



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

PROCESY ŘÍZENÍ V ENERGETICKÝCH SYSTÉMECH  
S ALTERNATIVNÍMI ZDROJI ENERGIE  
CONTROL PROCESSES IN ENERGY SYSTEMS WITH ALTERNATIVE POWER  
SOURCES

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

OBOR Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

AUTOR PRÁCE Ing. JAN MORÁVEK

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. PETR MASTNÝ, Ph.D.

OPONENTI Dr.h.c. prof. Ing. Michal Kolcun, PhD.

doc. Ing. Peter Braciník, PhD.

BRNO 2017

**Klíčová slova:**

Energetický systém, alternativní zdroje, řídicí procesy, fotovoltaika, větrná energie, hybridní systém, optimalizace, model, Matlab, Simulink, regulátor, tok výkonu

**Keywords:**

Energy system, alternative sources, control processes, photovoltaic, wind energy, hybrid system, optimization, model, Matlab, Simulink, regulator, power flow

**Místo uložení práce:**

Areálová knihovna FEKT VUT v Brně, Technická 12, 616 00 Brno

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>5</b>
<b>1 Cíle dizertační práce</b>	<b>6</b>
<b>2 Návrh hybridního systému</b>	<b>7</b>
2.1 Výchozí konfigurace hybridního systému . . . . .	7
2.1.1 Výchozí nastavení řídicího systému . . . . .	9
2.2 Analýza výchozí vnitřní logiky systému . . . . .	10
2.2.1 Výchozí nastavení – příkon zátěže odpovídající výrobě . . . . .	10
2.2.2 Výchozí nastavení – příkon zátěže vyšší než výroba . . . . .	11
2.2.3 Výchozí nastavení – příkon zátěže vyšší než výroba, bez sítě . . . . .	11
2.2.4 Výchozí nastavení – odpojená zátěž, snížená výroba, bez sítě . . . . .	11
2.2.5 Zhodnocení výchozího nastavení řídicího systému . . . . .	11
2.3 Konfigurace optimalizovaného hybridního systému s akumulací . . . . .	12
2.3.1 Korektní nastavení regulátoru větrné turbíny . . . . .	12
2.3.2 Vzdálený přístup k systému . . . . .	12
2.3.3 Měřicí systém pro záznam meteorologických podmínek . . . . .	13
2.4 Provozní měření na hybridním energetickém systému . . . . .	13
2.5 Zhodnocení dosažených výsledků . . . . .	14
<b>3 Modelování prvků hybridních systémů</b>	<b>16</b>
3.1 Matematický model hybridního systému . . . . .	17
3.1.1 Fotovoltaický panel . . . . .	17
3.1.2 DC-DC konvertor . . . . .	19
3.1.3 Akumulační systém . . . . .	19
3.1.4 DC-AC měnič . . . . .	19
3.1.5 Zátěž . . . . .	20
3.2 Validace modelu . . . . .	20
3.3 Využití sestavených modelů a zhodnocení dosažených výsledků . . . . .	21
<b>4 Optimalizace a provozní měření FV systémů</b>	<b>22</b>
4.1 Provozní výkonnost FV systému . . . . .	22
4.2 Kontrola FVE instalace dle ČSN EN 62446 . . . . .	23
4.2.1 Vizuální kontrola . . . . .	23
4.2.2 Měření na FV systému . . . . .	23
4.3 Zhodnocení dosažených výsledků . . . . .	25
<b>5 Optimalizace s využitím zařízení pro regulaci toku výkonu</b>	<b>26</b>
5.1 Možnosti řízení výkonů . . . . .	26
5.2 Kontroléry pro řízení toků energií . . . . .	28

5.3	Měření negativních vlivů systému s regulátorem toku výkonu . . . . .	29
5.4	Vyhodnocení problematiky regulátorů toků výkonu . . . . .	31
<b>6</b>	<b>Výsledky</b>	<b>32</b>
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>35</b>
	<b>Literatura</b>	<b>38</b>
	<b>Abstrakt</b>	<b>43</b>

# ÚVOD

Aktuální vývoj situace v oblasti obnovitelných zdrojů energie v České republice (ČR), kdy po masivním rozvoji fotovoltaických (FV) elektráren v letech 2009 – 2012 došlo k omezení podpory vykupované energie, vedl k zaměření dizertační práce na řídicí procesy zabývající se optimalizací jednotlivých výrobních jednotek s obnovitelnými zdroji energie, možnostmi jejich uspořádání a nastavení k zajištění korektního provozu.

Obnovitelné zdroje energie (OZE) se staly v posledním desetiletí oblastí dynamického rozvoje a soustředěného výzkumu v souvislosti s narůstající spotřebou energie a postupným vyčerpáváním zásob fosilních zdrojů. Širší zájem veřejnosti o obnovitelné zdroje energie byl způsoben snižováním investičních nákladů v důsledku existence nových výrobních technologií a nárůstu konkurence na obchodním trhu.

Provedené legislativní změny (především zrušení podpory pro nové zdroje od roku 2014) ve své podstatě zabrzdlily masivní rozvoj výstavby velkých elektráren využívajících sluneční záření a větrnou energii, ke kterému došlo v letech 2009–2011. V souvislosti s provedenými opatřeními (zrušení daňových úlev, snížení výkupních cen, dodatečné zdanění výrobních zdrojů) se provozovatelé stávajících instalací zaměřili především na optimalizaci provozních celků a diagnostiku případných defektů pro maximalizaci efektivity výroby a zajištění požadované provozní výkonnosti.

Pro tyto typy obnovitelných zdrojů se tak v otevřela nová oblast využití v aplikacích s malým výkonem, kde není primární snahou zisk, ale zvýšení nezávislosti na veřejné distribuční síti, tedy maximální využití vyrobené elektrické energie v místě instalace zdroje. Současné řešení těchto energetických systémů tak předpokládá využití akumulace energie v různých formách, zároveň však narážíme na problém související s charakterem některých obnovitelných zdrojů. Sluneční a větrná energie je obtížně regulovatelný zdroj, který má stochastický charakter a je tak špatně předvídatelný.

Vzhledem ke zmíněné současné situaci v oblasti obnovitelných zdrojů se jako perspektivní jeví malé energetické systémy. Aplikační sféra rodinných domů, malých výrobních objektů, případně administrativních budov je cílovou oblastí stávajícího výzkumu a vývoje. Tuto skutečnost indikují nové i probíhající dotační programy s využitím finančních zdrojů ČR a EU.

Dizertační práce představuje komentovaný soubor článků tvořících ucelený pohled na řízení, matematické modelování, optimalizaci a využití energetických systémů s obnovitelnými zdroji elektrické energie.

# 1 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

V souvislosti se zadaným tématem dizertační práce byly specifikovány následující cíle:

- návrh řídicího systému pro hybridní systém s akumulací,
- analýza řídicí logiky využívané v současných konfiguracích,
- definice podmínek pro řízení hybridních energetických systémů v korelaci s provozními stavy,
- tvorba matematického modelu hybridního energetického systému,
- optimalizace energetických systémů s alternativními zdroji energie.

Návrh řídicí logiky pro hybridní systém souvisí s realizací instalace experimentálního hybridního systému, který kombinuje různé typy obnovitelných zdrojů spolu s akumulací. Ve fázi návrhu je třeba specifikovat základní funkce řídicího systému s ohledem na provozní požadavky a bezpečnost celého energetického zařízení.

Následným krokem je analýza řídicí logiky využívané v současných konfiguracích. Pro provedení základní analýzy lze využít navržený řídicí systém, který byl ve výchozím stavu nastaven dle doporučení výrobce. Popis vnitřní logiky ve výchozím nastavení umožní podrobněji popsat jednotlivé provozní stavy využívané v současných konfiguracích.

S využitím získaných poznatků bude možné posoudit vhodnost dosavadního řešení a navrhnout řešení vedoucí k optimalizaci využití stávajícího hybridního systému i s ohledem na provozní vlastnosti a provozní stavy.

Tvorba matematického modelu hybridního energetického systému souvisí s provozními stavy, které jsou s ohledem na rozsáhlé parametry jednotlivých prvků tvořících celý systém, obtížně definovatelné. Sestavený matematický model, který umožní bližší pohled na jednotlivé energetické toky v systému, může sloužit jako optimalizační nástroj pro úpravu stávajícího nastavení.

Možnosti optimalizace energetických systémů tvoří poslední z cílů dizertační práce. Podkladem pro zpracování jsou splněné předcházející cíle, s jejichž využitím je možné stanovit možnosti přístupů k optimalizaci provozu systémů s obnovitelnými zdroji energie.

## 2 NÁVRH HYBRIDNÍHO SYSTÉMU

Hlavní motivací pro návrh a realizaci hybridního systému s akumulací byl dosavadní způsob řešení. Akumulační systémy se využívaly v kombinaci s FV systémy pouze jako záložní zdroj, kdy byla akumulace primárně udržována zcela nabitá, jak je popsáno níže. Na základě tohoto způsobu řízení, které snižuje celkový potenciál využití jednotlivých energetických zdrojů, vznikl námět na téma dizertační práce, jejímž dílčím cílem by byl korektní návrh systému z hlediska uspořádání a řízení. Optimální využití jednotlivých energetických systémů je v současné době řešeno v rámci dvou projektů TA ČR, které jsou zaměřeny na zvýšení účinnosti energetických systémů s výrobou tepla a elektrické energie u velkých zdrojů a na optimalizaci řídicích algoritmů v hybridních energetických systémech. Tyto řešené projekty dokládají aktuálnost tématu a potřebost hledání nových způsobů řízení a využití.

První řešený projekt s názvem Plánování a optimalizace výroby energetických zdrojů je zařazen do programu Alfa TA ČR. Projekt je zaměřen na optimalizaci energetických procesů v klasických tepelných elektrárnách a teplárnách s možností využití řídicích procesů u OZE.

Druhý řešený projekt s názvem Bezuhlíkový hybridní energetický systém s akumulací pracující jako aktivní prvek elektrizační soustavy je zařazen do programu Epsilon TA ČR. Tento projekt je zaměřen na analýzu vnitřního uspořádání hybridního systému, řídicích algoritmů a přepínání provozních stavů s ohledem na kvalitu napětí v síti a maximální využití vyrobené elektrické energie. Tento projekt je úzce provázán s tématem dizertační práce a navazuje na dílčí výsledky prezentované v následujícím textu.

### 2.1 Výchozí konfigurace hybridního systému

Výchozí konfigurace hybridního systému vychází ze základních požadavků na využití a výkon systému, dobu autonomního provozu a z výkonů dostupných zdrojů. S ohledem na předem definovanou lokalitu (Laboratoř obnovitelných zdrojů UEEN FEKT VUT v Brně) byly instalovány dva zdroje energie - monokrystalické FV panely o souhrnném výkonu  $P_{FVS}=2,25$  kWp a rychloběžná větrná turbína s nominálním výkonem  $P_{VtE}=1$  kW při rychlosti větru  $11,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Jednotlivé zdroje byly, ve fázi ověřovacího provozu, připojeny k akumulaci přes regulátor nabíjení Morningstar TS–MPPT–60.

Akumulaci energie zajišťují gelové olověné akumulátory v sérioparalelním zapojení tak, aby bylo získáno napětí 48 V a kapacita 400 Ah. Celková kapacita akumulátorů tak dosahuje 20 kWh elektrické energie. V systému jsou použity olověné akumulátory navzdory současnému trendu nasazování lithiových akumulátorů, které jsou výhodnější z hlediska parametrů, jako je počet cyklů a hloubka vybití (DOD–Depth of Discharge), která běžně dosahuje hodnot 80–100 %. Olověné akumulátory byly zvoleny především kvůli nižší ceně a pokročilým možnostem nastavení nabíjecích charakteristik u současných regulátorů. Zvolená míra DOD pro tyto akumulátory je 50 %, což dle údajů výrobce zajistí maximální pokles celkové kapacity

na 60 % jmenovité hodnoty po absolvování přibližně 1100 nabíjecích cyklů. Při uvažování jednoho nabíjecího cyklu denně tak tento stav nastane za tři roky.

Hybridní měniče Studer Innotec XTM2600 jsou jednofázové a jsou zapojeny v režimu Master–Slave<sup>1</sup>, což umožňuje přepnout podřízený střídač do klidového režimu při nízkém zatížení systému a snížit tak vlastní spotřebu systému. Hybridní měniče umožňují připojení na síť pro zajištění nabíjení akumulace ze sítě (svorky AC–IN). Výstupní svorky (AC–OUT) představují zálohovanou ostrovní síť (Grid–OFF), jejíž frekvence je řízena střídačem na 50 Hz. Označení svorek vychází z označení výrobce. Základní přehledové schéma bylo publikováno v literatuře [19], [21], [23] a [24].

Realizovaný experimentální hybridní systém využívá integrovaný řídicí systém střídačů Studer Innotec, jejichž pokročilé možnosti nastavení zajistí bezpečný provoz a pomocí společné sběrnice zajišťují komunikaci a nastavení dalších komponent systému. Použitá sběrnice je řetězcová a umožňuje propojení následujících prvků řídicího systému:

- RCC-02 – Uživatelské rozhraní s LCD displejem pro nastavení a kontrolu řídicího systému.
- BSP – Modul pro monitorování stavu akumulace.
- Xcom-232i – Datalogger a převodník komunikačního rozhraní Studer na standardní rozhraní RS-232.
- Xcom-MS – Převodník komunikačního rozhraní Studer na rozhraní RS-485 pro regulátory Morningstar TS-MPPT-60.
- XTM-2600 – Střídač Xtender umožňuje přímé zapojení do řídicího systému.

