

ALGORITMY PRO ŘÍZENÍ LiFePO_4 BATERIÍ

Luděk Špaček

Sekce - MECHATRONIKA

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, 3. ročník

Bakalářský studijní program – ELEKTRONICKÉ INFORMAČNÍ A ŘÍDICÍ SYSTÉMY

Abstrakt: Stále zvyšující se kvalita baterií a jejich snižující se cena způsobuje zvýšenou poptávku po budování stacionárních úložišť. Tato práce se zabývá řízením článků baterie pro stacionární úložiště energie využívající LiFePO_4 technologii. V úvodu práce je čtenář seznámen s problematikou baterie s LiFePO_4 články a jejím řízením. V praktické části jsou navrženy algoritmy pro balancování článků na úroveň nabití a vybití, které jsou zde popsány. Na reálném hardwaru testovány a v závěru práce vyhodnoceny. Vybrané algoritmy byly zapracovány do funkčního bloku, který realizuje funkci Battery Management Systemu.

Klíčová slova: Baterie, Článek, Battery Management System, Algoritmus, Balancování, Stacionární, Úložiště

1 Úvod

S rozvojem elektromobility dochází k značnému pokroku v technologiích elektrochemického ukládání energie. Stále zvyšující se kvalita baterií a jejich snižující se cena způsobuje zvýšenou poptávku po budování stacionárních úložišť. Jedním z hlavních odvětví, ve kterém jsou stále více využívána stacionární úložiště, je fotovoltaický systém rodinných domů nebo firem. Nadbytečná elektrická energie z fotovoltaických panelů je ukládána do baterií, aby bylo poté možné využít energii v situacích, kdy panely již nedodávají energii, nebo jejich energie není dostatečná pro pokrytí spotřeby.

2 Teoretická část

1.1 Baterie

Typická baterie je složena z několika článků zapojených paralelně nebo v sérii, aby mohla poskytovat požadovaný výkon. Při navrhování bateriového úložiště je nutné brát v potaz provozní napětí a špičkový proud, které baterie musí zvládat. Pro zvýšení napětí baterie se jednotlivé články řadí sériově. Výsledné napětí je poté dáno součtem napětí jednotlivých článků. Naopak při požadavku na velký proudový odběr je nutné zvýšit náboj (kapacitu) a tím i povolený maximální výstupní proud zapojením článků paralelně. Kapacita a proud baterie jsou poté dány součtem kapacit a proudů jednotlivých článků.

Větší baterie jsou často modulární. To znamená, že baterie je při návrhu rozdělena na menší části, tzv. moduly. Jedná se o malé skupiny článků, které jsou různě paralelně a sériově zapojeny. Tyto moduly jsou pak mezi sebou spojeny. Při stejných vlastnostech všech článků mají všechny moduly o stejném počtu článků stejný výkon. To ale neodpovídá skutečnosti, jelikož každý článek baterie se vždy svými vlastnostmi liší. Proto se využívají nejrozumnější topologie. [1]

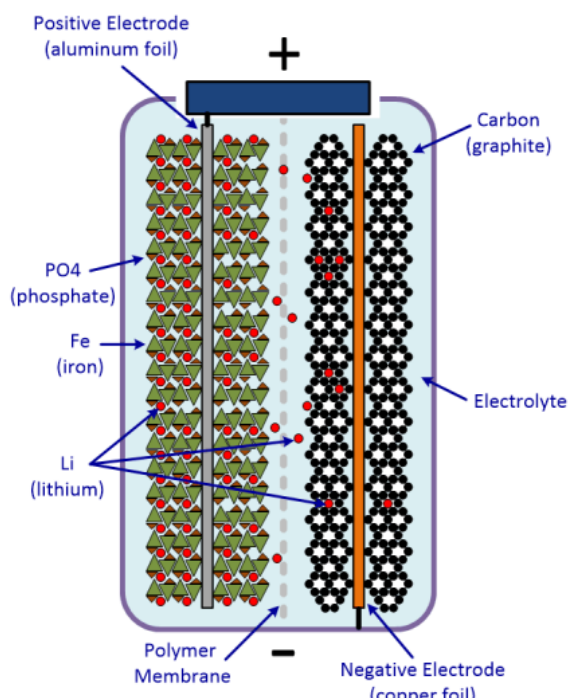
1.2 LiFePO_4

Lithium-železo-fosfátový akumulátor byl objeven v roce 1994 na Univerzitě v Texasu. Jak už název napovídá, katoda je vyrobena z železo-fosfátu, anoda je vyrobena z grafitového uhlíku. Díky materiálu katody jsou výrobní náklady těchto článků nízké a jsou zcela netoxické. Jedna z hlavních výhod vůči ostatním Li-iontovým článkům je i jejich možnost dodávat velmi vysoké proudy. Některé články jsou schopny dodat až 40 C. Výhodou je i bezpečnost, články totiž při extrémních teplotách nevybuchují. Nicméně mají nižší hustotu energie a také nižší napětí. [2]

