

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Eliminace zpětných vlivů OZE s využitím akumulace
Elimination of Back Influences of Renewable Sources with
Using Storage Devices

2015

Martin Zatloukal

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Zatloukal**

Studijní program: B2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika

Téma: **Eliminace zpětných vlivů OZE s využitím akumulace**
Elimination of Back Influences of Renewable Sources with Using
Storage Devices

Zásady pro vypracování:

1. Definice zpětných vlivů OZE na distribuční soustavu
2. Možnosti akumulace elektrické energie
3. Návrh způsobu řešení eliminace zpětných vlivů s využitím akumulace elektrické energie
4. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Cenek, M. a kol.: Obnovitelné zdroje energie, 2. upr. a dopln. vydání, Praha, FCC Public 2001, ISBN 80-901985-8-9
- [2] Štekl, J.: Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice, Praha 2003
- [3] Toman, P., Mišák, S., Drápela, J.: Provoz distribučních soustav, ČVUT, 2011, ISBN 978-80-01-04935-8
- [4] Mastný, P., Mišák, S., Drápela, J.: Obnovitelné zdroje energie, mČVUT, 2011, ISBN 978-80-01-04937-2
- [5] Mišák, S., Prokop, L, Sikora, T.: Provoz větrných elektráren s měniči frekvence, časopis ELEKTRO 10/2008

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

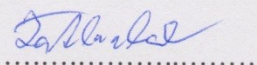


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 3. května 2015



.....
Martin Zatloukal

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval panu doc. Ing. Stanislavu Mišákovi, Ph. D. za odbornou pomoc a poskytnuté rady při vytváření mé bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval Ing. Jakubovi Vrambovi za konzultace při psaní této bakalářské práce.

Abstrakt

V této bakalářské práci jsou popsány zpětné vlivy obnovitelných zdrojů, především fotovoltaických elektráren, na distribuční soustavu. Cílem práce je tyto zpětné vlivy eliminovat a to s použitím akumulačního zařízení elektrické energie. Především se jedná o akumulaci elektrické energie pomocí akumulátorů. V první kapitole jsou definovány negativní zpětné vlivy, kterými může fotovoltaická elektrárna působit na distribuční soustavu, také jsou zde uvedeny požadavky na kvalitu elektrické energie z hlediska jednotlivých parametrů. Další kapitola je věnována akumulaci elektrické energie, především pomocí akumulátorů. Jsou zde popsány i nejčastěji používané baterie a jejich výhody či nevýhody pro jednotlivé typy akumulací. Poslední kapitola je věnována eliminaci zpětných vlivů pomocí akumulačního zařízení. Popisovány jsou zde dva druhy akumulací a to výkonová a energetická akumulace s případným řešením výkonové bilance v místě připojení fotovoltaické elektrárny do sítě. V závěru práce je provedeno zhodnocení, s následným doporučením použití jednotlivých typů akumulátorů pro daný způsob akumulace.

Klíčová slova

akumulace elektrické energie; flickr; fotovoltaická elektrárna; zpětné vlivy obnovitelných zdrojů

Abstract

This bachelor thesis deals with the back influences of renewable sources, especially photovoltaic power plants, on the distribution system. The aim of this work is to eliminate these back influences by using an accumulative device of electric power. It primarily covers the accumulation of electric power via accumulators. The first chapter defines the negative back influences by which the photovoltaic power plant can affect the distribution system. It also defines the requirements on quality of electric power from the perspective of the individual parameters. The next chapter is dedicated to accumulation of electric power, especially via accumulators. The most used batteries and their advantages and disadvantages for the individual types of accumulations are being described here. This entails two types of accumulations, namely output and energetic accumulation with potential output balance solution of the access point of the photovoltaic power plant into the system. The summary of the paper provides an evaluation with subsequent recommendation of usage of the individual types of accumulators for the given type of accumulation.

Key words

storage of electricity; flicker; photovoltaic power plant; back influences of renewable sources

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
C	(F)	Kapacita
$\cos\varphi$	(-)	Účinit
E	(J)	Energie (uložena v kondenzátoru)
k_{k1nn}	(-)	Zkratový poměr výkonů pro výroby s předávacím místem v síti nízkého napětí
k_{k1vn}	(-)	Zkratový poměr výkonů pro výroby s předávacím místem v síti vysokého napětí
nn	(V)	Nízké napětí
P_{bat}	(W)	Výkon akumulárního zařízení (baterie)
P_{lt}	(-)	Dlouhodobá (long term) míra vjemu flikru
P_{st}	(-)	Krátkodobá (short term) míra vjemu flikru
S_{kv}	(V · A)	Zkratový výkon v přípojném bodu
U	(V)	Napětí
U_n	(V)	Jmenovité napětí
vn	(V)	Vysoké napětí
ΔU	(V)	Úbytek napětí
$\Delta U_{nn, 110}$	(V)	Úbytek napětí (na hladině nízkého napětí nebo 110 kV)
ΔU_{vn}	(V)	Úbytek napětí (na hladině vysokého napětí)
ΣS_{Amax}	(V · A)	Součet maximálních zdánlivých výkonů všech připojených/ plánovaných výroben
P_{FEV}	(W)	Činný výkon fotovoltaické elektrárny
P_{DS}	(W)	Výkon dodávaný do distribuční sítě

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
apod.	a podobně
ČSN	Česká technická norma
DS	Distribuční síť
FVE	Fotovoltaická elektrárna
LiFePO4	Lithium-železo-fosfátový akumulátor
Li-Ion	Lithium-iontový akumulátor
Li-pol	Lithium-polymerový akumulátor
např.	například
PCC	Point of common coupling (společný napájecí bod)
PDS	Provozovatel distribuční soustavy
popř.	po případě
PPDS	Pravidla provozování distribuční soustavy
PQ	diagram činného a jalového výkonu
tj.	to jest

Seznam obrázků

<i>Obr. 1.1 Průběh dlouhodobého flikru</i>	3
<i>Obr. 1.2 Změny napětí v místě připojení FVE</i>	5
<i>Obr. 1.3 Změna napětí na vývodu vedení v rozvodně 22 kV, do níž je vyveden výkon z FVE</i>	8
<i>Obr. 2.1 Soudobost výroby a spotřeby elektrické energie</i>	9
<i>Obr. 2.2 Přehled účinnosti a životnosti různých akumulčních systémů</i>	11
<i>Obr. 2.3 Nikl-kadmiový akumulátor</i>	14
<i>Obr. 3.1 Hodnoty činitele výkonu během slunného dne</i>	17
<i>Obr. 3.2 Spojení FVE s akumulčním zařízením</i>	18
<i>Obr. 3.3 Množství dodané energie za měsíc červenec s příslušným činitelem výkonu</i>	19
<i>Obr. 3.4 Množství dodané energie za měsíc prosinec s příslušným činitelem výkonu</i>	20
<i>Obr. 3.5 PQ diagram</i>	20
<i>Obr. 3.6 PQ diagram fotovoltaické elektrárny</i>	21
<i>Obr. 3.7 Dynamické změny výkonu a napětí FVE 40 kWp</i>	22
<i>Obr. 3.8 Dynamické změny výkonu a napětí vyjádřeny v %</i>	23
<i>Obr. 3.9 15 minutové maximální % změny výkonu bez a s akumulací</i>	23
<i>Obr. 3.10 FVE s akumulací</i>	26

OBSAH

ÚVOD	1
1 DEFINICE ZPĚTNÝCH VLIVŮ OZE NA DISTRIBUČNÍ SOUSTAVU	2
1.1 VNĚJŠÍ VLIVY PŮSOBÍCÍ NA ELEKTRICKOU ENERGII.....	2
1.1.1 <i>Parametry ovlivňující kvalitu elektrické energie:</i>	2
1.2 FLIKR.....	2
1.3 KMITOČET SÍTĚ.....	4
1.4 ZMĚNA NAPĚTÍ PŘI SPÍNÁNÍ.....	4
1.5 HARMONICKÉ VYŠŠÍCH ŘÁDŮ	6
1.6 PODMÍNKY PRO PŘIPOJENÍ.....	6
1.7 ZPĚTNÉ VLIVY	7
2 AKUMULACE ELEKTRICKÉ ENERGIE	9
2.1 ELIMINACE RYCHLÉ ZMĚNY VÝKONU FVE.....	11
2.2 AKUMULACE VYROBENÉ ELEKTRICKÉ ENERGIE FVE S MOŽNOSTÍ NÁSLEDNÉHO VYUŽITÍ PŘI ŠPIČKOVÉM ZATÍŽENÍ DENNÍHO DIAGRAMU	11
2.3 VÝKONOVÁ AKUMULACE.....	12
2.4 ENERGETICKÁ AKUMULACE.....	12
2.5 NĚKTERÉ DRUHY AKUMULÁTORŮ.....	12
2.5.1 <i>Olověné baterie</i>	12
2.5.2 <i>Lithiové baterie</i>	13
2.5.3 <i>Nikl-kadmiové baterie</i>	14
2.5.4 <i>Superkapacitory</i>	14
2.6 SHRNUTÍ	16
3 ELIMINACE NEGATIVNÍCH ZPĚTNÝCH VLIVŮ	17
3.1 PQ DIAGRAM	18
3.2 NÁVRH VÝKONOVÉ AKUMULACE.....	22
3.3 BILANCE VÝKONU V MÍSTĚ PŘIPOJENÍ FVE	25
3.4 POPIS ENERGETICKÉ AKUMULACE.....	26
4 ZÁVĚR	27
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY:	28

Úvod

Elektrárny musí splňovat podmínky při připojení k elektrizační soustavě, v našem případě jsou to podmínky pro připojení obnovitelných zdrojů do elektrizační soustavy. Musí splňovat daná kritéria, která jsou popsána především v normách ČSN EN 50 160 ed. 3 [1] a v pravidlech pro provozování distribuční soustavy příloha č. 4 (PPDS 4) [7]. K zákazníkovi se elektrická energie transportuje pomocí elektrizační soustavy. Během transportu z elektrárny ke koncovému uživateli na elektrickou energii působí vnější vlivy, které jsou způsobeny např. nestabilní dodávkou elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Tyto vlivy mohou ovlivnit kvalitu elektrické energie.

