

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Ing. Tomáš Králík

**METODIKA PRO TECHNICKO-EKONOMICKOU OPTIMALIZACI
VÝSTAVBY A PROVOZU ZAŘÍZENÍ PRO AKUMULACI
ELEKTRINY Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ**

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Řízení a ekonomika podniku

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, srpen, 2016

Disertační práce byla vypracována kombinované formě doktorského studia na Katedře ekonomiky, manažerství a humanitních věd Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Ing. Tomáš Králík
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd
Fakulta elektrotechnická ČVUT
Zikova 4, 166 29 Praha 6

Školitel: Doc. Ing. Jaromír Vastl, CSc
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd
Fakulta elektrotechnická ČVUT
Zikova 4, 166 29 Praha 6

Oponenti:

.....

.....

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru *Řízení a ekonomika Podniku* v zasedací místnosti č Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

předseda komise pro obhajobu disertační práce
ve studijním oboru
Řízení a ekonomika podniku
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Články, které se věnují dané problematice, lze principiálně rozdělit do dvou hlavních tematických skupin. První skupina odborných prací se zabývá ryze technickou stránkou akumulace, tzn. klasifikací akumulčních zařízení, srovnáním a hodnocením jejich specifických technických vlastností a v neposlední řadě i integrací (včetně optimalizačních úloh) akumulčních zařízení jako vhodného nástroje pro širší zapojení obnovitelných zdrojů energie do ES.

Druhou, menší, skupinou jsou práce řešící nejen vlastní technickou stránku provozu akumulčních zařízení, ale i jejich ekonomické parametry. Tuto skupinu lze následně rozdělit na práce pokrývající problematiku investičních a provozních nákladů a minoritní část, která se zabývá i ekonomickými přínosy zapojení akumulčních zařízení do ES.

Z provedené rešerše [1-38] lze vyvodit následující závěry:

- Většina publikací se věnuje technickým problémům spojeným s instalací a provozem akumulčních zařízení.
- Jednotlivé technologie jsou v literatuře podrobně porovnávány mezi sebou zejména z pohledu svých technických parametrů.
- Autoři se shodují, že v odhadech budoucího vývoje, a to jak v oblasti technických parametrů, tak i ekonomických, je vysoká míra nejistoty. Z teorie reálných opcí toto však znamená, že opce na odložení investice do akumulčních systémů bude mít relativně vysokou hodnotu.
- Neméně důležitou částí jsou ekologické aspekty celého životního cyklu akumulčních technologií, respektive dlouhodobá dostupnost nutných surovin pro výrobu.
- Velmi často řešenou úlohou je nalezení správného mixu zdrojů a akumulční technologie. Ukazuje se, že neexistuje jedna univerzální kombinace a pro každý specifický případ se výsledné portfolio může měnit.
- Problematiku instalace a hledání optimální velikosti i technologie akumulčního zařízení lze rozdělit na tři, někdy se částečně překrývající, oblasti:
 - Velké (systémové) aplikace přímo napojené do distribuční či přenosové soustavy v řádu stovek kW až stovek MW instalovaného výkonu v akumulaci.
 - Malé (často i ostrovní) instalace v jednotkách až stovkách kW.
 - Aplikace zajišťující nabíjení baterií pro elektromobily.

- Metody pro vlastní optimalizaci navržených modelů se liší, lze identifikovat jak jednoduché (lineární) modely, tak i velmi sofistikované postupy (heuristické, na bázi umělé inteligence atd.)
- Ekonomické hodnocení akumulace je prováděno třemi hlavními způsoby:
 - Prosté uvedení investičních výdajů obvykle vztažených na jednotku výkonu, méně často na jednotku energie.
 - Celkové roční náklady provozu akumulačních zařízení (a to jak s uvažováním časové ceny peněz, tak i bez ní).
 - Nad rámec nákladů jsou stanoveny a ohodnoceny i ekonomické benefity akumulačních zařízení. Nejčastějším, a nejjednodušším, popsaným příkladem je využití cenové arbitráže mezi cenou základního a špičkového zatížení.

