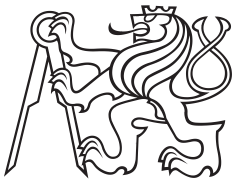
Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra kybernetiky

Optimální řízení akumulátorového úložiště v budově

David Žaitlík

Školitel: Ing. Petr Wolf, PhD.
Květen 2016

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Petru Wolfovi PhD. za odborné vedení, trpělivost, připomínky a cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Marku Maškovi za rady k programování PLC. Nakonec bych chtěl poděkovat mojí rodině za celkovou podporu během mého studia.

Prohlášení

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, 24. května 2016

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na regulaci čtvrthodinového maxima v budově UCEEB pomocí bateriového úložiště. V práci jsou popsány základní technologie používané ve fotovoltaických systémech. Práce obsahuje rozbor energetického systému budovy UCEEB, a to jak z hlediska energetického, tak z hlediska získávání dat. V práci je navržen algoritmus k řízení bateriového úložiště. Tento algoritmus je implementován dle normy IEC 61 131 v návrhovém prostředí Teco Mosaic. Práce také obsahuje implementaci programů k získávání dat z různých služeb, které jsou momentálně používány k monitoringu budovy UCEEB.

Klíčová slova: bateriové úložiště, čtvrthodinové maximum, fotovoltaické systémy, PLC, regulace, řízení

Školitel: Ing. Petr Wolf, PhD.
Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze,
Třinecká 1024,
273 43 Buštěhrad

Abstract

This bachelor's thesis focuses on fifteen minutes maximum regulation of UCEEB building using battery storage system. In this thesis basic technologies used in photovoltaic systems are described. Thesis contains study of energetical system of UCEEB building in terms of energetics and data acquisition. In thesis an algorithm to control the battery storage system is designed. This algorithm is implemented according to IEC 61 131 standard in development enviroment Teco Mosaic. Thesis contains implementation of programs to acquire data from various services which are used for monitoring UCEEB building.

Keywords: battery storage, control, fifteen-minutes maximum, photovoltaics systems, PLC, regulation

Title translation: Optimal control of battery system in the building

Obsah

1 Úvod 1

Část I
Úvod do fotovoltaických systémů

2 Fotovoltaické systémy 5
2.1 Fotovoltaické moduly 5
2.1.1 Krystalické křemíkové články . 5
2.1.2 Amorfní křemíkové články 7
2.2 Typy fotovoltaických systémů . . . 8
2.2.1 Systémy připojené k distribuční síti (Grid-connected/On-Grid) . . . 8
2.2.2 Ostrovní systémy (Stand Alone/Off-Grid) 8
2.2.3 Hybridní systémy 9

3 Baterie ve fotovoltaických systémech 11
3.1 Druhy baterií 12
3.1.1 Olověné baterie 12
3.1.2 Nikl-Kadmiové (Ni-Cd) baterie 12
3.1.3 Lithium-Iontové (Li-Ion) baterie 13

Část II
Vypracování

4 Energetický systém budovy UCEEB 17
4.1 Popis systému 17
4.2 Získávání dat 18
4.3 Zobrazování dat 21
4.4 Energetická bilance budovy 23

5 Popis bateriového úložiště 27
5.1 Baterie ESS 3.0 27
5.2 Střídače napětí Xtender XTH 6000-48, řídící jednotky RCC-02 a PLC Foxtrot CP-1016 28
5.3 Komunikace mezi komponenty úložiště 28

6 Řízení akumulátorového úložiště 33
6.1 Výchozí stav 33
6.2 Algoritmy pro regulaci akumulátorovým úložištěm 35
6.2.1 Obecný návrh algoritmu 35
6.2.2 Návrh algoritmu pro budovu UCEEB 37
6.2.3 Stanovení konstanty K 38
6.3 Implementace 40
6.3.1 Základy programování PLC v prostředí Mosaic 40
6.3.2 Popis implementovaného programu 43

7 Závěr 49

Přílohy

A Seznam zkratek 53

B Literatura 55

C Struktura přiloženého CD 61

D Zadání práce 63

Obrázky

2.1 Srovnání monokrystalického (vlevo) a polykrystalického (vpravo) článku. Převzato z [9] 6
2.2 Účinnosti jednotlivých fotovoltaických technologií. Převzato z [5] 7
2.3 Blokové schéma On-Grid systému 8
2.4 Blokové schéma ostrovního systému 8
2.5 Orientační denní křivka spotřeba obytné (vlevo) a administrativní (vpravo) budovy.. Převzato z [11] . . 9
2.6 Blokové schéma hybridního systému 9

3.1 Ilustrace memory effectu. [13] . . 13

4.1 Schéma energetického systému budovy UCEEB 19
4.2 Schéma datových toků v budově UCEEB 19
4.3 Zprůměrovaná denní křivka výkonu fotovoltaických polí budovy UCEEB 19
4.4 Schéma toků elektrické energie v budově 20
4.5 Ukázka průběhů příkonu budovy(červeně) a výkonu kogenerační jednotky(modře) 20
4.6 Ukázka webového rozhraní pro monitoring budovy - sekce s aktuálními hodnotami 22
4.7 Ukázka webového rozhraní pro monitoring budovy - sekce s grafy . 22
4.8 Spotřeba a výroba energie v jednotlivých měsících 23
4.9 Spotřeba a výroba energie v dubnu 2016 24
4.10 Spotřeba a výroba energie v 21. dubna 2016 25

5.1 Jednovodičové DC zapojení akumulátorového úložiště 27
5.2 Signály pro rozhraní RS-232, převzato z [27], strana 105 29
5.3 RS-232 třívodičové propojení, převzato z [27], strana 106 29
5.4 Volt-Ampérová charakteristika přijímače RS-485, převzato z [26], strana 7 30
5.5 Schéma datových obvodů akumulátorového úložiště 31

6.1 Kompenzační algoritmus. 34
6.2 Hladinový algoritmus. 35
6.3 Pásma algoritmu k řízení baterií 37
6.4 Cyklické vykonávání programu.[35] 40
6.5 Schéma struktury POU. 41
6.6 Funkční blok fbHttpRequest.[37] 44
6.7 Funkční blok PID21.[39] 44
6.8 Schéma programu v jazyce CFC 46
6.9 Webové rozhraní pro monitoring stavu baterií a jejich řízení 47
6.10 Snímek virtuálního displaye pro PLC Teco CP-1016 47

Tabulky

3.1 Počet cyklů olověných baterií při různých DOD.[15] 12

6.1 Tabulka datových typů dle normy IEC 61 131 42
6.2 Vstupní a výstupní proměnné funkčního bloku getNumInternet . . 45
6.3 Vstupní a výstupní proměnné funkčního bloku databazeCteni . . . 45
6.4 Vstupní a výstupní proměnné funkčního bloku zasahBaterie 45

Kapitola 1

Úvod

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a implementovat algoritmus k řízení bateriového úložiště v budově Univerzitního Centra Energeticky Efektivních Budov ČVUT v Praze (dále UCEEB). Toto bateriové úložiště bylo pořízeno s cílem zajistit nepřekračování čtvrthodinového maxima nasmlouvané s dodavatelem elektrické energie.

UCEEB je experimentálním centrem ČVUT, které spojuje 4 fakulty: elektrotechnickou, strojní, stavební a biomedicínského inženýrství. Toto výzkumné centrum se skládá z 5 výzkumných týmů, věnujících se rozličným tématům spojenými s tématem inteligentních a energeticky efektivních budov. Tato práce je vedena v rámci výzkumného týmu RP5 - Monitorování, diagnostika a inteligentní řízení budov.

Výzkumný tým RP5 se věnuje vývoji nových senzorů, konstrukci hybridních fotovoltaických systémů, monitoringu uživatelské interakce s budovami, optimalizaci spotřeb budov a mnohé další. Tým RP5 působí v několika laboratořích, jako je Laboratoř vývoje elektroniky, Laboratoř diagnostiky fotovoltaických systémů a Laboratoř vláknové optiky. Nově se k těmto laboratořím přidalo i bateriové úložiště.

Tento tým vyvinul také produkty ke komerčnímu užití, jako je například služba PV Forecast, která slouží k předpovědi energie vyrobené fotovoltaickými elektrárnami. Dalším produktem je systém Moisture Guard, který monitoruje vlhkost konstrukce dřevostaveb.

Některé laboratoře v budově UCEEB jsou velmi energeticky náročné, takže se stává, že příkon budovy přesáhne nasmlouvané čtvrthodinové maximum. Aby se předešlo placení zbytečných pokud, pořídilo se bateriové úložiště, které v případě potřeby začne dodávat elektrickou energii do budovy. V budoucnu by se funkce bateriového úložiště měla rozšířit o další služby, například nabíjení elektromobilu, nebo o spolupráci s předpovědí výroby elektrické energie pomocí fotovoltaických panelů PV Forecast.

Tato bakalářské práce je rozdělena na 2 části. První část je teoretická, ve které se stručně věnuji základním technologiím používaných ve fotovoltaických systémech, což jsou fotovoltaické moduly a technologie. Dále jsou v této části popsány základní fotovoltaické systémy.

Druhá část obsahuje popis energetického systému budovy UCEEB, kde čtenáře seznamuji jak se samotnými toky elektrické energie, tak s datovými

toky, kterými jednotlivé komponenty tohoto systému komunikují. Dále zde popisuji samotné bateriové úložiště, a jeho jednotlivé části a komunikační protokoly, kterými mezi sebou komunikují. Posledním bodem této části je analýza spotřeby a výroby elektrické energie budovy UCEEB. V tomto bodě se také věnuji momentálnímu stavu řízení elektrické energie v budově UCEEB. V této části čtenáře seznámím se základy programování PLC ve vývojovém prostředí Teco Mosaic. Nakonec se věnuji návrhu a implementaci algoritmu k řízení akumulátorového úložiště, a to jak obecně, tak na základě aktuálních dat o spotřebě a výrobě elektrické energie v budově UCEEB.

Část I

Úvod do fotovoltaických systémů

Kapitola 2
Fotovoltaické systémy

2.1 Fotovoltaické moduly

V dnešní době se k výrobě fotovoltaických článků nejčastěji využívá křemík, který se hojně vyskytuje v zemské kůře.[1, 2, 3] Dvěmi základními skupinami fotovoltaických článků, používaných ve stavebních aplikacích, jsou krystalické články a tenkovrstvé články.

Krystalické články jsou také označovány jako první generace fotovoltaické technologie a tenkovrstvé články jako generace druhá. Další generací je třetí generace, což jsou experimentální technologie, které ještě nejsou na trhu běžně k dispozici, a řadí se sem například polymerové, nebo organické solární články.

Nejúčinější fotovoltaické články jsou Multijunction-Concentrator Solar Cells of firmy Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE s rekordní účinností 46%.[6] Tyto články ovšem nejsou pro jejich cenu běžně využívány v domovních aplikacích, kde dominují krystalické fotovoltaické články, kterým se zde budu věnovat.

Spojením mnoha fotovoltaických článků vznikne fotovoltaický modul. Tyto moduly jsou dále spojovány do fotovoltaických polí. Fotovoltaické moduly zapojené v sérii se označují jako řetězec. [1, 3]

2.1.1 Krystalické křemíkové články

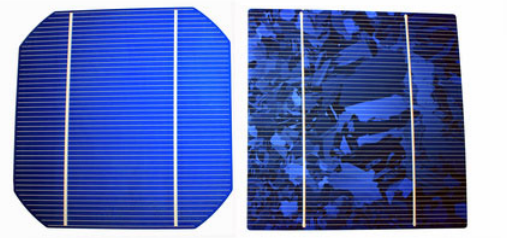
Křemík k výrobě krystalických článků se vyrábí smícháním roztaveného křemene (SiO_2) s uhlíkem při teplotě 1900°C. Tento proces vyjadřuje rovnice:
$SiO_2 + 2C \rightarrow Si + 2CO$
Tento křemík obsahuje pouze 1% nečistot, pro lepší výsledek se dále čistí metodou zonální tavby.

Z takto získaného křemíku se Czochralského metodou získává křemíkový monokrystalický ingot, ze kterého se dále vyrábí monokrystalické fotovoltaické články. Tento ingot se poté nařeže na jednotlivé křemíkové plátky, které se následně vyleští, a zpracují na fotovoltaické články. Řezáním tohoto ingotu na plátky vzniká značný řezný odpad, neboť neboť tloušťka řezacího nástroje, což bývá drát, nebo pila, se pohybuje okolo 100 μm, přičemž samotné plátky

jsou tlusté 150μm až 200μm. Protože je ingot kulatý, křemíkový plátek má stejný tvar.

Dalším způsobem, jak získaný křemík upravit, je Siemensův proces, čímž vznikne polysilikon, nebo také polykrystalický křemík, ze kterého se vyrábí polykrystalické fotovoltaické články. Polysilikon je poté roztaven a vylit do hranaté formy, kde kontrolovaně chladne tak, aby se vytvořila co největší zrna. Po ztuhnutí je takto získaná deska nařezána na jednotlivé články. Touto technikou se značně redukuje řezný odpad. Další výhodou této techniky oproti řezání ingotu je, lze získat obdélníkový tvar, což znamená, že lze modul efektivněji zaplnit. Nevýhodou techniky tažení křemíků je snížení účinnosti článku. [1, 4]

Křemíkové destičky se dále dopují borem nebo fosforem. Na křemíkovou destičku se nakonec připevní sběrné kontakty. Tyto kontakty jsou z vrchní strany realizovány sítí kontaktů, nebo transparentní vodivé plochy tak, aby na co největší část článku dopadalo světlo. Ze zadní strany je nanesena kovová vodivá plocha. Svrchní síť kontaktů lze vidět na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Srovnání monokrystalického (vlevo) a polykrystalického (vpravo) článku. Převzato z [9]

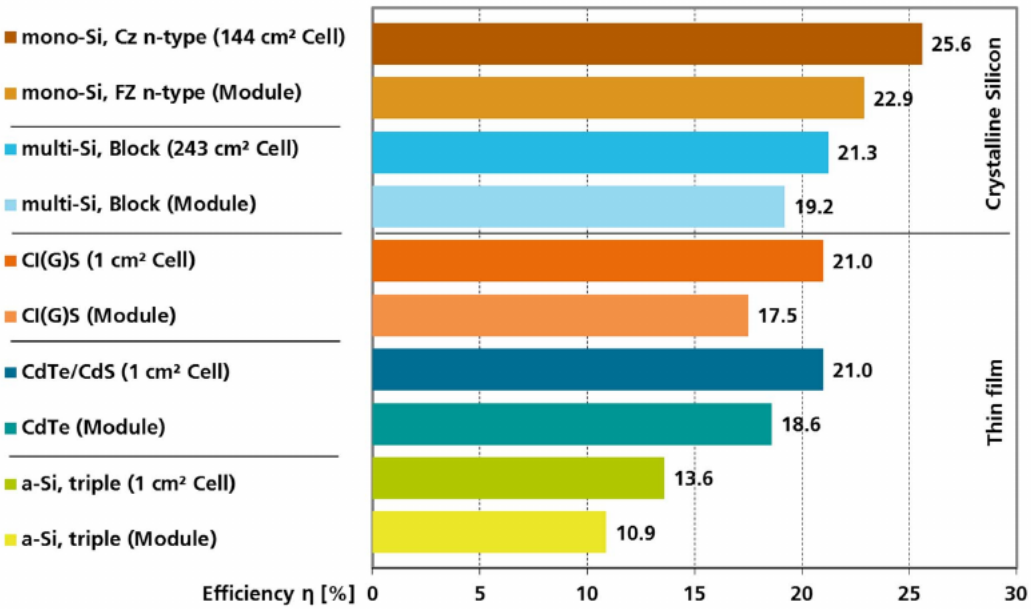
- **Monokrystalické články**
  Tyto články jsou jednolité. Kvůli technologii výroby neumožňuje nepravoúhlost jejich tvaru zaplnit plochu tak vhodně, jako polykrystalické články. Tvary článků lze vidět na obrázku 2.1. Běžně prodávané monokrystalické články dosahují účinnosti 15-18% [7], nejlepší článek na trhu, o firmy SunPower, ovšem dosahuje účinnosti 21,5% [8].
  V laboratorních podmínkách bylo dosáhnuto 25,6% pro článek a 22,9% pro modul, což lze vidět v grafu na obrázku 2.2. [5]
- **Polykrystalické články**
  Na rozdíl od monokrystalického článku, je polykrystalický článek tvořen mnoha krystaly, které lze rozlišit pouhým okem. Přechod mezi zrny, a defekty jimy způsobené, mají za následek zkrácení životnosti nosičů náboje, a tím pádem i snížení účinnosti článku. Tyto články jsou ovšem levnější, než monokrystalické články. [1, 4].
  Na trhu běžně dostupné polykrystalické moduly mají účinnost 12-15% [7], nejlepší na trhu, od firmy Phono Solar, dosahuje 17%. [8]
  V laboratorních podmínkách bylo dosáhnuto 21,3% pro článek a 19,2 pro modul, což lze vidět v grafu na obrázku 2.2. [5]

2.1.2 Amorfní křemíkové články

Tyto články jsou tvořeny tenkou vrstvou křemíku nanesenou na podklad, například ocel, sklo, nebo polymer. Díky tomu jsou lehké a flexibilní, mohou být použity na zakřivené povrchy, a s výhodou jsou integrovány například do fasád, nebo střech budov.

