouze požadované výsledné hodnoty jako napětí a čas pro jejich dosažení, ale nenařizují použití konkrétní technologie k jejich realizaci.

Rapid shutdown může být aktivován fyzickým stisknutím bezpečnostního tlačítka nebo může zahrnovat řídicí mechanismy, které např. neustále vysílají modulovaný signál na DC části a v případě jeho ztráty dojde k jeho automatické aktivaci. Tyto mechanismy mohou být integrovány přímo do fotovoltaických střídačů nebo mohou fungovat jako samostatné jednotky, které jsou připojeny k fotovoltaickým panelům nebo stringům. Díky

tomu je možné rapid shutdown implementovat i do stávajících fotovoltaických systémů bez nutnosti kompletní výměny stávající infrastruktury. [9]



Obrázek 1 Rozdělení vnitřní a vnější zóny rapid shutdown [55]

2.3 Možnosti dosažení rapid shutdown

2.3.1 Zařízení pro Rapid Shutdown

Tato zařízení se liší od optimizérů a mikrostřídačů tím, že se nezaměřují na zvyšování výkonu nebo efektivity, ale výhradně na bezpečnostní aspekty. Ačkoliv některé varianty těchto zařízení mohou obsahovat funkce jako je monitorování stavu panelů, tato práce se zaměřuje výhradně na ty modely, které poskytují pouze rapid shutdown funkci.

Obrázek 2 RSD TIGO TS4-A-F [56]

Obrázek 3BENY RSD [57]

Rapid shutdown u zařízení TIGO

Princip rapid shutdown systému od TIGO je založen na dvou hlavních komponentách: RSS vysílači instalovaném v blízkosti střídače a zařízení jako TS4-A-F instalovaných přímo na jednotlivé panely.

RSS vysílač používá technologii Power Line Communication (PLC) k přenosu signálů po elektrickém vedení, což umožňuje bezproblémovou a rychlou komunikaci bez nutnosti dodatečné kabeláže.

V případě vzniku nebezpečné situace, jako je požár, nebo při manuálním aktivování nouzového vypínače, RSS vysílač přestane vysílat modulovaný DC signál, který by za normálního provozu přijímala zařízení pro rapid shutdown připojená přímo k solárním panelům.

Na nepřijetí signálu zařízení okamžitě reagují snížením výstupního napětí solárních panelů na bezpečnou minimální úroveň, obvykle velmi blízkou nule. Toto rychlé snížení napětí efektivně odpojuje solární panely od elektrické sítě, čímž eliminuje jakékoliv riziko úrazu elektrickým proudem nebo vzniku požáru způsobeného elektrickou energií. [10]

Instalace a kompatibilita

Zařízení pro rapid shutdown lze instalovat na nové nebo stávající fotovoltaické systémy. Některá zařízení, jako například Tigo, jsou kompatibilní s většinou stávajících typů solárních panelů a invertorů, což umožňuje integraci do systému s relativně menšími úpravami. Instalace těchto zařízení obvykle zahrnuje přidání optimizérů na každý fotovoltaický modul, které se neobejde bez rozšíření stávajících elektrických obvodů a natahování ovládací kabeláže mezi moduly a invertorem. To může zahrnovat také úpravy v elektrických rozvaděčích, aby bylo zajištěno správné fungování celého systému a jeho bezpečnost. [11]

2.3.2 Optimizéry

Optimizéry výkonu jsou specializovaná zařízení umístěná přímo na solárních panelech, jejichž hlavní funkcí je zvyšování efektivity a zajištění bezpečnosti fotovoltaických systémů. Tato zařízení jsou navržena tak, aby nezávisle řídila výkon každého panelu, což umožňuje optimalizaci výkonu podle aktuálních podmínek prostředí a stavu panelu. Díky technologii Maximum Power Point Tracking (MPPT), optimizéry neustále vyhledávají a udržují panel na jeho maximálním možném bodě výkonu, což značně zvyšuje celkovou účinnost systému. [12]

Obrázek 5 Optimizér SolarEdge P950-4RMXMBY [58]

Obrázek 4 Optimizér TIGO TS4-A-O [59]

MPPT

MPPT neboli sledování maximálního výkonového bodu, je technologie využívaná v solárních fotovoltaických systémech k optimalizaci množství generované elektrické energie. Regulátor MPPT monitoruje výstupní napětí solárního panelu a porovnává jej s napětím baterie, aby identifikoval optimální výkonový bod (MPP), kde panel produkuje nejvíce energie. Následně upravuje elektrické podmínky mezi panelem a baterií, čímž zvyšuje efektivitu přenosu energie a celkovou účinnost solárního systému. [13] [14]

Konfigurace optimizérů

Některé systémy fotovoltaických panelů umožňují konfigurace, kde jeden optimizér řídí výkon jednoho nebo dvou. Tato konfigurace může nabídnout úspory z hlediska nákladů na pořízení a instalaci, jelikož počet použitých optimizérů může být nižší. Nicméně, taková konfigurace může znamenat kompromis v optimalizaci výkonu, zejména v situacích, kdy na panely působí různé úrovně osvětlení. Přesto může být výhodná v případech, kde jsou všechny panely vystaveny uniformním podmínkám, což umožňuje efektivní využití jednoho optimizéru pro více panelů. [15]

Kompatibilita a integrace systémů

Některé značky optimizérů, například SolarEdge, vyžadují specificky kompatibilní střídače. Tyto požadavky na kompatibilitu mohou omezit možnosti při výběru dalších komponent a vyžadovat zvláštní plánování při návrhu systému. Správná integrace a funkčnost celého systému závisí na pečlivém výběru kompatibilních komponent. [11] [9]

Rapid shutdown u optimizérů

Rapid shutdown systém lze aktivovat buď manuálně pomocí nouzového vypínače, nebo automaticky, když systémové senzory zaznamenají potenciální nebezpečí, jako je požár. Po aktivaci systém přestane převádět vyšší napětí ze solárních panelů na nižší napětí potřebné pro invertor. DC/DC měniče v každém optimizéru jsou pak nastaveny tak, aby snížily výstupní napětí panelů na bezpečnou minimální úroveň, typicky 0,6 V na panel.

U technologie SolarEdge je pro zahájení procesu rapid shutdown je vysílán modulovaný PLC signál, který koordinuje a monitoruje stav panelů. Pokud dojde k ztrátě tohoto signálu, například při vypnutí střídače, optimizéry okamžitě reagují snížením napětí, čímž zajišťují vyšší bezpečnost systému.

U technologie TIGO je komunikace a kontrola celého systému koordinována prostřednictvím Communication and Control Adapter (CCA), který je připojen k internetu a umožňuje dálkové sledování a správu systému a TAP neboli Transmitter Access Point, který je instalován přímo na solární panel a připojen k CCA. TAP slouží k realizaci příkazů pro rapid shutdown a komunikuje s ostatními zařízeními v systému bezdrátově prostřednictvím mesh sítě, zajišťující rychlou a spolehlivou reakci v případě nouze. Jedno zařízení TAP může komunikovat až s 300 optimizéry, což umožňuje efektivní správu a kontrolu velkého počtu solárních panelů. [16] [9]

2.3.3 Mikrostřídače

Mikrostřídače jsou technologií ve fotovoltaických systémech, která umožňuje nezávislé řízení výkonu každého solárního panelu. Tato zařízení přeměňují stejnosměrný proud

Obrázek 6 Mikrostřídač Enphase IQ8HC [60]

(DC) přímo na místě na střídavý proud (AC), což zvyšuje celkovou efektivitu systému a zlepšuje jeho bezpečnost. Mikrostřídače, stejně jako optimizéry, integrují technologii Maximum Power Point Tracking (MPPT) pro optimalizaci výkonu každého panelu, ale jsou navíc schopné nezávisle fungovat na každém panelu.

Rapid shutdown proces u mikrostřídačů

Na rozdíl od tradičních střídačových systémů, kde je rapid shutdown realizován pomocí externích zařízení snižujících napětí v celém systému, mikrostřídače jsou již vybaveny vnitřními mechanismy pro rychlé vypnutí. Tyto mechanismy zajišťují, že v případě aktivace rapid shutdown funkce dojde k okamžitému přerušení konverze stejnosměrného proudu (DC) na střídavý proud (AC). To v praxi znamená, že jakmile je rapid shutdown iniciálně spuštěn, mikrostřídače přestanou dodávat střídavý proud do sítě, což okamžitě odstraní jakékoliv napětí na AC straně systému. [17]

Pokud jde o stejnosměrnou stranu, mikrostřídače obvykle pracují s nízkým napětím na úrovni jednotlivých panelů, což je obvykle do 60 V DC. Toto napětí je natolik nízké, že v souladu s bezpečnostními předpisy často není vyžadováno další snížení nebo vypnutí. [17]

Kompatibilita

Je důležité zmínit že mikrostřídače mohou mít problémy s kompatibilitou s bateriovými systémy, které nepodporují AC coupling. Problém spočívá v tom, že mikrostřídače

přeměňují energii přímo na střídavý proud (AC), zatímco většina bateriových systémů vyžaduje pro nabíjení stejnosměrný proud (DC). [17]

2.3.4 Přehled výhod a nevýhod jednotlivých technologií

Rapid shutdown zařízení

Výhody:

Kompatibilita:	Kompatibilní s většinou fotovoltaických systémů bez nutnosti speciální konfigurace.
Nízké náklady:	Levnější než optimizéry a mikrostřídače.

Nevýhody:

Omezené funkční vylepšení:	Nezlepšují efektivitu nebo výkon systému.
Základní funkcionalita:	Poskytují pouze základní bezpečnostní funkce bez možnosti monitoringu nebo diagnostiky.

Optimizéry

Výhody:

Optimalizace výkonu:	Optimalizují výkon při zastínění, nebo komplikovaných instalacích na více střechách
Monitoring a diagnostika:	Poskytují možnost detailního monitoringu výkonu každého solárního panelu, což usnadňuje identifikaci a řešení technických problémů.
Flexibilita systému:	Nabízejí vysokou míru flexibility při návrhu systému, umožňují optimální uspořádání panelů i v komplikovaných instalacích.

Nevýhody:

Počáteční náklady:	Vyšší počáteční investice kvůli potřebě instalace optimizéru na každém panelu.
Kompatibilita:	Mohou vyžadovat specifické typy invertorů, což může omezit možnosti výběru např. SolarEdge.
Vyšší náklady:	Dražší než varianta zařízení bez monitoringu a optimalizace.

Mikrostřídače

Výhody:

Optimalizace výkonu:	Optimalizují výkon při zastínění, nebo komplikovaných instalacích na více střechách
Monitoring a diagnostika:	Poskytují možnost detailního monitoringu výkonu každého solárního panelu, což usnadňuje identifikaci a řešení technických problémů.
Flexibilita systému:	Nabízejí vysokou míru flexibility při návrhu systému, umožňují optimální uspořádání panelů i v komplikovaných instalacích.
Stabilita výkonu při poruše:	Pokud se rozbije jeden mikrostřídač, zbytek instalace stále pracuje, kdežto při rozbití stringového invertoru instalace není provozu schopna.
Snadné navýšení výkonu:	Pokud by se majitel rozhodl rozšířit svou FVE a navýšit její výkon, nemusí řešit překročení maximálního výkonu střídače.

Nevýhody:

Vysoké počáteční náklady:	Každý solární panel vyžaduje vlastní mikrostřídač, což zvyšuje celkové náklady instalace.
Kompatibilita:	Pro instalace s mikrostřídači je nutné aby zbylá technologie byla kompatibilní se vzolenými mikrostřídači.
Méně známá technologie:	V České republice není tato technologie běžně používaná, což může ztížit nalezení firmy schopné ji realizovat.
Nejvyšší náklady:	Z těchto 3 variant poskytujících rapid shutdown se jedná o nejdražší variantu.

Tabulka 1 Přehled výhod a nevýhod technologií umožňujících rapid shutdown

2.3.5 Další alternativní metody vypínání FV systémů

Kromě těchto tří nejpoužívanějších metod existují i další způsoby, jak dosáhnout bezpečného napětí, v této práci však nebudou dále uvažovány jsou zde pouze zmíněny.

Vypínání zkratováním výstupu panelů

Zkratování fotovoltaických panelů, přestože je to kontroverzní metoda, je uznávána v některých evropských normách jako efektivní způsob vypínání PV systémů. Slovenská norma STN 34 3085:2016, německá norma VDE-AR-E 2100-712 a rakouská směrnice OVE-Richtlinie R 11-1 povolují zkratování panelů individuálně nebo ve skupinách. Zkratování na úrovni panelů je preferováno pro svou schopnost omezit dopad selhání zkratovacího zařízení na celý systém.

Zkratovací zařízení vyžadují dimenzování alespoň na 1,25násobek ISC(STC) panelu a musí obsahovat diody proti zpětnému toku proudu. [18]

Vypínání odpojováním panelů

Tato metoda využívá dálkově ovládané vypínače pro odpojení DC kabeláže od panelů. I když jsou samotné panely a pod nimi ležící kabeláže stále pod napětím, DC kabeláž mimo PV pole je po aktivaci vypínače bez napětí. Používají se mechanické vypínače, které by měly být dimenzovány na minimálně 1,25násobek ISC(STC) panelu. Tato metoda bohužel ale nezajišťuje beznapěťový stav v samotném PV poli, a tedy není pro podmínky ČR vhodná. [18]

Napětím do 400 V DC

Podle metodického listu HZS číslo P 48, článek I odstavec 10 písmeno a) jsou hasiči vybaveni postupy pro zásahy v prostředích s napětím až do 400 V AC/DC, což otevírá možnosti pro zajištění požární bezpečnosti objektů s fotovoltaickými instalacemi. Nejjednodušší metodou zajištění bezpečnosti je udržování maximálního napětí DC části (UOC max) do 400 V. [50]

U menších fotovoltaických systémů na rodinných a bytových domech lze toto napětí snadno regulovat například pomocí mikrostřídačů, které umožňují efektivní přeměnu a regulaci napětí. V případě větších systémů je však obtížné nalézt centrální střídače s požadovanými specifikacemi nízkého napěťového rozsahu (100 až 400 V) a zároveň s vysokou proudovou zatížitelností pro paralelní zapojení více řetězců, což naznačuje možné technologické omezení v dostupných řešeních na trhu.

Na rodinných a bytových domech lze tyto systémy implementovat bez větších problémů, včetně systémů pracujících na bezpečném napětí do 120 V DC. Přestože taková instalace představuje vyšší investiční náklady, vyšší počáteční investice neznamená, že by realizace byla nevhodná. [18]

Bezpečnost rozpojováním řetězců

Při této metodě se v rozváděči DC části osazují stykače, které při aktivaci vypínacího povelu rozepnou řetězce na menší segmenty s napětím do 400 V, což dovoluje hasit systém při požáru vodou. Tato metoda je efektivní i pro systémy s vyšším napětím, kde lze rozdělením řetězců na menší segmenty dosáhnout požadovaného napětí pro bezpečné hašení. [18]

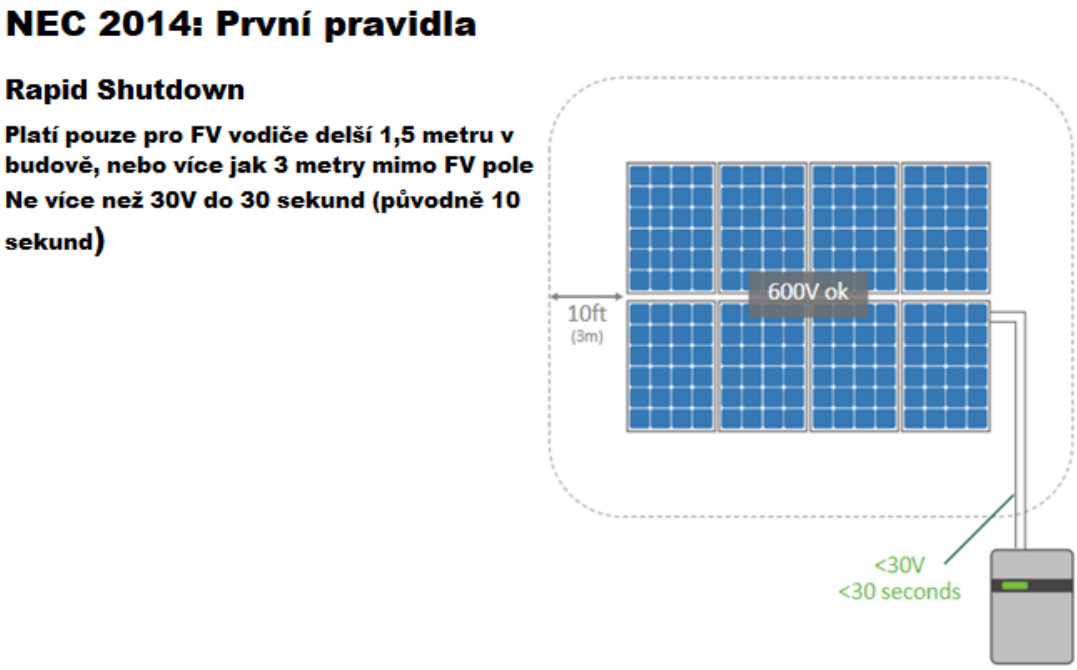
2.4 Historický vývoj a současný stav rapid shutdown

Historie a vývoj rapid shutdown je úzce spojen s regulacemi v oblasti elektrické bezpečnosti. Jako jedna z klíčových iniciativ byl rapid shutdown poprvé zakotven v americkém národním elektrickém kodexu (NEC). NEC, který je široce uznávaným souborem pravidel pro bezpečné elektrické instalace ve Spojených státech, zahrnul požadavky na rapid shutdown poprvé ve své verzi z roku 2014. Hlavním impulsem pro zavedení těchto pravidel byla snaha zvýšit bezpečnost hasičů při práci s fotovoltaickými systémy, zejména v případě požárů. [9] [19]

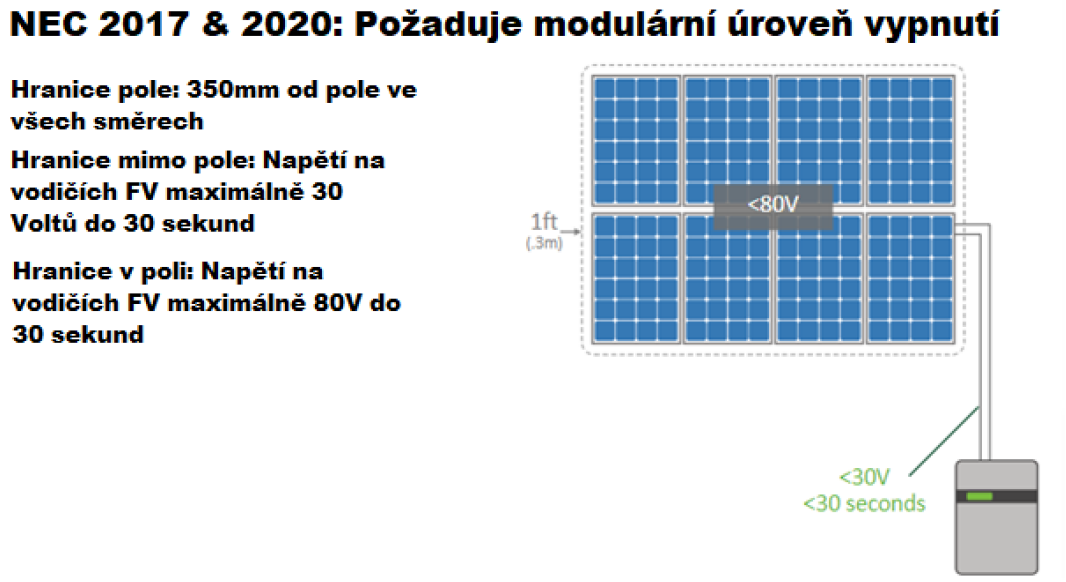
Od uvedeného roku rapid shutdown prošel výrazným vývojem a adaptací, aby odpovídal rostoucím požadavkům na bezpečnostní normy a standardy. V současné době je integrovanou součástí mnoha fotovoltaických instalací po celém světě a je považován za základní prvek bezpečnostního designu fotovoltaických systémů. [9] [19]