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Pro vhodný algoritmus výběru optimální akumulační technologie je nutné znát nejen technologické parametry a omezení daného typu akumulačního systému, ale i ekonomické aspekty instalace a provozu daného zařízení. Z tohoto důvodu je tak hlavním cílem navrhnout metodický přístup pro hodnocení ekonomických benefitů provozu akumulačních zařízení instalovaných v rozvodnách distribuční soustavy. Identifikované a vyčíslené ekonomické benefity mohou výrazně pomoci při rozhodování o instalaci a provozu akumulačních zařízení a v návaznosti na ně i k dalšímu rozvoji obnovitelných zdrojů energie. K úspěšnému splnění tohoto hlavního cíle je nutno naplnit následující dílčí cíle:

- Analyzovat a statisticky popsat výrobu elektřiny z fotovoltaických elektráren v geograficky omezené lokalitě.
- Vypracovat postup pro popis pravděpodobností systémové odchylky ES a její cenu.
- Navrhnout metodický postup hodnocení ekonomické efektivity akumulačních zařízení.
- Verifikovat navržený metodický postup pro jeden uzlový bod distribuční soustavy.

Disertační práce vychází současně z popisu a analýzy současného stavu užití OZE a přehledu používaných přístupů k hodnocení ekonomické efektivity instalace akumulačních zařízení. Na základě výše uvedených cílů předkládané disertační práce byla zformulována následující primární výzkumná otázka (VO1):

Vytváří současný stav, pravidla a regulace v oblasti elektroenergetiky, současná podoba trhu s elektřinou, investiční a provozní výdaje a vlastní

ekonomické přínosy akumulčních technologií dostatečně motivační předpoklady a prostředí pro ekonomicky efektivní instalaci zařízení pro akumulaci elektrické energie?

V průběhu verifikace navržené metodiky pro stanovení ekonomických benefitů instalace akumulčních zařízení byla identifikována sekundární výzkumná oblast týkající se analýzy výroby elektřiny z fotovoltaických zdrojů v geograficky blízkých oblastech a v návaznosti na ni pak byla definována i sekundární výzkumná otázka (VO₂):

Vyazuje výroba elektřiny v geograficky blízkých fotovoltaických elektrárnách výraznou shodu/korelaci z pohledu výroby i v krátkých časových úsecích?

3. METODY ZPRACOVÁNÍ

Předkládaná práce využívá metodu smíšeného výzkumu. Pro primární výzkumnou otázku VO₁ jsou využívány metody a principy kvantitativního výzkumu. Pro oblast analýzy výroby elektřiny z fotovoltaických elektráren (oblast výzkumu odpovídající výzkumné otázce VO₂) pak metody kvalitativní. Pro účely sběru dat byla použita kombinace analýzy dokumentů (pro rešeršní část práce) a přímého měření (analyzovaná data z výroby fotovoltaických elektráren), respektive data-mining (data o velikosti a ceně odchylek).

Vlastní hodnocení ekonomické efektivity instalace akumulčních zařízení vyžaduje nejprve identifikaci všech relevantních vstupních údajů, které pak mohou vstoupit do „klasických“ metod hodnocení ekonomické efektivity investic (NPV, IRR). Jako největší problém se v současné době jeví korektní identifikace ekonomických benefitů, které vyvolá instalace akumulčního zařízení. Stanovením těchto benefitů se zabývá tato disertační práce.

Ekonomické přínosy instalace zařízení pro akumulaci elektrické energie většího rozsahu, s výjimkou přečerpávacích elektráren, nelze v současné době v podmínkách ČR odvodit přímo z ceny podpůrných služeb. Důvodem je nynější praktická nemožnost přímého prodeje podpůrných služeb poskytovaných provozovateli akumulčních zařízení. Dostupné akumulční technologie mají buď příliš malý výkon a nesplní tak formální náležitosti poskytovatelů podpůrných služeb, respektive pro větší akumulční zdroje v současnosti chybí verifikovaný certifikační proces.

Změny v diagramu by bylo možné ohodnocovat s využitím cenové arbitráže mezi base a peak produkty. Tento rozdíl se však v poslední době takřka smazává díky deformaci trhu s elektřinou, kterou lze identifikovat na všech trzích v EU, které zavedly masivní podporu vybraných zdrojů.

Z výše uvedeného tedy plyne, že jedinou využitelnou metodikou pro ocenění přínosů akumulční technologie je stanovení rozdílu v ohodnocení diagramu výroby s akumulčním zařízením a bez něj. Pokud má akumulční zařízení

ekonomický přínos, je při jeho provozu potřeba nakupovat méně vyrovnávací energie (odchylek) a hodnota tohoto diagramu je takto zvýšena. Další zvýšení hodnoty je způsobeno nejen zvýšením střední očekávané hodnoty oceňovaného diagramu ale i snížením volatility (očekávaného rizika) tohoto diagramu.