Účinnost běžně používaných amorfních křemíkových modulů se pohybuje mezi 7-10%, v laboratořích bylo dosáhnuto až 13,6%, jak lze vidět na obrázku 2.2. Oproti krystalickým článkům jsou méně účinné, účinnost lze ovšem zvýšit vrstvením článků na sebe. Při nižším osvitu mají ovšem vyšší výkon, než články krystalické.

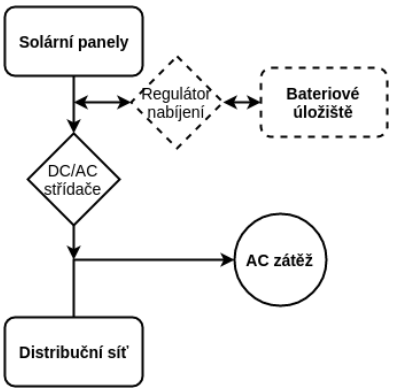
Amorfní křemíkové články jsou levnější, než krystalické články, ale mají kratší životnost. [1, 3, 4]



Obrázek 2.2: Účinnosti jednotlivých fotovoltaických technologií. Převzato z [5]

2.2 Typy fotovoltaických systémů

2.2.1 Systémy připojené k distribuční síti (Grid-connected/On-Grid)

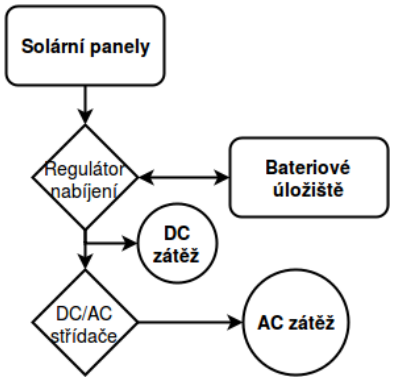


Obrázek 2.3: Blokové schéma On-Grid systému

Tyto systémy pracují paralelně s distribuční sítí. Zjednodušené blokové schéma těchto systémů lze vidět na obrázku 2.3. Elektřinu z fotovoltaických modulů není nutné skladovat v bateriovém úložišti, protože mimo dobu produkce elektřiny fotovoltaickým polem je elektřina dodávána z distribuční sítě. Ke zvýšení využití energie vygenerované fotovoltaickými moduly je často bateriové úložiště v systému přítomné. Bateriové úložiště může být instalováno z dalších důvodů, jako je například zajištění dodávky elektřiny v případě výpadku proudu.
Elektřina z fotovoltaických modulů, a případně i baterií, je poté ve střídači transformována ze stejnosměrného proudu na proud střídavý, a následně dodávána do budovy, případně do distribuční sítě.[1, 2]

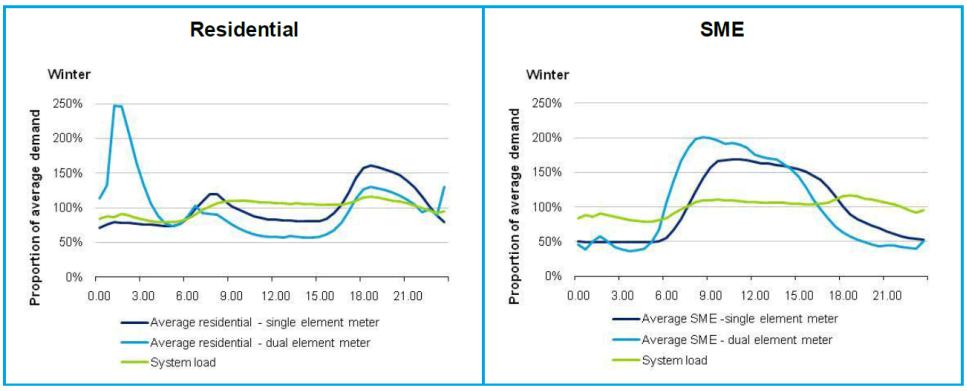
2.2.2 Ostrovní systémy (Stand Alone/Off-Grid)

Tyto systémy jsou určeny pro provoz bez připojení k distribuční síti, blokové schéma lze vidět na obrázku 2.4. Může se jednat například o systémy pro napájení pouličního osvětlení, pohánění čerpadla studny, o fotovoltaickou lavičku, nebo zcela samostatnou budovu.
V ostrovních systémech je většinou bateriové úložiště, v některých aplikacích, které jsou provozovány pouze přes den, to ovšem není nutné. Jako příklad off-grid systému bez akumulátorového úložiště může posloužit právě systém k pohánění čerpadla studny. Voda se načerpá do zásobníku přes den, proto není nutné skladovat elektřinu v akumulátorech. Často je také přítomná DC zátěž, což může být



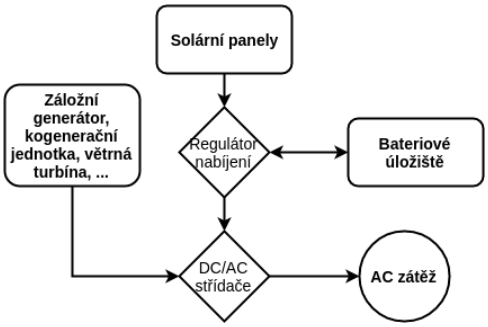
Obrázek 2.4: Blokové schéma ostrovního systému

například dříve zmíněné čerpadlo.
V případě domovních ostrovních systémů jsou baterie potřeba, neboť produkce solárních modulů je nejvyšší kolem poledne, kdežto spotřeba průměrného rodinného domu je nejvyšší k večeru. Elektřinu vyprodukovanou fotovoltaickými moduly je tedy potřeba uschovat.
Spotřeba administrativní budovy se od spotřeby obytného domu značně liší, jak lze vidět na obrázku 2.5. Zatímco obytné domy mají nejvyšší spotřebu ráno a večer, administrativní budovy ji mají nejvyšší přes den. Vzhledem k potřebné velikosti fotovoltaického pole pro administrativní budovy je off-grid systém nepraktický, a mohl by být redukován například k napájení světel, nebo pohánění lehčích strojů. [1, 2]



Obrázek 2.5: Orientační denní křivka spotřeba obytné (vlevo) a administrativní (vpravo) budovy.. Převzato z [11]

2.2.3 Hybridní systémy



Obrázek 2.6: Blokové schéma hybridního systému

Hybridní fotovoltaické systémy kombinují fotovoltaické pole a další zdroj elektrické energie, například kogenerační jednotku, záložní dieselový generátor, nebo větrnou turbínu. Blokové schéma hybridního systému lze vidět na obrázku 2.6. Řízení hybridního systému je obvykle složitější, než řízení ostrovního , nebo on-grid systému, kvůli potřebě řízení dalších zdrojů elektrické energie. Systém bývá primárně napájen z fotovoltaických modulů, a generátor se zapíná, pokud je vysoká spotřeba, nebo baterie klesnou pod určitý stav nabití. [1, 2]

Kapitola 3

Baterie ve fotovoltaických systémech

Předtím, než se budu zabývat jednotlivými druhy baterií, je nutné uvést základní terminologii.

- **Hloubka vybití (Depth of Discharge - DOD)**
  Hloubka vybití určuje množství vybité energie vzhledem k celkové kapacitě. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která bývá vyjádřena v procentech. Hloubka vybití 80% lze považovat za hluboké vybití.[11, 12, 13]

- **Počet cyklů (Cycle Life)**
  Počet opakování vybití a nabití na specifikovanou hloubku vybití, než změřená kapacita baterie klesne na 80% nominální kapacity.[12]

- **Specifická energie (Specific Energy)**
  Nominální enerie na jednotku váhy aktivní hmoty. Má rozměr Wh/kg. Často se zaměňuje s energetickou hustotou.[11, 12]

- **Energetická hustota (Energy Density)**
  Nominální enerie na jednotku objemu aktivní hmoty. Má rozměr Wh/l.[12]

- **Nominální kapacita (Nominal Capacity)**
  Množství elektřiny, které je baterie schopná dodat po úplném nabití. Udává se v Ah. [11]

- **Aktivní hmota (Active Material)**
  Chemické produkty účastnící se vybíjecích a nabíjecích reakcí baterie. [11, 2]

- **Stav nabití (State of Charge - SOC)**
  Poměr aktuální kapacity baterie k maximální kapacitě baterie. Vyjadřuje se v procentech.[12]

- **Článek baterie (Battery Cell)**
  Základní jednotka baterie, více článků, zapojených paralelně nebo sériově, tvoří baterii.

3.1 Druhy baterií

3.1.1 Olověné baterie

Článek baterie je tvořen dvěmi olověnými elektrodami ponořenými v elektrolytu což je zředěná kyselina sírová, napětí jednoho článku je 2V. Podle typu elektrolytu se olověné baterie se dělí na baterie s kapalným elektrolytem (flooded), kde jsou elektrody kompletně ponořené do elektrolytu, a baterie gelové (gelled), kde je elektrolyt ve formě gelu, díky přidanému SiO_2. Oproti gelovým bateriím se musí baterie s kapalným elektrolytem doplňovat vodou, která se vypařuje. [13]

Olověné baterie bývaly nejběžnější baterie používané ve fotovoltických systémech, a to díky nižšímu samovybíjení (většinou od 4% do 6%), v dnešní doby je ale nahradily lithium-iontové baterie, které se samovybíjí ještě méně. Takto populárními je dělá jejich cena a dostupnost. Dále mají velice nízké samovybíjení a jsou schopné dosáhnout vysokých vybíjecích proudů.[14, 15] Jejich nevýhodou je ovšem nízká specifická energie, která se pohybuje mezi 25 až 35 kW/kg.[13, 18]
Při vyšších hloubkách vybití klesá životnost baterií, což lze vidět v tabulce 3.1.

Hloubka vybití (DOD) [%]	100	50	30
Počet cyklů [-]	150-200	400-500	1000+

Tabulka 3.1: Počet cyklů olověných baterií při různých DOD.[15]

Olověné baterie se používají buďto startovací baterie a skladovací baterie. Rozdíl mezi nimi je v tloušťce olověných plechů. Startovací baterie mají plechy úzké, a proto nevydrží cyklické hluboké nabíjení a vybíjení, na rozdíl od skladovacích baterií, které mají plechy tlusté. [15]

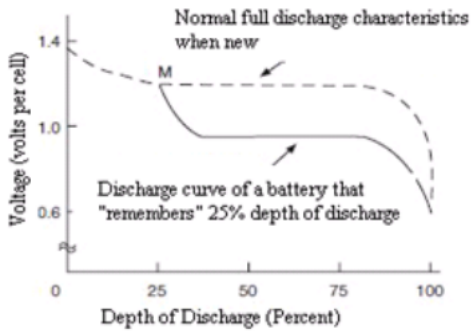
3.1.2 Nikl-Kadmiové (Ni-Cd) baterie

Kladná elektroda je tvořena hydroxidem nikelnatým (NiO(OH)) a kladná elektroda kadmiem. Elektrolytem je hydroxid draselný. Při vybití změní hydroxid nikelnatý formu $Ni(OH)_2$ a z kadmia se stane hydroxid kademnatý $Cd(OH)_2$. Tyto baterie jsou také velmi oblíbené ve fotovoltaických systémech, a to proto, že mají dlouhou životnost (700 cyklů), nejsou náročné na údržbu, a mají nízkou cenu za jeden cyklus. Dalším výhodou je schopnost této baterie snést vysoké nabíjecí proudy, což sníží dobu nabíjení. Také jsou schopny pracovat v teplotním rozsahu od -20 do cca 45 °C. Mají stejnou specifickou energii, jako baterie olověné, ale jsou dražší. [13, 16, 18]

Velkou nevýhodou je ovšem jedovatost Kadmia, kvůli které je nutná ekologická likvidace. Další značnou nevýhodou je tzv. memory effect, což znamená, že po opakovaném vybití na stejné DOD klesne baterii napětí. Ilustrace memory effectu lze vidět na obrázku 3.1, normální vybíjecí charakteristika je

vyznačena čárkovanou čarou, plnou čarou je vyznačena vybíjecí charakteristika baterie, která byla opakovaně vybita o 25%. Kvůli tomuto jevu je nutné baterii vždy vybít na 100% DOD.[13]

Tento typ baterie také není příliš vhodný k dlouhodobému skladování energie, a to kvůli vysokému samovybíjení. [2, 13, 16, 18]



Obrázek 3.1: Ilustrace memory effectu. [13]

3.1.3 Lithium-Iontové (Li-Ion) baterie

Kladná elektroda je tvořena kovovými oxidy lithia, záporná elektroda je tvořena uhlíkem. Během vybíjení a nabíjení se lithiové ionty pohybují mezi katodou a anodou. Napětí jednoho článku bývá 3,6V.

Tyto baterie mívají vysokou specifickou energii, která bývá 100-150 Wh/kg. Počet cyklů bývá 500 a více. Špičkové Li-Ion baterie, jako je například baterie ESS 3.0 od BMZ GmbH, instalované v budově UCEEB (viz kapitola 5), dosahují i 5000 cyklů. Tyto baterie ovšem dosahují i vysoké ceny.

Li-Ion baterie jsou schopné pracovat od -20 do 60° a velice málo se vybíjí (většinou od 2% do 3%), čímž překonají olověné baterie. Jejich nevýhodou, kromě ceny, je fakt, že většina kovových oxidů lithia je tepelně nestabilní, a proto jsou baterie vybaveny monitorovacím zařízením, které hlídá přebíjení a podbíjení baterie.

Druhem Li-Ion baterií jsou například Lithium-železo fosfátové baterie ($LiFePO_4$ baterie), které jako katodu používají právě $LiFePO_4$. Baterie ESS 3.0, které používáme, jsou Li-Ion NMC, s katodou $LiNiMnCoO_2$.

Část II

Vypracování

Kapitola 4

Energetický systém budovy UCEEB

4.1 Popis systému

Celkové schéma energetického systému budovy UCEEB lze vidět na obrázku 4.1.

Základem energetického systému budovy UCEEB je kogenerační plynová mikroturbína o elektrickém výkonu 65 kW a tepelném výkonu 120 kW. V budově je instalována další kogenerační plynová mikroturbína o elektrickém výkonu 30 kW, ta je ovšem určena pro experimentální účely.
Dalším zdrojem elektrické energie budovy je fotovoltaika. Na střeše budovy je instalováno pole polykrystalických fotovoltaických panelů o výkonu 35 kW. Toto pole je logicky rozděleno na dvě přibližně velké části.

Na fasádě budovy je dále instalováno menší fotovoltaické pole o výkonu 11,8 kW, kde jsou zastoupeny polykrystalické panely o výkonu 4,4 kW, monokrystalické panely o výkonu 2,6 kW a tenkovrstvé panely o výkonu 5 kW.
K akumulaci elektrické energie je v budově nově instalované akumulátorové úložiště o celkové energii 63 kWh, které bude popsáno v kapitole 5.

Teplo v budově je primárně zajišťováno výše zmíněnou kogenerační plynovou mikroturbínou o tepelném výkonu 120 kW. Záložním zdrojem tepla jsou dva plynové kotle, každý o výkonu 108 kW.
Produkované teplo je skladováno ve třech akumulátorech tepla o celkovém objemu 30 m^3, který je rozdělen mezi velký tepelný akumulátor o objemu 20 m^3, který je umístěn pod terénem vedle budovy, a 2 akumulátory o objemu 5 m^3, které jsou umístěny ve strojovně budovy.

Chlazení budovy je zajišťováno kompresorovou chladící jednotkou o chladícím výkonu 250 kW. Dále jsou v budově instalovány dvě sorpční jednotky, a to absorbční jednotka o chladícím výkonu 70 kW a adsorbční jednotka o chladícím výkonu 10 kW. Chlad je akumulován ve dvou akumulátorech chladu o celkovém objemu 5 m^3.[19]

4.2 Získávání dat

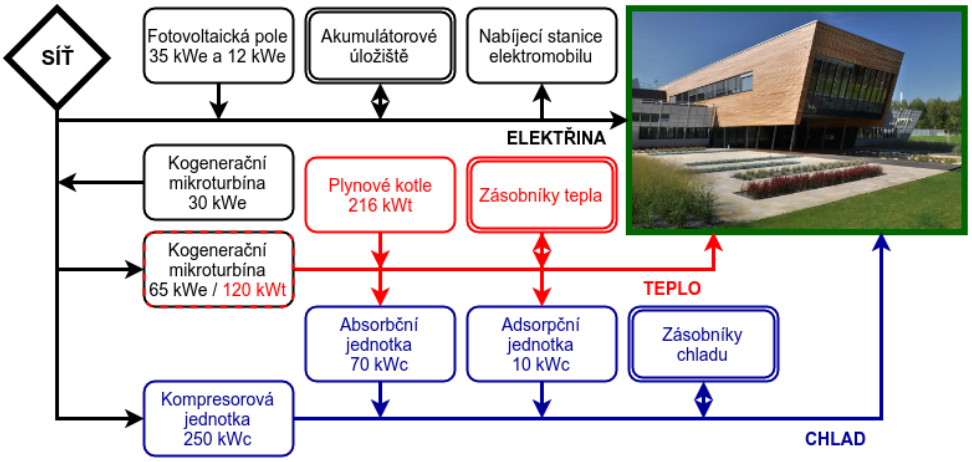
Datové toky, které jsou popsány níže, lze vidět i na obrázku 4.2. K získávání dat a řízení budovy je použit systém Mervis SCADA od společnosti ENERGOCENTRUM PLUS, s.r.o.
Pomocí systému SCADA je momentálně realizováno hlídání překročení maximálního nasmlouvaného odběru elektrické energie ve čtvrthodině. Pokud by se odběr elektrické energie příliš přiblížil dané hranici, začne SCADA odpojovat elektrické spotřebiče v budově, aby nepošlo k překročení čtvrthodinového maxima odběru.
Data ze systému SCADA je možné pohodlně vyčítat pomocí klienta v MATLABu.