Vývoj rapid shutdown není omezen pouze na Spojené státy. Další země a regiony, jako například Evropa, Austrálie a některé asijské země, rovněž implementovaly podobné bezpečnostní normy a standardy. Tyto normy často explicitně stanovují požadavky na rapid shutdown a předepisují její implementaci v nových instalacích. [9] [19]

V současnosti se v oblasti rapid shutdown systémů neustále vyvíjejí nové technologie s cílem zdokonalit jejich funkčnost a zvýšit kompatibilitu s různými typy fotovoltaických systémů. Trendy ve výzkumu a vývoji zahrnují snahy o zlepšení efektivity, bezpečnosti a snížení nákladů na instalaci, což jsou klíčové aspekty pro další rozvoj a rozšíření fotovoltaických systémů po celém světě. Inovace v této oblasti jsou zásadní pro zajištění bezpečného a efektivního provozu fotovoltaických systémů v souladu s místními předpisy a normami. [9] [19]



Obrázek 7 NEC 2014 Požadavky na rapid shutdown [61]



Obrázek 8 NEC 2017 & 2020 Požadavky na rapid shutdown [61]

Rozdíl mezi verzemi 2014 a 2017 spočívá v požadavcích na napětí v PV poli. Verze 2014 umožňovala ponechat napětí v PV poli libovolné (například 600 V, jak je uvedeno na

obrázku), což umožňovalo používání odpínačů na okraji PV pole. Naproti tomu verze 2017 vyžaduje snížení napětí na pouhých 80 V, což je obtížné realizovat pomocí odpínačů (muselo by jich být mnoho a musely by odpojovat jednotlivé stringy). [9] [19]

3 Bezpečnostní aspekty

3.1 Požáry ve fotovoltaických systémech

Požáry ve fotovoltaických systémech jsou často způsobeny nedostatečnou kvalitou montáže a nesplněním doporučení výrobců a bezpečnostních standardů. Nedostatečně provedená instalace může vést k vzniku tepelných a elektrických poruch, které zvyšují riziko požáru. Běžné chyby zahrnují špatné spojení kabelů, nesprávné rozmístění komponent, nedostatečnou ventilaci, nebo použití nekvalitních materiálů, které mohou vést k přehřátí, zkratu nebo vzniku elektrického oblouku. Správná instalace a dodržování předepsaných postupů a norem může významně snížit riziko požárů a zlepšit celkovou bezpečnost systému.

V posouzení požárního rizika fotovoltaických systémů provedeném Německým ministerstvem životního prostředí, ochrany přírody a jaderné bezpečnosti (BMU) v roce 2015 byly identifikovány hlavní příčiny požárů spojené s fotovoltaikou. Dle studie, nazvané "Bewertung des Brandrisikos in Photovoltaik-Anlagen und Erstellung von Sicherheitskonzepten zur Risikominimierung", převažují následující faktory:

Chybná instalace FVE (38 %): Nejvíce požárů způsobuje neodborná instalace, konkrétně špatné zapojení DC konektorů, chybné spojení izolovaných částí kabelů, nedostatečné odlehčení kabelů a špatné utažení svorkovnic a šroubových spojů.

Výrobní vada komponentů (35 %): Druhou nejčastější příčinu představují výrobní vady, zejména špatný design, použité materiály a kvalita provedení solárních panelů a měničů.

Chyba v projektu FV systému (17 %): Chyby v projektování, jako jsou špatně zvolené pojistky a svorky, nedostatečně dimenzovaná kabeláž nebo špatně umístěné měniče vystavené korozi nebo přímému slunci, stojí za 17 % požárů.

Vnější vlivy prostředí (10 %): K rizikům dále přispívají vnější vlivy jako silný vítr nebo poškození zařízení zvěří.

Studie zdůrazňuje, že přetížení elektrických komponent a zvýšení teploty vodičů, vedoucí k možnému tání izolace a hoření okolních materiálů jsou zásadními faktory v riziku vzniku požáru. [20]

3.2 Důležitost rapid shutdown pro bezpečnost FV systémů

Navzdory četným reklamním článkům prosazujících důležitost rapid shutdown pro bezpečnost hasičů je třeba vzít v úvahu, že studie provedená Fraunhofer Institutem ve spolupráci s německým Federálním ministerstvem pro ekonomické záležitosti a energii ukázala, že do roku 2015 nebyl v Německu zaznamenán žádný případ zranění hasičů elektrickým proudem z fotovoltaických systémů během požárů, přestože v té době bylo instalováno více než 1,4 milionu systémů. Toto může naznačovat, že fotovoltaické systémy mohou být bezpečné i bez použití rapid shutdown. I když rapid shutdown může pomoci snížit riziko zranění hasičů elektrickým proudem, není jednoznačné, že je nezbytný pro jejich bezpečnost. [21]

V České republice je jedním z největších nebezpečí při instalaci fotovoltaických systémů neodbornost firem, které tyto instalace provádějí. Fotovoltaický trh se stal atraktivním pro mnoho podnikatelů, což vedlo k situaci, kdy instalace často provádějí osoby s minimální kvalifikací. Mnoho montážních pracovníků absolvovalo pouze krátké kurzy, aniž by měli dostatečné zkušenosti nebo znalosti o bezpečnostních normách a předpisech. Toto často vede k instalacím bez kvalitních projektů, ignorování základních bezpečnostních zásad a špatně provedeným montážím, což zvyšuje riziko požárů a dalších problémů. [22]

3.3 Rizika spojená s FV systémy bez rapid shutdown

3.3.1 Elektrický úraz pro hasiče

Přestože v německé studii nebyly zaznamenány případy zranění hasičů elektrickým proudem z fotovoltaických systémů, stále existuje riziko elektrického úrazu. Je třeba brát v úvahu, že ze studie není zcela jasné, jak tyto zásahy probíhaly, a je tedy možné, že hasiči

mohli zasahovat s přístupem kontrolovaného dohoření stavby. Fotovoltaické panely mohou i po odpojení od sítě generovat napětí, což může být nebezpečné při požáru nebo jiných haváriích.

Hlavní problém spočívá v tom, že hasiči obvykle hasí objekty vodou a současně mohou hasit pod napětím do 400 V (viz metodický list P48). Pokud však v systému zůstává napětí vyšší než 400 V, nelze použít vodu k hašení, protože by to představovalo vysoké riziko elektrického úrazu

Tato omezení výrazně komplikují zásahy hasičů u požárů fotovoltaických systémů, kde může být přítomno vyšší napětí. [21] [50]

3.3.2 Vzplanutí požáru vlivem DC oblouku

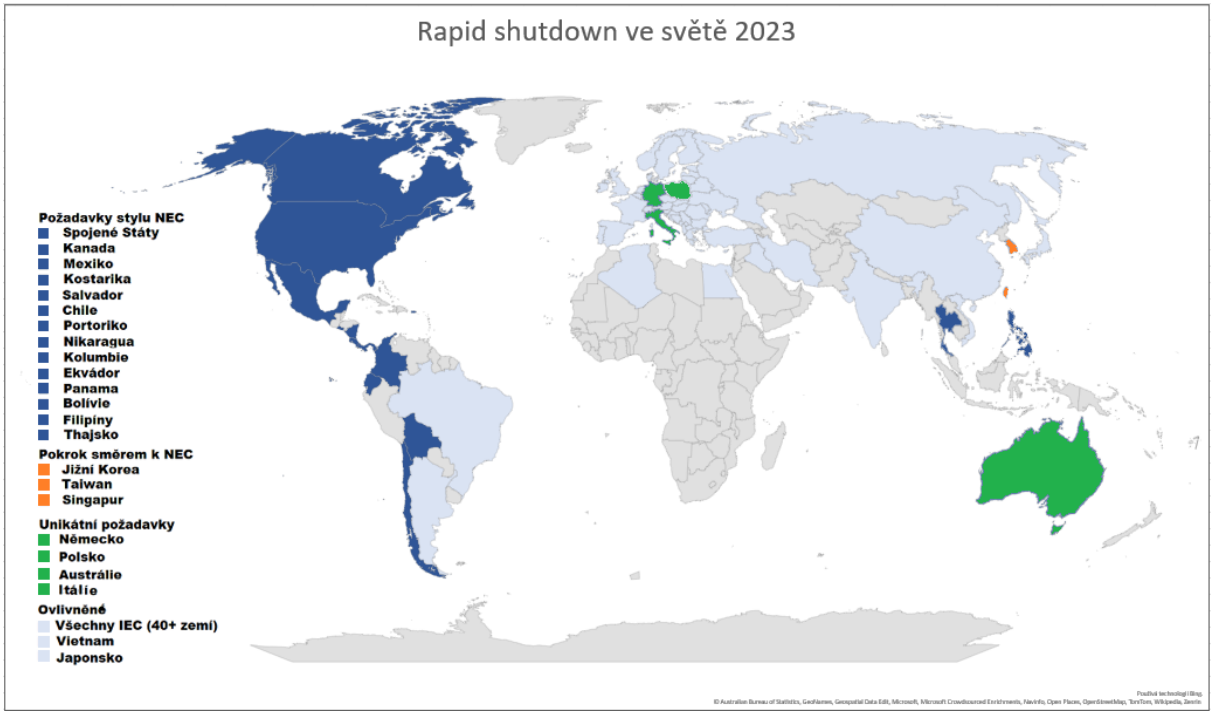
Vlivem stejnosměrného oblouku může dojít k požáru ve fotovoltaických elektrárnách. Tento jev vzniká kvůli poruchám jako je vypadnutí kontaktu, stárnutí zařízení, prasknutí izolace nebo špatné uzemnění a jeho riziko se zvyšuje s rostoucím výkonem a proudem systému. Stejnosměrný oblouk může vést k trvalému hoření, což komplikuje jeho uhašení a zvyšuje pravděpodobnost vzniku požáru. [4] [5]

3.3.3 Nehody při údržbě

Technici provádějící údržbu fotovoltaických systémů jsou vystaveni zvýšenému riziku elektrického úrazu, pokud systém není vybaven technologií umožňující rapid shutdown. Bez této technologie může v systému zůstat vysoké napětí i po jeho vypnutí, což představuje vážné nebezpečí při jakékoliv manipulaci s komponenty systému. [48]

4 Standardy a regulace

4.1 Přehled globálních standardů pro rapid shutdown



Obrázek 8 Mapa rapid shutdown ve světě

[23]

Tato část poskytuje přehled dvou hlavních norem a regulací, které jsou aplikovány na rapid shutdown ve fotovoltaických systémech, a to normy UL 3741 a požadavků National Electrical Code (NEC). Dále jsou zde vypsány normy a regulace ze zahraničí.

UL 3741

Norma UL 3741 byla zavedena k definování elektrických nebezpečí, kterým mohou být hasiči vystaveni při interakci s fotovoltaickými systémy. Obsahuje metodologie pro testování a ověřování, že systémy rapid shutdown dokážou chránit hasiče před elektrickým šokem v různých scénářích, například pokud hasiči spadnou na fotovoltaické vybavení s nářadím. Cílem je, aby tyto systémy minimalizovaly riziko úrazu elektrickým proudem. [24]

National Electrical Code (NEC)

NEC stanovuje soubor standardů pro bezpečné elektrické instalace a zahrnuje specifikace pro systémy rapid shutdown. Edice NEC pro roky 2017 a 2020 přinesly významné změny, včetně požadavku na implementaci rapid shutdown na úrovni jednotlivých solárních modulů, což představuje změnu od dřívějších požadavků, které se vztahovaly pouze na úroveň celého solárního pole. Edice pro rok 2023 přinesla pouze drobné změny. Dále, normy NEC 690.12 specifikují, jaké má být napětí na hranicích fotovoltaického pole k zajištění bezpečnosti. [8]

Implementace a certifikace

Pro splnění standardů UL 3741 a požadavků NEC je nutné, aby byly systémy rapid shutdown správně navrženy, vyrobeny a certifikovány. Zahrnuje to návrh specifických komponent, jako jsou střídače a zařízení pro rapid shutdown, včetně příslušenství. Výrobci fotovoltaických systémů nabízejí různá řešení, která odpovídají těmto standardům, používají různé technologie a metody pro dosažení bezpečného rapid shutdown.

I když jsou tyto normy a standardy primárně přijímány ve Spojených státech, mají vliv na globální trh fotovoltaických systémů. Výrobci a instalatéři ve světě se často řídí těmito standardy, aby zajistili bezpečnost a kompatibilitu svých systémů. Je důležité průběžně sledovat aktuální standardy a regulace, aby byly fotovoltaické systémy navrženy a instalovány bezpečně a efektivně, a to i v kontextu různých zemí, které mohou mít odlišné požadavky. [52]

Polsko

V Polsku byla nedávno zavedena legislativa Ustawa z dnia 13 lutego 2020 r. o zmianie ustawy - Prawo budowlane oraz niektórych innych ustaw (Dz.U. 2020 poz. 471) týkající se fotovoltaických instalací s kapacitou nad 6,5 kW. Zákon stanoví, že design mikro instalací (fotovoltaické instalace s kapacitou do 50 kW), které přesahují 6,5 kW, musí být schválen odborníkem na požární ochranu s ohledem na dodržování požárních předpisů. Navíc je po dokončení instalace nutné informovat Státní hasičskou službu o zahájení provozu. Tato regulace byla přijata v rámci aktualizace požárních bezpečnostních norem pro fotovoltaické systémy v roce 2020. [25]

Německo

V Německu došlo mezi lety 1995 a 2012 k 400 požárům, kde byly zapojeny fotovoltaické systémy. Z toho ve 180 případech byla příčinou požáru jednotlivá komponenta systému. V reakci na to byl přijat německý standard VDE-AR-E 2100-712, který vyžaduje, aby napětí v celém fotovoltaickém poli po vypnutí nepřekročilo 120 V. Tento standard byl přijat v roce 2012 a, i když není vymáhán, je brán jako nejlepší praxe pro zajištění bezpečnosti. Dále byl aktualizován v roce 2018.[26]

USA

V USA byly požadavky na rapid shutdown formálně zavedeny do National Electrical Code (NEC) v roce 2014. Tyto požadavky byly dále zpřísněny v posledních revizích NEC v letech 2017 a 2020. Tyto změny zdůrazňují potřebu umožnit rapid shutdown na úrovni jednotlivých modulů, což zlepšuje bezpečnost hasičů a techniků při zásahu. V roce 2023 došlo k dalším dodatkům, avšak byly pouze minoritní. [8]

Austrálie

Austrálie přijala bezpečnostní standardy podobné těm v USA a EU, které zahrnují požadavky na rapid shutdown. Tyto požadavky byly implementovány v rámci australských standardů pro fotovoltaické systémy, zvláště ve standardu AS/NZS 5033, aktualizovaném v roce 2021, který se týká instalace fotovoltaických (PV) systémů. [27]

Itálie

Itálie přijala směrnice pro fotovoltaické systémy, které vyžadují zařízení pro rapid shutdown v nových instalacích. Tyto směrnice byly zavedeny v národních elektrotechnických normách CEI 0-21 a CEI 0-16, s posledními aktualizacemi v roce 2019. Tyto normy jsou zaměřeny na zajištění bezpečnosti fotovoltaických instalací, zejména ve vztahu k ochraně proti elektrickým šokům a požární bezpečnosti. Zvláštní důraz je kladen na ochranu hasičů a záchranných týmů při zásazích, aby byli chráněni před potenciálním nebezpečím elektrického úrazu během nouzových situací. [28] [29]

Španělsko

Španělsko má přísné požadavky na bezpečnost fotovoltaických instalací, včetně rapid shutdown. Tyto požadavky jsou součástí národního elektrotechnického kodexu (REBT – Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión), který byl aktualizován v roce 2017. Normy stanoví, jak musí být fotovoltaické systémy navrženy a instalovány, aby bylo minimalizováno riziko elektrického úrazu pro hasiče a servisní techniky. [30]

Francie

Ve Francii musí být fotovoltaické instalace vybaveny systémy rapid shutdown podle směrnic stanovených ve standardu NF C 15-100. Tento standard, posledně aktualizovaný v roce 2020, zahrnuje specifikace pro návrh a provoz fotovoltaických systémů s ohledem na bezpečnost a ochranu proti požáru. [31]

Nizozemsko

V Nizozemsku jsou požadavky na bezpečnost fotovoltaických systémů definovány v národních normách NEN 1010, které zahrnují protokoly pro rapid shutdown. Tyto normy jsou navrženy tak, aby zajistily, že všechny fotovoltaické systémy jsou schopny rychle se odpojit v případě požáru nebo jiné nouzové situace. Normy NEN 1010 byly naposledy revidovány v roce 2015. [32]

Švédsko

Švédsko přijalo normy pro fotovoltaické systémy, které zahrnují bezpečnostní opatření pro rapid shutdown. Tyto požadavky jsou integrovány do švédských elektrotechnických norem, známých jako Svensk Standard (SS), které zahrnují detailní pokyny pro instalaci a provoz fotovoltaických systémů s důrazem na bezpečnost a rychlou reakci v případě požáru. Konkrétně pak Svensk Standard SS 436 40 00 (Electrical installations of buildings – Rules for design and erection of electrical installations) z roku 2012 dále aktualizováno a revidováno do nejnovější podoby v roce 2024. [33]

Rakousko

Rakousko má předpisy pro instalaci fotovoltaických systémů, které zahrnují komponenty rapid shutdown podle normy OVE-Richtlinie R 11-1:2022-05-01, aktualizované v květnu

2022. Tento standard se zaměřuje na bezpečnostní aspekty instalace a provozu fotovoltaických systémů, včetně požadavků na rychlé odpojení pro ochranu proti požárním rizikům. Norma specifikuje detailní pokyny pro implementaci bezpečnostních opatření, které mají minimalizovat riziko požáru a zajistit bezpečný provoz fotovoltaických instalací. [34]

Slovensko

Tato norma stanovuje bezpečnostní požadavky a technické specifikace pro instalaci a provoz fotovoltaických systémů. STN 34 3085: 2016 zahrnuje požadavky na rychlé vypnutí (rapid shutdown) systému, aby napětí v celém fotovoltaickém poli po vypnutí nepřekročilo bezpečnou úroveň. Tato norma byla přijata s cílem minimalizovat riziko elektrického úrazu a zvýšit požární bezpečnost. Normy jsou zaměřeny na zajištění bezpečnosti a spolehlivosti fotovoltaických instalací, čímž přispívají k celkové bezpečnosti energetických systémů na Slovensku. [35]

4.2 Specifika české legislativy a standardů FV

4.2.1 ČSN P 73 0847

Norma ČSN pro fotovoltaické systémy (FVE) se zaměřuje zejména na aspekty požární bezpečnosti a zahrnuje požadavky pro rapid shutdown systémy pro zajištění bezpečnosti v případě mimořádných situací. Níže jsou popsány klíčové detaily a specifikace, které norma uvádí.