Pro účely ocenění se jeví jako nejvhodnější využít údajů z trhů s energií. Dodávku elektřiny z obnovitelného zdroje je nezbytné ocenit tak, aby její hodnota odpovídala tržním principům, které se při obchodování se silovou elektřinou v současnosti používají. V konkurenčním prostředí lze i elektřinu z libovolného zdroje ocenit nabídkou konkurentů, pokud je oceňovaný zdroj proti celému trhu natolik malý, že cenu nemůže prakticky ovlivnit. To platí pro obnovitelné zdroje energie beze zbytku, protože (zatím) současný objem elektřiny jimi nabízený na trhu je natolik malý, že neovlivní zásadně cenu silové elektřiny na trhu.

Hlavním použitým principem ocenění libovolného diagramu výrobce je pokrytí plánovaného diagramu takovým způsobem, aby celková hodnota prodané elektřiny byla maximální. Toto pokrytí se ovšem dokonale zdaří jen ve zcela výjimečných případech, prakticky vždy se vyskytnou odchylky mezi produkty nabízenými na energetických burzách s elektřinou a plánovaným (očekávaným/předpovězeným) diagramem. Tyto odchylky snižují hodnotu vyráběné elektřiny, protože musí být vyrovnány, ať již jsou kladné nebo záporné. O plánovanou hodnotu odchylek se snižuje výše uvedená hodnota výroby ve FVE, respektive dodané z akumulačního zařízení

Pro výpočet hodnoty plánovaného diagramu vyráběné elektřiny byl sestaven optimalizační model, řešený numerickými metodami. Předpokladem je pokrývání diagramu výroby po jednotlivých hodinách během roku. Základní kritériální funkce pro výpočet hodnoty diagramu výroby elektřiny definovaná v [39] je však pro reálné řešení značně komplikovaná. Počet proměnných je vysoký a pro řešení by bylo nutné použít výpočetní prostředky, které řešení takto rozsáhlých matematických modelů umožňují.

Pro možnost výpočtu na běžně dostupných výpočetních zařízeních bylo proto nutné vymyslet takové zjednodušené řešení, které by poskytovalo srovnatelné výsledky a násobně by zredukovalo požadavky na výpočetní výkon. Z tohoto důvodu byl navržen následující postup.

V prvním kroku se pokryje diagram výroby zdroje bez použití akumulace tak, aby se minimalizovaly odchylky. V dalším kroku se použije akumulační zařízení tak, aby se dále zmenšila velikost odchylek, a tím zvýšila celková hodnota diagramu výroby. Vzhledem k odhadům ceny akumulačního zařízení se bude toto zařízení používat v denním cyklu. Hodnota uložené a získané elektřiny (nabíjení a vybíjení) bude během 24 hodin shodná.

Důvodem pro denní cyklus je maximalizace ekonomických přínosů z pohledu maximálního využití kapacity akumulačního zařízení. Při plánování delších než denních cyklů, např. přesun výkonu mezi pracovními dny a víkendy, by

požadovaná kapacita akumulčních zařízení musela být násobně vyšší, respektive by se výrazně snížilo využití (snížení počtu cyklů akumulace generujících ekonomické přínosy). Vzhledem k velmi vysoké investiční náročnosti všech druhů akumulčních zařízení a snížení využití byla tato myšlenka zamítnuta již na počátku optimalizace.

Následně tak lze rozdělit komplikovanou úlohu, mající 17 472 proměnných na úlohy o 48 proměnných. Úlohu optimalizace nasazení akumulátoru během jednoho dne lze pak popsat následovně:

$$\sum_{t=1}^{24} (c_{o-,t} P_{A,o-,t} + c_{o+,t} P_{A,o+,t}) = MIN$$

kde:

$P_{A,o-,t}$	odchylka po užití akumulace (vybíjení)
$P_{A,o+,t}$	odchylka po užití akumulace (nabíjení)
$c_{o+,t}$	cena za kladnou odchylku v hodině t [Kč/MWh]
$c_{o-,t}$	cena za zápornou odchylku v hodině t [Kč/MWh]

Kriteriální funkce je minimalizující, protože počítá platby za odchylky, které se nasazením akumulátorů zmenší. Platby za odchylky budou tedy menší a je výhodné je snižovat co nejvíce.