Čtení dat ze střídačů napětí instalovaných u fotovoltaických polích zajišťuje společnost SolarEdge pomocí webového API, které poskytuje data ve formátu JSON.
Toto rozhraní je však nepoužitelné pro získávání dat potřebných k řízení budovy, protože nejkraší interval mezi jednotlivými odměry na střídačích napětí je 5 minut, a navíc je počet dotazů API SolarEdge omezen na 300 za den z jedné IP adresy [20]. Jelikož je nutné číst data z každého střídače napětí zvlášť, připadá na každý střídač maximálně 100 dotazů API, což znamená interval trvající maximálně 8,3 hodiny. Abychom odměřili všechna data, bylo by třeba měřit alespoň 12 hodin, včetně rezervy.
Z tohoto důvodu jsme se rozhodli použít SolarEdge API pouze k vizualizaci dat.

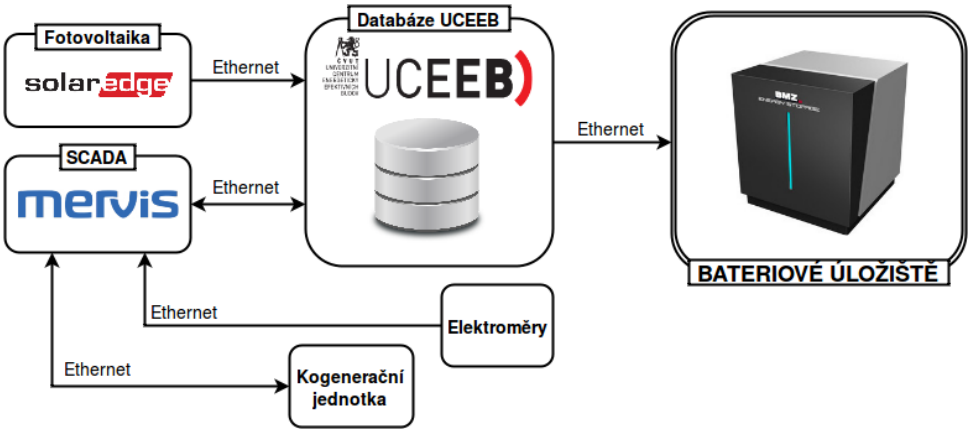
Data ze systému SCADA a SolarEdge jsou stahovány do interní databáze, odkud boudou posílány do PLC Teco Foxtrot 1016, které bude řídit akumulátorové úložiště budovy UCEEB. Program ke stahování dat ze systému SCADA je napsán v MATLABu, což není příliš ideální stav, jelikož budeme muset použít jednu licenci, a tím ji zablokovat. V budoucnu by bylo lepší získávání dat přeprogramovat v jazyce Java nebo Python. To by ovšem znamenalo seznámit se se strukturou databáze Mervis, kde jsou data ze systému SCADA uchovávány, proto jsme se rozhodli prozatím použít MATLAB.

Stahování dat ze systému SolarEdge realizuji pomocí programu napsaného v jazyce Java. Jelikož SolarEdge API poskytuje data ve formátu JSON, použil jsem knihovnu *json-simple*, která je licencovaná pod Apache License 2.0. Tento program stáhne data za poslední 3 dny, a poté je na 15 minut pozastaven.
Tento proces se neustále opakuje, dokud není 21 hodin, kdy solární panely již nemají žádný výkon, jak lze vidět na obrázku 4.3, a poté program usne do 7 hodin ráno, kdy opět začíná stahovat data.

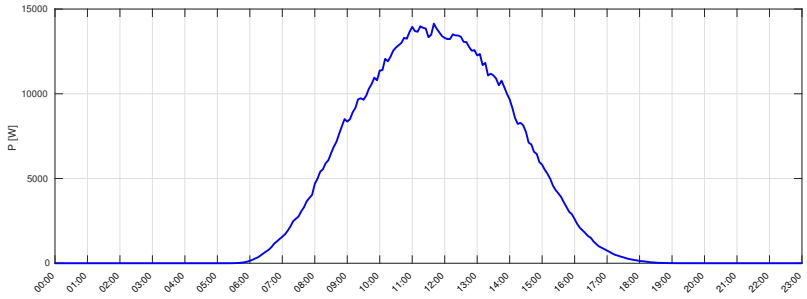
Maximální interval funkce používané ke stahování dat o střídačích napětí je omezen na jeden týden a čas mezi odměry je 5 minut. Stahováním dat 3 dny zpět předejdeme absenci dat v případě výpadku systému, kdy nedojde ke znovuspuštění programu, například o víkendu. Duplicitní data, tedy data se stejnou časovou značkou, nejsou do databáze zapsány.



Obrázek 4.1: Schéma energetického systému budovy UCEEB



Obrázek 4.2: Schéma datových toků v budově UCEEB



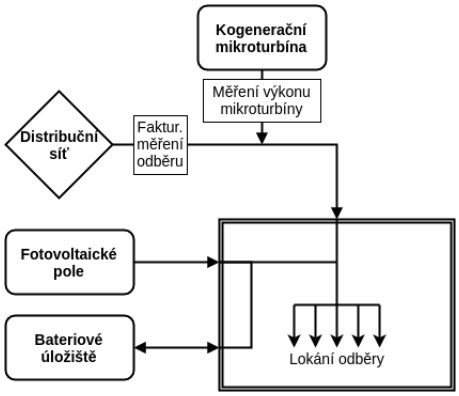
Obrázek 4.3: Zprůměrovaná denní křivka výkonu fotovoltaických polí budovy UCEEB

Schéma toků elektrické energie v budově lze vidět na obrázku 4.4. Fakturační odběr ze sítě je na obrázku vyznačen blokem "Faktur. měření odběru". Tento odběr neznamená celkovou spotřebu budovy, jelikož budova spotřebovává energii také z fotovoltaických polí a bateriového úložiště. Tento odběr je měřen optočlenem. Tento údaj se zaznamenává do systému SCADA, kde je označem jako "Příkon budovy". Fakturační odběr budovy je zaznamenáván každé 3 minuty.

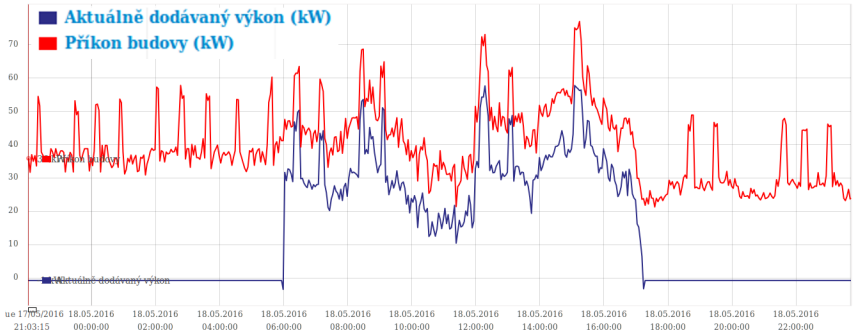
Dále se měří výkon dodávaný kogenerační mikroturbínou. V systému SCADA je označen jako "Aktuálně dodávaný výkon z MT". Mikroturbína se zapíná při zvýšeném odběru budovy, viz obrázek 4.5, a kopíruje příkon budovy. Výkon mikroturbíny je zaznamenáván každé 3 minuty.

Údaje o stavu baterií lze vyčítat pomocí PLC a převodníků ze sběrnice XCOM. Měření toků energie zajišťuje rozvaděč, kde jsou umístěny měřící transformátory proudu a analyzátor sítě PLA33.

Měření výkonu fotovoltických polí není prozatím nutné, neboť jejich výkon je již uplatněn ve fakturačním příkonu budovy. Pro inteligentnější řízení budovy, například nabíjení elektrického automobilu, by ovšem bylo vhodné vyčítat data častěji, než je momentálně umožněno API SolarEdge, a proto bude nainstalován elektroměr. Také se uvažuje o budoucím zapojení systému PV Forecast, což je předpověď účinnosti fotovoltaických panelů.



Obrázek 4.4: Schéma toků elektrické energie v budově



Obrázek 4.5: Ukázka průběhů příkonu budovy(červeně) a výkonu kogenerační jednotky(modře)

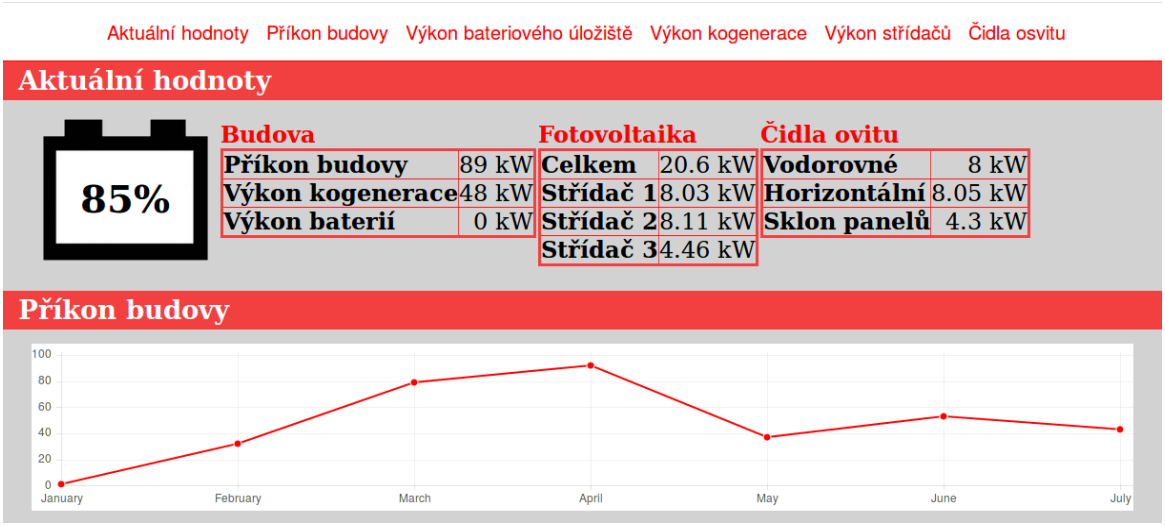
4.3 Zobrazování dat

K zobrazování dat jsem vytvořil webové rozhraní. Toto rozhraní se sestává z lišty menu, která je stále přítomná na vrchu okna, tato lišta odkazuje na jednotlivé sekce monitoringu budovy, jako jsou aktuální hodnoty měřených veličin a nebo jejich jednotlivé grafy.

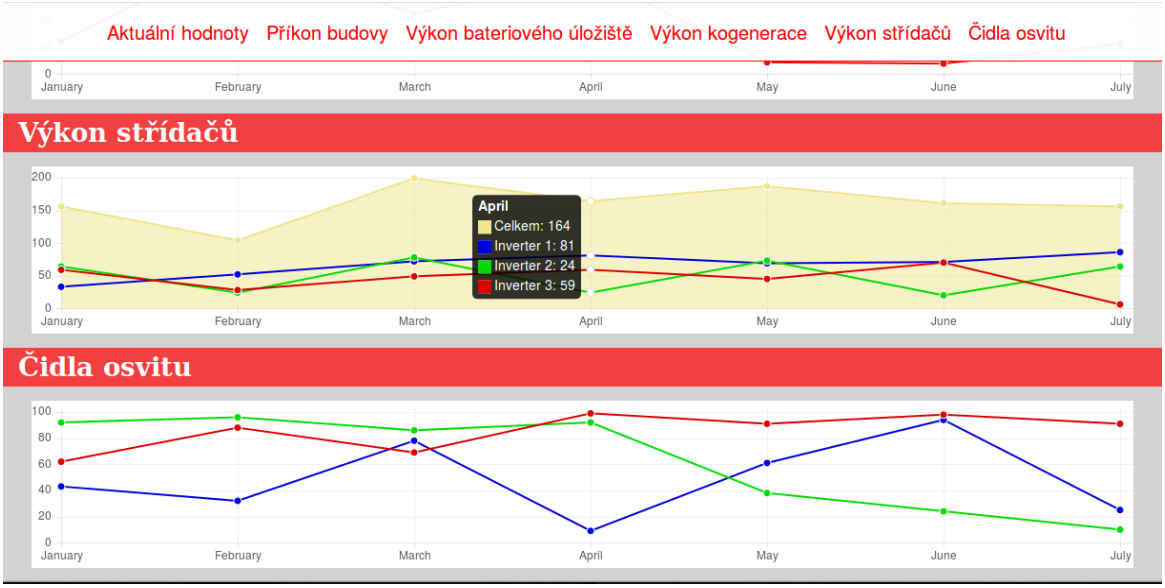
První sekcí, kterou lze vidět při otevření stránky je sekce s tabulkami aktuálních hodnot. V první tabulce jsou zobrazeny informace o aktuálním příkon budovy, výkonu kogenerační jednotky a výkonu bateriového úložiště. Druhá tabulka zobrazuje celkový výkon instalovaného fotovoltaického systému, a výkony jednotlivých fotovoltaických polí. V poslední tabulce budou zobrazeny údaje z čidel osvitu. V této sekci je také zobrazena informace o stavu bateriového úložiště. Tato sekce lze vidět na obrázku 4.6.

Každá tabulka má svou sekci, kde jsou zobrazeny průběhy příslušných veličin. Výjimkou je tabulka s nadpisem "Budova", kde má každá veličina svou sekci s grafem. Ukázka sekce s grafem lze vidět na obrázku 4.7.

Pro zobrazování průběhů v grafu jsem použil knihovnu ChartJS, která je licencovaná pod licencí "The MIT License (MIT) Copyright ©2013-2016 Nick Downie", která je volná k užití. Soubory potřebné k zobrazení jsou přiloženy na CD. V ukázce nejsou data získávána z databáze, ale jsou náhodně generována, k zajištění nezávislosti ukázky na databázi.



Obrázek 4.6: Ukázka webového rozhraní pro monitoring budovy - sekce s aktuálními hodnotami



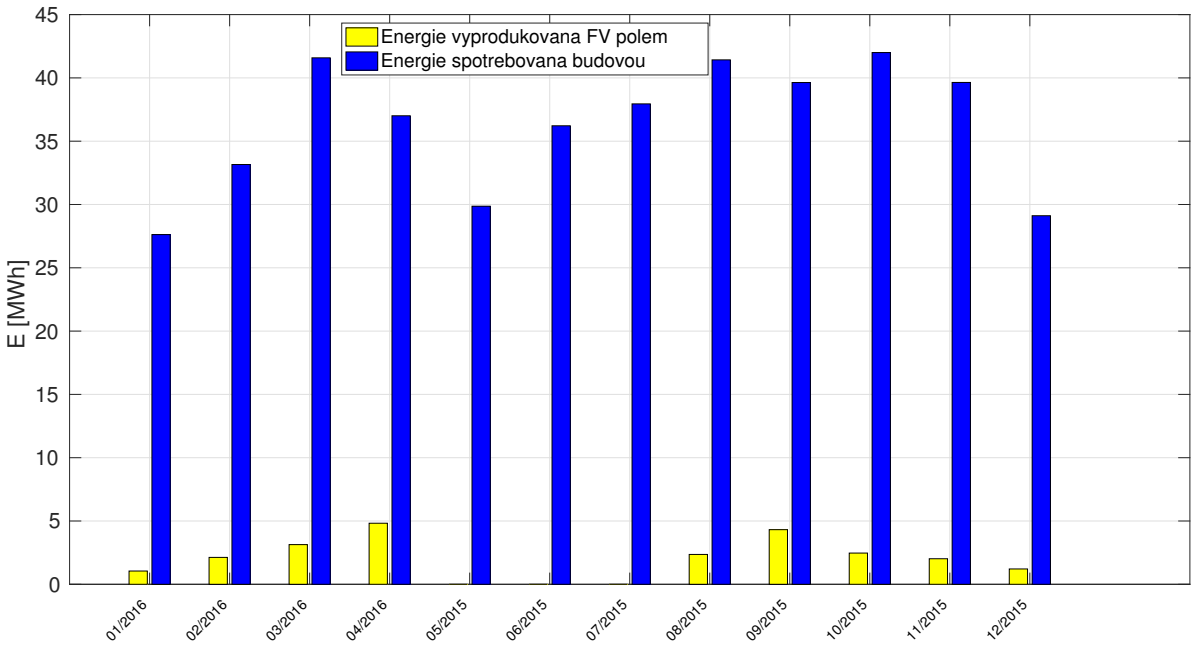
Obrázek 4.7: Ukázka webového rozhraní pro monitoring budovy - sekce s grafy

4.4 Energetická bilance budovy

Budova UCEEB spotřebuje v průměru 1,13 MWh denně za období od května 2015 do dubna 2016. Tento údaj ovšem není zcela přesný, neboť v systému MERVIS SCADA byla chyba, kdy záporná čísla se špatně ukládala jako maximální hodnota datového typu *short int*, tedy 65535. Kvůli této chybě jsem musel tyto hodnoty odfiltrovat a nahradit je nulou. Tento problém je již vyřešen, avšak ne zpětně.