Řídicí systém tak zajišťuje základní požadavky na bezpečnost, kdy jsou korektně nastaveny všechny hodnoty související s provozem a nabíjením akumulátorů. Pro nabíjení akumulátorů je možné sestavit kompletní nabíjecí cyklus sestávající z následujících nabíjecích fází:

- Fáze souvislého nabíjení (bulk stage).
- Absorpční fáze (absorption stage).
- Udržovací fáze (float stage).
- Fáze ekvalizace (equalize stage) – volitelná.

Jednotlivé uvedené meze napětí je možné v řídicím systému nastavit. Průběh napětí akumulčního systému následně respektuje tyto meze, jak je zřejmé z Obr. 2.4 v kapitole 2.4, který zobrazuje data získaná v průběhu provozního měření.

---

<sup>1</sup>Master-Slave zapojení využívá komunikace mezi střídači zapojených na jedné fázi. V případě nízkého odebraného výkonu ze systému nebo nízkého vstupního výkonu na straně zdrojů, je v provozu střídač označený jako Master. Slave se nachází v úsporném režimu a aktivuje se až při navýšení výkonu. Výhodou tohoto řešení je nižší vlastní spotřeba a vyšší provozní účinnost jednotlivých střídačů.

## 2.1.1 Výchozí nastavení řídicího systému

Výrobce přednastavená konfigurace řídicího systému uvažuje jako primární zdroj energie akumulátory, které tak mají prioritu pro nabíjení. Cílem je udržovat akumulátory neustále plně nabitě, aby bylo zajištěno zálohování ostrovní sítě (AC–OUT). Systém tedy pracuje jako záložní zdroj (UPS–Uninterruptible Power Source). Tato konfigurace s sebou přináší z provozního hlediska následující výhody i nevýhody.

Výhody:

- Nízký počet pracovních cyklů akumulace.
- Vyšší stupeň zajištění dodávky elektrické energie.
- Výstupní výkon může být vyšší, než je dostupný výkon z veřejné sítě (AC–IN) omezený hlavním jistícím prvkem.

Nevýhody:

- Dochází k omezení výkonu obnovitelných zdrojů – potenciální problém pro větrnou turbínu.
- Při zanedbatelném poklesu stavu nabití (SOC–State of Charge) dochází k odběru elektrické energie z veřejné sítě.
- Systém primárně využívá veřejnou síť místo dobíjení akumulace z dostupných obnovitelných zdrojů.
- Systém neumožňuje dodávku přebytků energie do distribuční sítě.

Omezení výroby obnovitelných zdrojů lze v této konfiguraci považovat za neefektivní, protože není využito maximálního potenciálu zdrojů v dané lokalitě. Především pro větrnou turbínu představuje tlumení výroby (resp. snížení zátěže) zásadní problém, který přímo ovlivňuje bezpečnost celého systému. Pokud nastane situace, kdy je generátor turbíny náhle odlehčen regulátorem, tedy dojde k poklesu zátěžného momentu, přičemž hnací moment větrné turbíny zůstane konstantní, je důsledkem nárůst úhlové rychlosti soustavy a s tím spojený nárůst indukovaného napětí na svorkách generátoru. Použitý synchronní generátor s permanentními magnety neumožňuje změnu magnetické indukce a tento typ generátoru tak postrádá možnost regulace výstupního napětí pomocí budícího obvodu. Při urychlení generátoru tak dochází k nárůstu napětí nad hodnoty přípustné pro daný regulátor (150 V pro TS-MPPT-60) a vybavení přepět'ových ochran na vstupní části regulátoru.

Řídicí systém tak musí umožnit správnou konfiguraci regulátoru, který bude schopen při nárůstu napětí rotor turbíny zatížit tak, aby udržoval optimální pracovní bod na výkonové charakteristice. Regulátor TS-MPPT-60 je schopen rychle reagovat na změny napětí na vstupní části za předpokladu, že je naprogramována výkonová zatěžovací křivka.

Pro tyto účely byl sestaven základní model větrné elektrárny se synchronním generátorem s permanentními magnety (prezentován v literatuře [23] a [24]) tak, aby bylo možné predikovat chování systému při určitých rychlostech větru. Následně byla s využitím modelu se-

stavena zatěžovací charakteristika regulátoru, která byla naprogramována do regulátoru a následně verifikována.

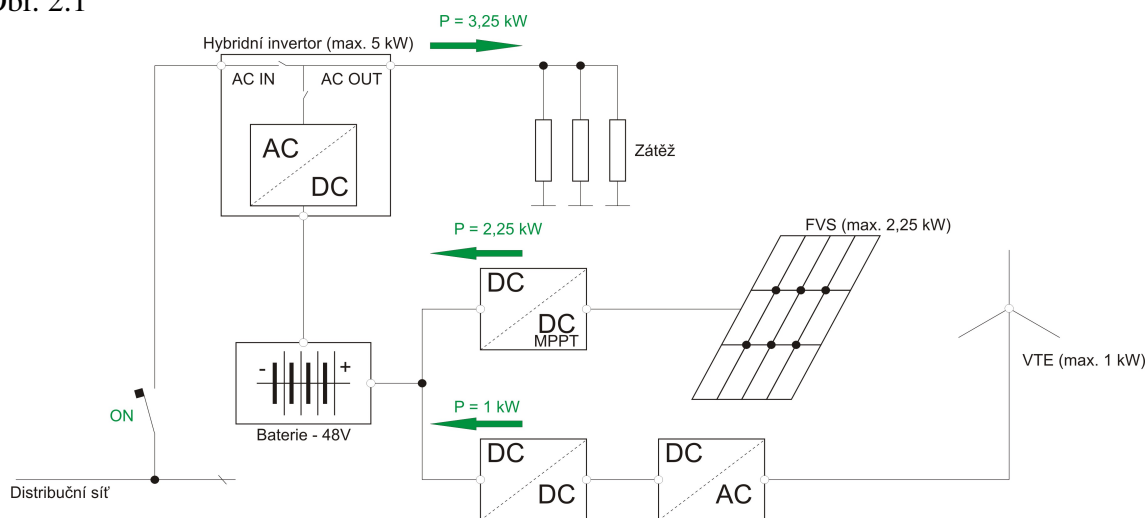
Dále je vhodné systém vybavit systémem pro zastavení větrné elektrárny při plně nabitých akumulátorech. K tomuto účelu lze použít programovatelné reléové kontakty na střídačích Studer, jejichž spínání lze nastavit prostřednictvím RCC a využít například k připojení dodatečné odporové zátěže na výstupní svorky generátoru. Připojení přídatné zátěže (např. tepelného spotřebiče) se využívá v systémech s regulátory toku výkonu a je metodou sloužící k zajištění bilance výroby a spotřeby elektrické energie. V případě hybridního energetického systému s akumulací řeší připojení přídatné zátěže částečně tlumení OZE při nabitém akumulátoru.

## 2.2 Analýza výchozí vnitřní logiky systému

V následující části jsou podrobněji popsány různé provozní stavy systému při výchozím nastavení a jejich vliv na chování celého hybridního systému. Pro vysvětlení je uvažován maximální výkon fotovoltaického systému  $P_{FVS} = 2,25$  kW, výkon větrné turbíny  $P_{VtE} = 1$  kW. Není-li uvedeno jinak, předpokládají se takové meteorologické podmínky, které umožňují provozovat obnovitelné zdroje s jejich nominálním výkonem. Akumulátory jsou ve výchozím stavu nabitě na 100 % SOC. Chování řídicího systému, které je uvedeno v následujících odstavcích, bylo zaznamenáno při výchozím nastavení řídicího systému z výroby (publikováno v [23]).

### 2.2.1 Výchozí nastavení – příkon zátěže odpovídající výrobě

V případě, že příkon zátěže odpovídá výrobě, je veškerá vyrobená energie spotřebována v rámci objektu. Řídicí systém tak správně primárně využívá dostupnou energii z obnovitelných zdrojů a nevyužívá pro napájení zátěže akumulátory ani síť. Výkonová bilance je na Obr. 2.1



Obr. 2.1: Výkonová bilance systému – Výchozí nastavení (příkon zátěže odpovídající výrobě)

## **2.2.2 Výchozí nastavení – příkon zátěže vyšší než výroba**

V případě, že nastane navýšení příkonu zátěže, řídicí systém začne okamžitě odebírat chybějící výkon ze sítě. Prioritou je zde udržení akumulace na stále stejné hodnotě SOC (v tomto případě 100 %).

## **2.2.3 Výchozí nastavení – příkon zátěže vyšší než výroba, bez sítě**

V případě, že je příkon zátěže vyšší, než výroba elektrické energie z jednotlivých výrobních zdrojů, nastane odběr energie z akumulátorů pouze, nastane-li výpadek veřejné sítě. Systém tak v podstatě pracuje v režimu UPS.

## **2.2.4 Výchozí nastavení – odpojená zátěž, snížená výroba, bez sítě**

Při odpojení celé zátěže systém nabíjí akumulátory dostupným výkonem z obnovitelných zdrojů (v tomto případě nižším než maximálním) s ohledem na stav nabití akumulace (SOC) a aktuální klimatické podmínky. Omezení výkonu zdrojů je zde vyvoláno regulačním procesem nabíjení akumulace, které je nezbytné pro zabránění přebíjení akumulace. Z předchozího textu je zde zřejmý problém s omezením výkonu u větrné elektrárny, kterou je třeba z bezpečnostních důvodů v tomto případě odstavit. Regulátor musí jako první začít omezovat výkon FV systému, kde nehrozí žádné poškození. Řídicí systém ve výchozím nastavením tuto situaci nerespektuje.

## **2.2.5 Zhodnocení výchozího nastavení řídicího systému**

Na základě získaných zkušeností během ověřovacího provozu výchozí konfigurace systému, lze definovat následující požadavky na logiku řídicího systému a optimalizaci konfigurace.

- Systém musí primárně využívat energetický potenciál obnovitelných zdrojů v místě instalace.
- Je-li výkon z dostupných zdrojů nedostatečný vzhledem k aktuální zátěži, je primárně využita dostupná energie akumulovaná v bateriích. Hloubku vybití je třeba definovat s ohledem na použitý typ akumulace a s dostatečnou rezervou pro případ, že by nebylo možné systém nabít ze sítě (např. z důvodu výpadku sítě).
- V případě definovaného poklesu SOC je akumulace nabita ze sítě, aby se zabránilo degradaci baterií kvůli dlouhému setrvání ve vybitém stavu.
- Umožňují-li to legislativní podmínky a je-li požadavek na dodávku energie do sítě, přicházejí v úvahu dva režimy
  - Dodávka přebytků – v případě, že je akumulace plně nabita, zátěž v systému je menší než výkonový potenciál dostupných zdrojů, je možné místo omezení výkonu výrobních zdrojů dodávat přebytečnou energii do sítě (grid-feeding).
  - Nucená dodávka výkonu do sítě – v případě požadavku je možné definovat výkon, časový interval a maximální hodnotu DOD, po kterou bude systém dodávat energii

do sítě (force grid-feeding). V tomto případě lze systém dálkově ovládat a v případě několika menších systémů je řadit do virtuálních bloků s větším výkonem, které tak lze použít např. pro dispečerské řízení.

Analýza energetických toků u stávajícího řešení a návrh na úpravu logiky řídicího systému byly publikovány v článku [23]

## **2.3 Konfigurace optimalizovaného hybridního systému s akumulací**

Jedním z cílů dizertační práce bylo optimalizovat výchozí návrh hybridního systému s ohledem na provozní vlastnosti a požadované chování systému. Hlavní nedostatky výchozího nastavení spočívaly v neoptimálním využití dostupných energetických zdrojů. Na základě získaných poznatků byl vytvořen koncept hybridního systému (publikován v [23]), který by optimálně využíval potenciál dostupných zdrojů, a dle požadavku byl schopen dodávat energii do sítě.

### **2.3.1 Korektní nastavení regulátoru větrné turbíny**

Pro maximalizaci využití energie větrné turbíny, bylo zapotřebí provést korektní nastavení DC-DC regulátoru. Při ověřovacím provozu výchozího nastavení bylo zjištěno nesprávné nastavení regulátoru pro větrnou turbínu, který neměl správně nakonfigurovanou zatěžovací charakteristiku.

S využitím modelu tak byla stanovena výsledná zatěžovací křivka generátoru. Výstupy simulací modelu byly konzultovány s technickou podporou výrobce regulátoru Morningstar a následně byl regulátor správně nakonfigurován tak, aby neustále zatěžoval generátor a zabránilo se tak nárůstu napětí při náhlých poryvech větru. Regulátor reaguje na zvýšené napětí na vstupu a začne odebírat větší proud, čímž je generátor zpomalen a udržován v optimálních otáčkách.

V případě dosažení 100 % SOC akumulace je navrženo elektrické zabrzdění rotoru větrné elektrárny pomocí výkonového stykače, který zajistí zkratování výstupních svorek generátoru. Řídicí signál pro výkonový stykač je vyveden z bezpotenciálového programovatelného výstupu střídače.