Nové odchylky se spočítají jako:

$$P_{A,o-,t} = P_{o-,t} - P_{A-,t}$$

$$P_{A,o+,t} = P_{o+,t} - P_{A+,t}$$

kde:

$P_{A-,t}$	výkon vybíjející akumulátor
$P_{A+,t}$	výkon nabíjející akumulátor

Bilance nabíjení a vybíjení v jednom dni musí být vyrovnaná:

$$\sum_{t=1}^{24} P_{A-,t} - \sum_{t=1}^{24} P_{A+,t} = 0$$

Dále musí být v každé hodině splněna omezení akumulátoru. Akumulátor nesmí být vybit do záporných hodnot energie:

$$t \in \{1\}$$

$$E_{A,1} = E_{poc} + P_{A+,1} - P_{A-,1} \geq 0$$

$$\forall t \in \{2, \dots, 24\}$$

$$E_{A,t} = E_{A,t-1} + P_{A+,t} - P_{A-,t} \geq 0$$

kde:

$E_{A,t}$ energie akumulátoru v čase t [MWh]
 $E_{A,t-1}$ energie akumulátoru v čase $t - 1$ [MWh]

Současně nesmí být překročena celková kapacita akumulátoru E_{Acelk} , počáteční hodnota nabití akumulátoru je E_{poc} :

$$t \in \{1\}$$

$$E_{A,1} = E_{poc} + P_{A+,1} - P_{A-,1} \leq E_{Acelk}$$

$$\forall t \in \{2, \dots, 24\}$$

$$E_{A,t} = E_{A,t-1} + P_{A+,t} - P_{A-,t} \leq E_{Acelk}$$

Dále platí pro odchylky po užití akumulace a pro proměnné že:

$$\forall t \in \{1, \dots, 24\}$$

$$P_{A,0+,t} \geq 0$$

$$P_{A,0-,t} \geq 0$$

$$P_{A+,t} \geq 0$$

$$P_{A-,t} \geq 0$$

Všechny proměnné jsou kladné a pro optimalizaci lze použít lineární model.

4. VÝSLEDKY

Výpočet hodnoty ekonomického přínosu akumulačního zařízení byl proveden pro dva scénáře:

1) Scénář, ve kterém je uvažováno se stávajícím reálným oceněním odchylek

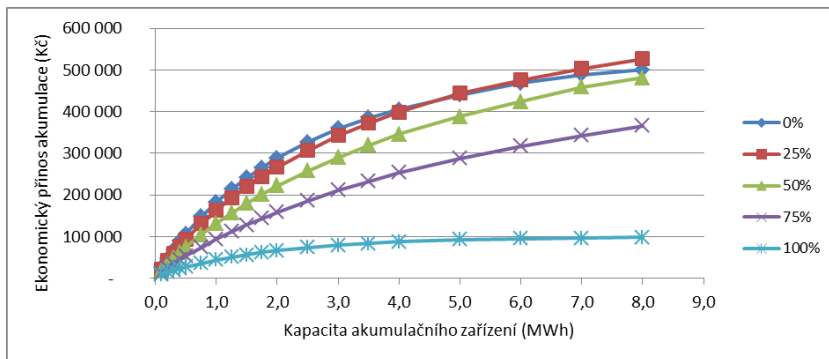
V tomto případě dochází díky pravděpodobnostnímu rozdělení kladných a záporných systémových odchylek a specificky nastavenému systému cen odchylek/proti odchylek k situaci, kdy se provozovateli FVE/distributorovi vyplatí záměrně způsobovat odchylky. V tomto případě bude docházet k cenové arbitráži a užití akumulčního zařízení nebude v daných podmínkách maximalizováno.

2) Scénář, ve kterém je uvažováno s pseudo oceněním odchylek

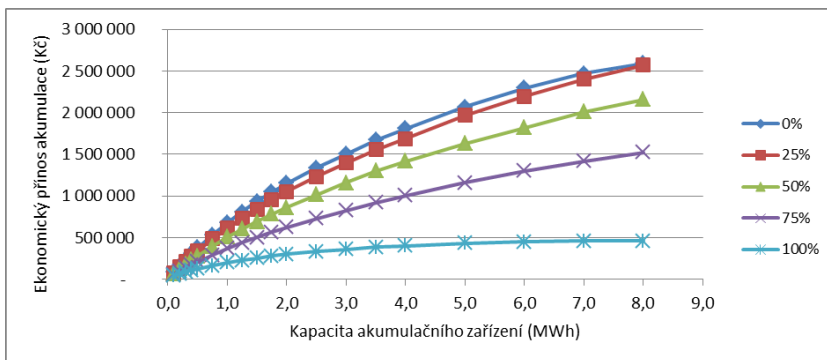
V tomto scénáři je hlavní myšlenkou snaha eliminovat problém arbitráže ze scénáře 1 pomocí premisy, že každá odchylka od sjednaného výrobního diagramu (bez ohledu na aktuální stav systémové odchylky) je z hlediska provozu soustavy špatná a jako taková by měla být penalizována. Pravděpodobnostní cena odchylky/proti odchylky je stejná jako v předcházejícím scénáři, ale na rozdíl od scénáře 1 je vždy placena (nemůže nastat situace, že by provozovatel FVE/distributor inkasoval jakékoliv finanční prostředky za porušení sjednaného výrobního diagramu).