Roční spotřebu a výrobu energie lze vidět na obrázku 4.8. Fotovoltaická pole byla spuštěna až v půlce října 2015, proto bohužel nebyla data k dispozici. Jak lze vidět, spotřeba elektrické energie v teplejších měsících je vyšší, než v měsících zimních. To je způsobeno tím, že v zimě se topí primárně kogenerační jednotkou, která produkuje také elektřinu. Záložním zdrojem tepla jsou plynové kotle, tudíž se elektřina na topení nespotřebovává, nýbrž je dodávána jako vedlejší produkt kogenerační mikroturbíny.

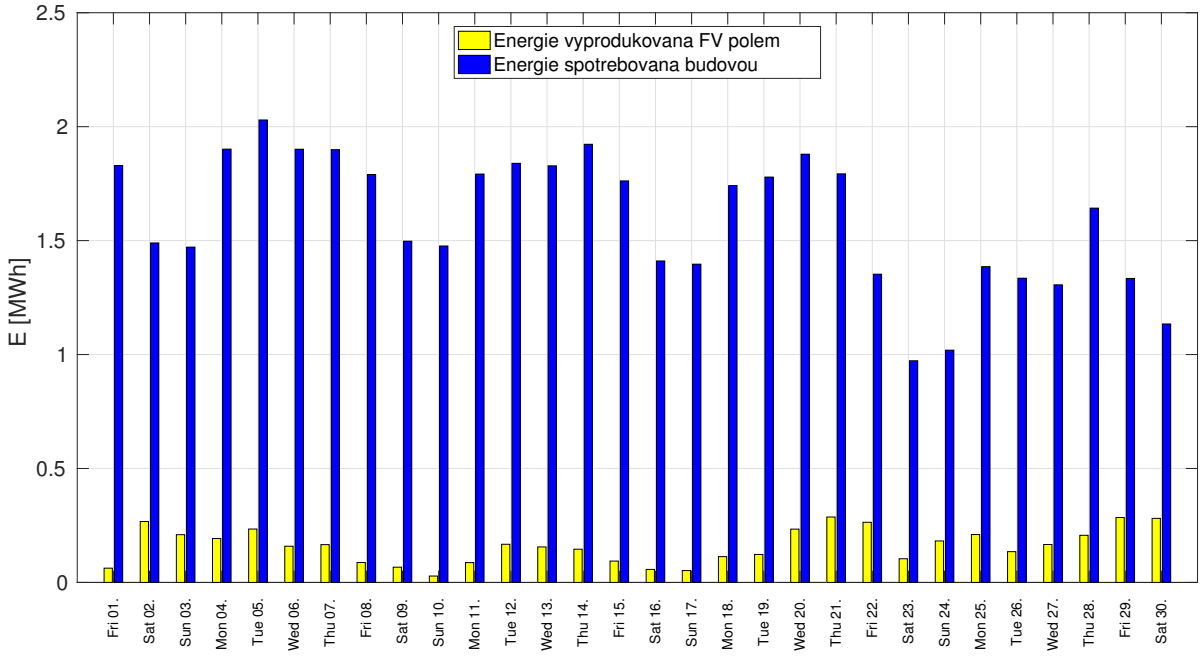
V letních měsících jsou sice fotovoltaické panely nejvýkonější, avšak k chlazení je použita kompresorová jednotka, které spotřebovává elektřinu. Navíc se nepoužívá kogenerační mikroturbína. Budova tedy odebírá nejvíce energie ze sítě na jaře a v létě.



Obrázek 4.8: Spotřeba a výroba energie v jednotlivých měsících

K rozboru měsíčního průběhu použiji měsíc duben, protože je to jediný z jarních a letních měsíců, ke kterému existují záznamy z fotovoltaických polí. V grafu na obrázku 4.9 lze sice vidět i energie vyprodukovaná fotovoltaickým polem v měsíci srpnu, tato data ovšem nejsou úplná, neboť fotovoltaický systém byl zprovozněn teprve v polovině tohoto měsíce. Spotřebu a výrobu energie v jednotlivých dnech měsíce dubna lze vidět na obrázku 4.9.

Je patrné, že spotřeba budovy je o víkendech nižší, než v pracovní dny, což je zcela očekávatelné. Není to však pravidlo, například o víkendech 9-10. a 16-17. ledna 2016 byla spotřebovaná energie o několik desítek kWh vyšší, než v předchozích dnech. Důležité je ale srovnat všední dny a víkendy z hlediska čtvrthodinových maxim. I přesto, že celková spotřeba byla o víkendech vyšší, byla rovnoměrně rozdělena mezi jednotlivé čtvrthodiny. Bateriové úložiště lze tedy přes víkendy dobíjet bez nebezpečí překročení čtvrthodinového maxima.

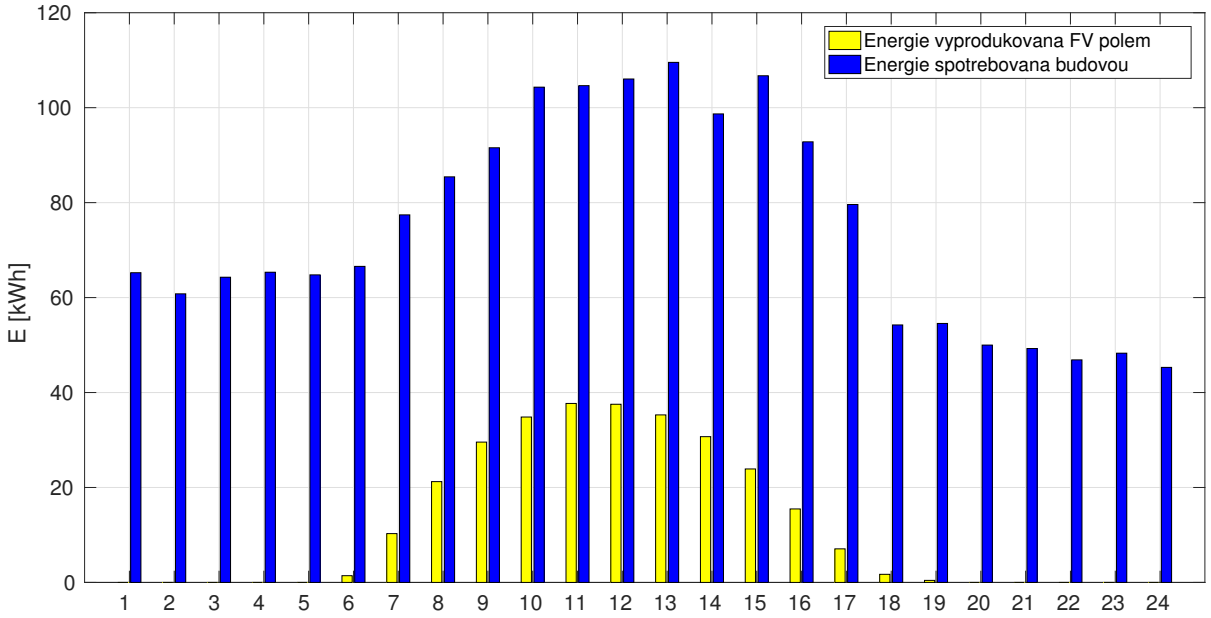


Obrázek 4.9: Spotřeba a výroba energie v dubnu 2016

Energetické příjmy a výdaje se pokusím přiblížit na průběhu dne 21. dubna 2016, který je na obrázku 4.10.

Je zřetelně vidět, že spotřeba klesá po mezi 16. a 17. hodinou, kdy většina zaměstnanců budovu opouští.

Jelikož se v budově nachází experimentální zařízení, která jsou náročná na spotřebu energie (jako je například solární laboratoř, ve které je instalován výkonný simulátor slunečního záření), je těžké předvídat, kdy se má akumulátorové úložiště dobíjet, neboť spotřeba se může skokově změnit, a při nesprávném odhadu situace by nabíjení baterií mohlo způsobit přiblížení se nasmlouvanému čtvrthodinovému maximálnímu odběru, čemuž chceme zamezit. Z hlediska čvtrthodinových maxim je vhodné, aby bylo bateriové úložiště nabité před 8. hodinou ráno, kdy se spotřeba nárazově zvedá, a poté ke konci pracovního dne v 16 hodin, kdy okamžitá spotřeba také narůstá.



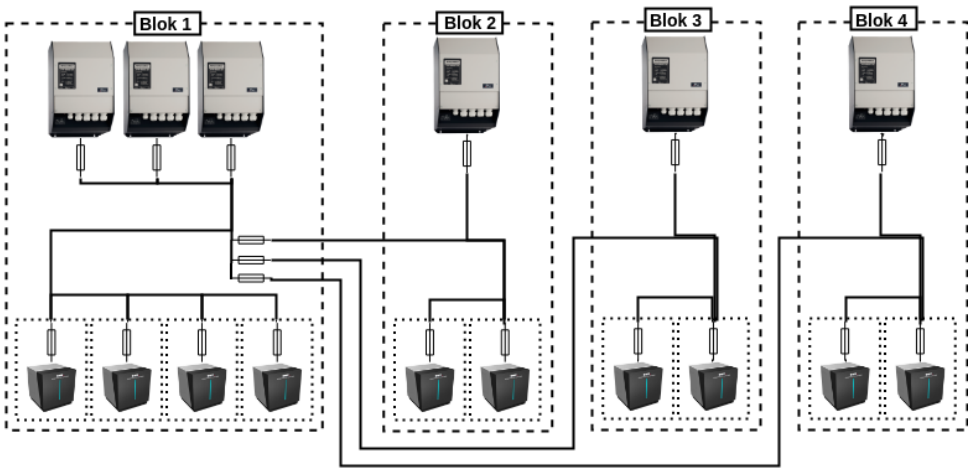
Obrázek 4.10: Spotřeba a výroba energie v 21. dubna 2016

Kapitola 5

Popis bateriového úložiště

Akumulátorové úložiště v budově UCEEB se skládá z deseti li-ion baterií ESS 3.0 od společnosti BMZ GmbH, šesti střídačů napětí Xtender XTH 6000-48 a tří řídících jednotek RCC-02 od společnosti Studer Innotec. K řízení střídačů napětí jsou instalovány tři PLC Foxtrot CP-1016 od společnosti Teco a.s. V systému jsou také instalovány převodníky mezi jednotlivými komunikačními protokoly.

Celý systém je navrhnut tak, aby se dal rozdělit na 4 samostatné části pro účely experimentů. První část, která je největší, se skládá ze čtyř baterií, tří střídačů napětí, jedné řídící jednotky a PLC Teco Foxtrot. Další dvě části se skládají ze dvou baterií, jednoho střídače napětí, řídící jednotky a PLC. Poslední část se od předchozích dvou liší absencí řídící jednotky a PLC. Fyzické zapojení lze vidět na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1: Jednovodičové DC zapojení akumulátorového úložiště

5.1 Baterie ESS 3.0

Baterie ESS 3.0 od společosti BMZ GmbH jsou li-ion NMC baterie sestavana z cylindrických článků SONY 18650 zapojených sérioparalelně. Tato baterie, vážící 120 kg, disponuje energií 6,3 kWh a specifickou energií 93 Wh/kg. Je zde vidět jistý nesoulad mezi váhou, energií a energetickou hustotou: Vynásobením

váhy a energetické hustoty nedostanu udávanou energii 6,3 kWh, nýbrž 11,16 kWh. Je ale nutné si uvědomit, že specifická energie je počítána z váhy aktivní hmoty, a nikoliv z váhy celé baterie, která je opatřena kovovou schránkou, řídící technikou, bezpečnostním stykačem a pojistkami.

Nominální napětí baterie je 54,7 V, konečné napětí po nabíjení je 61,5 V a koncové napětí po vybití je 41,0 V. Baterie se dokáže vybíjet maximálním proudem 300 A, ale pouze po dobu 3 sekund. Při vybíjení je baterie schopna dodat 6,5 kW.

Baterie má vysokou účinnost 97% a za rok se vybije o 4%.
Výdrž baterie je 5000 cyklů při 80% DOD, a její životnost je 15-20 let při teplotě 0-40°C, přičemž doporučená teplota je 10-25°C.

Tato baterie je pro zvýšení bezpečnosti vybavena řídící elektronikou, interně ovládaným stykačem a výstupním odpojovačem pro nožové pojistky.[21]

5.2 Střídače napětí Xtender XTH 6000-48, řídící jednotky RCC-02 a PLC Foxtrot CP-1016

Nabíjení a vybíjení baterií lze řídit zápisem do registrů střídačů napětí. Tuto činnost zajišťuje řídící jednotka RCC-02. Nabíjení a vybíjení lze ovládat jak pomocí displeje, tak webového rozhraní, které emuluje řídící jednotku RCC-02, nebo přístupem například z PLC. Pro automatické řízení je ovládání pomocí displeje a webového rozhraní zcela nevhodné, proto budeme nabíjení a vybíjení baterií řídit pomocí PLC.

V systému jsou umístěny tři PLC Foxtrot 1016, kterými budeme bateriové úložiště řídit. Předpokládáme, že k řízení postačí pouze jedno PLC, zbylé jsou instalovány z důvodu modularity celého systému.

5.3 Komunikace mezi komponenty úložiště

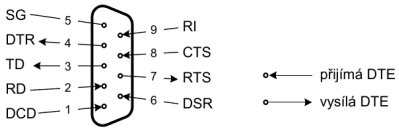
Jednotlivé komponenty mezi sebou komunikují různými technologiemi, které jsou popsány níže. Jelikož pro řízení systému nebudeme používat USB ani Ethernet, a pro chod systému nejsou tyto technologie důležité, nebudu je zde rozepisovat.

- **RS-232**
  RS-232 je sériová komunikační linka k přímému propojení 2 zařízení. Toto rozhraní podporuje synchornní i asynchronní komunikaci. Rozhraní RS-232 spojuje zařízení DCE - Data Circuit-terminating Equipment, tedy modem a zařízení DTE - Data Terminal Equipment, tedy například počítač.

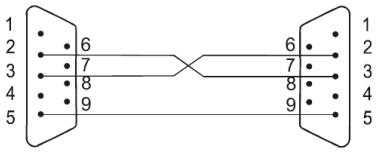
  Typickým konektorem pro toto rozhraní je konektor DB-9. Zapojení jednotlivých signálů lze vidět na obrázku 5.2. Pro přenos dat slouží signály TxD a RxD, na obrázku značeny TD a RD. Signál TxD (Transmitted Data) slouží k vysílání dat a signál RxD (Received Data) slouží k příjmu dat. Signál SG (Signal Ground) je signálová zem rozhraní. Ostatní vodiče

slouží k hardwarovému řízení přenosu dat, neboli Hardware Handshaking), tyto vodiče ovšem není nutné zapojovat. V praxi se často používá pouze třívodičové zapojení, kdy jsou zapojeny signály RxD, TxD a SG. V tomto zapojení se tok dat řídí softwarově (Software Handshaking), kdy signál RxD slouží k příjmu dat, a TxD slouží k řízení datového toku, například vysláním znaku nebo posloupností znaků. Třívodičové zapojení lze vidět na obrázku 5.3. Číselné označení je zrdcadlově obrácené oproti obrázku 5.2.

Napěťové úrovně pro logickou 1 jsou -25 až -3 V a pro logickou 0 3 až 25 V.
Maximální doporučená rychlost je 20kbit/s, jsou ovšem používány i vyšší přenosové rychlosti do 115,200 kbit/s. Maximální doporučená délka vodiče je 15m. [27, 28]



Obrázek 5.2: Signály pro rozhraní RS-232, převzato z [27], strana 105

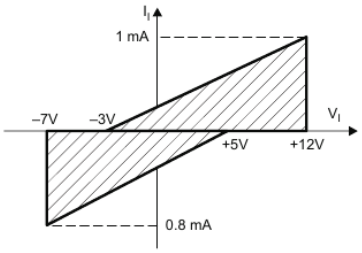


Obrázek 5.3: RS-232 třívodičové propojení, převzato z [27], strana 106

- **RS-485**
  Toto symetrické rozhraní slouží pro sériovou komunikaci až s 32 zátěžemi na budiči, které lze připojovat pomocí odboček. RS-485 je vysoce odolné vůči vnějšímu rušení, a proto je oblíbené v průmyslových aplikacích. Díky množství povolených zátěží je možné RS-485 použít jako sběrnici.