Materiály a konstrukce

U PV systémů se klade důraz na použití nehořlavých materiálů (třída reakce na oheň A1 nebo A2) pro moduly, panelové systémy a konstrukce, jakož i pro kabely a kabelové žlaby. Dále je požadováno, že materiály musí odpovídat specifickým požadavkům požární odolnosti. [36]

Umístění a bezpečnostní zařízení: Norma uvádí, že měniče a další kritické komponenty musí být umístěny na nehořlavých podkladech s dodatečným prostorovým přesahem a ve speciálně určených požárních úsecích, aby se minimalizovalo riziko šíření požáru. Kritické komponenty musí být umístěny co nejblíže k místu vypnutí elektrické energie pro rychlé a bezpečné odpojení v případě potřeby. [36]

Rapid Shutdown

Systém rychlého odpojení (rapid shutdown) musí snížit napětí na DC straně na maximálně 120 V během mimořádných situací, aby se zajistila bezpečnost osob zasahujících při požáru nebo jiné mimořádné události. [36]

Signalizace a značení

Instalace musí být jasně označeny, včetně všech místa vypínání elektrické energie a vstupů na střechy, kde jsou PV systémy umístěny. Informace o instalaci a možném přesahu napětí musí být k dispozici pro zásahové jednotky v případě požáru. [36]

Bezpečnostní opatření a přístupy

Norma stanovuje, že přístupy a evakuační cesty musí být navrženy tak, aby nebyly blokovány instalacemi PV systémů a aby zásahové jednotky měly k systémům snadný přístup pro rychlou a efektivní reakci. [36]

Tato norma tedy poskytuje komplexní rámec pro zajištění požární bezpečnosti a bezpečnosti provozu při instalaci a provozu fotovoltaických systémů, včetně specifických požadavků na systémy rychlého odpojení k ochraně před elektrickým proudem během mimořádných událostí.

4.2.2 Vyhláška č. 114/2023 Sb.

Tato vyhláška stanovuje požadavky na bezpečnou instalaci výroben elektřiny využívajících obnovitelné zdroje energie s instalovaným výkonem do 50 kW. Tato vyhláška se vztahuje zejména na fotovoltaické elektrárny (FVE) umístěné na rodinných domech a přidružených stavbách, jako jsou garáže nebo pergoly. [37]

Materiálové provedení

Obdobné jako v ČSN P 73 0847.

Vypnutí a odpojení od elektrické instalace a distribuční soustavy

Každá výrobna elektřiny musí mít možnost bezpečného vypnutí a odpojení. Vypínací prvek musí být umístěn na přístupném místě, označen a musí být zabráněno jeho volnému užití. Pro výrobny umístěné na budovách je nutné zajistit další vypnutí podle ČSN 73 0848, což zahrnuje instalaci vypínacího prvku s funkcí „TOTAL STOP“ nebo podobnou funkcí.

U rodinných domů s výrobou elektřiny do 10 kW není požadováno dosažení bezpečné úrovně stejnosměrného napětí v jakékoli části rozvodu. [37]

Kabelové vedení

Vnější části kabelových rozvodů musí být vyrobeny z materiálu odolného proti UV záření. Rozvaděče a střídače musí být instalovány na nehořlavé podkladové konstrukci, která přesahuje jejich půdorys alespoň o 500 mm. Kabelové prostupy požárně dělicími konstrukcemi musí být utěsněny certifikovaným systémem podle ČSN 73 0810. [37]

Výjimky

Rodinné domy s výrobou elektřiny do 10 kW: Pro tyto instalace není požadováno dosažení bezpečné úrovně stejnosměrného napětí.

Instalace zahájené před účinností vyhlášky: Projekty zahájené před 1. květnem 2023 nemusí splňovat nové požadavky této vyhlášky.

Stavby, které nejsou kulturními památkami: Instalace FVE nesmí zasahovat do nosných konstrukcí stavby, měnit způsob užívání stavby nebo vyžadovat posouzení vlivů na životní prostředí. [37]

Vyhláška je klíčová pro zajištění bezpečnosti instalací obnovitelných zdrojů energie do 50 kW. Důraz je kladen na použití nehořlavých materiálů, zajištění bezpečného vypnutí systémů a správné provedení kabelových rozvodů.

4.2.3 Energetický zákon č. 458/2000 Sb.

Energetický zákon č. 458/2000 Sb. definuje legislativní rámec pro trh s energiemi v České republice. Hlavním účelem tohoto zákona je regulovat vztahy v energetice, zejména v oblastech výroby, přenosu, distribuce, obchodu a využívání energie s důrazem na ochranu spotřebitele a podporu hospodářské soutěže.

V kontextu fotovoltaických systémů se zákon nezaměřuje specificky na technické detaily nebo bezpečnostní aspekty připojení těchto systémů k elektrické síti. Spíše poskytuje obecné směrnice pro provozovatele energetických systémů, které musí splňovat obecné technické, bezpečnostní a ekonomické požadavky stanovené státními energetickými autoritami. [38]

4.2.4 Technická norma ČSN 33 2000-7-712 ed. 2

ČSN 33 2000-7-712 ed. 2 je technická norma, která specifikuje požadavky na elektrické instalace fotovoltaických (FV) systémů. Stanovuje pravidla pro instalaci, provoz a údržbu FV systémů, aby byla zajištěna jejich bezpečnost a spolehlivost. [7]

Rozdělení napětí z hlediska úrazu

ČSN 33 2000-7-712 ed. 2 definuje bezpečné napětí pro stejnosměrné (DC) obvody na 120 V DC podle ČSN 33 2000-4-41. Toto napětí je považováno za bezpečné z hlediska ochrany osob před úrazem elektrickým proudem. Instalace musí obsahovat izolační materiály a ochranné prvky, které zabrání kontaktu s částmi pod napětím. [7]

Pravidla pro používání pojistek

Pojistky musí být dimenzovány tak, aby chránily obvody před přetížením a zkratem. Například pro FV systémy s vysokým proudovým zatížením se používají pojistky dimenzované na odpovídající hodnoty proudu. Pojistky musí být umístěny v snadno přístupných rozvaděčích nebo pojistkových skříních, které umožňují jejich rychlou výměnu nebo kontrolu.

Pravidla pro ochranu před bleskem

FV systémy musí být uzemněny v souladu s požadavky normy ČSN EN 62305, což zahrnuje použití zemnicích vodičů a uzemňovacích soustav, které zajistí bezpečné odvádění bleskových proudů. FV systémy musí být také vybaveny přepěťovými ochranami (SPD), které minimalizují riziko poškození způsobeného přepětím. Přepěťové ochrany by měly být dimenzovány na ochranu proti nejvyšším očekávaným přepětím v dané lokalitě. [7]

Pravidla pro instalaci

Fotovoltaické moduly musí být mechanicky upevněny tak, aby odolaly povětrnostním podmínkám, jako je vítr a sníh. To zahrnuje použití montážních systémů, které jsou certifikovány pro dané podmínky. Kabeláž musí být vedena a upevněna tak, aby byla chráněna před mechanickým poškozením a UV zářením. Kabely pro stejnosměrné (DC) a střídavé (AC) obvody musí být jasně označeny a odděleny. Kabely musí být dimenzovány podle maximálního proudu a musí mít dostatečný průřez, aby nedocházelo

k nadměrnému ohřevu. Všechny kabelové spojky a průchodky musí být vodotěsné a mechanicky odolné, aby zajistily dlouhodobou spolehlivost instalace.

FV systémy musí být vybaveny vypínacími prvky, které umožní rychlé odpojení systému v případě nouze. Tyto prvky musí být snadno přístupné a jasně označené. Hlavní vypínač musí umožnit úplné odpojení FV systému od elektrické sítě a doporučuje se jeho umístění blízko vstupu do budovy, aby byl snadno dostupný v případě potřeby rychlého vypnutí. Pro systémy instalované na budovách může být vyžadován systém rapid shutdown, který zajistí snížení napětí na bezpečnou úroveň během několika sekund. [7]

Ochrana před požárem

Obdobné jako v ČSN P 73 0847.

Údržba a provoz

FV systémy musí být pravidelně kontrolovány a udržovány, aby byla zajištěna jejich dlouhodobá bezpečnost a spolehlivost. Inspekce by měly zahrnovat kontrolu elektrických spojů, integrity kabeláže a funkčnosti ochranných prvků. Pravidelná kontrola elektrických spojů je nezbytná k zajištění, že nedochází k uvolnění nebo oxidaci spojů, což by mohlo vést k poruchám nebo požárům. Ochranné prvky, jako jsou přepěťové ochrany a pojistky, by měly být pravidelně testovány a vyměňovány podle potřeby. Provozovatelé FV systémů by měli vést podrobné záznamy o všech provedených údržbách a inspekcích, které jsou důležité pro sledování stavu systému a plánování preventivní údržby. [7]

5 Ekonomické faktory

5.1 Náklady a investice rapid shutdown

V této sekci jsou naceněny jednotlivé varianty realizace rapid shutdown a to pomocí rapid shutdown zařízení, optimizérů a mikrostřídačů. Pro srovnání je zde uvedena i varianta bez jakékoliv technologie umožňující rapid shutdown. Varianty jsou seřazeny podle ceny.

Nabídka s optimizéry (3) je převzata ze skutečné již realizované zakázky z roku 2023. Další varianty jsou upravené verze této původní nabídky.

Jedná se o rodinný dům v blízkém okolí Prahy s roční spotřebou 6120 kWh. Uvažován je prodej přebytečné energie (po nabití baterií) do sítě, virtuální baterie ani ukládání energie do ohřevu vody uvažováno není. Na přání zákazníka byl instalován nejvyšší možný výkon do 10 kWp (nehledě na spotřebu objektu) a to 9,72 kWp vzhledem ke zvoleným panelům značky Jinko *Tiger Neo N-type 54HL4-(V) 405 Watt.* Původní nabídka byla naceněna pro variantu s optimizéry, kde po dohodě s firmou instalující konstrukci a panely na střechu RD není naceněna práce s instalací optimizérů a je počítáno pouze s cenou instalace 1000 Kč za panel. Cena není zvýšena o instalaci optimizérů nebo rapid shutdown zařízení, neboť vzhledem ke zvolené technologii TIGO je vyžadováno upevnění na zadní stranu panelu pouhým zasunutím za jeho okraj a propojení kabelů z panelu s kabely v optimizéru. Dále jsou kabely z optimizérů spojovány do společného stringu stejně jako by byly spojovány kabely samostatných panelů. Tato cena se liší u technologie mikrostřídačů Enphase a bude popsána v části věnující se této technologii.

Kromě technologie mikrostřídačů Enphase je zvolen střídač o výkonu 10 kW – nepočítaje s možností předimenzování.

Jelikož se v žádné variantě nejedná o ostrovní systém je nutno uvažovat instalaci HDO (hromadné dálkové ovládání) a úpravu elektroměrového rozvaděče. V následujících cenících jsou tyto dvě položky shrnuty do jedné označené HDO.

Cena práce a materiálu je kromě přidané technologie jednotlivých variant až na variantu s mikrostřídači uvažována stejná.

Ve všech případech je uvažována realizace firmou, ceny jsou proto uvedeny bez DPH, jež to je přičtena na konci při výpočtu ceny pro zákazníka.

Kurz Eura použitý pro přepočet jednotlivých položek je uvažován 1 EUR = 25 CZK.

5.1.1 Varianta bez rapid shutdown

Tato varianta neuvažuje žádné zařízení umožňující rapid shutdown, optimalizaci nebo monitoring a je zde uvedena pouze pro lepší srovnání. Je tedy ze všech nejlevnější, protože nevyžaduje přidaná zařízení umožňující rapid shutdown, ani zařízení potřebná ke komunikaci s majitelem.

Materiál	Typ	Cena [Kč]
Panely	Tiger Neo N-type 54HL4-(V) 405 Watt	71 685
Střídač	TIGO TSI-10K3D	55 668
Baterie 12,2 kWh	Set LFP TIGO 12,2 kWh vč. BMS	128 910
Konstrukce	K2	30 750
HDO		10 000
DC box		9 000
Solární kabel	KBE SOLAR DB+ (PLUS), 6mm	1 700
Stop tlačítko		1 000
Kabeláž CYA a chráničky DC		6 000
Práce		
Montáž panelů		24 000
Doprava materiálu		6 000
Hromosvod pospojení		1 000
Prostupy		1 000
Úprava domovního rozvaděče		15 000
Montáž technologie		32 230
Dodatky		
Elektro projekt		4 000
Revize		3 890
Administrativa		10 000
Suma		
Nákladová cena bez DPH		411 833
Cena s marží 10% bez DPH		453 016
Cena s marží a DPH 15%		520 968
Dotace		160 000
Cena po odečtení dotace		360 968

Tabulka 2 Ceník FVE bez technologie pro rapid shutdown

5.1.2 Varianta s rapid shutdown zařízením

Tato varianta využívá RS zařízení značky TIGO a to konkrétně TIGO TS4-A-2F. Jedná se o zařízení umožňující pouze funkci rapid shutdown a nenabízí optimalizaci výkonu nebo monitoring. Existují i zařízení nabízející kombinaci rapid shutdown a monitoringu bez optimalizace výkonu, ale ta nebyla v této práci uvažována. Zvolená varianta -2F umožňuje připojení jednoho zařízení na dva panely o maximálním výkonu 700 Wp pro jeden panel, tedy je zde počítáno 12 kusů. Rozdíl v ceně oproti variantě bez zařízení je tedy v ceně technologie TS4-A-2F a TIGO RSS vysílači, který pomocí PLC komunikace umožňuje aktivaci rapid shutdown. [10]

Technologie TIGO byla zvolena kvůli své široké kompatibilitě s technologiemi jiných značek.

Materiál	Typ	Cena [Kč]
Panely	Tiger Neo N-type 54HL4-(V) 405 Watt	71 685
Střídač	TIGO TSI-10K3D	55 668
Baterie 12,2 kWh	Set LFP TIGO 12,2 kWh vč. BMS	128 910
Konstrukce	K2	30 750
RS zařízení	TIGO TS4-A-2F	16 110
Technologie TIGO	TIGO TSS vysílač	1 159
HDO		10 000
DC box		9 000
Solární kabel	KBE SOLAR DB+ (PLUS), 6mm	1 700
Stop tlačítko		1 000
Kabeláž CYA a chráničky DC		6 000
Práce		
Montáž panelů		24 000
Doprava materiálu		6 000
Hromosvod pospojení		1 000
Prostupy		1 000
Úprava domovního rozvaděče		15 000
Montáž technologie		32 230
Dodatky		
Elektro projekt		4 000
Revize		3 890
Administrativa		10 000
Suma		
Nákladová cena bez DPH		429 102
Cena s marží 10% bez DPH		472 012
Cena s marží a DPH 15%		542 814
Dotace		160 000
Cena po odečtení dotace		382 814

Tabulka 3 Ceník FVE se zařízením pro rapid shutdown

5.1.3 Varianta s optimizéry

Tato varianta realizuje rapid shutdown pomocí optimizérů TIGO TS-4-A-O, které na rozdíl od TS-4-A-2F umožňují i optimalizaci a monitoring. Další rozdíl je v konfiguraci jeden optimizér na jeden panel, tedy se v tomto případě se jedná o 24 optimizérů. Pro komunikaci monitoringu je třeba další přidaná technologie CCA (Cloud Connect Advanced) a TAP (Tigo Acces Point).

CCA zprostředkovává komunikaci s majitelem, která probíhá přes internet, tedy vyžaduje buď připojení k ethernetu nebo k WI-FI. Zařízení je kabelově připojeno ke střídači, k TAP a vyžaduje externí napájení 24 V DC. CCA je schopné až se sedmi přístupovými body TAP.

TAP slouží k realizaci příkazu pro rapid shutdown. K CCA je připojen pomocí kabelu a se zařízeními realizujícími rapid shutdown komunikuje bezdrátově prostřednictvím sítě mesh. Instaluje se přímo na panel přivrtáním k podkonstrukci panelů a vyžaduje maximální vzdálenost do 10 metrů od nejbližšího optimizéru pro daný string. Jedno toto zařízení je schopno komunikovat až s 300 optimizéry. [39]

Technologie TIGO byla zvolena kvůli své široké kompatibilitě s technologiemi jiných značek.

Materiál	Typ	Cena [Kč]
Panely	Tiger Neo N-type 54HL4-(V) 405 Watt	71 685
Střídač	TIGO TSI-10K3D	55 668
Baterie 12,2 kWh	Set LFP TIGO 12,2 kWh vč. BMS	128 910
Konstrukce	K2	30 750
Optimizéry	TIGO TS4-A-O	22 440
Technologie TIGO	CCA cloud connect kit + TAP	4 477
HDO		10 000
DC box		9 000
Solární kabel	KBE SOLAR DB+ (PLUS), 6mm	1 700
Stop tlačítko		1 000
Kabeláž CYA a chráničky DC		6 000
Práce		
Montáž panelů		24 000
Doprava materiálu		6 000
Hromosvod pospojení		1 000
Prostupy		1 000
Úprava domovního rozvaděče		15 000
Montáž technologie		32 230
Dodatky		
Elektro projekt		4 000
Revize		3 890
Administrativa		10 000
Suma		
Nákladová cena bez DPH		438 750
Cena s marží 10% bez DPH		482 625
Cena s marží a DPH 15%		555 019
Dotace		160 000
Cena po odečtení dotace		395 019

Tabulka 4 Ceník FVE s optimizéry

5.1.4 Varianta s mikrostřídači

Varianta s mikrostřídači Enphase realizuje rapid shutdown přímo v mikrostřídačích, které jsou podobně jako RS zařízení nebo optimizéry umístěny pod panely. Na rozdíl od optimizérů nebo RS zařízení se u technologie Enphase jedná o složitější instalaci, vyžadující připevnění mikrostřídače k podkonstrukci pomocí jednoho šroubu. Tato práce je promítnuta ve zvýšení ceny montáže panelů z 1 000 kč na 1 200 kč na panel. Zároveň je pak o tuto částku snížena cena montáže technologie, neboť zde již není třeba instalovat centrální střídač, a tedy je tato část instalace zjednodušena pouze na instalaci baterií (stejně jako u ostatních variant) a technologie Enphase – IQ relay, IQ gateway a CT (měřících transformátorů).

