



F3

**Fakulta elektrotechnická
Katedra měření**

Diplomová práce

Měření statických a dynamických provozních parametrů hybridního bateriového fotovoltaického měniče

Bc. Patrik Konjevič
Inteligentní budovy

Praha 2024
Vedoucí práce: Ing. Petr Wolf, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Konjević** Jméno: **Patrik** Osobní číslo: **492077**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Inteligentní budovy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Měření statických a dynamických provozních parametrů hybridního bateriového fotovoltaického měniče

Název diplomové práce anglicky:

Measurement of Static and Dynamic operation parameters of a hybrid battery photovoltaic inverter

Pokyny pro vypracování:

Proveďte rešerši současného stavu poznatků při testování provozních vlastností a charakteristik hybridních bateriových fotovoltaických měničů, a to jak pro ustálený stav, tak i přechodové děje (režimy).

Na experimentální sestavě v laboratoři změřte statické chování měniče:

- Konverzní účinnost a účinnost MPPT při toku energie z PV pole do AC sítě v závislosti na vstupním napětí a výkonu

- Konverzní účinnost při toku energie z PV pole do baterie a z baterie do AC sítě v závislosti na výkonu

Změřte dynamické chování měniče s ohledem na typické časy těchto dějů při změnách počasí (tj. výkon PV pole), a pro jednorázovou či periodickou změnu výkonu typických uživatelských spotřebičů.

Naměřená data použijte k vyhodnocení energetické bilance rodinného domu, kde bude instalován uvedený střídač, PV moduly, baterie a obvyklé spotřebiče. Zohledněte též stand-by spotřebu systému.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Bravo, R. and Robles, S.: Solar PV Inverter Test Procedures, Southern California Edison, 2013
- [2] Sedlačko J.: Testovací pracoviště pro hybridní a síťové střídače, Diplomová práce, VUT Brno 2018
- [3] Normy (zejm. ČSN EN 50530, ČSN EN 50524 ed. 2, ČSN 33 2000-7-712 ED.2)
- [4] Katalogové listy měřených výrobků

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Petr Wolf, Ph.D. UCEEB Kladno

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

Datum zadání diplomové práce: **09.02.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2024**

Platnost zadání diplomové práce:

do konce letního semestru 2024/2025

Ing. Petr Wolf, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování / Prohlášení

Chtěl bych v první řadě poděkovat vedoucímu této diplomové práce Ing. Petru Wolfovi, Ph.D. za vedení práce, poskytnutí potřebných materiálů a dohled při měřeních v UCEEB. Dále bych chtěl také vyjádřit poděkování Ing. Václavu Zelenkovi za cenné rady, ochotu a podnětné připomínky při konzultacích potřebných ke zpracování této práce. V neposlední řadě patří velké díky mé rodině a nejbližším za trpělivost a podporu během studia.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 24. května 2024

.....

Abstrakt / Abstract

Tato diplomová práce se zabývá měřením statických a dynamických provozních parametrů hybridního fotovoltaického měniče GW10K-ET PLUS+. V rámci testů při ustálených stavech byla ověřena euroúčinnost měniče, účinnost nabíjení a vybíjení baterie a také jeho samospotřeba v různých provozních režimech. Sledovaným dynamickým jevem, pozorovatelným za běžného provozu, byla změna ozářenosti, dále pak spínání asymetrické zátěže a výpadky sítě. Součástí práce je roční simulace provozu měniče s baterií a roční spotřebou 4000 kWh. Simulace byla provedena v hodinovém kroku a využívala naměřená data v ustálených stavech. Výsledky simulace posloužily k vyhodnocení energetické bilance domácnosti. Simulace ukázala, že v zimě převládá odběr nad dodávkou do sítě. Celková roční spotřeba je ze 75 % kryta vyrobenou PV energií, zbytek je nutné odebírat ze sítě. Vyrobená PV energie pokrývá v ročním souhrnu ze 42 % spotřebu, zatímco zbytek vyrobené PV energie připadá na dodávku do sítě a malá část na ztráty.

Klíčová slova: Fotovoltaika, měnič, hybridní bateriový měnič, účinnost, MPPT, testování vlastností měničů, testování dynamických jevů, testování ustálených stavů, asymetrie, simulace

This thesis deals with measurements of static and dynamic operating parameters of the hybrid photovoltaic inverter GW10K-ET PLUS+. Steady-state tests verified the inverter's euro-efficiency, battery charging and discharging efficiency, and self-consumption in different operating modes. The dynamic phenomena observed during the standard operation were the change in irradiance, asymmetrical load switching and grid failures. The work includes a yearly simulation of inverter operation with a battery and an annual consumption of 4000 kWh. The simulation was performed in hourly steps and used measured steady-state data. The simulation results were used to evaluate the energy balance of the household. The simulation showed that in winter, the consumption dominates over the supply to the grid. The total annual consumption is 75 % covered by the generated PV energy, while the rest has to be drawn from the grid. In the yearly total, the generated PV energy covers 42 % of the consumption, while the rest is for supply to the grid, and a small part is for losses.

Keywords: Photovoltaics, inverter, hybrid battery inverter, efficiency, MPPT, inverter performance testing, dynamic testing, steady state testing, asymmetry, simulation

Title translation: Measurement of static and dynamic operation parameters of a hybrid battery photovoltaic inverter

Obsah /

1 Úvod	1	5 Praktická část	24
2 Polovodičové měniče elektrické energie	2	5.1 Popis pracoviště	24
2.1 Usměrňovač	4	5.1.1 GoodWe GW10K-ET PLUS+	24
2.2 Stejnoseměrný měnič napětí	5	5.1.2 Solární simulátor TerraSAS	26
2.2.1 Snižovací DC/DC měnič	5	5.1.3 Baterie Dyness Tower T10	27
2.2.2 Zvyšovací DC/DC měnič	6	5.1.4 ZES Zimmer LMG670	28
2.3 Střídač	6	5.1.5 Programovatelná zátěž ZSAC1426 Standard	28
2.4 Střídavý měnič napětí	8	5.2 Metody	29
3 Typologie střídačů a měničů PV systémů	9	5.2.1 Euroúčinnost	30
3.1 Rozdělení	9	5.2.2 Účinnost konverze	31
3.2 Funkce hybridních měničů	10	5.2.3 Samospotřeba	32
3.3 Legislativa – měření elektrické energie v ČR	11	5.2.4 Změna ozářenosti	32
4 Testování vlastností měničů	13	5.2.5 Spínání asymetrické zátěže	34
4.1 Norma ČSN EN 50530	13	5.2.6 Výpadky sítě	35
4.1.1 Statická MPPT účinnost	13	5.3 Výsledky	35
4.1.2 Dynamická MPPT účinnost	15	5.3.1 Euroúčinnost	35
4.1.3 Konverzní účinnost	16	5.3.2 Účinnost konverze	38
4.2 Testy MPP trackeru	16	5.3.3 Samospotřeba	40
4.2.1 Napěťový rozsah	16	5.3.4 Změna ozářenosti	43
4.2.2 Proudový rozsah	17	5.3.5 Spínání asymetrické zátěže	46
4.2.3 Přesnost MPPT	17	5.3.6 Výpadky sítě	51
4.3 Přečiny do nebo z pohotovostního režimu	18	6 Vyhodnocení energetické bilance rodinného domu	54
4.3.1 Samospotřeba v pohotovostním režimu	18	6.1 Vstupní data simulace	54
4.3.2 Vstupní výkon spuštění střídače	19	6.2 PV moduly	54
4.3.3 Vstupní výkon vypnutí střídače	19	6.3 Spotřeba	55
4.4 Měniče pro přímý ohřev vody	19	6.4 Zhodnocení	56
4.5 Pravidla provozování distribuční soustavy (PPDS)	20	7 Závěr	59
4.5.1 Ochrany mikrozdvoje	20	Literatura	62
4.5.2 Normální provozní podmínky výroben v síti	20	A Seznam symbolů a zkratk	65
4.5.3 Zásady podpory sítě	21	B Seznam příložených souborů	67
4.5.4 Přizpůsobení činného a jalového výkonu	22		
4.5.5 Automatické opětovné připojení výroben	23		

Tabulky / Obrázky

4.1	Váhové faktory pro výpočet euroúčinnosti	14
4.2	Váhové faktory pro výpočet CEC účinnosti.....	15
4.3	Nastavení ochran mikrozdroje .	20
4.4	Provozní frekvenční rozsah výroben v NN	21
5.1	Nastavení kanálů ZES Zimmer LMG670	28
5.2	Nastavení VACH solárního simulátoru	30
5.3	Varianty měření asymetrické zátěže	34
5.4	Naměřené výkony a účinnosti pro PVS1	35
5.5	Naměřené výkony a účinnosti pro PVS2	36
5.6	Statické MPPT euroúčinnosti .	36
5.7	Konverzní euroúčinnosti	37
5.8	Celkové euroúčinnosti	37
5.9	Účinnosti ČSN EN 50530 B.2 .	44
5.10	Účinnosti <i>Heavy Clouds</i>	44
5.11	Účinnosti UCEEB.....	46
5.12	Asymetrie – časy a chování na síti (starý FW).....	50
5.13	Asymetrie – časy a chování na síti (nový FW)	51
5.14	Výpadky sítě – doba reakce a výpadku měniče	53
6.1	Parametry zvoleného PV modulu	55
2.1	Rozdělení měničů	2
2.2	Popis hodnot sinusového napětí	3
2.3	Diodový usměrňovač	4
2.4	Usměrněné sinusové napětí	4
2.5	Snižovací DC/DC měnič	5
2.6	Zvyšovací DC/DC měnič	6
2.7	Střídač	7
2.8	PWM spínání tranzistorů.....	7
2.9	Střídavý měnič napětí.....	8
2.10	Průběhy napětí u AC/AC měniče	8
3.1	Rozdělení měničů PV systémů ..	9
3.2	Fázové a součtové měření	11
4.1	Snižování power levelu	14
4.2	Profil ozáření podle ČSN EN 50530 B3	15
4.3	Podmínky pro zkoušku odezvy MPPT v ustáleném stavu .	17
4.4	Požadavky na dodávku/odběr jalového výkonu při U_n	21
4.5	Charakteristika funkce $Q(U)$..	22
5.1	Měřicí pracoviště ČVUT UCEEB.....	24
5.2	Výstřižek z aplikace SolarGo ..	25
5.3	Solární simulátor TerraSAS....	26
5.4	Výřez kopie obrazovky softwaru TerraSAS	27
5.5	Baterie Dyness Tower T10	27
5.6	ZES Zimmer LMG670	28
5.7	Programovatelná zátěž ZSAC1426	29
5.8	Schéma zapojení pro měření na hybridním měniči	29
5.9	Profil ČSN EN 50530 B.2.....	33
5.10	Profil <i>Heavy Clouds</i>	33
5.11	Profil UCEEB	34
5.12	Konverzní účinnost při měření euroúčinnosti	37
5.13	Konverzní účinnost z baterie do zátěže.....	38
5.14	Konverzní účinnost ze solárního simulátoru do baterie.....	39
5.15	Výkony samospotřeby – vypnutý Back-up.....	40

5.16	Kumulovaná energie samospotřeby – vypnutý Back-up...	41
5.17	Výkony samospotřeby – zapnutý Back-up, připojená síť ..	41
5.18	Kumulovaná energie samospotřeby – zapnutý Back-up, připojená síť	42
5.19	Výkony samospotřeby – zapnutý Back-up, odpojená síť...	42
5.20	Kumulovaná energie samospotřeby – zapnutý Back-up, odpojená síť	43
5.21	Profil ČSN EN 50530 B.2 – účinnosti	44
5.22	Profil <i>Heavy Clouds</i> – kumulovaná energie	45
5.23	Profil <i>UCEEB</i> – kumulovaná energie	45
5.24	Sepnutí zátěže – V1, starý FW	46
5.25	Vypnutí zátěže – V1, nový FW	47
5.26	Vypnutí zátěže – V2, starý FW	48
5.27	Sepnutí zátěže – V3, nový FW	49
5.28	Výpadek sítě při běhu z baterie	52
5.29	Výpadek sítě při běhu ze sítě ..	52
6.1	Průměrný denní diagram zatížení.....	55
6.2	Krytí spotřeby.....	56
6.3	Užití vyrobené PV energie.....	56
6.4	Interakce se sítí.....	57
6.5	Ztráty energií v systému	57
6.6	Roční bilance simulace	58

Kapitola 1

Úvod

V souvislosti s neustále rostoucí potřebou udržitelných a ekologických energetických řešení zaujímá oblast obnovitelných zdrojů energie (OZE) důležitou pozici ve světě energetiky. Fotovoltaika je v tomto ohledu jednou z nejvíce perspektivních technologií, která přeměňuje dopadající sluneční záření na elektrickou energii. Fotovoltaické (PV) moduly však při dopadajícím slunečním záření generují stejnosměrnou energii. Již v 19. století soupeřil Edison proti Teslovi a Westinghouseovi o to, jestli bude distribuce a rozvod elektrické energie řešen stejnosměrným, či střídavým proudem. Střídavý proud zvítězil z důvodu snadnější transformace napětí, což je důvod, proč je nutné řešit transformaci stejnosměrné energie vyrobené PV moduly na střídavou. Snížení ztrát na dálkovém vedení se zajistí zvýšením napětí, které lze následně snížit pro bezpečnou spotřebu.

K přeměně parametrů elektrické energie se používají zařízení, kterým se říká měniče. Konkrétně pro přeměnu stejnosměrné energie vyrobené PV moduly na střídavou energii se používají střídače. Kromě této přeměny energie plní měniče řadu dalších funkcí, které budou detailně v této práci popsány. Vzhledem ke své komplexnosti vyžadují měniče důkladné testování jejich vlastností a parametrů. Pro nedostatek testovacích standardů si většina výrobců měničů provádí své vlastní interní testy, které se mohou mezi jednotlivými výrobci lišit. Testování umožňuje ověřit spolehlivost měničů v různých provozních podmínkách a zároveň poskytuje možnost posoudit jejich účinnost při přeměně solární energie na elektrickou energii.

Cílem této diplomové práce je ověřit jak statické, tak dynamické chování hybridního měniče společnosti GoodWe typu GW10K-ET PLUS+. V ustálených stavech budou zjištěny účinnosti při různých směrech toku energie měničem a rovněž bude změřena jeho samospotřeba v jednotlivých provozních režimech. V rámci dynamických testů bude prozkoumáno chování měniče při přechodových dějích. Vybrané přechodové děje zahrnují změnu ozáření definovanou specifickými profily ozáření, spínání asymetrické zátěže při různých nastaveních měniče a výpadek elektrické sítě se zapnutým, či vypnutým zálohovaným výstupem.

Na základě naměřených hodnot účinností a samospotřeby v ustálených stavech, spolu se zaznamenanými daty teploty a ozáření, bude odsimulován roční provoz PV elektrárny vybavené testovaným hybridním měničem, měřenou baterií a vybranými PV moduly. Simulace bude provedena s hodinovým časovým krokem, což umožní poměrně detailně analyzovat výkon elektrárny v průběhu celého roku. Výsledky simulace poskytnou ucelený pohled na energetickou bilanci testovaného hybridního měniče v reálných podmínkách.

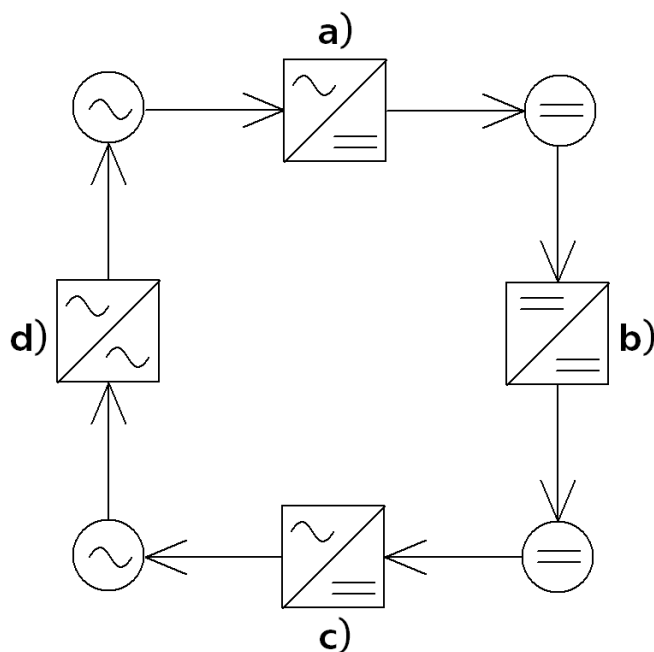
Kapitola 2

Polovodičové měniče elektrické energie

Měníče elektrické energie jsou velice důležité přístroje, které slouží k přeměně parametrů elektrické energie. V historii se pro změnu parametrů používaly převážně rotační elektromechanické stroje, pouze na nižší výkony se využívalo polovodičových součástek. Vzhledem k významnému technologickému pokroku během 20. století v oblasti polovodičové techniky se dnes u měničů využívají převážně výkonové polovodičové součástky jako jsou diody, tyristory a tranzistory (zejména IGBT – insulated-gate bipolar transistor). Využití najdou měniče elektrické energie v mnoha různých aplikacích a to nejen v energetice a průmyslu, ale také v domácnosti nebo v dopravě a především v oblasti fotovoltaiky, což je hlavní důvod, proč jsou v této práci zmiňovány [1]. Podle charakteru vstupní a výstupní energie tohoto zařízení lze měniče napětí rozdělit na:

- usměrňovače,
- stejnosměrné měniče napětí,
- střídače,
- střídavé měniče napětí.

Na obrázku 2.1 je schématicky znázorněno, jakým způsobem dochází k přeměně parametrů elektrické energie u jednotlivých zařízeních. Vlnovka symbolizuje střídavé (AC) veličiny (napětí, proud, výkon) a dvě rovnoběžné čáry představují stejnosměrné (DC) veličiny elektrické energie. Kolečka jsou formy energie na začátku nebo konci přeměny a ve čtvercích jsou vždy jednotlivá zařízení.

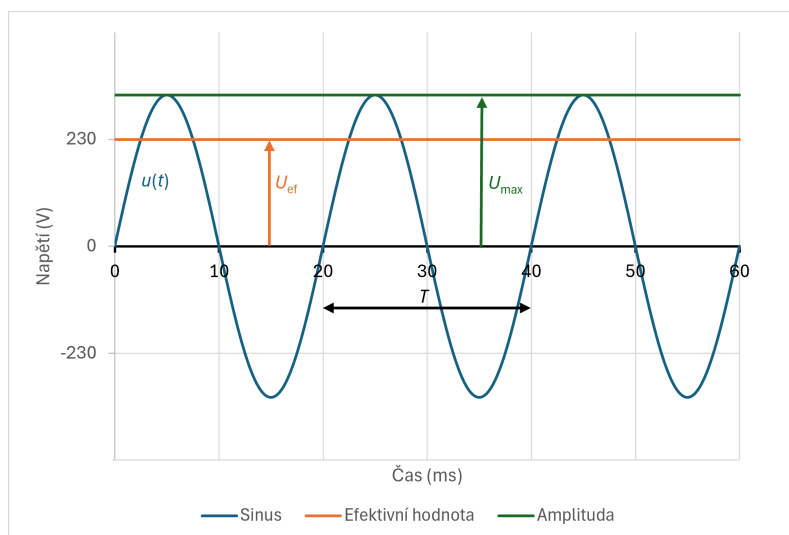


Obrázek 2.1. Rozdělení polovodičových měničů napětí. a) usměrňovač, b) stejnosměrný měnič napětí, c) střídač, d) střídavý měnič napětí.

Na obrázku 2.2 je uveden střídavý průběh napětí $u(t)$. Střídavé veličiny mají periodu T , což je doba, během které dojde k opakování periodického děje a rovná se převrácené hodnotě frekvence. Dále je na obrázku vidět amplituda napětí U_{\max} , která je maximální hodnotou periodicky opakujícího se děje. Poslední vyznačená veličina je efektivní hodnota napětí U_{ef} , která svou velikostí odpovídá hodnotě DC napětí, která by při připojení odporové zátěže dávala stejný průměrný výkon. Když se mluví o AC veličinách, myslí se vždy jejich efektivní hodnota, pokud to není blíže specifikováno. Pro výpočet efektivní hodnoty napětí se vychází z definičního vztahu:

$$U_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}, \quad (1)$$

kde: U_{ef} – efektivní hodnota napětí (V),
 T – perioda (s),
 $u(t)$ – okamžitá hodnota napětí (V),
 dt – diferenciál času (s).



Obrázek 2.2. Popis hodnot střídavého sinusového napětí.

Střední hodnota periodického děje je DC složkou tohoto signálu. Pro výpočet střední hodnoty napětí se vychází z definičního vztahu:

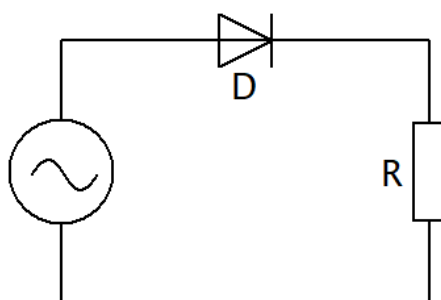
$$U_{\text{stř}} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt, \quad (2)$$

kde: $U_{\text{stř}}$ – střední hodnota napětí (V).

Z definice je patrné, že pokud je plocha signálu nad časovou osou shodná s plochou signálu pod časovou osou, je střední hodnota rovna nule. Typickým příkladem toho je sinusový průběh.

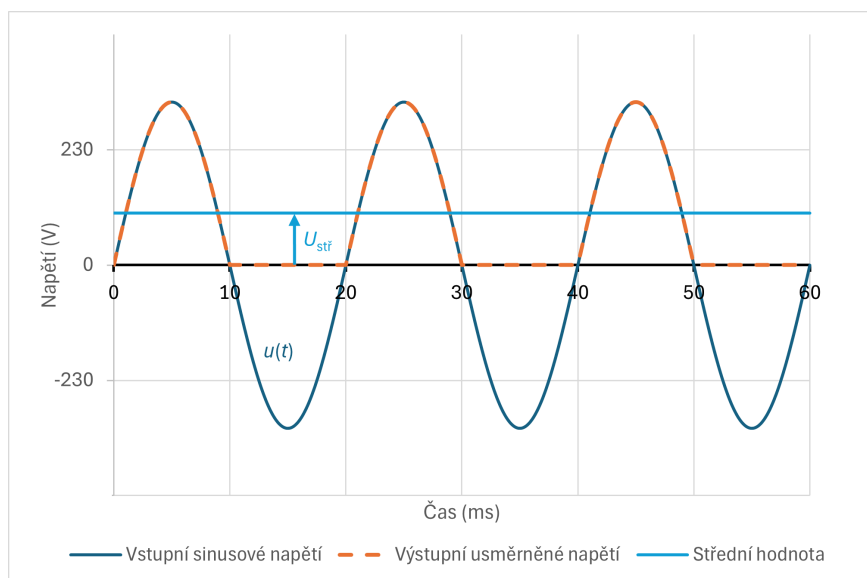
2.1 Usměrňovač

Jak už napovídá název, usměrňovače slouží k usměrnění střídavé energie vstupující do zařízení na stejnosměrnou energii na výstupních svorkách. Existují nejrůznější možná dělení, například podle typu použitých polovodičových součástek, podle počtu fází, podle způsobu zapojení na vstupu (můstkové nebo uzlové), nebo podle počtu pulzů v jedné výstupní periodě. Pravděpodobně nejjednodušším usměrňovačem je dioda, jejíž zapojení k zátěži je patrné na obrázku 2.3. Pokud by se měl tento usměrňovač zařadit dle výše uvedeného rozdělení, jednalo by se o neřízený, jednofázový, jednopulzní usměrňovač.



Obrázek 2.3. Zapojení diody jako usměrňovače střídavého napětí. D – dioda, R – zátěž.

Vstupní napětí diody je sinusové a na výstup se skrze diodu dostane pouze kladná půlvlna každé periody, jelikož dioda neumožňuje tok proudu v závěrném směru. Takovéto výstupní napětí má již oproti klasickému sinusovému průběhu na vstupu nenulovou střední hodnotu (viz obrázek 2.3).



Obrázek 2.4. Usměrněné sinusové napětí pomocí diodového usměrňovače.

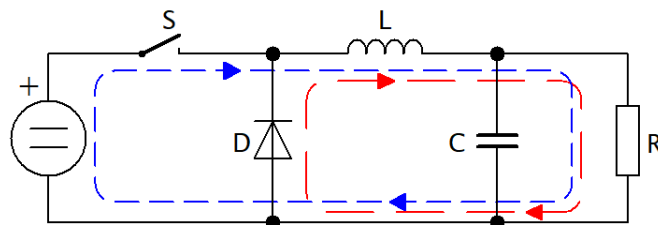
Usměrňovače naleznou své využití například v napájecích soustavách elektrických trakčních vozidel, ve válcovnách, u důlních strojů nebo při provozech spojených s elektrolýzou.

2.2 Stejnoseměrný měnič napětí

Stejnoseměrné měniče napětí neboli DC/DC měniče existují ve více provedeních, v této práci bude však popsán pouze snižovací (Buck) a zvyšovací (Boost) měnič, jejichž kombinace je často využívána právě ve fotovoltaice [2], konkrétně u MPPT (Maximum power point tracking), o čemž více pojednává další kapitola. Kromě těchto přímých DC/DC měničů existují i nepřímé, které jsou tvořeny střídačem, střídavým meziobvodem a nakonec řízeným usměrňovačem.

2.2.1 Snižovací DC/DC měnič

Snižovací DC/DC měnič má vstupní stejnosměrné napětí vyšší, než je střední hodnota napětí na výstupu. Schéma tohoto měniče lze vidět na obrázku 2.5. Buck měnič dokáže pracovat ve dvou režimech, přičemž první z nich je při sepnutém spínači, druhý pak při rozepnutém spínači. Spínačem bývá nejčastěji IGBT nebo MOSFET (Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) tranzistor.



Obrázek 2.5. Snižovací DC/DC měnič napětí. Modrá uzavřená proudová smyčka je pro sepnutý spínač, červená pro rozepnutý spínač. C – kondenzátor, D – dioda, L – cívka, R – zátěž, S – spínač.

Při sepnutém spínači teče proud z DC zdroje do zátěže přes cívku, ve které se ukládá energie do magnetického pole. Proud cívku se tedy zvyšuje a současně postupně roste napětí na kondenzátoru a zátěži až k hodnotě napětí zdroje. Na diodě je přiloženo napětí v závěrném směru, tudíž dioda nedovoluje tok proudu. Tento režim je na obrázku 2.5 zobrazen pomocí modré uzavřené proudové smyčky.

Rozepnutím spínače dojde k odpojení DC zdroje. Nabitá cívka se brání změně, zachová si směr proudu a stává se zdrojem uzavřeného obvodu, ve kterém se proud uzavírá z cívky skrz zátěž a diodu, která je v tomto okamžiku ve směru propustném. K proudu cívky se přidá proud z vybíjeného kondenzátoru a postupně klesá napětí na zátěži. Tento režim je na obrázku 2.5 zobrazen pomocí červené uzavřené proudové smyčky.

Tyto měniče se často využívají například jako regulátory nabíjení akumulátorů, pro systémy automobilového průmyslu a další. Pro výpočet střední hodnoty výstupního napětí se vychází ze vztahu, ve kterém je rozhodující velikost vstupního napětí a poměr doby sepnutí spínače k jeho spínací periodě (duty cycle) [1].

$$U_{\text{out}} = U_{\text{in}} \frac{t_{\text{on}}}{t_{\text{on}} + t_{\text{off}}} = U_{\text{in}} D, \quad (3)$$

kde: U_{out} – výstupní napětí (V),

U_{in} – vstupní napětí (V),

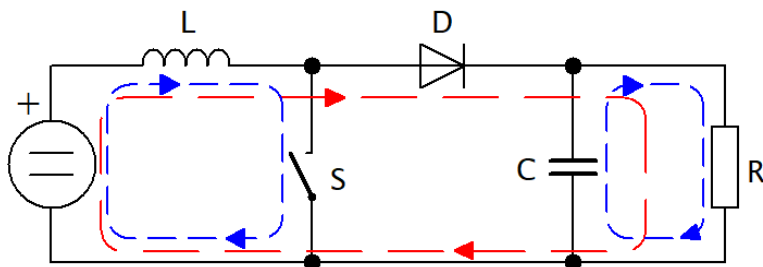
t_{on} – doba sepnutí spínače během periody (s),

t_{off} – doba rozepnutí spínače během periody (s),

D – duty cycle (-).

2.2.2 Zvyšovací DC/DC měnič

U zvyšovacího DC/DC měniče je naopak vstupní stejnosměrné napětí nižší, než je střední hodnota napětí na výstupu. Základní princip činnosti se opět odvíjí od dvou režimů, které jsou dány stavem sepnutí spínače. Schéma tohoto měniče lze vidět na obrázku 2.6, přičemž spínačem může být jako v předchozím případě MOSFET nebo IGBT tranzistor.



Obrázek 2.6. Zvyšovací DC/DC měnič napětí. Modré uzavřené proudové smyčky jsou pro sepnutý spínač, červená pro rozepnutý spínač. C – kondenzátor, D – dioda, L – cívka, R – zátěž, S – spínač.

Pokud se sepne spínač, je veškeré vstupní napětí přivedeno na cívku, což na ní vyvolá nárůst proudu a ukládání energie (chová se jako spotřebič). Dioda je v tento okamžik v závěrném směru, a tak nevede žádný proud. Další uzavřená část obvodu je v pravé části obrázku 2.6 vyznačena modře a dochází tam k vybíjení energie uložené v kondenzátoru do zátěže.