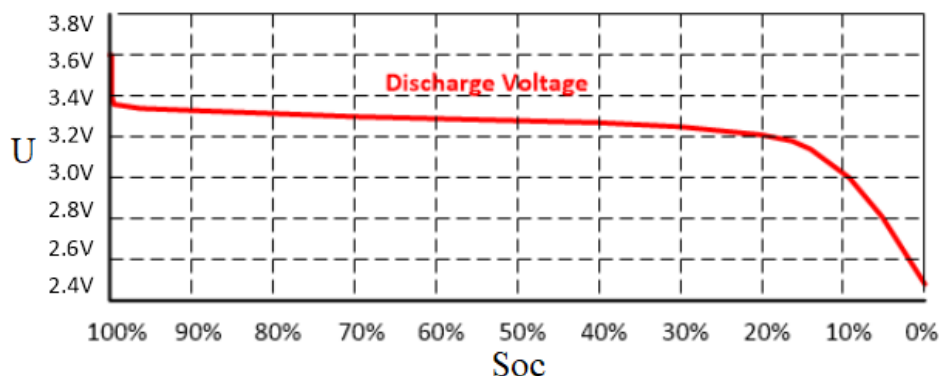
Tabulka 1. Vlastnosti LiFePO₄ článků [2]

Napětí	3,20 V 3,30 V nominální; typický provozní rozsah 2,5–3,65 V / článek
Měrná energie (kapacita)	90–120 Wh / kg
Nabíjecí proud (C)	Typicky 1 C
Vybíjecí proud (C)	1 C, pro některé buňky i 25 C
Životnost (v cyklech)	2000 a vyšší (vztahující se k hloubce výboje, teplotě)
Aplikace	Přenosné a stacionární úložiště, vyžadující vysoké zátěžové proudy.

Vnitřní struktura LiFePO₄ článku je vidět na Obrázku 1. Na levé straně je umístěná kladná elektroda z železo-fosfátu a na pravé straně záporná elektroda z grafitového uhlíku. Mezi elektrodami je umístěná membrána z polymeru s malými póry pro průchod iontů lithia. Železo s fosfátem tvoří mřížku, která zachycuje ionty lithia, ty jsou na obrázku vyznačeny červenými tečkami. Stejnou funkci plní i na druhé straně uhlíková mřížka. Při nabíjení článku se ionty lithia přemísťují z kladné železo-fosfátové elektrody přes membránu na zápornou uhlíkovou elektrodu. Pro vybíjení dochází k opačnému přenosu iontů lithia ze záporné uhlíkové elektrody na kladnou železo-fosfát elektrodu. [3, 4, 5]

Obrázek 1. Vnitřní struktura LiFePO₄ článku [5]

Při vybíjení LiFePO₄ článků je úroveň napětí od 95 % do 30 % SOC článku blízko úrovni nominálního napětí 3,3 V nebo 3,2 V (podle výrobce). Zatímco v aplikacích je tento jev vítán, určování stavu nabití podle naměřeného napětí je zásluhou toho velmi nepřesné a je nutné používat Coulombovu metodu. Podle hloubky vybití článku lze ovlivňovat jeho životnost. Při vybíjení článku na 30 % jeho kapacity lze docílit prodloužení životnosti až o 1/3 cyklů a při vybíjení do 50 % dokonce až na trojnásobek cyklů, než při běžném 100 % cyklování. [5]



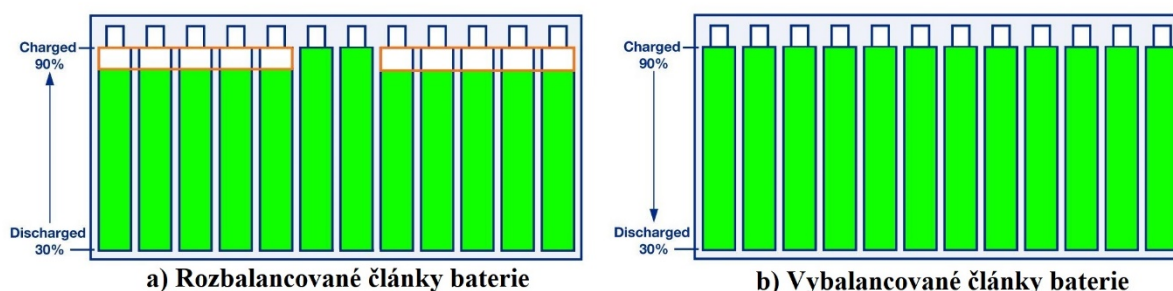
Obrázek 2. Vybíjecí charakteristika LiFePO_4 článku [5]

1.3 Battery Management System

Battery Management System slouží k hlídání správného chodu baterie a hlavně k její ochraně před zničením. Hardwarová část se skládá z elektronických obvodů zajišťujících bezpečnost baterie a z měřících obvodů které měří teplotu a napětí jednotlivých článků baterie a dodávaný či odebíraný proud. Softwarová část pracuje s naměřenými daty a dává uživateli zpětnou vazbu o stavu baterií. Zároveň podle potřeby a stavu baterie upravuje vyráběný či dodávaný výkon. [1]