IQ relay slouží jako propojení mezi jednotlivými fázemi z mikrostřídačů a zbytkem budovy. Zároveň zajišťuje PLC komunikaci. Při abnormalitách sítě, jako jsou změny napětí, frekvence nebo výpadek sítě automaticky odpojuje mikrostřídače od zbytku instalace. [53]

IQ gateway zprostředkovává monitoring skrze internetovou komunikaci mezi mikrostřídači, bateriemi a majitelem. [54]

Jelikož je u této varianty přímo ze střechy sváděno střídavé napětí, není zde užito DC solárních kabelů jako u předchozích variant. Dále je třeba zvolit kompatibilní baterie umožňující nabíjení a vybíjení přes střídavé napětí. V této variantě byly zvoleny baterie značky Enphase pro zajištění kompatibility. Bohužel jsou tyto baterie prodávány s jinými kapacitami než baterie u předchozích variant, a tedy zde dochází k rozdílu celkové kapacity. Krom tohoto rozdílu, který se promítá do jejich ceny je tato technologie celkově dražší než u předchozích variant. Dále je v této variantě uvažována doprava ze Spojených států což je nutno vzít v potaz. Enphase momentálně bohužel nemá podporu pro český trh a neprodává se zde – v jiných zemích EU (v Německu nebo Polsku) ano, ale bohužel se mi nepodařilo zjistit ceny na místním trhu.

[40]

Technologie Enphase byla zvolena, jelikož se této značce jako první podařilo komercializovat technologii mikrostřídačů a jedná se o světového leadera v tomto odvětví.

Materiál	Typ	Cena [Kč]
Panely	Tiger Neo N-type 54HL4-(V) 405 Watt	71 685
Střídač	EnPhase IQ8A	91 500
Baterie 13,44 kWh	IQ Battery 3T	184 500
Konstrukce	K2	30 750
HDO		10 000
Enphase technologie	IQ relay + IQ gateway + CT	14 100
Enphase kabel	IQ Cable single drop	2 625
Stop tlačítko		1 000
Kabeláž CYA a chráničky DC		6 000
Práce		
Montáž panelů		28 800
Doprava materiálu		6 000
Hromosvod pospojení		1 000
Prostupy		1 000
Úprava domovního rozvaděče		15 000
Montáž technologie		27 430
Dodatky		
Elektro projekt		4 000
Revize		3 890
Doprava Enphase technologie		13 489
Administrativa		10 000
Suma		
Nákladová cena bez DPH		512 770
Cena s marží 10% bez DPH		564 046
Cena s marží a DPH 15%		648 653
Dotace		160 000
Cena po odečtení dotace		488 653

Tabulka 5 Ceník FVE s mikrostřídači

5.1.5 Srovnání cen jednotlivých technologií

V tabulce jsou seřazeny jednotlivé varianty postupně od nejlevnější po nejdražší. Nejlevněji vychází varianta s RS zařízeními neumožňujícími optimalizaci výkonu

a monitoring. To je způsobeno levnějšími komponenty s omezenou funkcí a absencí technologie potřebné k jejich komunikaci. Zároveň byla zvolena varianta využívající možnosti jednoho zařízení na dva panely, která po přepočtení vychází levněji. Tuto variantu by bylo možné použít i pro optimizéry, avšak schopnost monitoringu by se snížila na polovinu a tedy nebyla uvažována.

Technologie s využitím optimizérů vychází dražší než varinta RS zařízení. Cena těchto zařízení přepočtená na počet panelů se liší okolo 300 Kč za kus. Další rozdíl je způsoben vyžadovanou technologií umožňující monitoring a komunikaci s majitelem.

Nejdražší varinta vychází s použitím mikrostřídačů Enphase. Výrazný rozdíl oproti předchozím varintám v řádech desítek tisíc korun je způsoben několika faktory, hlavní z nichž budou dále popsány.

Bateriové systémy od společnosti Enphase jsou vyráběny v jiných kapacitách a tedy je uvažována nejbližší možná varianta s vyšší kapacitou než u předchozích variant.

Technologie mikrostřídačů je dražší než standardní stringový střídač, ale tento rozdíl je částečně kompenzován faktem, že není třeba instalovat další RS zařízení, nebo zařízení pro monitoring a optimalizaci, jelikož mikrostřídače tyto možnosti automaticky mají.

Doprava technologie Enphase je tomto případě uvažována ze Spojených států, neboť se mi nedodařilo zjistit ceny evropského trhu.

Varianta	Bez rapid shutdown [Kč]	Rapid shutdown zařízení [Kč]	Optimizéry [Kč]	Mikrostřídače [Kč]
Nákladová cena bez DPH	411833	429102	438750	512770
Cena s marží 10% bez DPH	453016	472012	482625	564046
Cena s marží a DPH 15%	520968	542814	555019	648653
Dotace	160000	160000	160000	160000
Cena po odečtení dotace	360968	382814	395019	488653
Zvýšení ceny oproti variantě bez rapid shutdown		21845	34050	127685

Tabulka 6 Srovnání ceníků variant FVE

5.2 Ekonomické zhodnocení investic

Zde jsou popsány jednotlivé metody zvolené pro ohodnocení technologií umožňujících rapid shutdown. Nejdříve jsou postupně vysvětleny myšlenky těchto variant a odůvodněné vybrané parametry pro finanční výpočet. Na konci této kapitoly jsou uvedeny výsledky výpočtů.

První metoda se zaměřuje na ekonomické zhodnocení při simulovaném zastínění, kde je hodnocen vliv optimizérů a mikrostřídačů – technologií, které kromě rapid shutdown a monitoringu umožňují i optimalizaci výkonu. Tato schopnost nachází využití hlavně ve dvou případech:

a. Při složité instalaci na členité střeše, kde je jeden string rozložen do více různých střech s jinou orientací a sklonem (tento případ v simulaci není relevantní, neboť je instalace provedena pouze ze dvou stringů a oba jsou instalovány s jednotnou orientací panelů).
b. Při potřebě kompenzovat zastínění ať již trvalé (například vlivem komínu), nebo dočasné vlivem vnějších překážek, např. stromů

V simulaci je tedy relevantní pouze bod b.

Druhá metoda ekonomického zhodnocení očekává poškození panelu způsobující snížení výkonu celého stringu. Vzhledem k možnosti monitoringu, který nabízí technologie optimizérů a mikrostřídačů, předpokládáme odhalení této vady a jednorázové výměny poškozených panelů pro zachování výkonu stringu. Tato metoda rozšiřuje metodu předchozí, kdy rovněž počítá se zastíněním a přidává zde snížení výkonu poškozením panelů. Při variantě s monitoringem zůstává výkon zachován, avšak je počítáno s jednorázovými investicemi na výměnu panelů.

Třetí metoda uvažuje předejití požáru pomocí rapid shutdown. Vzhledem ke schopnosti snížení napětí a bezpečnějšího, a tedy i efektivnějšího zásahu hasičů je zde zhodnocena efektivita investice do této technologie s předpokladem uhašení požáru bez dalších škod a varianta kompletního vyhoření nemovitosti.

5.2.1 Určení inflace, eskalace cen elektřiny a diskontu

Inflace byla zvolena ve výši 2,3 %, založená na predikci České národní banky pro rok 2024. Tento odhad využívá sofistikované ekonomické modely ČNB, které poskytují informace o očekávaných ekonomických podmínkách. I když je tato predikce považována za spolehlivý odhad pro daný rok, inflace se v průběhu následujících 25 let, což je předpokládaná životnost fotovoltaického systému, bude samozřejmě měnit. Avšak pro zjednodušení výpočtů byla tato hodnota pevně stanovena, aby poskytla konzistentní základ pro finanční plánování a analýzu efektivity investice. [51]

Eskalace ceny elektřiny byla pro výpočty efektivity fotovoltaického systému nastavena na 2,8 %. Toto číslo bylo zvoleno na základě očekávaného vyššího růstu cen elektřiny ve srovnání s obecnou inflací, která je dle České národní banky odhadnuta na 2,3 %. Rozdíl 0,5procentního bodu odráží predikci, že ceny elektřiny mohou růst rychleji než celková úroveň cen. Tento odhad tedy slouží jako opatrný přístup k predikci budoucích výdajů na elektřinu.

Diskontní sazba 5 % pro výpočet cash flow z investice do fotovoltaického systému na rodinném domě byla stanovena na základě porovnání s aktuálními výnosy z alternativních investic, jako jsou úsporné vklady a investiční fondy, které se obvykle pohybují v rozmezí 4–6 %. Sazba reflektuje očekávanou inflaci mezi 2–3 % a rizikovou prémii spojenou s investicí do obnovitelných zdrojů energie. Tímto způsobem poskytuje vyvážený odhad budoucích peněžních toků a zohledňuje běžné náklady na kapitál, nabízejíc přitom rozumnou kompenzaci za přijatelné riziko investice.

U všech variant počítáno s výměnou technologie v roce vypršení její záruky. Ikdyž je pravděpodobné, že baterie i střídače budou schopny fungovat delší dobu, než na kterou je stanovena jejich záruka, počítá se s nejhorší možnou variantou.

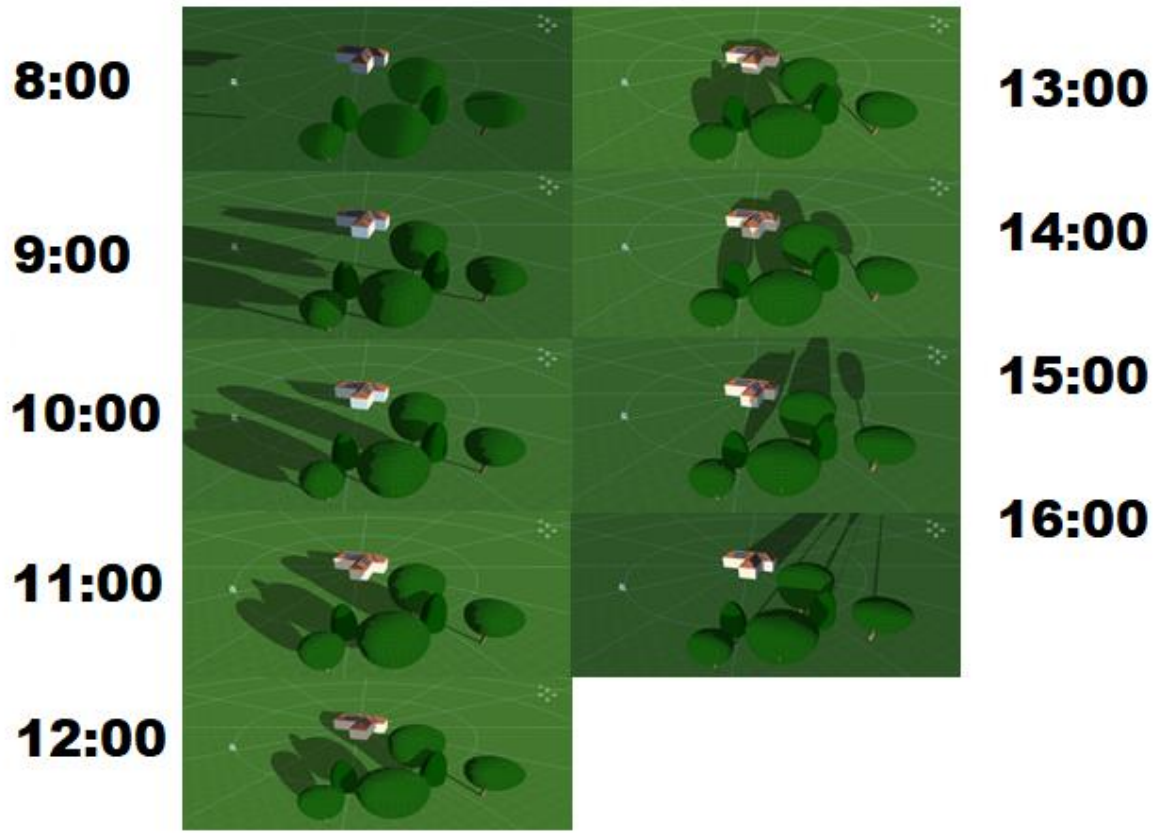
Výpočet návratnosti vyjadřuje první rok, kdy se cashflow dostane do kladných hodnot. V následujících letech se cashflow vlivem reinvestic můžeš opět dostat do záporných čísel.

5.2.2 Metoda uvažující zastínění

Pro posouzení vlivu zastínění na výkon fotovoltaické instalace byl využit software PV*SOL premium. Tento program nabízí možnost modelování budovy včetně střechy, komínů a instalovaných solárních panelů. Kromě toho umožňuje zahrnout do simulace i okolní překážky, jako jsou stromy, a poskytuje nástroje pro nastavení sklonu panelů a simulaci průběhu slunce během dne.

Díky těmto funkcím je možné v PV*SOL premium vytvořit simulaci reálných podmínek, což umožňuje vyhodnotit, jak zastínění způsobené různými překážkami ovlivňuje výkon panelů. Software rovněž poskytuje analýzu, jak členitost střechy a různé orientace jednotlivých stringů fotovoltaických panelů ovlivňují celkovou účinnost instalace.

PV*SOL premium dále dokáže modelovat a vyčíslit přínos použití optimizérů výkonu nebo mikrostřídačů, které jsou navrženy ke kompenzaci negativních dopadů zastínění.



Obrázek 9 Simulace zastínění s hodinovým krokem

5.2.3 Metoda uvažující snížení výkonu vlivem poškození panelů

Jako další ekonomický aspekt byla vybrána analýza poklesu výkonu způsobeného poškozením panelů. Tento pokles by bylo možné minimalizovat instalací technologie s monitoringem, která by umožňovala identifikaci a následnou výměnu problematických panelů.

Pro simulaci propadu výkonu fotovoltaického systému byly zvoleny roky 7 a 18, které reflektují klíčové období v životnosti systému. Tyto roky byly vybrány na základě zkoumání dat a pravděpodobnosti výskytu různých typů poškození, dokumentovaných ve studii IEA PVPS. [41]

7. rok: Během prvních sedmi let dochází k nejvyšší akumulaci závad, které zahrnují

Trhliny v článcích a změna barvy.

Tyto poruchy obvykle vedou k ztrátě výkonu pod 2,5 % a s postupem času mohou narůstat. Předpokládáme ztrátu 3 % z celkového výkonu. [41]

Selhání způsobená PID.

V určitých prostředích, jako jsou pobřežní oblasti, mohou být tyto poruchy častější a mít významný dopad na snížení účinnosti. Předpokládáme, že PID ovlivní 10 % panelů s 5% ztrátou účinnosti na těchto panelech, což přispěje k dalšímu snížení celkové účinnosti systému o 0,5 %. Ze studie bohužel nelze odhadnout vliv na prostředí České republiky, a tak tento jev nebude do výpočtu uvažován. [41]

Další různé poruchy.

Poruchy včetně odpojených článků nebo smyček a defektů bypass diod, což může vést k další ztrátě přibližně 1 %. Celková odhadovaná ztráta za prvních 7 let je tedy 4 %. [41]

18. rok: Tento rok je zvolen jako další klíčový milník z těchto důvodů

Diskolorace a další degradační mechanismy, které se projevují v průběhu času, vedou k dalšímu snížení výkonu. Pro zbytek životnosti (roky 8–25) se předpokládá snížená roční míra degradace na 0,3 % ročně, což celkově představuje další degradaci o 5,4 %. Kombinace počáteční degradace a této dlouhodobé míry dává celkovou odhadovanou degradaci systému za 25 let na úrovni přibližně 9,4 %. [41]

Pro simulaci systému s funkčností 25 let je tedy třeba zvolit rok na pomezí prvotních intenzivnějších ztrát a ztrát ustálených a zároveň pro umožnění promítnutí těchto ztrát tedy nemůže být zvolen 25. rok, neboť by se již nepromítly do simulace. Proto je zvolen 18. rok, kde se očekává pokles výkonu přibližně o 3,3 %, což reflektuje postupnou degradaci a stabilizaci systému po implementaci opatření proti dalším degradacím. [41]

Celková očekávaná životnost systému je 25 let, během kterých se předpokládá, že počáteční míra degradace se nebude lineárně promítat. Počáteční závady jsou obvykle opraveny nebo selžou brzy, což vede ke snížení míry degradace v dalších letech.

Tento odhad odráží jak rychlou počáteční degradaci, tak pomalejší a stabilnější míru, jak systém stárne a počáteční závady jsou zmírněny nebo se neopakují se stejnou frekvencí. Data a závěry jsou podloženy studií IEA PVPS, která poskytuje důležité informace o chování systémů v dlouhodobém horizontu a pomáhá předvídat a minimalizovat budoucí problémy. [41]

5.2.4 Metoda uvažující předejití požáru

V rámci ekonomického zhodnocení technologií vybavených funkcí rapid shutdown byla zařazena také analýza scénáře úplného vyhoření nemovitosti. Tento scénář představuje nejhorší možný vývoj situace, kdy je nemovitost s instalovaným fotovoltaickým systémem zcela zničena požárem, čímž dochází ke ztrátě její celkové hodnoty. V ekonomických výpočtech je proto zohledněna hodnota nemovitosti vybavené fotovoltaickým systémem a jednotlivými variantami technologie umožňující rapid shutdown. Cílem této analýzy je porovnat, zda se s ohledem na pravděpodobnost vzniku požáru FVE vyplatí investovat do ochranných technologií rapid shutdown, nebo zda je pravděpodobnost úplného zničení nemovitosti během 25 let provozu FVE natolik nízká, že investice do těchto technologií není ekonomicky opodstatněná.

Pro stanovení rizika požárů fotovoltaických elektráren (FVE) byla využita data poskytnutá hasičským záchranným sborem, která obsahují statistiky o počtu požárů FVE vzhledem k celkovému počtu instalovaných systémů FVE. Na základě těchto údajů byla vyhodnocena pravděpodobnost vzniku požáru u fotovoltaických elektráren.

Pro konkrétní kvantifikaci rizika požárů fotovoltaických systémů byla analyzována data z let 2021 až 2023. V roce 2021 bylo zaznamenáno 15 požárů při 50,620 instalovaných FVE, což odpovídá pravděpodobnosti požáru 0,02963 %. V následujícím roce 2022 došlo ke 29 požárům z celkového počtu 85,661 instalací, což znamená pravděpodobnost 0,033854 %. V roce 2023, kdy byl počet instalovaných FVE nejvyšší (167,360), bylo zaznamenáno 45 požárů, což představuje pravděpodobnost požáru 0,02689 %. Pro účely ekonomického zhodnocení technologií s funkcí rapid shutdown byla zvolena pravděpodobnost požáru z roku 2023, jelikož se jedná o nejaktuálnější a zároveň nejnižší hodnotu. Tento optimistický scénář umožňuje zhodnocení ekonomické efektivity investice do technologií rapid shutdown vzhledem k potenciálnímu riziku požáru během 25letého provozu FVE. [42] [43]

Hodnota nemovitosti bez FVE je uvažována 9 000 000 Kč a ta je dále je při výpočtech navýšena o hodnotu FVE s vybranou technologií pro danou variantu.

5.2.5 Varianta bez RS zařízení

5.2.5.1 Bez rozbití panelů

Tato varianta slouží pro lepší srovnání následujících možností uvažující technologie pro rapid shutdown, jelikož FVE neobsahuje zařízení pro rapid shutdown, optimalizaci výkonu či monitoring. Tato konfigurace tedy nenabízí pokročilou ochranu proti požáru, je vystavena většímu zastínění během dne a nedovoluje detailní analýzu stavu jednotlivých solárních panelů. Přestože tento přístup vede k nižším počátečním nákladům, což je jeho zásadní výhodou, očekávalo se, že silné zastínění bude mít negativní dopad na celkovou výrobní kapacitu, zejména v období kolem poledne, kdy je většina fotovoltaického systému zastiňována.