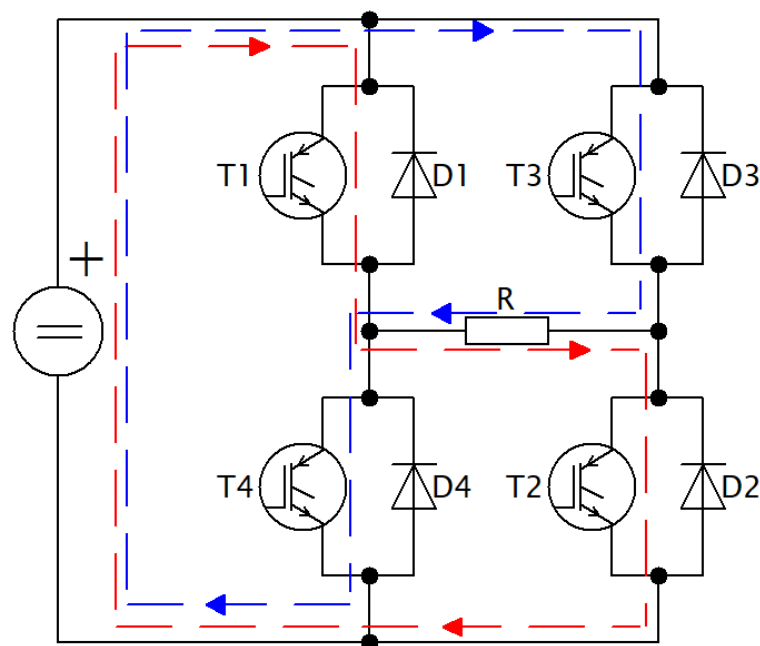
Při rozepnutí spínače si cívka zachová směr proudu, takže proud teče z DC zdroje do zátěže přes diodu a cívku. Napětí na cívce však změní oproti předchozímu režimu polaritu, protože se cívka začne vybíjet. Jelikož je v této fázi napětí cívky v sérii s napětím DC zdroje, tak se napětí sčítají a na jeho výslednou hodnotu se postupně nabíjí kondenzátor (tedy na hodnotu vyšší než je napětí zdroje). Tento režim je na obrázku 2.6 zobrazen pomocí červené uzavřené proudové smyčky.

Pro výstupní napětí platí vztah uvedený níže a je z něj patrné, že je opět přímo úměrné velikosti vstupního napětí. Čím větší však bude duty cycle, tím větší napětí bude na výstupu [1].

$$U_{\text{out}} = \frac{U_{\text{in}}}{1 - \frac{t_{\text{on}}}{t_{\text{on}} + t_{\text{off}}}} = \frac{U_{\text{in}}}{1 - D}, \quad (4)$$

2.3 Střídač

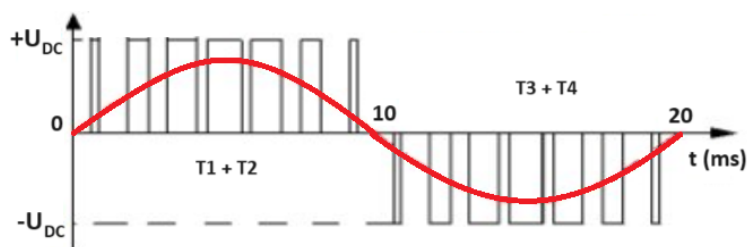
Střídač je ve fotovoltaice nejdůležitějším měničem, jelikož právě toto zařízení dokáže vyrobenou stejnosměrnou energii z PV modulů transformovat na střídavou, která se dále spotřebovává nebo posílá do sítě. Základní dělení napěťových střídačů je podle počtu fází, přičemž nejsnazší variantou je jednofázové provedení, které je ve svém můstkovém zapojení zobrazeno na obrázku 2.7.



Obrázek 2.7. Napěťový střídač. Červená uzavřená proudová smyčka je pro sepnuté T1 a T2, modrá pro sepnuté T3 a T4. T – IGBT, D – dioda, R – zátěž.

Stejnoseměrné napětí na vstupu se přivádí na zátěž spínáním vhodné kombinace IGBT tranzistorů. Červená uzavřená proudová smyčka ukazuje stav, kdy jsou současně sepnuté tranzistory T1 a T2, modrá smyčka pak pro sepnuté T3 a T4. Pokud by se tyto dva stavy střídaly každých 10 ms a zátěž by byla čistě odporová, dostal by se na výstup střídavý obdélkový průběh napětí s frekvencí 50 Hz. V běžné síti se používá sinusové napětí, a proto se spínání nerealizuje tímto způsobem, nýbrž pomocí PWM (Pulse-width modulation). Antiparalelně zapojené diody D1 až D4 slouží ke komutaci proudu v případě, obsahuje-li zátěž induktivní složku.

Způsob spínání pomocí PWM funguje na principu generování pravidelných impulsů o různé střídě (duty cycle). Během prvních 10 ms dochází k současnému spínání tranzistorů T1 a T2, přičemž každé sepnutí trvá takovou dobu, která je vhodná pro přenos sinusového signálu. V další půlperiodě se pak analogicky spínají T3 a T4, které přivádí napětí zdroje na zátěž v opačné polaritě. Takto modulovaný signál lze pozorovat na obrázku 2.8. Pokud by zátěž nebyla čistě odporová (ale měla induktivní složku) průběh proudu by byl sinusový. Pro čistě odporovou zátěž by proud kopíroval průběh napětí.

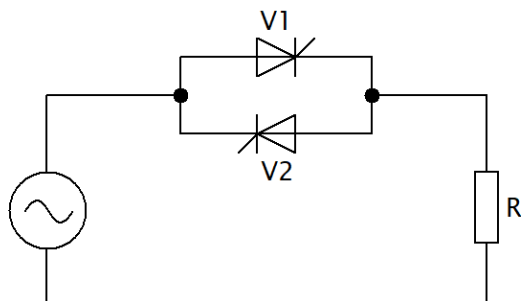


Obrázek 2.8. PWM signál pro spínání IGBT tranzistorů T1 až T4 pro modulaci sinusové vlny [2] (upraveno).

Kromě využití ve fotovoltaice najdou střídače své uplatnění třeba v elektromobilech nebo UPS (Uninterruptible power source) [1].

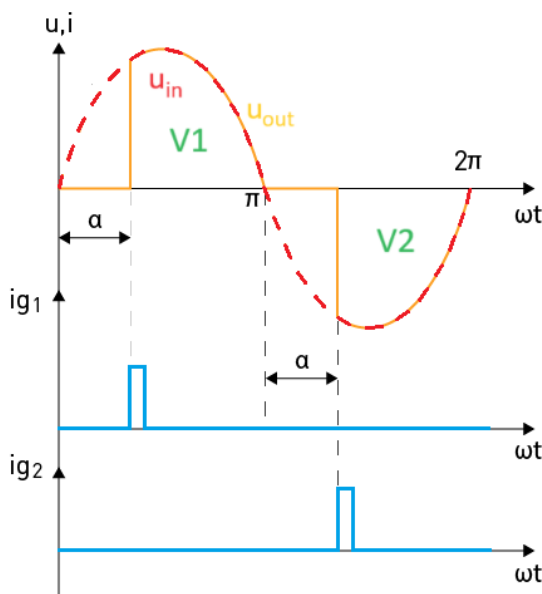
2.4 Střídavý měnič napětí

Úkolem střídavých měničů napětí (AC/AC měničů) je změnit efektivní hodnotu napětí na výstupu při zachování frekvence. Nejsnazší způsob, jak tohoto docílit, je pomocí dvou antiparalelně zapojených tyristorů (viz obrázek 2.9) nebo triakem.



Obrázek 2.9. Střídavý měnič napětí s antiparalelně zapojenými tyristory V1, V2. R – zátěž.

Střídavý měnič napětí funguje ve třech stavech. Buď vede pouze tyristor V1, nebo V2, nebo ani jeden. Do řídicí elektrody (Gate) tyristoru se pro sepnutí přivádí proudový impuls. V závislosti na řídicím úhlu α , o který se opozdí otevření tyristoru od začátku každé půlperiody, se „oseká“ vstupní střídavé napětí a vznikne průběh, který je na obrázku 2.10 znázorněn žlutou barvou. Je patrné, že čím větší bude řídicí úhel α , tím menší bude efektivní hodnota napětí na výstupu. Opět je pro jednoduchost uveden průběh pro čistě odporovou zátěž.



Obrázek 2.10. Průběhy napětí u AC/AC měniče. Červený průběh je pro vstupní napětí, žlutý pro výstupní napětí, modře jsou vyznačeny proudové impulsy pro tyristory V1 a V2 [1] (upraveno).

Podobnou funkci jako střídavé měniče napětí zajišťují také transformátory. Transformace napětí se však v tomto případě nerealizuje díky výkonovým polovodičovým součástkám, nýbrž elektromagnetickou indukcí mezi primárním a sekundárním vinutím transformátoru.

Kapitola 3

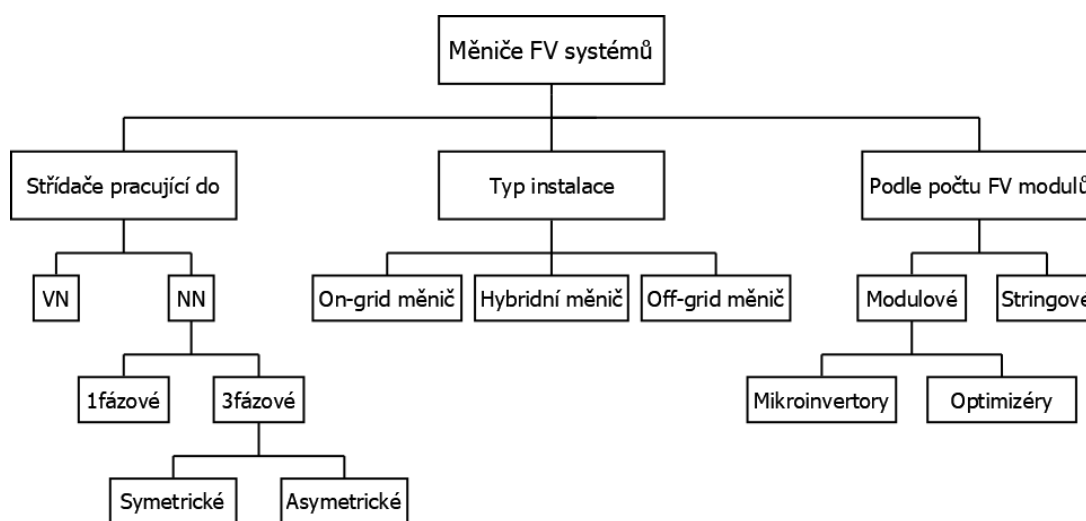
Typologie střídačů a měničů PV systémů

Existuje široká škála měničů, které se liší nejen velikostí výkonu, který jsou schopny přeměnit. Tato kapitola uvádí rozdělení jednotlivých měničů PV systémů, se kterými se lze v případě PV instalací v praxi setkat.

Důležitý je u těchto měničů MPP (Maximum power point) tracker, který je na vstupu do měniče a zajišťuje, že PV moduly zapojené do měniče mají optimální elektrické parametry (napětí a proud), aby byl z PV modulu odbírán největší možný výkon. Bod maximálního výkonu v závislosti na provozních podmínkách (intenzitě dopadajícího slunečního záření, stínění, teplotě) značně kolísá, což by při absenci MPP trackeru snižovalo energetický výnos.

3.1 Rozdělení

Střídače a obecně měniče pro PV systémy lze dělit dle celé řady kritérií. Možné rozdělení těchto měničů je uvedeno v diagramu na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1. Rozdělení měničů PV systémů.

Střídač je tedy zařízení, které pouze přeměňuje stejnosměrnou energii z PV modulů na střídavou. Střídače mohou buďto pracovat do hladiny nízkého napětí (NN) nebo vysokého napětí (VN). Střídače pracující do hladiny VN se řeší tak, že mají buď centrální střídač, před kterým jsou jednotlivé stringy (do série propojené PV moduly) spojené paralelně v DC slučovači, nebo více decentrálních střídačů.

U hladiny NN se lze setkat s jednofázovým i třífázovým řešením, avšak častější je třífázové, jelikož ty se využívají pro elektrárny s vyšším instalovaným výkonem (již od nějakých 3 kW). U třífázových je pak především důležité dělení na symetrické a asymetrické typy (více o asymetrii bude ještě dále).

V případě dělení podle typu instalace je on-grid (též síťové) řešení takové, které své přebytky vyrobené energie posílá do distribuční sítě (nepotřebují tedy žádné akumulční zařízení). Je důležité, aby byl střídač se sítí nafázovaný a aby byly síťové parametry jako velikost napětí a frekvence v mezích stanovených v příloze 4 Pravidel provozování distribučních soustav [3]. Off-grid měniče (též ostrovní nebo autonomní) ke svému provozu vůbec nepotřebují síť a veškeré přebytky naopak ukládají do baterie. Tím, že off-grid měniče nemají k dispozici síť, musí být schopny samy vytvářet střídavou energii o vhodných napěťových a frekvenčních parametrech. Kombinací těchto dvou řešení je hybridní měnič, což je zařízení, které dokáže elektrickou energii jak odebírat, tak dodávat do distribuční sítě a také baterie. V případě výpadku elektřiny mají také některé měniče možnost zálohy [4].

Poslední uvedené rozdělení je v závislosti na počtu připojených PV modulů. Stringový měnič má na vstupu jeden či více stringů. Výhodou těchto měničů je jejich jednoduchost a nízká cena vztažená na výkon. Nevýhodou je pak to, že MPP tracker optimalizuje výrobu celého stringu, který má proud daný nejslabším modulem v sérii nebo dochází k deformaci voltampérové charakteristiky (VACH). Přesně tento problém řeší právě další typ měničů, které se označují jako modulové měniče, které jsou připojeny typicky k jednomu PV modulu (maximálně dvěma PV modulům). Takovéto měniče byly ještě dále rozděleny na mikroinvertory a optimizéry.

Mikroinvertory jsou střídače, mění tedy stejnosměrnou energii na střídavou. Jak výkonově (cca 500 W), tak rozměrově se jedná o menší zařízení, a každý takovýto střídač je většinou přímo připojen ke svému PV modulu, čímž je umožněna optimalizace výroby elektrické energie celé elektrárny. Hlavní výhodou těchto střídačů je tedy fakt, že každý PV modul má svůj MPP tracker a ostatní moduly se vzájemně nijak neomezují. Pokud má PV elektrárna více modulů, tak se jejich propojení logicky provádí až na střídavé straně. Časté použití těchto měničů je také u tzv. balkónové fotovoltaiky [4].

Power optimizér není střídač, ale DC/DC měnič. Opět se umísťuje jeden pro každý PV modul, ale někteří výrobci umožňují připojení power optimizéru pouze k určitým (zastíněným) PV modulům. Pokud je ve stringu zastíněna jenom část jednoho PV modulu, ovlivní to proud celého stringu a zbytečně by byla omezena výroba. Power optimizér funguje v podstatě jako by-pass, kdy umožní ostatním PV modulům vyrábět maximální možné množství energie, zatímco zastíněný PV modul vyrábí energii úměrnou svému zastínění. Přebytek proudu ze stringu, převezme power optimizér by-passem, a není tak omezen výkon dalších PV modulů ve stringu. Power optimizéry v sobě mají také MPP trackery, takže umožňují každému PV modulu osazenému power optimizérem maximalizovat výkon. Další výhodou power optimizérů je, že umožňují monitoring na úrovni PV modulů.

3.2 Funkce hybridních měničů

Výroba elektrické energie z OZE výrazně kolísá a zřídka odpovídá aktuální spotřebě domácnosti. Pro překonání rozdílů mezi elektřinou vyrobenou během dne a tou, která je potřebná večer, v noci a ráno, kdy není výroba elektřiny prakticky žádná, je nezbytné krátkodobě skladovat energii pro následné využití. Hybridní měniče, které jsou předmětem této práce, umožňují optimalizovat nerovnováhu mezi nestabilní výrobou elektřiny a její spotřebou. Kromě PV modulů pracují s dalším zdrojem energie, kterým bývá zpravidla baterie, kde na základě komunikace vyhodnocuje, jestli je potřeba energii do baterie dodávat nebo ji z ní čerpat. Takový měnič tedy propojuje jednotlivé části PV systému – PV moduly, bateriové uložení, zátěž a distribuční síť. Dále pak zajišťuje

veškeré přeměny energie, umožňuje řízení toku výkonu na základě vnitřního algoritmu měniče a provozního stavu. Současně umožňuje monitoring s připojením k internetu a výrobci měničů nabízí svým zákazníkům zdarma portály, ze kterých si lze snadno přehledně výrobu elektrické energie, a porozumí jim i kdejaký laik.

Na výstupu z měniče je střídavá energie posílána do domácnosti. Současně je měnič napojen i na síť, do které se posílá vyrobená elektrická energie v případě přebytků, kdy jsou veškeré odběry z domácnosti pokryty výrobou fotovoltaiky a baterie je současně plně nabita. Naopak v případě potřeby může měnič ze sítě odebírat energii když není dostatečná výroba pro pokrytí spotřeby, nebo pro nabíjení baterie. Většinou měnič umožňuje také zálohu v případě přerušení dodávky elektrické energie ze sítě, která však zpravidla nemá dostatečný výkon na pokrytí chodu celého domu. Zálohuje se tedy pouze vybraný elektrický okruh a zvolené spotřebiče.

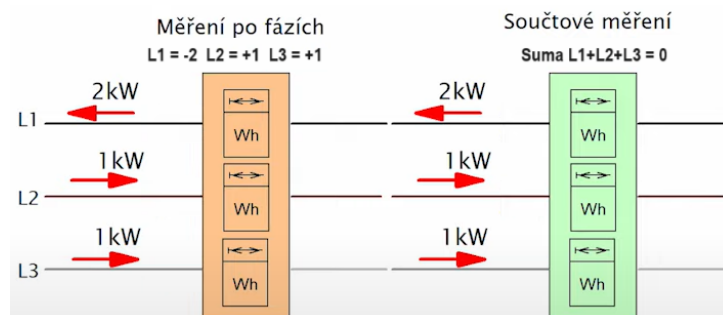
V nastavení měničů lze zvolit, s jakou prioritou se má vyrobená elektřina kam posílat. Také existuje možnost režimu zálohování, kdy je baterie prioritně dobíjena na maximální hodnotu i ze sítě, právě pro případ náhlého přerušení dodávky elektrické energie. Některé hybridní měniče také v nastavení umožňují zapnout, či vypnout asymetrii, což je velmi podstatná vlastnost pro provozovatele v ČR (viz sekce 3.3 Legislativa – měření elektrické energie v ČR). Další velice důležité nastavení je volba parametrů síťového kodexu RfG dle předdefinovaných národních norem [5].

3.3 Legislativa – měření elektrické energie v ČR

Česká republika je v podstatě jedinou zemí Evropy, kde se měří elektrická energie po fázích a ne součtově. V minulosti bylo i v Česku součtové měření, které se používá téměř všude jinde ve světě. Ke změně na fázové měření elektrické energie ministerstvo přistoupilo v roce 2011 s cílem zastavení někdejšího solárního boomu [6–7].

Nejprve je nutné zadefinovat si tzv. „prosumera“, což je subjekt, který vlastní PV elektrárnu, která mu vyrábí elektrickou energii, a zároveň své přebytky posílá do sítě. Jak již bylo výše vysvětleno, v ČR se měří elektrická energie po fázích a ne součtově. Součtové měření funguje tak, že elektroměr provádí v předdefinovaném časovém taktu součet toku energie ve všech třech fázích. Odběratel pak zaplatí nebo dostane odměnu podle toho, jestli v součtu odebírá energii z distribuční sítě nebo energii do sítě dodává.

Fázové měření se oproti součtovému liší v tom, že každá fáze se vyhodnocuje zvlášť. V praxi je problém ten, že většinou není spotřeba domu symetrická a na jedné fázi může být odběr větší než na zbylých dvou. To může znamenat, že když prosumer vyrábí elektrickou energii, tak má na jedné fázi odběr, zatímco na zbylých dvou třeba přetok do sítě. Rozdíl mezi fázovým a součtovým měřením spotřeby elektrické energie lze pozorovat na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2. Rozdíl mezi fázovým a součtovým měřením spotřeby elektrické energie [8] (upraveno).

Hlavním problémem u prosumera je, že jednotková cena za prodej vyrobené energie je výrazně nižší než jednotková cena za nákup. Koncem roku 2023 poslanecká sněmovna schválila novelu energetického zákona č. 458/2000 Sb., zvanou LEX OZE II. V té se mimo jiné píše o možnosti sdílení elektřiny, nicméně s distribučními poplatky po fázích. To také znamená, že zákazníci si budou moct z hlediska ekonomiky systému vybírat z širšího spektra nabízených technologií střídačů a nebudou se nutně muset omezovat pouze na měniče, které podporují asymetrický výstup (v ČR nejčastěji měniče firem GoodWe, Solax, Wattsonic nebo Growatt).

Kapitola 4

Testování vlastností měničů

Měniče představují komplexní zařízení, na která jsou kladena vysoká očekávání. Výrobci PV měničů obvykle nabízejí desetileté záruky na své výrobky, na rozdíl od PV modulů, které mají většinou záruku po dobu 25 let. Proto se každý majitel PV systému pravděpodobně v budoucnu bude muset vypořádat s problémy nesouladu záruk. Většina výrobců měničů provádí své vlastní interní testy, které se výrazně liší mezi jednotlivými výrobci. Vzhledem k nedostatku vyhovujících standardů nebo spolehlivých testovacích dat je běžné, že kupující PV měničů spoléhají při rozhodování o nákupu spíše na značky, datové listy a záruky než na nezávislá testovací data [9].

Testování umožňuje ověřit, zda měniče pracují spolehlivě v různých provozních podmínkách a současně dává možnost posoudit efektivitu měničů při přeměně solární energie na elektrickou energii. V této kapitole bude uvedena rešerše některých testů vlastností měničů.

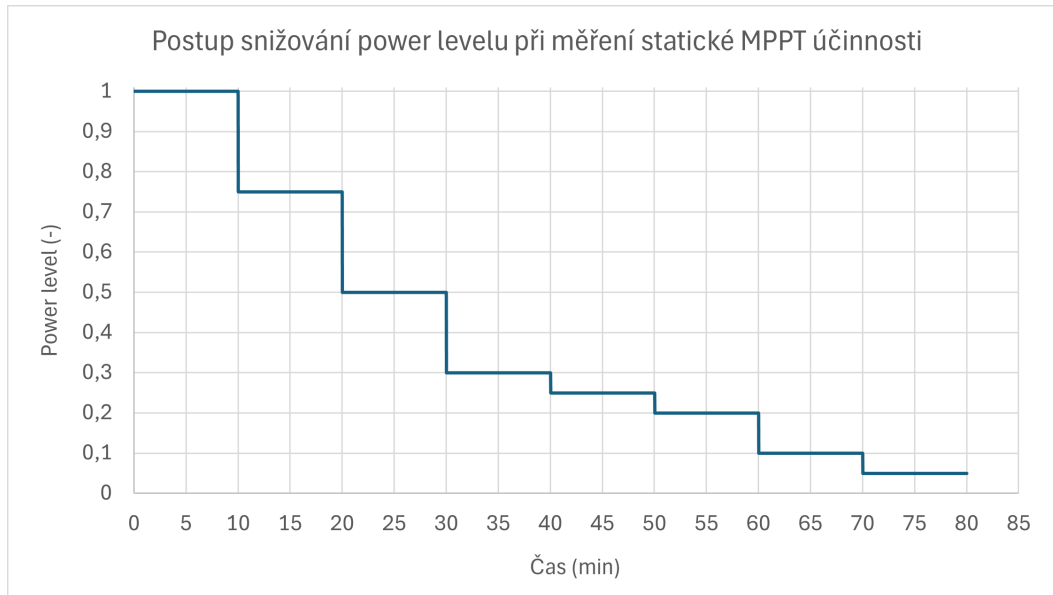
4.1 Norma ČSN EN 50530

Norma ČSN EN 50530, o celkové účinnosti PV invertorů spojených s elektrorozvodnou sítí, pojednává o postupech pro měření účinnosti MPPT, které se používají ve PV systémech připojených k síti [10]. Účinnost MPPT je v normě uvažována jak statická, tak dynamická. V normě je také uveden postup pro měření účinnosti při konverzi energie ze stejnosměrné na střídavou. Pro testování PV měniče je na jeho vstup připojen solární simulátor a výstup je napojen na síť o standardních místních napěťových a frekvenčních parametrech.

4.1.1 Statická MPPT účinnost

Statická účinnost MPPT popisuje schopnost regulace měniče na bod maximálního výkonu při dané statické VACH solárního simulátoru. V praxi se tedy jedná se o účinnost MPPT při stabilních podmínkách, kterými jsou teplota a ozáření. V solárním simulátoru se nastaví různé VACH podle požadavků normy, které závisí na napěťovém rozsahu MPPT testovaného měniče.

Po uvedení testovaného zařízení do provozu je třeba nejprve počkat na stabilizaci MPP trackeru. Jakmile dojde ke stabilizaci MPP trackeru, lze začít s měřením, přičemž je třeba zaznamenávat hodnoty napětí a proudu (potažmo výkonu) teoreticky generovaného solárním simulátorem a odebíraného testovaným měničem. Po více než 10 minutách se skokově sníží výkon ze solárního simulátoru ze 100 % na 75 % a opět se nechá alespoň 10 minut zaznamenávat na této hodnotě. Analogicky se výkon snižuje dále na 50 %, 30 %, 25 %, 20 %, 10 % a 5 % z původní nastavené VACH. Daná úroveň výkonu se označuje jako power level a většinou se udává spíše desetinným číslem než v procentech (tedy například power level 0,5 odpovídá 50% výkonu). Popsané snižování power levelu je pro názornost zobrazeno na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1. Snižování power levelu po 10 minutách.

Délka intervalu mezi jednotlivými power levely se volí tak, aby byl omezen vliv dynamiky systému a umožnilo se ustálení MPP trackeru. Je však nutné, aby po ustálení dynamického děje trvalo zaznamenávání na daném power levelu alespoň 10 minut. Pro každý 10minutový interval lze pak z naměřených hodnot spočítat dílčí statickou účinnost MPPT podle vztahu:

$$\eta_{\text{MPPT,stat}} = \frac{\sum U_{\text{DC},i} I_{\text{DC},i} \Delta T}{P_{\text{MPP,PVS}} T_{\text{int}}}, \quad (1)$$

kde: $\eta_{\text{MPPT,stat}}$ – statická účinnost MPPT (-),

$U_{\text{DC},i}$ – i -tá hodnota vstupního napětí měniče (V),

$I_{\text{DC},i}$ – i -tá hodnota vstupního proudu měniče (A),

ΔT – vzorkovací perioda (s),

$P_{\text{MPP,PVS}}$ – výkon v MPP poskytovaný solárním simulátorem (W),

T_{int} – celková doba jednoho intervalu (s).

Z těchto dílčích statických účinností MPPT lze dále skrze součet váhových faktorů spočítat euroúčinnost (respektive CEC účinnost, kde CEC je zkratka pro California Energy Commission), což je ukazatel výkonnosti měničů pro naše zeměpisné šířky (respektive pro podnebí s vyšší ozářeností odpovídající kalifornskému klimatu). Jedná se o váženou účinnost, která se získá přiřazením odpovídajícího podílu času, po který se měnič nachází v daném provozním rozsahu. Pro euroúčinnost lze využít váhové faktory a odpovídající dílčí účinnosti podle tabulky 4.1. Pro CEC účinnost platí jiné váhové faktory a k nim odpovídající dílčí účinnosti podle tabulky 4.2.

Power level	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	1
Váhový faktor	0,03	0,06	0,13	0,1	0,48	0,2

Tabulka 4.1. Váhové faktory pro výpočet euroúčinnosti.

Power level	0,1	0,2	0,3	0,5	0,75	1
Váhový faktor	0,04	0,05	0,12	0,21	0,53	0,05

Tabulka 4.2. Váhové faktory pro výpočet CEC účinnosti.

Euroúčinnost se ve výsledku počítá jako součet určitých dílčích statických účinností MPPT přes váhové faktory jako:

$$\eta_{\text{euro,MPPT}} = 0,03 \eta_{0,05} + 0,06 \eta_{0,1} + 0,13 \eta_{0,2} + 0,1 \eta_{0,3} + 0,48 \eta_{0,5} + 0,2 \eta_1. \quad (2)$$

Obdobně pro CEC účinnost platí vztah:

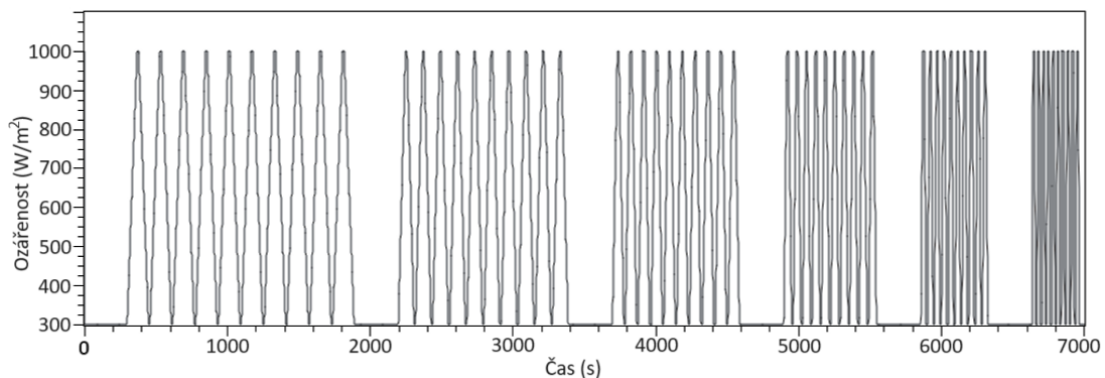
$$\eta_{\text{CEC,MPPT}} = 0,04 \eta_{0,1} + 0,05 \eta_{0,2} + 0,12 \eta_{0,3} + 0,21 \eta_{0,5} + 0,53 \eta_{0,75} + 0,05 \eta_1, \quad (3)$$

kde: $\eta_{\text{euro,MPPT}}$ – euroúčinnost MPPT (-),
 $\eta_{\text{CEC,MPPT}}$ – CEC účinnost MPPT (-),
 η_j – j-tá dílčí statická účinnost MPPT (-).