Cílem této bakalářské práce je popsat a eliminovat zpětné vlivy obnovitelných zdrojů a to především fotovoltaických elektráren na distribuční soustavu a zabránit jejich zavlečení do elektrizační soustavy. V místě připojení fotovoltaické elektrárny do sítě může docházet ke změně napětí, dále nemusí být stálá dodávka výkonu. Jednou z možností, jak potlačit tyto negativní vlivy je akumulace elektrické energie. Pokud nám FVE dodává více výkonu, než jsme schopni využít, tak tento nadbytečný výkon akumulujeme pomocí akumulčního zařízení a následně tuto uloženou elektrickou energii využijeme k dodávce elektrické energie v časech, kdy FVE není schopna dodávat požadovaný výkon s potřebnými parametry do sítě, parametry se myslí např. účinník. Tím prodloužíme i dodávku elektrické energie z FVE do částí dne, kdy je nedostatek slunečního záření a částečně potlačíme negativní vlivy na elektrizační soustavu.

1 Definice zpětných vlivů OZE na distribuční soustavu

1.1 Vnější vlivy působící na elektrickou energii

- náhlé odpojování a připojování obnovitelných zdrojů elektrické energie jako jsou fotovoltaické elektrárny nebo větrné elektrárny (velké proudové rázy)
- atmosférické vlivy
- působení ochran

Parametry ovlivňující kvalitu elektrické energie jsou popsány především v normách ČSN EN 50160 [1] a v pravidlech provozování distribučních soustav příloha 4 (PPDS 4) [7]

Pravidla pro připojení výroby elektřiny do sítě nn, vn nebo 110 kV provozovatele distribuční soustavy (PDS)

1.1.1 Parametry ovlivňující kvalitu elektrické energie:

- Změna napětí
- Flickr (periodické poklesy napětí)
- Vyšší harmonické
- Kmitočet sítě

1.2 Flickr

Subjektivní vjem změny světelného toku v důsledku periodických poklesů napětí.

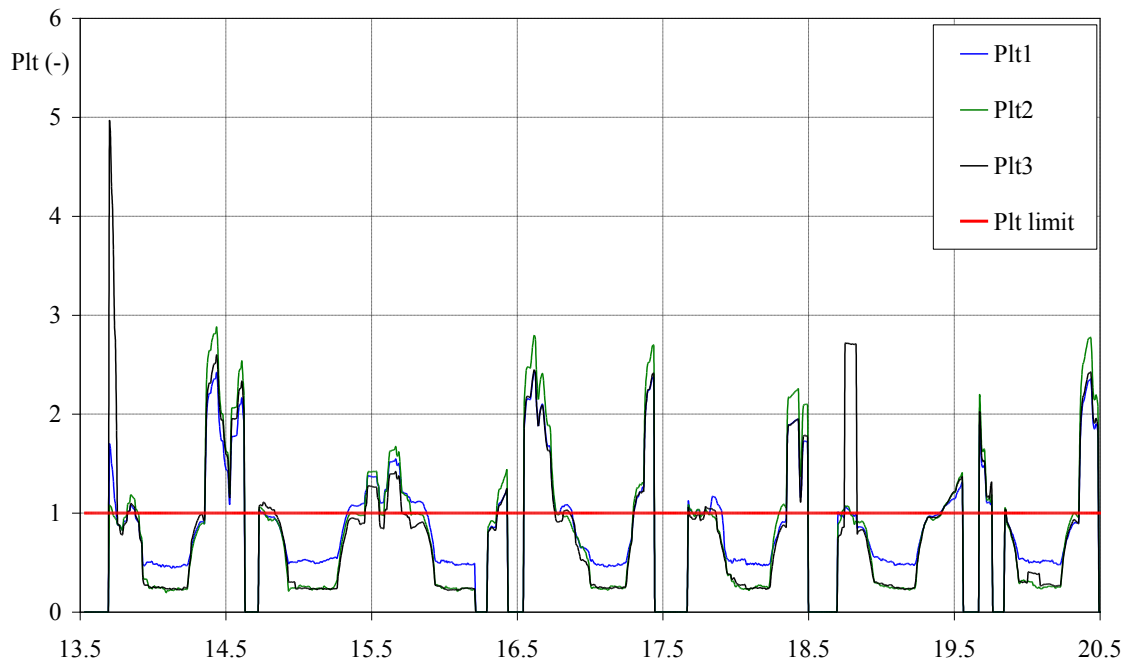
Jako parametr určující flickr se nepoužívá přímo úbytek napětí způsobený flickrem, ale veličina míra „vjemu flickru“.

krátkodobá (short term) míra vjemu flickru P_{st}

- měřená nebo počítaná v časovém intervalu 10 minut

dlouhodobá (long term) míra vjemu flickru P_{lt}

- určovaná pro interval 2 hodiny
- za normálních provozních podmínek dle [1] musí být po 95 % času, v libovolném týdenním období, dlouhodobá míra flickru $P_{lt} \leq 1$, kde je tato hodnota překročena a tato situace neodpovídá výše popsaným kritériím



Obr. 1.1 Průběh dlouhodobého flickru [9]

míra vjemu flickru je úměrná poměrnému úbytku napětí:

$$P_{st,lt} = du = \frac{\Delta u}{U_n} \quad (1)$$

• **spotřebiče a provozní stavy způsobující flickr:**

- spínání velké zátěže
- rozběh velkých motorů
- proměnlivá zátěž
- elektrické obloukové pece

1.3 Kmitočet sítě

- jmenovitý kmitočet sítě je 50 Hz
- dle normy ČSN EN 50 160 ed. 3 [1] musí být kmitočet základní harmonické napájecího napětí měřený v intervalu 10 s v ostrovním napájecím systému za normálních provozních podmínek v následujících mezích:

$$50 \pm 2\% \text{ (tj. 49 - 51 Hz) během 95 \% \text{ \u016dne}}$$

$$50 \pm 15\% \text{ (tj. 42,5 - 57,5 Hz) po 100 \% \text{ \u010dasu}}$$

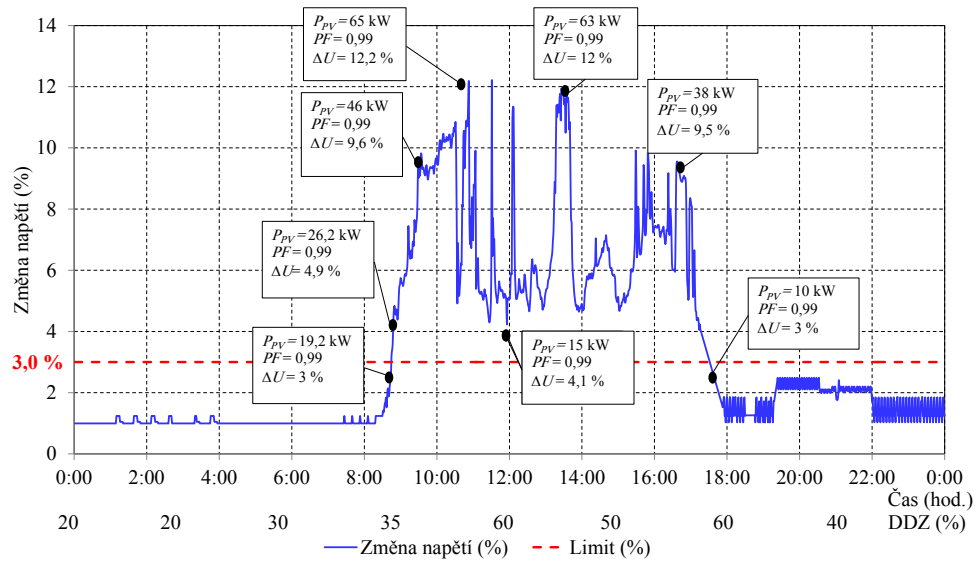
1.4 Změna napětí při spínání

Zvýšení napětí vyvolané provozem připojených výroben nesmí být v nejnepříznivějším případě v PCC (v přípojném bodu) překročit 2% (pro výroby s přípojným místem v síti vn a 110 kV ve srovnání s napětím bez jejich připojení a zároveň nesmí být překročeny limity napětí v předávacím místě zdroje podle [1].

$$\Delta U_{vn,110} \leq 2\%$$

$$\Delta U_{nn} \leq 3\%$$

- úroveň napětí musí být posouzena s ohledem na výši skutečné hodnoty napětí v předávaném bodě
- $U_n = \pm 10\%$ v PCC
- 95% průměrných efektivních hodnot napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut během každého týdne
- **Omezení kolísání napětí:**
 - zvýšení zkratového výkonu (s ohledem na výkon zátěže) v místě připojení fotovoltaické elektrárny
 - připojením FVE na vyšší napětřovou hladinu
 - oddělení napájení kolísavé zátěže a stabilní zátěže z oddělených vinutí trojfázového transformátoru



Obr. 1.2 Změny napětí v místě připojení FVE [9]

Na grafu změny napětí v místě připojení FVE viz. Obr. 1.2 vidíme několikanásobné překročení dovolené změny napětí (jenž je v grafu zobrazena modrou křivkou) v místě připojení fotovoltaické elektrárny. V nejvíce nepříznivém stavu, který nastal mezi 10:00 a 12:00 je to až 4 násobné překročení limitní hodnoty 3%, která je vyznačena v grafu červenou čerchovanou čarou.