Překvapivě však tento očekávaný pokles výroby nenastal, což naznačuje, že optimalizace výkonu nemusí být zásadním prvkem pro instalace významně ovlivněné zastíněním, například velkými stromy. V takových případech ztrácí úprava výkonu jednotlivých panelů svůj význam, protože dočasný nedostatek záření postihuje celý string panelů, a jakékoliv úpravy výstupních hodnot jednotlivých panelů tak nevedou k výraznému zlepšení výkonu celého systému. Tato varianta se ukazuje jako finančně nejvýhodnější z hlediska počátečních investic.

Energie bez RS zařízení

Roky	1	2	23	24	25
Spotřeba v objektu z FVE [kWh]	4 363,89	4 302,80	3 936,23	3 918,78	3 901,32
Spotřeba ze sítě [kWh]	1 756,10	1 817,20	2 183,77	2 201,22	2 218,68
Prodáno do sítě [kWh]	4 808,70	4 741,38	4 337,45	4 318,22	4 298,98

CASHFLOW - bez RS zařízení

Roky	0	1	2	23	24	25
Příjmy [Kč]		40 539,06	41 090,72	67 131,87	68 705,53	70 314,68
Cashflow [Kč]	-360 968,43	40 539,06	41 090,72	67 131,87	61 991,78	65 035,55
Kumulované cashflow [Kč]	-360 968,43	-320 429,37	-279 338,65	343 439,75	405 431,53	470 467,08
DCF [Kč]	-360 968,43	42 566,02	45 302,52	206 197,15	199 929,70	220 233,46
Kumulované DCF [Kč]	-360 968,43	-318 402,41	-273 099,89	891 207,02	1 091 136,72	1 311 370,18

VÝSLEDKY

Cena FVE pod dotaci [Kč]	360 968
NPV výdajové [Kč]	-769 657
NPV [Kč]	114 528
Návratnost [rok]	8
IRR	8,162%
NPV bez fotovoltaiky [Kč]	-884 184

Tabulka 7 Přehled energie, cashflow a výsledků pro variantu bez RS zařízení bez rozbití panelů

5.2.5.2 S rozbitím panelů

V této metodě bylo zohledněno poškození panelů ve specificky zvolených sedmém a osmnáctém roce provozu fotovoltaického systému, což vedlo ke snížení jeho celkového výkonu. Toto poškození mělo za následek nižší produkci elektrické energie v průběhu následujících let, což negativně ovlivnilo NPV systému, zvýšilo množství elektřiny odebírané ze sítě a snížilo objem prodané elektřiny ve srovnání s variantou, kde takové poškození nebylo zahrnuto. Absence monitoringu v této variantě neumožňuje identifikaci specificky poškozených panelů a jejich následnou výměnu pro zachování efektivity FVE.

NPV této varianty však dosahuje hodnot srovnatelných s dražší variantou, která zahrnuje technologii optimizérů. V této variantě je však interní výnosové procento (IRR) lepší, což signalizuje potenciálně vyšší efektivitu investice v dlouhodobém horizontu.

Energie bez RS zařízení s rozbitím panelů

Roky	1	2	23	24	25
Spotřeba v objektu z FVE [kWh]	4 363,89	4 302,80	3 617,67	3 600,21	3 582,76
Spotřeba ze sítě [kWh]	1 756,10	1 817,20	2 502,33	2 519,79	2 537,24
Prodáno do sítě [kWh]	4 808,70	4 741,38	3 986,41	3 967,18	3 947,94

CASHFLOW - bez RS zařízení s rozbitím panelů

Roky	0	1	2	23	24	25
Příjmy [Kč]		40 539,06	41 090,72	61 698,81	63 120,34	64 573,10
Cashflow [Kč]	-360 968,43	40 539,06	41 090,72	61 698,81	56 406,59	59 293,97
Kumulované cashflow [Kč]	-360 968,43	-320 429,37	-279 338,65	288 721,28	345 127,87	404 421,84
DCF [Kč]	-360 968,43	42 566,02	45 302,52	189 509,35	181 916,89	200 790,43
Kumulované DCF [Kč]	-360 968,43	-318 402,41	-273 099,89	763 103,04	945 019,93	1 145 810,37

VÝSLEDKY

Cena FVE po dotaci [Kč]	360 968
NPV výdajové [Kč]	-797 769
NPV [Kč]	86 415
Návratnost [rok]	8
IRR	7,524%
NPV bez fotovoltaiky [Kč]	-884 184

Tabulka 8 Přehled energie, cashflow a výsledků pro variantu bez RS zařízení s rozbitím panelů

5.2.5.3 Vyhoření

Varianta bez ochranné technologie je uvedena pouze pro srovnání, jelikož zde nelze porovnat poměr hodnoty vyhoření a ceny ochranné technologie. NPV je zde nejnižší ze všech variant, protože se jedná o nejméně nákladnou investici do FVE.

VYHOŘENÍ FVE bez RS zařízení

Roky	1	2	23	24	25
Šance na nevyhoření	99,9731%	99,9462%	99,3834%	99,3567%	99,3300%
Šance na vyhoření	0,0269%	0,0269%	0,0251%	0,0250%	0,0248%
Ohodnocení vyhoření vzhledem k šanci [Kč]	2574,88	2633,40	3967,10	4033,32	4099,54

NPV [Kč]	44594
Cena ochranné technologie [Kč]	0

Tabulka 9 Vyhoření FVE bez RS zařízení

5.2.6 Varianta s RS zařízením

5.2.6.1 Bez rozbití panelů

V této variantě s RS zařízením jsou výsledky podobné jako v případě varianty bez RS zařízení, protože zařízení neposkytuje optimalizaci. Očekává se tedy podobný vývoj systému bez zlepšení výkonu, přičemž množství vyrobené, koupené a prodané elektřiny zůstává stejné. Hlavním rozdílem mezi oběma variantami jsou vyšší počáteční náklady spojené s instalací RS zařízení. Tato investice negativně ovlivňuje NPV a IRR systému.

Energie RS zařízení

Roky	1	2	23	24	25
Spotřeba v objektu z FVE [kWh]	4 363,89	4 302,80	3 936,23	3 918,78	3 901,32
Spotřeba ze sítě [kWh]	1 756,10	1 817,20	2 183,77	2 201,22	2 218,68
Prodáno do sítě [kWh]	4 808,70	4 741,38	4 337,45	4 318,22	4 298,98

CASHFLOW - RS zařízení

Roky	0	1	2	23	24	25
Příjmy [Kč]		40 539,06	41 090,72	67 131,87	68 705,53	70 314,68
Cashflow [Kč]	-382 813,71	40 539,06	41 090,72	67 131,87	61 991,78	65 035,55
Kumulované cashflow [Kč]	-382 813,71	-342 274,65	-301 183,93	321 594,46	383 586,25	448 621,80
DCF [Kč]	-382 813,71	42 566,02	45 302,52	206 197,15	199 929,70	220 233,46
Kumulované DCF [Kč]	-382 813,71	-340 247,70	-294 945,18	869 361,74	1 069 291,44	1 289 524,89

VÝSLEDKY

Cena FVE po dotaci [Kč]	382 814
NPV výdajové [Kč]	-791 502
NPV [Kč]	92 682
Návratnost [rok]	8
IRR	7,435%
NPV bez fotovoltaiky [Kč]	-884 184

Tabulka 10 Přehled energie, cashflow a výsledků pro variantu s RS zařízení bez rozbitím panelů

5.2.6.2 S rozbitím panelů

V této metodě s RS zařízením se výsledky shodují s variantou bez RS zařízení, protože implementované zařízení nenabízí monitorovací funkce, a tím pádem neumožňuje odhalení rozbitých panelů a jejich výměnu. Důsledkem je, že průběh výkonnosti systému

zůstává nezměněn ve srovnání s variantou bez RS. Jediným významným rozdílem jsou vyšší počáteční náklady spojené s instalací RS zařízení, které mají negativní dopad na NPV a IRR.

Energie RS zařízení s rozbitím panelů

Roky	1	2	23	24	25
Spotřeba v objektu z FVE [kWh]	4 363,89	4 302,80	3 617,67	3 600,21	3 582,76
Spotřeba ze sítě [kWh]	1 756,10	1 817,20	2 502,33	2 519,79	2 537,24
Prodáno do sítě [kWh]	4 808,70	4 741,38	3 986,41	3 967,18	3 947,94

CASHFLOW - RS zařízení s rozbitím panelů

Roky	0	1	2	23	24	25
Příjmy [Kč]		40 539,06	41 090,72	61 698,81	63 120,34	64 573,10
Cashflow [Kč]	-382 813,71	40 539,06	41 090,72	61 698,81	56 406,59	59 293,97
Kumulované cashflow [Kč]	-382 813,71	-342 274,65	-301 183,93	266 876,00	323 282,59	382 576,56
DCF [Kč]	-382 813,71	42 566,02	45 302,52	189 509,35	181 916,89	200 790,43
Kumulované DCF [Kč]	-382 813,71	-340 247,70	-294 945,18	741 257,76	923 174,65	1 123 965,08

VÝSLEDKY

Cena FVE po dotaci [Kč]	382 814
NPV výdajové [Kč]	-819 615
NPV [Kč]	64 570
Návratnost [rok]	8
IRR	6,794%
NPV bez fotovoltaiky [Kč]	-884 184

Tabulka 11 Přehled energie, cashflow a výsledků pro variantu s RS zařízením s rozbitím panelů

5.2.6.3 Vyhoření

V této variantě je implementována nejekonomičtější technologie umožňující rapid shutdown. NPV této varianty je více než dvojnásobné ve srovnání s náklady na danou technologii, což ji činí nejlepší volbou z hlediska ochrany proti požáru. Při snižování hodnoty nemovitosti s krokem 500 000 Kč se bod, kdy se investice do technologie rapid shutdown stává nevýhodnou, nachází u hodnoty nemovitosti 4 500 000 Kč. Pokud byla hodnota nemovitosti bez instalace fotovoltaického systému FVE původně odhadnuta na tuto částku nebo méně, investice do této technologie by již nebyla ekonomicky výhodná.

VYHOŘENÍ FVE s RS zařízením

Roky	1	2	23	24	25
Šance na nevyhoření	99,9731%	99,9462%	99,3834%	99,3567%	99,3300%
Šance na vyhoření	0,0269%	0,0269%	0,0251%	0,0250%	0,0248%
Ohodnocení vyhoření vzhledem k šanci [Kč]	2580,89	2639,54	3976,36	4042,73	4109,11

NPV [Kč]	44698
Cena ochranné technologie [Kč]	21845

Tabulka 12 Vyhoření FVE s RS zařízením

5.2.7 Varianta s optimizéry

5.2.7.1 Bez rozbití panelů

Tato varianta zahrnuje všechny tři hodnocené přidané hodnoty: rapid shutdown, optimalizaci a monitoring. Optimalizace má pozitivní dopad na celkové množství spotřebované vyrobené energie, snižuje potřebu odebírané energie ze sítě a zvyšuje objem energie prodávané do sítě ve srovnání s předchozími variantami bez optimalizace. Tyto změny jsou nicméně relativně malé. Zvýšení vyrobené energie se odvíjí pouze v řádech desítek kWh, což má podobný dopad i na sníženou spotřebu ze sítě. Výraznější rozdíl je patrný u množství prodané energie, která se liší o stovky kWh. Nicméně z hlediska cashflow je cena prodané energie do sítě výrazně nižší než cena energie nakoupené, a finanční přínos technologie je omezený na několik stovek korun ročně.

V důsledku toho netto současná hodnota (NPV) této varianty mírně zaostává za variantou s RS zařízením bez optimalizace. Tento fakt je zdůrazněn faktem, že optimalizační technologie je více než o 50 % dražší a její schopnost omezit negativní efekty zastínění nestačí na vyvážení těchto vyšších nákladů.

Energie optimizéry

Roky	1	2	23	24	25
Spotřeba v objektu z FVE [kWh]	4 402,46	4 340,83	3 971,02	3 953,41	3 935,80
Spotřeba ze sítě [kWh]	1 717,54	1 779,17	2 148,98	2 166,59	2 184,20
Prodáno do sítě [kWh]	5 023,53	4 953,20	4 531,22	4 511,13	4 491,03

CASHFLOW - optimizéry

Roky	0	1	2	23	24	25
Příjmy [Kč]		41 140,79	41 700,63	68 128,32	69 725,33	71 358,36
Cashflow [Kč]	-395 018,69	41 140,79	41 700,63	68 128,32	63 011,58	66 079,23
Kumulované cashflow [Kč]	-395 018,69	-353 877,90	-312 177,27	327 342,00	390 353,58	456 432,82
DCF [Kč]	-395 018,69	43 197,83	45 974,95	209 257,74	203 218,65	223 767,74
Kumulované DCF [Kč]	-395 018,69	-351 820,86	-305 845,92	892 783,57	1 096 002,23	1 319 769,97

VÝSLEDKY

Cena FVE po dotaci [Kč]	395 019
NPV výdajové [Kč]	-793 062
NPV [Kč]	91 122
Návratnost [rok]	8
IRR	7,314%
NPV bez fotovoltaiky [Kč]	-884 184

Tabulka 13 Přehled energie, cashflow a výsledků pro variantu s optimizéry bez rozbití panelů

5.2.7.2 S rozbitím panelů

V této metodě, která zohledňuje možnost poškození panelů a následné snížení jejich výkonu, poskytuje technologie možnost identifikace konkrétních panelů s redukovaným výkonem. Díky této schopnosti lze poškozené panely vyměnit za nové

nebo náhradní, což zajišťuje udržení stabilního výkonu systému na úrovni varianty bez poškození. Tato výměna panelů představuje jednorázové náklady, které jsou však kompenzovány výhodami udržení výkonu.

Porovnáme-li tuto variantu s jinými, které rovněž počítají s poškozením panelů, ale neobsahují technologii pro jejich identifikaci a výměnu, dosahuje tato varianta lepší netto současnou hodnotu (NPV). Konkrétně s dvěma jednorázovými investicemi do nových panelů v 7. a 18. roce dosahuje NPV vyšší o desítky tisíc korun ve srovnání s variantou pouze s technologií rapid shutdown a o několik stovek korun ve srovnání s variantou bez jakékoliv ochranné technologie. I přes celkové náklady ve výši přibližně 34 000 korun, se tato investice z hlediska poškození panelů ukazuje jako finančně výhodná.

Energie optimizéry s rozbitím panelů

Roky	1	2	23	24	25
Spotřeba v objektu z FVE [kWh]	4 402,46	4 340,83	3 971,02	3 953,41	3 935,80
Spotřeba ze sítě [kWh]	1 717,54	1 779,17	2 148,98	2 166,59	2 184,20
Prodáno do sítě [kWh]	5 023,53	4 953,20	4 531,22	4 511,13	4 491,03

CASHFLOW - optimizéry s rozbitím panelů

Roky	0	1	2	23	24	25
Příjmy [Kč]		41 140,79	41 700,63	68 128,32	69 725,33	71 358,36
Cashflow [Kč]	-395 018,69	41 140,79	41 700,63	68 128,32	63 011,58	66 079,23
Kumulované cashflow [Kč]	-395 018,69	-353 877,90	-312 177,27	319 342,18	382 353,76	448 433,00
DCF [Kč]	-395 018,69	43 197,83	45 974,95	209 257,74	203 218,65	223 767,74
Kumulované DCF [Kč]	-395 018,69	-351 820,86	-305 845,92	877 031,61	1 080 250,27	1 304 018,01

VÝSLEDKY

Cena FVE po dotaci [Kč]	395 019
NPV výdajové [Kč]	-797 420
NPV [Kč]	86 765
Návratnost [rok]	8
IRR	7,211%
NPV bez fotovoltaiky [Kč]	-884 184

Tabulka 14 Přehled energie, cashflow a výsledků pro variantu s optimizéry s rozbitím panelů

5.2.7.3 Vyhoření

V případě varianty s optimizéry je netto současná hodnota (NPV) systému stále nižší než celkové náklady na technologii umožňující rapid shutdown. Rozdíl mezi NPV a cenou optimizérů činí více než 10 000 Kč. I přes tento cenový rozdíl představuje tato varianta z pohledu ochrany proti požáru stále ekonomicky výhodné řešení.

Dalším aspektem této varianty je vliv hodnoty nemovitosti na ekonomickou výhodnost investice do optimizérů. Když se hodnota nemovitosti snižuje o každých 500 000 Kč, stane se investice do optimizérů nevýhodnou při hodnotě nemovitosti 6 500 000 Kč a nižší. To znamená, že pro nemovitosti ohodnocené na méně než 6 500 000 Kč již není instalace optimizérů finančně výhodná.

VYHOŘENÍ FVE s optimizéry

Roky	1	2	23	24	25
Šance na nevyhoření	99,9731%	99,9462%	99,3834%	99,3567%	99,3300%
Šance na vyhoření	0,0269%	0,0269%	0,0251%	0,0250%	0,0248%
Ohodnocení vyhoření vzhledem k šanci [Kč]	2584,25	2642,97	3981,53	4047,99	4114,46

NPV [Kč]	44756
Cena ochranné technologie [Kč]	34050

Tabulka 15 Vyhoření FVE s optimizéry

5.2.8 Varianta s mikrostřídači

5.2.8.1 Bez rozbití panelů

Mikrostřídače poskytují podobné funkce jako optimizéry, ale s vyššími počátečními investičními náklady. Jednou z jejich výhod je lepší možnost rozšiřování systémů; připojují se přímo k jednotlivým panelům, což umožňuje snadné navýšení výkonu fotovoltaického systému (FVE) přidáním dalších panelů, bez problémů s nedostatečným výkonem, které mohou nastat u centrálních střídačů. Tato flexibilita v rozšiřování však v rámci této práce není dále hodnocena.

Co se týče produkce energie, mikrostřídače dosahují o něco lepších výsledků než optimizéry, ale tento mírný nárůst není dostatečný k pokrytí značně vyšších nákladů na systém, které jsou vyšší o téměř 100 000 Kč. Z hlediska cashflow nabízejí mikrostřídače výhody v podobě delší záruky, konkrétně 25 let oproti 13 letům u centrálních střídačů, což eliminuje potřebu jejich výměny během životnosti systému.

Hlavní nákladové rozdíly vznikají u baterií, které jsou o téměř 50% dražší než u jiných technologií a nabízejí mírně vyšší kapacitu. Plánované dvě výměny baterií během 25 let mají velmi negativní dopad na netto současnou hodnotu (NPV), která je kladná jen

v řádech stovek Kč, což zdůrazňuje finanční zátěž spojenou s těmito komponentami v mikrostřídačové technologii.