### **2.3.2 Vzdálený přístup k systému**

Jedním doporučením při analýze výchozí logiky systému bylo dálkové ovládání umožňující aktivaci dodávky energie do systému (force grid-feeding). K realizaci toto požadavků je možné přistoupit v případě, že systém bude možné dálkově ovládat. V rámci výchozí konfigurace bylo prováděno veškeré nastavení prostřednictvím RCC, tzn. vyžadovalo fyzickou přítomnost obsluhy. K systému je možné se lokálně připojit prostřednictvím rozhraní RS-232, které zajišťuje převodník Xcom-RS232. Na základě komunikace s dodavatelem systému bylo

následně navrženo rozšíření systému o modul, zajišťující připojení k internetu. Systém umožňuje připojení prostřednictvím převodníku RS–232-LAN, případně RS–232-GSM. Vzhledem k dostupnosti sítě LAN bylo zvoleno doplnění systému o převodník RS–232-LAN (Moxa NPort 5110A).

Následně lze systém zaregistrovat na portálu výrobce Studer Innotec a přes zabezpečené rozhraní přistupovat k ovládání a nastavení systému přes vizualizované rozhraní RCC, tedy stejným způsobem jako při lokální obsluze.

### **2.3.3 Měřicí systém pro záznam meteorologických podmínek**

Měřicí systém pro vyhodnocení a záznam meteorologických podmínek je založen na programovatelném PLC Unitronics Vision V1040. Výchozí návrh pro měření hodnot rychlosti větru s využitím senzoru Mierij Meteo a intenzity slunečního záření byl prezentovaný v publikacích [19] a [22], kde autor dizertační práce využil znalostí z řešení vlastní diplomové práce [18].

V roce 2016 byl měřicí systém přepracován (Obr. 2.2) při vedení bakalářské práce Juraje Lahvičky [7], který pod vedením autora dizertační práce navrhnul upravené schéma a realizoval zapojení.

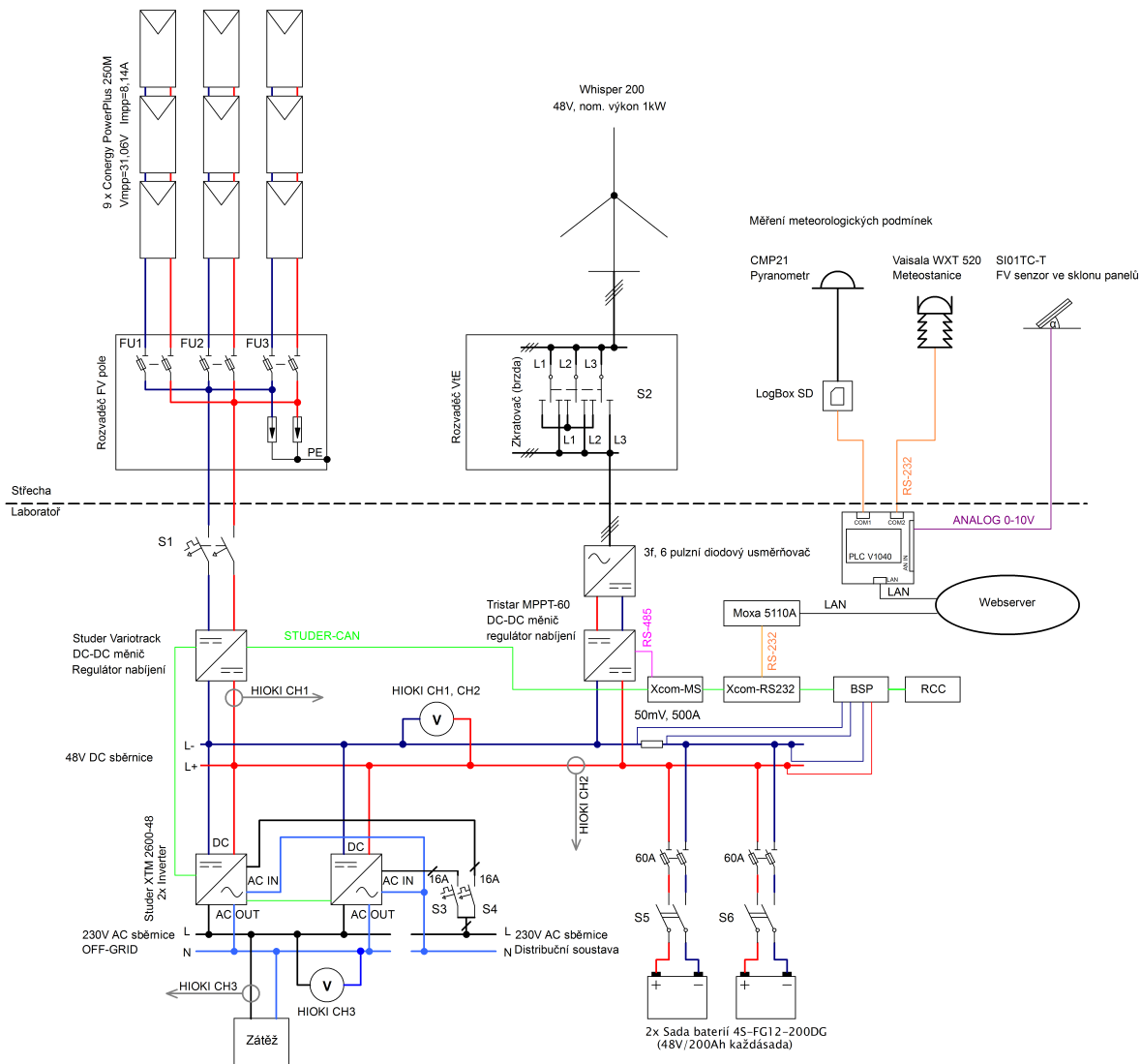
Monitorovací systém je v aktuální verzi založen na senzoru Vaisala WXT 520, který měří rychlost a směr větru, teplotu vzduchu, atmosférický tlak, relativní vlhkost a srážkové úhrny. Další senzory představují pyranometry (CMP21, SG02) a srovnávací článek (SI01TCT) pro měření intenzity slunečního záření v rovině panelů i ve vodorovné rovině. Naměřené hodnoty se ukládají v půlminutových intervalech do vnitřní paměti a následně do souboru typu XLS (Excel). Zároveň jsou okamžité hodnoty přístupné prostřednictvím webserveru pro online monitoring.

Využití měření meteorologických hodnot je především v oblasti validace vytvořených modelů a výzkumných zařízení i ve spolupráci s dalšími ústavu fakulty (např. bakalářská práce Jana Mazocha [15] z Ústavu automatizace a měřicí techniky)

## **2.4 Provozní měření na hybridním energetickém systému**

Pro zajištění základního provozního měření byla využita funkce integrovaného dataloggeru v řídicím systému, který prostřednictvím datové komunikace s jednotlivými prvky systému ukládá požadované veličiny. Základní hodnoty jednotlivých veličin se ukládají na SD kartu kontinuálně v minutových intervalech do CSV souboru.

Pro zpracování souborů se zaznamenanými údaji byl vytvořen skript v programu Matlab. Ukázky výsledných grafických závislosti jsou uvedeny v Obr. 2.3 a Obr. 2.4 a zobrazují časový úsek v délce jednoho dne. Podrobná analýza je v nezkrácené verzi dizertační práce.



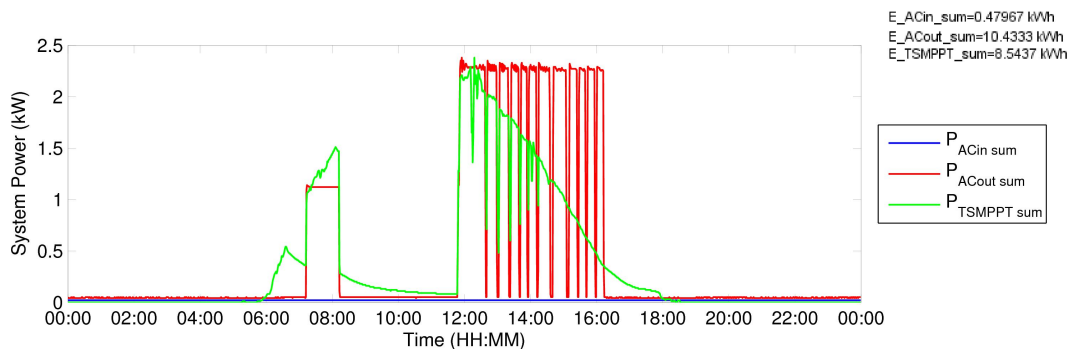
Obr. 2.2: Jednopolové schéma hybridního systému po optimalizaci

## 2.5 Zhodnocení dosažených výsledků

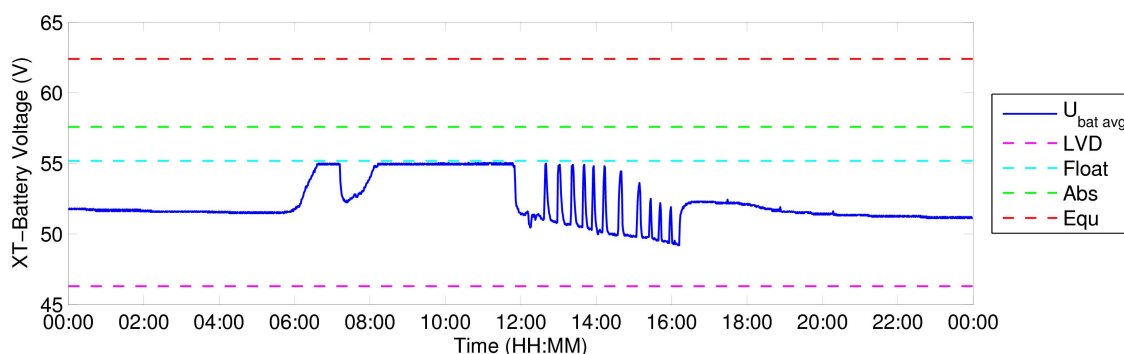
Jak bylo uvedeno v předchozí části kapitoly, korektní řešení a konfigurace hybridního systému je náročné na realizaci především z hlediska komunikace, nastavení a spolupráce jednotlivých prvků v systému. V rámci realizace systému lze, na základě získaných zkušeností, doporučit systémové řešení na jedné platformě řídicího systému, které umožňuje bezproblémovou konfiguraci jednotlivých prvků.

Prezentovaný návrh systému po optimalizaci je v maximální možné míře založen na komponentech firmy Studer-Innotec a je využito řídicích prvků a nastavení realizovatelných v servisním menu. Tento způsob řešení minimalizuje pravděpodobnost výskytu problému souvisejících s nekompatibilitou jednotlivých komponent různých výrobců a řídicích procesů realizovaných separátně odlišnými systémy.

Na základě autorových zkušeností s provozem hybridních systémů získaných na labo-



Obr. 2.3: Výsledky provozního měření 2. dubna 2016 – Přehled výkonů v systému



Obr. 2.4: Výsledky provozního měření 2. dubna 2016 – Napětí na DC vstupu střídačů

ratorním experimentálním systému a na systémech realizovaných společností SUNLUX, lze konstatovat, že v současnosti je správné nastavení celého systému komplexní záležitostí, které vyžaduje pravidelné vyhodnocování provozních dat a následné úpravy nastavení. Důvodem je široká škála různých provozních stavů, které je velmi obtížné predikovat ve fázi návrhu a liší se dle konkrétní instalace. Z těchto důvodů byly vytvořeny nástroje pro zpracování měřených dat spolu s využitím vzdáleného přístupu k systému.

Z hlediska stanovených cílů dizertační práce, lze konstatovat, že kapitola 2 spolu s publikovanými články ([19], [20], [21], [22], [23] a [23]) představuje naplnění cílů dizertační práce týkajících se návrhu řídicího systému pro hybridní systém s akumulací, analýzy řídicí logiky využívané v současných konfiguracích a definice podmínek pro řízení hybridních energetických systémů v korelaci s provozními stavy.

### 3 MODELOVÁNÍ PRVKŮ HYBRIDNÍCH SYSTÉMŮ

Možnosti přístupu k modelování prvků energetických systémů jsou poměrně rozsáhlé. Model může být popsán a sestaven v různém prostředí s ohledem na jeho použití a očekávané výstupy. Jak je uvedeno v literatuře [6], v současnosti existuje široká škála statistických i analytických modelů pro účely dimenzování a návrh systémů. Běžně využívané matematické modely dostupné v literatuře a vědeckých publikacích jsou sestaveny na základě definovaných zjednodušení (faktor ideality diody, konstanty). Po analýze několika matematických modelů jsme dospěli k názoru, že se pokusíme udělat matematický model tak, aby reflektoval většinu standardně zanedbávaných závislostí.

V rámci naplnění cíle týkajícího se vytvoření matematických modelů byly v průběhu doktorského studia postupně sestaveny modely jednotlivých dílčích částí, které obvykle tvoří energetické systémy s alternativními zdroji energie. Jako prostředí pro sestavení matematických modelů byl zvolen Matlab Simulink, protože se jedná o robustní nástroj, který umožňuje zpracování rozsáhlých datových souborů s výstupními hodnotami veličin získanými prostřednictvím vytvořených modelů. Další výhodou je možnost dílčích výpočtů a vykreslení výstupních grafů s využitím vlastních skriptů.

V návaznosti na řešení projektů spolupráce s průmyslem, do jejichž řešení byl autor dizertační práce aktivně zapojen v průběhu studia, byly vytvořeny i matematické modely prvků tepelných energetických systémů.