Výsledná hodnota ekonomického přínosu akumulace při denním cyklu provozu závisí nejen na celkové kapacitě daného zařízení, ale i na velikosti průběžně udržovaného stupně nabití. Jak je patrné z následujících dvou grafů, s rostoucí velikostí stupně nabití výrazně klesá ekonomický přínos. Toto je však v přímém rozporu s požadavky na hospodárny provoz akumulčních zařízení (nerealizovat často stav plného vybití kvůli významnému poklesu životnosti baterie). Dále je patrné, že ekonomický přínos akumulace roste se zvyšováním kapacity akumulátoru. Tato závislost je konkávní tzn., s každým dalším zvýšením kapacity marginální přínos klesá.

Z výše uvedených důvodů je proto třeba optimalizovat nejen velikost akumulčního zařízení, ale i způsob jeho provozu.



Obrázek 44: Ekonomický přínos akumulace v závislosti na celkové kapacitě a velikosti průběžně udržovaného stupně nabití – varianta s reálně oceněnými odchylkami (tzn. arbitrážní situace)



Obrázek 45: Ekonomický přínos akumulace v závislosti na celkové kapacitě a velikosti průběžně udržovaného stupně nabití – varianta s pseudo-reálně oceněnými odchylkami (tzn. každá odchylka je pro soustavu nevhodná a finančně penalizovaná)

Z dosažených výsledků prezentovaných na výše uvedených grafech je patrné, že i při zjednodušeném modelu, který mírně nadhodnocuje přínos akumulace, ekonomický přínos není sto pokrýt byť jen provozní náklady akumulčního zařízení a akumulční zařízení tak nemůže být za daných podmínek ekonomicky efektivní.

5. ZÁVĚR

Hlavním cílem disertační práce byl návrh zcela nového způsobu ocenění ekonomických přínosů instalace akumulčního zařízení, tak aby bylo možné korektně posoudit ekonomické důsledky nasazení akumulace. V návaznosti na stanovené cíle v oblasti energetiky a klimatu EU do roku 2020, respektive do roku 2030, lze očekávat další posílení role obnovitelných zdrojů energie v rámci energetického mixu jednotlivých států EU. Tyto snahy potvrdily i závěry klimatické konference v Paříži.

Trend zvyšování podílu (intermitentních) OZE na celkové výrobě elektrické energie tak bude znamenat i zvýšené nároky na řízení sítí. Jedním ze slibných způsobů, jak eliminovat negativní vlivy intermitentních OZE na elektrizační soustavu a umožnit tak naplnění cílů EU v klimaticko-energetické oblasti je nasazení a využívání akumulčních zařízení. Dílčími cíli disertační práce bylo:

- **Analyzovat a statisticky popsat výrobu elektřiny z FVE v geograficky omezené lokalitě.**

Pro prvotní popis datového souboru, obsahující údaje o výrobě elektřiny z FVE, byly použity základní nástroje statistické analýzy. Na jejich základě byla identifikována nekonzistence v datovém setu

a následně upraven i vlastní datový set pro další analýzy. Pro verifikaci výzkumné otázky VO₂ byla následně zpracována i korelační analýza výroby 17 geograficky blízkých fotovoltaických elektráren. Na základě těchto vstupních analýz byl pak zpracován vlastní datový set výroby FVE pro následný verifikační výpočet ekonomické efektivity nasazení akumulace.

➤ **Vytvořit postup pro popis pravděpodobnostní systémové odchylky ES a její cenu.**

Pro vstupní analýzu odchylek soustavy a jejich cen byla využita data dostupná na OTE. Nejprve byla podrobena zkoumání pravděpodobnostní analýza odchylek v závislosti na pracovních dnech a dnech klidu. Neprokázal se významný rozdíl v pravděpodobnosti kladné/záporné systémové odchylky v závislosti na typu dne (pracovní, dny klidu). Ve druhém kroku byl statisticky analyzován vliv jednotlivých měsíců na velikost pravděpodobnosti jednotlivých odchylek. Zde již byl variační koeficient výraznější a z tohoto důvodu byly pro účely modelu vytvořeny matice pravděpodobností po měsících a hodinách dne, které na základě dat z předchozích 4 let uvádí pravděpodobnost, s jakou nastala kladná/záporná systémová odchylka

➤ **Navrhnout metodický postup hodnocení ekonomické efektivity akumulačních zařízení.**

Návrh tohoto hodnocení vychází z teorie ekonomického ocenění diagramu výrobního zdroje. Vlastní ocenění přínosů akumulace je pak založeno na skutečnosti, že optimální využití akumulačního zařízení v součinnosti s výrobou z OZE zvyšuje celkovou cenu výrobního diagramu (snižuje volatilitu tohoto zdroje). Toto zvýšení lze pak označit za ekonomický přínos instalace akumulačního zařízení. Pro účely verifikačního výpočtu byl následně navržen zjednodušující model optimálního nasazení akumulačního zařízení v denním cyklu respektující identifikovaná technická omezení.