CASHFLOW - mikrostřídače

Roky	0	1	2	23	24	25
Příjmy [Kč]		43 093,26	43 679,67	71 361,57	73 034,37	74 744,91
Cashflow [Kč]	-486 838,15	43 093,26	43 679,67	71 361,57	66 320,63	69 465,78
Kumulované cashflow [Kč]	-486 838,15	-443 744,89	-400 065,22	205 523,95	271 844,57	341 310,35
DCF [Kč]	-486 838,15	45 247,92	48 156,84	219 188,75	213 890,65	235 235,79
Kumulované DCF [Kč]	-486 838,15	-441 590,23	-393 433,39	667 362,34	881 252,99	1 116 488,78

Energie mikrostřídače

Roky	1	2	23	24	25
Spotřeba v objektu z FVE [kWh]	4 678,53	4 613,03	4 220,04	4 201,32	4 182,61
Spotřeba ze sítě [kWh]	1 441,47	1 506,97	1 899,96	1 918,68	1 937,39
Prodáno do sítě [kWh]	4 894,44	4 825,92	4 414,79	4 395,21	4 375,63

VÝSLEDKY

Cena FVE po dotaci [Kč]	486 838
NPV výdajové [Kč]	-883 744
NPV [Kč]	441
Návratnost [rok]	9
IRR	5,010%
NPV bez fotovoltaiky [Kč]	-884 184

Tabulka 16 Přehled energie, cashflow a výsledků pro variantu s mikrostřídači bez rozbití panelů

5.2.8.2 S rozbitím panelů

V metodě zohledňující rozbití panelů je vidět podobný trend jako u varianty s optimizéry, kde dochází k negativnímu ovlivnění netto současné hodnoty (NPV) z důvodu dvou jednorázových výměn panelů. V důsledku těchto nákladů na výměnu, kdy NPV je původně jen v řádech stovek korun, klesá NPV v této variantě do záporných hodnot.

Tento výsledek poukazuje na to, že z hlediska NPV je investice do varianty uvažující poškození panelů a jejich následnou výměnou ekonomicky nevýhodná.

CASHFLOW - mikrostřídače s rozbitím panelů

Roky	0	1	2	23	24	25
Příjmy [Kč]		43 093,26	43 679,67	71 361,57	73 034,37	74 744,91
Cashflow [Kč]	-486 838,15	43 093,26	43 679,67	71 361,57	66 320,63	69 465,78
Kumulované cashflow [Kč]	-486 838,15	-443 744,89	-400 065,22	197 524,13	263 844,75	333 310,53
DCF [Kč]	-486 838,15	45 247,92	48 156,84	219 188,75	213 890,65	235 235,79
Kumulované DCF [Kč]	-486 838,15	-441 590,23	-393 433,39	651 610,38	865 501,03	1 100 736,82

Energie mikrostřídače s rozbitím panelů

Roky	1	2	23	24	25
Spotřeba v objektu z FVE [kWh]	4 678,53	4 613,03	4 220,04	4 201,32	4 182,61
Spotřeba ze sítě [kWh]	1 441,47	1 506,97	1 899,96	1 918,68	1 937,39
Prodáno do sítě [kWh]	4 894,44	4 825,92	4 414,79	4 395,21	4 375,63

VÝSLEDKY

Cena FVE po dotaci [Kč]	486 838
NPV výdajové [Kč]	-888 102
NPV [Kč]	-3 917
Návratnost [rok]	9
IRR	4,912%
NPV bez fotovoltaiky [Kč]	-884 184

Tabulka 17 Přehled energie, cashflow a výsledků pro variantu s mikrostřídači s rozbitím panelů

5.2.8.3 Vyhoření

V případě varianty s mikrostřídači je netto současná hodnota (NPV) téměř trojnásobně nižší než cena technologie, což činí tuto variantu z hlediska ochrany proti vyhoření ekonomicky nevýhodnou. Na rozdíl od varianty s optimizéry, kde cena technologie překračuje NPV při nižší hodnotě nemovitosti, u mikrostřídačů je tento bod, kdy NPV převyšuje cenu technologie, dosažen při hodnotě nemovitosti 26 000 000 Kč. Tato analýza ukazuje, že investice do mikrostřídačů se stává ekonomicky výhodnou pouze u velmi vysokých hodnot nemovitostí.

VYHOŘENÍ FVE s mikrostřídači

Roky	1	2	3	23	24	25
Šance na nevyhoření	99,9731%	99,9462%	99,9194%	99,3834%	99,3567%	99,3300%
Šance na vyhoření	0,0269%	0,0269%	0,0269%	0,0251%	0,0250%	0,0248%
Ohodnocení vyhoření vzhledem k šanci [Kč]	2609,50	2668,80	2728,72	4020,45	4087,56	4154,67

NPV [Kč]	45194
Cena ochranné technologie [Kč]	125 870

Tabulka 18 Vyhoření FVE s mikrostřídači

5.2.9 Závěr

Varianta bez zařízení:

a) Bez rozbití: Tato varianta nabízí nejnižší počáteční náklady a finančně nejvýhodnější výsledky, přestože trpí výrazným poklesem výkonu v důsledku zastínění.

b) S rozbitím panelů: Oproti variantě bez rozbití panelů vede poškození panelů k horšímu NPV a vyššímu množství elektřiny odebírané ze sítě. Tato varianta také trpí nedostatkem možností monitorování a řízení stavu panelů.

c) Vyhoření: Poskytuje nejnižší náklady na investici a nejnižší NPV ze všech variant, což z ní činí méně atraktivní volbu z hlediska ochrany proti požáru.

Varianta s RS zařízením:

a) Bez rozbití: Má vyšší počáteční náklady než varianta bez zařízení a nezlepšuje výkonnost v důsledku zastínění, což negativně ovlivňuje NPV.

b) S rozbitím panelů: Podobně jako předchozí, i tato varianta trpí vyššími počátečními náklady bez zlepšení výkonnosti v důsledku poškození panelů, což vede k horšímu NPV a IRR.

c) Vyhoření: Poskytuje nejlepší ochranu proti požáru a nejvýhodnější NPV v případě vyhoření, což ji činí nejlepší volbou pro situace, kde je požární ochrana prioritou.

Varianta s optimizéry:

a) Bez rozbití: Přestože nabízí lepší řízení výkonu panelů, mírný nárůst vyrobené energie nekompenzuje výrazně vyšší počáteční náklady.

b) S rozbitím panelů: Díky schopnosti monitoringu a snadné výměně poškozených panelů poskytuje lepší výkon a NPV oproti variantám bez optimizace a s RS.

c) Vyhoření: Ačkoliv poskytuje ochranu proti vyhoření, NPV této varianty není dostatečně vysoké na to, aby ospravedlnilo vyšší náklady na optimizéry v porovnání s variantou s RS zařízením.

Varianta s mikrostřídači:

a) Bez rozbití: Přestože mikrostřídače umožňují flexibilní rozšiřování systému a mírně lepší výkon než optimizéry, vyšší počáteční náklady negativně ovlivňují finanční výsledky.

b) S rozbitím panelů: Vyšší náklady spojené s reinvesticemi do nových panelů negativně ovlivňují NPV a činí z této varianty méně výhodnou.

c) Vyhoření: Z pohledu ochrany proti vyhoření a nákladů na technologii jsou mikrostřídače nejméně výhodnou variantou, jelikož NPV je výrazně nižší než cena technologie.

VARIANTA BEZ ROZBITÍ PANELU

	Počáteční výdaj [Kč]	Dotace [Kč]	Příjem v prvním roce [Kč]	Výdajové NPV [Kč]	NPV [Kč]	IRR	Doba návratnosti [rok]
1) FVE bez RS zařízení	520 968,43	160 000,00	40 539,06	- 769 656,66 Kč	114 527,71	8,162%	8
2) FVE RS zařízení	542 813,71	160 000,00	40 539,06	- 791 501,95 Kč	92 682,42	7,435%	8
3) FVE optimizéry	555 018,69	160 000,00	41 140,79	- 793 061,92 Kč	91 122,44	7,314%	8
4) FVE mikrostřídače	646 838,15	160 000,00	43 093,26	- 883 743,86 Kč	440,50	5,010%	9

VARIANTA S ROZBITÍM PANELŮ V ROCE 7 A 18

	Počáteční výdaj [Kč]	dotace [Kč]	Příjem v prvním roce [Kč]	Výdajové NPV [Kč]	NPV [Kč]	IRR	Doba návratnosti [rok]
1) FVE bez RS zařízení	520 968,43	160 000,00	40 539,06	- 797 769,49	86 414,87	7,524%	8
2) FVE RS zařízení	542 813,71	160 000,00	40 539,06	- 819 614,78	64 569,59	6,794%	8
3) FVE optimizéry	555 018,69	160 000,00	41 140,79	- 797 419,74	86 764,63	7,211%	8
4) FVE mikrostřídače	646 838,15	160 000,00	43 093,26	- 888 101,68	-3 917,31	4,912%	9

VYHOŘENÍ

	Cena technologie RS [Kč]	NPV [Kč]
1) FVE bez RS zařízení	-	44 594,08
2) FVE RS zařízení	21 845,29	44 698,14
3) FVE optimizéry	34 050,26	44 756,28
4) FVE mikrostřídače	125 869,72	45 193,70

Tabulka 19 Srovnání výsledků jednotlivých variant

5.3 Pojišťovny

5.3.1 Přístup pojišťoven k fotovoltaice

V rámci ekonomického zhodnocení této práce bylo plánováno také posouzení možných změn v přístupu pojišťoven k nemovitostem vybaveným fotovoltaickými instalacemi. Konkrétně jsem se chtěl zaměřit na potenciál atraktivnějšího pojištění pro objekty, které splňují nejnovější bezpečnostní standardy a jsou vybaveny technologií s funkcí rapid shutdown.

Aktuální přístup pojišťoven v České republice však fotovoltaické systémy považuje primárně za součást stavebních konstrukcí, nikoliv jako samostatné elektrické zařízení či

potenciální zdroj požáru. V praxi to znamená, že při pojišťování nemovitostí s instalovanou fotovoltaikou dojde pouze k navýšení celkové pojistné částky o hodnotu fotovoltaického systému, bez dalšího zohlednění specifik spojených s provozem těchto systémů.

Přestože bylo naznačeno, že se pojišťovny snaží reagovat na rostoucí počet instalací fotovoltaických systémů a plánují přepracovat své pojistné podmínky, konkrétní informace o připravovaných změnách nebyly k dispozici. Očekává se, že nový systém pojišťování by mohl vstoupit v platnost během následujících několika měsíců, avšak detaily těchto změn zůstávají nejasné. Tyto informace byly získány osobními i telefonickými rozhovory se zaměstnanci pojišťoven a z dokumentů dostupných na jejich webových stránkách.

Vzhledem k tomu že fotovoltaické systémy jsou považovány za integrální část budovy, celková pojistná suma nemovitosti se zvyšuje o hodnotu přidanou instalací fotovoltaiky. Tato přidaná hodnota představuje obvykle pouze malý procentuální nárůst celkové pojistné sumy a dopad na celkovou cenu pojištění je považován za zanedbatelný. Cena pojištění tak není započítána do cashflow v žádném z případů v této práci.

5.3.2 Můj názor

Domnívám se, že přístup pojišťoven k fotovoltaickým systémům by měl být přepracován. Pojišťovny by měly začít považovat fotovoltaické systémy nejen za součást stavebních konstrukcí, ale i za samostatná elektrická zařízení s potenciálem být zdrojem požáru.

Především by pojišťovny měly pečlivě hodnotit provedená bezpečnostní opatření u instalací. Instalace, které jsou realizovány s nejnovějšími bezpečnostními standardy jako je rapid shutdown, by měly být odměněny atraktivnějšími pojistnými podmínkami. Tento přístup by nejen zvýšil bezpečnost, ale také motivoval investory a majitele nemovitostí k implementaci pokročilých bezpečnostních opatření, čímž by se snížilo riziko požárů a jiných nehod spojených s fotovoltaickými systémy.

6 Případová studie: Aplikace v ČR

6.1 Analýza současného stavu FV v ČR

Fotovoltaické systémy v České republice procházejí rychlým rozvojem a stávají se významným prvkem národní energetiky. Tento rozvoj je podporován poklesem cen technologií a dotačními programy jako „Nová zelená úsporám“, což zvyšuje jejich adopci mezi domácnostmi a podniky. Přestože je fotovoltaika obecně považována za bezpečnou technologii, existují určitá požární rizika, která vyžadují zvýšenou pozornost.

Bezpečnostní rizika a požární prevence jsou klíčové pro udržení bezpečného provozu fotovoltaických systémů. Neodborná instalace je hlavní příčinou mnoha problémů a rizik. Například, podle studie Německého ministerstva životního prostředí z roku 2015, byla chybná instalace identifikována jako hlavní příčina 38 % požárů FVE. Dalšími častými příčinami jsou výrobní vady komponentů (35 %) a chyby v projektech systému (17 %).

V roce 2021 zaznamenaly hasičské sbory ČR 15 požárů fotovoltaických elektráren při celkovém počtu 50 620 instalací, což odpovídá pravděpodobnosti požáru 0,02963 %. Následující rok, 2022, bylo zaznamenáno 29 požárů z 85 661 instalací, což představuje pravděpodobnost 0,03384 %. V roce 2023 pak bylo evidováno 45 požárů při 167 360 instalacích, s pravděpodobností 0,02689 %. Tyto údaje ukazují, že přes rychlý nárůst počtu instalací fotovoltaických elektráren se pravděpodobnost požáru v procentech udržuje na srovnatelné úrovni.

V reakci na tyto výzvy byla založena pracovní skupina Fire, která spojuje odborníky z různých oblastí, včetně Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT v Praze a Hasičského záchranného sboru Středočeského kraje. Skupina se zaměřuje na zlepšení informovanosti a dodržování protipožárních zásad ve fázi projekce, instalace a údržby fotovoltaických systémů. Pracovní skupina Fire také vytvořila brožuru, která se zaměřuje na prevenci rizik požárů a nabízí praktické návody pro bezpečnou instalaci a údržbu fotovoltaických systémů.

Prevence je klíčová pro minimalizaci rizik. Zahrnuje pravidelné kontroly, revize a dodržování přísných instalatérských standardů. Správná instalace a údržba výrazně

snižují pravděpodobnost vzniku požáru. Zdůraznění významu kvalifikace instalátorů je nezbytné, neboť jen kvalifikovaní odborníci mohou zaručit bezpečnost systémů.

Závěrem, fotovoltaické systémy v ČR jsou na dobré cestě k dosažení vyšší bezpečnosti a širšího přijetí. Hasiči je již nyní považují za naprosto bezpečnou technologii, pokud jsou řádně instalovány a pravidelně udržovány. Avšak pro dosažení těchto cílů je nezbytná další osvěta, zdokonalení technických norem a lepší spolupráce mezi veřejným a soukromým sektorem, aby byla zajištěna bezpečnost a dlouhodobá udržitelnost fotovoltaických systémů v České republice. [44] [45] [62]

6.1.1 Brožura od skupiny FIRE

Brožura „Zásady protipožárního zabezpečení střešních instalací FVE a opatření požární prevence“ obsahuje podrobné informace rozdělené do několika fází: projekce, instalace, provoz a údržba. Důraz je kladen na celkovou integritu a požární bezpečnost fotovoltaických instalací, a to od začátku projektování až po běžný provoz a údržbu. Zvláštní pozornost je věnována rizikům spojeným s požárními aspekty různých komponent instalace, jako jsou panely, rozvaděče, střídače a kabelové spoje. [45]

Významně je zdůrazněno, že pro zajištění maximální požární bezpečnosti je nezbytné považovat FVE za celek, nejen za souhrn jednotlivých komponent. Zmiňuje se o nutnosti striktního dodržování stávajících českých norem, i když zákonná legislativa tato doporučení nevyžaduje povinně. Toto má vliv na pojistné plnění v případě škodních událostí. [45]

Zdůrazněno je také, že instalace fotovoltaických zařízení smí provádět pouze osoby s odbornou kvalifikací „Elektromontér fotovoltaických systémů“. [45]

Hlavní prvky týkající se bezpečnosti, které jsou v brožuře pokryty, zahrnují:

Potřeba adekvátního požárního oddělení FVE od vnitřních prostor budovy.

Výběr a hodnocení materiálů s ohledem na reakci na oheň.

Umístění instalace ve vztahu k požárně nebezpečným zónám a požárně otevřeným plochám.

Specifické technické úpravy a přístupy, které minimalizují riziko vzniku a šíření požáru. [45]

Klíčovým aspektem je i důkladná kontrola a regulární údržba, což pomáhá předcházet potenciálním zdrojům požáru způsobeným elektrickými závadami. Monitoring a vyhodnocování provozních dat jsou prezentovány jako zásadní pro včasné identifikování potenciálních problémů. [45]

Celkově brožura poskytuje komplexní pohled na to, jak efektivně zabezpečit fotovoltaické systémy proti požárním rizikům a jakým způsobem je lze integrovat do stavebních konstrukcí s ohledem na maximální bezpečnost.

6.2 Vhodnost a implementace rapid shutdown v ČR

6.2.1 Výtahy ze zahraničních norem týkajících se rapid shutdown

6.2.1.1 USA

Požadavky na Rapid Shutdown

Kontrolované Vodiče (690.12(A)):

Požadavky se vztahují na DC obvody PV systémů a na výstupní obvody střídačů umístěné uvnitř hranice pole.

Kontrolované limity (690.12(B)):

Vodiče umístěné mimo hranici pole musí být omezeny na maximálně 30 voltů do 30 sekund po zahájení rychlého odpojení. [8]

Vodiče uvnitř hranice pole musí splňovat požadavky na omezení napětí na maximálně 80 voltů do 30 sekund po zahájení rychlého odpojení. [8]

Zařízení pro zahájení (690.12(C)):

Zahájení funkce rapid shutdown musí být zajištěno zařízením, které je snadno dostupné a jasně indikuje, že byla funkce aktivována. [8]

Označení staveb rapid shutdown (690.12(D)):

Na budovách s PV systémy musí být umístěn trvalý štítek označující polohu zařízení pro zahájení rapid shutdown. [8]

Výjimky pro rapid shutdown

Pozemní PV systémy, které vstupují do budov pouze za účelem umístění PV zařízení, nemusí splňovat požadavky na rapid shutdown. [8]

PV zařízení a obvody instalované na samostatných konstrukcích, jako jsou parkovací střechy, přístřešky pro auta, solární pergoly a podobné konstrukce, také nevyžadují splnění požadavků na rapid shutdown.

Tyto výjimky jsou zavedeny s ohledem na to, že na těchto typech konstrukcí obvykle neprobíhají hasičské zásahy na střechách, což snižuje riziko elektrického šoku pro hasiče. [8]

6.2.1.2 Německo VDE-AR-E 2100-712

7 Technické instalační opatření – 7.1 Zařízení pro spínání, oddělení nebo zkratování v DC oblasti fotovoltaického systému – 7.1.1 Základní funkce

Po vypnutí střídače nebo při výpadku napájení musí dojít k spínání, oddělení nebo zkratování automaticky mimo budovu nebo před chráněnou oblastí směrem ke střídači. [26]

Pro spínání, oddělení nebo zkratování je vhodné zařízení nebo kombinace zařízení, pokud jejich aktivací na výstupu:

Napětí mezi aktivním dílem a zemí a napětí mezi aktivními částmi je menší než 120 V stejnosměrného napětí (bez harmonických) nebo součet všech výstupních zkratových proudů ve stejném výstupním DC systému je menší než 12 mA DC nebo energie v rámci stejného výstupního DC systému je menší než 350 mJ. [26]

6.2.1.3 Rakousko OVE-Richtlinie R 11-1:2022-05-01

Fotovoltaické systémy – Dodatečné bezpečnostní požadavky -- Část 1: Požadavky na ochranu hasičů.