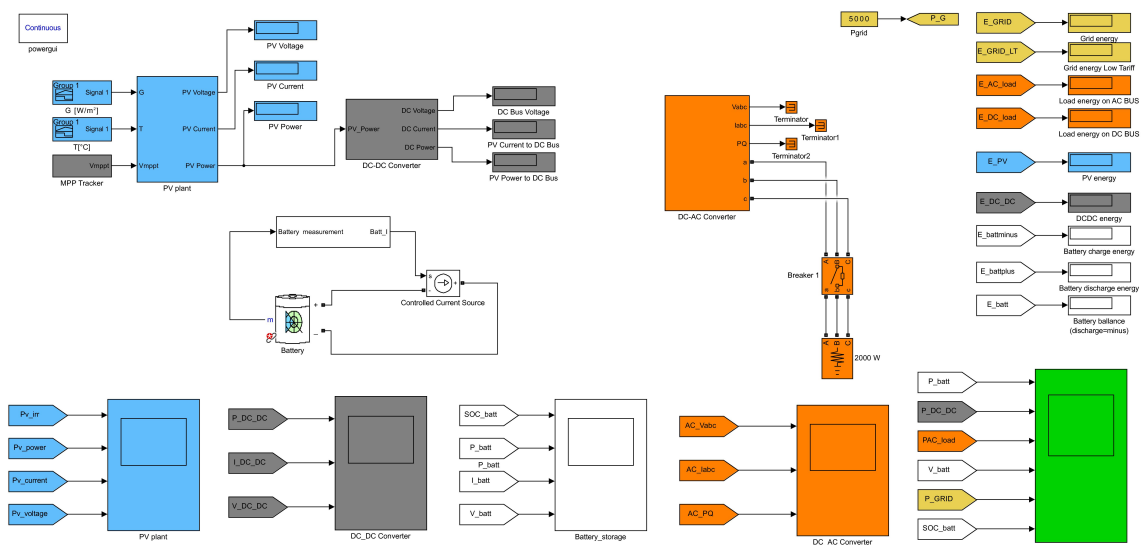
Sestavené matematické modely jsou následující:

- model rychloběžné větrné turbíny se synchronním generátorem s permanentními magnety – publikován v článku [24],
- model fotovoltaického panelu – publikován v článku [17],
- model plochého solárního kolektoru – publikován v článku [8],
- model solárního systému s tepelným výměníkem – publikován v článku [8],
- model hybridního systému pro napájení rychlonabíjecích stanic elektromobilů – publikován v článcích [9] a [12].

V následující kapitole je detailně popsán model hybridního systému, který byl použit pro sestavení provozních charakteristik při napájení rychlonabíjecích stanic uvedených v článku [12]. Tento model byl vybrán, protože obsahuje celé spektrum řešených provozních stavů, které se mohou při chodu systému vyskytnout. Zároveň se jedná, vzhledem k současnému vývoji v oblasti elektromobility, o systém, jehož realizace může pomoci eliminovat negativní vlivy na síť spojené s provozem rychlonabíjecích stanic velkých výkonů. Výsledky simulace prezentují články [9] a [12].

### 3.1 Matematický model hybridního systému

Model hybridního systému (Obr. 3.1 [12]) byl sestavený v prostředí Matlab/Simulink s využitím prvků knihovny SimPowerSystems. Umožňuje analyzovat energetické a výkonové bilance celého systému, ale i chování jednotlivých částí. Tvoří ho FV pole připojené na DC sběrnici prostřednictvím DC-DC regulátoru, akumulárního systému, DC-AC měniče a zátěže. Kromě bloků simulujících tyto fyzické prvky jsou v modelu vytvořeny i zobrazovací a výpočetní bloky pro grafickou reprezentaci výsledků simulovaných provozních scénářů. Po vytvoření modelu byla provedena jeho validace spočívající v porovnání výsledků s měřeními daty na experimentálním hybridním systému v laboratořích UEEN FEKT VUT v Brně (Obr. 3.3).



Obr. 3.1: Implementace hybridního energetického systému v prostředí Matlab Simulink [12]

#### 3.1.1 Fotovoltaický panel

Základním zdrojem energie je u fotovoltaické elektrárny fotovoltaický panel tvořený sériovým řazením jednotlivých fotovoltaických článků. Fotovoltaický panel byl modelován na základě všeobecného jednodiodového ekvivalentního obvodu. Detailní popis a možnosti stanovení náhradních parametrů jsou podrobně rozebrány v [3].

Výstupní proud z FV panelu lze popsat rovnicí 3.1:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \cdot \left( e^{\frac{q \cdot (V + I_{pv} \cdot R_s)}{N_s \cdot k \cdot T \cdot D}} - 1 \right) - \frac{V + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}}, \quad (3.1)$$

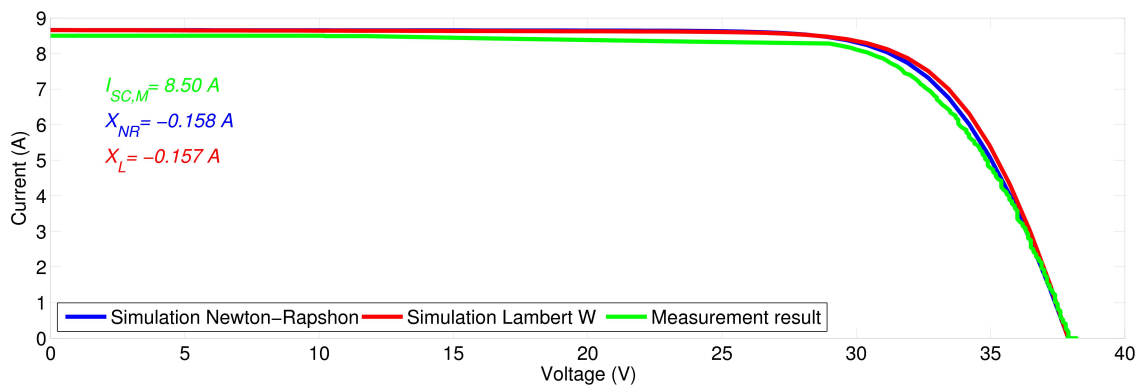
kde:

- $I_{pv}$  je výstupní proud FV panelu (A),
- $I_{ph}$  je proud generovaný fotodiodou (A),
- $I_s$  je saturační proud (A),
- $q$  je náboj elektronu ( $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C),

- $V$  je výstupní napětí panelu (V),
- $N_s$  je počet článků panelu v sérii (-),
- $k$  je Boltzmannova konstanta ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ),
- $T$  je teplota článku (K)
- $D$  je faktor ideality diody (-),
- $R_s$  je sériový odpor panelu ( $\Omega$ ),
- $R_{sh}$  je paralelní odpor panelu ( $\Omega$ ).

Parametry  $R_s$  a  $R_{sh}$  je možné stanovit analyticky (za předpokladu zvolení parametru  $D$ ) pomocí Lambertovy W funkce [3] z hodnot uvedených v datovém listu konkrétního panelu. Další možností pro stanovení potřebných parametrů je použití numerické Newton-Raphsonovy iterační metody [25]. V tomto případě není třeba zvolit parametr  $D$ , ale metoda je velmi závislá na zvoleném počátečním přiblížení, jinak může při výpočtu divergovat.

Srovnání výsledků simulace modelu s provedeným měřením na reálném panelu je vidět na tvaru  $I - V$  křivky na Obr. 3.2. V oblasti proudu nakrátko je odchylka simulovaných hodnot od měřených ( $\Delta I = 1,8 \%$ ) způsobena plošným zastíněním panelu nečistotami v průběhu měření, případně celkovou degradací panelu, které se projevuje snížením hodnoty proudu nakrátko vůči hodnotě uváděné v datovém listu výrobce. Jak je zřejmé z Obr. 3.2, rozdíly mezi výsledky simulovaných hodnot panelu a parametry získanými pomocí Newton-Raphsonovy iterační metody a Lambertovy W funkce jsou minimální, a lze je použít pro stanovení potřebných parametrů ( $A$ ,  $R_s$  a  $R_{sh}$ ).



Obr. 3.2: Srovnání naměřené  $I-V$  křivky se simulovanými výsledky

Dalšími vstupními parametry, které mají vliv na výsledný tvar  $I-V$  křivky jsou teplota panelu  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), intenzita slunečního záření v rovině panelu  $G$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) a aktuální napětí na výstupu panelu, tj. pracovní napětí  $V_{ref}$  určené trackerem maximálního pracovního bodu (MPPT–Maximum Power Point Tracker). Pro fotovoltaický panel a pro jednotlivé stringy byla v modelu vytvořena maska umožňující měnit vstupní parametry a konfiguraci zapojení. FV pole je následně tvořeno sérioparalelním řazením panelů (vždy podle požadavků na systémové napětí a proud).

Modelovaný systém použitý při validaci byl tvořen třemi paralelně řazenými stringy. Každý string je složen ze tří sériově řazených panelů. Panely byly při validaci orientovány na jih se sklonem 35°. Vstupní hodnoty pro simulaci (denní průběh intenzity slunečního záření a teplota panelu) odpovídají přímo dané orientaci.

### 3.1.2 DC-DC konvertor

Blok simulující chování DC-DC regulátoru byl modelován pouze z pohledu toku výkonu a příslušných regulačních funkcí, spínací pochody a přechodné děje nebyly uvažovány. Vstupní veličinou do bloku je výstupní výkon FV pole. Následně je tento výkon vynásoben regulačním koeficientem  $Q$ , který respektuje aktuální stav akumulace a podle aktuálního napětí akumulčního systému reguluje výkon v rozmezí 0-100 %. Závislost regulačního koeficientu na napětí akumulace byla stanovena experimentálně. Výstupní proud regulátoru je dále s pomocí aktuální hodnoty napětí akumulace vypočítán z výstupního výkonu DC-DC regulátoru a je využit pro nabíjení akumulace, případně napájení připojené zátěže. Kromě výše uvedených funkcí obsahuje DC-DC regulátor funkci sledování maximálního bodu výkonu FV pole za účelem dosažení vyšší provozní účinnosti. Vzhledem ke klimatickým závislostem parametrů popisující průběh  $I$ - $V$  křivky se maximální bod výkonu (Maximum Power Point – MPP) neustále mění a v každém čase existuje jedna hodnota napětí  $V_{ref}$ , tj. zatížení FV pole, při kterém je možné odebírat maximální výkon [2],[27]. Tato skutečnost je důsledkem nelineárního průběhu  $I$ - $V$  křivky.

### 3.1.3 Akumulační systém

Pro simulaci akumulčního systému byl použit model akumulátoru z knihovny SimPower Systems, který reprezentuje parametrizovaný model obecného akumulátoru. Simulace je založena na principu řízeného zdroje napětí s vnitřním odporem. Pro účely modelu bylo v souvislosti s použitou baterií potřeba definovat stavy systému a popsat tak chování hybridního systému – jeho vnitřní logiku tak, aby bylo jasně definované, za jakých okolností a priorit je možné energii do baterie dodávat nebo odebírat.

### 3.1.4 DC-AC měnič

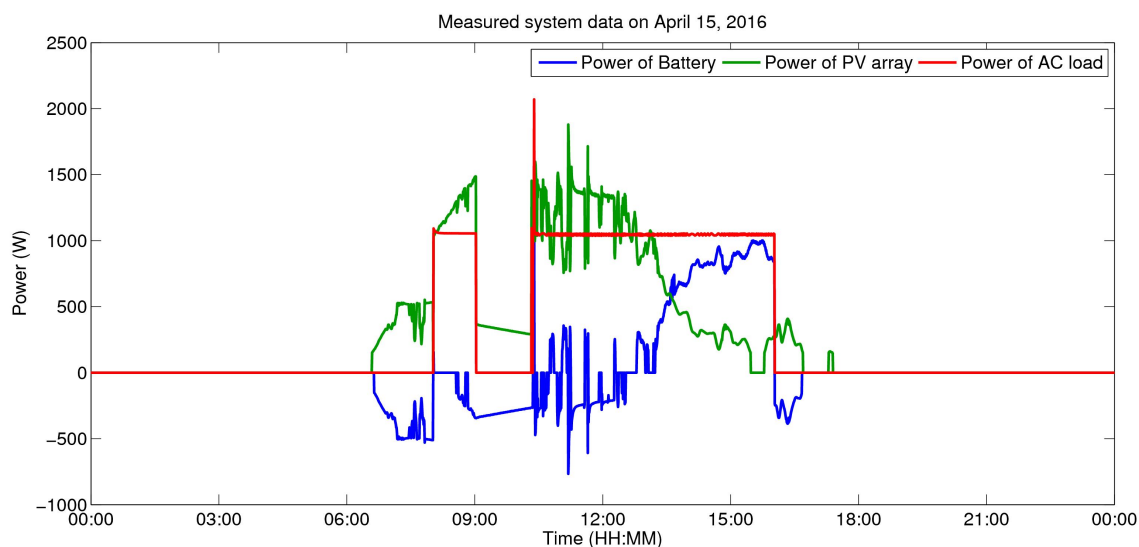
DC-AC měnič byl modelován z pohledu energetických toků jako zařízení, které konvertuje stejnosměrnou energii na energii střídavou se zadanou konstantní účinností. Vstupní veličinou je tedy výkon  $P_{load,DC}$ , výstupní veličinou výkon  $P_{load,AC}$ . V praktických aplikacích se účinnost měniče mění podle aktuálního zatížení. V případě vytvořeného modelu byla účinnost DC-AC měniče zvolena  $\eta_{AC-AC}=95\%$ . Simulační blok je tvořen třífázovým napěťovým zdrojem, který generuje napětí pro připojenou zátěž a je oplněn o měřicí bloky napětí a proudu. Spínací pochody nebyly obdobně jako u DC-DC regulátoru uvažovány.