4.1.2 Dynamická MPPT účinnost

Změny ozáření a z nich vyplývající přechod střídače do nového pracovního bodu nejsou zohledněny při statickém hodnocení účinnosti MPPT. Pro vyhodnocení této přechodové charakteristiky je určena dynamická účinnost MPPT. V praxi se tedy jedná o účinnost MPPT při proměnných podmínkách (teplota a ozáření), což je stav, který spíše v provozu nastává.

Měření dynamické účinnosti se má provádět podle testovacích podmínek uvedených v příloze B této normy, ve které jsou definovány jednotlivé profily ozáření s různou dobou náběhových a sestupových ramp. Procentuální specifikace ozáření se vztahuje ke standardním testovacím podmínkám (STC), přičemž 100 % odpovídá 1000 W/m^2 při teplotě $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Jako příklad může posloužit nastavení profilu podle B3 s minimem ozáření 300 W/m^2 a maximem 1000 W/m^2 . Zprvu je doba náběhové rampy 70 s a postupně se snižuje až na 7 s (viz obrázek 4.2).



Obrázek 4.2. Profil ozáření podle ČSN EN 50530 B3 [11] (upraveno).

Pro výpočet dynamické MPPT účinnosti každého profilu lze použít vztah:

$$\eta_{\text{MPPT,dyn}} = \frac{\sum U_{\text{DC},i} I_{\text{DC},i} \Delta T_i}{\sum P_{\text{MPP,PVS},j} \Delta T_j}, \quad (4)$$

kde: $\eta_{\text{MPPT,dyn}}$ – dynamická účinnost MPPT (-),
 ΔT_i – vzorkovací perioda $U_{\text{DC},i}$ a $I_{\text{DC},i}$ (s),
 ΔT_j – vzorkovací perioda $P_{\text{MPP,PVS},j}$ (s).

4.1.3 Konverzní účinnost

Pro měření účinnosti při konverzi energie ze stejnosměrné na střídavou se využije naprosto totožného měření jako v případě statické MPPT účinnosti, dokonce se doporučuje využít jednoho měření pro určení jak konverzní účinnosti, tak statické MPPT účinnosti. Z definice se pak spočítá konverzní účinnost podle vztahu:

$$\eta_{\text{konv}} = \frac{\sum U_{\text{AC},k} I_{\text{AC},k}}{\sum U_{\text{DC},i} I_{\text{DC},i}}, \quad (5)$$

kde: η_{konv} – konverzní účinnost (-),
 $U_{\text{AC},k}$ – k-tá hodnota výstupního napětí měniče (V),
 $I_{\text{AC},k}$ – k-tá hodnota výstupního proudu měniče (A).

Stejně jako u statické MPPT účinnosti lze skrze váhové faktory dopočítat konverzní euroúčinnost nebo CEC účinnost. Celková euroúčinnost (respektive celková CEC účinnost) je pak definována jako součin statické MPPT euroúčinnosti (CEC účinnosti MPPT) a konverzní euroúčinnosti (CEC účinnosti konverze).

4.2 Testy MPP trackeru

V [12] je uveden postup pro ověření napěťového a proudového rozsahu, ve kterém MPP tracker funguje. Dále je v té samé práci uveden test přesnosti MPP trackeru.

4.2.1 Napěťový rozsah

Tento test určí rozsah napětí, ve kterém MPP tracker pracuje. Zkoušku lze provést pomocí solárního simulátoru nebo skutečného PV pole (vzhledem k tomu, že je třeba nastavit napětí v MPP (U_{MPP}), může být PV pole doplněno vhodně dimenzovaným napájecím zdrojem s regulací napětí). Test by měl probíhat v MPP poblíž středu vstupního proudového rozsahu měniče, který je stanoven výrobcem.

Tato zkouška spočívá ve změně hodnoty U_{MPP} . Začne se s U_{MPP} u středu napěťového rozsahu měniče a pomalu se toto napětí zvyšuje rychlostí menší než 5 V/minutu, dokud měnič sám neomezí nebo nezareaguje podle specifikací při překročení mezní hodnoty U_{MPP} . Zaznamená se mezní hodnota. Zkouška se opakuje třikrát a pak se provede obdobně s úbytky, aby se určila dolní mezní hodnota U_{MPP} .

Jako horní limit U_{MPP} se stanoví minimum ze tří horních mezních hodnot a spodní limitní hodnota U_{MPP} bude naopak maximum ze tří zkoušek s úbytky a jejich mezními hodnotami.

4.2.2 Proudový rozsah

Tento test určí rozsah proudu, ve kterém MPP tracker pracuje, a jestli proud v MPP (I_{MPP}) ovlivňuje řízení. Test by měl probíhat v MPP poblíž středu vstupního napěťového rozsahu měniče, který je stanoven výrobcem. Předpokládá se, že nižší DC proud vyřadí obvody MPPT, přičemž limitní hodnota se zaznamená.

Tato zkouška spočívá v provozu měniče v blízkosti jeho jmenovitého výkonu na PV poli nebo solárním simulátoru, přičemž se mění I_{MPP} . Test začne s I_{MPP} blízko středu proudového rozsahu měniče a pozvolna se zvyšuje I_{MPP} rychlostí menší než $0,02 I_{max}/\text{minutu}$, kde I_{max} je maximální vstupní proud, dokud měnič sám neomezí nebo nezareaguje podle specifikací při překročení mezní hodnoty I_{MPP} . Zaznamená se mezní hodnota. Zkoušku se opakuje třikrát a pak se provede obdobně s úbytky, aby se určila dolní mezní hodnota I_{MPP} .

Jako horní limit I_{MPP} se stanoví minimum ze tří horních mezních hodnot a spodní limitní hodnota I_{MPP} bude naopak maximum ze tří zkoušek s úbytky a jejich mezními hodnotami.

4.2.3 Přesnost MPPT

Cílem tohoto hodnocení je zjistit přesnost funkce MPPT při chodu PV pole v jeho MPP. Pokud je baterie součástí běžného provozu systému, musí být také součástí měření a musí být během měření udržována na přibližně 90% nabití (omezí to vliv napětí nebo impedance baterie na výkon MPPT). Činnost MPPT často závisí na vlastnostech PV pole, které se jednotka snaží sledovat. Porovnávají se tři standardní typy PV polí, které se liší faktorem plnění (fill factor, zkráceně FF) PV pole, což je podíl výkonu v MPP ku teoretickému výkonu daného napětím naprázdno a proudem nakrátko. Napětí v MPP na PV poli s nízkým FF je menší částí napětí naprázdno než na PV poli s vysokým FF.

Zkouška odezvy MPPT v ustáleném stavu

Pro podmínky uvedené v tabulce na obrázku 4.3, které se odlišují napětím v bodě maximálního výkonu, FF a power levelem, se nechá stabilizovat MPPT v pracovním bodě. Zaznamenávají se DC napětí, proud a výkon PV simulátoru. Hodnoty přesnosti MPPT se vypočítají pro napětí, proud a výkon jako podíl měřené ku teoreticky očekávané hodnotě ze solárního simulátoru. Maximální přesnost MPPT je dána maximumem z 27 hodnot přesnosti výkonu pro power levely 10 %, 25 %, 50 %, 75 % a 100 % (šedě vyznačená oblast na obrázku 4.3). Minimální přesnost MPPT je naopak minimum z 27 hodnot.

Test	V_{dc} (V_{REF})	V_{ac}	Array Fill Factor	Inverter DC Input Power Level (P_{REF})				
				10%	25%	50%	75%	100%
A	105% V_{min}	V_{nom}	0.55					
B	V_{nom}	V_{nom}	0.55					
C	95% V_{max}	V_{nom}	0.55					
D	105% V_{min}	V_{nom}	0.68					
E	V_{nom}	V_{nom}	0.68					
F	95% V_{max}	V_{nom}	0.68					
G	105% V_{min}	V_{nom}	0.8					
H	V_{nom}	V_{nom}	0.8					
I	95% V_{max}	V_{nom}	0.8					

Obrázek 4.3. Podmínky pro zkoušku odezvy MPPT v ustáleném stavu [12].

■ Zkouška dynamické odezvy MPPT

V principu se jedná o podobnou zkoušku, která je uvedena v normě ČSN EN 50530. Rozdíl je v uvedených profilech ozáření, přičemž v práci [12] rozlišují pomalou rampu (nahrazující jasný den), rychlou rampu (přerušovanou oblačnost) a trojúhelníkovou rampu (částečně zamračený den).

U pomalé rampy je profil nastaven tak, že výchozí ozáření je 0 W/m^2 a teplota modulu $5 \text{ }^\circ\text{C}$. Z těchto počátečních podmínek se 30 minut zvyšuje ozáření i teplota až na ozáření 1000 W/m^2 a teplotu $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Po dosažení tohoto maxima se rampa obrátí, začne klesat, až se za 30 minut dostane do počátečních podmínek 0 W/m^2 a $5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Co se týče rychlé rampy, tak ta slouží k simulaci účinku mraku cumulu (typ mraku, který je osamocený, obvykle hustý a s ostře ohraničenými obrysy [13]) procházejícího před sluncem. Test zjišťuje, jak rychle MPP tracker reaguje na rychlou změnu výkonu. Test začíná změnou ozáření ze 100 na 800 W/m^2 během 3 sekund za konstantní teploty modulu $50 \text{ }^\circ\text{C}$. V tomto stavu se vydrží do stabilizace MPP trackeru a pak se během 3 sekund provede pokles zpátky z 800 na 100 W/m^2 a opět se vyčká na stabilizaci MPP trackeru. Tento postup se opakuje pětkrát.

Trojúhelníková rampa má modelovat opakované a rychle se pohybující mraky. Rampa začíná na ozáření 100 W/m^2 , která roste až k 800 W/m^2 a po dosažení maxima ihned klesá zpět na 100 W/m^2 , přičemž jeden tento trojúhelník trvá 60 sekund. Celý proces se za jedno měření opakuje 60krát, a tak celková doba testu je 1 hodina.

Pro naměřená data z testů pomalé a trojúhelníkové rampy se vypočítá využití MPPT jako poměr skutečně získané energie ku očekávané energii ze solárního simulátoru pro každý z testů. Skutečné množství energie se měří od počátku první rampy do ukončení poslední rampy. Z naměřených dat rychlé rampy se pro každou vzestupnou a sestupnou rampu zjistí a zaznamená doba od konce rampy do stabilizace MPPT. Doba stabilizace MPPT se určí jako maximum z naměřených hodnot.

■ 4.3 Přečody do nebo z pohotovostního režimu

V práci [12] je kromě testů MPP trackeru nastíněna série testů pro určení střídavého výkonu nutného k provozu střídače v pohotovostním režimu a také úrovně stejnosměrného vstupního výkonu, při kterých se měnič spouští a vypíná. Testy se provádějí při okolní teplotě ($25 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$).

■ 4.3.1 Samospotřeba v pohotovostním režimu

Pro měření samospotřeby střídače v pohotovostním režimu se postupuje podle následujících kroků, přičemž se po celou dobu měření zaznamenává výkon ze sítě. Střídač se uvede do pohotovostního režimu, vstupní stejnosměrné napětí a výkon startuje na nule a střídavé napětí a frekvence sítě na jmenovitých hodnotách. Zvýší se napětí (proud a potažmo výkon zůstává nulový) solárního simulátoru na hodnotu uprostřed napěťového rozsahu, načež se začne zvyšovat proud solárního simulátoru v krocích po $0,1 \%$ jmenovitého proudu (po každém kroku se počká 5 sekund). Zaznamená se úroveň vstupního výkonu, před kterou měnič přejde z pohotovostního do normálního provozu. Výsledkem testu jsou tedy hodnoty výkonu ze sítě, který střídač potřebuje pro svůj chod v pohotovostním režimu při různých úrovních vstupního výkonu.

4.3.2 Vstupní výkon spuštění střídače

Střídač se uvede do pohotovostního režimu, vstupní napětí je na jmenovité hodnotě při nulovém vstupním proudu (výkonu) a výstupní střídavé napětí a frekvence sítě na jmenovitých hodnotách. Nepřetržitě se zvyšuje úroveň vstupního DC výkonu v krocích po 0,1 % jmenovitého výkonu. Zaznamená se úroveň vstupního výkonu, při které buď střídač přejde z pohotovostního do normálního provozu, nebo výstupní výkon bude větší než nula. Tato hodnota se označuje jako vstupní výkon pro spuštění střídače a přechod z pohotovostního do normálního režimu.

4.3.3 Vstupní výkon vypnutí střídače

V tomto testu se v podstatě postupuje opačně než v testu spuštění střídače. Začne se s parametry solárního simulátoru tak, aby střídač pracoval při 10 % jmenovitého vstupního výkonu (za jmenovitého vstupního napětí) a při jmenovitém střídavém napětí a frekvenci na síti. Postupně se snižuje úroveň vstupního výkonu v krocích po 0,1 % jmenovitého výkonu při zachování konstantního napětí a frekvence sítě. Zaznamená se úroveň vstupního výkonu buď při přechodu střídače z normálního provozu do pohotovostního či vypnutí, nebo při poklesu výstupního výkonu na nulu či do záporných hodnot. Takto změřený limitní vstupní výkon bude vypínací výkon, při kterém střídač vypíná.

4.4 Měníče pro přímý ohřev vody

Vyrobená elektrická energie z PV modulů se může využít pro ohřev vody, což je možná alternativa k solárním termickým kolektorům. Pro tento účel slouží regulátory pro ohřev vody pomocí PV systému. K těmto měničům mohou být připojeny pouze čistě odporové zátěže, jelikož výstupní parametry měniče nejsou zcela v souladu se síťovými parametry, což by mohlo vést k poškození spotřebiče s ne zcela odporovou charakteristikou. V práci [11] se posuzuje efektivita regulátoru sledovat MPP, vnitřní účinnost měniče, schopnost přenášet energii do zátěže a výstupní signál měniče. Cílem testů bylo posoudit chování regulátorů dostupných v České republice.

Regulátory byly zkoumány s využitím solárního simulátoru, který sloužil jako zdroj s VACH podle provozních podmínek PV modulů. K výstupu měniče byl připojen přímotopný ohřívač o výkonu 2 kW. Celková účinnost přenosu energie závisí na účinnosti MPPT a konverzi měniče. Pro testování regulátorů byl vybrán profil VACH dle ČSN EN 50530 B3 (viz obrázek 4.2). Celková účinnost se počítá jako podíl kumulované energie, která byla vložena do přímotopu, a kumulované energie v testovacím profilu.

Co se týče výstupního signálu z těchto měničů, tak ten může být buď stejnosměrný nebo střídavý. V práci byly znázorněny typické průběhy výstupních napětí měničů. Jedním z průběhů je pulzující DC napětí o frekvenci cca 500 Hz. Vstupní napětí a proud ze solárního simulátoru je mírně zvlněno. Další typický průběh je charakteristický střídavým obdélníkovým signálem o frekvenci 1 kHz. Posledním uvedeným výstupním signálem je modifikovaný sinus o frekvenci 50 Hz, jehož výstupní napětí i proud mají obdélníkový průběh s mezery, takže výstup má charakter střídavého napětí. Více o měničích pro ohřev vody v [11].

4.5 Pravidla provozování distribuční soustavy (PPDS)

Pravidla PPDS (především příloha č. 4 [3]) řeší aspekty připojování výroben elektřiny do distribučních sítí. Souvisejí tímto se statickým i dynamickým chováním střídače, s jeho činnou ale i jalovou dodávkou energie do sítě.

Pravidla shrnují hlavní aspekty pro připojení výrobní elektřiny. V PPDS jsou výroby rozděleny dle výkonových kategorií, přičemž kategorie A je ta, která je zajímavá pro tuto práci, jelikož do ní výkonově spadají domácí PV elektrárny s hybridními měniči s výkonovým rozsahem 0,8 až 100 kW. Mikrozdroy je jednofázový nebo třífázový zdroj včetně jejich souvisejících zařízení pro výrobu elektřiny, určený pro paralelní provoz s distribuční soustavou na NN; s jmenovitým střídavým fázovým proudem do 16 A na fázi a celkovým maximálním instalovaným výkonem do 10 kW. Pro výroby podkategorie A1 (0,8 až 11 kW) jsou požadavky dle přílohy 4 PPDS následující:

- frekvenční rozsahy a časové limity pro výrobní modul,
- hodnota rychlosti změny frekvence,
- omezený frekvenčně závislý režim při nadfrekvenci,
- dovolené snížení činného výkonu při klesající frekvenci soustavy
- logické rozhraní pro přerušení dodávky činného výkonu,
- podmínky pro automatické připojení k soustavě,
- překlenutí poklesu napětí.

4.5.1 Ochrany mikrozdroye

Opatření na ochranu vlastní výroby je nutné provést podle části 3.5.9 PPDS. U výroben podporujících ostrovní provoz je zapotřebí zajistit ochrany i v tomto režimu. K chránění vlastního zařízení jsou potřebná další opatření využívající ochran, které při odchylkách napětí a frekvence vybaví příslušná spínací zařízení, čímž dojde ke galvanickému oddělení všech fázích. Okamžité odpojení výroby při poruše v síti, které bylo možné při relativně malém podílu těchto zařízení, není udržitelné při jejich rostoucím podílu v distribuční soustavě. Pro mikrozdroye jsou nastaveny parametry pro vypnutí podle tabulky 4.3.

Parametr	Nastavení pro vypnutí	Vypínací čas
Nadpětí 1. stupeň	230 V+10 %	3 s
Nadpětí 2. stupeň	230 V+15 %	1 s
Nadpětí 3. stupeň	230 V+20 %	0,1 s
Podpětí	230 V−15 %	1,5 s
Nadfrekvence	52 Hz	0,5 s
Podfrekvence	47,5 Hz	0,5 s

Tabulka 4.3. Nastavení ochran mikrozdroye [3].

4.5.2 Normální provozní podmínky výroben v síti

Výrobní elektřiny připojená do hladiny NN musí být schopna trvalého provozu, pokud napětí v místě připojení zůstává v rozsahu $U_n - 15\%$ až $U_n + 10\%$. Při napětí nižším než U_n lze snížit výstupní výkon odpovídající relativní změně napětí $(U_n - U)/U_n$. Co se týče frekvenčních normálních provozních podmínek, tak ty jsou dány tabulkou 4.4.

Rozsah frekvence	Minimální doba provozu
47,5 až 48,5 Hz	30 min
48,5 až 49 Hz	90 min
49 až 51 Hz	neomezeně
51 až 51,5 Hz	30 min

Tabulka 4.4. Provozní frekvenční rozsah výroben v síti NN [3].

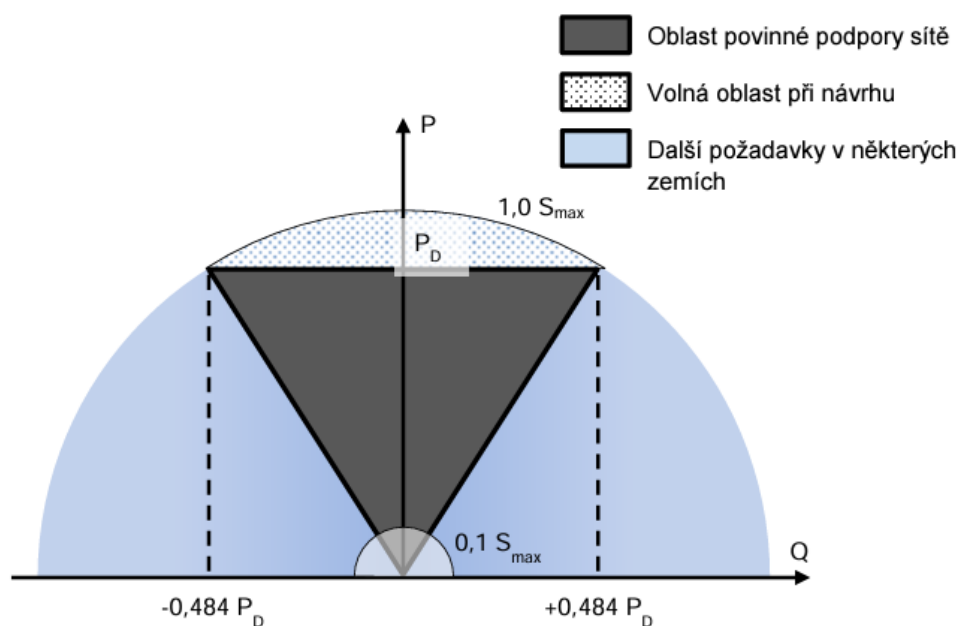
4.5.3 Zásady podpory sítě

Výrobný musí být schopný se při dodávce do sítě podílet na udržování napětí. Rozlišuje se mezi statickou a dynamickou podporou sítě. Požadované hodnoty a charakteristiky pro podporu sítě stanoví provozovatel distribuční soustavy (PDS). Dodržování stanovených hodnot v provozu zajišťuje automatické řízení ve výrobě.

Statické řízení napětí

Statické udržování napětí v síti je udržování napětí ve smluvně stanovených mezích za normálního provozu v síti při pomalých změnách napětí. Pokud to vyžadují podmínky v síti, a PDS tento požadavek uplatní, musí se výrobný podílet na statickém udržování napětí pomocí jalového výkonu v rozsahu účinníku výrobný mezi 0,9 kapacitní a 0,9 induktivní.

Kolísání napětí musí zůstat v povolených mezích. Výrobný musí být schopný splnit níže uvedené požadavky v celém rozsahu provozního napětí a frekvence podle tabulky 4.4. Grafické znázornění minimálních a volitelných požadavků na dodávku či odběr jalového výkonu za jmenovitého napětí je uvedeno na obrázku 4.4, kde P_D je návrhový výkon výrobný.



Obrázek 4.4. Požadavky na dodávku či odběr jalového výkonu při U_n [3].

■ Dynamická podpora sítě

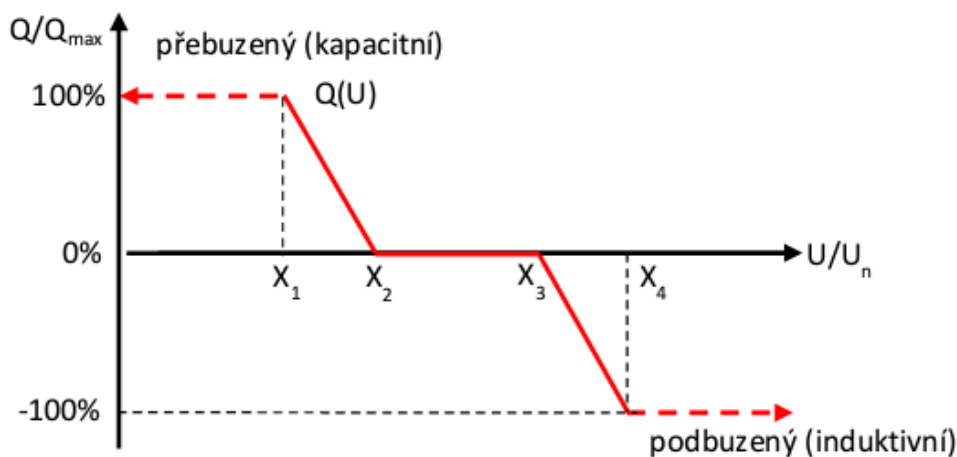
Dynamická podpora sítě je schopnost udržovat napětí při poklesech napětí v síti velmi vysokého napětí a zvláště vysokého napětí, zamezující nechtěnému odpojení výkonů napájejících sítí nižších napěťových hladin a rozpadu sítě. Z tohoto důvodu je potřeba, aby se i výrobny v sítích NN podílely na dynamické podpoře sítě – musí být schopné zůstat připojené i při poruchách v síti. Vyžaduje se překlenutí poruchy při krátkodobém poklesu napětí a také krátkodobém nadpětí podle křivek definovaných v [3].

■ 4.5.4 Přizpůsobení činného a jalového výkonu

Všechny výrobny elektriny připojené do distribuční sítě musí dokázat snižovat činný výkon automaticky v závislosti na síťové frekvenci a podle poměrů v síti i podle povelů z řídicího dispečinku PDS nebo se automaticky odpojit.

Od výrobny se vyžaduje snížení činného výkonu při nadfrekvenci, stanoveno je také přípustné snížení činného výkonu při podfrekvenci. Další funkcí je snížení činného výkonu závislé na napětí – funkce $P(U)$. Všechny parametry těchto funkcí přizpůsobení činného výkonu jsou jasně definovány v [3].

Obecně řízení jalového výkonu závisí na konkrétní distribuční soustavě a určuje ho PDS po konzultaci s výrobcem. Při dodávce činného výkonu je nastavení jalového výkonu zadáváno PDS buď pevnou hodnotou, nebo pokud to provoz sítě vyžaduje dálkově nastavitelnou žádanou hodnotou. Žádaná hodnota může být nastavena pomocí charakteristické křivky $Q(U)$ – viz obrázek 4.5, přičemž nastavení určí PDS podle místních síťových podmínek, eventuálně studie připojitelnosti.



Obrázek 4.5. Charakteristika funkce $Q(U)$. Vodorovná osa – poměr měřené hodnoty napětí a U_n ; svislá osa – poměr dodávaného či odebraného jalového výkonu a maximálního možného dodávaného či odebíraného jalového výkonu [3].

■ 4.5.5 Automatické opětovné připojení výroben

Automatické opětovné připojení je povoleno, pokud to PDS nezakázal z důvodu řízení činného výkonu v závislosti na provozních podmínkách. Připojení a spuštění výroby elektřiny je povoleno pouze tehdy, pokud jsou napětí a frekvence v povolených rozsazích alespoň po dobu 300 s. Meze napětí jsou 85 až 110 % jmenovité hodnoty napětí, meze frekvence jsou 47,5 až 50,5 Hz. Pak může postupně najet výkon od nuly s gradientem maximálně 10 % jmenovitého výkonu za minutu. Není-li výrobní schopna postupného najetí výkonu, připojí se zpět k distribuční soustavě po době, kterou stanoví PDS v intervalu 0 až 20 minut (za průběžné kontroly napětí a frekvence).

Při automatickém připojení musí dodávaný výkon z výroby respektovat případné výkonové omezení z důvodu řízení činného výkonu v závislosti na provozních podmínkách. Synchronizace výroby se sítí musí být plně automatizovaná.

Kapitola 5

Praktická část

5.1 Popis pracoviště

Praktická část, tedy všechna měření na zvoleném hybridním měniči, byla realizována v laboratoři Fotovoltaických systémů a energetiky v Univerzitním centru energeticky efektivních budov (UCEEB) ČVUT v Buštěhradě. Níže, na obrázku 5.1, je fotografie měřicího pracoviště. Vpravo na konstrukci je pověšený hybridní měnič GW10K-ET PLUS+, vedle něj jsou pak zapojeny rozvaděče s přepětovými ochranami a na zemi vedle této konstrukce stojí solární simulátor TerraSAS, na kterém leží měřicí přístroj ZES Zimmer LMG670. K měniči je také připojeno bateriové uložení Dyness Tower T10, které stojí na pojízdné plošině za měničem a rozvaděči.



Obrázek 5.1. Měřicí pracoviště v budově ČVUT UCEEB.

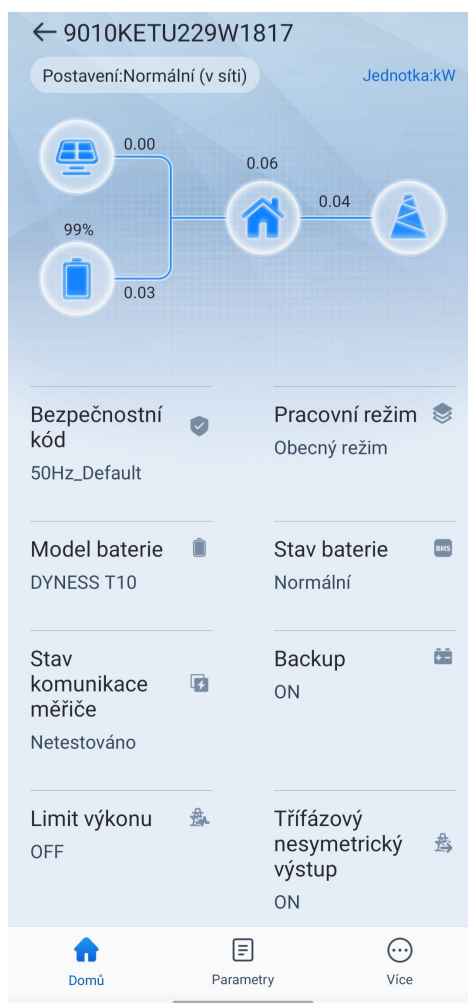
5.1.1 GoodWe GW10K-ET PLUS+

Pro měření statických a dynamických vlastností hybridních měničů byl použit měnič společnosti GoodWe typu GW10K-ET PLUS+. Jedná se o poměrně často instalovaný hybridní měnič pro domácí fotovoltaiky v České republice, jelikož umožňuje asymetrický

výstup. Tento měnič má dva oddělené vstupy s vlastními MPPT (PVS1 a PVS2), což je vhodné například pro systémy východ-západ, aby se jednotlivé orientace PV modulů vzájemně neovlivňovaly. Tyto MPPT mají maximální vstupní proud 12,5 A, napěťový rozsah 200 až 850 V a v tomto rozmezí by měl být měnič schopen najít bod maximálního výkonu a udržovat ho. Vstupní stejnosměrný výkon z PV modulů může být až 15 kW (7,5 kW na každý MPPT). Euroúčinnost měniče je 97,5 %. Na výstupu dokáže měnič mít až 16,5 A a střídavý výkon 10 kW. Tento střídač umožňuje 100% nesymetrickou zátěž, avšak z jakého základu je těch 100 %, to již specifikováno není [14]. Měřením však bylo ověřeno, že dokáže poslat maximálně 3,3 kW vždy do jedné fáze nezávisle na tom, kolik pošle do dalších fází (základem pro asymetrii 100 % bude tedy myšlen fázový výkon).