1.4 Balancování

Při používání lithiových baterií dochází k rozbalancování jednotlivých článků, to způsobí, že každý článek poté disponuje odlišným nábojem. Pokud nedojde k vybalancování článků, baterie nedodá svoji jmenovitou kapacitu, jelikož se všechny články nenabijí nebo nevybijí na maximální hodnotu. Nebo není-li správně ošetřena baterie, může dojít k ničení článku nebo celé baterie vlivem přebíjení nebo podbíjení. Lithiové články disponují velice plochou charakteristikou, odhadování náboje v člancích podle naměřeného napětí je tedy velmi složité. Z Obrázku 2. lze pozorovat, že při nízkém a vysokém SOC je nárůst/pokles napětí vysoký a je tedy vhodné balancovat podle napětí na hranici nabití nebo na hranici vybití článků. [6]



Obrázek 3. Princip balancování článků [7]

- **Pasivní balancování**

Nejjednodušší a zároveň nejlevnější metodou balancování článku je metoda pasivní. Pasivní balancování je nejčastěji realizováno pomocí paralelně zapojených rezistorů, které jsou pomocí tranzistorů připojovány/odpojovány k článku baterie. Přebytný náboj je poté přeměněn na teplo, u větších baterií je z tohoto důvodu vyžadováno externí chlazení. [6]

- **Aktivní balancování**

Aktivní balancování přebytečnou energii z článků s větším nábojem nepřeměňuje na teplo, ale využívá ji pro zvýšení náboje ostatních článků. Aktivní metoda balancování využívá složitější obvody a řídicí elektroniku. Jedna z metod aktivního balancování je balancování s využitím kondenzátoru. Článek s vyšším nábojem nabije kondenzátor, který pak předává svůj náboj článku s nižším nábojem. Tento princip je efektivní, ale také pomalý. Pro rychlejší reakce se využívají obvody s transformátory. [8]

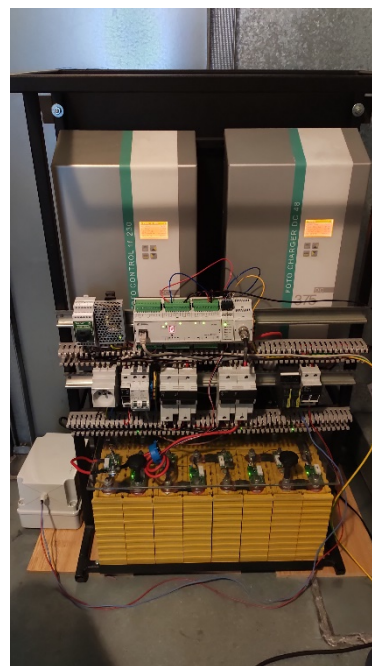
3 Praktická část

Testování algoritmů bylo prováděno na sestavě, kterou mi poskytla firma Teco a.s. Algoritmy jsou testovány pro funkční blok, který má plnit hlavní úkoly Battery Management Systému. Tedy zabezpečit co nejdelší životnost a bezpečný provoz baterie, detekovat nebezpečné situace a správně na ně reagovat, například odpojením baterie od zátěže po jejím vybití.

2.1 Hardware

Testování navržených algoritmů bylo provedeno na LiFePO₄ člancích o kapacitě 90 Ah od společnosti Winston. Baterii tvoří šestnáct těchto článků zapojených do série o celkovém jmenovitém napětí 51,2 V a celkovém výkonu 4608 Wh. Ke každému článku byl paralelně zapojen modul B-BM-0201X pro snímání napětí, teploty a balancování článků. Každý z těchto modulů je propojen sériovou komunikací do mastera C-BM-0202M, který řídí komunikaci se slave moduly a pomocí analogového vstupu pro Hallovu sondu měří elektrický proud, který je do baterie dodáván nebo z ní odebírán. Všechna tato data posílá po CIB sběrnici do centrální jednotky CP-1000, která se stará o řízení celé soustavy.