  Toto rozhraní je dvouvodičové, vodiče jsou většinou označovány jako A a B s charakteristickou impedancí 120 Ω, a jsou realizovány jako kroucená dvoulinka. K eliminaci odrazů je vedení na obou koncích terminováno. Logická hodnota je reprezentována polaritou rozdílového výstupního napětí budiče U_{AB}. Logická 1 je reprezentována kladným napětím a logická 0 napětím záporným. Absolutní hodnota rozdílového napětí mezi vodiči A a B musí být alespoň 1,5V a nanejvýš 6V.

  Ze vstupního rozdílového napětí přijímače U'_{AB} je vyvozováno výstupní rozdílové napětí budiče U_{AB}. Jelikož nejmenší povolená absolutní hodnota U'_{AB} je 200 mV, musí být vstupní napětí přijímače v rozsahu -7 až 12 V, což lze vidět na obrázku 5.4.



Obrázek 5.4: Volt-Ampérová charakteristika přijímače RS-485, převzato z [26], strana 7

Oproti RS-232 dovoluje RS-485 větší přenosové rychlosti a vzdálenosti. Maximální doporučená přenosová rychlost je 20Mbit/s a maximální vzdálenost je stanovena na 1200 m. [26, 27]

- **CAN**
  Controller Area Network, neboli CAN je sériový komunikační protokol, navržen k distribuovanému řízení systémů v reálném čase. Nejčastějším fyzickým přenosovým médiem bývá rozdílová sběrnice dle normy ISO 11898, kterou tvoří kroucený pár vodičů terminovaných na obou stranách rezistorem o odporu 120 Ω. Tyto vodiče jsou označované jako CAN_H a CAN_L.

  Nejvyšší přenosová rychlost této sběrnice je až 1 Mbit/s, tato rychlost je udávána pro délku sběrnice 40 m. Na tuto sběrnici může být připojeno až 30 zařízení.

  Tento protokol je protokol s náhodným přístupem, kde jsou kolize řešeny prioritním rozhodováním. Pokud je sběrnice volná, může libovolný uzel vysílat, a obsadit tak sběrnici až do konce vysílání zpávy. Pokud dojde ke kolizi, je odvysílána zpráva s nejvyšší prioritou. Každá zpráva začíná identifikátorem, který určuje její prioritu, nižší hodnota identifikátoru znamená vyšší prioritu.[25, 27]

- **XCOM**
  XCOM je vnitřní sběrnice firmy Studer založena na sběrnici CAN. Sběrnice XCOM zajišťuje komunikaci mezi střídači Xtender a dalšími zařízeními na sběrnici. Zařízení, kromě střídačů, zapojených na sběrnici může být ovšem maximálně 3. Mezi tato zařízení patří například řídící jednotka RCC-02, monitorovací jednotka BSP-02, nebo převodníky XCOM-CAN, XCOM-RS232. Mimo komunikaci mezi zařízeními tato sběrnice slouží k výměně dat mezi měniči Studer, napájení řídících a komunikačních jednotek a jejich časové synchronizaci.

Kompletní zapojení datových obvodů lze vidět na obrázku 5.5. U dílčích komponent, nebo jejich seskupení je přidán popisek, u převodníků popisky nejsou.

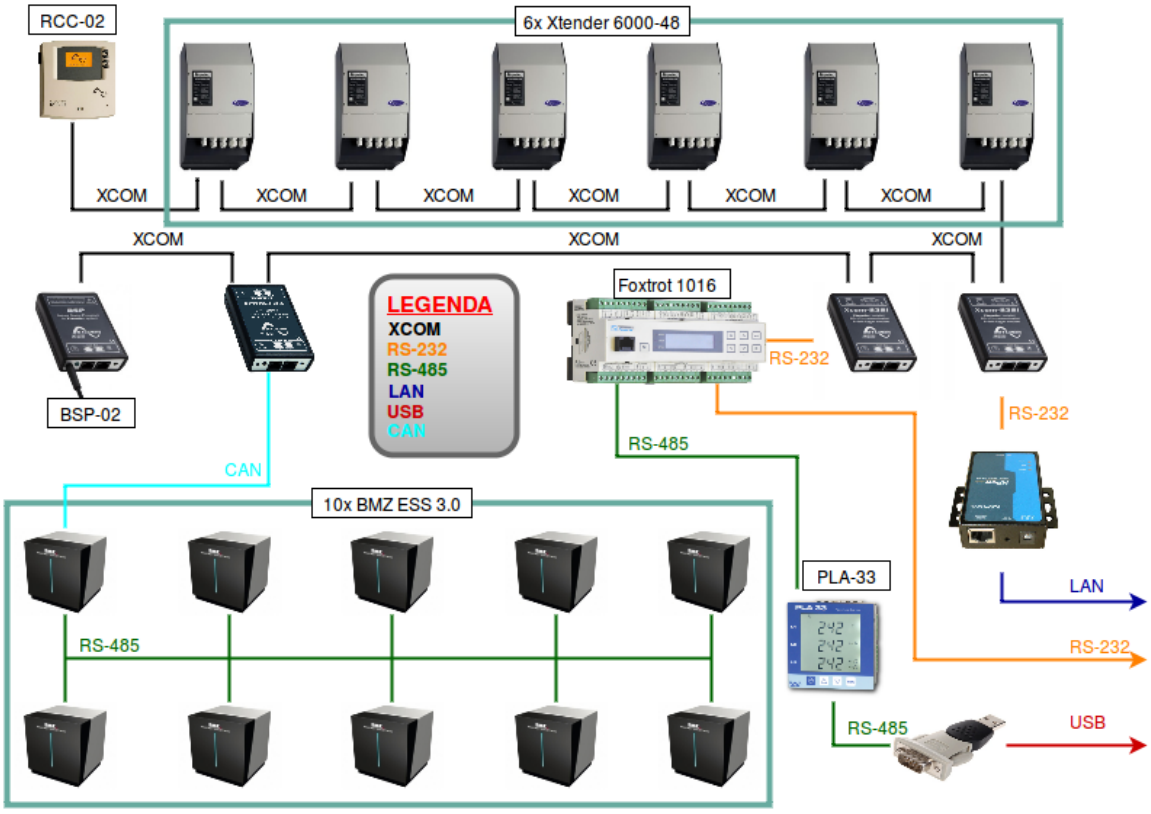
Střídače napětí jsou zapojeny v sérii přes sběrnici XCOM. Před střídači napětí je zapojena řídící jednotka RCC-02.

Na sběrnici XCOM je dále zapojen výstup na LAN, který je realizován převodníkem XCOM-RS232 a RS232-LAN. Díky připojení na LAN lze řídící jednotka nastavovat pomocí webového rozhraní.

Dále je na sběrnici připojeno PLC Foxtrot 1016, kterým lze také řídit RCC-02. PLC je připojeno pomocí převodníku XCOM-RS232. Toto PLC má instalován rozšiřující modul RS485, kterým lze získávat data z analyzátoru sítě PLA-33. Pro komunikaci s PC lze použít převodník RS485-USB.

Dále je na sběrnici XCOM připojen procesor stavu baterie BSP-02.

Nakonec jsou ke sběrnici XCOM připojeny baterie, ty mají uspořádání master-slave a jsou propojeny pomocí RS-485. Baterie s úlohou master komunikuje s okolím přes protokol CAN, ke komunikaci se střídači napětí je použit převodník XCOM-CAN.



Obrázek 5.5: Schéma datových obvodů akumulátorového úložiště

Kapitola 6

Řízení akumulátorového úložiště

6.1 Výchozí stav

Jelikož jsou v budově UCEEB zařízení, která jsou náročná na spotřebu energie, stává se, že je překročeno čtvrthodinové maximum, což je smluvně stanovená hodnota průměrného výkonu za čtvrt hodiny, kterou nesmí odběratel překročit. Pokud odběratel čtvrthodinové maximum překročí, je dodavatelem finančně penalizován.

Čtvrthodinové maximum lze sice nasmlouvat dostatečně veliké na to, aby ho nikdy nebylo dosaženo, toto řešení je ovšem drahé a neefektivní, jelikož cena 1kW čtvrthodinového maxima se pohybuje, dle tarifu, kolem 100 Kč měsíčně.[30] Je tedy zřejmé, že značné předimenzování horní hranice nepřinese úsporu.

Úspory je naopak docíleno regulací spotřebičů, kdy se spotřeba některých spotřebičů přesune do jiné, méně vytížené čtvrthodiny. Spotřebiče lze regulovat dle možností dvoustavově (případně vícestavově), kdy je spotřebič zapnut nebo vypnut (případně do jiného stavu), a nebo spojitě, kdy se spotřebiči plynule upravuje výkon.

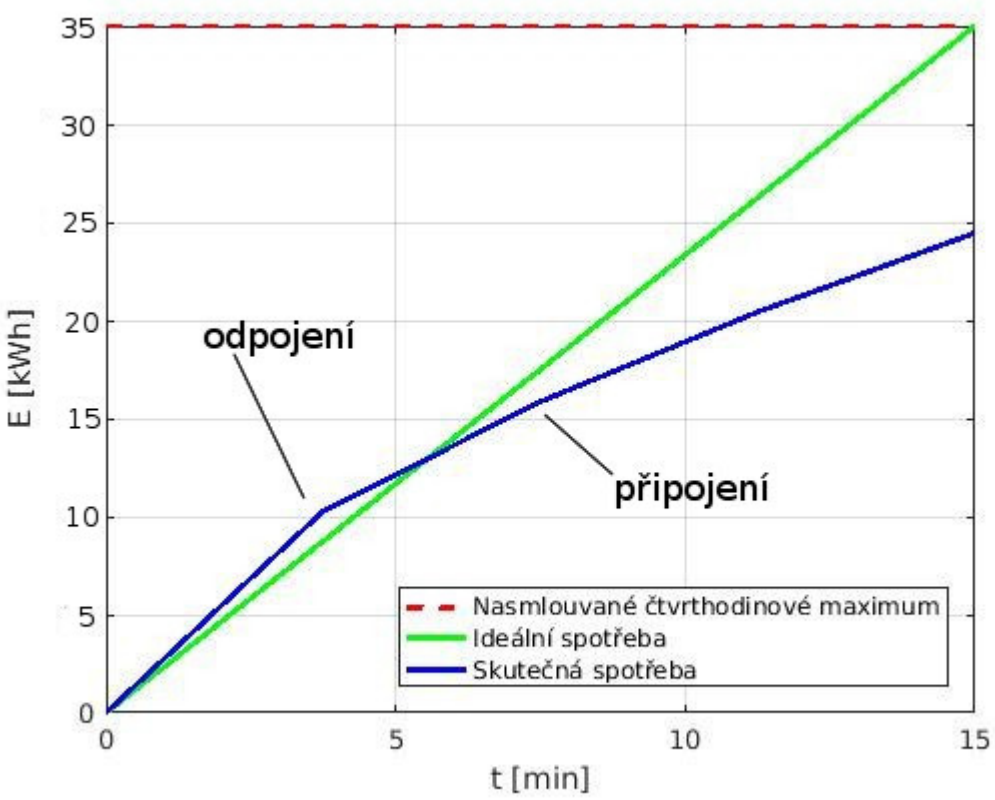
Momentálně je regulace čtvrthodinových maxim v budově UCEEB řešeno jak pasivně, tedy odepínáním spotřebičů, tak aktivně, spouštěním kogenerační jednotky.

Odepínání spotřebičů se řídí kompenzačním algoritmem, kdy se měří činná práce. Princip kompenzačního algoritmu lze vidět na obrázku 6.1.
Činná práce je je porovnávána s přímkou ideální spotřeby, která je dána předpisem:
$W_{ideal}(t) = \frac{W_{max}}{T} \cdot t \ [kWh]$
kde T je perioda (tedy 15 minut), a t je aktuální čas ve čtvrthodině. W_{max} je maximální vykonaná práce při výkonu rovným nasmlouvanému čtvrthodinového maxima po dobu čtvrthodiny. Tato práce se určí jako
$W_{max} = P_{max} \cdot \frac{kWh}{4} = \frac{P_{max}}{4} \ kWh$
kde P_{max} je nasmlouvané čtvrthodinové maximum.

Pokud činná práce překročí ideální spotřebu v daném kroku, odpojí se 1. sada spotřebičů. Pokud v dalším kroku není činná práce menší, než ideální spotřeba, odpojí se 2. sada spotřebičů, a dále obdobně. Jakmile je hodnota činné práce menší, než ideální spotřeba v daném kroku, spotřebiče se opět

začnou připojovat v pořadí LIFO (zásobník). [30]

Aktivní regulaci zajišťuje kogenerační jednotka, která se zapíná, překročí-li příkon budovy určenou hranici. Kogenerační jednotka sleduje průběh příkonu budovy, jak lze vidět na obrázku 4.5. Ke snižování odběru ze sítě se v budově UCEEB používá také fotovoltaické pole, na to se však nelze spoléhat, neboť to není stabilní zdroj elektrické energie. Nově bude čtvrthodinové maximum regulováno i akumulátorovým úložištěm.

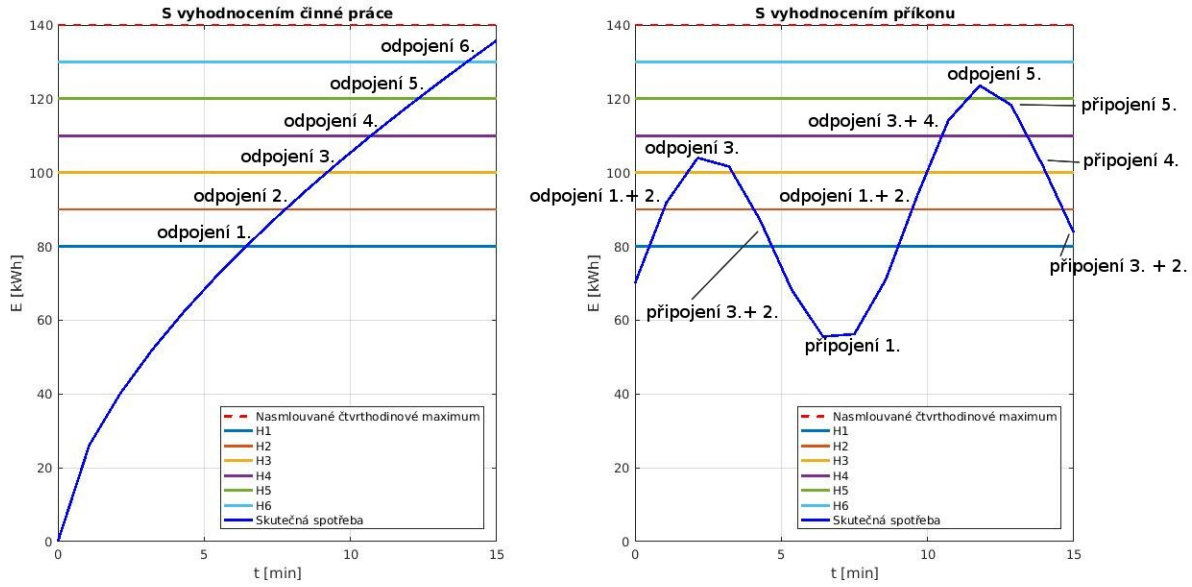


Obrázek 6.1: Kompenzační algoritmus.

6.2 Algoritmy pro regulaci akumulátorovým úložištěm

6.2.1 Obecný návrh algoritmu

Pro řízení akumulátorového úložiště jsem se inspiroval hladinovým algoritmem, který je užíván pro regulaci čtvrthodinových maxim. Principem hladinového algoritmu jsou hranice, jinak též hladiny, při kterých se spotřebiče připojují, nebo odpojují. Při překročení každé hladiny je odpojena jiná skupina spotřebičů. Lze vyhodnocovat činnou práci, nebo příkon budovy. V případě vyhodnocování činné práce algoritmus spotřebiče pouze odpojuje, neboť spotřeba je kumulativní, a neklesá. Je-li vyhodnocován příkon, jsou spotřebiče odpojovány, pokud je příkon vyšší, než daná hladina, a připojovány, pokud příkon pod hladinu klesne. Spotřebiče jsou připojovány v pořadí LIFO. Princip těchto algoritmů lze vidět na obrázku 6.2. Hladinové algoritmy jsou často kombinovány s ostatními, a používány jako pojistka, kdy je například definována hladina, kdy se odpojí velká skupina zařízení, nebo se zakáže zařízení připojovat.



Obrázek 6.2: Hladinový algoritmus.