■ Aplikace SolarGo

Aplikace SolarGo slouží k nastavení požadovaných parametrů hybridních měničů od společnosti GoodWe a také umožňuje sledovat výkony v krátké zpožděném čase. Pro sledování historických dat spotřeby a výroby energie je uživatelům zdarma umožněno používání aplikace SEMS Portal. Výstřižek z domovské stránky aplikace SolarGo je na obrázku 5.2, přičemž v horní části je diagram toku energie a dolní část ukazuje stav systému (pracovní režim, limit výkonu, nesymetrický výstup, Back-up a další).



Obrázek 5.2. Výstřižek z aplikace SolarGo.

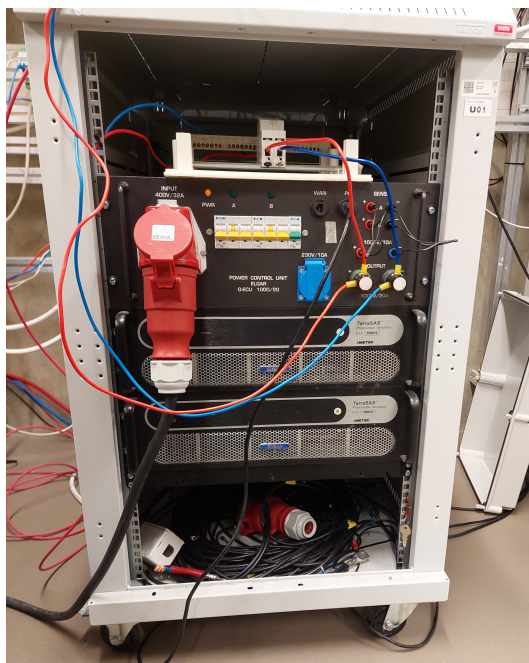
V aplikaci SolarGo se dá nastavit, jestli má měnič dodávat vyrobenou energii symetricky nebo asymetricky. Pro všechna měření v této práci byla zapnutá asymetrie. Dále aplikace umožňuje nastavení limitu výkonu dodávaného do sítě, což je důležité, pokud například nelze mít přetoky do sítě kvůli tomu, že nejsou povoleny provozovatelem distribuční soustavy. Uživatel si také může vybrat z nabídky pracovních režimů, který je nejvhodnější pro jeho instalaci. V aplikaci se také vybírají parametry síťového kodexu RfG – pro účely měření bylo nastaveno 50Hz_Default, kde nejsou dlouhé čekací doby na připojení měniče k síti.

Měnit se v aplikaci dají některé parametry baterie, jako například hloubka vybití DOD (Depth of discharge) a to pro běžný stav při připojení k síti, tak pro výpadek sítě při režimu Back-up. Celkově aplikace nabízí spoustu nastavitelných parametrů, které najdou své využití v různých případech.

Důležité je zmínit, že na podzim roku 2023 vyšla nová verze firmwaru DSP 11.177, ARM 27.265 z původní verze DSP 09.163, ARM 23.237 pro hybridní měniče řady GoodWe 5-10kW ET PLUS+. Tato nová verze přináší možnost přetížení a hlavně rychlejší odezvu při dynamických jevech, což bude mezi těmito dvěma verzemi u některých měření porovnáváno [15].

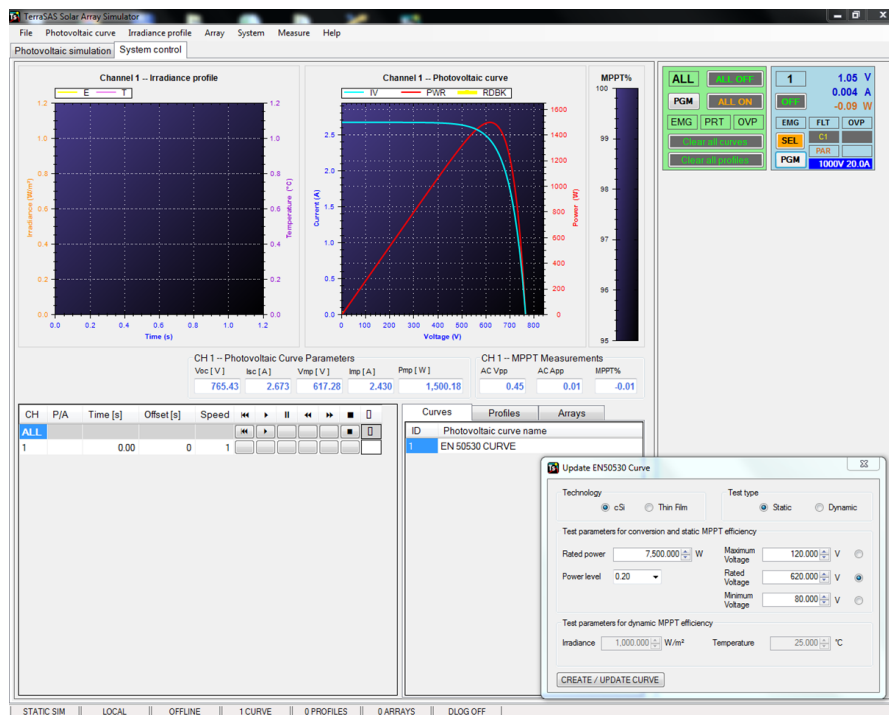
5.1.2 Solární simulátor TerraSAS

Ovládací jednotka O-ECU1000/20 slouží ke společnému napájení a propojení dvou paralelně řazených PV simulátorů TerraSAS ETS1000/10 ELGAR. Jedná se v podstatě o DC zdroje, které společně umožňují na výstupu nastavit libovolnou velikost napětí (0-1000 V) a proudu (0-20 A), čímž je simulován výkon PV modulů [16–17]. Solární simulátor TerraSAS je vidět na obrázku 5.3.



Obrázek 5.3. Solární simulátor TerraSAS.

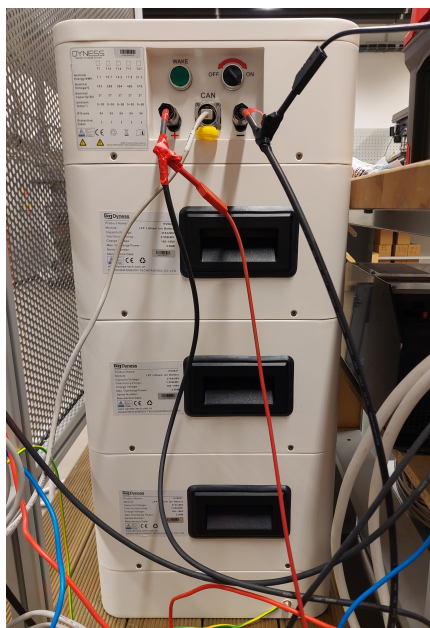
Výřez kopie obrazovky softwaru pro solární simulátor je na obrázku 5.4. V softwaru se můžou nastavovat různé VACH a stupně power levelu. Kromě nastavování VACH lze také využít nastavení profilů ozáření a teploty. Solární simulátor dokáže ukládat data, ze kterých lze například vyčíst účinnost MPPT.



Obrázek 5.4. Výřez kopie obrazovky softwaru TerraSAS.

5.1.3 Baterie Dyness Tower T10

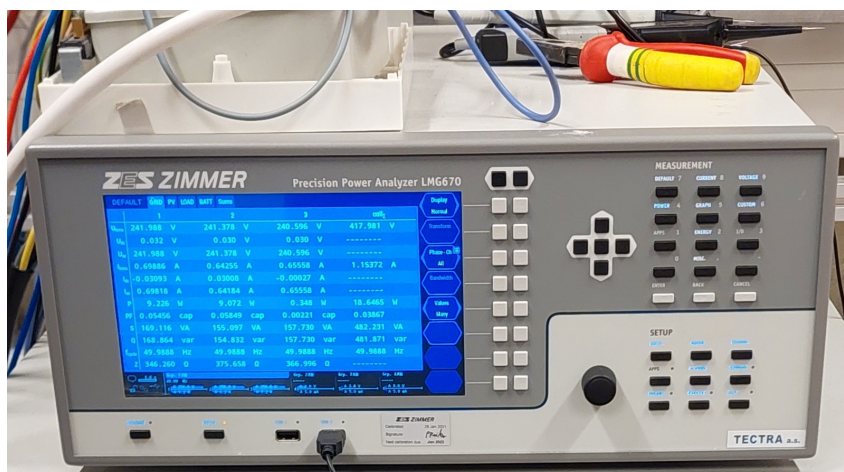
Lithium-železo-fosfátový (LiFePo_4) akumulátor od firmy Dyness je kompatibilní s měničem GoodWe. Konkrétně produkt Dyness Tower T10 je složen ze tří sériově propojených modulů HV9637, má celkovou využitelnou energii 10,66 kWh, kapacitu 37 Ah, nominální napětí 288 V a maximální nabíjecí/vybíjecí výkon 6,39 kW při komunikaci s měničem. Battery management system (BMS) je součástí tohoto produktu, komunikuje s měničem, dohlíží na chod a monitoruje akumulátor [18]. Obrázek 5.5 ukazuje použité bateriové uložení Dyness Tower T10.



Obrázek 5.5. Baterie Dyness Tower T10.

5.1.4 ZES Zimmer LMG670

Měřicí přístroj ZES Zimmer LMG670 je vidět na obrázku 5.6. Jedná se o analyzátor výkonu, pomocí kterého probíhalo přesné měření a záznam elektrických veličin. Přesnost měření je 0,015 % z naměřené hodnoty a 0,01 % z rozsahu měření [19].



Obrázek 5.6. Měřicí přístroj ZES Zimmer LMG670.

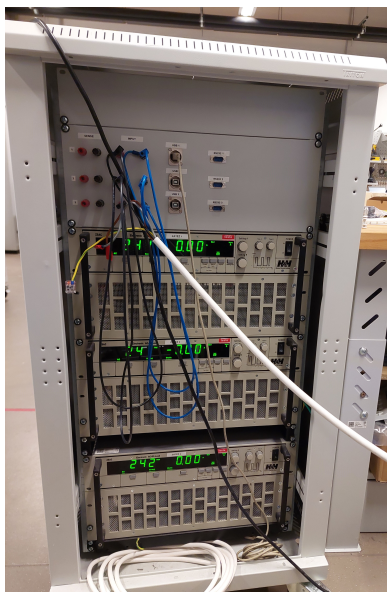
Měření byly hodnoty napětí, proudu a výkonu na vstupu do měniče a také na jeho jednotlivých výstupech. Konkrétně bylo využito všech šesti kanálů tohoto přístroje, přičemž první tři kanály byly sloučeny do skupiny pro měření veličin na jednotlivých fázích sítě – viz tabulka 5.1.

Označení kanálu	Popis zapojení	Vysvětlení orientace výkonu
1G1	Fáze L1 na síti	+ je odběr, – je dodávka
2G1	Fáze L2 na síti	+ je odběr, – je dodávka
3G1	Fáze L3 na síti	+ je odběr, – je dodávka
G2	Solární simulátor	+ je výroba
G3	Fáze L1 zátěže	+ je spotřeba
G4	Baterie	+ je nabíjení, – je vybíjení

Tabulka 5.1. Nastavení šesti kanálů ZES Zimmer LMG670 a vysvětlení orientace jednotlivých výkonů u sítě a baterie.

5.1.5 Programovatelná zátěž ZSAC1426 Standard

Na výstup hybridního měniče byla na fázi L1 připojena elektronická zátěž, která je sestavena ze tří paralelně propojených modelů ZSAC1426 Standard od společnosti Höcherl & Hackl, přičemž každá z těchto zátěží má výkon 1 400 W a snese maximálně proud o velikosti 10 A. Jde o elektronickou, čistě odporovou zátěž, která umožňuje přednastavovat a měnit odběr proudu. Jedná se sice o programovatelnou zátěž, ale k měření v této práci nebylo potřeba využít software LabVIEW, jelikož všechny parametry zátěže byly ručně nastavovány pomocí potenciometrů [20]. Zátěž včetně jejího paralelního zapojení je vidět na obrázku 5.7.

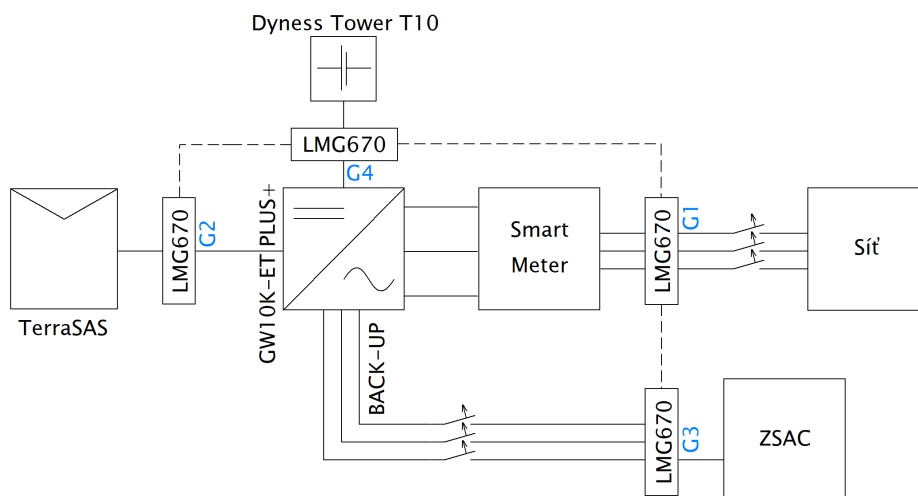


Obrázek 5.7. Programovatelná zátěž ZSAC1426 Standard.

5.2 Metody

V rámci praktické části této diplomové práce byly nejprve zkoumány statické, a následně také dynamické vlastnosti měniče GW10K-ET PLUS+. U dynamických jevů byly simulovány situace, které mohou běžně v provozu nastat (tedy například změna ozáření, spínání a vypínání asymetrické zátěže nebo výpadky sítě). Pro všechna měření se vychází ze základního schématu zapojení, které je vidět na obrázku 5.8. Na stejnosměrnou stranu měniče je připojen solární simulátor TerraSAS a baterie Dyness Tower T10. Na střídavé straně je měnič napojen na síť a zátěž má připojenou na zálohovaný výstup měniče (Back-up), přičemž se zatěžuje pouze fáze L1.

U některých měření nejsou zapojeny všechny přilehlé bloky hybridního měniče (například někde není připojena baterka, nebo síť a podobně). Jednotlivé metody měření budou specifikovány dále v této sekci a vždy bude popsáno, jestli některý z bloků zrovna pro dané měření není odpojený.



Obrázek 5.8. Schéma zapojení pro měření na hybridním měniči GW10K-ET PLUS+. Modře jsou označeny kanály měřicího přístroje ZES Zimmer LMG670.

5.2.1 Euroúčinnost

Euroúčinnost je průměrná provozní účinnost měničů, která se počítá podle normy ČSN EN 50530 [10]. Je to zajímavý ukazatel výkonnosti měničů pro naše zeměpisné šířky, která je měřena při měnících se klimatických podmínkách – různé ozáření. Jedná se o váženou veličinu účinností podle procentuálního podílu času, který měnič stráví v daném provozním rozsahu.

K měniči je na jeho vstupu připojen solární simulátor (G2) a výstup měniče je připojen k síti (G1). O přesné měření elektrických veličin se stará měřicí přístroj Zimmer a zaznamenává veškeré veličiny se vzorkovací periodou 0,5 s. Hodnoty ze softwaru solárního simulátoru jsou také zaznamenávány se stejnou vzorkovací periodou.

Z hodnot uvedených v datovém listu hybridního měniče byly vypočteny parametry VACH a nastaveny v simulátoru TerraSAS. Pro měření byly zvoleny 3 různé VACH, které jsou mezi sebou následně porovnávány – viz tabulka 5.2. Po nastavení parametrů VACH může započít měření. MPP tracker nejprve najíždí a hledá bod maximálního výkonu, což trvá přibližně 3 minuty, následně měnič pracuje v optimálním bodě VACH a může začít zaznamenávání měřených hodnot. Po cca 11 minutách se skokově sníží výkon ze solárního simulátoru z power levelu 1 na 0,75 a opět se nechá 11 minut zaznamenávat na této hodnotě. Analogicky se power level snižuje dále na 0,5, 0,3, 0,25, 0,2, 0,1 a 0,05 z původní nastavené VACH. Délka intervalu 11 minut mezi jednotlivými úrovněmi je volena s ohledem na to, aby bylo možné z intervalu vyfiltrovat přechodový děj ustalování MPP trackeru a aby zbyly alespoň data za 10 minut ustáleného stavu.

Označení	U_{MPP}	P_m	U_{oc}	I_{sc}
VACH1	460 V	5 750 W	568 V	13,8 A
VACH2	620 V	7 500 W	765 V	13,4 A
VACH3	750 V	7 500 W	925 V	11,1 A

Tabulka 5.2. Nastavení VACH pro solární simulátor s ohledem na rozsah MPP trackeru. U_{mpp} – napětí v bodě maximálního výkonu; P_m – maximální výkon; U_{oc} – napětí na prázdko, I_{sc} – proud nakrátko.

Výsledkem měření bude statická MPPT euroúčinnost, konverzní euroúčinnost a jejich součin – celková euroúčinnost. Zkoušený měnič má dva oddělené vstupy s vlastními MPP trackery (PVS1 a PVS2), tudíž bylo měření provedeno pro oba vstupy a následně porovnáno.

Účinnost MPPT

Pro každý 10minutový interval lze z naměřených hodnot spočítat dílčí statickou účinnost MPPT podle vztahu:

$$\eta_{MPPT,stat} = \frac{\sum U_{DC,i} I_{DC,i} \Delta T}{P_{MPP,PVS} T_{int}}, \quad (1)$$

Z těchto dílčích statických účinností MPPT lze dále skrze součet váhových faktorů spočítat euroúčinnost jako:

$$\eta_{euro,MPPT} = 0,03 \eta_{0,05} + 0,06 \eta_{0,1} + 0,13 \eta_{0,2} + 0,1 \eta_{0,3} + 0,48 \eta_{0,5} + 0,2 \eta_1. \quad (2)$$

■ Účinnost konverze

Pro každý 10minutový interval lze z naměřených hodnot spočítat dílčí konverzní účinnost podle definičního vztahu:

$$\eta_{\text{konv}} = \frac{\sum U_{AC,k} I_{AC,k}}{\sum U_{DC,i} I_{DC,i}}, \quad (3)$$

Z těchto dílčích konverzních účinností lze dále skrze součet váhových faktorů spočítat euroúčinnost jako:

$$\eta_{\text{euro,konv}} = 0,03 \eta_{0,05} + 0,06 \eta_{0,1} + 0,13 \eta_{0,2} + 0,1 \eta_{0,3} + 0,48 \eta_{0,5} + 0,2 \eta_1. \quad (4)$$

■ Celková účinnost

Poté, co bude zjištěna statická MPPT euroúčinnost $\eta_{\text{euro,MPPT}}$ a konverzní euroúčinnost $\eta_{\text{euro,konv}}$ se součinem dostane celková euroúčinnost:

$$\eta_{\text{euro,celk}} = \eta_{\text{euro,MPPT}} \eta_{\text{euro,konv}}. \quad (5)$$

■ 5.2.2 Účinnost konverze

Měření euroúčinnosti v sobě zahrnuje ověřování konverze ze solárního simulátoru do sítě. Kromě této konverze byla v této části ověřována účinnost při toku energie z baterie do zátěže a ze solárního simulátoru do baterie.

■ Konverze z baterie do zátěže

Měření konverzní účinnosti při toku elektrické energie z baterie (G4) do zátěže (G3) probíhá za odpojeného solárního simulátoru a sítě. Analyzátor výkonu Zimmer ukládá data se vzorkovací periodou 1 s. Výchozí stav nabití baterie SOC (State of charge) je 99 %. Zatěžuje se asymetricky pouze fáze L1, a to tak, že každé cca 2 minuty dojde k navýšení odběru proudu na zátěži ZSAC o 1 A (počínaje na 0 A) při běžném síťovém napětí 230 V. Z datového listu měniče bylo zjištěno, že dokáže na výstup poslat maximálně 16,5 A, což bude v tomto měření také ověřeno. V okamžik, kdy již měnič nedokáže pokrýt zátěž, bude měření ukončeno.

Konverzní účinnost se zde spočítá pro každou úroveň výkonu jako podíl průměrného výkonu zátěže a průměrného výkonu baterie:

$$\eta_{\text{konv}} = \frac{P_{\text{load}}}{P_{\text{bat}}}, \quad (6)$$

kde: P_{load} – průměrný výkon zátěže (W),
 P_{bat} – průměrný výkon baterie (W).

■ Konverze ze solárního simulátoru do baterie

Konverzní účinnost při toku elektrické energie ze solárního simulátoru (G2) do baterie (G4) probíhá za odpojené zátěže a sítě. Analyzátor výkonu Zimmer ukládá data se vzorkovací periodou 1 s. V solárním simulátoru byly postupně nastaveny tři různé VACH jako v případě měření euroúčinnosti (viz tabulka 5.2). Stejně jako u měření euroúčinnosti, i zde se měnily power levely od 1 do 0,05 s časovým intervalem 150 s. Výchozí stav nabití baterie SOC je před začátkem každého měření menší než 50 %.

Účinnost MPPT se v tomto měření nepozoruje, jelikož již byla zjištěna v měření euroúčinnosti. Konverzní účinnost se pro tento případ spočítá pro každou VACH a power level jako podíl průměrného výkonu baterie a průměrného vstupního výkonu měniče:

$$\eta_{\text{konv}} = \frac{P_{\text{bat}}}{P_{\text{DC}}}, \quad (7)$$

kde: P_{DC} – průměrný vstupní výkon měniče (W).

■ 5.2.3 Samospotřeba

Samospotřeba hybridního měniče je další zajímavý ukazatel, který se uvádí v datovém listu. Konkrétně pro testovaný měnič by měla být samospotřeba menší než 15 W, avšak u tohoto údaje je poznámka, že tato hodnota platí pro vypnutý Back-up. V rámci této práce byla změřena samospotřeba jak pro vypnutý, tak pro zapnutý zálohovaný výstup. Pro zapnutý Back-up by měla být samospotřeba vyšší, jelikož měnič je neustále v pohotovosti.

V rámci této zkoušky se ověří hodnota uvedená v datovém listu. Dále bude zjištěno, jak velká spotřeba je pro zapnutý Back-up při buď připojené síti, nebo odpojené síti. Všechna měření probíhají za vypnutého solárního simulátoru a nulové zátěže. K měniči je v každém případě připojena baterie (G4), jejíž výchozí stav nabití je 40 %. Záznam dat probíhá každou 1 s a samotné měření trvá hodinu.

Z naměřených dat bude určen maximální výkon a průměrný výkon za sledované období, který měnič potřebuje pro svou funkci ve zvoleném pracovním režimu. Vyhodnocení bude probíhat přes kumulovanou energii vloženou do měniče z baterie a ze sítě (pokud je zrovna připojena k měniči).

■ 5.2.4 Změna ozáření

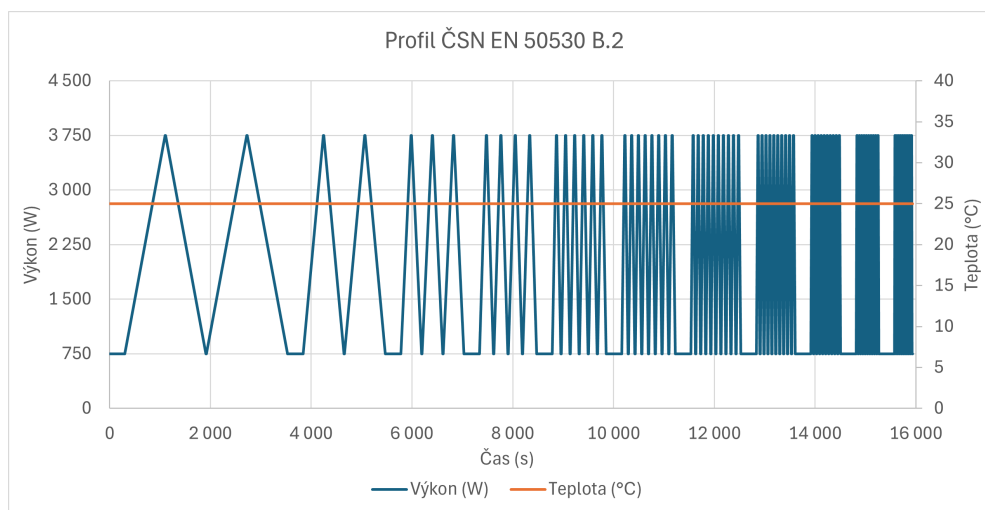
Jeden z hlavních dynamických jevů, se kterými se při provozu PV elektrárny majitel setká, je změna ozáření. Během ne zcela jasného dne dochází k fluktuaci ozáření, což se projevuje na výstupním výkonu. Ke změně ozáření dochází i za jasného dne, avšak změna výkonu není tak rychlá jako v případě oblačného dne.

Měření dynamické účinnosti MPPT je náročné, protože vyžaduje vhodné určení dynamického profilu, který má velký vliv na naměřené výsledky. Tento profil by měl co nejvíce odrážet typické chování PV modulů v reálných podmínkách provozu, což je ovlivněno faktory jako orientace a sklon modulů, způsob jejich instalace s ohledem na chlazení, roční období a počasí v lokalitě [11]. Pro účely tohoto měření byly testovány různé profily ozáření, které byly nahrány do softwaru solárního simulátoru.

Měření změny ozáření probíhá za odpojené sítě a nulové zátěže. Veškerá vyrobená energie je tedy ukládána do baterie (G4), proto je nutné před začátkem každého měření dostatečně vybit baterii přibližně na $\text{SOC} = 30\%$. Zaznamenávání dat probíhá se vzorkovací periodou 100 ms. Výsledky těchto testů budou dynamická účinnost MPPT, konverzní účinnost a jejich součin (tedy celková účinnost). Účinnosti budou měřeny z kumulativní energie za sledované období. MPPT účinnost bude dána podílem kumulované energie vstupující do měniče a kumulované energie poskytované solárním simulátorem. Konverzní účinnost se zjistí z podílu kumulované výstupní a vstupní energie.

■ Testovací profil ČSN EN 50530 B.2

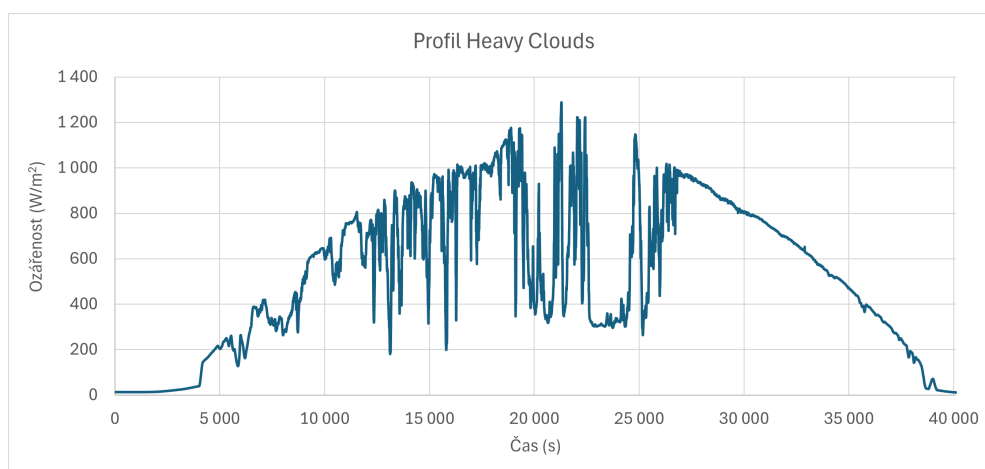
Pro první test byl zvolen profil ozáření dle ČSN EN 50530, přílohy B.2 [10]. V této příloze je definován profil měření pro náběhové a sestupové rampy s minimem ozáření 100 W/m^2 a maximem 500 W/m^2 při konstantní teplotě 25 °C . Náběhová rampa zprvu trvá 800 s, sestupová taktéž a čas ramp se postupně snižuje až na 8 s (časovou závislost výstupního výkonu a teploty simulátoru, při řízení tímto profilem, kdy maximální výkon odpovídající ozáření 500 W/m^2 je 3750 W , ukazuje obrázek 5.9). Tento profil byl také proměřen s 10x větší rychlostí, což umožní lépe zhodnotit chování při rychlých změnách ozáření.



Obrázek 5.9. Profil výstupního výkonu a teploty dle ČSN EN 50530 B.2. Vodorovná osa – čas; hlavní svislá osa – výkon; vedlejší svislá osa – teplota.