### 3.1.5 Zátěž

Model využívá přímé načítání požadované proměnné – např. importem měřených, nebo vypočítaných hodnot. Pro účely simulace byl použit předem známý diagram zátěže a vstupuje do modelu jako vstupní proměnná.

## 3.2 Validace modelu

Funkčnost a vnitřní logika vytvořeného modelu byla validována s využitím naměřených dat na experimentálním hybridním systému situovaném v solární laboratoři UEEN FEKT VUT v Brně. Pro provozní měření byl použit výkonový analyzátor HIOKI 3390-10, měření bylo realizováno dne 15. 4. 2016. Zároveň byla stažena data z řídicího systému pro možnost porovnání výsledků. Laboratorní systém, použitý pro validaci, je podrobně popsán v nezkrácené verzi dizertační práce. V rámci provozního měření byly měřeny výkony na výstupu DC-DC regulátoru (CH1 - Obr. 2.2, na rozhraní bateriového systému (CH2 - Obr. 2.2) a výkon na výstupu DC-AC měniče (CH3 - Obr. 2.2). Naměřené průběhy jsou uvedeny v Obr. 3.3. Pro průběh výkonu na baterii znamená záporná hodnota výkonu nabíjení baterie a kladná hodnota výkonu její vybíjení.



Obr. 3.3: Průběhy výkonů měřené na fyzikálním modelu hybridního systému

Jak je z uvedených výsledků zřejmé, vytvořený model vykazuje největší odchylku výsledků 15 % u energie dodané do akumulace ( $\Delta E_{battplus}$  - Tab. 3.1), která je způsobena především volbou odlišného způsobu nabíjení olověné baterie, kdy v modelu není implementována funkce třístupňového nabíjení (bulk stage, absorption stage, float stage), jak je v praxi obvyklé u olověných akumulátorů [31], ale byl pro zjednodušení zvolen jednostupňový systém nabíjení.

Tab. 3.1: Procentuální odchylka měřených a vypočítaných hodnot energie při validaci modelu

Popis veličiny	Veličina	Hodnota
Odchylka energie odebrané zátěží na AC straně	$\Delta E_{AC\_LOAD}$	0,00 %
Odchylka energie dodané do systému DC-DC měničem	$\Delta E_{DC\_DC}$	-0,07 %
Odchylka energie odebrané z akumulace	$\Delta E_{battminus}$	+1,20 %
Odchylka energie dodané do akumulace	$\Delta E_{battplus}$	+15,00 %

### 3.3 Využití sestavených modelů a zhodnocení dosažených výsledků

Sestavené matematické modely našly uplatnění při výuce, kde slouží jako ukázkové příklady pro vysvětlení vlastností jednotlivých simulovaných komponent. Současně jsou využívány při řešení bakalářských a diplomových prací jako vstupní modely pro další parametrizaci a zpřesnění. Další oblastí využití je výzkum v oblasti hybridních systémů zaměřený na porovnání energetických bilancí při odlišných nastaveních a provozních stavech. Jednou z hlavních oblastí využití sestaveného modelu hybridního systému s akumulací je predikce chování systému při různých konfiguracích, parametrech a diagramech zátěže. V rámci dosavadního výzkumu byl sestavený model použit pro stanovení energetických toků v systému, který slouží jako podpůrný systém pro rychlonabíjecí stanice elektromobilů (publikace [9], [12] a [14]). Navržený koncept je v předmětu realizace společností ČEZ a.s a autor dizertační práce se aktivně podílí (v rámci řešitelského týmu) na přípravě podkladů pro realizaci navrženého řešení.

Uvedené sestavené modely představují komplexní souhrn modelů jednotlivých prvků hybridního systému, přičemž se předpokládá jejich další rozšíření, zpřesnění a vzájemné propojení. Uplatnění simulovaných výstupů v praxi je reálné především v oblasti stanovení energetických toků s ohledem na nastavení vnitřní logiky řídicího systému. S využitím sestavených modelů tak lze ověřit např. vliv rozložení zátěže na chování systému.

Na základě sestavených modelů prezentovaných v kapitole 3 a v publikovaných článcích [8], [12] a [24] lze konstatovat, že cíl práce zaměřený na tvorbu matematického modelu hybridního energetického systému byl splněn.

## 4 OPTIMALIZACE A PROVOZNÍ MĚŘENÍ FV SYSTÉMŮ

Optimalizace a provozní měření FV systémů úzce souvisí s tématem dizertační práce a tvoří jeden z dílčích cílů. Na základě autorových praktických zkušeností s provozem systémů s OZE, je častým požadavkem provozovatelů energetických systémů zvýšení efektivity stávajících instalací. V případě průmyslových instalací ( $P_{inst} > 10$  kWp) je základním nástrojem pro určení dostupných možností pro zvýšení energetické (ev. finanční) výnosnosti stávajícího systému, provedení korektní diagnostiky FV systému. Na základě výsledků provedených provozních měření lze následně stanovit možnosti optimalizace vedoucí ke zvýšení výroby el. energie celého systému. Příkladem optimalizace může být rekonfigurace FV pole s ohledem na skutečné parametry jednotlivých FV panelů, změna zapojení pro eliminaci vlivu zastínění od okolních předmětů nebo i pouhá výměna vadných panelů.

V rámci studia se autor podílel na provozních měřeních a diagnostice více než 20 FV systémů, přičemž největší disponoval instalovaným výkonem ( $P_{inst} = 55,8$  MWp). Použitou metodiku a úkony související s diagnostikou a prohlídkou FV systémů autor popsal v publikacích ([10],[11] a [30]).

### 4.1 Provozní výkonnost FV systému

Základním ukazatelem efektivity FV systému je provozní výkonnost, definovaná vztahem 4.1 [11]

$$PR = \frac{E}{(G_E - G_0) \cdot A \cdot E_{ffm}} \quad (\%), \quad (4.1)$$

kde:

- $E$  – Celkový objem elektrické energie vyrobené FV elektrárnou za relevantní období dle údajů zaznamenaných měřicím zařízením PDS (Wh).
- $G_E$  – Celková agregovaná energie slunečního záření zjištěná z údajů solárního čidla instalovaného v rámci FV elektrárny za relevantní období dopadající v lokalitě FV elektrárny na plochu FV panelů. V případě umístění více čidel v rámci FV elektrárny je pro určení celkové agregované energie použit vážený průměr všech naměřených veličin ( $\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2}$ ).
- $A$  – Celková plocha všech instalovaných FV panelů v rámci FV elektrárny ( $\text{m}^2$ ).
- $E_{ffm}$  – Účinnost nových FV panelů použitých v rámci FV elektrárny ke konverzi slunečního záření na elektrickou energii, dle údajů výrobce v datasheetu daného panelu (%). V případě více různých typů FV panelů se použije vážený průměr.
- $G_0$  – Celková agregovaná energie slunečního záření za relevantní období dopadající v lokalitě FVE na plochu solárních panelů, kterou nebylo možno konvertovat na elektrickou energii a dodat do sítě výlučně z některého z následujících důvodů ( $\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2}$ ):
  - V důsledku odpojení FVE nebo snížení napájecího výkonu PDS nezaviněného zhotovitelem.

- V důsledku okolnosti vylučující odpovědnost ve smyslu § 2913 zákona č. 89/2012 Sb. ve znění pozdějších předpisů [26].
- V důsledku zhotovitelem nezaviněného poškození VN vedení připojovacího FVE do sítě třetí osobou mezi přípojným bodem PDS a oplocením FVE.
- V důsledku poruchy nebo odpojení distribuční soustavy v daném místě.
- V důsledku zasněžených modulů.

Na základě praktických zkušeností je stanovena minimální hodnota provozní výkonnosti u kvalitně provedených FV systémů bez závad 85 % pro technologie instalované po roce 2010, v případě starších instalací je požadován limit 80 % s ohledem na nižší účinnost použité technologie.

## 4.2 Kontrola FVE instalace dle ČSN EN 62446

Norma ČSN EN 62446 představuje normu, která definuje postupy a úkony pro konstruktéry a instalátory FV systémů. Cílem normy je efektivní tvorba adekvátní dokumentace pro provozovatele systému.

Na základě uvedených informací lze kontrolu FVE rozdělit na následující dvě části:

- Vizuální kontrola.
- Měření na FV systému

### 4.2.1 Vizuální kontrola

Samotná vizuální kontrola na místě instalace má za cíl ověřit soulad s poskytnutou dokumentací a detekovat potenciální problémy v instalaci. Vizuální prohlídku lze rozdělit do několika částí a na základě provedených prohlídek a měření lze zdůraznit následující body, které jsou obsaženy v uvedené normě, ale při prohlídkách tvořily nejčastější nedostatky:

- Prohlídka DC komponent.
- Kontrola přítomnosti a provedení LPS.
- Prohlídka AC komponent.
- Kontrola označení jednotlivých prvků instalace.

### 4.2.2 Měření na FV systému

Norma rozsáhlým způsobem definuje standardní postup pro měření všech parametrů především pro výchozí kontrolu instalace. V případě periodické kontroly k ověření vlastností systému je možné se zaměřit především na kontrolu DC části instalace sestávající z:

- Ověření izolačního odporu FV pole.
- Měření parametrů stringu ( $U_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $U_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$  a  $I$ - $V$  křivek).

- Provozní měření jednotlivých stringů a FVE jako celku, spolu se stanovením provozní výkonnosti.
- Diagnostika infrakamerou.
- Měření  $I$ - $V$  křivek jednotlivých panelů u stringů vykazujících mimotoleranční parametry.

Pro zhodnocení, zda FV panel splňuje požadované výkonové parametry (měřený výkon v maximálním pracovním bodě při STC podmínkách –  $P_{mpp,STC,meas}$ ) je třeba vycházet z požadavků normy ČSN EN 61215, která uvádí, že FV panel splňuje požadavky, pokud se jeho výkon nachází v rozmezí  $\pm 5\%$  z očekávané hodnoty  $P_{mpp,STC,exp}$ . Očekávanou hodnotou se rozumí hodnota výkonu v maximálním pracovním bodě, která respektuje výrobcem garantovanou odchylku výkonu při výrobě a také pokles výkonu v čase způsobený degradací panelu vlivem provozu.

Pro výpočet očekávaného výkonu v maximálním pracovním bodu po  $n$  letech provozu lze použít vztah 4.2 [30]

$$P_{mpp,STC,exp} = P_{mpp,STC,nom} \cdot (1 + p) \cdot (1 + r)^{n-1} \quad (4.2)$$

Ukázkový výpočet je proveden pro FV panel s nominálním výkonem v pracovním bodu při STC podmínkách ( $P_{mpp,STC,nom} = 240$  Wp), definovaným maximálním ročním poklesem výkonu  $r = -0,345\% \cdot \text{rok}^{-1}$ , tolerancí nominálního výkonu při výrobě  $p = \pm 3\%$  a dobou provozu  $n = 5$  let.

Tolerance nominálního výkonu FV panelu při výrobě dosahuje jak kladných tak záporných hodnot (vlivem materiálových vlastností jednotlivých fotovoltaických článků a kvalitou propojů mezi nimi), z tohoto důvodu je možné uvažovat oba mezní případy. Při dosazení hodnot do vztahu 4.2 lze získat pro zápornou odchylku nominálního výkonu  $p = -3\%$  hodnotu očekávaného výkonu uvedenou ve vztahu 4.3 [30] a pro kladnou odchylku nominálního výkonu  $p = +3\%$  hodnotu uvedenou ve vztahu 4.4 [30].

$$P_{mpp,STC,exp,min} = 240 \cdot (1 - 0,03) \cdot (1 - 0,00345)^{5-1} = 229,60 \text{ Wp} \quad (4.3)$$

$$P_{mpp,STC,exp,max} = 240 \cdot (1 + 0,03) \cdot (1 - 0,00345)^{5-1} = 243,81 \text{ Wp} \quad (4.4)$$

Hodnoty očekávaného výkonu uvažovaného FV panelu po pěti letech provozu tak leží v intervalu  $\langle 229,60; 243,81 \rangle$  Wp. Z hlediska stanovení výkonnosti FV systémů a poskytnutých garancí má v praxi smysl vyhodnocovat minimální hodnotu uvedeného intervalu. V případě, že se výsledky naměřeného výkonu v maximálním pracovním bodě při STC podmínkách ( $P_{mpp,STC,meas}$ ) liší od hodnoty  $P_{mpp,STC,exp,min}$  o méně než  $\pm 5\%$ , lze předmětný panel považovat v souladu s normou ČSN EN 61215. V praxi tak změřená hodnota  $P_{mpp,STC,meas} = 218,12$  Wp neznamena rozpor vůči výrobcem garantovaným parametrům panelu, přestože se jedná o pokles výkonu vůči údaji uvedeném na štítku panelu ( $P_{mpp,STC,nom}$ ) o  $9,12\%$  a na první by se mohlo zdát, že uvedený pokles výkonu FV panelu může indikovat defekt, případně problém

v instalaci. Tuto skutečnost je nutné uvažovat při provozní analýze jednotlivých FV panelů, případně celých řetězců.