Pro řízení akumulátorového úložiště jsem použil hladinový algoritmus s vyhodnocením příkonu obohacený o predikci změny v příštím kroku v případě vybíjení. Vyhodnocení příkonu jsem vybral, protože není nutné sledovat přesný čas ve čtvrthodině, což je momentálně problematické, kvůli špatné implementaci sledování času v systému SCADA. Tento algoritmus vyhodnocuje nejen momentální hodnotu příkonu budovy, ale určí i trend, kterým

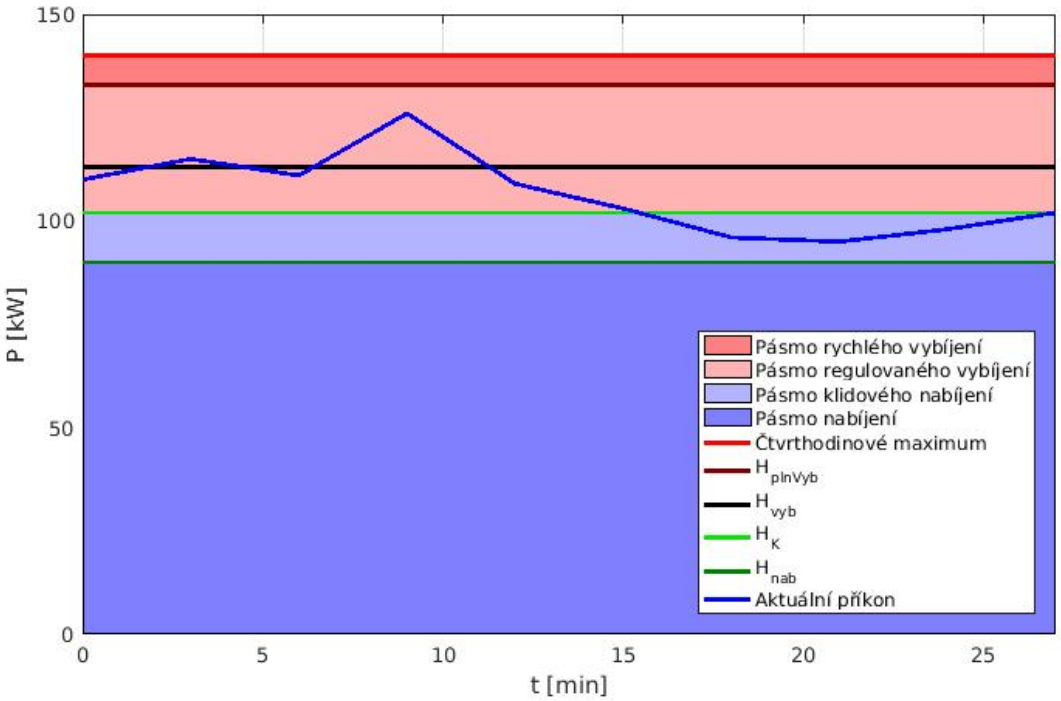
se příkon nyní ubírá. Díky tomuto lze odhadnout pravděpodobnou hodnotu příkonu v příštím kroku. Z diagnostiky průběhu příkonu budovy UCEEB je zřejmé, že pokud příkon narůstá za určitou mez, v dalším kroku již neroste tak prudce, nebo dokonce klesá, což je zařízeno zásahem kogenerační jednotky a kompenzačním algoritmem, který v případě nebezpečí překročení maxima odpojí některé spotřebiče. Definoval jsem 4 pásma, jež lze vidět na obrázku 6.3:

- **Pásmo rychlého vybíjení**
  Pásmo rychlého vybíjení je shora ohraničeno hranicí čtvrthodinového maxima (H_{max} $[kW]$) a zdola hranicí rychlého vybíjení (H_{plnVyb} $[kW]$). V tomto pásmu je jediná povolená akce bateriového úložiště vybíjení plným výkonem, aby nedošlo k překročení maximální hranice. Vybíjení plným výkonem však není pro baterie příliš dobré, proto je voleno pouze v krajních případech. Pásmo rychlého vybíjení je určeno pouze jako pojistka, kdyby regulace v pásmu regulovaného vybíjení nebyla dostatečně účinná.

- **Pásmo regulovaného vybíjení**
  Pásmo regulovaného vybíjení je shora ohraničeno H_{plnVyb} $[kW]$ a zdola hranicí klidu (H_K $[kW]$). V tomto pásmu se algoritmus snaží stlačit aktuální příkon budovy na hranici vybíjení $H_{vyb}[kW]$ pomocí PID regulátoru. Pokud by měl být akční zásah bateriového úložiště záporný, úložiště nebude ani vybíjet, ani nabíjet. Snaha regulovat na hranici H_{vyb} je vyvíjena pouze tehdy, je-li aktuální příkon budovy vyšší, než tato hranice.

- **Pásmo klidového nabíjení**
  Toto pásmo je ohraničeno zdola H_{nab} $[kW]$, a shora H_K $[kW]$. Pásmo klidového nabíjení slouží k pomalému dobíjení baterie v době, kdy příkon budovy neklesl dostatečně, takže je stále riziko dosáhnutí hranice H_vyb, ale zároveň toto riziko není tak velké, aby bylo nutné dělat akční zásahy ke snížení příkonu budovy. Je tedy možné bateriové úložiště pomalu dobíjet, aby bylo připravené v případě překročení hranice H_vyb, a také proto, aby baterie nedosahovaly příliš hlubokých cyklů, které snižují jejich životnost. Pokud dojde ke zvýšení příkonu budovy, bateriové úložiště zůstává v klidu, pokud dojde k dostatečně velkému úbytku příkonu budovy, začne se bateriové úložiště se nabíjet výkonem, který určí PID regulátor, nanejvýš ale polovinou maximálního výkonu baterie

- **Pásmo nabíjení**
  Pásmo nabíjení je shora ohraničeno hranicí H_{nab}, a slouží k rychlému dobití bateriového úložiště v případě, že je příkon budovy nízký. V tomto pásmu se bateriové úložiště vždy nabíjí výkonem
  $P_{bat+} = K$ $[kW]$, kde K je konstanta.



Obrázek 6.3: Pásma algoritmu k řízení baterií

6.2.2 Návrh algoritmu pro budovu UCEEB

Momentálně je hodnota čtvrthodinového maxima 140 kW, v minulosti byla tato hodnota 250 kW, ta ale byla zbytečně vysoká, a proto byla snížena na 100 kW. Potom ovšem docházelo k překračování této hranice, a proto byla zvýšena na 140 kW, která je, dle mého názoru, optimální.

Momentálně jsou data získávány s krokem 3 minuty, což pro řízení není příliš vhodné, neboť může dojít k vysokému nárustu příkonu za tento krok. V budoucnu se zajistí zkrácení kroku nainstalováním elektroměru, který bude komunikovat přímo s řídícím PLC, neboť ze strany poskytovatele systému SCADA není možné interval zkrátit. Dalším problémem je zpoždění o jeden krok za aktuální situací, neboť rozhraní pro získávání dat ze systému SCADA poskytuje pouze předposlední hodnotu.

Stanovení hranice pro nabíjení H_{nab}

Z diagnostiky příkonu budovy UCEEB jsem zjistil, že příkon budovy UCEEB o víkendech přes den nezřídka klesá pod 50 kW. Přes noc bývá tento příkon stejný, nebo nižší. Aby došlo ke spolehlivému nabití bateriového úložiště přes víkend, je nutné, aby hranice H_{nab} byla alespoň 60 kW. O víkendech by tato hranice mohla být vyšší, jelikož nedochází ke skokovým změnám příkonu.

Prozkoumáním průběhu příkonu přes den se ukázalo, že příkon budovy občas klesne pod 80 kW, vhodná hranice H_{nab} se tedy pohybuje okolo 90 kW.

V tuto dobu by bylo možné bateriové úložiště dobíjet, a připravit ho tak na další špičku. V noci klesá příkon dokonce i pod 40 kW, není ovšem výjimkou ani 70 kW. Aby se bateriové úložiště přes noc spolehlivě nabylo, je tedy nutné nastavit H_{nab} minimálně na 80 kW.

Pro účely regulace čtvrthodinových maxim je ovšem nutné posuzovat dny, kdy může dojít k překročení maxima. V tyto dny se zřídka stává, že příkon budovy je nižší, než 90 kW, nebo pouze na krátkou dobu. Nastavit hranici pro nabíjení na 100 kW by bylo příliš riskantní v případě skokového nárustu příkonu, často se totiž stává, že příkon budovy vzroste o 40 kW a více.

Tyto hodnoty nejsou závislé na velikosti nasmlouvaného čtvrthodinového maxima, nemusí se tedy podle něj upravovat.
Z těchto důvodů jsem se rozhodl nastavit hodnotu $H_{nab} = 90\ kW$.

Stanovení hranice rychlého vybíjení H_{plnVyb}

Tato hranice je úzce spjatá s hodnotou H_{max}, neboť je poslední pojistkou nepřekročení této hodnoty. Maximální výkon bateriového úložiště je sice 60 kW, ale výkon maximální výkon střídačů Studer je 5 kW. Momentálně jsou v provozu pouze 3 tyto střídače, tudíž maximální výkon, který může bateriové úložiště dodávat do sítě je 15 kW, jakmile bude v provozu další trojice střídačů, tento maximální výkon stoupne na 30 kW. Baterie není příliš vhodné vybíjet velkými výkonu, proto by tato hranice měla být dostatečně vysoká, aby opravdu sloužila pouze jako pojistka.
Aby nedocházelo k častému rychlému vybíjení, stanovil jsem hodnotu $H_{plnVyb} = 0.95 \cdot H_{max}\ [kW] = 133\ kW$.

Stanovení hranice vybíjení H_{vyb}

Pásmo ohraničené hranicemi H_{vyb} a H_{plnVyb} by mělo být dostatečně široké, obsáhlo i poměrně velký skok příkonu. Příliš nízká hodnota H_{vyb} by ale způsobila časté a zbytečné vybíjení bateriového úložiště na úkor doby, kdy bude potřeba vybíjet. Aby baterie nevybíjela příliš vysokými výkony bylo by vhodné stanovit šířku tohoto pásma na $\frac{1}{3}$ maximálního výkonu bateriového úložiště, tedy 20 kW. Hranici vybíjení H_{vyb} tedy určím jako $H_{vyb} = H_{plnVyb} - 30[kW] = 113\ kW$

Stanovení hranice klidu H_K

Hranice klidu se odvíjí od hranic H_{nab} a H_{vyb}. Tato hranice by měla být na polovině vzdálenosti hranic H_{nab} a H_{vyb}, Jelikož $H_{nab} = 90kW$ a $H_{vyb} = 113\ kW$, platí $H_K = H_{nab} + \frac{1}{2} \cdot (H_{vyb} - H_{nab}) = 101,5\ kW$. Zaokrouhlením dostanu $H_K = 102\ kW$.

6.2.3 Stanovení konstanty K

Bateriové úložiště se začíná nabíjet, klesne-li příkon budovy pod 90 kW. Aby se zajistilo poměrně rychlé nabití, je nutné baterie nabíjet dostatečně

velkým příkonem. Jak již bylo napsáno, maximální velikost výkonu, kterým lze bateriové úložiště nabíjet, nebo vybíjet, je momentálně 15 kW. Konstanta K je tedy shora omezena touto hodnotou. Zároveň by bylo vhodné, aby příkon budovy během nabíjení nebyl vyšší, než 100 kW, jelikož se příkon budovy může skokově změnit o desítky kW. Ideální hodnota pro nabíjení bateriového úložiště je tedy, dle mého, $K = 10\ kW$.

6.3 Implementace

6.3.1 Základy programování PLC v prostředí Mosaic

Program v PLC se vykonává ve smyčce, vždy po vykonání se program vrátí na začátek. Toto lze vidět na obrázku 6.4. Cyklus procesu začíná fází, označené jako *Režie*, ve které se aktualizují systémové a časové proměnné, aktivují procesy a podobně. Následuje fáze *Čtení X*, kdy jsou přečteny vstupy. Poté se provede samotný program. Po vykonání programu následuje fáze *Zápis Y*, ve které se na výstup pošlou výstupní proměnné. Poté se celý cyklus opakuje znovu.

Obrázek 6.4: Cyklické vykonávání programu.[35]

K zajištění přenositelnosti programů mezi jednotlivá PLC nezávisle na výrobci slouží norma IEC 61 131. Tato norma stanovuje základní datové typy a programovací jazyky, které lze k programování PLC používat.

Tyto základní datové typy lze vidět v tabulce 6.1. Nad tyto elementární datové typy jsou definovány také rodové typy, zastřešující více elementárních datových typů s podobnými vlastnostmi. Tyto rodové typy začínají prefixem `ANY_`, například `ANY_INT`, který obsahuje všechny elementární celočíselné typy (`INT`, `SINT`, `DINT`, `UINT`, `USINT`, `UDINT`). Typ `ANY` obsahuje všechny elementární typy. Dále je také možné deklarovat vlastní odvozené datové typy. Je také možné deklarovat jedno a více rozměrná pole elementárních i odvozených datových typů.

K realizaci algoritmů je možné použít buďto jazyky textové nebo jazyky grafické. Mezi textové jazyky patří jazyk strukturovaného textu **ST**, nebo jazyk seznamu instrukcí **IL**. K jazykům grafickým se řadí jazyk příčkového diagramu **LD** a jazyk funkčního blokového schématu **FBD** a jazyk volně propojovaných bloků **CFC**. V této práci se budu věnovat jazyku ST.

K provádění úkonů slouží Programová Organizační Jednotka, zkráceně POU z anglického Program Organisation Unit. POU může být reprezentována funkcí, funkčním blokem a programem:

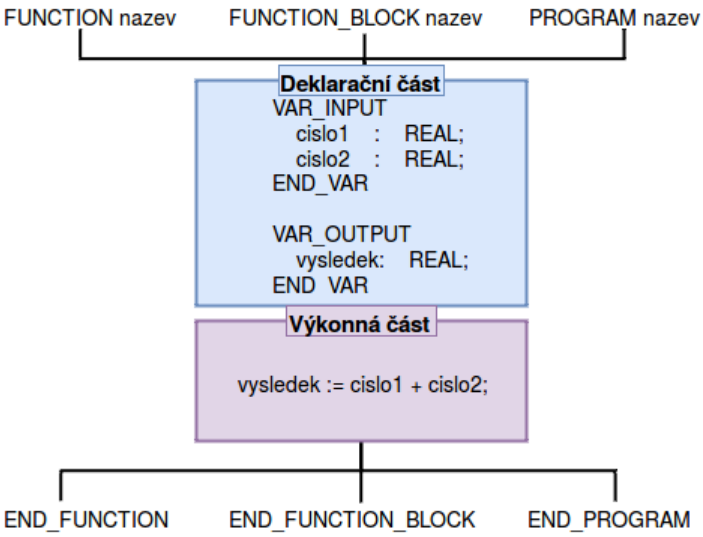
Funkce
Funkce je nejjednodušší POU. Může obsahovat pouze jednu výstupní proměnnou, která je ovlivněna pouze vstupními proměnnými, a při stejných vstupních parametrech vrací stejný výstup.

Funkční jednotka
Funkční blok může obsahovat více výstupních proměnných a jeho výstup mohou ovlivňovat i minulé hodnoty, čímž je způsobeno, že při stejných vstupních parametrech nemusí vrátit stejný výstup.

Program
Program je nejvyšší POU, která je seskupením funkcí a funkčních bloků. PLC je schopno spouštět více programů naráz.

Každá POU obsahuje deklarační a výkonnou část, struktura POU lze vidět na obrázku 6.5. V deklarační části se definují vstupní, výstupní a jiné proměnné (například konstanty nebo vnitřní proměnné funkce). Výkonná část obsahuje vlastní algoritmus. Deklarace POU začíná klíčovým slovem `<typ POU>` a názvem POU, a končí klíčovým slovem `END_<typ POU>`, například `FUNCTION funkce1 ... END_FUNCTION`. Za klíčovým slovem začátku POU začíná deklarační část, ve které se definují jednotlivé proměnné. Proměnné se podle typu píší do bloků, které začínají klíčovým slovem `VAR_<typ proměnné>` a končí klíčovým slovem `END_VAR`. Tento blok obsahuje definice proměnných. Definice proměnné má tvar:
`<název proměnné> : <datový typ> := <inicializační hodnota>;`.
Pokud není uvedena inicializační hodnota, proměnné je přiřazena její předdefinovaná hodnota.

Jakmile jsou definovány potřebné proměnné, začíná výkonná část. V této části je možné používat používat příkazy `IF`, přepínač `CASE`, smyčky `FOR` a `WHILE`, a další příkazy. Dále se zde přiřazují hodnoty proměnným a používají funkce a funkční bloky. Struktura POU lze vidět na obrázku 6.5



Obrázek 6.5: Schéma struktury POU.