■ Testovací profil *Heavy Clouds*

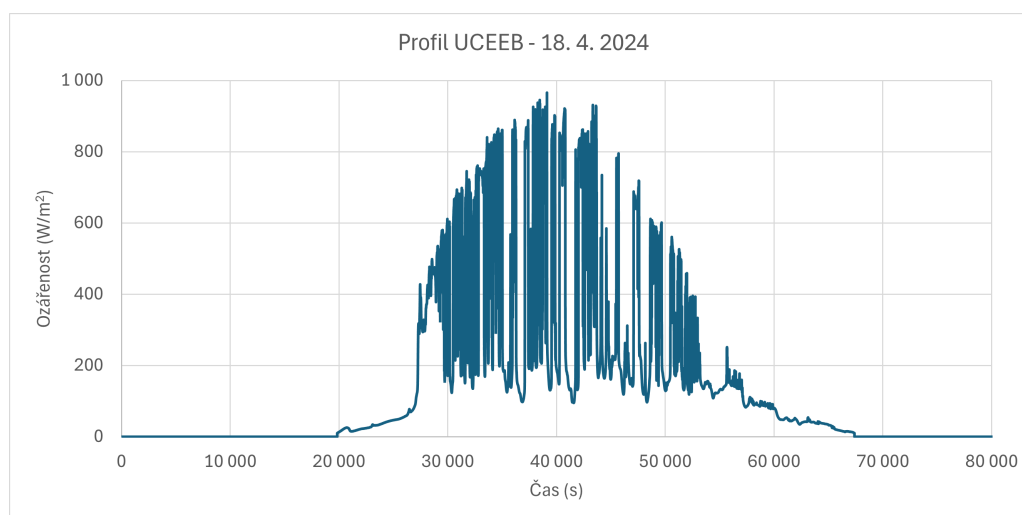
Testovací profil *Heavy Clouds* byl vytvořený pro simulaci oblačného dne. Časová závislost ozáření je zobrazena na obrázku 5.10. Časová závislost teploty v podstatě sleduje s menším zpožděním průběh výstupního výkonu a pro přehlednost není v obrázku zobrazena. Vzhledem k tomu, že se jedná o profil trvající půl dne, byla pro účely této zkoušky vybrána reprezentativní oblast od času 19 500 s až 21 100 s (celková doba měření 1 600 s).



Obrázek 5.10. Profil ozáření dle *Heavy Clouds*.

■ Testovací profil UCEEB

Časová závislost ozáření dle skutečně naměřených hodnot na budově UCEEB ze dne 18. 4. 2024 s jižní orientací a sklonem 30° je na obrázku 5.11. Časová závislost teploty v podstatě kopíruje s menším zpožděním průběh výstupního výkonu a opět není pro přehlednost v obrázku zobrazena. Vzhledem k tomu, že se jedná o profil trvající celý den, byla pro účely této zkoušky vybrána reprezentativní oblast od 33 300 s až 34 900 s (doba měření jako v předchozím případě 1 600 s).



Obrázek 5.11. Profil ozáření dle skutečně naměřených hodnot na budově UCEEB ze dne 18. 4. 2024 s jižní orientací a sklonem 30°.

■ 5.2.5 Spínání asymetrické zátěže

V domácnosti většinou není zátěž zcela symetrická, a tak se přesně této problematice věnuje měření spínání asymetrické zátěže. Programovatelná zátěž (G3) je nastavena tak, že vždy minutu odebírá proud 5 A (což dělá 1,2 kW při síťovém napětí) a další minutu je zátěž nulová. Těchto sepnutí bude během jednoho měření osm k odhalení typického chování hybridního měniče, připojené baterie (G4) a sítě (G1). Zaznamenávání dat provádí měřicí přístroj ZES Zimmer LMG670 se vzorkovací periodou 100 ms, aby bylo možné pozorovat dynamiku děje při spínání a vypínání zátěže s ohledem na doby reakce a přetoky nebo odběry ze sítě. Byly zkoumány čtyři různé varianty, ve kterých se kombinuje, jestli jsou přetoky povolené, nebo zakázané a jestli je solární simulátor (G2) aktivní, či nikoliv – viz tabulka 5.3. Při zapnutém solárním simulátoru jsou nastaveny parametry podle VACH2: $U_{MPP} = 620$ V, $P_m = 7\,500$ W a power level 0,2. V tomto měření bude také porovnáno, jaký vliv má upgrade firmwaru na doby reakce měniče.

	Přetoky povoleny	Přetoky zakázány
Simulátor aktivní	V1	V2
Simulátor nepracuje	V3	V4

Tabulka 5.3. Označení a popis jednotlivých variant měření asymetrické zátěže.

5.2.6 Výpadky sítě

Další dynamický děj, který byl v rámci měření zkoumán, je výpadek elektrické sítě. Výpadky sítě mohou nastat z důvodu poškození distribuční sítě nebo například v rámci plánované odstávky. K výpadkům sítě dochází více či méně často podle lokality instalace. V této práci byl výpadek sítě měřen tak, že byl shozen jistič na střídavém vstupu do měniče, což může být kdekoliv na přívodu (v budově, hlavní domovní skříni). Výpadek byl měřen pro stav, kdy má síť nekonečnou impedanci, k čemuž dojde vybavením ochrany (například nadproudové nebo obloukové). Výpadek sítě může také nastat z důvodu zkratu, nebo nízkým odporem.

Uvažovány byly dva odlišné případy výpadku sítě. První z nich je v případě, že spotřeba je před výpadkem zajišťována vybíjením baterie. Druhý případ je pro variantu, kdy je baterie vybita pod úroveň, ze které by mohla dodávat elektřinu do domácnosti, a tudíž je spotřeba plně kryta ze sítě. Obě varianty počítají s tím, že výpadek nastane v noci – tedy v okamžik, kdy fotovoltaika nevyrábí žádnou elektrickou energii, takže solární simulátor není aktivní.

Měnič je zatěžován (G3) pomocí přímotopu o výkonu 1 250 W připojeného na fázi L1. K záznamu tohoto přechodového děje je využit analyzátor výkonu Zimmer v režimu Transient tak, že je zachycen prudký pokles napětí na síti. V čase kolem tohoto poklesu se zaznamenají průběhy měřených veličin se vzorkovací periodou 0,1 ms. Každá varianta bude proměřena 5x. Cílem tohoto měření je zjistit, jak se měnič chová v případě výpadku sítě a jak dlouhá je časová prodleva do náběhu zálohy – podle datového listu měniče by měla být menší než 10 ms [14]. Také v tomto měření bude sledován vliv upgradu firmwaru na časové prodlevy měniče.

5.3 Výsledky

5.3.1 Euroúčinnost

Po zpracování naměřených hodnot byly zjištěny dílčí statické účinnosti MPPT a konverzní účinnosti za každý 10minutový interval. Níže v tabulce 5.4 (respektive 5.5) jsou uvedeny naměřené výkony a z nich vypočtené statické účinnosti MPPT a účinnosti konverze pro vstup PVS1 (PVS2). Z této tabulky se pak vyberou všechny účinnosti s power levely, které jsou nutné pro výpočet euroúčinnosti.

	Power level	0,05	0,1	0,2	0,25	0,3	0,5	0,75	1
VACH1	P_{DC} (W)	27,6	565	1 140	1 430	1 714	2 860	4 286	5 709
	P_{AC} (W)	8,5	516	1 077	1 360	1 640	2 759	4 146	5 527
	η_{konv} (%)	30,95	91,24	94,48	95,06	95,68	96,48	96,75	96,80
	η_{MPPT} (%)	10,44	98,72	99,45	99,89	99,76	99,93	99,92	99,93
VACH2	P_{DC} (W)	49,5	740	1 492	1 862	2 239	3 731	5 595	7 457
	P_{AC} (W)	28,6	690	1 431	1 791	2 161	3 624	5 444	7 255
	η_{konv} (%)	57,67	93,30	95,88	96,23	96,51	97,13	97,31	97,29
	η_{MPPT} (%)	15,42	99,09	99,85	99,66	99,88	99,87	99,89	99,93
VACH3	P_{DC} (W)	69,8	732	1 486	1 865	2 236	3 735	5 600	7 472
	P_{AC} (W)	45,6	691	1 432	1 806	2 171	3 647	5 473	7 301
	η_{konv} (%)	65,36	94,41	96,32	96,83	97,13	97,65	97,73	97,70
	η_{MPPT} (%)	21,22	98,17	99,46	99,83	99,74	99,95	99,89	99,94

Tabulka 5.4. Naměřené výkony a vypočtené účinnosti konverze a MPPT pro PVS1.

	Power level	0,05	0,1	0,2	0,25	0,3	0,5	0,75	1
VACH1	P_{DC} (W)	161	502	1 142	1 427	1 712	2 857	4 284	5 712
	P_{AC} (W)	121	454	1 083	1 363	1 643	2 762	4 150	5 536
	η_{konv} (%)	75,48	90,33	94,84	95,52	95,96	96,67	96,87	96,93
	η_{MPPT} (%)	56,32	87,87	99,67	99,65	99,69	99,84	99,87	99,91
VACH2	P_{DC} (W)	147	365	1 489	1 851	2 238	3 730	5 597	7 457
	P_{AC} (W)	103	315	1 427	1 783	2 163	3 625	5 446	7 254
	η_{konv} (%)	70,34	86,29	95,84	96,32	96,66	97,19	97,30	97,28
	η_{MPPT} (%)	39,55	48,97	99,49	99,03	99,77	99,79	99,89	99,90
VACH3	P_{DC} (W)	108	351	1 486	1 864	2 234	3 725	5 597	7 467
	P_{AC} (W)	72,6	308	1 433	1 804	2 170	3 636	5 471	7 293
	η_{konv} (%)	67,17	87,54	96,42	96,81	97,14	97,62	97,75	97,67
	η_{MPPT} (%)	28,84	47,48	99,39	99,72	99,66	99,68	99,82	99,87

Tabulka 5.5. Naměřené výkony a vypočtené účinnosti konverze a MPPT pro PVS2.

Účinnost MPPT

MPP tracker nepracuje se v oblasti nižších power levelů stabilně, což vede k nízké statické účinnosti MPPT, jak je patrné z tabulek 5.4 a 5.5. Pro vstup PVS1 je patrný výraznější pokles této účinnosti až na nejnižším měřeném power levelu (0,05). Na vstupu PVS2 lze pozorovat výraznější vybočení již při power levelu 0,1. Na vyšších power levelech již oba vstupy vykazují stabilní chování a dosažená účinnost je pak vždy vyšší než 99 %.

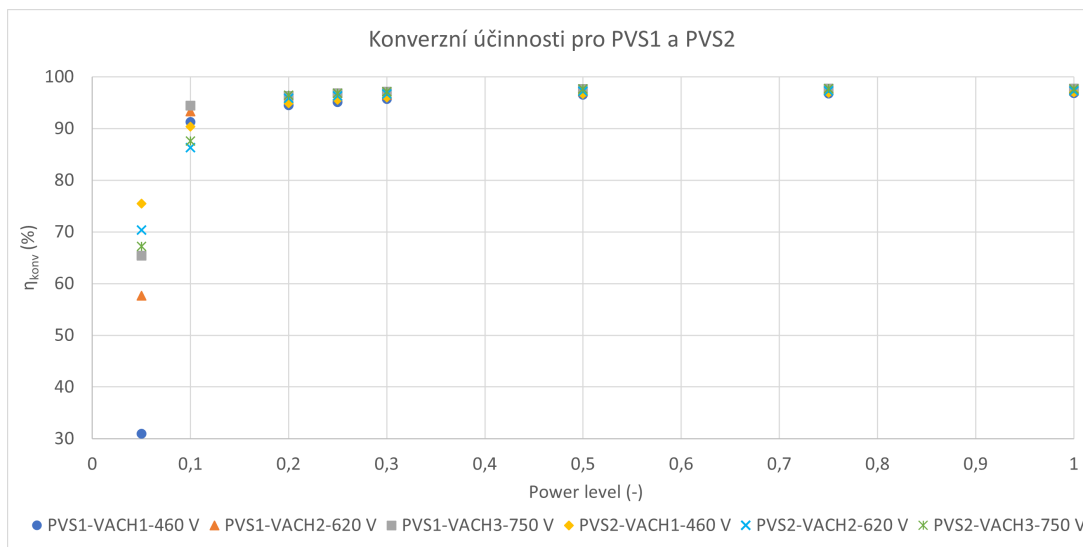
Vypočtené statické MPPT euroúčinnosti vstupů PVS1 a PVS2 pro jednotlivé měřené VACH jsou patrné v tabulce 5.6. MPP tracker na vstupu PVS1 dosahuje vyšších účinností u VACH s vyšší napětím. Oproti tomu na vstupu PVS2 je patrný opačný trend, a dokonce pro VACH1 byla statická MPPT euroúčinnost nejvyšší z měřených variant ($\eta_{euro,MPPT,PVS2} = 97,79$ %).

Označení	U_{MPP}	P_m	$\eta_{euro,MPPT,PVS1}$	$\eta_{euro,MPPT,PVS2}$
VACH1	460 V	5 750 W	97,09 %	97,79 %
VACH2	620 V	7 500 W	97,30 %	94,91 %
VACH3	750 V	7 500 W	97,39 %	94,42 %

Tabulka 5.6. Statické MPPT euroúčinnosti vstupů PVS1 a PVS2.

Účinnost konverze

Závislost konverzních účinností vstupů PVS1 a PVS2 je zobrazena v grafu na obrázku 5.12. Z tohoto grafu je patrné, že při nižším power levelu vychází konverzní účinnost zásadně hůře než pro vyšší power level, přičemž od power levelu 0,2 a více je závislost téměř konstantní. Průběhy konverzních účinností jsou závislé na zvolené VACH. Pro PVS1 je nejvyšší konverzní účinnosti dosaženo pro VACH3 o parametrech $U_{MPP} = 750$ V a $P_m = 7 500$ W a nejnižší účinnosti pro VACH1 o parametrech $U_{MPP} = 460$ V a $P_m = 5 750$ W. Pro PVS2 je závislost opačná a nejlepší výsledky byly zjištěny pro VACH1 o nejnižším napětí.



Obrázek 5.12. Konverzní účinnost při měření euroúčinnosti vstupů PVS1 a PVS2.

Z uvedených konverzních účinností byly pomocí váhových faktorů vypočteny konverzní euroúčinnosti, které jsou uvedeny v tabulce 5.7. Z tabulky je patrné, že mírně vybočuje jedna hodnota – vstup PVS1 při VACH1. Tato skutečnost je jistě dána silně nestabilním chováním MPP trackeru v oblasti nízkého power levelu, což bylo během měření této charakteristiky pozorováno.

Označení	U_{MPP}	P_m	$\eta_{euro,konv,PVS1}$	$\eta_{euro,konv,PVS2}$
VACH1	460 V	5 750 W	93,92 %	95,52 %
VACH2	620 V	7 500 W	95,52 %	95,40 %
VACH3	750 V	7 500 W	96,27 %	95,91 %

Tabulka 5.7. Konverzní euroúčinnosti vstupů PVS1 a PVS2.

■ Celková účinnost

Celková euroúčinnost vstupů PVS1 a PVS2 je dána součinem jejich statické MPPT euroúčinnosti a konverzní euroúčinnosti uvedených výše v tabulkách 5.6 a 5.7. V tabulce 5.8 jsou uvedeny celkové euroúčinnosti pro jednotlivé měřené VACH vstupů PVS1 a PVS2.

Označení	U_{MPP}	P_m	$\eta_{euro,celk,PVS1}$	$\eta_{euro,celk,PVS2}$
VACH1	460 V	5 750 W	91,19 %	93,29 %
VACH2	620 V	7 500 W	92,94 %	90,66 %
VACH3	750 V	7 500 W	93,76 %	90,56 %

Tabulka 5.8. Celkové euroúčinnosti vstupů PVS1 a PVS2.

Z výše uvedených tabulek a grafů lze konstatovat, že vstup PVS2 vykazuje stabilnější chování při nejnižším měřeném power levelu, takže dílčí účinnosti jsou při tomto power levelu vyšší. Již od power levelu 0,1 je však vyšší účinnost téměř výhradně měřena na vstupu PVS1, což se pak také projeví v celkové euroúčinnosti. Celková euroúčinnost

na PVS1 vychází o 2 až 3 % příznivěji než na PVS2 pro VACH2 a VACH3, pouze pro VACH1 je vhodnější použití vstupu PVS2. Z toho plyne závěr, že pokud má PV elektrárna dva stringy, přičemž jeden obsahuje větší množství PV modulů (tedy má vyšší napětí), vyplatí se tento string přivést ke vstupu PVS1 a string o nižším napětí ke vstupu PVS2. Pokud se tento měnič provozuje s PV elektrárnou o jednom stringu, pro vyšší napětí je výhodnější použití vstupu PVS1. Pro zjištění přesné hranice napětí stringu, pro které je již výhodnější zapojení do PVS2 než do PVS1, by bylo nutné proměřit více VACH s napětími mezi 460 V a 620 V.

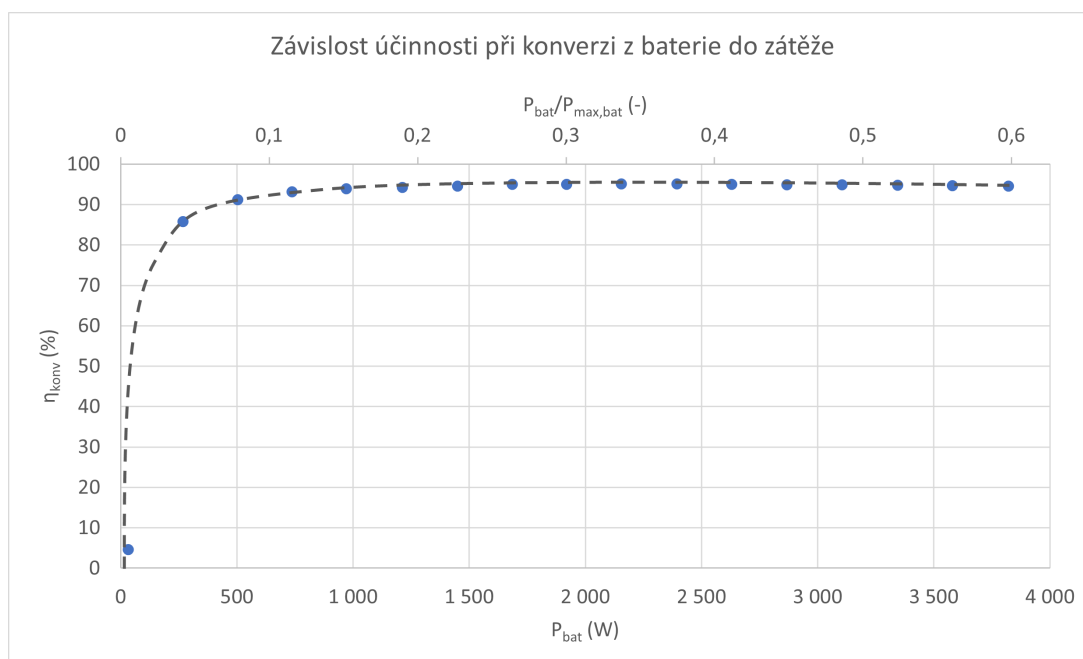
5.3.2 Účinnost konverze

Konverze z baterie do zátěže

Z naměřených dat byl vyfiltrován přechodový děj, který nastává při každém nárůstu odběru proudu. Odběr proudu 16 A celé 2 minuty měnič zvládl dodávat, ale jakmile byl proud navýšen na hodnotu 17 A, měnič přešel do chybového režimu.

Na obrázku 5.13 je graficky znázorněna závislost konverzní účinnosti na výkonu z baterie. Na vedlejší vodorovné ose je vyjádřen poměr výkonu z baterie ku maximálnímu výkonu, kterým se baterie dokáže vybíjet při komunikaci s měničem ($P_{\max, \text{bat}}$).

V ustálené části od výkonu z baterie 1 000 W a více, vychází konverzní účinnost přibližně 95 %, přičemž maximum bylo zjištěno při odběru 9 A (výkonu cca 2 100 W). S dalším zvyšováním zátěže docházelo k nezatelnému poklesu konverzní účinnosti. Při menších výkonech než 500 W je patrný silný pokles účinnosti. Koleny této charakteristiky bylo proměřeno s menším krokem, v grafu jsou vyneseny pouze hodnoty průměrované s krokem 1 A.



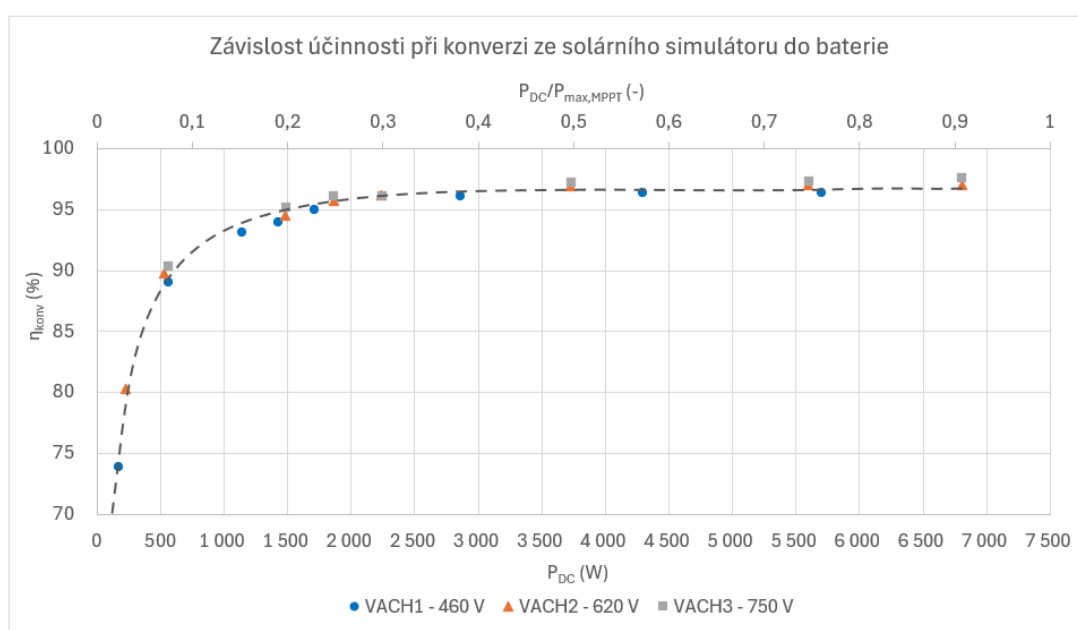
Obrázek 5.13. Konverzní účinnost při toku elektrické energie z baterie do zátěže. Hlavní vodorovná osa – výkon z baterie; vedlejší vodorovná osa – poměr výkonu z baterie ku maximálnímu vybíjecímu výkonu baterie; svislá osa – konverzní účinnost.

Konverze ze solárního simulátoru do baterie

Konverzní účinnost při toku elektrické energie ze solárního simulátoru do baterie byla měřena pro 3 různé VACH. V solárním simulátoru se snižoval power level od 1 do 0,05 (pro VACH3 se nepovedlo MPP trackeru chytit na nejnižším power levelu).

Na obrázku 5.14 je graficky znázorněna závislost konverzní účinnosti (s potlačením nuly) na vstupním výkonu do měniče. Na vedlejší vodorovné ose je vyjádřen poměr vstupního výkonu ku maximálnímu výkonu, který zvládne jeden MPPT ($P_{\max,MPPT}$).

V ustálené části od vstupního výkonu 3 000 W a více, dosahuje konverzní účinnost přibližně 97 % (nepatrně lepších výsledků bylo dosaženo u nastavení VACH s vyšším U_{MPP}). Také v koleni této charakteristiky je nepatrně vyšší účinnost dosažena u VACH s vyšší U_{MPP} . Ve strmé části charakteristiky (při nízkém vstupním výkonu – power level 0,05) je již účinnost pro VACH2 o více než 6 % vyšší než pro VACH1.



Obrázek 5.14. Konverzní účinnost při toku elektrické energie ze solárního simulátoru do baterie. Hlavní vodorovná osa – vstupní výkon do měniče; vedlejší vodorovná osa – poměr vstupního výkonu ku maximálnímu výkonu MPPT; svislá osa – konverzní účinnost.

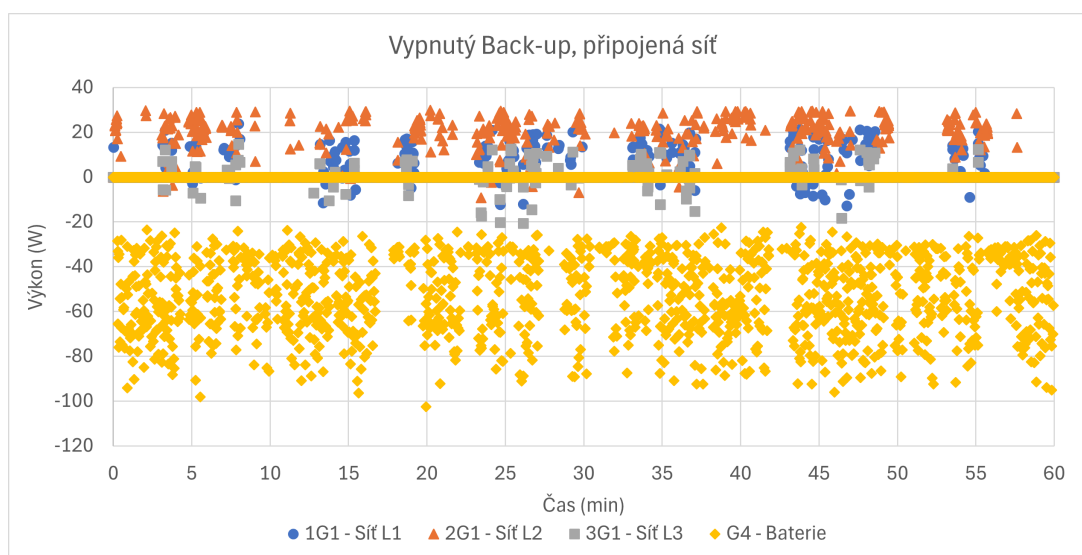
Zajímavé je také porovnání konverzní účinnosti ze solárního simulátoru do baterie s předchozím měřením, kde se ověřovala konverze z baterie do zátěže. V ustálené části obou těchto závislostí si lépe vede konverze ze solárního simulátoru do baterie. Tato skutečnost bude dána tím, že na DC/DC měniči, který je mezi DC vstupem měniče a výstupem do baterie, budou nižší ztráty než na DC/AC měniči, který je na cestě mezi baterií a zátěží.

5.3.3 Samospotřeba

Samospotřeba byla v souladu s popsány metodami (sekce 5.2.3) po dobu jedné hodiny měřena pro tři různé varianty, které jsou popsány níže. Jedním měřením přes noc po dobu delší než 12 hodin bylo ověřeno, že ani v delším časovém intervalu nedochází k větším výkonovým odchýlkám, a tak doba měření jedné hodiny je naprosto dostačující. Byla také snaha provést měření při vypnuté záloze a odpojené síti, avšak v tomto nastavení se měnič uvede do režimu chyby, kde nemá žádnou spotřebu. Z tohoto režimu se dá dostat připojením sítě nebo tím, že se zapne Back-up a spustí solární simulátor (potřebuje tedy kromě baterie ještě další zdroj energie).

Vypnutý Back-up, připojená síť

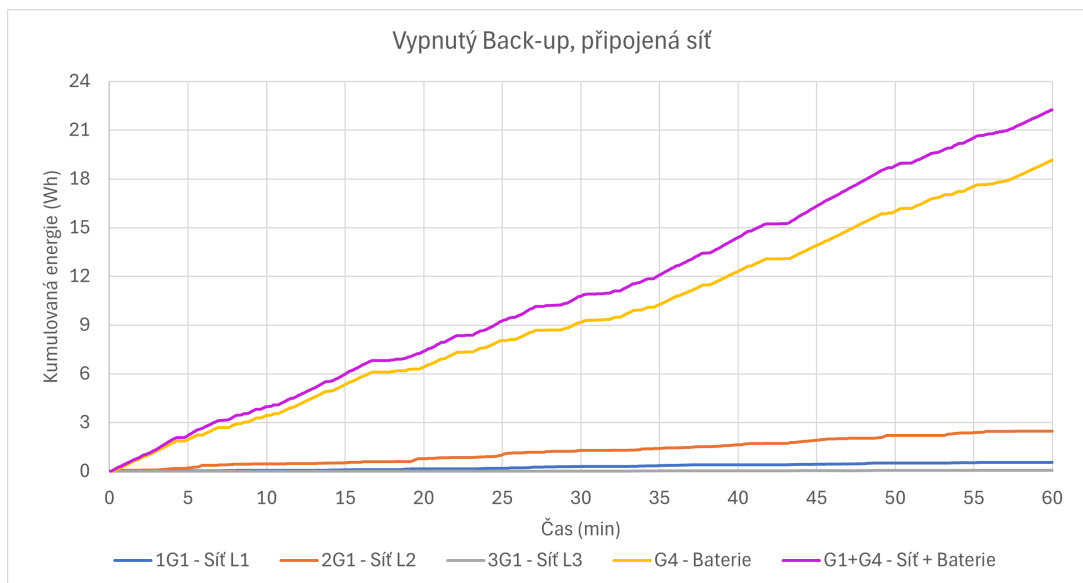
Toto nastavení ověřuje spotřebu o hodnotě 15 W, která je uvedena v datovém listu měniče. Měřené výkony na baterii a na jednotlivých fázích sítě jsou vidět na obrázku 5.15. Záporné hodnoty pro baterii (G4) znamenají, že se baterie vybíjí, a záporné hodnoty na síti (G1) značí přetok do sítě (viz tabulka 5.1).



Obrázek 5.15. Okamžité výkony při měření samospotřeby pro vypnutý Back-up a připojenou síť.

Z grafu na obrázku 5.15 je patrné, že na síti dochází nejen k odběrům, ale také ke krátkodobým přetokům, přestože není žádná výroba ze solárního simulátoru. Baterie je po celou dobu měření pouze vybíjena, nikdy výkon nevyleze do kladných hodnot. Drtivá většina samospotřeby je kryta z baterie, ze sítě si měnič bere energie mnohem méně. Maximální okamžitý výkon byl naměřen 103 W a byl celý z baterie. Průměrný výkon za sledované období byl 22,3 W, což je o 7,3 W (téměř 50 %) více, než udává výrobce.