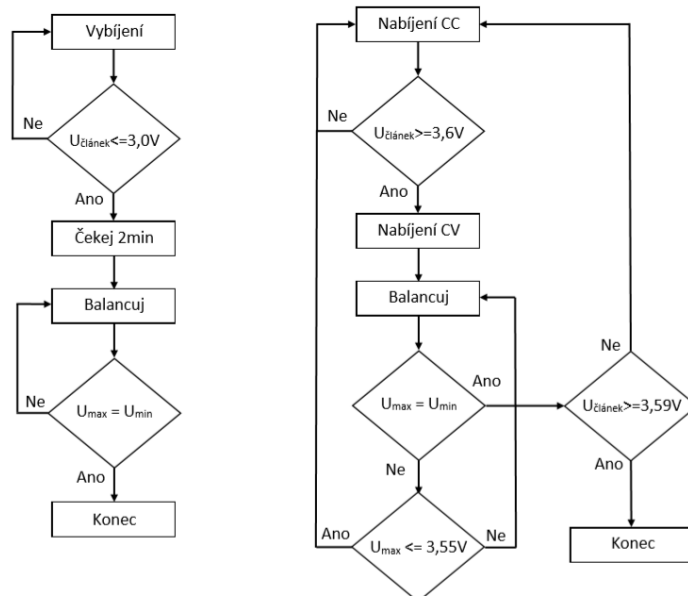
Sestava byla navržena pro hybridní nebo ostrovní fotovoltaický systém, o nabíjení baterií se stará zařízení VONSCH FOTO CHARGER DC 48, vpravo na Obrázku 4. Jedná se o DC/DC měnič, který mění vstupní elektrické napětí z fotovoltaických panelů na nabíjecí napětí baterie. Měnič disponuje funkcí MPPT, která zaručuje, že se fotovoltaické panely pohybují v pracovním bodě s maximálním výkonem, čímž zajišťuje maximální možnou účinnost. Vybíjení baterií obstarává zařízení VONSCH FOTO CONTROL 1f 230/48DC, vlevo na Obrázku 4. Tento DC/AC měnič se stará o převod stejnosměrného napětí baterie na jednofázové napětí 230 V o frekvenci 50 Hz. Oba měniče jsou pomocí rozhraní RS-485 spojeny s centrální jednotkou CP-1000 a probíhá mezi nimi komunikace protokolem ModBUS. Při testování nebyly baterie nabíjeny pomocí fotovoltaických panelů, ale výkon panelů pro DC/DC měnič byl simulován pomocí autotransformátoru, jehož výstupní napětí bylo poté usměrněno. Pro vybíjení byl na výstup střídače měniče zapojen přímotop.



Obrázek 4. Hardware pro testování algoritmů

Algoritmy

Jak bylo popsáno v kapitole 1.4 Balancování, pro balancování LiFePO_4 článků podle naměřeného napětí na elektrodách, je vhodné zvolit krajní meze cyklu baterie, při kterých dochází v závislosti na změně stavu nabití k nejvyšší změně napětí. Balancování je tedy prováděno na úroveň vybití a na úroveň nabití. Pro zkrácení doby balancování na úroveň nabití byly navrženy ještě dva doplňující algoritmy, které mají pomoci ke zrychlení balancování. Všechny navržené algoritmy byly testovány při pasivním balancování.