### **4.3 Zhodnocení dosažených výsledků**

Na základě provedených více než 20 provozních měření na FV instalacích různého rozsahu lze konstatovat, že pravidelná prohlídka a kontrola FVE představuje klíčový prvek mající zásadní vliv na výslednou provozní výkonnost celé instalace. V případě problematických instalací byly zjištěny zásadní nedostatky související s kvalitou návrhu (dimenzování vodičů, rozložení panelů s ohledem na zastínění), kvalitou provedení (uvolněné konektory, špatně uchycené panely) i s nedostatečnou a chybnou údržbou (vadná pojistka, rozbité krycí sklo, neudržovaná vegetace).

Z hlediska optimalizace FV systémů představuje kvalitně provedené provozní měření základní diagnostický nástroj, jehož provedení nezbytně předchází návrhu optimalizačních řešení a nelze jej, narozdíl od současné praxe, považovat za nepodstatný úkon.

Důraz na kvalitu provedeného měření spočívá především v dodržení požadovaných postupů a podmínek pro měření, které jsou předpokladem pro získání relevantních výsledků. Na základě získaných praktických znalostí, zpracovaných zpráv z měření (vlastních i poskytnutých spolupracujícími techniky) a konzultací s provozovateli FV instalací je v současné době zřejmý tlak obchodních zástupců firem zaměřujících se na poskytování servisu a optimalizačních řešení v oblasti FV systémů. V rámci tendenčně provedených analýz jsou prezentována zařízení pro navýšení výkonu např. v souvislosti s degradací panelů vlivem PID (Potential Induced Degradation), což se však při provedených měření ukázalo jako minoritní problém vzhledem ke specifickým podmínkám v ČR (viz. článek cite1Mastny2015c).

## 5 OPTIMALIZACE S VYUŽITÍM ZAŘÍZENÍ PRO REGULACI TOKU VÝKONU

Diagnostika defektů a kontrola parametrů FV instalací popsaná v předchozí kapitole je předmětem zájmu především provozovatelů instalací s výkonem větším než 10 kWp primárně dodávající energii do sítě. Jak bylo uvedeno, zájmem těchto provozovatelů je diagnostikovat příčiny poklesu výkonu u FV instalací vystavěných v závěru let 2009 a 2010 kvůli končícím lhůtám pro uplatnění záruk. Vzhledem k nastaveným výkupním cenám v ČR pro tyto instalace znamená nižší výroba elektrické energie ekonomickou ztrátu, kterou s ohledem na omezené možnosti rekonstrukce není možné řešit např. celkovou výměnou.

V případě instalací do výkonu 10 kWp (tj. malé instalace na rodinných domech) lze výnosnost celého systému zvýšit optimalizací energetických toků souvisejících s bilancí výroby a spotřeby elektrické energie. Jak je uvedeno v kapitole 2, samotná optimální bilance může být zajištěna prostřednictvím hybridního systému s akumulací, který standardně pracuje v ostrovním provozu.

V případě zapojení FV systému v konfiguraci s on-grid střídači (paralelně pracujících s distribuční soustavou), je pro snížení energetické závislosti objektu v souladu s aktuální legislativou nutné omezit dodávku elektrické energie do sítě na minimální úroveň. Konkrétně je ve vyhlášce ERÚ č. 16/2016 Sb. [5] v §16, odst. 2b uvedeno, že je vyžadováno: „technické řešení mikrozdroje, které zamezuje dodávce elektřiny do distribuční soustavy v místě připojení, s výjimkou krátkodobých přetoků elektřiny do distribuční soustavy, které slouží pro reakci omezujícího zařízení, ale které nezvýší hodnotu napětí v místě připojení.“

Vzhledem k charakteru typu zdroje s proměnlivou výrobou, ke kterému se váže variabilní příkon spotřebičů v objektu (odběr elektrické energie), není možné jednoduše zajistit, aby v každém okamžiku byla mezi aktuální výrobou a odběrem rovnováha. Řešení, která jsou na trhu pro provozovatele těchto systémů v současné době dostupná, spočívají v řízení vybraných spotřebičů prostřednictvím externích kontrolérů a regulátorů, které mají zajišťovat regulaci odběru v souladu s aktuální výrobou.

Uvedené regulační systémy jsou mnohdy propagovány jako plynulá regulace spotřeby zajišťující v době výroby nulovou bilanci činného výkonu na fakturačním elektroměru, což může vést k přesvědčení, že je veškerá vyrobená elektrická energie přímo spotřebovávána v místě. Tyto tzv. regulátory pro snížení přebytků vyrobené elektrické energie ve skutečnosti využívají slabiny v metrice elektroměrů činné energie, které nedokáží měřit a registrovat energii v jednotlivých směrech správně podle skutečnosti, jelikož měřící algoritmus tyto rychlé změny směru toků průměruje.

### 5.1 Možnosti řízení výkonů

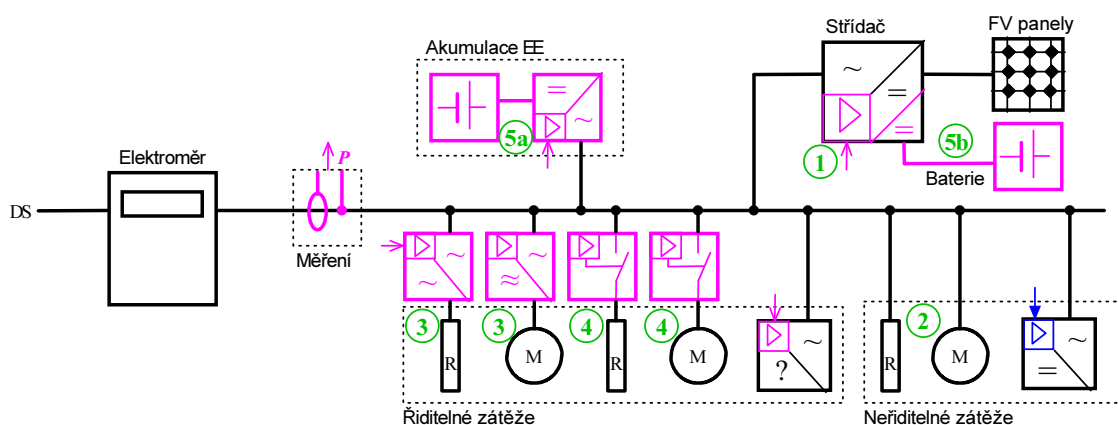
Jak bylo uvedeno výše, disproporce mezi výrobou a spotřebou elektrické energie v objektu vede k dodávce energie do sítě v případě, že aktuální výkon výrobního zdroje je vyšší, než

součet aktuálních příkonů spotřebičů v objektu. Možnosti jak omezit dodávku elektrické energie do sítě na minimum jsou následující:

- snížení výkonu výrobního zdroje – nutná spolupráce střídače s měřícím modulem v předávacím místě,
- zvýšení zátěže – akumulace energie (baterie, zpravidla však akumulace elektrické energie ve formě tepla prostřednictvím systémů pro ohřev vody).

Pro obě možnosti je nutný dodatečný regulátor toku výkonu, zajišťující jednak měření výkonu v předávacím místě prostřednictvím měřícího modulu, tak spínání dodatečných zátěží, případně zasílání komunikačních zpráv pro omezení výkonu střídače (je-li podporováno). Vliv regulátorů toku výkonu na kvalitu elektrické energie je popsán v publikaci [16].

Variantu instalace s měničem, který umožňuje řízení/regulaci výkonu (činného) na požadovanou hodnotu, ukazuje Obr. 5.1. Střídač (bod 1) zahrnuje regulátor, který reguluje/omezuje výstupní výkon tak, aby v místě měření byl roven referenční hodnotě (zpravidla nula). Aktuálně dostupný činný výkon střídače je tak limitován aktuální spotřebou.



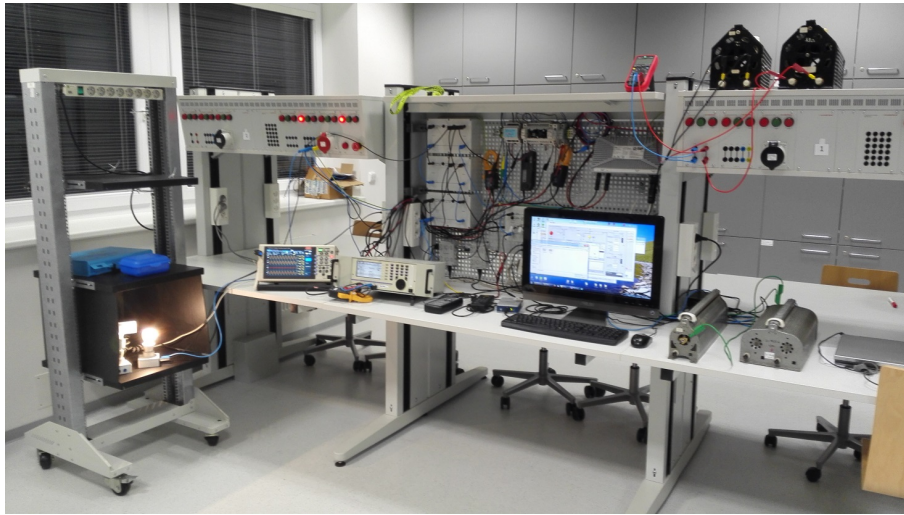
Obr. 5.1: Jednopolové schéma spotřebitelské sítě s jednofázovým PV zdrojem a s variantním řešením bilance činného výkonu [4]

Z hlediska požadavku na vyrovnanou energetickou bilanci objektu je nutné příkon zátěží regulovat. Běžně příkon spotřebičů regulovat nelze a pokud ano, pak pouze skokově ve více stupních, jejichž výkonová diference je stále příliš velká (definována příkonem kaskádně řazených spotřebičů). V případě, že je požadována „plynulejší“ regulace je použit externí výkonový měnič/regulátor (Obr. 5.1 - bod 3), který umožní plynulé řízení výkonu zátěže, která bude použita pro regulaci bilance činných výkonů. V úvahu připadají frekvenční měniče pro pohony, či měniče napětí jako například regulační transformátory nebo také fázové (triakové) regulátory [4].

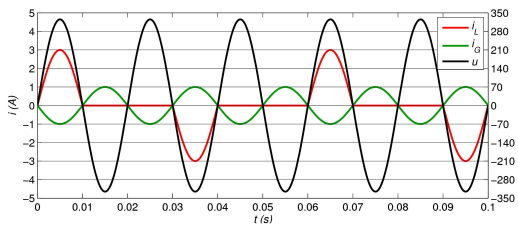
Současně s možností plynulé regulace výkonu pomocí vestavěných či externích měničů, které jsou v každém okamžiku schopny nastavit příkon odpovídající požadovanému bilančnímu výkonu, je používána i šířkově pulsní (PW – Pulse-Width) regulace (PWR – Pulse-Width Regulation). Tento typ regulace však zajišťuje pouze zdánlivě plynulou regulaci a fiktivní závislost mezi výkonem zdroje a příkonem zátěží. PWR představuje kontrolované řízení za-



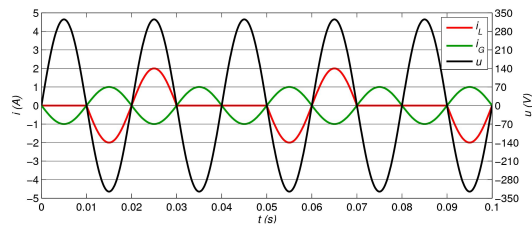




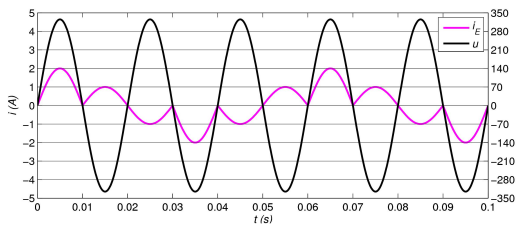
Obr. 5.4: Uspořádání měřícího pracoviště s regulátorem toku výkonu



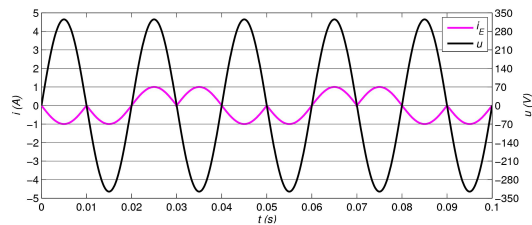
Obr. 5.5: Wattrouter – proud zdroje, spínané zátěže a napětí



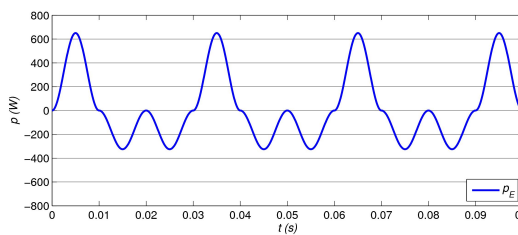
Obr. 5.6: Greenbono – proud zdroje, spínané zátěže a napětí



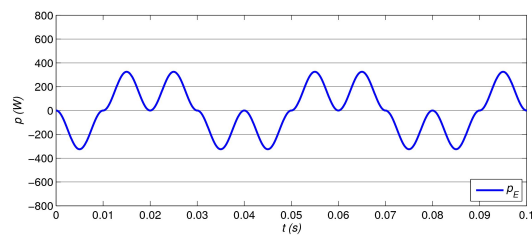
Obr. 5.7: Wattrouter – proud elektroměrem a napětí



Obr. 5.8: Greenbono – proud elektroměrem a napětí



Obr. 5.9: Wattrouter – průběh okamžitého výkonu



Obr. 5.10: Greenbono – průběh okamžitého výkonu

## 5.4 Vyhodnocení problematiky regulátorů toků výkonu

Současně rozšířený způsob zajištění bilance elektrické energie (v instalacích s výrobou a spotřebou v místě), pomocí šířkově-pulsní regulace se z pohledu dodavatele elektrické energie a provozovatele DS vyznačuje následujícím:

- chybné měření činné elektrické energie, kdy způsob spínání regulačních zátěží vnucený spínací logikou komerčních kontrolérů využívá nedokonalé metriky stávajících elektroměrů,
- zhoršení kvality elektrické energie a především kvality napětí v DS způsobené rychlými spínacími procesy, které v závislosti na použitém způsobu spínání způsobují kolísání napětí (flickr), nebo způsobují harmonické zkreslení napětí a současně rušivá napětí ve frekvenčním rozsahu do 20 kHz.