➤ **Verifikovat navržený metodický postup pro jeden uzlový bod distribuční soustavy.**

V posledním kroku předkládané disertační práce byl proveden verifikační výpočet pro zapojení dvou různě velikých akumulačních zařízení do distribučního uzlu 110/22 kV. Lze konstatovat, že

dosažené výsledky ekonomických přínosů akumulčního zařízení nejsou dostatečně velké na to, aby (bez dodatečných finančních příjmů) zavadaly důvod toto zařízení instalovat. Z tohoto důvodu jsou v závěru práce navrženy další možné směry zvýšení ekonomických přínosů (a to jak peněžních tak i nepeněžních) akumulčních zařízení. Bez ohledu na negativní výsledek verifikačního výpočtu byla ověřena funkčnost a správnost nově navrženého metodického postupu hodnocení ekonomické efektivnosti akumulčních zařízení.

Vyhodnocení výsledků výzkumných otázek

V rámci předkládané disertační práce byly formulovány dvě výzkumné otázky:

Výzkumná otázka VO₁:

Vytváří současný stav, pravidla a regulace v oblasti elektroenergetiky, současná podoba trhu s elektřinou, investiční a provozní výdaje a vlastní ekonomické přínosy akumulčních technologií dostatečně motivační předpoklady a prostředí pro ekonomicky efektivní instalaci zařízení pro akumulaci elektrické energie?

Odpověď na VO₁:

Ne, v současné době je v podmínkách ČR stále nutno hledat a identifikovat další potenciální peněžní i nepeněžní benefity instalace akumulčních zařízení. Jako nejvíce slibnou oblastí se v současné chvíli jeví využití akumulčních zařízení jakožto zdroje podpůrných služeb. Detailně je toto diskutováno v následující kapitole 0.

Výzkumná otázka VO₂:

Vyazuje výroba elektřiny v geograficky blízkých fotovoltaických elektrárnách výraznou shodu/korelaci z pohledu výroby i v krátkých časových úsecích?

Odpověď na VO₂:

Ne, detailní analýzou korelačních koeficientů výroby 17 geograficky blízkých fotovoltaických elektráren zapojených do jednoho uzlu distribuční soustavy bylo prokázáno, že hodnota korelačních koeficientů s rostoucí hodnotou okamžitého výkonu jednotlivých FVE (nad 25%, 50 % a 75 %) výrazně klesá. Z tohoto důvodu nelze ani u geograficky blízkých FVE pracovat s konceptem „virtuálního zdroje“ a naopak je nutné respektovat veškeré jednotlivé výrobní diagramy.

Témata pro navazující výzkum:

Témata pro navazující výzkum identifikovaná v průběhu této práce lze rozdělit do dvou hlavních kategorií. První oblastí jsou **technicko-ekonomické** parametry akumulčních zařízení. Pro výběr a nasazení akumulční technologie jsou určující následující parametry:

- Výkon akumulčního zařízení na jednotku hmotnosti (objemu)
- Účinnost nabíjecího a vybíjecího cyklu
- Doba vybíjení
- Počet přípustných nabíjecích cyklů (životnost)
- Délka nabíjení
- Samovybíjení
- Degradace/opotřebení
- Reakční doba
- Regulační elektronika
- Maximální přípustná teplota provozu
- Modularita
- Napětí na článcích
- Investiční a provozní náklady

Jakékoliv zlepšení výše uvedených parametrů bude mít za následek větší možnost uplatnění akumulčních technologií, což ve svém důsledku může znamenat i zvýšení maximálního přípustného instalovaného výkonu intermitentních OZE. Výzkum v této oblasti však spadá do ryze technické oblasti a je tak mimo rámec zaměření této práce.