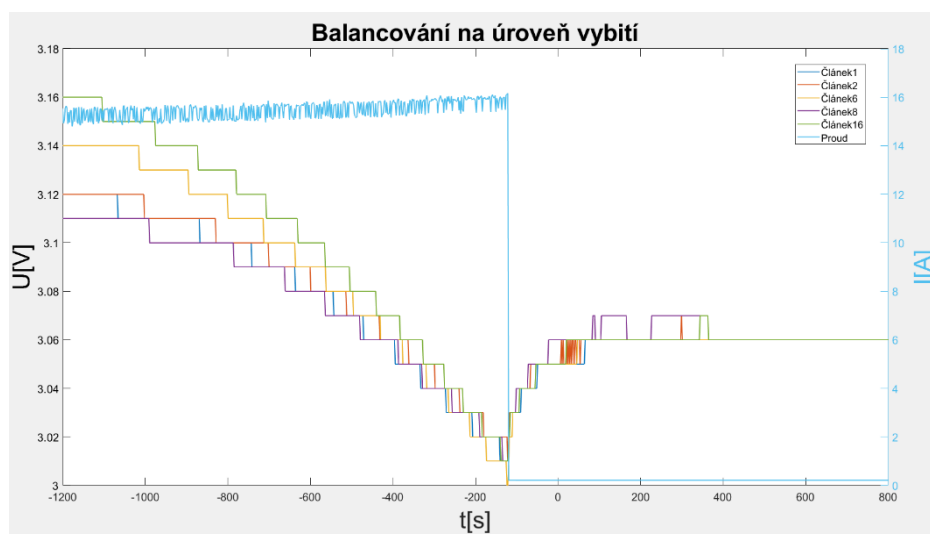
a) balancování na úroveň vybití

b) balancování na úroveň nabití

Obrázek 5. Algoritmy balancování na úroveň vybití a nabití

2.1.1. Balancování na úroveň vybití

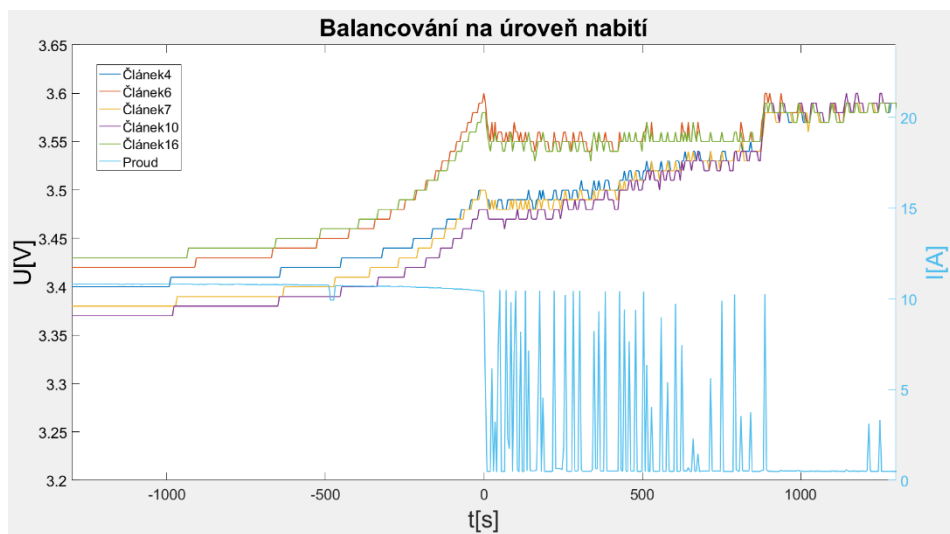
Baterie je vybita, dokud některý z článků nedosáhne minimální povolené hodnoty napětí. Po vybití systém čeká 2 minuty, během kterých dochází k elektrochemickým procesům v baterii a napětí článků mírně vzroste. Následně jsou pomocí paralelně zapojeného odporu články s vyšším napětím, než je hodnota nejnižšího napětí článku, vybity, a dochází k vyrovnání jejich napětí. Průběh balancování lze vidět na Obrázku 6.



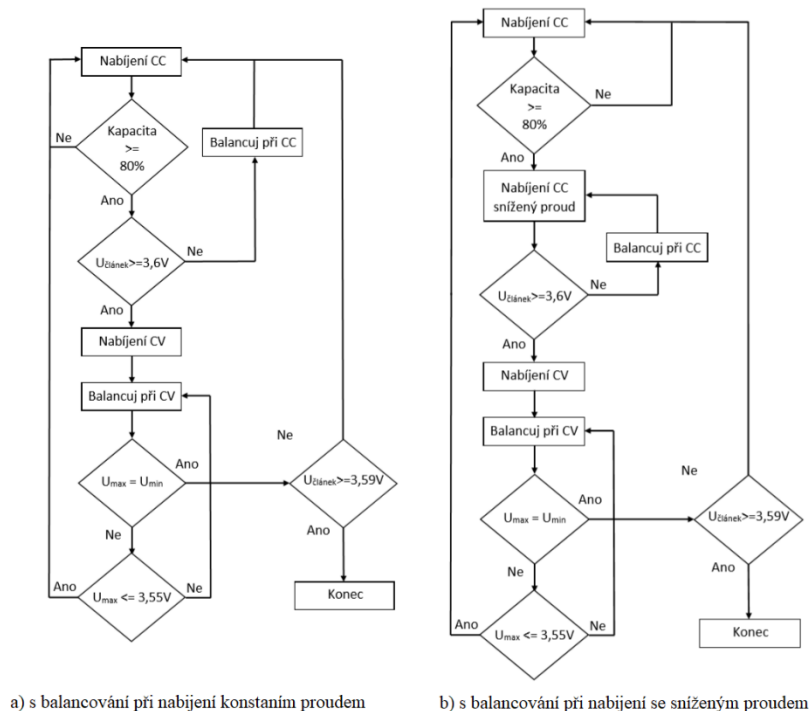
Obrázek 6. Graf balancování na úroveň vybití

2.1.2. Balancování na úroveň nabití

Jak je znázorněno na Obrázku 7. baterie je nabíjena konstantním proudem, dokud jeden z článků nedosáhne maximálního povoleného napětí, v tomto případě dochází k přechodu do nabíjení konstantním napětím. Nabíjecí proud baterie klesá a napětí je měničem udržováno na konstantní hodnotě. Na testovaném hardwaru je možné udržování konstantního napětí pouze celé baterie. Při dosažení maximálního napětí jednoho z článků baterie neodpovídá hodnota napětí baterie maximální možné hodnotě a při balancování by články vlivem rozbalancování byly balancovány na nižší hodnotu, než je nastavená hodnota 3,6 V. Z toho důvodu je po poklesu napětí článku s nejvyšší hodnotou na hodnotu 3,55 V nebo dojde-li k vybalancování článků na nižší úroveň nežli 3,6 V, znovu umožněno nabíjení baterie mimo režim konstantního napětí.