1.5 Harmonické vyšších řádů

Jedná se o sinusové kmity, jejichž kmitočet je celistvým násobkem základní frekvence (tj. 50 Hz). V síti o základním kmitočtu 50 Hz jsou to nejčastěji harmonické s těmito kmitočty: 150, 250 a 350 Hz.

Harmonické kmitočty vznikají v důsledku zatížení. Tyto zatížení způsobují zkreslení sinusového průběhu. Harmonické složky generují nelineární spotřebiče jako např. polovodiče - střídače atd.

problémy způsobené harmonickými:

- síťová rezonance pro určitou harmonickou může přepětím nebo zvýšeným proudem namáhat síťové prvky (kabely, transformátory)
- špatná činnost řídicích obvodů elektronických zařízení
- chybná funkce ochran

omezení problémů způsobených harmonickými:

- Spotřebitelé:
 - zesílení a rekonstrukce vlastní sítě
 - filtrování nulové složky způsobené třetí harmonickou použitím vhodného zapojení napájecího transformátoru
- Dodavatelé:
 - filtrace harmonických
 - zvětšení zkratového výkonu na straně napájení

1.6 Podmínky pro připojení

K zabránění zavlečení zpětného napětí do sítí PDS je zapotřebí zajistit technickými opatřeními, aby připojení vlastní výroby k síti PDS bylo možné pouze tehdy, když jsou všechny fáze sítě pod napětím [2].

- k připojení může být použit spínač
 - který spojuje celé zařízení odběratele se sítí
 - který spojuje generátor (popř. více paralelních generátorů) se zbylým zařízením odběratele
- zapnutí spínače musí být blokováno do doby, dokud není na každé fázi napětí minimálně nad rozběhovou hodnotou napětíové ochrany

pro sítě nn a vn s jedním přípojným místem:

$$k_{k1} = \frac{S_{kv}}{\Sigma S_{Amax}} \quad (2)$$

podmínka pro zvýšení napětí bude dodržena pokud:

$$k_{k1vn} \geq 50$$

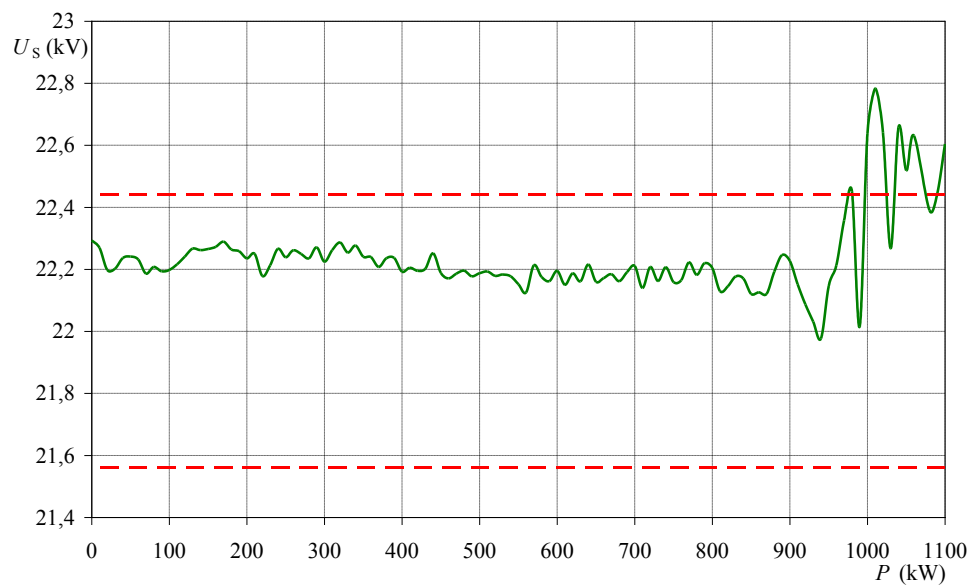
$$k_{1nn} \geq 33$$

1.7 Zpětné vlivy

Zpětné vlivy vznikají v okamžiku připojení elektrárny na DS (=distribuční síť), těmito vlivy působí elektrárna na elektrizační síť.

Tyto zpětné vlivy je nutné je omezit, aby nebyla narušena zařízení dalších odběratelů a zařízení provozovaná v PDS. Jsou to především tyto parametry. Kolísání napětí - délka trvání a frekvence, míra vjemu flikru, proudový ráz při připínání fotovoltaické elektrárny k distribuční soustavě.

Distribuční soustavy jsou navrhovány jako pasivní a k provozu s jedním směrem toku energie, od výrobce elektrické energie ke spotřebitelům, na rozdíl od přenosových systémů, které jsou navrhovány pro obousměrný tok energie/ výkonů [2].



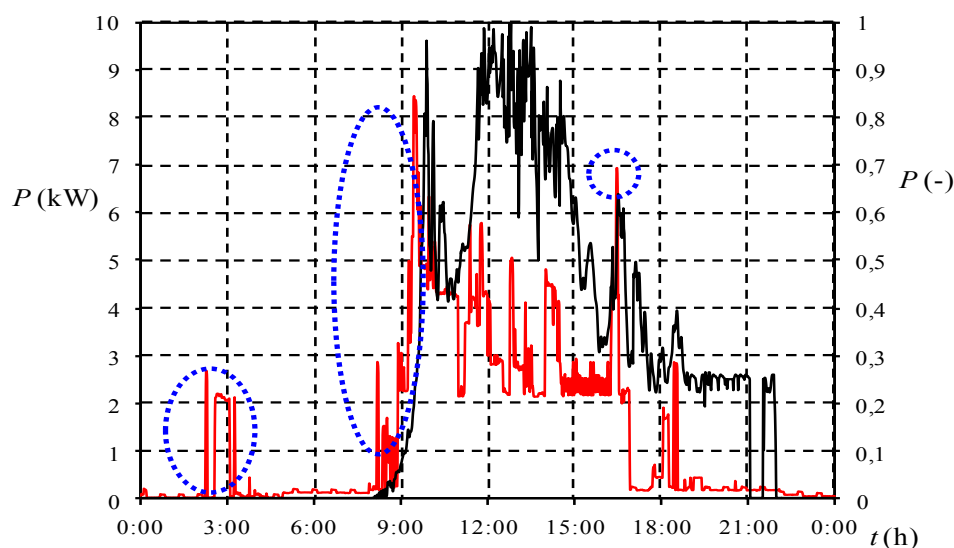
Obr. 1.3 Změna napětí na vývodu vedení v rozvodně 22 kV, do níž je vyveden výkon z FVE [9]

Na Obr. 1.3 je zobrazen průběh sdruženého napětí v závislosti na velikosti dodávaného činného výkonu, červenou čerchovanou čarou je zde vymezen dovolený 2 % rozsah napětí pro napětíovou hladinu 22 kV. Přibližně v 90 % rozsahu bilance činného výkonu není překročena hodnota dovoleného napětí [9].

2 Akumulace elektrické energie

Jednou z možností, jak potlačit nestálost dodávky elektrické energie z FVE a zmírnit negativní vlivy FVE na distribuční soustavu je využití akumulace elektrické energie. Akumulaci elektrické energie provádíme také proto, abychom zajistili rovnoměrnost dodávky elektrické energie do distribuční soustavy, kterou ve FVE vyrobíme. Dále pro pokrytí výkonových špiček, které se vyskytují při dnech s jasným sluncem a naopak k pokrytí propadů výkonu v denním diagramu zatížení nastávajících při přechodné oblačnosti a FVE tudíž není schopna dodávat do sítě požadovaný výkon a je potřeba tyto „propady“ hradit z akumulčního zařízení (baterie).