Druhou oblastí jak zvýšit uplatnitelnost akumulčních technologií a potažmo tak i intermitentních OZE je **zvýšení ekonomických přínosů akumulace**. Jako velmi slibnou oblastí, jak tohoto dosáhnout, může být opuštění maximalizace ekonomických přínosů pouze na principu arbitráže ceny elektřiny a investigace potenciálních možností provozu akumulčních zařízení jakožto zdrojů poskytujících podpůrné služby, zejména pak primární regulaci. První projekt jsou již v rámci EU ve výstavbě, konkrétně pak projekt 90 MW instalovaného výkonu bateriového systému typu Li-ion určeného pro primární regulaci. Projekt je rozfázován do 6 etap po 15 MW a první etapa již byla v létě 2016 dokončena (u 750 MW černouhelné elektrárny Lünena) a je v současné době v testovacím provozu. Dokončení zbývajících etap je naplánováno během roku 2017 [40].

V ČR je problematika bateriových systémů poskytujících podpůrné služby dosud nevyřešena. V současné době nejsou ve výstavbě žádné srovnatelné projekty a není ani zcela jasné, zdali Kodex přenosové soustavy dovoluje využití bateriových systémů pro poskytování primární regulace. Dle následující definice Kodexu přenosové soustavy [41]:

„Sumární regulační záloha (PR) – jedná se o točivou výkonovou zálohu, která je vyčleněna na blocích poskytujících podpůrnou službu primární regulace f bloku.“

je PR regulace definována jako **točivá** výkonová záloha, což bateriové systémy nesplňují. Toto je tak třeba do budoucna vyjasnit. Pro bateriové systémy totiž hovoří i fakt, že s postupným dožíváním fosilních zdrojů bude ubývat zařízení, která jsou primární regulaci schopna poskytovat.

Navazující výzkum v oblasti ekonomické optimalizace provozu akumulčních zařízení by tak měl řešit jak vlastní model provozování akumulčního zařízení, tak i předpisy, které tento provoz upravují.

Dalším způsobem, jak zvýšit penetraci akumulčních technologií, je identifikace a ocenění všech reálných opcí, které instalace akumulční technologie svému majiteli poskytuje. Příkladem reálných opcí pro akumulční zařízení instalované do uzlu distribuční soustavy může být opce odložení investic kvůli posílení distribuční sítě vyvolanému zvýšenou penetrací intermitentních OZE zapojených do daného distribučního uzlu.

Otázka vlivu akumulčních technologií na spolehlivost distribuční soustavy může být taktéž předmětem dalšího výzkumu. Podobně můžou akumulční technologie významně přispívat k zajištění funkce kritické infrastruktury v krizových stavech (blackout, přírodní katastrofy atd.), a tím snižovat potenciální výdaje a finanční i nefinanční ztráty.

Seznam v tezích použité literatury

- 1) A. Evans, V. Strezov a T. J. Evans, „Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 16, pp. 4141-4147, 30. 4. 2012
- 2) J. P. Hall a E. J. Bain, „Energy-storage technologies and electricity generation,“ *Energy Policy*, sv. 36, pp. 4352-4355, 18. 10. 2008.
- 3) T. Kousksou, P. Bruel, A. Jamil, T. El Rhafiki a Y. Zeraouli, „Energy storage: Applications and challenges,“ *Solar Energy Materials & Solar Cells*, sv. 120, pp. 59-80, 12. 9. 2013.
- 4) J. Baker, „New technology and possible advances in energy storage,“ *Energy Policy*, sv. 36, pp. 4368-4373, 4. 11. 2008
- 5) I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas a V. Efthimiou, „Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 13, pp. 1513-1522, 30. 9. 2008
- 6) T. Mahlia, T. Saktisahdan, A. Jannifar, M. Hasan a H. Matseelar, „Review of available methods and development on energy storage; technology update,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 33, pp. 532-545, 12. 3. 2014
- 7) K. Divya a J. Østergaard, „Battery energy storage technology for power systems - An overview,“ *Electric Power Systems Research*, pp. 511-520, 11. 12. 2008
- 8) H. Ibrahim, A. Ilinca a J. Perron, „Energy storage systems-Characteristics and comparisons,“ *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, sv. 12, pp. 1221-1250, 5. 1. 2007
- 9) R. Dell a D. Rand, „Energy storage – a key technology for global energy sustainability,“ *Journal of Power Sources*, sv. 100, pp. 2-17, 2001
- 10) H. Chen, T. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li a Y. Ding, „Progress in electrical energy storage system - critical review,“ *Progress in Natural Science*, sv. 19, pp. 291-312, 27. 2008
- 11) F. Díaz-González, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt a R. Villafañila-Robles, „A review of energy storage technologies for wind power applications,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 16, pp. 2154-2171, 18. 2. 2012.
- 12) J. Kaldellis, D. Zafirakis a K. Kavadias, „Techno-economic comparison of energy storage systems for island autonomous electrical networks,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 13, pp. 378-392, 2. 11. 2007
- 13) R. Doucette a M. McCulloch, „A comparison of high-speed flywheels, batteries and ultracapacitors on the bases of cost and fuel economy as the energy storage system in a fuel cell based hybrid electric vehicle,“ *Journal of Power Sources*, sv. 196, pp. 1163-1170, 6. 9. 2010
- 15) T. Mahlia, T. Saktisahdan, A. Jannifar, M. Hasan a H. Metseelar, „A review of available methods and development on energy storage; technology update,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 33, pp. 532-545, 12. 3. 2014
- 16) J. Kondoh, I. Ishii, H. Yamaguchi, A. Murata, K. Otani, K. Sakuta, N. Higuchi, S. Sekine a M. Kamimoto, „Electrical energy storage systems for energy networks,“ *Energy Conversion and Management*, sv. 41, pp. 1863-1874, 7. 2. 2000
- 17) R. Fares, J. Meyers a M. Webber, „A dynamic model-based estimate of the value of a vanadium redox flow battery for Freq regulation in Texas,“ *Applied Energy*, sv. 113, pp. 189-198, 7. 8. 2013
- 18) R. Komiyama a F. Yasumasa, „Assessment of massive integration of photovoltaic system considering rechargeable battery in Japan with high time resolution optimal power generation mix model,“ *Energy Policy*, sv. 66, pp. 73-89, 4. 12. 2013
- 19) N. Wade, P. Taylor, P. Lang a P. Jones, „Evaluating the benefits of an electrical energy storage system in a future smart grid,“ *Energy Policy*, sv. 38, pp. 7180-7188, 17. 8. 2010