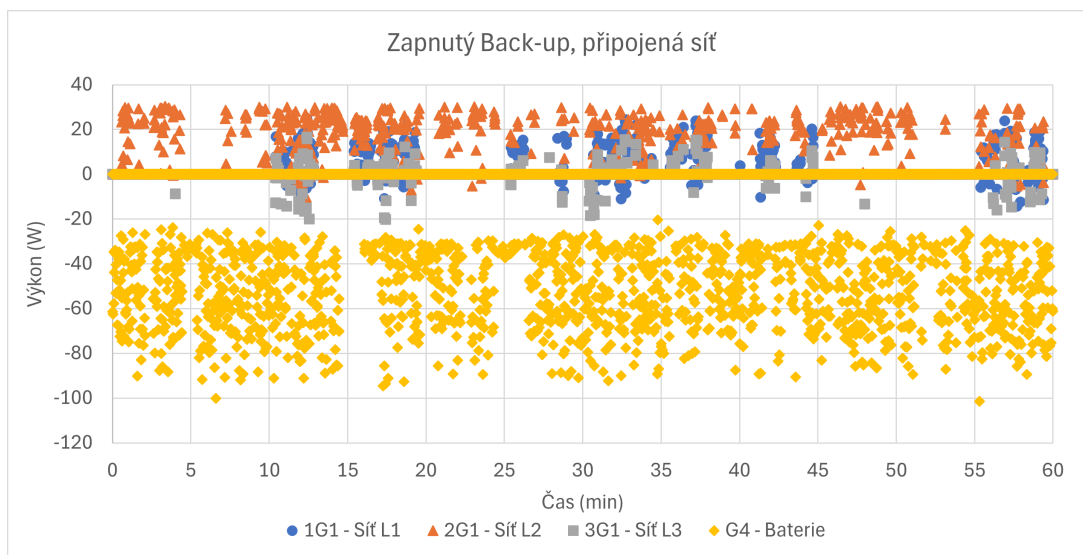
Graf kumulované energie za sledované období je na obrázku 5.16. Z tohoto grafu je více vidět rozložení výkonu po jednotlivých fázích sítě a také, že baterie skutečně kryje většinu (86 %) samospotřeby měniče. Co se týče sítě, tak nejvíce energie odebírá měnič na fázi L2 (11 %), méně pak na L1 (2 %) a téměř nic na L3 (1 %).



Obrázek 5.16. Kumulovaná energie během 1 hodiny měření samospotřeby pro vypnutý Back-up a připojenou síť.

Zapnutý Back-up, připojená síť

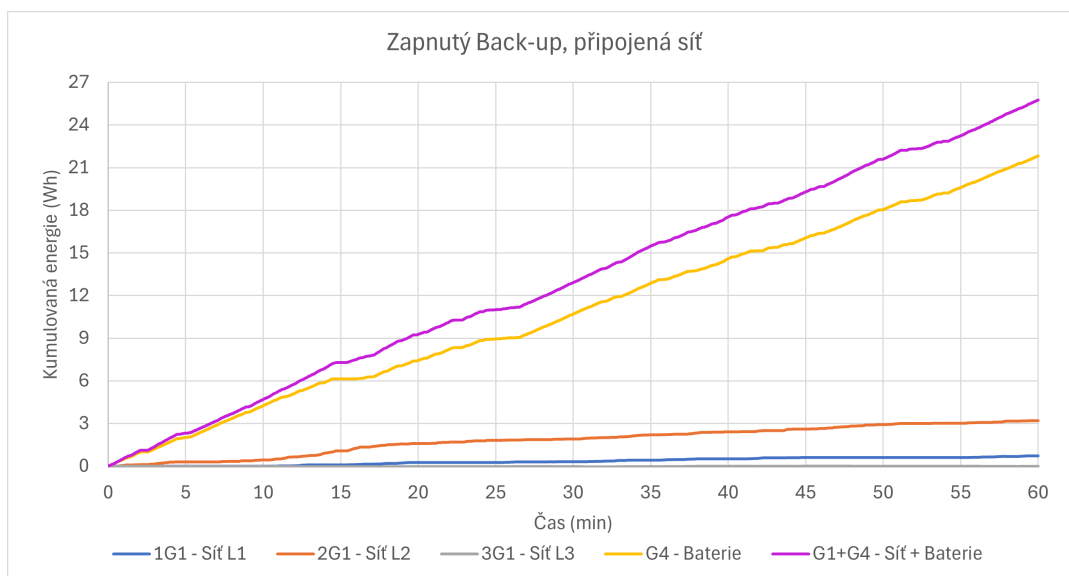
Pro zapnutý Back-up a připojenou síť byla očekávána větší spotřeba než pro vypnutý Back-up. Měřené výkony na baterii a na jednotlivých fázích sítě jsou vidět na obrázku 5.17. Záporný výkon u baterie (G4) opět značí vybíjení a záporné hodnoty na síti (G1) zase přetok.



Obrázek 5.17. Okamžité výkony při měření samospotřeby pro zapnutý Back-up a připojenou síť.

Graf na obrázku 5.17 se velmi podobá předchozímu grafu z obrázku 5.15. I zde je patrné, že na síti dochází nejen k odběrům, ale také ke krátkodobým přetokům. Baterie je po celou dobu měření pouze vybíjena a drtivá většina samospotřeby je kryta

právě z baterie. Maximální okamžitý výkon byl naměřen 101,5 W a byl opět celý z baterie. Průměrný výkon za sledované období byl 25,8 W, tedy pouze neznatelně vyšší (konkrétně o 3,5 W) než pro vypnutý Back-up.

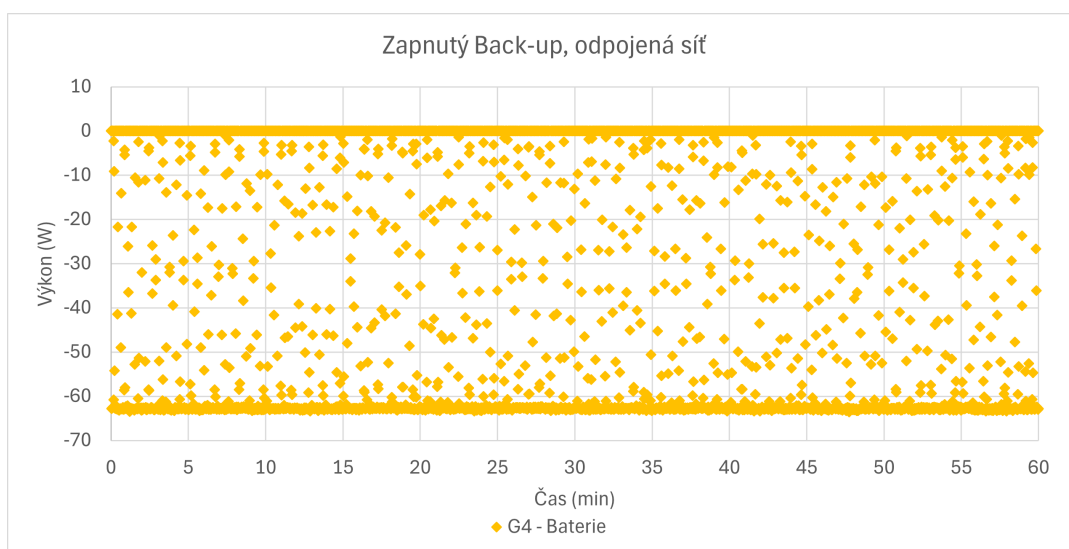


Obrázek 5.18. Kumulovaná energie během 1 hodiny měření samospotřeby pro zapnutý Back-up a připojenou síť.

Graf kumulované energie za sledované období je na obrázku 5.18. I v tomto případě je většina samospotřeby měniče kryta z baterie (85 %) a na síti je největší odběr z fáze L2 (12 %), méně pak z L1 (3 %) a v podstatě nulový odběr z L3.

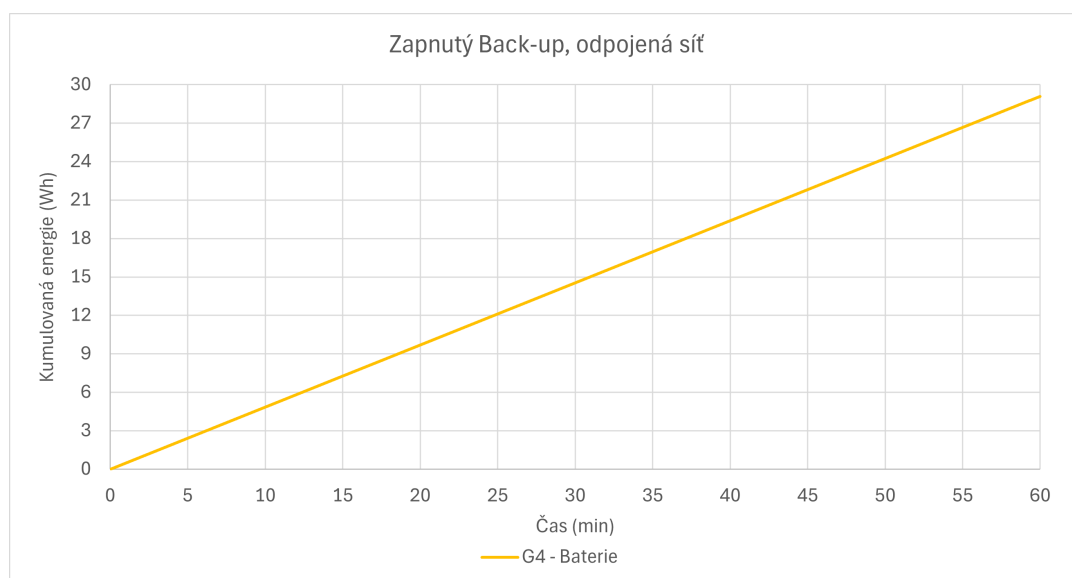
■ Zapnutý Back-up, odpojená síť

Pro zapnutý Back-up a odpojenou síť je jediným zdrojem energie pro chod měniče baterie (G4). Měřené hodnoty okamžitého výkonu na baterii jsou vidět na obrázku 5.19.



Obrázek 5.19. Okamžitý výkon baterie při měření samospotřeby pro zapnutý Back-up a odpojenou síť.

Z grafu na obrázku 5.19 je patrné odlišné chování baterie než v předchozích případech. Vybíjecí výkon se pohybuje v rozmezí 0 až 63,5 W, což u připojené sítě nebylo. V první řadě je výrazný rozdíl ve špičkové hodnotě a pak taky to, že u připojené sítě bylo nevyužitá pásma 0 až 20 W, zatímco při odpojené síti je využito celé pásmo 0 až 63,5 W téměř rovnoměrně. Průměrný výkon za sledované období byl 29,1 W. Jedná se o nejvyšší hodnotu z testovaných variant, jelikož síť je odpojena. Měnič musí neustále vytvářet výstup o síťových parametrech, což má za následek vyšší spotřebu.



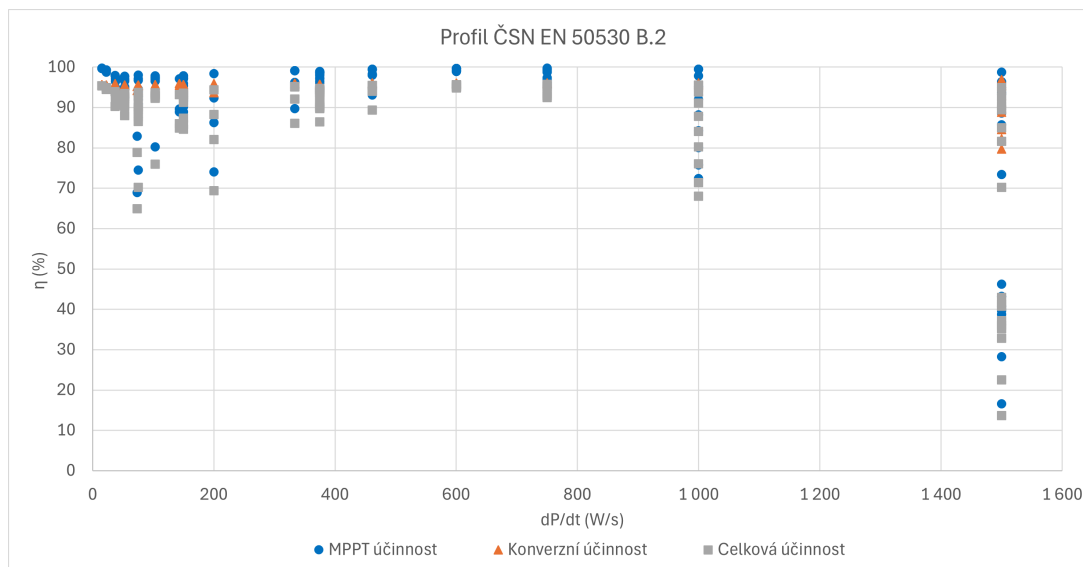
Obrázek 5.20. Kumulovaná energie během 1 hodiny měření samospotřeby pro zapnutý Back-up a odpojenou síť.

Graf kumulované energie za sledované období pro tuto variantu je na obrázku 5.20. Jelikož je síť odpojená, kumulovaná energie na jednotlivých fázích je nulová, a tak v grafu vůbec není zobrazena. Do samospotřeby promlouvá pouze baterie, na které jsou výkony rozloženy téměř rovnoměrně. To ve výsledku znamená prakticky lineární časovou závislost kumulované energie končící v hodnotě 29,1 Wh.

■ 5.3.4 Změna ozáření

■ Testovací profil ČSN EN 50530 B.2

Jelikož je tento testovací profil jasně definován úseky o stejné frekvenci ramp, lze zde provést vyhodnocení účinností pro jednotlivé rychlosti změny výkonu dP/dt . Grafická závislost účinností na rychlosti změny výkonu je vyobrazena na obrázku 5.21. Z tohoto grafu je jasně patrná závislost MPP trackeru na dynamice systému. Pokud je změna výkonu rychlá, $\eta_{\text{MPPT, dyn}}$ ztelně kolísá, což se ve výsledku projeví také v celkové účinnosti. Při nejrychlejší změně výkonu 1 500 W/s osciluje dynamická účinnost MPPT mezi 16,6 až 98,8 %.



Obrázek 5.21. Znázornění závislosti účinností na rychlosti změny výkonu pro testovací profil ČSN EN 50530 B.2.

Z kumulované energie testovacího profilu ČSN EN 50530 B.2 pro rychlosti testu 1x a 10x byly vypočteny jednotlivé účinnosti (viz tabulka 5.9). Z této tabulky je opět zřejmá závislost dynamické účinnosti MPPT na rychlosti změny výkonu. Konverzní účinnosti vyšly pro obě rychlosti testů srovnatelné, avšak přibližně o 2 % menší než v případě statické konverze měřené v sekci 5.3.2, za což může pravděpodobně dynamika celého testu.

Rychlost testu	$\eta_{\text{MPPT,dyn}}$	η_{konv}	η_{celk}
1x	96,74 %	95,08 %	91,98 %
10x	89,78 %	94,85 %	85,15 %

Tabulka 5.9. Vypočtené účinnosti profilu ČSN EN 50530 B.2 pro rychlost testu 1x a 10x.

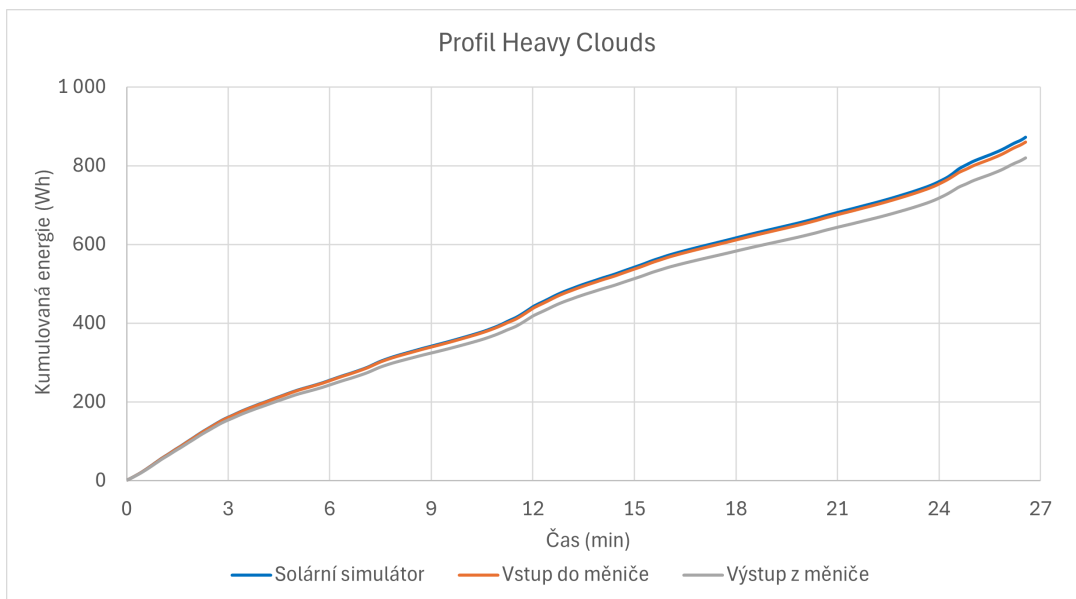
■ Testovací profil *Heavy Clouds*

Tento testovací profil nemá jasně definovány úseky o stejných rychlostech změny výkonu, a tak jsou v této variantě vyhodnoceny účinnosti pro celou sledovanou oblast (téměř 27 minut). Graf kumulované energie poskytované solárním simulátorem, vstupující do měniče a vystupující z měniče pro testovací profil *Heavy Clouds* je zobrazen na obrázku 5.22.

Z kumulované energie byly následně dopočteny jednotlivé účinnosti, které jsou pro přehlednost zobrazeny v tabulce 5.10. V porovnání s variantou testovacího profilu ČSN EN 50530 B.2 zde vychází vyšší účinnosti, což je dáno pomalejšími změnami ozáření této varianty.

$\eta_{\text{MPPT,dyn}}$	η_{konv}	η_{celk}
98,41 %	95,33 %	93,81 %

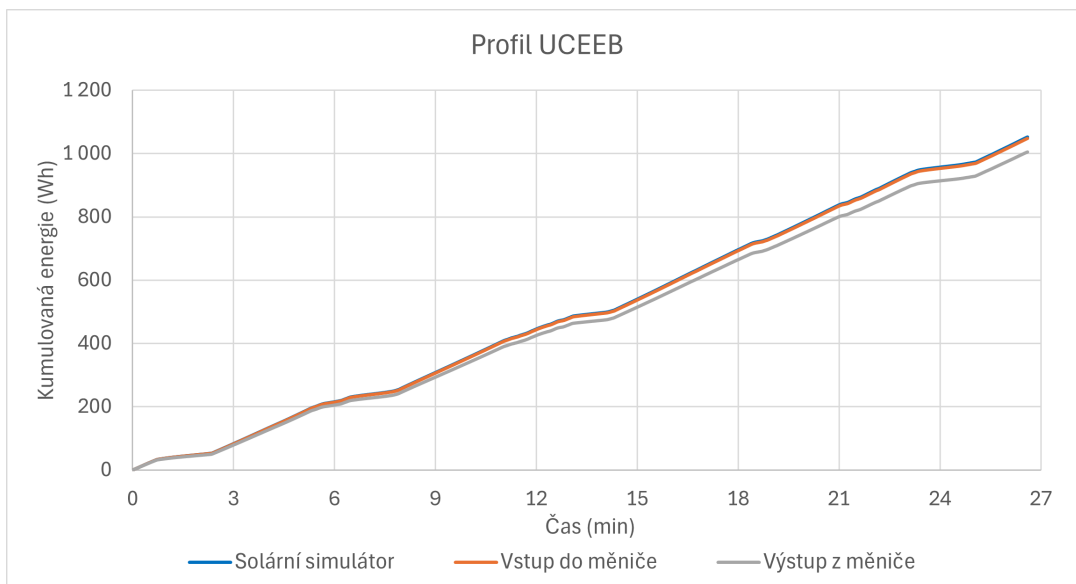
Tabulka 5.10. Vypočtené účinnosti profilu *Heavy Clouds*.



Obrázek 5.22. Kumulovaná energie poskytovaná solárním simulátorem, vstupující do měniče a vystupující z měniče pro testovací profil *Heavy Clouds*.

■ Testovací profil *UCEEB*

Ani v posledním testovacím profilu nejsou jasně definovány úseky o stejných rychlostech změny výkonu, jelikož vstupními daty byly skutečně naměřené ozáření a teploty. Tato varianta tedy hodnotí účinnosti pro celou sledovanou oblast, stejně jako varianta s profilem *Heavy Clouds*. Graf kumulované energie pro testovací profil *UCEEB* je na obrázku 5.23.



Obrázek 5.23. Kumulovaná energie poskytovaná solárním simulátorem, vstupující do měniče a vystupující z měniče pro testovací profil *UCEEB*.

$\eta_{MPPT,dyn}$	η_{konv}	η_{celk}
99,64 %	95,88 %	95,53 %

Tabulka 5.11. Vypočtené účinnosti profilu *UCEEB*.

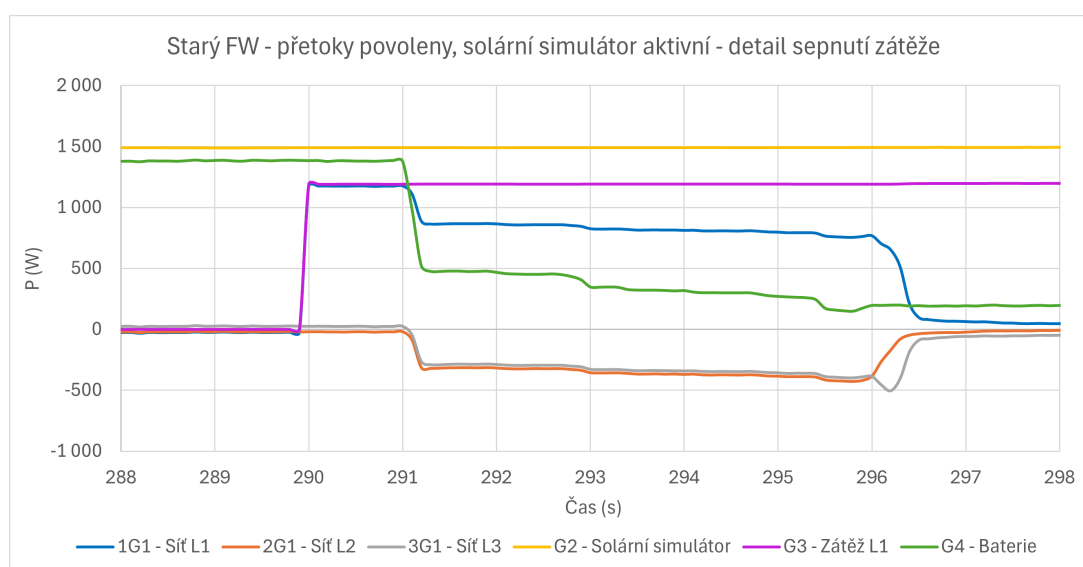
Z hodnot kumulované energie během sledovaného období byly dopočteny jednotlivé účinnosti (viz tabulka 5.11). Opět je zde v porovnání s variantou testovacího profilu ČSN EN 50530 B.2 pomalejší změna ozáření, což se projeví vyšší účinností. Účinnosti této varianty jsou srovnatelné s profilem *Heavy Clouds*.

5.3.5 Spínání asymetrické zátěže

Cílem této zkoušky bylo ověřit vliv spínání a vypínání zátěže s ohledem na doby reakce měniče a přetoky nebo odběry ze sítě. Zkouška byla provedena se starším i novějším firmwarem, který by měl vykazovat kratší odezvy při dynamických jevech, takže je v této sekci uvedeno i porovnání z tohoto hlediska. Grafy výkonů při spínání a vypínání zátěže budou pro svou podobnost uvedeny jen pro vybrané varianty, pokaždé bude však popsáno, k čemu při spínání a vypínání dochází.

V1 – Přetoky povoleny, solární simulátor aktivní

Příklad jednoho typického sepnutí zátěže s povolenými přetoky a aktivním solárním simulátorem je na obrázku 5.24. Po sepnutí je asymetrická zátěž asi 1 s plně kryta ze sítě (konkrétně z fáze L1) a baterie je nadále dobíjena, jelikož ještě nestihla zareagovat na tuto změnu. Následně poklesne dobíjecí výkon baterie téměř na třetinu, přičemž se tento pokles projeví rovnoměrně na fázích L1, L2 a L3 na síti – na L1 se zmírní odběr ze sítě, na L2 a L3 bude přetok. Tento stav trvá přibližně 5 s až se výkony ustálí na nule, během kterých je na fázích sítě L2 a L3 přetok energie 0,4 Wh z každé fáze. Celý přechodový děj tedy trvá asi 6,5 s a i po něm (když je sepnutá zátěž) je baterie dobíjena přebytečným výkonem, který vyrábí solární simulátor a nespoteřovává zátěž.

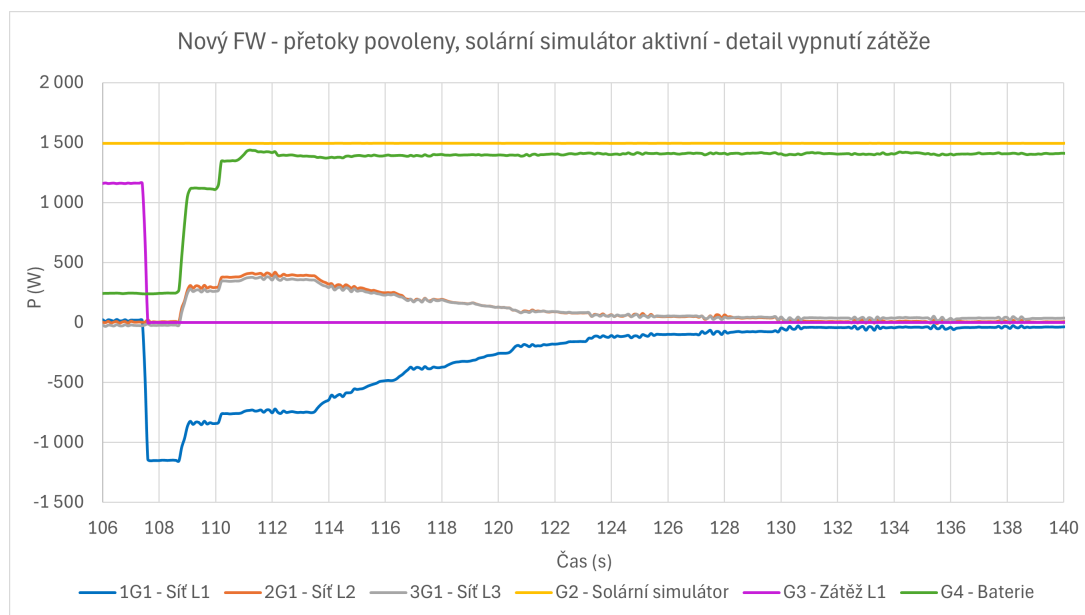


Obrázek 5.24. Sepnutí asymetrické zátěže pro povolené přetoky a aktivní solární simulátor se starým firmwarem.

Vypnutí asymetrické zátěže v této variantě trvá delší dobu než sepnutí. Po dobu cca 1 s je na fázi L1 přetok do sítě o velikosti vypnuté zátěže. Dobíjecí výkon baterie začne po reakční době vypnutí zátěže postupně růst až na maximální hodnotu, což trvá něco málo přes 2 s. Na L2 a L3 je v okamžiku zareagování baterie odběr, který v součtu kompenzuje přetok na L1, což trvá a postupně se zmenšuje asi 10 s, než dojde k ustálení na nulové hodnotě výkonu na všech fázích sítě. Přetok energie na fázi L1 během celého procesu vypnutí je 2,3 Wh (více než 2násobek součtu přetoků z fází L2 a L3 při spínání).

Po aktualizaci firmwaru bylo sledováno pár změn při spínání i vypínání asymetrické zátěže. Při spínání je reakční doba opět cca 1 s, během které je zátěž plně pokryta ze sítě (L1). Po reakční době dojde ke skokovému poklesu nabíjení baterie nižším výkonem, přičemž se tento skokový pokles opět rovnoměrně rozdělí na třetiny mezi všechny tři fáze sítě. To znamená, že na L1 už není tak velký odběr a na L2 a L3 je v součtu stejně velký přetok jako je odběr na L1, což trvá asi 5 s, během kterých přeteče do sítě po L2 a L3 dohromady energie 0,9 Wh.

Proces vypínání se aktualizací firmwaru poměrně změnil, a tak bude pro ilustraci zobrazen i pomocí obrázku 5.25. Reakční doba je opět asi 1 s, během které je na fázi L1 přetok o velikosti vypnuté zátěže. Pak vzroste nabíjení baterie na plný výkon, což se projeví rovnoměrně na síti – na L1 už není tak velký přetok a na L2 a L3 dochází k odběru, který v součtu kompenzuje právě přetok na L1. Úplné ustálení celého přechodového děje trvá kolem 30 s, během kterého je na fázi L1 přetok 2,7 Wh a z fází L2 a L3 se odebere celkem 2,2 Wh.