Pro ostrovní provoz fotovoltaické elektrárny je nutné zajistit vhodný systém pro akumulaci elektrické energie. Musíme uvažovat takový systém, který je schopen zajistit dostatečný výkon pro pokrytí spotřeby rodinného domu a zároveň nesmí dojít ke ztrátě elektrické energie, kterou získáme v období vyšší výroby než spotřeby rodinného domu. [9] Samozřejmě každý rodinný dům má různé energetické nároky, tento fakt musíme také brát v úvahu při navrhování akumulčního systému.



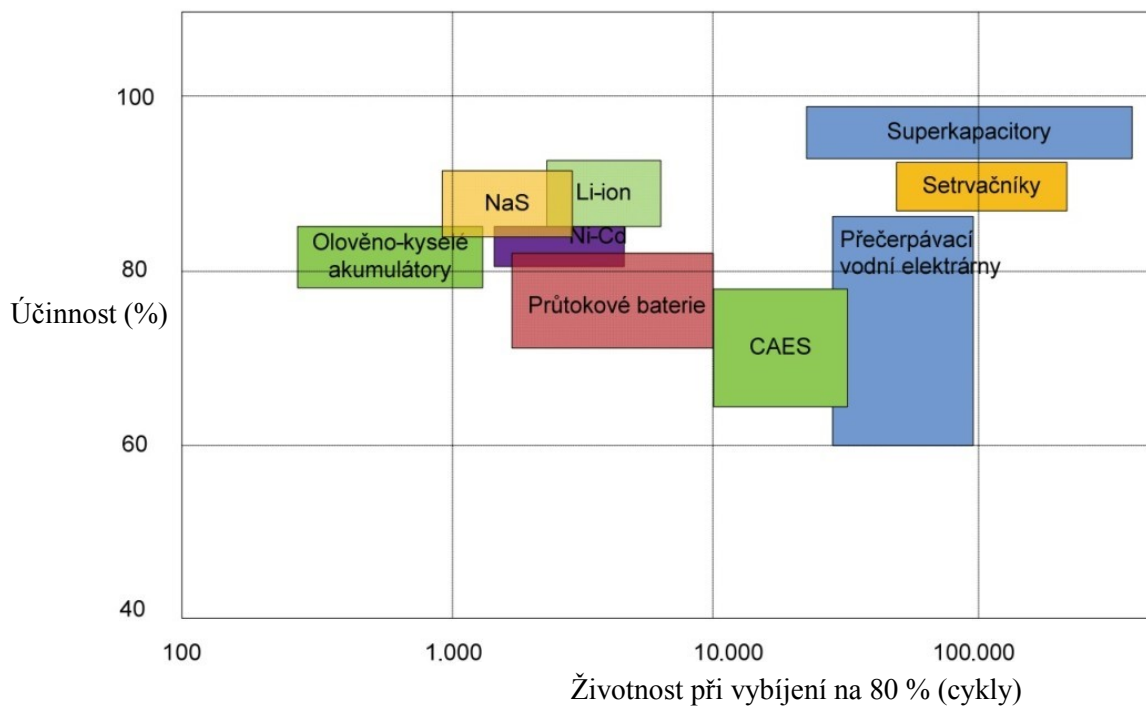
Obr. 2.1 Soudobost výroby a spotřeby elektrické energie [9]

Takový příklad nesoudobosti je uveden na Obr. 2.1, zde červená křivka znázorňuje skutečnou spotřebu rodinného domu, černá křivka reprezentuje vyrobenou elektrickou energii a modře jsou vyznačeny oblasti spotřeby elektrické energie, které musíme kompenzovat pomocí právě akumulčního zařízení. [9]

Z grafu je patrné, že výkon hybridních systémů je kolísavý, proto musíme spotřebu elektrické energie přizpůsobit nebo ji akumulovat např. pomocí akumulární baterie.

Pro akumulování velkých energetických objemů využíváme dnes převážně přečerpávací vodní elektrárny. Které slouží pro pokrývání výkonových špiček a propadů v denním diagramu zatížení.

Při překročení některých limitních hodnot, které jsou definovány v normě ČSN EN 50160 [1] a pravidlech provozování distribučních soustav (PPDS) [7]. Připojením akumulárního zařízení zajistíme eliminaci negativních vlivů.



Obr. 2.2 Přehled účinnosti a životnosti různých akumulčních systémů [10]

K fotovoltaické elektrárně připojíme baterii a tím zajistíme akumulaci elektrické energie. Zde máme několik možností pro nastavení provozu baterie:

2.1 Eliminace rychlé změny výkonu FVE

- **Baterie:** výkonová verze, relativně krátké nabíjecí a vybíjecí časy, menší kapacita, velký výkon a velké cyklování

Baterie tlumí náhlé změny dodávaného výkonu, např. při vysoké oblačnosti oproti jasnému slunci, eliminuje rychlé změny napětí.

- **Klady:** eliminace rychlých změn výkonu, kolísání napětí, omezení špiček výkonu
- **Poměr výkonu a energie baterie:** od 1:1 do 10:1

2.2 Akumulace vyrobené elektrické energie FVE s možností následného využití při špičkovém zatížení denního diagramu

- **Baterie:** energetická verze, delší nabíjecí a vybíjecí časy než u výkonové baterie, nižší výkony, velká kapacita

- **Klady:** rovnoměrná dodávka elektrické energie do sítě s účinnkem 1 ($\cos\varphi=1$), odstranění napěťových změn a dlouhodobého vjemu flikru
- **poměr výkonu a energie baterie:** od 1:2 do 1:10

2.3 Výkonová akumulace

Odstraňuje rychlé změny dodávaného výkonu např.

Při přechodu mraku přes FVE nebo při změně rychlosti větru u větrných elektráren.

Poměr výkonu a kapacity baterie je větší nebo roven 1.

Při náhlých výkonových špičkách nám baterie výkony baterie akumuluje a poté nám tato energie slouží k pokrytí propadů výkonu.

Pokud je nízký výkon FVE a malý účinník, potom celý výkon FVE slouží k nabíjení baterie.

Za předpokladu dostatečného výkonu (který si nastavíme) je část výkonu FVE použita k nabíjení baterie a zbytek je dodáván do sítě.

Při náhlém poklesu výkonu FVE dodáváme výkon do sítě z baterie.

Je také nutno baterii pravidelně vybíjet na nastavenou hodnotu, aby byla schopna tlumit výkonové špičky v dalším dni.

2.4 Energetická akumulace

Slouží ke zrovnoměnění dodávky elektrické energie z obnovitelných zdrojů z období kdy je nadbytek energie (ukládání energie do baterie) a naopak pokud je vyšší poptávka po energii poté ji dodáme z baterie.

Má za úkol omezit negativní zpětné vlivy elektrárny na distribuční soustavu.

Elektrická energie, která se vyrobí, nad nastavenou hodnotu se akumuluje do baterie a následně je použita pro vykrytí propadu dodávky elektrické energie z FVE.

Slouží k eliminování kolísavého napětí.

2.5 Některé druhy akumulátorů

2.5.1 Olověné baterie

- jsou vhodné především pro **energetickou akumulaci**
- výhodou je poměr výkonu k hmotnosti a cena akumulátorů
- životnost v cyklech 500 - 800 [3]

Akumulátor je složený z nádoby a dvou elektrod, které jsou tvořeny z čistého olova. Jako elektrolyt zde slouží vodný roztok s kyselinou sírovou. Pomocí její hustoty se dá kontrolovat nabíjení akumulátoru, při vybití její koncentrace klesá a naopak při nabíjení stoupá.

Tyto akumulátory jsou schopny dodávat vysoké rázové proudy.

Elektrody mají tvar mříží, ty se plní pastou nebo jsou žebrované.

- **Klady:** dodávání velkých proudů i po delší dobu, velká mechanická odolnost, vysoká kapacita
- **Zápory:** nutnost udržovat baterie nabité, nebezpečný zkratový proud, hmotnost a robustnost baterie, nízká hustota energie, dlouhá doba nabíjení

2.5.2 Lithiové baterie

- vhodné především pro **výkonovou akumulaci**
- životnost více než 2 000 cyklů (až 8 000 cyklů)

Jsou to akumulátory na bázi lithia, což je světlý a reaktivní kov. V dnešní době nejvíce používané a dostupné Li-ion a Li-pol. Výhoda těchto baterií spočívá především v hmotnosti na instalovaný výkon v kWh, díky lehkému kovu. Samovybití je téměř nulové, vhodné pro dynamické akumulací systémy, díky rychlé nabíjecí a vybíjecí charakteristice.