Zátěže spínané přes SSR způsobují kolísání napětí (flickr) a řízení příkonu pomocí triaků zase způsobuje harmonické zkreslení napětí a vznik rušivých napětí v rozsahu běžně do 20 kHz. Oba typy spínání mají značný potenciál způsobit překročení dovolených limitů pro kolísání napětí/flickr či harmonické v NN DS [28].

Způsob používané regulace je efektivní. Přestože může způsobovat z hlediska EMC výše uvedené problémy, lze jej tolerovat v případě, že regulace bude zajištěna kaskádně a zároveň bude limitována velikost regulační zátěže zajišťující bilanci pomocí PWR. V této souvislosti je však ale nezbytné tolerovat určité množství elektrické energie dodané do sítě, to může být procentuálně vztaženo k množství odebrané energie a zároveň prosadit ochranu u kontrolérů zamezující připojení zátěže na PWR výstup s nominálním výkonem větším než 650 W (v tomto případě nebude docházet k překročení maximální povolené dlouhodobé míry vjemu flickru [16]). Uvedenou ochranou funkci lze u kontrolérů realizovat například na základě měřené změny velikosti proudu.

## 6 VÝSLEDKY

Výsledky dizertační práce lze shrnout do následujících bodů:

- Realizace zapojení experimentálního hybridního systému kombinující FV systém s větrnou elektrárnou a akumulací. Následně byl navržen, zapojen a nakonfigurován řídicí systém.
- V rámci laboratoře obnovitelných zdrojů byl navržen, realizován a naprogramován měřicí systém pro dlouhodobý záznam meteorologických údajů.
- Na základě dat z provozního měření a provozních poznatků bylo analyzováno výchozí nastavení hybridního systému a na základě jeho nedostatků navržena doporučení a možná řešení pro jeho rekonfiguraci.
- Pro jednotlivé prvky tvořící hybridní systémy s obnovitelnými zdroji energie byly sestaveny matematické modely v prostředí Matlab Simulink, z nichž některé byly následně využity pro sestavení komplexního modelu hybridního systému s akumulací, který je po validaci využíván pro další výzkum a vývoj a pro řešení projektů spolupráce s průmyslem.
- Koncepční návrh hybridního systému s akumulací pro podporu rychlonabíjecích stanic pro elektromobily (EV) – [14], [9] a [13].
- V souvislosti s poptávkou po optimalizaci výroby a využití FV systémů byla provedena provozní měření se zaměřením na příčiny poklesu výroby, na základě kterých byly definovány nejčastější příčiny a uvedeny možnosti jejich odstranění.
- Pro optimalizaci využití elektrické energie vyrobené prostřednictvím obnovitelných zdrojů byla detailně rozebrána problematika regulátorů toků výkonu, které jsou v současnosti doporučovány jako řešení pro maximalizaci energetických zisků.
- Výsledný soubor publikací autora čítá více než 20 článků, přičemž převážnou část tvoří příspěvky v rámci indexovaných konferencí, následují články publikované v rámci tuzemských a zahraničních neindexovaných konferencí a časopisů. Dva články [11] a [13] v příloze jsou publikovány v impaktovaném časopise s hodnotou Impact Factoru: 2.262 (2016) a v době odevzdání dizertační práce měly celkem 6 citací.

Další výsledky související přímo s řešením dizertační práce vycházejí z navázané spolupráce v rámci pracovních skupin Cechu aplikovaných fotovoltaických technologií (CAFT) a Solární asociace, kdy se autor dizertační práce aktivně podílí na pořádaných seminářích, konzultacích a školeních pro elektromontéry FV systémů. Další výsledky souvisí s řešením projektů spolupráce s průmyslem z oblasti provozního měření FV systémů, testováním FV střídačů a bateriových systémů (Střední průmyslová škola v Třebíči, společnosti SUNLUX a fgFORTE), problematikou regulátorů toků výkonů (ČEZ, E.ON) a tvorbou matematických modelů energetických systémů (Enbra, ČEZ, Uralská univerzita). Další zapojení autora dizertační práce je v oblasti výuky. Autor úspěšně vedl následující závěrečné studentské práce:

- Houzar, T.; Návrh kombinovaného tepelného systému pro vytápění a ohřev TUV v ro-

dinném domě: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 68 s.

- Schittenhelm, D.; Energetický potenciál vody v chovných nádržích: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 59 s.
- Lahvička, J.; Návrh monitorovacího systému FVE: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016, 49 stran.
- Sedlačko, J.; Návrh modelu Savoniova rotoru: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 38 s.
- Špinar, M.; Ověření provozní výkonnosti a optimalizace FVE: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 90 s.

V předmětech Výroba a distribuce elektrické energie, Malé zdroje elektrické energie a Výroba elektrické energie na Ústavu elektroenergetiky VUT v Brně, se přímo podílel na tvorbě a realizaci následujících laboratorních úloh:

- Provozní měření na FV instalaci.
- Provozní testování FV střídačů.
- Vyhodnocení kvality napětí při provozu FVE s regulátorem toku energie do sítě.
- Větrná elektrárna se Savoniovým rotorem.
- Analýza hybridního systému.
- Odezva elektroměrů činné energie na rychlé změny mezi výrobou a dodávkou při běžných provozních změnách odběru.
- Odezva elektroměrů činné energie na rychlé změny mezi výrobou a dodávkou při nasazení regulátoru odběru typu GreenBonO.
- Komplexní hodnocení jevů v systémech se zdroji elektrické energie a řízenou spotřebou.

Další oblast související nepřímo s řešením dizertační práce zahrnuje softwarové programy a skripty, které byly vytvořeny/sestaveny autorem dizertační práce a jejichž výstupy byly použity při vypracování dizertační práce. Výsledky v této oblasti jsou následující:

- Skript v programu Matlab pro zpracování měřených dat a oscilogramů z analyzátoru HIOKI a jejich výsledný export do grafických závislostí.
- Grafické rozhraní v prostředí Matlab pro zpracování měřených dat, vyhodnocení I-V charakteristik z měřicího přístroje Metrel a výsledný export.
- Skript v programu Matlab pro výpočet hodnot sériového a paralelního odporu FV panelu s využitím štítkových údajů a numerického řešení pomocí Newton-Raphsonovy iterační metody.
- Skript v programu Matlab pro zpracování a vykreslení zaznamenaných meteorologických dat.
- Skript v programu Matlab pro zpracování a vykreslení dat z řídicího systému hybridního

systemu.

- Řídící program PLC (Unitronics Visilogic) pro dálkové ovládání rotační zdrojovny Laboratoře výroby elektrické energie UEEN FEKT VUT v Brně.
- Řídící program PLC (Unitronics Visilogic) pro záznam meteorologických údajů v Laboratoři obnovitelných zdrojů UEEN FEKT VUT v Brně.
- Aplikace pro měření vybíjecích/nabíjecích charakteristik LiFePO akumulátorů v programu LabVIEW.

## 7 ZÁVĚR

Dizertační práce je zaměřena na oblast řídicích procesů v systémech s alternativními zdroji energie. Vzhledem k tématicky rozsáhlé oblasti, kterou takové systémy představují, byly cíle dizertační práce zaměřeny na elektrické hybridní systémy kombinující více zdrojů energie. Kombinace rozdílných energetických zdrojů s různými charakteristikami tvoří komplexní systém, který klade specifické nároky na řídicí systém a jeho nastavení.

Klíčovým cílem dizertační práce bylo vytvoření návrhu technického řešení hybridní energetického systému s akumulací a jeho realizace. Postup řešení a dílčí výsledky jsou uvedeny v kapitole 2. Možnosti řešení řídicího systému na platformě programovatelného PLC a Lab-View jsou využity pro sběr meteorologických dat. Řídicí systém pro hybridní systém je tvořen komunikačním rozhraním na platformě RCC Studer Innotec, která umožňuje vzdálený přístup a nastavení jednotlivých parametrů, stejně jako automatizovaný sběr a ukládání naměřených hodnot z jednotlivých částí systému. Optimální konfigurace a uspořádání hybridního systému je v současné době řešeno v rámci projektu TA ČR (TH02020435), což dokládá aktuálnost tématu a potřebnost hledání nových způsobů uspořádání, řízení a využití.

Na základě poznatků získaných v průběhu testovacího provozu navrženého hybridního energetického systému byla, v souladu s dalšími dílčími cíli dizertační práce, provedena analýza řídicí logiky využívané v současných konfiguracích a definovány podmínky pro řízení hybridních energetických systémů v korelaci s provozními stavy. Vytvořený experimentální model hybridního systému umožnil ověření výchozí logiky řízení jednotlivých prvků systému.

Následně byla provedena optimalizace nastavení hybridního systému spočívající v zajištění korektní konfigurace jednotlivých prvků (regulátory nabíjení, střídače, komunikační rozhraní), při které byly využity dostupné informace, sestavené matematické modely a zpracované výsledky z provedených měření. Systém je po optimalizaci funkční a reaguje na změny provozních stavů dle předpokladů. Systémová data jsou automaticky ukládána a je realizován vzdálený přístup prostřednictvím online rozhraní. Důraz při provádění optimalizace byl kladen na logické chování systému v jednotlivých provozních stavech popsaných v kapitole 3 a správné řízení toku elektrické energie.

V souvislosti s provedenými analýzami bylo možné sestavit matematické modely jednotlivých dílčích prvků a sestavit je do funkčního celku. Sestavený matematický model v prostředí Matlab Simulink byl nejprve validován na laboratorním experimentálním hybridním systému a následně využit k ověření konceptu nabíjecí stanice pro elektromobily s využitím podpůrného hybridního systému s akumulací.

Sestavené matematické modely byly využity pro optimalizaci laboratorního hybridního systému s akumulací a dále také pro řešení projektů spolupráce s průmyslem (matematické modely tepelných systémů, koncept hybridního systému pro podporu rychlonabíjecích stanic pro EV) a vyhodnocení dat získaných z provozních měření FV systémů. Možnost porovnání predikovaných výsledků pomocí validovaných matematických modelů s provozními daty tvoří základní diagnostický nástroj pro optimalizaci těchto systémů. Příkladem využití může být

srovnání výsledků naměřených průběhů  $I$ - $V$  křivek pro různé teploty a intenzity slunečního záření a možnost predikce výroby elektrické energie z OZE.

V průběhu zpracování dizertační práce bylo vyhodnoceno více než 20 FV instalací různého rozsahu instalovaného výkonu. Na základě zpracovaných výsledků těchto měření lze konstatovat, že příčiny poklesu výroby v problematických instalacích byly nejčastěji způsobeny nevhodným návrhem instalace (dimenzování vodičů, rozložení panelů s ohledem na zastínění), kvalitou provedení (uvolněné konektory, špatně uchycené panely) i nedostatečnou a chybnou údržbou (vadná pojistka, rozbité krycí sklo, neudržovaná vegetace). Pokles výkonu FV panelů vlivem degradace typu PID se v podmínkách ČR ukázal jako neodůvodněný vzhledem ke specifickým příčinám vzniku. V průběhu provozních měření se tento typ degradace na testovaných FV systémech neprojevil a instalaci dodatečných zařízení sloužících pro optimalizaci výroby s tímto typem defektu lze v podmínkách ČR považovat za neopodstatněnou investici. Podrobněji je tato problematika rozepsána v kapitole 4.

Problematika řízení systémů s obnovitelnými zdroji energie byla dále řešena z pohledu řízení spotřeby s využitím systémů pro regulaci toku výkonu (kapitola 5). Podrobná analýza vlivu těchto regulátorů na parametry kvality elektrické energie byla využita pro stanovení limitních výkonů pro jednotlivé regulační metody. Dále byly analyzovány negativní vlivy na kvalitu elektrické energie související s provozem rychle spínaných zátěží.

Na základě výše uvedených informací a publikací, na kterých se autor podílel nebo sám publikoval, lze považovat cíle dizertační práce za splněné. V rámci dalšího výzkumu se lze zaměřit na zpřesnění sestavených matematických modelů. Konkrétní oblastí, která je aktuálně předmětem vývoje jsou invertory umožňující programovatelné řízení výstupního výkonu a jejich spolupráce s obnovitelnými zdroji energie.

Přínosy dizertační práce pro vědní obor:

- Sestavené matematické modely s definovanými vstupními veličinami.
- Zpracovaná analýza nejčastějších příčin poklesu výkonnosti FV systémů v ČR.
- Návrh a realizace hybridního systému a akumulací s definicí problémových oblastí s hlediska řízení a provozu.
- Návrh a realizace testovací sestavy pro měření provozních vlastností regulátorů toku výkonu a FV střídačů.