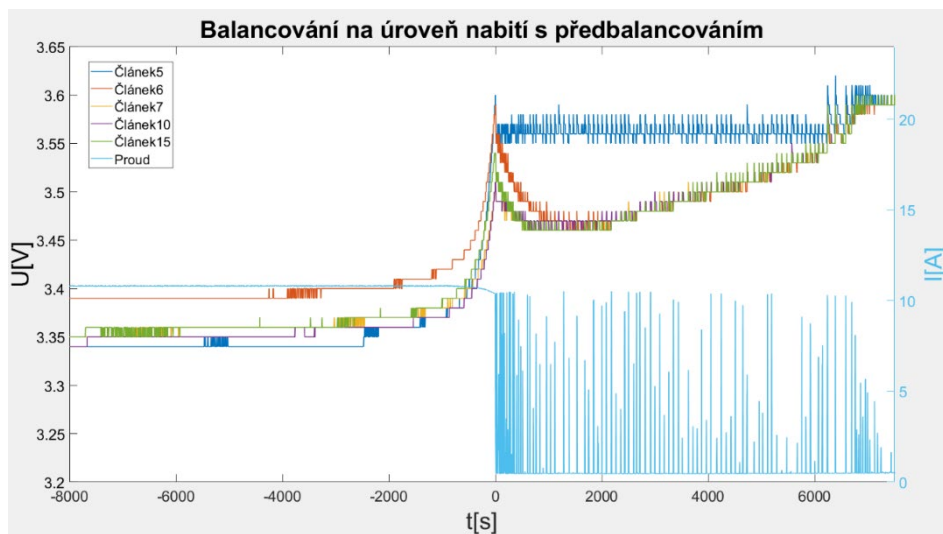
Obrázek 7. Graf balancování na úroveň nabití



Obrázek 8. Algoritmy balancování s předbalancováním

2.1.3. Balancování na úroveň nabití s balancováním při nabíjení

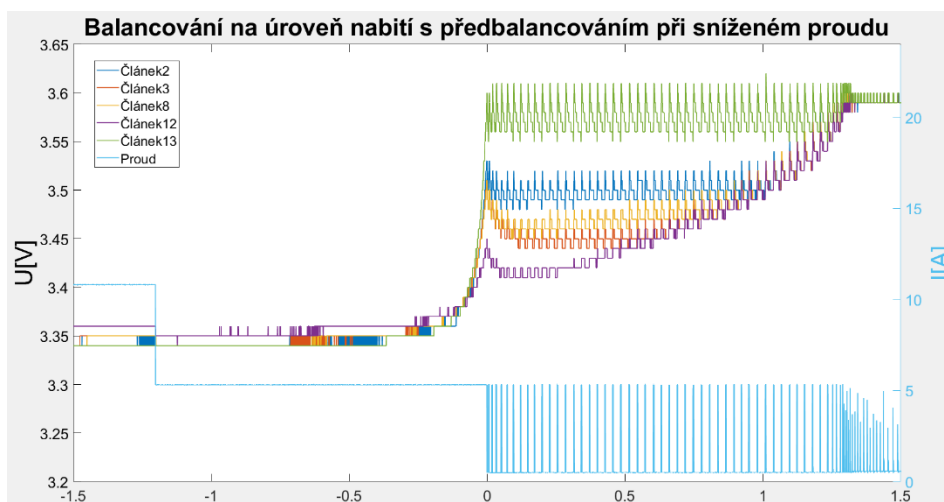
Pro zkrácení doby balancování na úroveň nabití byl navržen algoritmus, který vychází z předchozího algoritmu, ten je ale doplněn o balancování v průběhu nabíjení konstantním proudem. Překročí-li článek hranici 80 % své kapacity a jeho napětí je vyšší než napětí článku s nejnižší hodnotou, centrální jednotka vyšle informaci a dojde k balancování článku. Při nabíjení je velikost napětí článků ovlivněna vnitřním odporem ($U_{\text{cell}} = U_{\text{ovc}} + R_i \cdot I$), který zvyšuje napětí baterie. Článek, který je balancován, nemusí mít větší napětí způsobené větším akumulovaným nábojem, ale může mít jen větší vnitřní odpor a místo k balancování článků tak může docházet k rozbalancování. K tomuto jevu může docházet hlavně u nabíjení při vyšších proudech. Celý algoritmus je zobrazen na Obrázku 8.



Obrázek 9. Graf balancování na úroveň nabití s předbalancováním

2.1.4. Balancování na úroveň nabití s balancováním při nabíjení sníženým proudem

Se snahou předejít rozbalancování při balancování v průběhu nabíjení, byl předchozí algoritmus upraven tak, že při dosažení hranice 80 % kapacity dochází k balancování článku, ale zároveň dochází ke snížení nabíjecího proudu, čímž klesá napětí způsobené vnitřním odporem článků baterie a snížení pravděpodobnosti nechtěného rozbalancování. Graficky znázorněný algoritmus a průběh balancování lze vidět na Obrázku 8 a na Obrázku 10.



Obrázek 10. Graf balancování na úroveň nabití s předbalancováním 2

2.2 Měření

2.2.1. Podmínky měření

Při testování navržených algoritmů byl využit výše popsáný hardware. Na vstup FOTO CHARGER 48 DC byl místo fotovoltaických panelů připojen autotransformátor, jehož výstup byl usměrňovačem přeměněn na stejnosměrný proud. Z důvodů maximálního povoleného zatížení využívaného usměrňovače byl maximální nabíjecí proud omezen na 11 A. Pro vybíjení baterie byl na výstup FOTO CONTROL 1f 230/48 DC připojen přímotop s maximálním odběrem 25 A.