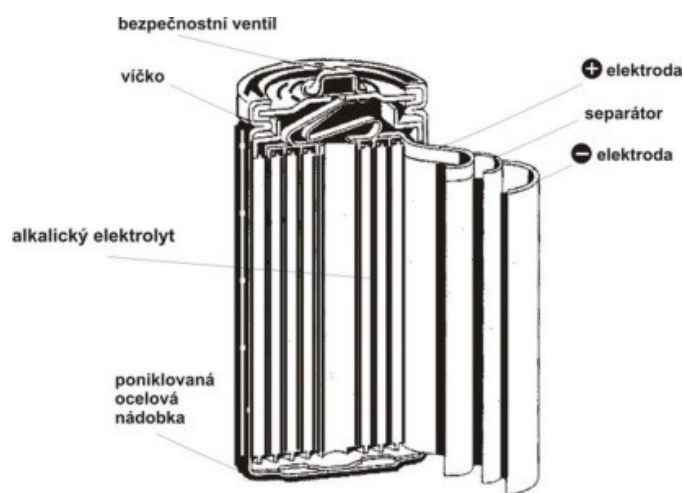
LiFePO₄ [4]

- jmenovití napětí článku je 3,2 V
- prakticky nulové samovybití
- žádný paměťový efekt
- kompaktní rozměry a nízká hmotnost
- vysoká životnost (minimálně 2 000 cyklů)
- kompaktní rozměry a nízká hmotnost
- pracovní teplota od -45°C do 85°C [5]

2.5.3 Nikl-kadmiové baterie

Katoda je zde tvořena elektrodou z niklu a anoda z kadmia.

Elektrolyt tvoří jednoduchý hydroxid alkalického prvku, např. hydroxid draselný KOH nebo hydroxid sodný NaOH. Tento elektrolyt je vázán v separátoru a elektrodách. Mají příznivý poměr hmotnosti ke kapacitě baterie. Nevadí jim skladování při hlubokém vybití. Tyto baterie jsou též schopné pracovat za nízkých teplot (-40°C). Používají se tam, kde požadujeme velká proudová zatížení. Jejich nevýhodou je, že obsahují těžké kovy, zvláště jedovaté kadmium.



Obr. 2.3 Nikl-kadmiový akumulátor [6]

2.5.4 Superkapacitory

- jsou to speciální elektrolytické kondenzátory s velkou kapacitou (řádově více než 1 000F)
- kondenzátory mají velkou hustotu energie řádově 10Wh/kg, delší životnost než konvenční baterie a také vyšší účinnost až 95% [2]

Malé kapacitory s napětím od 2,3 do 2,7 V jsou zapojeny do série a tvoří tak baterii. Oproti bateriím umožňují velmi rychlé nabíjení a vybíjení a to až milionkrát. Velká rychlost nabíjení méně než 1 sekunda do plné kapacity. Účinnost nabíjení je vyšší než 95%. Vysoké vybíjecí proudy, které mohou dosahovat až tisíců ampér. [8]

Rovnice energetické bilance:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 (\text{J}) \quad (3)$$

kde U je napětí ve voltech (V)

C je kapacita ve faradech (F)

Superkapacitory mohou být uplatněny v aplikacích, kde předpokládáme časté nabíjení a vybíjení baterií a pokrytí krátkodobých výpadků výkonu.

Výhody:

- vysoká kapacita (až 1 000 F)
- díky malému vnitřnímu odporu (řádově 0,001 Ω) vysoká účinnost a malé ztráty
- mnoho cyklů nabíjení a vybíjení (až milion)
- krátká doba nabití na plnou kapacitu

Nevýhody:

Množství energie uložené na jednotku váhy je nižší než u elektrochemických článků (3-5 Wh.kg⁻¹ pro superkondenzátory v porovnání s 30-40 Wh.kg⁻¹ pro klasické baterie). [2]

V budoucnu se počítá s využitím superkapacitorů např. pro chytré mobilní telefony, hlavně pro rychlé nabití akumulátoru do plné kapacity.

2.6 Shrnutí

Pro energetickou akumulaci jsou vhodné **nikl-kadmiové akumulátory** a **olověné**, protože mají vysokou proudovou hustotu.

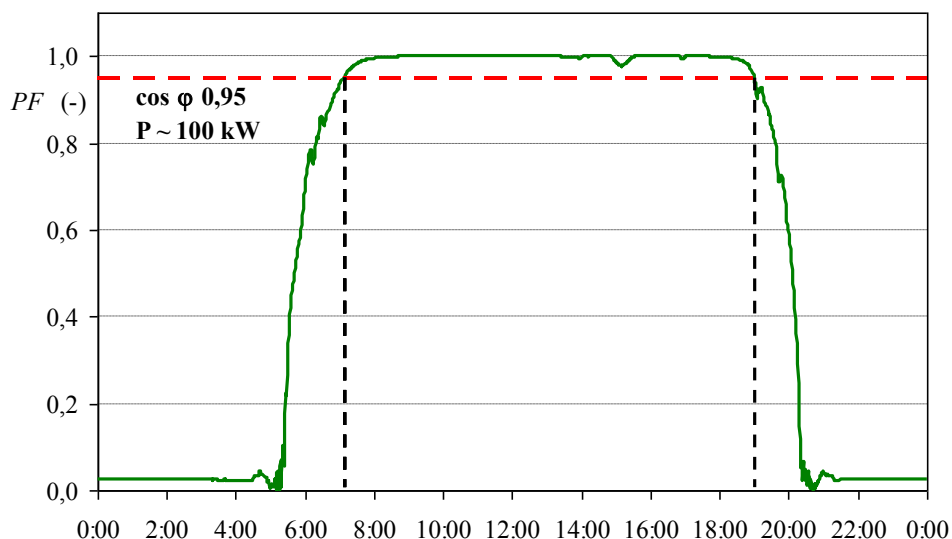
Pro výkonovou akumulaci jsou vhodné baterie na bázi lithia. Nejlépe **LiFePO₄**, nevadí jim časté formátování, mají rychlé vybíjecí a nabíjecí cykly. Případně superkapacitory, ale tato technologie pro výkonovou akumulaci je stále ve fázi vývoje.

3 Eliminace negativních zpětných vlivů

Pokud jsou překročeny některé limitní hodnoty definovány v normě ČSN EN 50 160 [1] a v pravidlech pro provozování distribučních soustav [7], lze předpokládat, že připojením akumulčního zařízení dojde k eliminaci zpětných vlivů na distribuční soustavu.

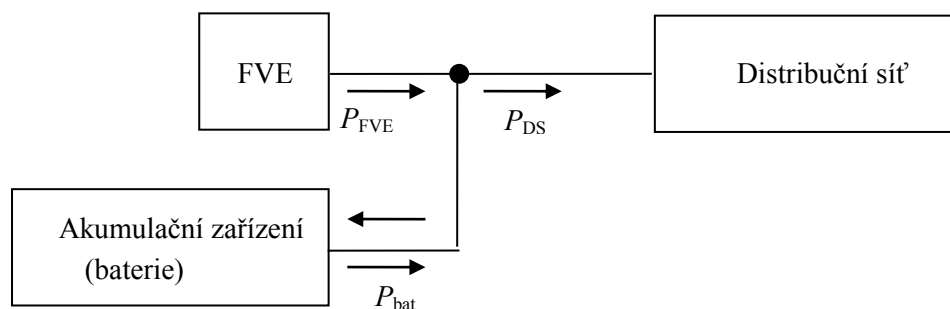
K nejvýznamnějším zpětným vlivům na distribuční síť, které vyvolá provoz FVE patří zejména rychlé změny napětí, které jsou způsobeny častým spínáním, dále změnou zatížení a v neposlední řadě také změnou dodávaného výkonu FVE do distribuční sítě.

Budeme řešit návrh akumulčního zařízení pro výkonovou akumulaci, energetická akumulace je náročnější na způsob řízení.



Obr. 3.1 Hodnoty činitele výkonu během slunného dne [9]

Při vhodných meteorologických podmínkách je FVE schopna dodávat činný výkon do distribuční soustavy již od brzkých ranních hodin (viz. Obr. 3.1) kdy výkon dodává již před 6. hodinou, ale není zde dodrženo neutrální pásmo činitele výkonu. Po 7. hodině začne FVE dodávat do DS výkon s neutrálním účinníkem (tj. 0,95 - 1). Tento výkon má hodnotu přibližně 100 kW, po 18. hodině již FVE nedodává výkon s neutrálním účinníkem [9].



Obr. 3.2 Spojení FVE s akumulacním zařízením

3.1 PQ diagram

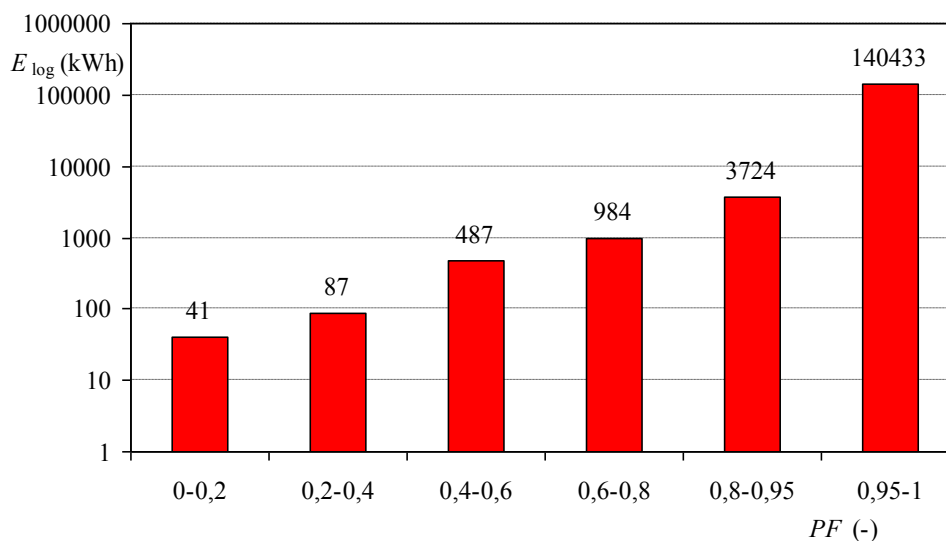
Parametry fotovoltaické elektrárny, pro různé stavy, potřebujeme znát, abychom mohli hodnotit provoz fotovoltaické elektrárny a tomu odpovídající zpětné vlivy dané výrobní elektrické energie na soustavu, do které je výkon vyveden. Jednotlivé panely FVE mají výkon vyvedený přes frekvenční měniče do distribuční soustavy, kde celkový výkon jednotlivých vývodů fotovoltaických je transformován přes výkonový transformátor do DS. Při použití frekvenčních měničů a výkonové elektroniky, můžeme provozovat fotovoltaickou elektrárnu v tzv. čtyřkvadrantovém provozním režimu, to znamená, že musíme počítat s možností odběru či dodávky činného výkonu a také s odběrem či dodávkou induktivního jalového výkonu [9].