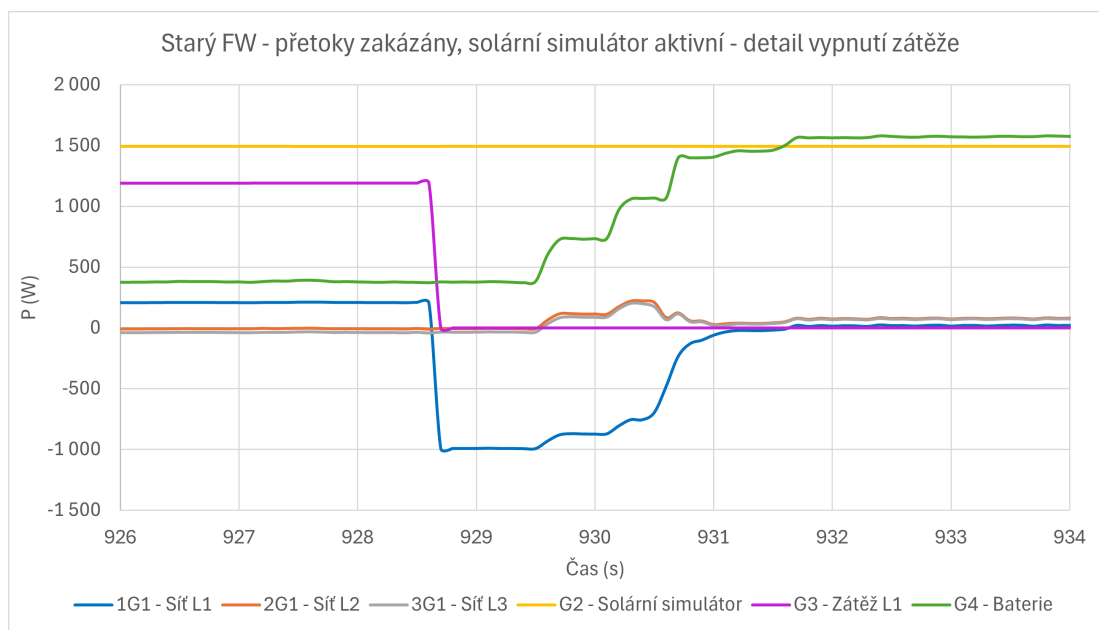


Obrázek 5.25. Vypnutí asymetrické zátěže pro povolené přetoky a aktivní solární simulátor s novým firmwarem.

■ V2 – Přetoky zakázány, solární simulátor aktivní

Sepnutí zátěže probíhá podobně jako ve variantě V1, oproti které se tato varianta liší tím, že má zakázané přetoky. První rozdíl je v kratší reakční době, která zde trvá pouze 0,5 s, a s ní související celkové době přechodového jevu. Další odlišností je to, že baterie je před sepnutím dobíjena výkonem větším než poskytuje solární simulátor, což měnič dělá pro jistotu, aby nedocházelo k případným přetokům. Poslední rozdíl je pak ve snaze měniče omezit přetok na fázích L2 a L3, což se mu daří snížit na polovinu (0,2 Wh). Celý přechodový děj trvá v průměru 5 s a baterie je neustále dobíjena přebytečným výkonem i při sepnuté zátěži.

Vypnutí lze pozorovat níže na obrázku 5.26. Proces je opět velmi podobný variantě V1, avšak trvá kratší dobu (v průměru 3,4 s), jelikož se měnič snaží omezit přetoky, které jsou při vypínání na L1. Reakční doba trvá 1 s a pak se začne dobíjet baterie a postupně růst dobíjecí výkon, což sníží přetok na L1 a úměrně k tomu vzroste odběr z L2 a L3 tak, aby vyvážil přetok na L1. Nejpozději do 4 s dojde k ustálení děje, tudíž je přetok na L1 znatelně omezen na 0,5 Wh. Na obrázku je také vidět, že pro zakázané přetoky je baterie dobíjena větším výkonem, než který poskytuje solární simulátor (část energie se tedy odebírá ze sítě), aby nedocházelo k případným přetokům.



Obrázek 5.26. Vypnutí asymetrické zátěže pro zakázané přetoky a aktivní solární simulátor se starým firmwarem.

Po aktualizaci firmwaru je reakční doba sepnutí nepatrně delší (1 s), ale celková doba přechodového děje trvá pouze 4,5 s. Vlivem toho je po aktualizaci sledováno nižších hodnot odběrů a přetoků. Baterii po sepnutí zátěže klesne nabíjecí výkon na rozdíl hodnot výkonu solárního simulátoru a výkonu zátěže (při zanedbání ztrát). Na fázi L1 je i po ustálení přechodového děje v některých případech sledován nenulový, avšak velmi malý, odběr.

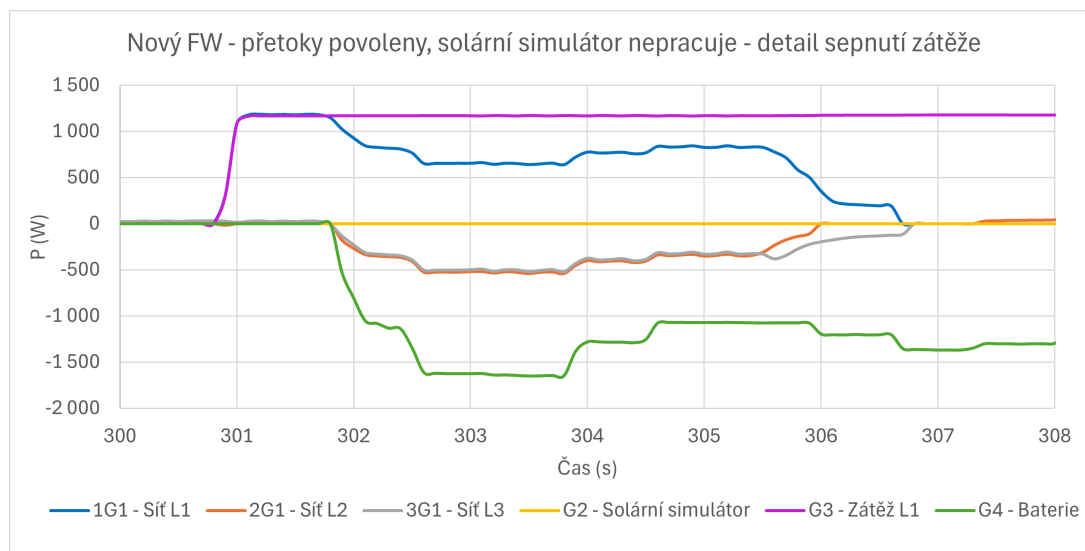
Při vypnutí po aktualizaci je reakční doba asi 0,5 s, během které je přetok na fázi L1. Poté zareaguje baterie a začne narůstat dobíjecí výkon (většinou dvoustupňově, poprvé na cca polovinu maximálního výkonu) a do další 1,5 s přetok na L1 vymizí. Na L2 a L3 se víceméně po celou dobu přechodového děje nic neděje a drží si nulový výkon.

■ V3 – Přetoky povoleny, solární simulátor nepracuje

V této a další variantě je vypnutý solární simulátor, což je evidentně faktor, který rozhodně lépe zvládá aktualizovaná verze firmwaru. Nejprve však ke starší verzi, kde reakční doba sepnutí trvá přibližně 3 s. Pak se začne vybíjet baterie a pomáhat fázi L1 se zátěží, což vyvolá přetok na fázích L2 a L3, který v součtu odpovídá odběru na L1. Během přibližně 6 s klesnou výkony na síti k nule, na fázích L2 a L3 to znamená přetok v průměru 1,1 Wh. Veškerá zátěž je po přechodovém ději kryta baterií a na L1 není žádný odběr.

Při vypnutí zareaguje měnič do 1,5 s. Po celou tuto dobu je výkon z baterie dodáván po fázi L1 do sítě. Následně poklesne výkon baterie, což se opět projeví na všech třech fázích, takže na L2 a L3 bude odběr, který se ustálí za přibližně 10 s. Během těchto 10 s je z L2 a L3 dohromady odebráno 1,7 Wh.

Nyní k nové verzi firmwaru. Při sepnutí je reakční doba kratší než 1 s, načez poměrně rychle nabíhá baterie, ale dalších zhruba 5 s se stabilizuje její výkon, během čehož na L2 a L3 dochází k přetokům dohromady 0,8 Wh. Graf tohoto sepnutí s aktualizovaným firmwarem je vidět níže na obrázku 5.27



Obrázek 5.27. Sepnutí asymetrické zátěže pro povolené přetoky a vypnutý solární simulátor s novým firmwarem.

Při vypínání je po aktualizaci opět patrná kratší reakční doba i celý přechodový děj. V principu však probíhá stejně, takže není třeba blíže tento stav popisovat. Přetok po fázi L1 je v průměru 1,4 Wh, odběr z L2 a L3 je v součtu 0,8 Wh.

■ V4 – Přetoky zakázány, solární simulátor nepracuje

V případě sepnutí je reakční doba řádově delší (v průměru 12 s). Následně během dalších přibližně 4 s postupně nabíhá baterie, která pomáhá síti se zátěží na L1, přičemž na L2 a L3 dochází k přetokům. Na L1 je i po odeznění přechodového děje neustále nějaký odběr, aby měl měnič jistotu, že náhodou nedojde k nechtěnému přetoku. Odběr ze sítě na fázi L1 je během spínání 5 Wh, zatímco na L2 a L3 dochází k neznamatelným přetokům v průměru 0,2 Wh.

Reakční doba u vypnutí už není tak dlouhá, v průměru trvá 1,5 s. Posléze klesne výkon baterie, což se projeví malým a krátkodobým odběrem na fázi L2 a L3. Celý přechodový děj vypnutí netrvá déle než 5 s.

V novější verzi firmwaru je především mnohem kratší spínání. Doba reakce je průměrně 1,5 s, pak skokově naběhne výkon baterie, během něhož dochází na L2 a L3 ke krátkodobým přetokům trvajícím maximálně 2 s. Po této době se stabilizuje výkon z baterie a plně dodává energii zátěži. Na L1 už není po odeznění přechodového děje sepnutí žádný odběr.

Na vypnutí zareaguje měnič do 1 s, takže přetok na L1 je menší než při vypnutí se starší verzí firmwaru. Do další 1 s klesne výkon z baterie na nulu a přetok na L1 také vymizí. Na L2 a L3 nedochází téměř k žádnému odběru.

■ Porovnání jednotlivých variant

Z popisu výše je patrné poměrně podobné chování zkoušených variant. Obecně při sepnutí asymetrické zátěže dochází k odběru energie ze sítě po zatěžované fázi. Na zbylých fázích sítě je menší přetok, jelikož je zde reakční doba, během které dochází pouze k odběru.

U vypnutí asymetrické zátěže dochází k inverznímu chování. Fáze, na které byla sepnutá zátěž, vykazuje přetok do sítě. Po reakční době dochází na zbylých fázích sítě k menšímu odběru. Z toho vyplývá, že při asymetrickém zatížení bude logicky nejvíce namáhána právě fáze s nejvyšším zatížením.

Nastavení povolených nebo zakázaných přetoků má také vliv na chování měniče. Stará verze firmwaru měla problém s vypnutým solárním simulátorem, tam byly sledovány delší doby reakce i celého přechodového děje. Nová verze v podstatě pro každou zkoušenou variantu kromě V1 vykazuje lepší výsledky, někdy dokonce řádově. Zprůměrované jednotlivé doby reakce a přechodového děje spolu s odběry a přetoky probíhajícími na síti jsou patrné pro obě verze firmwaru v tabulkách 5.12 a 5.13.

	Přechod	Reakční doba	Doba přechodového děje	Odběr ze sítě	Přetok do sítě
V1	Sepnutí	1 s	6,5 s	1 Wh	0,8 Wh
	Vypnutí	1 s	11 s	1,9 Wh	2,2 Wh
V2	Sepnutí	0,5 s	5 s	1,2 Wh	0,4 Wh
	Vypnutí	1 s	3,4 s	0,1 Wh	0,5 Wh
V3	Sepnutí	3 s	9 s	1,9 Wh	1,1 Wh
	Vypnutí	1,5 s	12 s	1,7 Wh	2,5 Wh
V4	Sepnutí	12 s	16 s	5 Wh	0,2 Wh
	Vypnutí	1,8 s	4 s	0,06 Wh	0,6 Wh

Tabulka 5.12. Časy a chování měniče při spínání asymetrické zátěže se starým firmwarem.

	Přechod	Reakční doba	Doba přechodového děje	Odběr ze sítě	Přetok do sítě
V1	Sepnutí	1 s	6,5 s	1,3 Wh	0,9 Wh
	Vypnutí	1 s	32 s	2,2 Wh	2,7 Wh
V2	Sepnutí	1 s	4,5 s	1 Wh	0,1 Wh
	Vypnutí	0,5 s	3,4 s	0,04 Wh	0,4 Wh
V3	Sepnutí	0,7 s	6,5 s	1,2 Wh	0,8 Wh
	Vypnutí	1 s	8 s	0,8 Wh	1,4 Wh
V4	Sepnutí	1,5 s	4 s	0,7 Wh	0,2 Wh
	Vypnutí	0,8 s	2 s	0,01 Wh	0,4 Wh

Tabulka 5.13. Časy a chování měniče při spínání asymetrické zátěže s novým firmwarem.

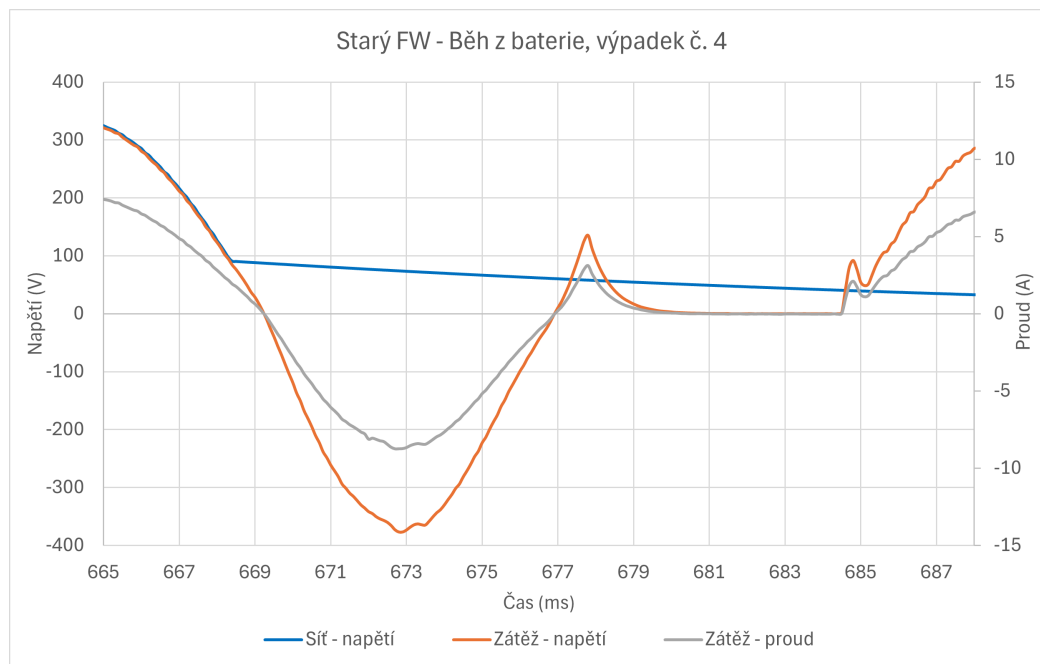
■ 5.3.6 Výpadky sítě

■ Výpadek sítě při běhu z baterie

První testovaná varianta byla při běhu měniče z baterie. V okamžiku výpadku sítě měnič tento stav většinou ihned nezaznamená. Z toho vyplývá, že při běhu z baterie měnič nenahlíží do sítě neustále, ale pouze v nějakém intervalu. Pokud si měnič všimne výpadku sítě, klesne výstupní výkon měniče na nulu. Doba, která trvá měniči do zaznamenání výpadku sítě, bude dále označována jako reakční doba. Reakční doba byla během pěti pokusů změřena v intervalu 0 až 20,5 ms. Aktualizací firmwaru došlo ke zkrácení těchto reakčních dob, přičemž dokonce 4x z pěti výpadků měnič zareagoval okamžitě.

Co se týče doby výpadků měniče, tak u staršího firmwaru skutečně trvaly maximálně 10 ms, jak udává výrobce ve svém datovém listu. S novým firmwarem došlo ke zkrácení doby výpadků maximálně na necelých 7 ms. Lze tedy potvrdit, že s novým firmwarem vykazuje měnič rychlejší chování při dynamickém ději, jakým je právě výpadek sítě.

Vybrané průběhy napětí a proudu jsou při výpadku vidět na obrázku 5.28. V moment, kdy dojde k výpadku sítě (cca 668 ms), měnič nic nezaznamená a baterie dodává zátěži výkon až do cca 678 ms. Náhle dojde k rychlému poklesu výkonu a necelých 7 ms se nic neděje. Pak začne baterie skrze měnič v režimu zálohování dodávat energii do zátěže. Jelikož se jedná o čistě odporovou zátěž, je proud zátěže ve fázi s napětím. Napětí sítě neklesne na nulu tak rychle, protože je měřeno na vstupu do měniče, kde dojde k nabití vstupních kapacit. Proto je i po výpadku sítě vidět v grafu nenulová hodnota napětí na síti, která s časem exponenciálně klesá. V závislosti na okamžiku, při kterém dojde k výpadku, se projeví doba vybíjení vnitřní kapacity. Pokud výpadek nastane zrovna poblíž amplitudy, je vnitřní kapacita nabita na maximální úroveň a její vybíjení trvá delší dobu, než pokud dojde k výpadku při nižší hodnotě napětí.

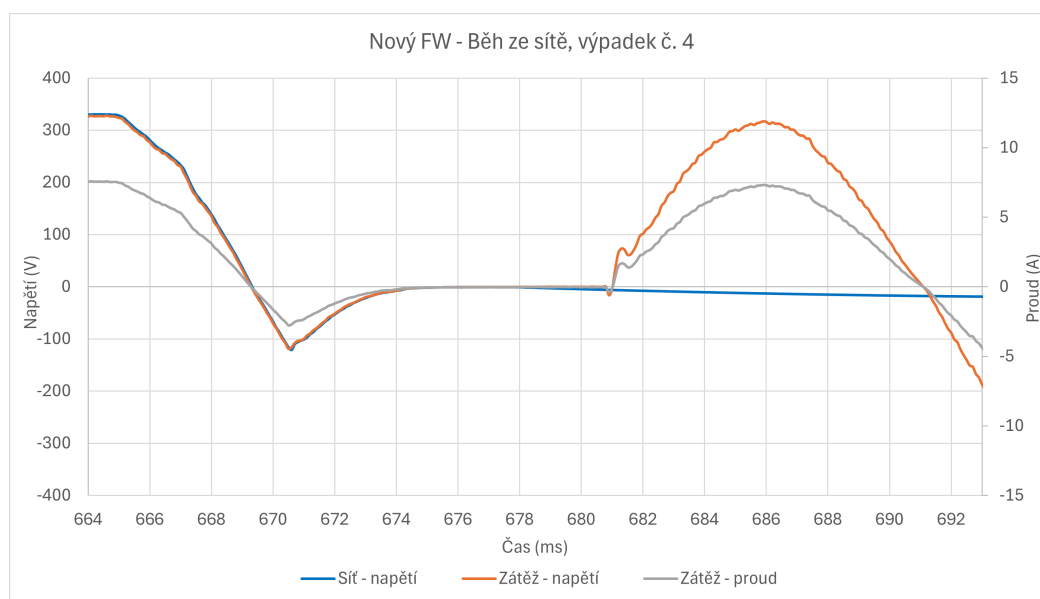


Obrázek 5.28. Výpadek sítě při běhu z baterie se starým firmwarem.

■ Výpadek sítě při běhu ze sítě

V případě výpadku sítě při běhu měniče je oproti běhu z baterie sledován především rozdíl v době reakce měniče. Měnič logicky okamžitě zaznamená, že došlo k výpadku sítě, jelikož je z ní přímo kryta zátěž. Pro doby výpadků měniče, nebyla vždy dosažena výrobcem garantovaná doba 10 ms a to ani po aktualizaci firmwaru. Naopak po aktualizaci je doba výpadku v průměru delší než se starým firmwarem.

Na obrázku 5.29 jsou zobrazeny průběhy napětí na zátěži a síti a proud do zátěže. V okamžiku výpadku sítě (cca 671 ms) poklesne výkon a přibližně 10 ms měnič nedodává žádnou energii. Následně začne baterie dodávat energii do zátěže. Proud je opět ve fázi s napětím ze stejného důvodu jako v předchozí variantě.



Obrázek 5.29. Výpadek sítě při běhu ze sítě s novým firmwarem.

■ Porovnání jednotlivých variant

Porovnání doby reakcí a výpadků měniče je pro jednotlivé zkoumané varianty uvedeno v tabulce 5.14. Pro variantu běhu ze sítě není v tabulce uvedena reakční doba, jelikož je vždy 0 ms (měnič si okamžitě všimne, že došlo k výpadku sítě, když z ní kryje zátěž). Pokud však výpadek nastane při běhu z baterie, nevšimne si toho měnič většinou okamžitě. Při starším firmwaru trvala tato reakční doba maximálně 20,5 ms.

Zajímavé je také sledování fázového posunu při výpadku sítě. V principu jde o to, že po zaregistrování výpadku je vždy chvíli dodáván nulový výkon, načež začne baterie krýt zatížení. První půlvlna z baterie je vždy kladná, ať už došlo k výpadku při kladné nebo záporné půlvlně. Takto vzniklý fázový posun nemusí úplně vyhovovat některým spotřebičům (motory, spínané zdroje).

Běh z	FW	Výpadek číslo	1	2	3	4	5
Baterie	Starý	Reakce (ms)	15,5	12,8	0	9,3	20,5
		Výpadek (ms)	7	7	6,9	6,7	10
	Nový	Reakce (ms)	0	0	0	8,3	0
		Výpadek (ms)	6,6	6,8	6,6	6	6,7
Sítě	Starý	Výpadek (ms)	8,5	10	8,4	11,2	8
	Nový	Výpadek (ms)	6,4	11,7	11,2	10,5	7,4

Tabulka 5.14. Doba reakce a výpadku měniče při výpadku sítě. Uvedené varianty jsou při běhu z baterie a ze sítě, pro starý a nový firmware.

Kapitola 6

Vyhodnocení energetické bilance rodinného domu

Naměřená data z předchozí kapitoly byla využita k vyhodnocení energetické bilance rodinného domu za rok v hodinovém kroku pomocí softwaru Microsoft Excel. Vstupními hodnotami simulace jsou roční naměřená data ozáření a teploty. V zapojení se uvažuje testovaný měnič GW10K-ET PLUS+ a byly zvoleny PV moduly společnosti Canadian Solar. V simulaci se bere v úvahu také chování baterie a běžná spotřeba.

6.1 Vstupní data simulace

Vstupními hodnotami pro simulaci chování měniče byla hodinová data okolní teploty a ozáření s jižní orientací a sklonem 30° za rok 2023 z UCEEB. Podle vztahu uvedeného v [21] byla z teploty okolí vypočtena teplota článku:

$$T_{\text{článek}} = T_{\text{okolí}} + G \frac{\text{NOCT} - 20}{800}, \quad (1)$$

kde: $T_{\text{článek}}$ – teplota článku (°C),
 $T_{\text{okolí}}$ – teplota okolí (°C),
 G – ozáření (W/m^2).

Se znalostí teploty článku a ozáření lze v hodinovém kroku dopočítat výkon, který produkují vybrané PV moduly:

$$P_{\text{PV}} = n P_m \frac{G}{1000} \left[1 - \frac{\alpha_{Pm}}{100} (25 - T_{\text{článek}}) \right], \quad (2)$$

kde: P_{PV} – výkon produkovaný PV moduly (W),
 n – počet sériově propojených PV modulů (-).

6.2 PV moduly

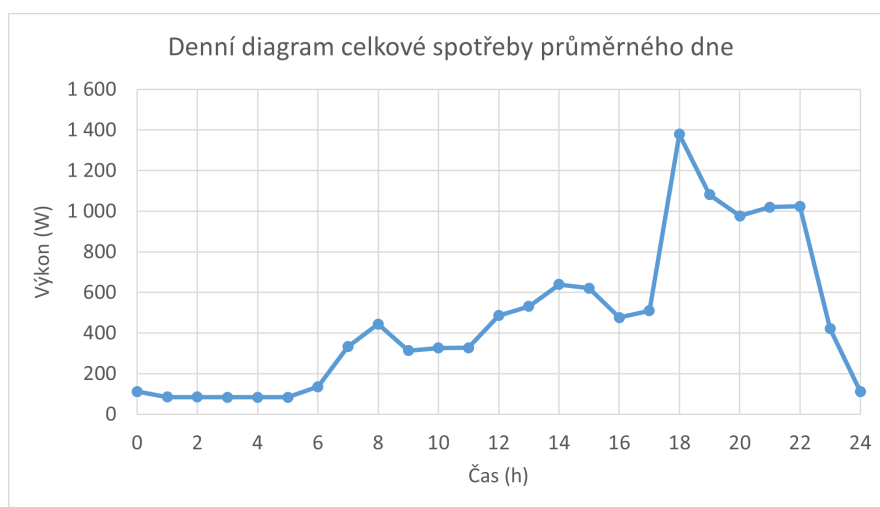
Vybrané PV moduly společnosti Canadian Solar o výkonu 455 Wp mají další parametry uvedené níže v tabulce 6.1. Pro účely simulace byly tyto PV moduly propojeny do stringu o 15 sériově zapojených PV modulech. Napětí v bodě maximálního výkonu U_{MPP} takto sestaveného stringu má při STC hodnotu 619,5 V, což odpovídá měření z předchozí kapitoly pro VACH2. Jednotlivé změřené účinnosti z předchozí kapitoly pro dílčí power levely budou v simulaci využity pro zhodnocení energetické bilance rodinného domu.

P_m	455 W	η_{modul}	20,6 %
U_{MPP}	41,3 V	α_{P_m}	-0,35 %/K
I_{MPP}	11,02 A	$\alpha_{U_{oc}}$	-0,27 %/K
U_{oc}	49,3 V	$\alpha_{I_{sc}}$	+0,05 %/K
I_{sc}	11,66 A	NOCT	$42 \pm 3 \text{ } ^\circ\text{C}$

Tabulka 6.1. Parametry PV modulu Canadian Solar CS3W-455MS [22]. Vlevo jsou hodnoty za STC (ozáření 1000 W/m^2 , teplota článku $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ a spektrum AM 1,5). η_{modul} – účinnost PV modulu; α_{P_m} – teplotní koeficient P_m ; $\alpha_{U_{oc}}$ – teplotní koeficient U_{oc} ; $\alpha_{I_{sc}}$ – teplotní koeficient I_{sc} ; NOCT – nominální provozní teplota článku.

6.3 Spotřeba

Pro spotřebu byla použita data vytvořená generátorem profilů programu PVSOL. Vybraný profil spotřeby domácnosti je pro dvě dospělé osoby a jedno dítě, celková roční spotřeba elektrické energie činí 4000 kWh. Kromě spotřeby je uvažována i změřená samospotřeba, která pro zapnutý Back-up a připojenou síť dosahuje hodnoty 25,8 W, což v ročním souhrnu znamená 226 kWh. Z celého roku byly zprůměrovány hodnoty pro denní diagram celkové spotřeby, který je vidět na obrázku 6.1. Patrný je v něm po nočních minimech ranní nárůst spotřeby a pak především večerní špička dosahující maximálního výkonu téměř 1400 W.



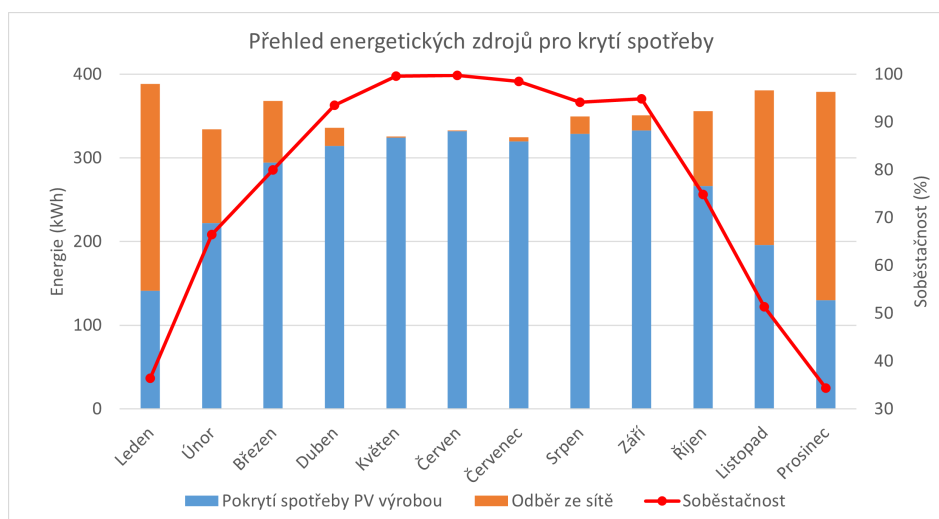
Obrázek 6.1. Zprůměrovaný denní diagram zatížení.

Co se týče baterie, opět se uvažovalo se stejnou sestavou Dyness Tower T10, která byla využita pro měření v předchozí kapitole (viz sekce 5.1.3) o využitelné energii 10,66 kWh. Baterii se doporučuje nevybíjet až úplně na nulu, a tak byla nastavena maximální hloubka vybití DOD 15 %, což znamená, že je k dispozici 9,06 kWh. Při nabíjení i vybíjení baterie bylo počítáno s účinností, která byla zjištěna v předchozí kapitole. Nebyla však proměřena celková vnitřní účinnost baterie, a tak byla pro účely simulace o odhadem stanovených 8 % ponížena účinnost vybíjení baterie.

Baterie je v simulaci dobíjena, pokud je výroba větší než spotřeba. Především v letních měsících může nastat stav, kdy se baterie dobije na maximum, pak dochází k dodávce přebytečné energie do sítě. Vybíjení probíhá, pokud je nedostatečná výroba z PV pole (při vyšší spotřebě, než je baterie schopna zajistit, je nutné část energie odebrat ze sítě).