2.2.2. Provedená měření

Naměřená data odpovídají balancování po jednom cyklu baterie. Baterie byla při realizaci balancování na úroveň vybití nejdříve vybalancována na úroveň vybití, poté byla nabita a v poslední řadě byla vybita a znovu balancována. Opačný postup platil u realizace balancování na úroveň nabití, baterie byla nabita a vybalancována, poté vybita a znovu nabita a balancována podle zvoleného algoritmu.

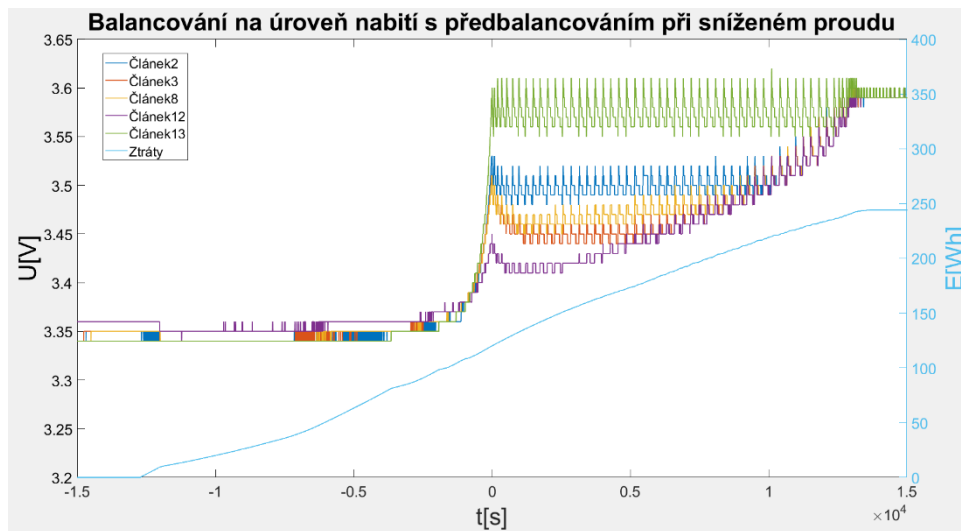
Tabulka 2. Naměřená data

Měření	Doba nabíjení/vybíjení	Doba balancování	Celková doba	Ztráty [Wh]
1	5h 40m 14s	6m 11s	5h 48min 25s	1,21
2	3h 20m 42s	3m 33s	3h 24m 15s	1,53
3	18h 47m 4s	33m 26s	19h 20min 30s	21,4
4	8h 43m 28s	21m 25s	9h 4m 52s	13,8
5	8h 43m 23s	2h 0m 21s	10h 43m 44s	146,4
6	10h 31m 33s	3h 46m 56s	14h 18m 30s	244,2

V Tabulce 2. lze pozorovat hodnoty jednotlivých měření. Měření 1 a 2 představují balancování na úroveň vybití. Při měření 1 bylo vybíjení baterie prováděno proudem 15 A, u měření 2 byl nabíjecí proud 25 A. Měření 3 a 4 jsou algoritmy balancování na úroveň nabití s balancováním při nabíjení konstantním napětím. U měření 3 byl nabíjecí proud 5,5 A, u měření 4 byl nabíjecí proud 11 A. Poslední dvě měření jsou algoritmy balancování na úroveň nabití s předbalancováním. Měření 5 je algoritmus s balancováním po dosažení 80 % kapacity při nabíjecím proudu 11 A. Měření 6 je algoritmus s balancováním po dosažení 80 % kapacity se sníženým proudem. Po dosažení 80 % kapacity byl nabíjecí proud snížen z 11 A na polovinu (5,5 A). Měření bylo u každého algoritmu provedeno třikrát a do tabulky byla zanesena průměrná hodnota naměřených dat.

2.2.3. Zhodnocení měření

Při testování algoritmů byl dán důraz na dobu potřebnou k vybalancování a na ztráty energie při balancování článků, která se měnila přes paralelně připojený odpor na teplo. Na Obrázku 11. je zobrazen průběh ztrát energie v závislosti na čase u algoritmu balancování na úroveň nabití s balancováním od 80 % kapacity baterie při nabíjení se sníženým proudem. Na grafu lze také sledovat vývoj balancování článků.



Obrázek 11. Graf ztrát energie balancováním

Z naměřených dat můžeme konstatovat, že nejlepším z navržených algoritmů pro použitý hardware s pasivním balancováním je algoritmus balancování na úroveň vybití. Doba balancování se pohybuje okolo 5 min, zásluhou toho dosahují ztráty energie hodnoty menší než 2 Wh na cyklus. K nízkým ztrátám pomáhá i hodnota napětí článků na úrovni vybití a nulový proud. U vybití 15 A lze pozorovat větší ztráty, ale kratší čas balancování než u vybití proudem 25 A. U vybití nižším proudem nedošlo k rozbalancování tolika článků, ale jednotlivé články měly větší rozdíly náboje, tím pádem trvalo delší dobu jejich vybalancování. Jelikož ale bylo balancováno méně článků, hodnota energie přeměněné na teplo byla i přesto menší.