Čtyřkvadrantový provozní režim lze v základu pro výrobní vyjádřit jako tzv. PQ diagram. Jednotlivé provozní stavy fotovoltaické elektrárny jsou v tomto diagramu zobrazeny v měřítku jednotlivých výkonů.

Účinnost je definován jako kosinus úhlu mezi průběhem napětí a proudu pro první harmonickou, je-li fázový posun určen obecně pro průběhy napětí a proudu včetně uvažování harmonických vyšších řádů, používáme termín hodnota činitele výkonu. Tato hodnota je důležitá pro stanovení velikosti odběru nebo dodávky jalového výkonu [9].

Dle [7] musí být účinnost zdroje za normálních ustálených provozních podmínek při dovoleném rozsahu tolerancí jmenovitého napětí být mezi 0,95 kapacitními a 0,95 induktivními za předpokladu, že činná složka výkonu je nad 20 % jmenovitého výkonu zdroje.

V případě, kdy bude naměřená hodnota činitele výkonu mimo stanovený rozsah, je provozovateli výrobní udělena sankce, dle pravidel, které stanoví provozovatel distribuční soustavy, do které je výkon z výrobní vyveden.

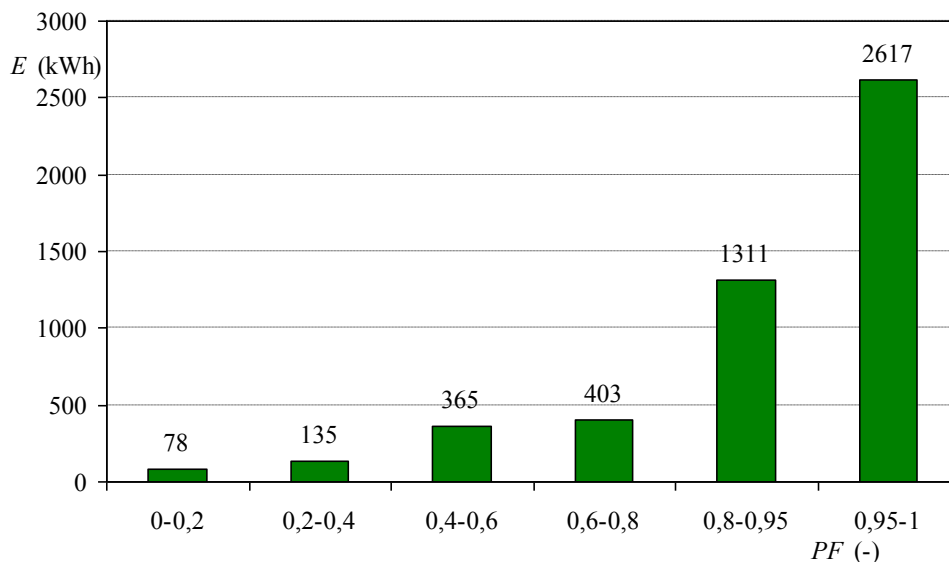


Obr. 3.3 Množství dodané energie za měsíc červenec s příslušným činitelem výkonu. [9]

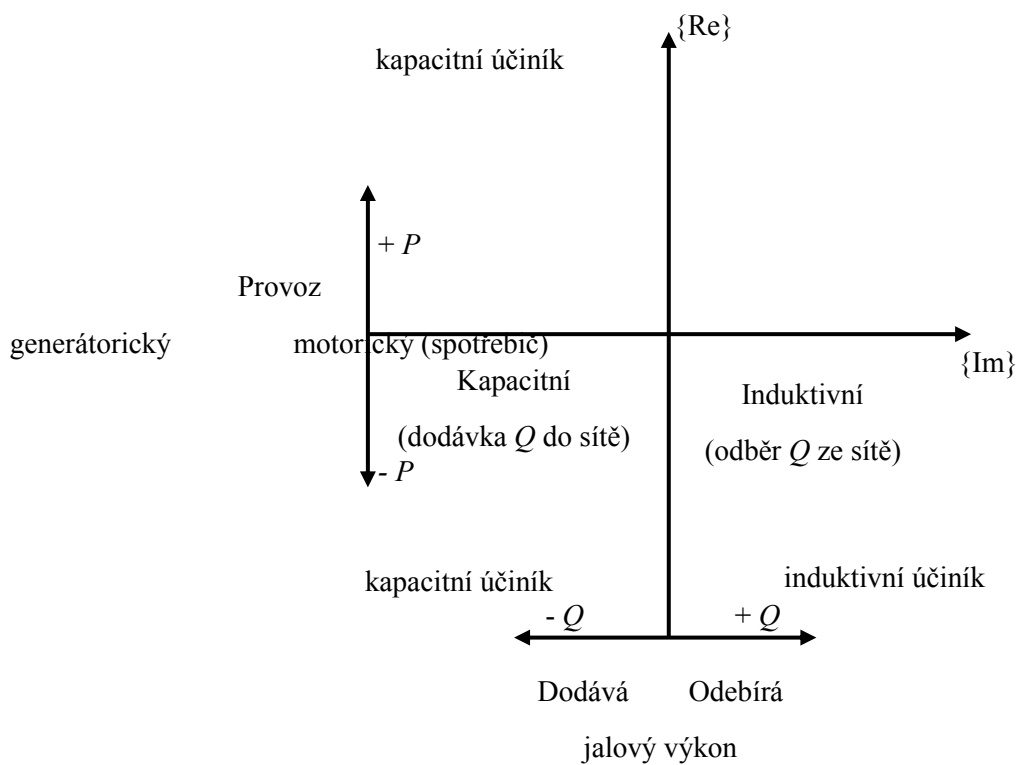
Na Obr. 3.3 je zobrazena dodávka činného výkonu s různým účínkem. Je zde volena logaritmická osa Y, vzhledem k disproporcí mezi jednotlivými intervaly PF. Povoleno rozsah účínku jak již bylo popsáno výše je 0,95 - 1. Zde však fotovoltaická elektrárna dodávala činný výkon i mimo dovolený rozsah, toto je dáno charakterem fotovoltaické elektrárny, ta je připojena do DS i hodinách kdy je dodávka činného výkonu minimální, tj. noční hodiny. V tuto dobu není schopna výkonová elektronika provádět kompenzaci v požadované toleranci [9].

FVE, která je vyvedena do úrovně vysokého napětí musí dodávat jmenovitý činný výkon do sítě s tzv. neutrálním účínkem. Pásmo neutrální účínku je v rozmezí od 0,95 induktivního charakteru až do 1,00.