Klíčové slovo	Anglicky	Datový typ	Bitů	Rozsah hodnot
BOOL	Boolean	Boolovské číslo	1	0,1
SINT	Short integer	Krátké celé číslo	8	–128 až 127
INT	Integer	Celé číslo	16	–32 768 až +32 767
DINT	Double integer	Celé číslo, dvojnásobná délka	32	–2 147 483 648 až +2 147 483 647
USINT	Unsigned short integer	Krátké celé číslo bez znaménka	8	0 až 255
UINT	Unsigned integer	Celé číslo bez znaménka	16	0 až 65 535
UDINT	Unsigned double integer	Celé číslo bez znaménka, dvojnásobná délka	32	0 až +4 294 967 295
REAL	Real (single precision)	Číslo v pohyblivé řádové čárce (jednoduchá přesnost)	32	±2.9E-39 až ±3.4E+38 Podle IEC 559
LREAL	Long real (double precision)	Číslo v pohyblivé řádové čárce (dvojnásobná přesnost)	64 2	Podle IEC 559
TIME	Duration	Trvání času		24d 20:31:23.647
DATE	Date (only)	Datum		Od 1.1.1970 00:00:00
TIME_OF_DAY nebo TOD	Time of day (only)	Denní čas		24d 20:31:23.647
DATE_AND_TIME nebo DT	Date and time of day	„Absolutní čas“		Od 1.1.1970 00:00:00
STRING	String	Řetězec		Max.255 znaků
BYTE	Byte(bit string of 8 bits)	Sekvence 8 bitů	8	Není deklarován rozsah
WORD	Word (bit string of 16bits)	Sekvence 16 bitů	16	Není deklarován rozsah
DWORD	Double word (bit string of 32 bits)	Sekvence 32 bitů	32	Není deklarován rozsah

Tabulka 6.1: Tabulka datových typů dle normy IEC 61 131

6.3.2 Popis implementovaného programu

Popis použitých funkčních bloků

Program začíná stažením dat z databáze do PLC. Toto je realizováno skriptem v jazyce PHP, který pomocí SQL dotazu uloží poslední nenulové hodnoty příkonu budovy a čtvrthodinového maxima do souboru. Výstupem je řetězec dvou čísel oddělených oddělovacím znakem. Na tomto oddělovacím znaku nezáleží, důležitý je pouze formát řetězce číslic. Každý řetězec musí mít délku 6 znaků, pokud přečtené číslo nemá 6 cifer, je mu předřazen patřičný počet nul. Data z tohoto soubory jsou poté staženy pomocí funkčního bloku `getNumInternet`, která využívá knihovnu pro PLC Teco InternetLib.

Z této knihovny je použit funkční blok `fbHttpRequest`, který lze vidět na obrázku 6.6. Funkční blok `fbHttpRequest` je detailně popsán v manuálu knihovny InternetLib [37]. Vstupními argumenty tohoto funkčního bloku jsou booleovské proměnné, které určí použitou metodu (Get a Post), nebo komunikaci zruší. Dalším vstupem je IP adresa vyjádřená pomocí datového typu TIPadr z knihovny ComLib.[38]. Následujícími argumenty jsou port a komunikační kanál, oba reprezentované datovým typem `UINT`. Tento blok obsahuje také vstupně-výstupní proměnné, které jsou potřeba k nastavení spojení. Těmito proměnnými jsou doménové jméno serveru, cesta k datům na serveru a data k odeslání pro metodu POST. Vyjmenované proměnné jsou typu `STRING`. Poslední vstupně-výstupní proměnnou jsou přijatá data. Tato data jsou typu `THttpBuffer`, což je datový typ knihovny InternetLib, a jedná se o pole dat typu `USINT`. Tento funkční blok obsahuje řadu výstupních proměnných, mezi které patří například chybový kód.[37]

Funkční blok `getNumInternet` je použit jako obálka funkčního bloku `fbHttpRequest`. Vstupním argumentem funkčního bloku `getNumInternet` je `STRING` *ActionInput*, což je cesta k souboru na serveru, začínající znakem `/`, například `/slozka/soubor.txt`. Výstupem tohoto funkčního bloku je `STRING` *output*, což je řetězec znaků přečtených z požadovaného souboru, a proměnná `USINT` *err*, což je chybový kód. Chybový kód odpovídá chybovému kódu popsaným v [37] na straně 28, hodnota 0 znamená, že operace proběhla bez chyby.

K získání dat naráz je používán funkční blok `databazeCteni`, který nepřijímá žádné vstupní argumenty. Jako vnitřní proměnnou obsahuje řetězec s cestou k souboru na severu ve formátu, který požaduje funkční blok `getNumInternet`. Výstupem funkčního bloku `getDataInternet` jsou popořadě proměnné `REAL` *prikonBudovy* `REAL` *maximum* a `USINT` *errorCteni*. Proměnná *prikonBudovy* reprezentuje aktuální příkon budovy, proměnná *maximum* pak maximální povolené čtvrthodinové maximum, proměnná *errorCteni* je chybový kód čtení dat ze souboru.

Stažená data jsou předána funkčnímu bloku `zasahBaterie`, který obsahuje implementaci navrženého algoritmu. Tento funkční blok přijímá jako argument dvě proměnné typu `REAL` - *prikonBudovy* a *maximum*. aby proměnná *prikonBudovy* obsahovala aktuální příkon budovy v kW, a proměnná *maximum* hodnotu nasmlouvaného čtvrthodinového maxima v kW. Poslední

vstupní proměnnou je `USINT` *errCteni*, která udává chybový kód čtení příkonu budovy a hodnoty čtvrthodinového maxima. Je-li hodnota chybového kódu čtení příkonu budovy nenulová, akční zásah baterie je automaticky nulový. Je-li chybový kód nenulový, je akční zásah nastaven na hodnotu 0.

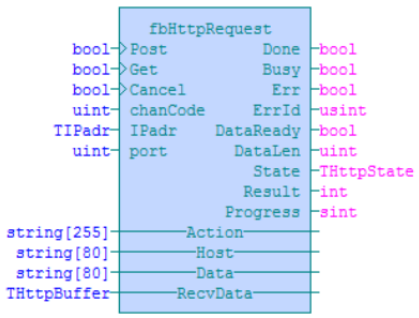
Tento funkční blok také sleduje stav globální proměnné *manualniRizeni* typu `BOOL`. Tuto proměnnou lze nastavovat pomocí webového rozhraní. Pokud je hodnota proměnné *manualniRizeni* logická 0, funkční blok vykonává regulaci způsobem, který byl popsán výše. Nabývá-li *manualniRizeni* logické 1, funkční blok `zasahBaterie` vrací hodnotu globální proměnné *akcniZasahGlobal* typu `REAL`, která je vyčtená ze zadávacího políčka webového rozhraní.

Výstupem tohoto akčního bloku je požadovaný akční zásah bateriového úložiště reprezentovaný proměnnou `REAL` *zasahBaterieOut*, jejíž hodnota je v intervalu od -15 do 10 kW, kde záporné hodnoty reprezentují vybíjení a kladné hodnoty nabíjení.

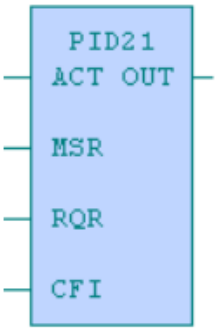
K vypočítání akčního zásahu v pásmu klidového nabíjení a v pásmu regulovaného vybíjení je použit funkční blok `PID21` z knihovny RegoLib [39]. Tento funkční blok lze vidět na obrázku 6.7 a je detailně popsán v manuálu Regulačních knihoven pro Mosaic [39]. Tento regulátor funguje podle diskrétní verze rovnice:

$$u(t) = K \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_t^0 e(\tau) d\tau + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right] \tag{6.1}$$

Funkční blok `PID21` přijímá 4 vstupní proměnné, kde první je datového typu `BOOL`, a určuje, zda má být regulátor v provozu, nebo ne. Další vstupní proměnná, typu `REAL` je měřená hodnota. Třetí vstupní proměnná, typu `REAL`, je požadovaná hodnota. Poslední vstupní hodnota je typu `_TPID21_IN_`, což je datový typ z knihovny RegoLib, který určuje parametry regulátoru PID21. V této proměnné lze nastavovat řadu hodnot, jako je integrační konstanta T_i či derivační konstanta T_d. Dále je možné nastavit omezení vstupu i výstupu regulátoru, periodu vzorkování, pásmo necitlivosti, a pod. Výstupem funkčního bloku `PID21` je proměnná typu `REAL`, která reprezentuje akční zásah.



Obrázek 6.6: Funkční blok fbHttpRequest.[37]



Obrázek 6.7: Funkční blok PID21.[39]

getNumInternet			
Vstupní		Výstupní	
Název	Typ	Název	Typ
ActionInput	STRING	output	STRING
		err	USINT

Tabulka 6.2: Vstupní a výstupní proměnné funkčního bloku getNumInternet

databazeCteni			
Vstupní		Výstupní	
Název	Typ	Název	Typ
		prikonBudovy	REAL
		maximum	REAL
		errorCteni	USINT

Tabulka 6.3: Vstupní a výstupní proměnné funkčního bloku databazeCteni

zasahBaterie			
Vstupní		Výstupní	
Název	Typ	Název	Typ
prikonBudovy	REAL	zasahBaterieOut	REAL
maximum	REAL		
errorCteni	USINT		

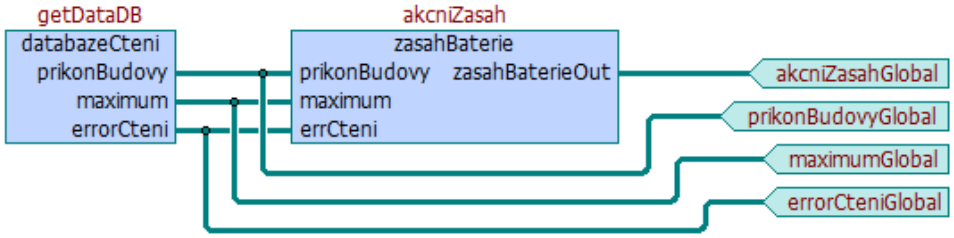
Tabulka 6.4: Vstupní a výstupní proměnné funkčního bloku zasahBaterie

Program

Program `akcniZasahMain` je přiřazen k úloze `FreeWheeling`, která využívá proces číslo P0, což je proces, který se spustí se začátkem každého cyklu. Schéma tohoto programu v jazyce CFC lze vidět na obrázku 6.8.

Nejdříve se zavolá instance *getDataDB* funkčního bloku `databazeCteni`. Výstupní hodnoty této instance se předají instanci *akcniZasah* funkčního bloku `zasahBaterie`, a také se zapíší do globálních proměnných *prikonBudovyGlobal*, *maximumGlobal* a *errorCteniGlobal*.

Intance *akcniZasah* funkčního bloku `zasahBaterie` zpracuje přijaté proměnné. Výstupní hodnota je zapsána do globální proměnné *akcniZasahGlobal*. Tato globální proměnná je poté předána programu, který vytvořil Ing. Marek Maška. Tento program komunikuje se střídači Studer, a slouží k předání informace o hodnotě vybíjení, či nabíjení baterií střídačům.



Obrázek 6.8: Schéma programu v jazyce CFC

Grafické rozhraní

K vizualizaci dat a řízení bateriového úložiště jsem vytvořil webové rozhraní a rozhraní pro obrazovku na PLC. Webové rozhraní, které lze vidět na obrázku 6.9, jsem navrhl pomocí nástroje WebMaker v rozhraní Teco Mosaic. Toto rozhraní je rozděleno na monitorovací a řídící část. K zobrazení informace o stavu baterie byl použit objekt s názvem *Sloupec ovládaný proměnnou*, který mění svou výšku v závislosti na řídící proměnné. Jako řídící proměnná byla použita globální proměnná *stavBaterieGlobal*, která je vyčítána pomocí programu na ovládání střídačů Studer. Tato proměnná je také zobrazována v textovém poli.

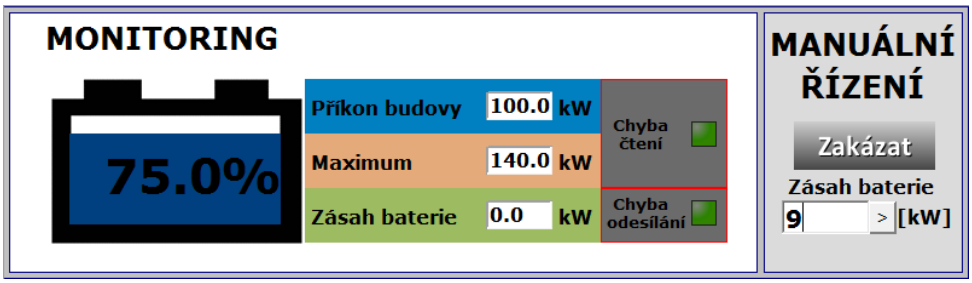
Dále jsou v odpovídajících textových polích zobrazeny proměnné *prikonBudovyGlobal*, *maximumGlobal* a *akcniZasahGlobal*. K indikaci správnosti čtení příkonu budovy a nasmlouvaného čtvrthodinového maxima slouží objekt *Dvoustavový obrázek*, který je řízen globální proměnnou *errorCteniGlobal*. Je-li chybový kód 0, je tento stav signalizován obrázkem zhasnuté zelené diody. Je-li chybový kód nenulový, což znamená, že při čtení nastala chyba, je tento stav signalizován obrázkem rozsvícené červené diody.

Dále je připraven obdobný dvoustavový obrázek pro signalizaci správnosti odesílání informace o hodnotě akčního zásahu do databáze, toto však ještě nebylo implementováno, a do databáze se zatím tento údaj neposílá.

K manuálnímu nastavení hodnoty akčního zásahu bateriového úložiště slouží řídící část. Aby bylo možné hodnotu akčního zásahu nastavit pomocí

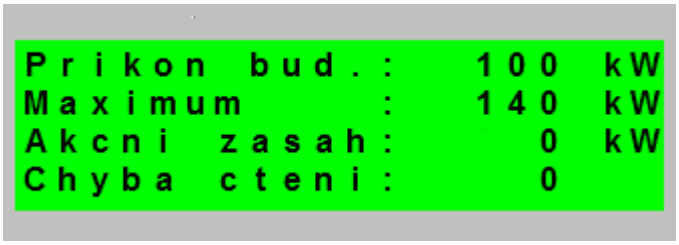
webového rozhraní, je nutné nejdřív tento stav povolit. K tomuto úkonu jsou použita dvě tlačítka k přepínání globální proměnné *manualniRizeni*. Je-li *manualniRizeni* rovno logické 0, je skryto tlačítko pro zadávání, i tlačítko pro deaktivaci manuálního zadávání. Viditelné je pouze tlačítko pro aktivaci manuálního řízení. Toto tlačítko má nápis "Povolit", a překrývá tlačítko pro deaktivaci, která má nápis "Zakázat". Stisknutím tlačítka "Povolit"se toto tlačítko skryje, a zobrazí se tlačítko "Zakázat"i zadávací políčko. Zároveň se vypne řízení bateriového úložiště. Nyní je možné zadávat hodnotu akčního zásahu manuálně. Po zadání se nastavená hodnota okamžitě zobrazí v monitorovací části rozhraní.

Stisknutím tlačítka "Zakázat"se skryje zadávací políčko, i tlačítko samotné, a zobrazí se tlačítko "Povolit". Zároveň se aktivuje automatické řízení bateriového úložiště.



Obrázek 6.9: Webové rozhraní pro monitoring stavu baterií a jejich řízení

Rozhraní pro obrazovku PLC Teco Foxtrot CP-1016 lze vidět na obrázku 6.10. Na této obrazovce lze pouze sledovat, řízení není možné. Na této obrazovce se zobrazují aktuální hodnoty příkonu budovy, čtvrthodinového maxima a akčního zásahu bateriového úložiště. Dále je zde zobrazen chybový kód čtení dat z databáze.



Obrázek 6.10: Snímek virtuálního displaye pro PLC Teco CP-1016

Kapitola 7

Závěr

Během vypracovávání práce došlo ke zpožděním způsobených technickými potížemi při zprovozňování komunikačního systému bateriového úložiště. Dokumentace střídačů a baterií nebyla místy zcela jasná, a některé vlastnosti byly zprovozněny až s nahráním nového firmware. Proto nebylo možné realizovat zadanou bakalářskou práci v plném rozsahu, snažil jsem se ale co nejvíce splnit zadané body tak, aby bylo možné na této práci v budoucnu stavět, a použít implementované programy a vizualizační rozhraní k další práci.

Čas, který jsem ztratil opožděným zprovoznění bateriového úložiště jsem se ale snažil využít co nejefektivněji, a zpracovával jsem data o energetickém systému budovy.

I přes zdržení se mi podařilo implementovat program k získávání dat o výkonu jednotlivých fotovoltaických polích a dat o příkonu budovy ze systému SCADA. Také jsem částečně implementoval program pro PLC Teco Foxtrot, které bude řídit bateriové úložiště. Tento algoritmus ovšem nebyl otestován, a proto není možné vyhodnotit jeho chování, ani ekonomickou návratnost.

Dále jsem navrhl, a vytvořil, webové rozhraní k prezentování získaných dat. Toto rozhraní se však nejspíš nebude používat, protože aktuální databáze má prostředky k vizualizaci dat. V přípravě je navíc nová databáze, která by měla data vizualizovat ještě lépe.