5 Technická a stavební opatření – 5.2 Technická opatření – 5.2.2 Základní funkce

Následující požadavky platí obdobně i pro PV ostrovní systémy.

Při vypnutí PV střídače v důsledku odpojení od sítě musí být aktivace zařízení pro odpojení nebo zkratování provedena automaticky nebo ovládáním z příslušných a označených dálkových ovládání. [34]

Pro odpojení nebo zkratování je vhodné zařízení nebo kombinace zařízení, pokud jejich aktivací na výstupu:

napětí mezi aktivní částí a zemí a napětí mezi aktivními částmi je menší než 90 V efektivní hodnoty. [34]

6.2.1.4 Slovensko STN 34 3085

Pravidla na zacházení s elektrickými zařízeními při požárech nebo povodních.

6 Postup při vypínání – 6.5 Speciální požadavky na technické řešení vypínání solárních fotovoltaických napájecích systémů – 6.5.2 Při vypínání SFNS se postupuje následovně:

a) zařízením pro odpojení se odpojí střídavá strana od stejnosměrné strany SFNS;

b) pomocí vhodného technického řešení se zaručeně zabezpečí na stejnosměrné straně SFNS:

ba) beznapěťový stav jednotlivých modulů SFNS nebo jejich řetězců nebo

bb) takový napěťový stav jednotlivých modulů SFNS nebo jejich řetězců, který umožňuje bezpečné hašení požáru střešní konstrukce nebo obvodového pláště stavby. [46]

6.2.2 Porovnání jednotlivých výtahů z norem

USA

V USA je funkce rapid shutdown definována a regulována podle National Electrical Code (NEC) sekce 690.12. Tato norma vyžaduje, aby fotovoltaické systémy instalované na budovách měly schopnost rychle snížit napětí na bezpečnou úroveň do 30 sekund od aktivace. Cílem je ochrana hasičů před elektrickým šokem.

Německo

Německá norma klade důraz na automatické spínání, oddělování, nebo zkratování fotovoltaických systémů mimo budovu při vypnutí střídače nebo výpadku sítě. Německo stanoví jasné limity pro napětí a proudy, které musí být dodrženy po aktivaci bezpečnostního mechanismu.

Rakousko

Rakouské předpisy jsou podobné německým v tom, že požadují automatické aktivace zařízení pro odpojení nebo zkratování při vypnutí střídače. Rakousko stanoví maximální napětí na 90 V RMS mezi jakýmikoli vodiči po aktivaci bezpečnostního systému.

Slovensko

Slovenská regulace zdůrazňuje, že při vypínání musí dojít k odpojení střídavé strany od stejnosměrné a zabezpečení beznapěťového stavu na stejnosměrné straně, aby bylo možné bezpečně hasit případný požár.

Společné rysy a rozdíly

Všechny čtyři země zdůrazňují důležitost ochrany proti elektrickému šoku v případě požáru, ale mohou se lišit v metodách a specifických technických požadavcích, jako jsou limity napětí a konstrukční požadavky na zařízení. USA a Rakousko specifikují konkrétní napěťové limity, zatímco Německo a Slovensko se zaměřují více na automatické bezpečnostní reakce systému a správné umístění zařízení pro rychlé odpojení.

6.2.3 Doporučení pro ČR na základě porovnání zahraničních norem

Rozšíření požadavků na monitoring a signalizační systémy:

Přestože české normy již obsahuje jisté pokyny pro detekci a signalizaci, bylo by vhodné zdůraznit potřebu komplexnějších systémů monitoringu, které by kontinuálně sledovaly nejen přítomnost požárních zplodin, ale i další parametry kritické pro bezpečnost, jako je teplota a vlhkost v prostorách s PV systémy. Tyto systémy by měly být integrovány s centrálním bezpečnostním systémem budovy pro rychlejší reakci a lepší koordinaci v případě nouze.

Legislativní rámec a kontrola:

I když existuje norma ČSN EN IEC 62446-2, která stanovuje požadavky na zkoušení, dokumentaci a údržbu fotovoltaických systémů, včetně rapid shutdown systémů, její účinnost je velice omezena tím, že nebyla přeložena do češtiny. To vede k situaci, kdy není dostatečně zajištěno, že se touto normou budou v praxi řídit všechny relevantní subjekty. Bez překladu a adekvátního začlenění do národní legislativy není možné zajistit, že budou dodržovány stanovené bezpečnostní standardy. [49]

6.2.4 Nový stavební zákon platný od 1. 7. 2024

Nový stavební zákon, který vstoupí v platnost 1. července 2024, zavádí změny v klasifikaci a požadavcích na povolování a realizaci fotovoltaických (PV) systémů, což může mít negativní dopad na jejich bezpečnost. Tento zákon klasifikuje PV systémy do 50 kW jako drobné stavby a PV systémy do 100 kW jako jednoduché stavby. [47]

Drobné stavby (do 50 kW)

Bez povolení: Drobné stavby nevyžadují žádné stavební povolení, což znamená, že není potřeba žádná stavební dokumentace ani schválení autorizovanou osobou. To může vést k instalaci systémů bez náležitého dohledu a kontroly, což zvyšuje riziko chyb a nebezpečí.

Bez odborného dozoru: Stavby může realizovat stavebník svépomocí bez jakéhokoli odborného dozoru, což může vést k nesprávným instalacím a potenciálně nebezpečným situacím. [47]

Jednoduché stavby (do 100 kW)

Povolení, ale bez odborné dokumentace: Jednoduché stavby sice vyžadují povolení, ale jejich dokumentaci nemusí zpracovávat autorizovaná osoba v oboru elektro což může vést k nedostatečně kvalifikovaným návrhům.

Bez odborného dohledu: Ani jednoduché stavby nevyžadují odborný dozor, což může vést k tomu, že instalace nebude prováděna v souladu s bezpečnostními standardy. [47]

Návrh na zlepšení:

Zavést povinný odborný dozor: I pro drobné a jednoduché stavby by měl být vyžadován odborný dozor ze strany kvalifikovaného technika nebo inženýra s odpovídající kvalifikací v oblasti elektro. To by zajišťovalo, že všechny instalace PV systémů splňují stávající bezpečnostní a technické normy.

Požadavek na minimální dokumentaci: I pro jednoduché a drobné stavby by měla být vyžadována základní dokumentace, která popisuje instalaci a zajišťuje, že byla provedena v souladu s relevantními technickými normami a bezpečnostními předpisy.

6.3 Možné výzvy a překážky pro adopci v ČR

Jedním z největších problémů, který brání efektivní implementaci rapid shutdown systémů v České republice, je nedostatečné dodržování norem a regulačních požadavků ze strany instalatérů fotovoltaických systémů. Mnoho z nich se s předpisy neseznámí a nesnaží se je dodržovat, což může vést k chybám ve výstavbě a potenciálním bezpečnostním rizikům. Pro zlepšení této situace by bylo užitečné zavést certifikační kurzy a vzdělávací programy pro instalatéry, doplněné o pravidelné kontroly realizovaných instalací, které by prováděly autorizované osoby nebo inspekční orgány. [22]

Další významná výzva spočívá v neautorizovaném projektování fotovoltaických systémů osobami, které nejsou dostatečně kvalifikované. To vyvolává obavy o kvalitu a bezpečnost instalací. Tento problém by mohl být řešen zpřísněním legislativních požadavků na kvalifikaci a autorizaci projektantů, včetně zavedení striktních sankcí pro ty, kteří tato pravidla porušují. [22]

Navíc, nový stavební zákon, který vstoupí v platnost v červenci 2024, představuje další potenciální překážku. Tento zákon snižuje administrativní bariéry pro instalaci fotovoltaických systémů malého rozsahu tím, že je klasifikuje jako drobné nebo jednoduché stavby, což může vést k nedostatečnému dohledu a kontrole nad těmito instalacemi. [22] [47]

Implementace systémů s rapid shutdown znamená další finanční investici pro majitele a investory, což může být bariérou pro jejich širší adopci, zejména pokud veřejnost nebude plně informována o jejich významu a potřebnosti. Je tedy zásadní zlepšit veřejné povědomí o bezpečnostních a ekonomických výhodách těchto systémů prostřednictvím informačních kampaní a edukačních iniciativ, které by veřejnost mohly přesvědčit o důležitosti a užitečnosti investic do bezpečnějších a modernějších fotovoltaických technologií.

Tato kombinace opatření by mohla přispět ke zlepšení kvality a bezpečnosti fotovoltaických instalací v České republice, což by usnadnilo širší adopci rapid shutdown a zároveň by posílilo důvěru veřejnosti a odborníků v tuto oblast. [44]

7 Závěr

Součástí rešerše jsem ověřil, že celosvětový trend v legislativě ukazuje na rostoucí požadavky na implementaci systémů rapid shutdown v nových fotovoltaických instalacích. V mnoha zemích například ve Spojených státech a některých členských státech Evropské unie, jsou již zavedeny přísné normy, které vyžadují začlenění technologií umožňujících rapid shutdown.

Vzhledem k tomuto mezinárodnímu vývoji lze očekávat, že i v České republice dojde v blízké budoucnosti k implementaci podobných legislativních opatření. Zajištění souladu s těmito trendy a předpisovými požadavky bude klíčové pro další rozvoj a bezpečný provoz fotovoltaických systémů na domácím trhu. Při analýze bezpečnosti fotovoltaiky v České republice jsem zjistil, že hasiči považují správně instalované fotovoltaické systémy za bezpečné. Správné instalace systémů prostřednictvím kvalifikovaných instalačních firem, použití vhodných komponent a pravidelné kontroly jsou klíčové faktory pro zajištění bezpečnosti. Rapid shutdown přispívá k dalšímu zvýšení bezpečnosti tím, že umožňuje rychlé odpojení fotovoltaických systémů v případě potřeby, ale primární důraz na prevenci skrze kvalitu instalace a komponent zůstává nejdůležitější.

Pro ekonomické zhodnocení různých technologií umožňujících rapid shutdown jsem použil tři metody, které posoudily vliv zastínění, rozbití panelů a vyhoření. Z hlediska vlivu zastínění vychází optimizéry hůře než zařízení pro rapid shutdown, což ukazuje, že přidaná hodnota z optimalizace nepokrývá jejich vyšší náklady. Mikrostřídače vykazují nejnižší ekonomickou výhodnost s NPV blížícím se nule. Při rozbití panelů mají optimizéry vyšší počáteční náklady, ale poskytují nejlepší výsledky díky schopnosti efektivně řídit a monitorovat stav panelů, což vede k lepšímu NPV oproti ostatním technologiím. U mikrostřídačů se v důsledku výměny poškozených panelů NPV dostává do záporných hodnot. Jako ochrana proti vyhoření se pro nemovitost v hodnotě 9 000 000 Kč nejvíce vyplatí investice do rapid shutdown zařízení, která vykazuje nejvyšší NPV v případě požáru a nabízí tak nejlepší ochranu. Mikrostřídače nejsou ekonomicky výhodné pro nemovitosti v této cenové kategorii. Stávají se vhodnými pouze pro nemovitosti s hodnotou přesahující 26 000 000 Kč.

V rámci práce jsem vytvořil praktickou pomůcku, která demonstruje základní principy a průběh činnosti systému rapid shutdown. Tato výuková pomůcka slouží k lepšímu pochopení funkce a významu rapid shutdown systémů.

8 Výuková pomůcka

8.1 Zadání

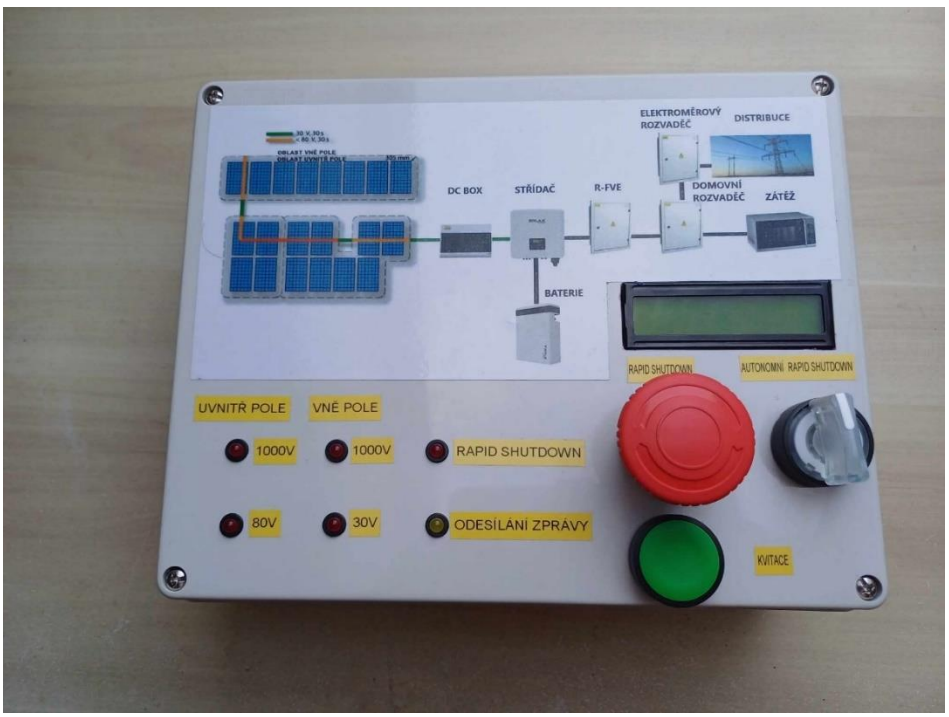
Součástí zadání této bakalářské práce je tvorba přenosné výukové pomůcky, která by demonstrovala princip rapid shutdown.

8.2 Popis pomůcky

Pomůcka je realizována ve formě interaktivního přenosného zařízení, na kterém je natištěno blokové schéma technologie FVE s důrazem na přehlednost.

Zařízení se skládá z plastové rozvaděčové krabice, šesti LED, STOP tlačítka s aretací, přepínače, tlačítka pro kvitaci a LCD.

Jako řídící zařízení bylo zvoleno Arduino Uno. Pro jeho napájení je do krabice vyvedena USB-A/USB-A vývodka a USB-A/USB-A kabel. Do Arduina je zasazena propojovací destička, ke které jsou připájeny jednotlivé kabely ze zbytku pomůcky. Destička je tak kabely pevně spojena s víkem pomůcky, kde jsou umístěny LED, tlačítka, přepínač, displej a obrázek schématu FVE.



Obrázek 10 Pomůcka pro demonstraci průběhu rapid shutdown

8.3 Návod na použití pomůcky

1) Po připojení USB kabelu ke zdroji se pomůcka zapne do stavu reprezentujícího normální stav FVE. To indikují dvě svítící LED označené „1000 V“ a na displeji nápis „SYSTEM OK“. Tento stav trvá, dokud nedojde k aktivaci rapid shutdown.

2) Stisknutím STOP tlačítka označeného „RAPID SHUTDOWN“ systém začne simulovat průběh rapid shutdown pomocí rozsvícené LED označené „RAPID SHUTDOWN“, změny nápisu na displeji na „RAPID SHUTDOWN“, 2 sekundy trvajícího rozsvícení LED „ODESILANI ZPRAVY“, která simuluje online informování majitele o probíhajícím rapid shutdown, zároveň po dobu svícení LED simulující odesílání zprávy je na panelu nápis „ODESILANI ZPRAVY“.

3) Po 4 sekundách od stisknutí STOP tlačítka nejprve zhasne LED „1000 V“ reprezentující oblast „VNĚ POLE“ a zároveň se rozsvítí LED „30 V“ indikující snížení napětí v okolí panelů na bezpečnou úroveň. Na displeji se objeví nápis „VNE BEZPECNE“. Po uplynutí 6 sekund od stisknutí STOP tlačítka dojde ke stejnému průběhu pro LED reprezentující oblast „UVNITR POLE“ s rozdílem že požadované bezpečné napětí uvnitř pole je vyšší a tedy bude svítit LED „80 V“ a na displeji se objeví druhý nápis „UVNITR BEZPECNE“.

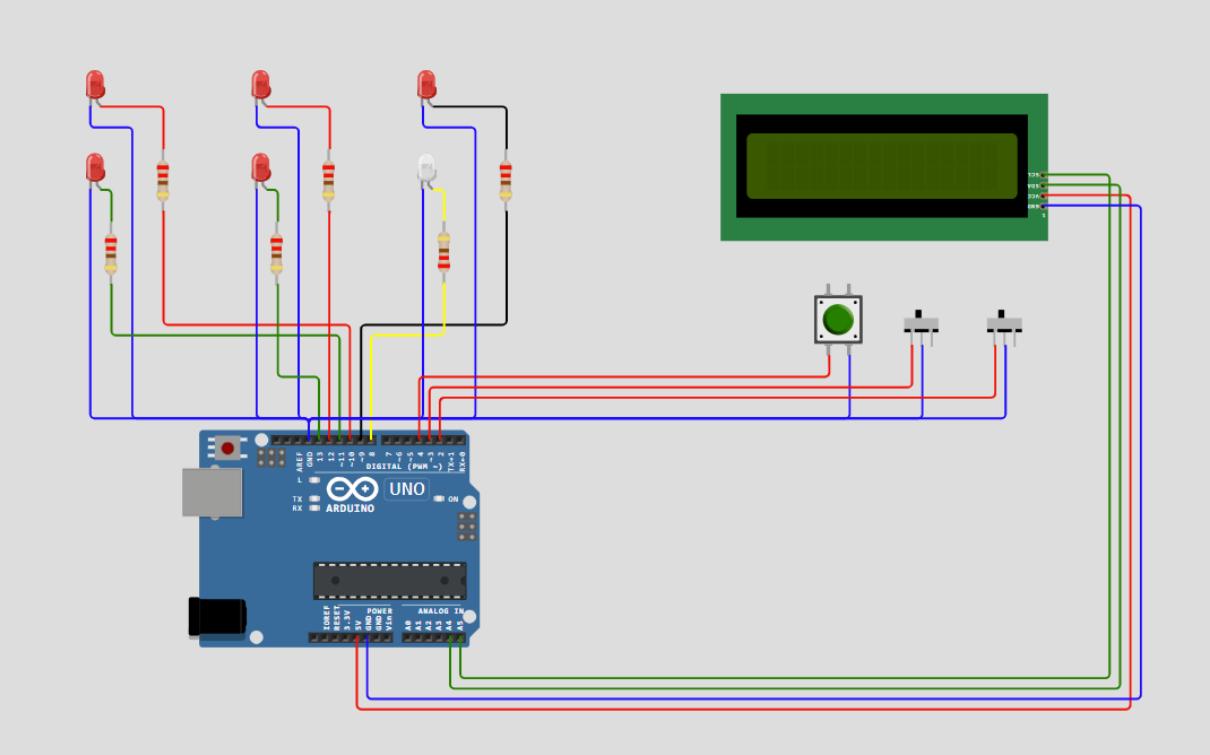
4) Tento stav je trvalý, dokud nedojde k vymáčknutí STOP tlačítka a stisknutí tlačítka „KVITACE“.

5) Stejný průběh lze aktivovat také pomocí přepínače „AUTONOMNÍ RAPID SHUTDOWN“, který zde simuluje autonomní reakci systému. Opět je pro restart systému nejdříve nutno přepnout přepínač do původní polohy a poté stisknout tlačítko „KVITACE“.