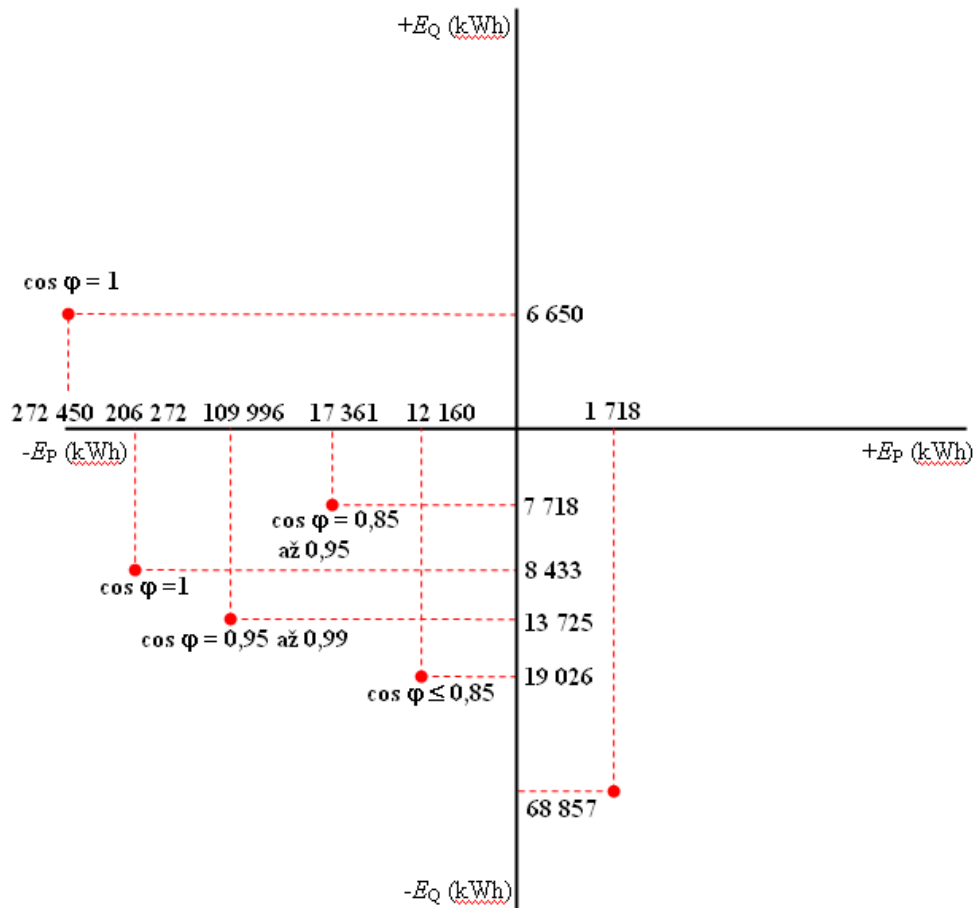
Pro srovnání graf s množstvím dodané energie za měsíc prosinec, zde byly jiné meteorologické podmínky, než v měsíci červenci viz. Obr. 3.3, tj. menší množství dopadajícího slunečního záření.



Obr. 3.4 Množství dodané energie za měsíc prosinec s příslušným činitelem výkonu. [9]



Obr. 3.5 PQ diagram



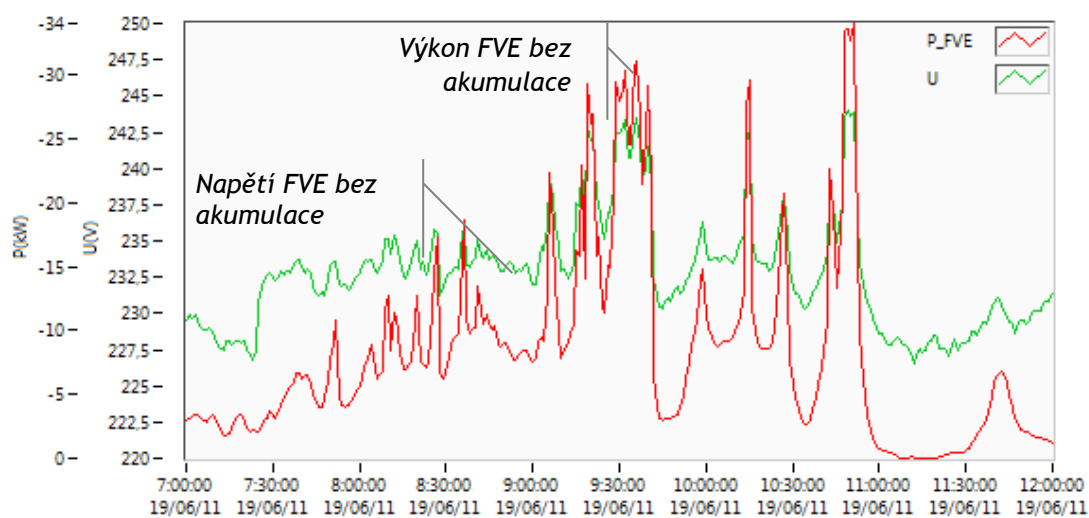
Obr. 3.6 PQ diagram fotovoltaické elektrárny [9]

Na Obr. 3.6 je zobrazena celková bilance toku jalového i činného výkonu v tzv. PQ diagramu. Znaménko + vyjadřuje odběr energie, znaménko – dodávku energie. Z toho plyne, že provoz fotovoltaické elektrárny je definován pro tři základní provozní stavy. Jsou to v první řadě dodávka činného výkonu ($-P$) a dodávka induktivního jalového výkonu ($-Q$). Poté režim dodávky činného výkonu ($-P$) a odběr induktivního jalového výkonu ($+Q$). Posledním případem je režim odběru činného výkonu ($+P$) a dodávka induktivního jalového výkonu ($-Q$). Vezme-li v potaz charakter induktivního jalového výkonu, musíme počítat s možností, že se nám zvýší napětí v přípojném bodě v případě dodávky induktivního jalového výkonu a naopak se snížením napětí v případě odběru induktivního jalového výkonu[9].

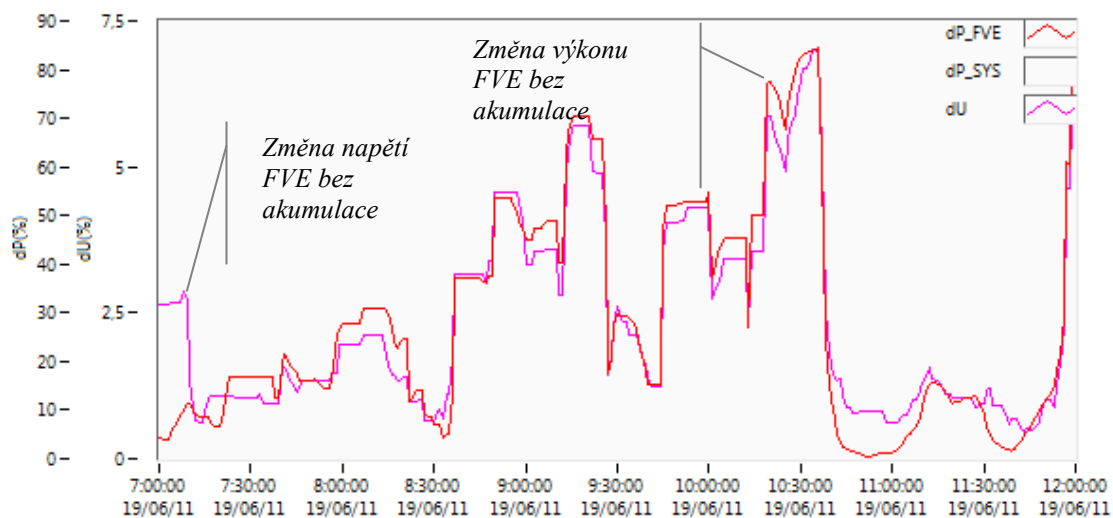
3.2 Návrh výkonové akumulace

Výkonová akumulace nám slouží k eliminaci náhlých změn dodávaného výkonu. Náhlá změna výkonu může vzniknout při přechodu oblačnosti nad fotovoltaickými panely.

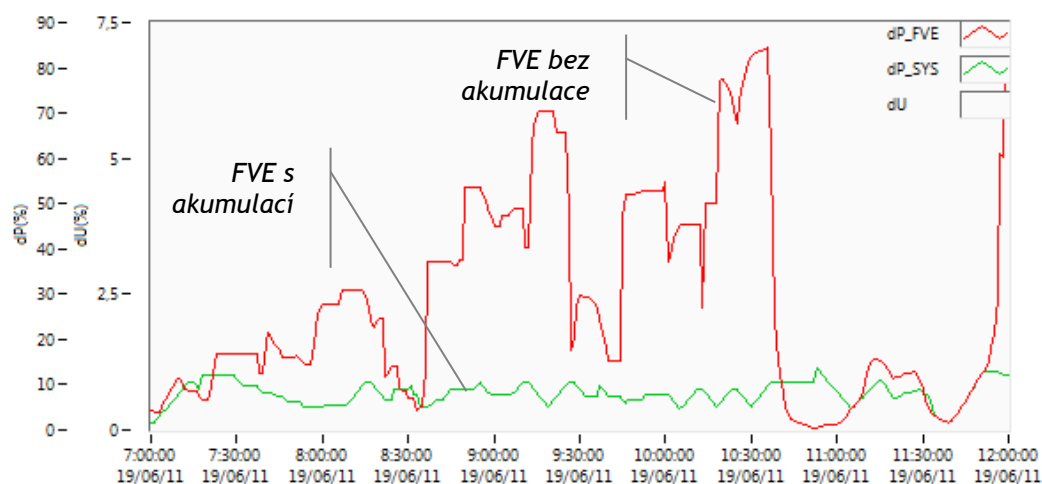
Maximální změna výkonu během 15 minut vztažená ke jmenovité hodnotě je 85%, a napětí 6%. Akumulace musí být dimenzována na jmenovitý výkon FVE. Nabíjení baterie tedy budeme provádět od 85% jmenovitého výkonu FVE.



Obr. 3.7 Dynamické změny výkonu a napětí FVE 40kWp [9]



Obr. 3.8 Dynamické změny výkonu a napětí vyjádřeny v % [9]



Obr. 3.9 15 minutové maximální % změny výkonu bez a s akumulací [9]

Na Obr. 3.9 je červenou čarou znázorněn průběh dynamických změn výkonu bez použití akumulace, pro porovnání je zelenou čarou zobrazena křivka dynamických změn výkonu FVE s použitím akumulace.