V prostředí Mosaic jsem pomocí nástroje WebMaker navrhl další webové rozhraní, kterým je možné sledovat stav budovy. Toto webové rozhraní je umístěno přímo v PLC, a zobrazuje údaj o správnosti přečtených dat z databáze, aktuální a maximální dovolený příkon budovy a akční zásah bateriového úložiště. Toto prostředí také možno použít k manuálnímu řízení akčního zásahu bateriového úložiště.

V budoucnu je možné program rozšířit o spolupráci se službou PV Forecast, díky které bude možné implementovat prediktivní řízení akumulátorového úložiště. Do prediktivního řízení je také možnost zahrnout změny cen elektrické energie, díky čemuž by akumulátorové úložiště k nabíjení používalo levnější elektřinu, čímž by se snížila doba návratnosti investice do tohoto úložiště. Dále by bylo vhodné příkon budovy získávat přímo z elektroměru, a ne zprostředkovaně ze systému SCADA.

Přílohy

Příloha A

Seznam zkratek

API - Application Programming Interface

CFC - Continuous Function Chart

CSMA/CD - Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection

DCE - Data Circuit-terminating Equipment

DOD - Depth of Discharge

DTE - Data Terminal Equipment

FBD - Function Block Diagram

HCPV - High Concentration Photovoltaics

IL - Instruction List

JSON - JavaScript Object Notation

LD - Ladder Diagram

LIFO - Last In First Out

NMC - Nickel Manganese Cobalt Oxide

PLC - Programmable Logic Controller

POU - Program Organisation Unit

SCADA - Supervisory Control And Data Acquisition

ST - Structured Text

UCEEB - Univerzitní Centrum Energeticky Efektivních Budov

Příloha B

Literatura

[1] SMETS Arno, JÄGER Klaus, ISABELLA Olindo, VAN SWAAIJ René, ZEMAN Miro. *Solar Energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems* [online]. Cambridge:UIT Cambridge, 2016. ISBN 978-1906860325. [cit. 22.4.2016]. Dostupné z: http://www.amazon.com/Solar-Energy-engineering-photovoltaic-technologies-ebook/dp/B0198VHPHM/

[2] MARTÍNEZ Mohedano, BERNABÉ Javier. *BATTERIES IN PV SYSTEMS*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2011. Bakalářská práce. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Eléctrica.

[3] International Renewable Energy Agency [online]. *RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIES - Solar Photovoltaics*. 2012. [cit 22.4.2016]. Dostupné z: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/RE_Technologies_Cost_Analysis-SOLAR_PV.pdf

[4] SLÁDEK Karel. *DIAGNOSTIKA PASIVAČNÍCH VRSTEV PRO KŘEMÍKOVÉ SOLÁRNÍ ČLÁNKY*. Brno: Vysoké Učení Technické v Brně, 2011. Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Fakulta Elektrotechniky a Komunikačních Technologií. Ústav Mikroelektroniky.

[5] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE [online]. *PHOTOVOLTAICS REPORT*. 2016. [cit. 22.4.2016]. Dostupné z: https://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/photovoltaics-report-in-englischer-sprache.pdf

[6] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE [online]. *Presseinformation - New world record for solar cell efficiency at 46%*. 2014. [cit. 22.4.2016]. Dostupné z: https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-and-media/

[7] SAHIN M. E. a OKUMUS H. I. Physical Structure, Electrical Design, Mathematical Modeling and Simulation of Solar Cells and Modules. In: *Turkish Journal of Electromechanics & Energy* [v tisku]. 2016. ISSN: Pending. [cit. 22.4.2016]. Dostupné z: https://www.academia.edu/24352082/Physical_Structure_Electrical_Design_Mathematical_Modeling_and_Simulation_of_Solar_Cells_and_Modules

[8] Which Solar Panels Are Most Efficient?. In: *The Eco Experts* [online]. The Eco Experts, 2016. [cit. 22.4.2016]. Dostupné z: http://www.theecoexperts.co.uk/which-solar-panels-are-most-efficient

[9] poly-and-mono-solar-cells. In: *Tindo Solar* [online]. 2016©Tindo Solar. [cit. 22.4.2016]. Dostupné z: http://www.tindosolar.com.au/poly-vs-mono-crystalline/

[10] Average daily electricity usage profile (residential and SME) versus system load. In: *Smart Meters* [online]. 2015©State Government of Victoria. [cit. 23.4.2016]. Dostupné z: http://www.smartmeters.vic.gov.au/about-smart-meters/reports-and-consultations/advanced-metering-infrastructure-customer-impacts-study-volume-1/executive-summary

[11] GLAIZE Christian, GENIES Silvie *Lithium Batteries and Other Electrochemical Storage Systems*, Wiley-ISTE. July 2013. ISBN: 978-1-84821-496-5

[12] MIT Electric Vehicle Team. *A Guide to Understanding Battery Specifications* [online] In: Massachusetts Institute of Technology. December 2008. [cit. 11.4.2016]. Dostupné z:http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf

[13] MANIMEKALAI P., HARIKUMAR R., RAGHAVAN S. An Overview of Batteries for Photovoltaic (PV) Systems. In: *International Journal of Computer Applications* [online]. Vol. 82 - No. 12, 28-32. ISBN: 973-93-80878-72-4. Dostupné z: http://www.ijcaonline.org/archives/volume82/number12

[14] A. Joseph and M. Shahidehpour. Battery storage systems in electric power systems. *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. Montreal, Que. 2006. pp. 1-8. doi: 10.1109/PES.2006.1709235. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1709235&isnumber=36065

[15] *BU-201: How does the Lead Acid Battery Work?* [online]. Cadex Electronics Inc. ©2003 - 2016 Cadex Electronics Inc.

[cit. 21.4.2016]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries

[16] *BU-203: Nickel-based Batteries* [online]. Cadex Electronics Inc. ©2003 - 2016 Cadex Electronics Inc. [cit. 21.4.2016]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/nickel_based_batteries

[17] *BU-204: How do Lithium Batteries Work?* [online]. Cadex Electronics Inc. ©2003 - 2016 Cadex Electronics Inc. [cit. 21.4.2016]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries

[18] Dostupné z: http://web.mit.edu/2.009/www/resources/mediaAndArticles/batteriesPrimer.pdf

[19] MATUŠKA Tomáš, MAŠČUCH Jakub, DYTRICH Jakub. *Energetický systém UCEEB* [online]. [cit. 10.4.2016]. Dostupné z: www.uceeb.cz/system/files/souboryredakce/energeticky_system.pdf

[20] SolarEdge [online]. *SolarEdge Monitoring Server API*. 2016. [cit. 10.4.2016]. Dostupné z: http://www.solaredge.com/files/pdfs/se_monitoring_api.pdf

[21] BMZ GmbH. *Energy Storage System ESS 3.0 Data Sheet*. 2015. [cit. 11.4.2016].

[22] Studer Innotec SA [online]. *Xtender, Unit combining inverter,battery charger and transfer system; User Manual*. 2015. [cit. 11.4.2016]. Dostupné z: http://www.studer-inno.com/en/downloads/xtender-series/

[23] Studer Innotec SA [online]. *Remote control and programming unit RCC-02 and RCC-03 for the Xtender; User Manual*. 2014. [cit. 11.4.2016]. Dostupné z: http://www.studer-inno.com/en/downloads/xtender-series/

[24] Studer Innotec SA [online]. *Communication module Xcom-232i; User Manual*. 2013. [cit. 11.4.2016]. Dostupné z: http://www.studer-inno.com/en/downloads/xtender-series/

[25] Texas Instruments[online]. *Controller Area Network Physical Layer Requirements*. 2008. [cit. 15.4.2016]. Dostupné z: http://www.ti.com/lit/an/slla270/slla270.pdf

[26] Texas Instruments[online]. *RS-422 and RS-485 Standards Overview and System Configurations*. 2002, revize 2010. [cit. 17.4.2016]. Dostupné z: http://www.ti.com/lit/an/slla070d/slla070d.pdf

[27] KOCOUREK Petr, NOVÁK Jiří. *Přenos informace*. ČVUT, Praha, 2006. ISBN 80-01-02892-5.

[28] HAASZ Vladimír, SEDLÁČEK Miloš. *Elektrická měření. Přístroje a metody*. ČVUT, Praha 2003 (2. vydání). ISBN 80-01-02731-7.

[29] *Projektová dokumentace - Stacionární bateriové úložiště pro micro-grid/smartgrid systém*

[30] JANKŮ Petr. *Regulace spotřeby 15' maxima - implementace algoritmů*. Praha: České Vysoké Učení Technické v Praze, 2012. Diplomová práce. České Vysoké Učení Technické v Praze. Fakulta Elektrotechnická. Katedra Měření.

[31] MAJDA František. Čtvrthodinové maximum. In: *ELEKTRO, časopis pro elektrotechniku*[online]. Vydavatel: FCC Pubish s.r.o. 2008. [cit. 6.5. 2016]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38165.pdf

[32] Teco a.s. [online]. TecoInfo - firemní občasník. Regulátory spotřeby. [cit. 6.5. 2016]. Dostupné z: http://www.edumat.cz/texty/spotreba_text.pdf

[33] Teco a.s. [online]. *Programování PLC podle normy IEC 61 131-3 v prostředí Mosaic*. 2007. cit. [15.5. 2016]. Dostupné z: http://www.edumat.cz/texty/Programovani_IEC61131-3.pdf

[34] KOVÁŘ Josef, PROKOPOVÁ Zuzana, ŠMEJKAL Ladislav. *Programování dle normy IEC 61 131* [online] [cit. 15.5. 2016]. Dostupné z: http://www.spszl.cz/soubory/plc/programovani_dle_normy_iec61131.pdf

[35] KOVÁŘ Josef, PROKOPOVÁ Zuzana, ŠMEJKAL Ladislav. *Programování PLC* [online] [cit. 15.5. 2016]. Dostupné z: http://www.spszl.cz/soubory/plc/programovani_dle_normy_iec61131.pdf

[36] Teco a.s. [online]. *Začínáme v prostředí Mosaic*. 2010. [cit. 22.5.2016]. Dostupné z: http://www.tecomat.com/wpimages/other/DOCS/cze/TXV00320_01_Mosaic_ProgStart_cz.pdf

[37] Teco a.s. [online]. *Knihovna InternetLib*. 2013. [cit. 18.5.2016]. Dostupné z: http://www.tecomat.com/wpimages/other/DOCS/cze/TXV00354_01_Mosaic_InternetLib_cz.pdf

[38] Teco a.s. [online]. *Knihovna ComLib*. 2013. [cit. 20.5.2016]. Dostupné z: http://www.tecomat.com/wpimages/other/DOCS/cze/TXV00351_01_Mosaic_ComLib_cz.pdf

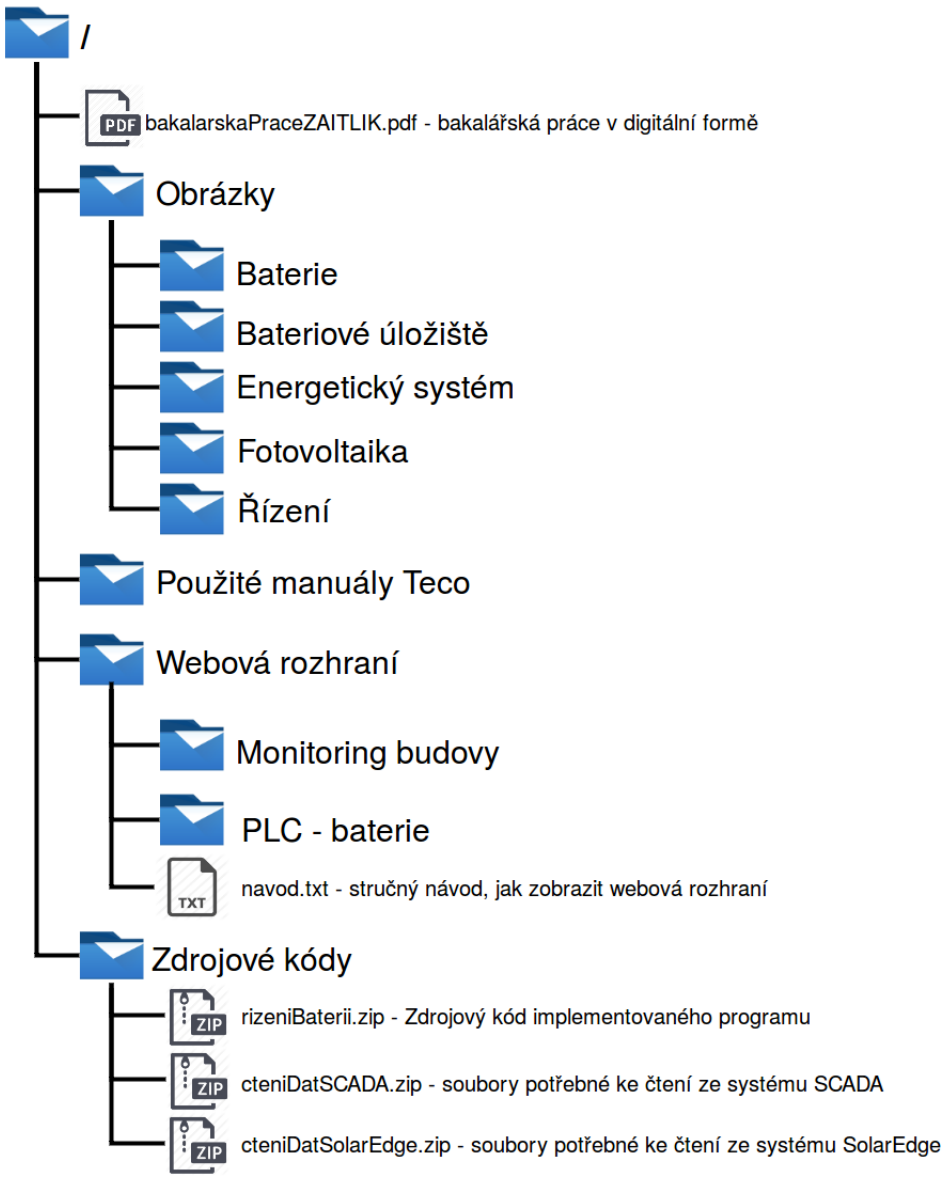
[39] Teco a.s. [online]. *REGULAČNÍ KNIHOVNY PRO MOSAIC*. 2008. [cit. 20.5.2016]. Dostupné z: http://www.tecomat.com/wpimages/other/DOCS/cze/TXV00323_01_Mosaic_RegoLib_cz.pdf

[40] Teco a.s. [online]. *Nástroj WebMaker*. 2013. [cit. 22.5.2016]. Dostupné z: http://www.tecomat.com/wpimages/other/DOCS/cze/TXV00328_01_Mosaic_WebMaker_cz.pdf

[41] Teco a.s. [online]. *Nástroj PanelMaker a PanelSIM*. 2008. [cit. 22.5.2016]. Dostupné z: http://www.tecomat.com/wpimages/other/DOCS/cze/TXV00325_01_Mosaic_PanelMaker_cz.pdf

Příloha C

Struktura přiloženého CD



České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra kybernetiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: David Ž a i t l í k

Studijní program: Kybernetika a robotika (bakalářský)

Obor: Robotika

Název tématu: Optimální řízení akumulátorového úložiště v budově

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s energetickou infrastrukturou budovy UCEEB, podrobně pak s instalovaným akumulátorovým systémem a možnostmi jeho řízení.
2. Seznamte se s návrhovým prostředím Mosaic pro PLC Foxtrot firmy Teco.
3. Definujte požadavky na řízení elektrické energie v budově (což může být např. řízení 1/4h maxim, nabíjení elektromobilu, predikce výroby FV zdroje a spotřeb, řízení provozu kogenerační jednotky), navrhněte a implementujte vhodný způsob řízení akumulátorového úložiště pro uvedené PLC.
4. Implementujte též vhodné vizuální rozhraní pro monitorování stavu provozu akumulátorového úložiště a energetické situace v budově.
5. Systém řízení otestujte, vyhodnoťte jeho chování a přínos po stránce technické i odhadovaných provozních nákladů.

Seznam odborné literatury:

[1] ASIF, S. Advanced Building Technologies for Sustainability. ISBN: 978-0-470-54603-1, 256 s., 2012.
[2] CHEN-CHING, L. Smart Grid Handbook. ISBN: 978-1-118-75548-8, 1900 s., 2016.
[3] GLAIZE Ch., GENIES, S. Lithium Batteries and other Electrochemical Storage Systems. ISBN: 978-1-84821-496-5, 384 s. Wiley-ISTE, 2013.
[4] Programování PLC podle normy IEC 61 131-3 v prostředí Mosaic. [online]. 15.01.2016. http://www.tecomat.com/index.php?ID=318
[5] STANĚK, K. Fotovoltaika pro budovy. Grada. Praha, 2012.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Wolf, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

prof. Dr. Ing. Jan Kybic
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 15. 1. 2016