Balancování na úroveň nabití trvalo mezi 20-35 minutami v závislosti na nabíjecím proudem. Při nabíjení vyšším proudem 11 A nedošlo k takovému rozbalancování baterie a balancování probíhalo rychleji a tedy i s nižšími ztrátami.

U navržených algoritmů s předbalancováním, pro rychlejší balancování, nedošlo k rychlejšímu balancování, ale k rozbalancování, které způsobil vnitřní odpor článků ($U_{\text{cell}} = U_{\text{ovc}} + R_i \cdot I$). Tím se zvýšila doba balancování i ztráty. Jak se ukázalo i u prvního algoritmu balancování na úroveň nabití při nabíjení nižším proudem, nedošlo k menšímu rozbalancování, ale naopak k většímu. Zároveň zásluhou nižšího nabíjecího proudu došlo k prodloužení doby nabíjení a tedy i delší době balancování a tím i k vysokým ztrátám.

Využití pasivního balancování je tedy dobré pro aplikace, které umožňují balancování na úroveň vybití. Příkladem mohou být hybridní fotovoltaické systémy. Kde je přes den baterie nabíjena přebytečnou energií z fotovoltaický panelů a ve večerních hodinách je nahromaděná energie spotřebou domácnosti vybita. Přes noční hodiny je ponechána na úrovni vybití a je tedy možné ji balancovat.

Možné je i využití pro aplikace typu UPS a balancování na úroveň nabití. Nepochází tak k vysokým ztrátám. Pokud bude systém využíván občasně, ztráty balancováním nemusí být tak velké a jednodušší a levnější pasivní balancování může být dostačující.

Pasivní balancování při nabíjení se ukázalo jako nevhodné a výsledné hodnoty ukazují, že se jedná o neefektivní algoritmus balancování. Chce-li ale uživatel balancovat baterie při nabíjení, měl by využít aktivní balancování, kde je snaha o zamezení ztrát a nadbytečný náboj z článku je předán článkům s nižší hodnotou náboje. Pro balancování článků během nabíjení je možné využít také balancování podle vypočtené hodnoty SOC (stavu nabití). Tato technika ale vyžaduje sofistikované výpočty a je vhodná především pro aplikace využívající umělou inteligenci.

4 Závěr

Z výsledků měření bylo usouzeno, že pro zvolený hardware s pasivním balancováním bylo nejvhodnější balancování na úroveň vybití. Při tomto algoritmu byla baterie vybalancována nejrychleji a s nejmenšími ztrátami. Balancování na úroveň nabití při nabíjení konstantním napětím trvalo výrazně déle a mělo vyšší ztráty. Pro baterie, které nejsou využívány na denní bázi, může být zvolený algoritmus dostačující. Navržené algoritmy s balancováním při nabíjení konstantním proudem pro balancování na úroveň nabití nesplnily svoji funkci. Články se při nabíjení konstantním proudem rozbalancovaly a prodloužila se tak doba balancování.

Vybrané algoritmy byly doplněny do funkčního bloku sloužícího jako Battery Management System pro řízení baterie pomocí centrální jednotky CP-1000 od firmy Teco, který byl zhotoven při realizaci měření. Funkční blok byl při testování algoritmu otestován a je připraven pro testování v reálném hybridním fotovoltaickém systému.

Literatura

- [1] G. L. PLETT, Battery management systems. Volume II, Equivalent-circuit methods, Boston: Artech House, 2016.
- [2] „Types of Lithium-ion,“ Cadex Electronics Inc., 10 7 2019. [Online]. Dostupné na: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion.
- [3] C. D. Ranh a C.-Y. WANG, Battery systems engineering, Chichester: Wiley, 2013.
- [4] Redakce, „cnews.cz,“ Mladá fronta a. s., 15 4 2011. [Online]. Dostupné na: <https://www.cnews.cz/li-ion-baterie-principy-provoz-rady-1-cast/>
- [5] R. Beckers, „Solacity,“ Solacity Inc. , [Online]. Dostupné na: <https://www.solacity.com/how-to-keep-lifepo4-lithium-ion-batteries-happy/>
- [6] K. Scott a S. Nork, „Passive Battery Cell Balancing,“ Analog Devices, [Online]. Dostupné na: <https://www.analog.com/en/technical-articles/passive-battery-cell-balancing.html>.
- [7] J. Fröde, „Aktivní balancer baterií,“ HW server s.r.o, 12 3 2019. [Online]. Available: <https://vyvoj.hw.cz/aktivni-balancer-baterii.html>.
- [8] K. Scott a S. Nork, „Active Battery Cell Balancing,“ Analog Devices, [Online]. Dostupné na: <https://www.analog.com/en/technical-articles/active-battery-cell-balancing.html>.