Za sledovaný časový úsek tj. od 7:00 do 12:00 je maximální změna výkonu v průběhu 15 minut $85\% P_n$. Při simulování provozu s akumulací se tato hodnota snížila na $18\% P_n$. Tímto jsme omezili rychlé změny napětí mimo definované limity.

Podmínky

Budeme řešit výkonovou bilanci v místě připojení FVE

1. Pokud bude činný výkon dodávaný FVE do sítě větší než výkon, který je nutný ke spotřebě bude se baterie nabíjet. V opačném případě, tedy pokud FVE nebude schopna dodávat požadovaný výkon a současně bude-li akumulátor nabitý na dostatečnou kapacitu, bude tento deficit hrazen z baterie, tím zajistíme vyrovnanou bilanci v místě připojení.
2. Kvalita elektrické energie, musíme se pohybovat v pásmu neutrálního účinníku, musí být od 0,95 do 1, tj. $\cos \varphi = 0,95 - 1$. Pokud nebude dodrženo pásmo neutrálního účinníku, je provozovatel výrobný sankcionován.
3. Naším cílem je se v PQ diagramu viz. Obr. 3.5 pohybovat ve 3. kvadrantu. Tudiž stav kdy FVE dodává do sítě činný výkon ($-P$) a kapacitní jalový výkon ($-Q$), s neutrálním účinníkem.

3.3 **Bilance výkonu v místě připojení FVE**

Návrh akumulace řeší bilanci výkonu v místě připojení fotovoltaické elektrárny do distribuční sítě. Pokud bude bilance 0 %, znamená to, že FVE je schopna vyrobit dostatečný výkon pro pokrytí požadavků spotřebitelů.

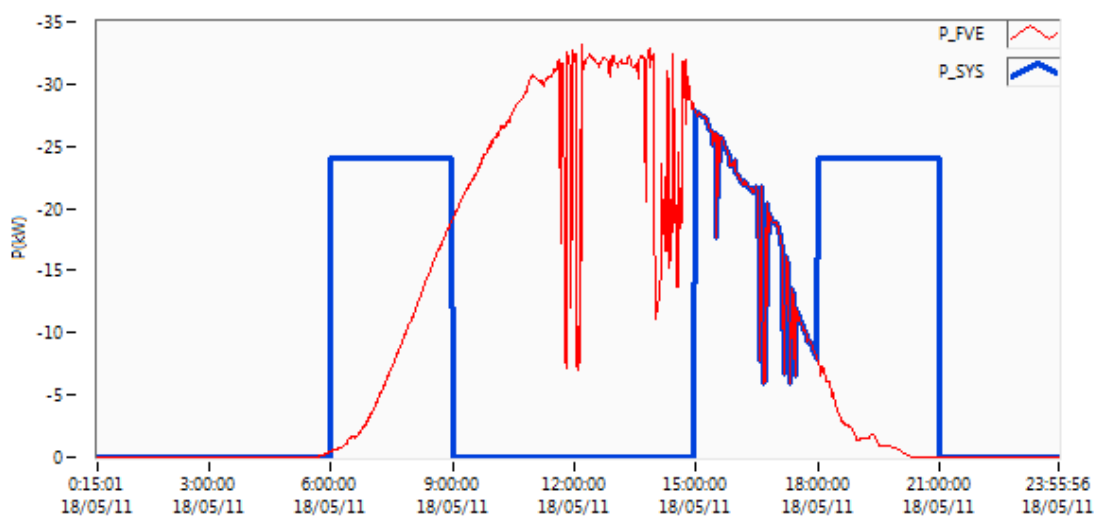
V případě, že bude výkonová bilance kladná (tzn. + %), jedná se o nadbytek. FVE vyrábí více výkonu než je požadovaná spotřeba, v této situaci tato energie vyrobená nad rámec stanovené hodnoty je uložena do akumulátoru pro pozdější využití.

Bude-li výkonová bilance záporná (tzn. - %), je nutné tento chybějící výkon hradit z akumulátoru, budeme vybíjet baterii.

3.4 Popis energetické akumulace

Akumulujeme energii z FVE pro jeden den. Cílem je přesunout výkon FVE do období ranní a večerní špičky.

V případě, kdy je baterie plně nabitá dodává do sítě výkon 24 kW. Z grafu (viz. **Chyba! nenalezen zdroj odkazů.**) je patrné, že tento dodávaný výkon je v období od 6:00 do 9:00 a 18:00 do 21:00. Pokud bude dostatečná kapacita baterie pro pokrytí ranní a večerní dodávky elektrické energie, je výkon dodáván do sítě. Je vhodné, aby baterie na konci dne zůstala z části nabitá, kvůli dodávce výkonu v brzkých ranních hodinách.



Obr. 3.10 FVE s akumulací [9]

4 Závěr

Tato bakalářská práce se věnuje negativním vlivům obnovitelných zdrojů na distribuční soustavu a možností jejich eliminace, za použití akumulace elektrické energie. V první kapitole byly popsány vnější vlivy, které působí na elektrickou energii. První kapitola se rovněž věnuje popisu parametrů, které ovlivňují kvalitu elektrické energie. Parametry, které bývají z kvalitativního hlediska nejčastěji překračovány při provozu fotovoltaické elektrárny, jsou především rychlé změny napětí v místě připojení FVE a míra dlouhodobého vjemu flikru. Tyto vlivy lze potlačit či zcela eliminovat zařazením akumulačního zařízení. Bude-li docházet při provozu FVE k vyšší výrobě elektrické energie než je spotřeba, nastavíme požadovanou mez a poté energie, vyrobená nad tuto hodnotu bude akumulována pomocí akumulačního zařízení. Naopak pokud bude spotřeba vyšší, než je výroba FVE bude tento rozdíl hrazen z akumulačního zařízení, tím zajistíme zrovnoměnění dodávky elektrické energie v denní diagramu zatížení.

V další části jsou popsány způsoby akumulace elektrické energie, především se jedná o jednotlivé typy akumulátorů s popsáním výhod a nevýhod při jejich aplikaci. Zohledňují se zde především parametry akumulátorů, jako jsou životnost, hloubka vybití, účinnost a kapacita. V současné době jsou s úspěchem využívány především akumulátory na bázi lithia, tzn. Li-ion nebo Li-pol, konkrétně typ LiFePO₄. Výhoda tohoto akumulátoru spočívá především v jeho vysoké účinnosti 95%, velký počet cyklů (až 8 000 cyklů) a životnost více než 10 let.

V poslední kapitole jsou popsány typy akumulací, kterými lze eliminovat zpětné vlivy. Výkonová akumulace řeší eliminaci náhlých změn dodávaného výkonu, které mohou být způsobeny přechodem oblačnosti nad fotovoltaickými panely. V grafu průběhu výkonu v závislosti na čase akumulujeme špičky výkonu nad nastavenou hodnotu. Případ energetické akumulace slouží ke zrovnoměnění dodávky elektrické energie pro dané období. Cílem této metody je přesunout výkon FVE do období večerní a ranní špičky, kdy není FVE schopna dodávat požadovaný výkon.

Provoz obnovitelných zdrojů elektrické energie je spojen především s nestálou dodávkou elektrické energie do sítě a nutností eliminovat zpětné vlivy na distribuční síť. Tento problém lze vyřešit pomocí připojení akumulačního zařízení. Tím zajistíme zrovnoměnění dodávky elektrické energie v denním diagramu zatížení.

Seznam použité literatury:

- [1] ČSN EN 50 160 ed. 3 *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*, Praha: Český normalizační institut, 2011, 32 s. EAN 8590963874678
- [2] MASTNÝ P. a kol. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2011, 256 s. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [3] AKU-SHOP.CZ s.r.o. [online]. [cit. 2015-2-3]. Dostupné z:
<<http://nabaterie.cz/content/12-lead-acid-olovene-akumulatory>>
- [4] eskutr.cz [online]. [cit. 2015-30-1]. Dostupné z: <<http://eskutr.cz/cs/baterie/76-baterie-lifeypo4-32v-60ah.html>>
- [5] Winston Global Energy Limited. [online]. [cit. 2015-30-1]. Dostupné z:
<http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery/item/wb-lyp60aha?category_id=176>
- [6] Bateria Slaný CZ, s.r.o. [online]. [cit. 2015-2-1]. Dostupné z:
<<http://www.bateria.cz/stranky3/zabava--pouceni/jak-to-funguje-/niklkadmiovy-akumulator-nicd.htm>>
- [7] *Pravidla provozování distribučních soustav*. Příloha 4. Energetický regulační úřad, 2011.
- [8] ElektrickéVozy.cz [online]. [cit. 2015-1-25]. Dostupné z:
<<http://elektrickevozy.cz/clanky/superkapacitory-budoucnost-napajeni-elektromobilu/>>
- [9] Stanislav Mišák, Lukáš Prokop a kol. *Provozní vlastnosti obnovitelných zdrojů*. 1. vyd. Ostrava, 2014, 340 s. ISBN 978-80-260-6184-7
- [10] oEnergetice.cz [online]. [cit. 2015-3-20]. Dostupné z:
<<http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/prutokova-baterie/>>