6) Po vymáčknutí STOP tlačítka/přepnutí přepínače do původní polohy a stisknutí tlačítka „KVITACE“ zhasnou všechny LED a rozsvítí se pouze LED „1000 V“ pro oblast vně i uvnitř pole. Na displeji se znovu zobrazí nápis „SYSTEM OK“. Systém je takto navrácen do původního stavu reprezentujícího normální fungování.

8.4 Schéma zapojení a program

8.4.1 Schéma zapojení



Obrázek 11 Schéma zapojení pomůcky

8.4.2 Program

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
bool isSystemOn = true;
int promenna;
void setup() {
  pinMode(2, INPUT_PULLUP);      //rapid shutdown tlačítko s aretací
  pinMode(3, INPUT_PULLUP);      //rapid shutdown přepínač
  pinMode(4, INPUT_PULLUP);      //tlačítko kvitace
  pinMode(9, OUTPUT);            //LED indikující rapid shutdown
  pinMode(8, OUTPUT);            //LED indikující odesílání zprávy
  pinMode(10, OUTPUT);           //LED indikující vysoké napětí uvnitř pole
  pinMode(12, OUTPUT);           //LED indikující vysoké napětí vně pole
  pinMode(11, OUTPUT);           //LED indikující nízké napětí uvnitř pole
  pinMode(13, OUTPUT);           //LED indikující nízké napětí vně pole
  promenna=1;                    //pomocná proměnná pro určení stavu
zařízení
```

```
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("SYSTEM OK");}
void loop() {
  // Kontrola, zda bylo stisknuto první tlačítko nebo druhé tlačítko
   if(promenna==0  &&  digitalRead(4)==LOW  &&digitalRead(2)  !=  LOW  &&
digitalRead(3) != LOW)
  { promenna=1;
    isSystemOn = true;
    lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("SYSTEM OK");  }
  if (digitalRead(2) == LOW || digitalRead(3) == LOW) {
    promenna = 0;
    if (isSystemOn) {
      // Spuštění procesu "rapid shutdown"
      isSystemOn = false;
      lcd.clear();
      lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("RAPID SHUTDOWN ");
      digitalWrite(9, HIGH);
      digitalWrite(8, HIGH);
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd.print("odesilani zpravy");
      delay(2000); // Představuje proces odeslání zprávy
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd.clear();
            lcd.setCursor(0,0);
            lcd.print("RAPID SHUTDOWN ");
      digitalWrite(8, LOW);
      delay(2000); // Simulace zpoždění 4 sekund
      // Následuje přechod na bezpečné napětí v okolí pole
      digitalWrite(12, LOW);
      digitalWrite(13, HIGH);
      lcd.setCursor(0,1);
      lcd.print("OKOLI BEZPECNE");
      delay(4000); // Simulace zpoždění 8 sekund
```

```
      // Následuje přechod na bezpečné napětí uvnitř pole
      digitalWrite(11, HIGH);
      digitalWrite(10, LOW);
      lcd.setCursor(0,0);
      lcd.print("UVNITR BEZPECNE");   }  }
 if(promenna == 1) {
    digitalWrite(11, LOW);
      digitalWrite(13, LOW);
    digitalWrite(9, LOW);
  digitalWrite(10, HIGH);
  digitalWrite(12, HIGH);  }
  // zóna 1 (pole) do 80 voltů do 30 sekund - v simulaci pro zrychlení 8
sekund
  // zóna 2 (okolo) do 30 voltů do 10 sekund - v simulaci pro zrychlení 4
sekundy}
```

9 Zdroje a citace

[1] ZBENY. *Rapid Shutdown Device For Solar System: All You Need To Know* [online]. 2021 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.beny.com/new/rapid-shutdown-device-for-solar-system-all-you-need-to-know/

[2] INTERSOLAR. *The Dawn of the Terawatt Age: Markets and Trends Drive the Global Solar Deployment* [online]. 2023 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.intersolar.de/press-releases/gmo-global-solar-market-trends

[3] *Crank it up: High-voltage solar systems save contractors cash* [online]. 2018 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.solarpowerworldonline.com/2018/11/high-voltage-solar-systems-save-contractors-cash/

[4] *Arc Detection of Photovoltaic DC Faults Based on Mathematical Morphology* [online]. 2024 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.mdpi.com/2075-1702/12/2/134

[5] *Distributed PV power station DC arc and fire "safety" hazard – application scenario risk analysis* [online]. 2021 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.beny.com/new/distributed-pv-power-station-dc-arc-and-fire-safety-hazard-application-scenario-risk-analysis/

[6] *Basic Photovoltaic Principles and Methods* [online]. 1982 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/1448.pdf

[7] *ČSN 33 2000-7-712 ED.2 (332000) Elektrické instalace nízkého napětí – Část 7-712: Zařízení jednoúčelová a ve zvláštních objektech – Fotovoltaické (PV) systémy* [online]. 2016 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-33-2000-7-712-ed-2-332000-180403.html

[8] *690.12 Rapid Shutdown of PV Systems on Buildings* [online]. 2023 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://link.nfpa.org/publications/70/2023/chapters/6/articles/690

[9] *NEC 690.12 Rapid Shutdown of PV Systems on Buildings – Part 1: Inverters* [online]. 2020 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.altestore.com/blog/2020/07/nec-690-12-rapid-shutdown-of-pv-systems-on-buildings-part-1-inverters/

[10] *Systém rychlého vypnutí (RSS) pro požární bezpečnost Příručka k instalaci TS4-A-F/2F a vysílače* [online]. 2023 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://assets-global.website-

files.com/5fad551d7419c7a0e9e4aba4/64ee09ef42233c705ea2ef86_002-00118-35%203.1%20Installation%20Manual%20RSS%20w%20Fire%20Safety%2020230814%20-%20CZ.pdf

[11] *Použití většiny (ne-li všech) měničů s Tigo TS4 Flex MLPE* [online]. 2024 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://cs.tigoenergy.com/inverter-compatibility#s-inverter-list

[12] *What are DC power optimizers?* [online]. 2024 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.solarreviews.com/blog/complete-guide-to-power-optimizers

[13] *What is Maximum Power Point Tracking (MPPT)* [online]. 2022 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.solar-electric.com/learning-center/mppt-solar-charge-controllers.html/

[14] *Basics of MPPT Solar Charge Controller* [online]. 2013 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.leonics.com/support/article2_14j/articles2_14j_en.php

[15] *Application Note: Connecting SolarEdge Power Optimizers to Multiple PV Modules* [online]. 2023 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/application-note-connecting-solaredge-power-optimizers-to-multiple-pv-modules.pdf

[16] *Stručná referenční příručka TS4-A-O/S/M s TAP a CCA* [online]. 2023 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://assets-global.website-files.com/5fad551d7419c7a0e9e4aba4/64db95e5d8f20bcfea15f852_002-00147-35%201.3%20QSG%20TS4-A%20CCA%20TAP%2020230804%20-%20CZ.pdf

[17] *SolarEdge Vs Enphase: An In-Depth Comparison* [online]. 2021 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://nrgcleanpower.com/learning-center/solaredge-vs-enphase/

[18] *Jak na objektech zajistit bezpečnost FVE?* [online]. 2022 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://janhlavaty.cz/2022/12/bezpecnost-objektu-s-fve/

[19] *What is solar rapid shutdown, and why do I need it?* [online]. 2024 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.solarreviews.com/blog/solar-rapid-shutdown

[20] *Bewertung des Brandrisikos in Photovoltaik-Anlagen und Erstellung von Sicherheitskonzepten zur Risikominimierung* [online]. 2015 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: http://www.pv-brandsicherheit.de/fileadmin/downloads_fe/Leitfaden_Brandrisiko_in_PV-Anlagen_V01.pdf

[21] FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS ISE. *Recent Facts about Photovoltaics in Germany* [online]. 2016 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/kumar1/docs/fraunhofer-14oct16.pdf

[22] *Dá se navrhovat fotovoltaika bezpečně?* [online]. 2022 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://janhlavaty.cz/2022/11/bezpecna-fotovoltaika/

[23] *Rapid shutdown requirements around the world* [online]. 2022 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://event.on24.com/eventRegistration/console/apollox/mainEvent?simulive=y&eventid=3605627&sessionid=1&username=&partnerref=Website&format=fhvideo1&mobile=&flashsupportedmobiledevice=&helpcenter=&key=08A3E75C4CFB7C98037B5F498CC9B7D2&newConsole=true&nxChe=true&newTabCon=true&consoleEarEventConsole=false&text_language_id=en&playerwidth=748&playerheight=526&eventuserid=645013493&contenttype=A&mediametricsessionid=555874574&mediametricid=5063508&usercd=645013493&mode=launch

[24] *Understanding UL3741 and New Rapid Shutdown Solutions* [online]. 2023 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.mayfield.energy/technical-articles/ul3741/

[25] *Dziennik Ustaw – rok 2020 poz. 471* [online]. 2020 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.infor.pl/akt-prawny/DZU.2020.056.0000471,ustawa-o-zmianie-ustawy-prawo-budowlane-oraz-niektorych-innych-ustaw.html

[26] *DE-AR-E 2100-712 Anwendungsregel:2018-12 Measures for the DC range of a PV installation for the maintenance of safety in the case of firefighting or technical assistance* [online]. 2018 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.vde-verlag.de/standards/0100500/vde-ar-e-2100-712-anwendungsregel-2018-12.html

[27] *AS/NZS 5033:2021 Installation and safety requirements for photovoltaic (PV) arrays* [online]. 2021 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://store.standards.org.au/reader/as-nzs-5033-2021?preview=1

[28] *CEI 0-21* [online]. 2019 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://mycatalogo.ceinorme.it/cei/item/0000016797?sso=y

[29] *CEI 0-16* [online]. 2022 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://mycatalogo.ceinorme.it/cei/item/0000018527/

[30] *Reglamento electrotécnico para baja tensión e ITC* [online]. 2023 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.boe.es/biblioteca_juridica/codigos/codigo.php?modo=2&id=326_Reglamento_electrotecnico_para_baja_tension_e_ITC

[31] *NORME NF C 15-100 POINTS CLÉS & SOLUTIONS LEGRAND* [online]. 2016 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://assets.legrand.com/editorial/legrandfr/outils/documentations-et-guides/legrand-guide-norme-nf-c-15-100.pdf

[32] *Low-voltage electrical installations - Part 8: Functional aspects* [online]. 2021 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.nen.nl/en/nen-1010-8-2021-nl-283742

[33] *T–436 40 00 (2.1) - en* [online]. 2012 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.scribd.com/document/706087312/T-436-40-00-2-1-en-1

[34] *OVE-Richtlinie R 11-1:2022-05-01* [online]. 2022 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://shop.ove.at/de/product/ove-richtlinie-r-11-1-2021-08-01-35164

[35] *STN 34 3085: 2016, Pravidlá na zaobchádzanie s elektrickým zariadením pri požiaroch alebo zátopách.* [online]. 2016 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://sclib.svkk.sk/sck01/Record/000497799#citethis

[36] *ČSN P 73 0847 (730847) Požární bezpečnost staveb – Fotovoltaické (PV) systémy* [online]. 2024 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-p-73-0847-730847-251417.html

[37] *Komentované znění vyhlášky č. 114/2023 Sb.* [online]. 2023 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.mpo.gov.cz/cz/energetika/elektroenergetika/obnovitelne-zdroje/komentovane-zneni-vyhlasky-c--114-2023-sb---277095/

[38] *Zákon č. 458/2000 Sb.* [online]. 2001 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-458

[39] *Jednotka TS4-A s přístupovým bodem TAP a jednotkou CCA Příručka k instalaci* [online]. 2023 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://assets-global.website-files.com/5fad551d7419c7a0e9e4aba4/64ee0af92b1baa5320ef5bbf_002-00129-35%202.0%20Installation%20Manual%20TS4-A%20w%20TAP%20%26%20CCA%2020230816%20-%20CZ.pdf

[40] *IQ8HC Microinverter* [online]. 2024 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://enphase.com/en-lac/store/microinverters/iq8-series/iq8hc-microinverter

[41] *Assessment of Photovoltaic Module Failures in the Field* [online]. 2017 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://iea-pvps.org/key-topics/report-assessment-of-photovoltaic-module-failures-in-the-field-2017/

[42] *HSCZR* [online]. 2024 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.hzscr.cz/

[43] *Fotovoltaika způsobuje devastující požáry, přitom nehoří. Proč? A proč nezapomenout na pojištění?* [online]. 2023 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.ceskestavby.cz/clanky/fotovoltaika-zpusobuje-devastujici-pozary-pritom-nehori-proc-a-proc-nezapomenout-na-pojisteni-32598.html

[44] *POŽÁRY FOTOVOLTAICKÝCH ELEKTRÁREN A SOLÁRNÍCH PANELŮ. BEZPEČNOST, RIZIKA, STATISTIKY A POŽÁRNÍ PREVENCE FVE* [online]. 2022 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.bezpecnostprace.info/pozarni-ochrana/pozary-fve-a-solarnich-panelu/

[45] *Zásady protipožárního zabezpečení střešních instalací FVE a opatření požární prevence* [online]. 2016 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.hzscr.cz/soubor/firefve-brozura-a5-final-web-pdf.aspx

[46] *STN 343085 (343085)* [online]. 2016 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://eshop.normservis.sk/norma/stn-343085-1.1.2016.html

[47] *Nový stavební zákon: Schvalování staveb. Co je drobnou, jednoduchou nebo vyhrazenou stavbou?* [online]. 2024 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.estav.cz/cz/12566.novy-stavebni-zakon-schvalovani-staveb-co-je-drobnou-jednoduchou-vyhrazenou-stavbou

[48] *Ensuring Safe Solar Maintenance* [online]. 2023 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://keesafety.co.uk/guides/ensuring-safe-solar-maintenance

[49] *ČSN EN IEC 62446-2 (364623) Fotovoltaické (PV) systémy – Požadavky na zkoušení, dokumentaci a údržbu - Část 2: Systémy spojené s rozvodnou sítí - Údržba PV systému* [online]. 2020 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iec-62446-2-364623-196251.html

[50] Požáry fotovoltaických elektráren, Metodický list číslo 48 P [online]. 2017 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.hzscr.cz/soubor/4-p-p-ml48-fv-elekrarny-pdf.aspx

[51] Prognóza ČNB – jaro 2024 [online]. 2024 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.cnb.cz/cs/menova-politika/prognoza/

[52] HAZARD CONTROL Understanding UL 3741 and new rapid shutdown solutions [online]. [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: https://digital.solarbuildermag.com/?m=59310&i=784807&p=46&ver=html5

[53] *IQ Relay (single/three-phase)* [online]. 2024 [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: https://enphase.com/en-in/store/accessories/iq-relay-three-phase

[54] IQ Gateway [online]. 2024 [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: https://enphase.com/en-lac/store/communication/iq-gateway

[55] What is Rapid Shutdown and why was it implemented in the United States? [online]. 2018 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.acsolarwarehouse.com/news/rapid-shutdown/

[56] TIGO TS4-A-F [online]. 2024 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://cs.tigoenergy.com/product/ts4-a-f

[57] ZAŘÍZENÍ PRO RYCHLÉ VYPNUTÍ [online]. 2022 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.beny.com/cs/module-level-rapid-shutdown

[58] SOLAREDGE P950-4RMXMBY (MC4) [online]. 2024 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://solarity.shop/cs/stridace_c4316442132535/optimizery_c4350801870944/solaredge-p950-4rmxmby-mc4_p241/

[59] TIGO TS4-A-O [online]. 2024 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://cs.tigoenergy.com/product/ts4-a-o

[60] Enphase IQ8HC-72-M-INT Micro Inverter [online]. 2024 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.wechselrichter-online.de/en/enphase-iq8hc-72-m-int-micro-inverter

[61] Tigo Busieness Review [online]. 2022 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.pv.de/media/220601_tigo_design_install_commissioning_copartner_ews.pdf

[62] Praktická doporučení pro bezpečnost a požární prevenci střešních FVE [online]. 2016 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: https://www.hzscr.cz/clanek/prakticka-doporuceni-pro-bezpecnost-a-pozarni-prevenci-stresnich-fve.aspx

9.1 Seznam obrázků

Obrázek 1 Rozdělení vnitřní a vnější zóny rapid shutdown ..... - 17 -

Obrázek 2 RSD TIGO TS4-A-F ..... - 17 -

Obrázek 3BENY RSD ..... - 17 -

Obrázek 4 Optimizér SolarEdge P950-4RMXMBY ..... - 19 -

Obrázek 5 Optimizér TIGO TS4-A-O ..... - 19 -

Obrázek 6 Mikrostřídač Enphase IQ8HC ..... - 21 -

Obrázek 7 NEC 2014 Požadavky na rapid shutdown ..... - 25 -

Obrázek 8 NEC 2017 & 2020 Požadavky na rapid shutdown ..... - 25 -

Obrázek 9 Simulace zastínění s hodinovým krokem ..... - 46 -

Obrázek 10 Pomůcka pro demonstraci průběhu rapid shutdown ..... - 71 -

Obrázek 11 Schéma zapojení pomůcky ..... - 73 -

9.2 Seznam tabulek

Tabulka 1 Přehled výhod a nevýhod technologií umožňujících rapid shutdown ..... - 22 -

Tabulka 2 Ceník FVE bez technologie pro rapid shutdown ..... - 39 -

Tabulka 3 Ceník FVE se zařízením pro rapid shutdown ..... - 40 -

Tabulka 4 Ceník FVE s optimizéry ..... - 41 -

Tabulka 5 Ceník FVE s mikrostřídači ..... - 42 -

Tabulka 6 Srovnání ceníků variant FVE ..... - 43 -

Tabulka 7 Přehled energie, cashflow a výsledků pro variantu bez RS zařízení bez rozbití panelů ..... - 49 -

Tabulka 8 Přehled energie, cashflow a výsledků pro variantu bez RS zařízení s rozbitím panelů ..... - 50 -

Tabulka 9 Vyhoření FVE bez RS zařízení ..... - 51 -

Tabulka 10 Přehled energie, cashflow a výsledků pro variantu s RS zařízení bez rozbitím panelů ..... - 51 -

Tabulka 11 Přehled energie, cashflow a výsledků pro variantu s RS zařízením s rozbitím panelů ..... - 52 -

Tabulka 12 Vyhoření FVE s RS zařízením ..... - 52 -

Tabulka 13 Přehled energie, cashflow a výsledků pro variantu s optimizéry bez rozbití panelů ..... - 53 -

Tabulka 14 Přehled energie, cashflow a výsledků pro variantu s optimizéry s rozbitím panelů ..... - 54 -

Tabulka 15 Vyhoření FVE s optimizéry ..... - 55 -

Tabulka 16 Přehled energie, cashflow a výsledků pro variantu s mikrostřídači bez rozbití panelů ..... - 56 -

Tabulka 17 Přehled energie, cashflow a výsledků pro variantu s mikrostřídači s rozbitím panelů ..... - 57 -

Tabulka 18 Vyhoření FVE s mikrostřídači ..... - 57 -

Tabulka 19 Srovnání výsledků jednotlivých variant ..... - 59 -