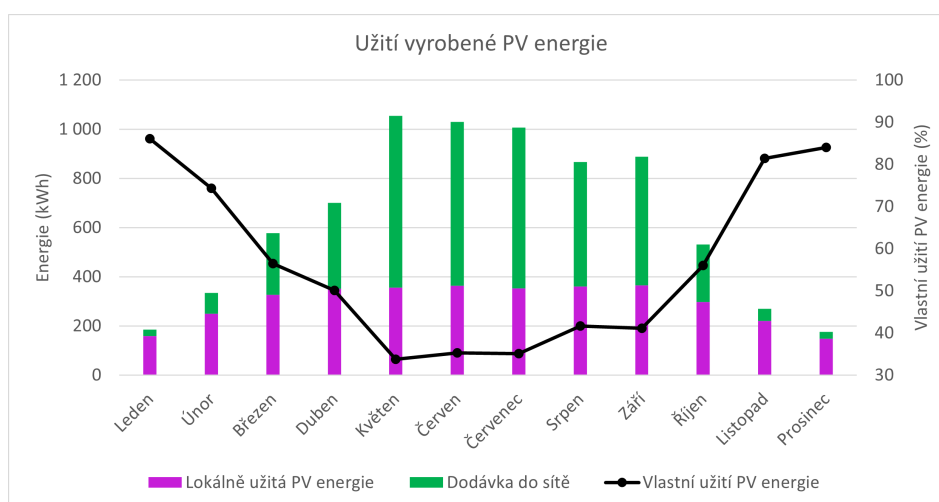
6.4 Zhodnocení

Z odsimulovaných dat bylo vytvořeno několik grafů, ze kterých si lze udělat představu o fungování celého systému. Na obrázku 6.2 je graf, který zobrazuje přehled krytí spotřeby domácnosti po měsících. Z grafu je patrná závislost odběru energie na množství vyrobené energie. V letních měsících je nutné odebírat jen velmi malé množství elektrické energie ze sítě na pokrytí spotřeby. Naopak v zimě, kdy fotovoltaika nevyrábí tolik, je odběr ze sítě větší než pokrytí spotřeby PV výrobou. Do grafu byla zanesena také soběstačnost, která v průběhu roku značně kolísá od 34 % až téměř ke 100 %.



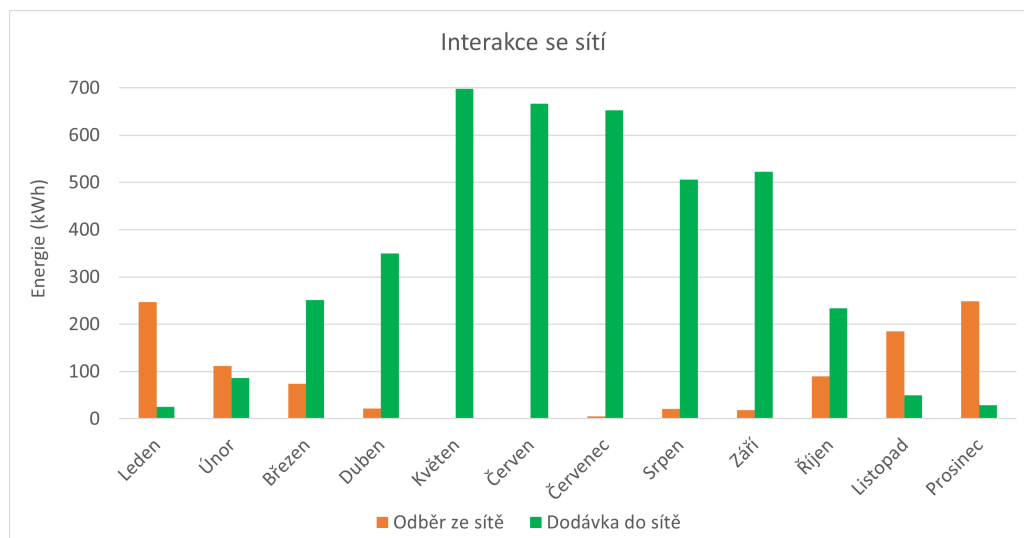
Obrázek 6.2. Přehled energetických zdrojů pro krytí spotřeby v domácnosti.

Další obrázek 6.3 ukazuje užití vyrobené PV energie po měsících. Lokálně užitá PV energie a dodávka do sítě dává v součtu pro každý měsíc PV výrobu. Vlastní užití PV energie na vedlejší svísle ose vyjadřuje, jaká část z celkové vyrobené energie je lokálně užitá přímo ke spotřebě nebo ukládána do baterie pro pozdější užití. Zbytek energie je dodáván do sítě. Dodávka do sítě je silně závislá na množství slunečního záření. Jelikož je v letních měsících značný přebytek vyrobené energie, který se musí dodávat do sítě, klesá procentuální vlastní užití PV energie. V zimě je dodávka minimální.



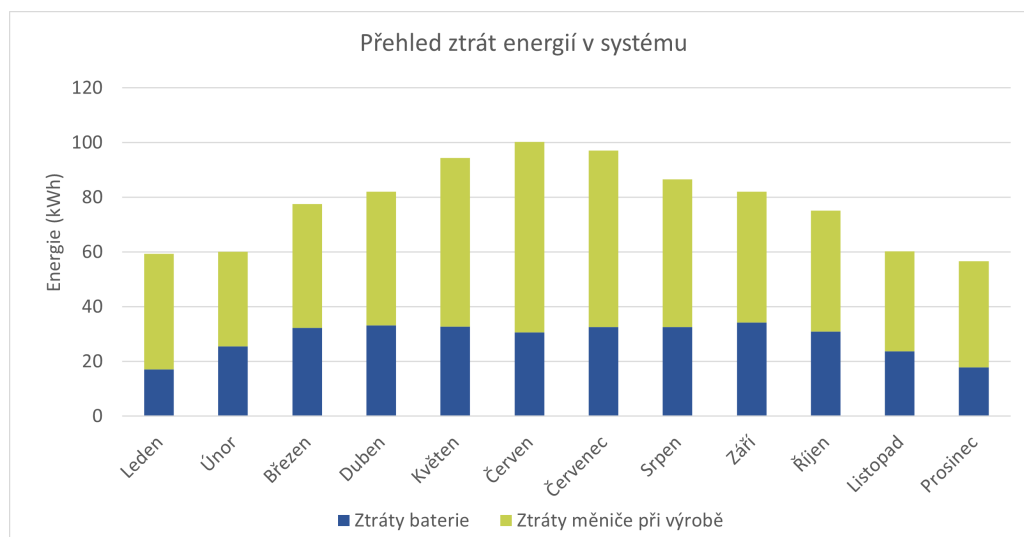
Obrázek 6.3. Užití vyrobené PV energie.

Z obou předchozích grafů je jasně patrná závislost interakce se sítí na ročním období. Jak je vidět na obrázku 6.4, v zimě převládá odběr, po zbytek roku pak dodávka do sítě. Od května do července je sledován měsíční odběr pouze v jednotkách kWh.



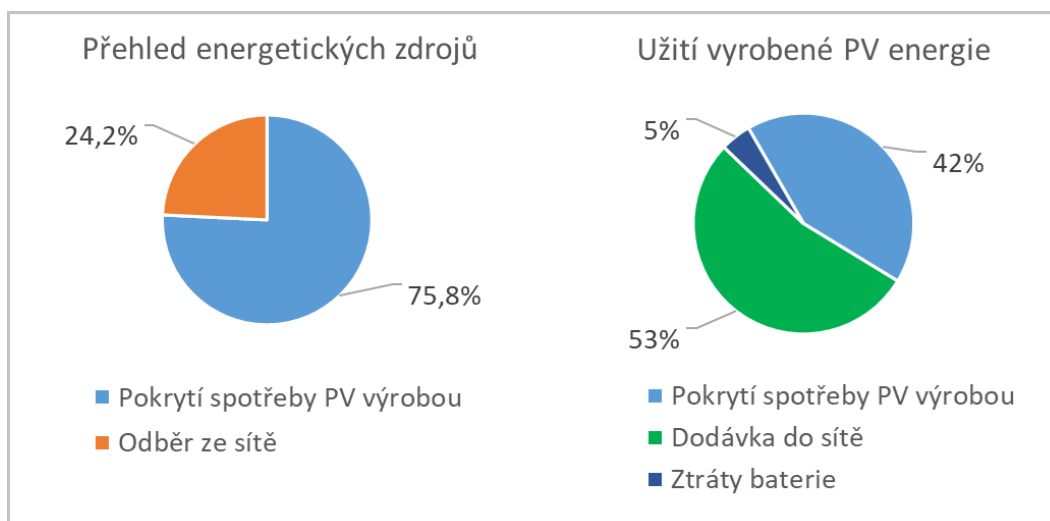
Obrázek 6.4. Interakce se sítí.

Co se týče ztrát energií v systému v jednotlivých měsících, tak ty lze sledovat na obrázku 6.5. Ztráty v systému jsou tvořeny ztrátami měniče při výrobě a ztrátami baterie. Ztráty měniče vychází z účinnosti MPPT a konverzní účinnosti. Lze pozorovat, že při vyšší výrobě jsou i vyšší ztráty a to jak na baterii, tak na měniči. Nejvyšší celková ztráta dle simulace vychází v červnu a dosahuje téměř 100 kWh.



Obrázek 6.5. Přehled ztrát energií v systému.

Dva důležité koláčové grafy roční bilance simulace jsou vedle sebe na obrázku 6.6. Graf vlevo zobrazuje energetické zdroje pro krytí spotřeby. Pro téměř čtvrtinu spotřeby odebírá domácnost energii ze sítě, zbytek kryje PV výroba. Lze tedy tvrdit, že soběstačnost systému, neboli nezávislost na dodávkách ze sítě, dosahuje více než 75 %, což je poměrně vysoká hodnota. Graf vpravo ukazuje, jak se nakládá s vyrobenou PV energií. Více než 40 % vyrobené energie kryje spotřebu, 5 % tvoří ztráty baterie a nadpoloviční většina vyrobené energie se v průběhu roku dodá do sítě.



Obrázek 6.6. Roční bilance simulace v koláčových grafech. Vlevo je graf energetických zdrojů pro krytí spotřeby a vpravo je užití vyrobené PV energie.

Celkově lze konstatovat, že simulace vyšla dobře a patrně by byl dostačující nižší instalovaný výkon pro daný profil spotřeby. Ve skutečnosti by se celý systém pravděpodobně nechoval takto příznivě, především profil spotřeby by se značně lišil během prázdnin a svátků, s čímž pak souvisí další parametry simulace. Také je potřeba počítat s tím, že se uvažovaly pouze účinnosti a samospotřeba v ustáleném stavu. Dynamické jevy by také promlouvaly do celkové bilance, což by se projevilo vyššími ztrátami.

Kapitola 7

Závěr

Tato diplomová práce nejprve popisuje, co to jsou polovodičové měniče elektrické energie. Každý typ měniče má specifické využití a princip fungování, který je ve stručnosti vysvětlen. V následující kapitole je uvedeno rozdělení měničů PV systémů podle více různých kritérií a bližší popis hybridních měničů, kterými se konkrétně tato práce zabývá. Hybridní měniče jsou zásadní pro vyrovnání kolísavé produkce energie z fotovoltaiky s aktuální spotřebou. Tyto měniče integrují PV moduly s bateriemi a dalšími částmi systému, optimalizují tok energie, poskytují střídavou energii do domácnosti a umožňují dodávat přebytky do sítě. V případě nedostatku výroby mohou energii odebírat ze sítě nebo využívat bateriové uložení. Některé modely disponují také volbou asymetrického výstupu, což je alespoň zatím velmi důležité pro oblast České republiky z důvodu měření elektrické energie po fázích.

V další kapitole jsou rozebrány jednotlivé testy měničů. Testování měničů ověřuje jejich spolehlivost a účinnost při přeměně solární energie na elektrickou. Norma ČSN EN 50530 popisuje postupy pro měření účinnosti konverze a MPPT, jak statické, tak dynamické. Testování MPP trackeru zahrnuje ověření jeho napěťového a proudového rozsahu. Dále bylo uvedeno měření samospotřeby střídače v pohotovostním režimu a úroveň vstupního výkonu potřebné k přechodu z tohoto režimu. Byly analyzovány měniče pro přímý ohřev vody z PV modulů, kde se hodnotí účinnost přenosu energie a typ výstupního signálu. V neposlední řadě jsou uvedeny důležité části PPDS s podmínkami pro připojení výroben do distribučních sítí.

V praktické části diplomové práce byla provedena celá řada měření na vybraném hybridním měniči GW10K-ET PLUS+. Nejprve byly zkoumány provozní vlastnosti měniče v ustáleném stavu, následně pak při přechodových dějích. První z ustálených testů spočíval ve zjištění euroúčinnosti obou vstupů měniče s vlastními MPP trackery pro tři různé VACH. Celková euroúčinnost vstupů PVS1 a PVS2 je dána součinem statické MPPT euroúčinnosti a konverzní euroúčinnosti. Pro optimální provoz měniče je vhodné připojit stringy s vyšším napětím ke vstupu PVS1 a stringy s nižším napětím ke vstupu PVS2. U nižších power levelů byly měřeny výrazně nižší účinnosti z důvodu nestabilního chování MPP trackeru, což má za následek nesoulad naměřené hodnoty celkové euroúčinnosti s hodnotou uvedenou v datovém listu měniče.

Další testy statického chování měniče sloužily pro zjištění účinnosti konverze energie z baterie do zátěže (účinnost vybíjení baterie) a ze solárního simulátoru do baterie (účinnost nabíjení). Konverzní účinnost z baterie do zátěže dosahuje stabilních hodnot kolem 95 % pro výkony nad 1 000 W. Při nižších výkonech než 500 W je pozorován výrazný pokles účinnosti konverze. Konverzní účinnost ze solárního simulátoru do baterie je vyšší než konverze z baterie do zátěže, přičemž dosahuje až 97 % pro výkony dodávané solárním simulátorem nad 3 000 W. Také při nižších výkonech byla zjištěna vyšší účinnost nabíjení baterie než účinnost vybíjení.

Posledním testem měniče v ustáleném stavu bylo měření samospotřeby, které se zkoumalo po dobu jedné hodiny pro tři různé varianty. Když byl vypnutý Back-up a připojená síť, byla změřena samospotřeba 22,3 W, což je hodnota téměř o 50 % vyšší než je uvedeno v datovém listu. Další varianty sloužily k zjištění samospotřeby pro zapnutý Back-up a připojenou, nebo odpojenou síť. Zapnutí zálohy mírně zvýšilo samospotřebu, jelikož měnič musí být v tomto režimu neustále připravený na případný výpadek sítě a zajistit výstup s požadovanými síťovými parametry. Nejvyšší samospotřeba 29,1 W byla dle očekávání zjištěna pro zapnutou zálohu a odpojenou síť, kdy je jediným zdrojem energie baterie, protože měnič neustále vytváří výstup o síťových parametrech.

Z dynamického chování byla nejprve na základě různých testovacích profilů ozářenosti hodnocena dynamická účinnost MPPT. Testovací profily ČSN EN 50530 B.2, *Heavy Clouds* a *UCEEB* poskytují různé úrovně a rychlosti změny ozářenosti. Účinnosti jsou závislé na dynamice změn ozářenosti, přičemž pomalejší změny vedou k vyšším účinnostem. Profil ČSN EN 50530 B.2 byl proměřen s rychlostí 1x a 10x, pro rychlost testu 1x byla dynamická účinnost MPPT téměř 97 % a pro rychlost 10x o 7 % nižší. Profily *Heavy Clouds* a *UCEEB* vykazují mírně vyšší účinnosti než profil ČSN EN 50530 B.2, právě díky pomalejším změnám ozářenosti.

Princip následujícího dynamického testu spočíval ve spínání asymetrické zátěže. Byly zkoumány čtyři různé varianty, kombinující povolené/zakázané přetoky se zapnutým/vypnutým solárním simulátorem a ověřil se zde vliv aktualizace firmwaru z původní verze DSP 09.163, ARM 23.237 na novou DSP 11.177, ARM 27.265. Obecně bylo pozorováno, že při sepnutí asymetrické zátěže dochází k odběru energie ze sítě po zatěžované fázi, zatímco na ostatních fázích je menší přetok. Krátce po vypnutí zátěže se systém chová naopak, dochází k přetoku na fázi, na které byla zátěž, a menšímu odběru na zbývajících fázích. Z toho vyplývá, že fáze s nejvyšším zatížením je při asymetrickém zatěžování nejvíce vytížena. Také nastavení povolených nebo zakázaných přetoků má vliv na chování měniče, jelikož při zakázaných přetocích se měnič snaží omezit dodávku do sítě jak při spínání, tak při vypínání zátěže. Starší verze firmwaru vykazovala problémy s vypnutým solárním simulátorem, což se projevovalo delší dobou reakce a přechodového děje. Měřením bylo ověřeno, že novější verze firmwaru má rychlejší odezvu při dynamických jevech, což výrazně zlepšilo výsledky pro zkoumané všechny varianty s výjimkou případu zapnutého solárního simulátoru a povolenými přetoky.

Měření výpadku sítě bylo posledním provedeným měřením v této diplomové práci. V rámci měření výpadků sítě byly zkoumány dvě varianty – výpadek sítě při předchozím běhu z baterie a při předchozím běhu ze sítě. I pro toto měření byl sledován vliv aktualizace firmwaru. Při běhu z baterie měnič obvykle nezaznamená výpadek sítě okamžitě, což je patrné z reakční doby, která byla změřena během pěti pokusů v intervalu 0 až 20,5 ms, než baterie začne znova dodávat energii do zátěže. Aktualizací firmwaru došlo ke zkrácení těchto reakčních dob, což většinou způsobilo okamžitou reakci měniče. Celková doba výpadku byla maximálně 10 ms se starším firmwarem a necelých 7 ms s novým, což odpovídá hodnotě uvedené v datovém listu, kde výrobce garantuje výpadek kratší než 10 ms. V případě předchozího běhu ze sítě dojde okamžitě k zaznamenání výpadku (doba reakce je nulová). Ne ve všech případech však celková doba výpadku trvala kratší dobu než 10 ms, což se nezlepšilo ani aktualizací firmwaru. V obou variantách začne baterie krýt zatížení po výpadku tak, že první půl vlna je vždy kladná, což může vyvolat značný fázový posun oproti stavu před výpadkem.

Na závěr bylo využito naměřených dat v ustálených stavech pro vyhodnocení energetické bilance rodinného domu. Simulace probíhala v hodinovém kroku v softwaru Microsoft Excel. Vstupními hodnotami simulace byly roční naměřená data ozáření a teploty, přičemž byl zohledněn testovaný měnič GW10K-ET PLUS+ a PV pole o instalovaném výkonu 6 825 Wp. Součástí simulace bylo také chování baterie a profil spotřeby domácnosti o celkové roční spotřebě elektrické energie 4 000 kWh. Simulace ukázala, že v zimních měsících převládá odběr energie, zatímco v letních měsících dochází k dodávce do sítě. Celková roční spotřeba je více než ze 75 % kryta vyrobenou PV energií, zbytek je nutné odebírat ze sítě. Vyrobená PV energie v ročním souhrnu ze 42 % pokrývá spotřebu, zbytek připadá na dodávku do sítě a malá část na ztráty. Ztráty v systému jsou tvořeny ztrátami měniče a baterie, které rostou při vyšší výrobě energie. Simulace ukázala příznivou bilanci systému, a instalovaný výkon by mohl být nižší vzhledem k danému profilu spotřeby.

Tato práce ověřuje vybrané parametry hybridního měniče GW10K-ET PLUS+ udávané výrobcem v ustálených stavech a při výpadku sítě. Navíc bylo zjištěno chování měniče při dynamických jevech nastávajících ve skutečném provozu. Práce tedy může posloužit jako předloha pro testy na dalších hybridních měničích, případně je možné provést porovnání s testovaným měničem společnosti GoodWe.

Literatura

- [1] *Power Electronics*. Dostupné na <https://www.monolithicpower.com/en/power-electronics>.
- [2] G, Dileep. a S.N. SINGH. Selection of non-isolated DC-DC converters for solar photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, ročník 76, s. 1230-1247. ISSN 13640321. Dostupné na DOI 10.11591/ijeecs.v12.i1.pp1-6. Dostupné na <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117304653>.
- [3] DISTRIBUCE, ČEZ. Pravidla provozování distribučních soustav – Příloha 4. PRAVIDLA PRO PARALELNÍ PROVOZ VÝROBEN A AKUMULAČNÍCH ZAŘÍZENÍ SE SÍTÍ PROVOZOVATELE DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY. Dostupné na https://www.cezdistribuce.cz/file/edee/distribuce/ppds/ppds-2022_priloha-4.pdf.
- [4] ZILVAR, Jiří. Střídače pro domácí fotovoltaiku I. – funkce a parametry. 2022. Dostupné na <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/24668-stridace-pro-domaci-fotovoltaiku-i-funkce-a-parametry>.
- [5] ERÚ. *PŘIPOJOVACÍ SÍŤOVÉ KODEXY*. Dostupné na <https://eru.gov.cz/pripojovaci-sitove-kodexy>.
- [6] CHLUMECKÁ, Karolína. Češi ušetří na fotovoltaike kvůli zastaralému měření spotřeby méně než sousedi. Měnit se však nic nebude. 2023. Dostupné na <https://www.ekonews.cz/cesi-usetri-na-fotovoltaike-kvuli-zastaralemu-mereni-spotreby-mene-nez-sousedi-menit-se-vsak-nic-nebude/>.
- [7] ČESKO. *Vyhláška č. 82/2011 Sb., o měření elektřiny a o způsobu stanovení náhrady škody při neoprávněném odběru, neoprávněné dodávce, neoprávněném přenosu nebo neoprávněné distribuci elektřiny*. Dostupné na <https://www.zakonyprolid.cz/cs/2011-82>.
- [8] HRZINA, Pavel. Fázové versus součtové měření: v novém videu se dovíte vše podstatné. 2023. Dostupné na <https://www.solarniasociace.cz/asociace-radi-jak-vybrat-kvalitni-instalacni-firmu-pro-dodavku-domaci-fotovoltaiky-3-2-2/>.
- [9] DOYLE, Tara, Ryan DESHARNAIS a Michael MILLS-PRICE. 2019 PV INVERTER SCORECARD. Dostupné na <https://www.pvel.com/inverter-scorecard/>.
- [10] ČSN EN 50530: *Celková účinnost fotovoltaičkových invertorů spojených s rozvodnou sítí*. Dostupné na <https://csnonline.agentura-cas.cz/>.
- [11] WOLF, Petr a Pavel HRZINA. Srovnání vyráběných regulátorů pro ohřev vody fotovoltaičkými systémy. *Vytápění, větrání, instalace*. ročník 28, č. 2, s. 92-97. ISSN 1210-1389. Dostupné na <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/86896>.
- [12] BOWER, Ward, Chuck WHITAKER, William ERDMAN, Michael BEHNKE a Mark FITZGERALD. Performance Test Protocol for Evaluating Inverters Used in Grid-

- Connected Photovoltaic Systems. Dostupné na https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2020-06/2004-11-22_Sandia_Test_Protocol_ada.pdf.
- [13] HOWARD, L. On the Modifications of Clouds. Asher, 1894. Dostupné na <https://books.google.cz/books?id=R-dLvFe4trsC>.
- [14] GOODWE. *ET PLUS+ Series 5-10kW. Three Phase Hybrid Inverter*. Dostupné na https://en.goodwe.com/Ftp/EN/Downloads/Datasheet/GW_ET%20PLUS+_Datashet-EN.pdf.
- [15] GMBH, GoodWe Europe. GoodWe představuje aktualizaci firmwaru pro hybridní měniče na českém trhu. 2023. Dostupné na <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/25942-goodwe-predstavuje-aktualizaci-firmwaru-pro-hybridni-menice-na-ceskem-trhu>.
- [16] ELGAR. *ETS1000X Photovoltaic Simulator Operation and Maintenance Manual*.
- [17] ELGAR. *Ovládací jednotka O-ECU1000/20, Uživatelská příručka/Návod k obsluze*.
- [18] DYNES. *Towe Technical Specifications*. Dostupné na https://assets-global.website-files.com/6459f6ee0c7f63a3b1a74a51/64e463c4a83efa79a3260267_Dyness%20Tower%20datasheet-EN.pdf.
- [19] ZIMMER. *LMG670 1 to 7 Channel Power Analyzer*. Dostupné na <https://www.zes.com/en/Products/Predecessor-Products/Energy-and-Power-Meters/LMG670>.
- [20] HÖCHERL, HACKL. *Electronic AC Load Operating Manual*.
- [21] ROSS, Jr., R. G. Flat-plate photovoltaic array design optimization. In: *14th Photovoltaic Specialists Conference*. 1980. s. 1126-1132. Dostupné na <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/7-modules-and-arrays/nominal-operating-cell-temperature>.
- [22] CANADIAN SOLAR. *HiKu SUPER HIGH POWER MONO PERC MODULE*. Dostupné na https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2019/12/Canadian_Solar-Datasheet-HiKu_CS3W-MS_EN.pdf.

Příloha A

Seznam symbolů a zkratk

D	■ Duty cycle (-)
G	■ Ozáření (W/m ²)
$I_{AC,k}$	■ k-tá hodnota výstupního proudu měniče (A)
$I_{DC,i}$	■ i-tá hodnota vstupního proudu měniče (A)
I_{max}	■ Maximální vstupní proud (A)
I_{MPP}	■ Proud v bodě maximálního výkonu (A)
I_{sc}	■ Proud nakrátko (A)
n	■ Počet sériově propojených PV modulů (-)
P_{bat}	■ Průměrný výkon baterie (W)
P_{DC}	■ Průměrný vstupní výkon měniče (W)
P_D	■ Návrhový výkon výroby (W)
P_{load}	■ Průměrný výkon zátěže (W)
$P_{max,bat}$	■ Maximální nabíjecí/vybíjecí výkon baterie (W)
$P_{max,MPPT}$	■ Maximální výkon MPPT (W)
$P_{MPP,PVS}$	■ Výkon v MPP poskytovaný solárním simulátorem (W)
P_m	■ Maximální výkon (W)
P_{PV}	■ Výkon produkováný PV moduly (W)
α_{Isc}	■ Teplotní koeficient I_{sc} (%/K)
α_{Pm}	■ Teplotní koeficient P_m (%/K)
α_{Uoc}	■ Teplotní koeficient U_{oc} (%/K)
ΔT	■ Vzorkovací perioda (s)
ΔT_i	■ Vzorkovací perioda $U_{DC,i}$ a $I_{DC,i}$ (s)
ΔT_j	■ Vzorkovací perioda $P_{MPP,PVS,j}$ (s)
$\eta_{CEC,MPPT}$	■ CEC účinnost MPPT (-)
$\eta_{euro,celk}$	■ Celková euroúčinnost (-)
$\eta_{euro,MPPT}$	■ Euroúčinnost MPPT (-)
η_j	■ j-tá dílčí statická účinnost MPPT (-)
η_{konv}	■ Konverzní účinnost (-)
η_{modul}	■ Účinnost PV modulu (%)
$\eta_{MPPT,dyn}$	■ Dynamická účinnost MPPT (-)
$\eta_{MPPT,stat}$	■ Statická účinnost MPPT (-)
dt	■ Diferenciál času (s)
NOCT	■ Nominální provozní teplota článku (°C)
T	■ Perioda (s)
$T_{článek}$	■ Teplota článku (°C)
T_{int}	■ Celková doba jednoho intervalu (s)
t_{off}	■ Doba rozepnutí spínače během periody (s)
$T_{okolí}$	■ Teplota okolí (°C)
t_{on}	■ Doba sepnutí spínače během periody (s)
$u(t)$	■ Okamžitá hodnota napětí (V)
$U_{AC,k}$	■ k-tá hodnota výstupního napětí měniče (V)

$U_{DC,i}$	■ i-tá hodnota vstupního napětí měniče (V)
U_{in}	■ Vstupní napětí (V)
U_{MPP}	■ Napětí v bodě maximálního výkonu (V)
U_n	■ Jmenovité napětí sítě (V)
U_{oc}	■ Napětí naprázdno (V)
U_{out}	■ Výstupní napětí (V)
$U_{stř}$	■ Střední hodnota napětí (V)
AC	■ Střídavý proud (<i>Alternating current</i>)
BMS	■ Řídicí systém baterie (<i>Battery management system</i>)
CEC	■ California Energy Commission
ČR	■ Česká republika
DC	■ Stejnoseměrný proud (<i>Direct current</i>)
DOD	■ Hloubka vybití (<i>Depth of discharge</i>)
IGBT	■ Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem (<i>Insulated-gate bipolar transistor</i>)
MOSFET	■ Tranzistor řízený polem s hradlem izolovaným oxidem kovu (<i>Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor</i>)
MPP	■ Bod maximálního výkonu (<i>Maximum power point</i>)
MPPT	■ Sledování bodu maximálního výkonu (<i>Maximum power point tracking</i>)
NN	■ Nízké napětí
OZE	■ Obnovitelné zdroje energie
PDS	■ Provozovatel distribuční soustavy
PPDS	■ Pravidla provozování distribuční soustavy
PV	■ Fotovoltaický
PWM	■ Pulzně šířková modulace (<i>Pulse-width modulation</i>)
SOC	■ Stav nabití (<i>State of charge</i>)
STC	■ Standardní testovací podmínky (<i>Standard test conditions</i>)
UCEEB	■ Univerzitní centrum energeticky efektivních budov
UPS	■ Záložní zdroj (<i>Uninterruptible power source</i>)
VACH	■ Voltampérová charakteristika
VN	■ Vysoké napětí

Příloha B

Seznam přiložených souborů

- Soubor sešitu Microsoft Excel se simulací energetické bilance rodinného domu včetně výsledků a použitých grafů ve zhodnocení.