Přínosy dizertační práce pro praxi:

- Ověřená metodika analýzy a vyhodnocení provozu FV systémů.
- Analýza výsledků provozních měření regulátorů toku výkonu a jejich negativních vlivů na distribuční soustavu.
- Koncepční uspořádání hybridního systému s akumulací pro aplikace v soukromé (rodinný dům) i komerční (rychlonabíjecí stanice pro elektromobily) oblasti.

Možnosti dalšího využití výsledků a navazující vývoj:

- Využití sestaveného modelu hybridního systému pro ověření správného návrhu a dimenze jednotlivých komponent při odlišných vstupních podmínkách.

- Zpřesnění stávajících řídicích procesů v oblasti FV střídačů s možností zadání výstupního výkonu.
- Zpřesnění metodiky pro vyhodnocení defektů FV panelů na základě měřených  $I-V$  charakteristik.
- Využití dalších typů akumulace a jejich korektní začlenění do hybridních systémů, včetně úpravy vnitřních řídicích algoritmů energetického managementu.

## LITERATURA

- [1] Batunlu, C.; Alrweq, M.; Albarbar, A.: Effects of Power Tracking Algorithms on Lifetime of Power Electronic Devices Used in Solar Systems. *Energies*, vol. 9, issue 11, 2016, ISSN 1996-1073, doi:10.3390/en9110884.  
URL: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/9/11/884>>
- [2] de Brito, M. A. G.; Sampaio, L. P.; Luigi, G.; aj.: Comparative analysis of MPPT techniques for PV applications. In *2011 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, June 2011, pp. 99–104, doi:10.1109/ICCEP.2011.6036361.
- [3] Cubas, J.; Pindado, S.; de Manuel, C.: Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function. *Energies*, vol. 7, issue 7, 2014: pp. 4098–4115, ISSN 1996-1073, doi:10.3390/en7074098.  
URL: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/7/7/4098>>
- [4] Drápela, J.: Spořiče energie. Faktické a domnělé úspory. In *Trendy elektroenergetiky v evropském kontextu X*, Špindlerův Mlýn, 15. -16. dubna 2015.
- [5] ERÚ: Vyhláška ERÚ č. 16/2016 o podmínkách připojení k elektrizační soustavě.
- [6] Khare, V.; Nema, S.; Baredar, P.: Solar–wind hybrid renewable energy system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, 2016: pp. 23 – 33, ISSN 1364-0321, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.223>.  
URL: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115016068>>
- [7] Lahvička, J.: *Návrh monitorovacího systému FVE*. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jan Morávek, Vysoké učení technické v Brně, 2016.
- [8] Mastný, P.; Morávek, J.; Pitron, J.: Mathematical Modeling of Basic Parts of Heating Systems with Alternative Power Sources. In *Recent Advances in Fluid Mechanics and Thermal Engineering. Recent Advances in Mechanical Engineering Series.*, editace I. University of Salerno, WSEAS Press, 2015, pp. 126–131, ISBN: 978-1-61804-311-5.
- [9] Mastný, P.; Morávek, J.; Vojtěch, W.; aj.: Integrace nabíjecích stanic s podporou akumulace - provozní charakteristiky. In *In Sborník Konference ČK CIRED2016*, 2016, pp. 1–10, ISBN: 978-80-905014-5-4.
- [10] Mastný, P.; Morávek, J.; Vrána, M.; aj.: Current Status of the Potential Induced Degradation in Czech Republic. In *Advances in Environmental and Geological Science and Engineering. Energy, Environmental and Structural Engineering Series*, editace Ba-dea2014, Salerno, Italy: WSEAS Press, 2015, pp. 78–83.
- [11] Mastny, P.; Moravek, J.; Drapela, J.: Practical Experience of Operational Diagnostics and Defectoscopy on Photovoltaic Installations in the Czech Republic. *Energies*, vol. 8,

issue 10, 2015: pp. 11234–11253, ISSN 1996-1073, doi:10.3390/en81011234.

URL: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/8/10/11234>>

- [12] Mastny, P.; Moravek, J.; Vojtek, M.; aj.: Hybrid Photovoltaic Systems with Accumulation—Support for Electric Vehicle Charging. *Energies*, vol. 10, issue 7, 2017: str. 834, ISSN 1996-1073, doi:10.3390/en10070834.  
URL: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/10/7/834>>
- [13] Mastny, P.; Moravek, J.; Vojtek, M.; aj.: Hybrid Photovoltaic Systems with Accumulation—Support for Electric Vehicle Charging. *Energies*, vol. 10, issue 7, 2017, ISSN 1996-1073, doi:10.3390/en10070834.  
URL: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/10/7/834>>
- [14] Mastny, P.; Moravek, J.; Vrana, M.: Concept of fast charging stations with integrated accumulators - Assessment of the impact for operation. In *2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, May 2016, pp. 1–6, doi: 10.1109/EPE.2016.7521788.
- [15] Mazoch, J.: *Měření slunečního záření*. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, 2017.
- [16] Moravek, J.; Drapela, J.; Wasserbauer, V.; aj.: Power quality issues related to power flow control in systems with renewable energy micro sources. In *2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, May 2016, pp. 1–6, doi: 10.1109/EPE.2016.7521784.
- [17] Moravek, J.; Mastny, P.; Pitron, J.: Modeling the energy systems in Matlab Simulink - problematics of energy system control. In *2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, May 2015, pp. 163–168, doi:10.1109/EPE.2015.7161141.
- [18] Morávek, J.: *Návrh elektrického ovládání malé vodní elektrárny*. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Lukáš Radil, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, 2012.
- [19] Morávek, J.: Experimental Hybrid Energy System. In *STUDENT EEICT 2014*, Brno: Brno University of Technology, 2014, ISBN 978-80-214-4922-0, pp. 93–97.
- [20] Morávek, J.; Mastný, P.: Automation of Small Energy Sources. In *Recent advances in environmental science*, Lemesos, Cyprus: WSEAS Press, 2013, ISBN 978-1-61804-167-8, pp. 59–64.
- [21] Morávek, J.; Mastný, P.: Hybrid Renewable Energy System - Configuration and Control. In *Recent Researches in Electric Power and Energy System*, vol. 22, Chania, Crete Island, Greece: WSEAS Press, 2013, ISBN 978-960-474-328-5, pp. 87–92.  
URL: <<http://www.wseas.us/e-library/conferences/2013/Chania/POW/POW-12.pdf>>

- [22] Morávek, J.; Mastný, P.: Experimental Hybrid Energy System - Actual Progress. In *Numerical Modelling and Simulation*, Tatranske Matliare, Slovakia: Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, pp. 23–26.
- [23] Morávek, J.; Mastný, P.: Hybrid Energy System - Optimization and New Concept. *Informatyka, Automatyka, Pomíary w Gospodarce i Ochronie Srodowiska*, vol. 1, issue 3, 2014: pp. 77–80, ISSN 2083-0157.
- [24] Morávek, J.; Mastný, P.: Model of PMSG Wind Turbine in Hybrid Energy System. In *Proceedings of 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering*, Brno, Czech Republic: Brno University of Technology, 2014, pp. 349–352.
- [25] Orioli, A.; Gangi, A. D.: A procedure to calculate the five-parameter model of crystalline silicon photovoltaic modules on the basis of the tabular performance data. *Applied Energy*, vol. 102, 2013: pp. 1160 – 1177, ISSN 0306-2619, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.036>, special Issue on Advances in sustainable biofuel production and use - {XIX} International Symposium on Alcohol Fuels - {ISAF}.  
URL: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912004813>>
- [26] Parlament České republiky: Zákon č. 89/2012 Sb. občanský zákoník. 03 2012.
- [27] Piegari, L.; Rizzo, R.; Spina, I.; aj.: Optimized Adaptive Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Control for Photovoltaic Generation. *Energies*, vol. 8, issue 5, 2015: pp. 3418–3436, ISSN 1996-1073, doi:10.3390/en8053418.  
URL: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/8/5/3418>>
- [28] ČSN EN 50160 ed.3:2010: Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí. 2011.
- [29] Solarcontrols.cz: Regulátory WATTROUTER®. 2013.  
URL: <<http://www.solarcontrols.cz/cz/wattrouter.html>>
- [30] Vrána, M.; Morávek, J.; Mastný, P.: Photovoltaic power plant inspection and diagnostic. *Informatyka, Automatyka, Pomíary w Gospodarce i Ochronie Srodowiska*, vol. 5, issue 3, 2015: pp. 55–58.
- [31] Wu, Y.-E.; Shen, C.-L.; Liu, C.-Y.: Implementation of solar illumination system with three-stage charging and dimming control function. In *2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering*, April 2011, pp. 2260–2263, doi:10.1109/ICEICE.2011.5776825.
- [32] Yorix s.r.o.: Regulace spotřeby přebytků z FVE. 2009.  
URL: <<http://yorix.cz/>>

# CURRICULUM VITAE

Ing. Jan Morávek

Tel: +420 541 146 231

Email: moravek@feec.vutbr.cz

Narozen: 4.2.1988 v Šumperku



## Vzdělání

- 2016 – dosud Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, Obor sil-noproudá elektrotechnika a elektroenergetika, doktorské kombinované studium.
- 2012 – 2016 Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, Obor sil-noproudá elektrotechnika a elektroenergetika, doktorské prezenční studium.
- 2010 – 2012 Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, Obor elektroenergetika, magisterské prezenční studium.
- 2007 – 2010 Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, Obor sil-noproudá elektrotechnika a elektroenergetika, bakalářské prezenční studium.

## Pracovní zkušenosti v oboru

- 2017 – dosud Lektor předmětu Výroba a distribuce elektrické energie (veden v AJ).
- 2016 – dosud Lektor kurzu Elektromontér fotovoltaických systémů (organizován CAFT).
- 2012 – dosud Lektor laboratorní výuky a počítačových cvičení v předmětech Výroba elektrické energie a Malé zdroje elektrické energie.  
Technický pracovník ÚEEN FEKT VUT v Brně.  
Terénní měření FVE zaměřené na provozní výkonnost, kontrolu izolačních stavů a diagnostiku defektů (více než 20 instalací v rozsahu 1 kWp - 50 MWp).
- 2013 – 2014 Technický pracovník v Centru výzkumu a využití obnovitelných zdrojů energie.

## Řešené projekty spolupráce s průmyslem

- 2017 – dosud Spoluřešitel projektu TA ČR TH02020435 Bezuhlíkový hybridní energetický systém s akumulací pracující jako aktivní prvek elektrizační soustavy.
- 2014 – 2017 Spoluřešitel projektu TA ČR TA04021196 Plánování a optimalizace výroby energetických zdrojů.
- 2014 – 2016 Spoluřešitel projektu specifického výzkumu FEKT-S-14-2520 Nové technologie pro udržitelnou elektroenergetiku.
- 2014 – 2015 Spoluřešitel projektu spolupráce s průmyslem na téma Výzkum a vývoj matematického modelu tepelného čerpadla a solárního kolektoru.

## Publikační činnost

Autor nebo spoluautor 16 článků na tuzemských a zahraničních odborných konferencích, 4 článků v recenzovaných zahraničních časopisech (z toho dva články v impaktovaném časopise Energies, celkem 6 doložitelných citací) a dvou výukových skript.

## Jazykové znalosti

- anglický jazyk – pokročilé znalosti slovem i písmem (aktivní účast na zahraničních konferencích, publikace odborných článků, překladatelská činnost při podávání grantových přihlášek)
- německý jazyk – základní znalosti slovem i písmem

## Ostatní dovednosti

- Řidičský průkaz sk. B
- Elektrotechnická kvalifikace podle §6,7 (bez omezení napětí pro objekty tř. A) a §9 (v rozsahu E4A) vyhlášky 50/1978 Sb.
- Absolvent kurzu základů vědecké práce na Akademii Věd ČR
- Absolvent kurzu první pomoci
- Osvědčení Elektromontér fotovoltaických systémů
- Pokročilé znalosti programů Matlab, Matlab/Simulink, Visilogic, LaTeX

## **Abstrakt**

Dizertační práce představuje komentovaný soubor článků zaměřených na oblast procesů řízení v systémech s obnovitelnými zdroji energie, matematické modely a možnosti optimalizace u fotovoltaických systémů velkého i malého rozsahu. V rámci řešení byly publikovány články v zahraničních impaktovaných a recenzovaných časopisech a indexovaných sbornících zahraničních i tuzemských konferencích. Hlavními výsledky dizertační práce jsou návrh, konfigurace a realizace hybridního energetického systému s následnou optimalizací. S využitím provozních dat z laboratorního systému byl sestaven a následně validován matematický model v prostředí Matlab/Simulink pro hybridní energetický systém s akumulací. Možnosti optimalizace výrobních fotovoltaických zdrojů jsou založeny jednak na provozních měřeních (u komerčních aplikací) a na analýze regulátorů toku výkonu pro optimalizaci energetické bilance (pro aplikace v soukromých objektech v malém měřítku).

## **Abstract**

The dissertation is a publication summary focused on the field of management processes in renewable energy systems, mathematical models and optimization possibilities for large and small scale photovoltaic systems. The articles were published in foreign impacted and reviewed journals and indexed proceedings of foreign and domestic conferences. The main results of the dissertation are the design, configuration and realization of the hybrid energy system with subsequent optimization. Using the data from the laboratory system, a mathematical model was compiled and subsequently validated in the Matlab / Simulink environment for a hybrid energy system with accumulation. The options for power production optimization with photovoltaic sources are based on both operational measurements (for commercial applications) and on the analysis of power flow controllers to optimize the energy balance (for small scale applications in private buildings).