- 20) M. Beaudin, H. Zareipour, A. Schellenberglobe a W. Rosehart, „energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review,“ *Energy for Sustainable Development*, sv. 14, pp. 302-314, 27. 9. 2010
- 21) D. Connolly, H. Lund, B. Mathiesen, E. Pican a M. Leahy, „The technical and economic implications of integrating fluctuating renewable energy using energy storage,“ *Renewable Energy*, pp. 47-60, 4 1. 2012
- 22) T. Daim, X. Li, J. Kim a S. Simms, „Evaluation of energy storage technologies for integration with renewable electricity,“ *Environmental Innovation and Societal Transitions*, sv. 3, pp. 29-49, 12. 5. 2012
- 23) S. Koochi-Kamali, V. Tyagi, N. Rahim, N. Panwar a H. Mokhlis, „Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 25, pp. 135-165, 20. 5. 2013
- 24) N. Liu, Z. Chen, J. Liu, X. Tang, X. Xiao a J. Zhang, „Multi-objective optimization for component capacity of the PV based battery switch stations: Towards benefits of economy and environment,“ *Energy*, sv. 64, pp. 779-792, 4. 12. 2013
- 25) N. C. Nair a N. Garimella, „Battery energy storage system - Assessment for small scale renewable energy integration,“ *Energy and Buildings*, sv. 42, pp. 2124-2130, 4 7. 2010
- 26) O. Toledo, D. Filho a A. Diniz, „Distributed photovoltaic generation and energy storage systems: A review,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 14, pp. 506-511, 7. 8. 2009
- 27) A. Zahedi, „Maximizing solar PV energy penetration using energy storage technology,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 866-870, 2 9. 2010
- 28) A. Yoza, A. Yona, T. Senjyu a T. Funabashi, „Optimal capacity and expansion planning methodology of PV and battery in smart house,“ *Renewable Energy*, pp. 25-33, 31 3. 2014
- 29) X. Wang, G. Gaustad, C. Babbitt a K. Richa, „Economies of scale for future lithium-ion battery recycling infrastructure,“ *Resources, Conservation and Recycling*, sv. 83, pp. 53-62, 16. 11. 2013
- 30) J. Speirs, M. Contestabile, Y. Houari a R. Gross, „The future of lithium availability for electric vehicle batteries,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 35, pp. 183-193, 22. 4. 2014
- 31) P. Denholm a G. Kulcincki, „Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems,“ *Energy Conversion and Management*, sv. 45, pp. 2153-2172, 26. 10. 2003
- 32) D. Rastler, *Electricity Energy Storage-A White Paper Primer on Applications, Costs and Benefits (1020676)*, Palo Alto: ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE , 2010
- 33) B. Battke, T. Schmidt, Grosspietsch, D. a V. Hoffmann, „A review and probabilistic model of lifecycle costs of stationary batteries in multiple applications,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, sv. 25, pp. 240-250, 24. 5. 2013
- 34) I. Pawel, „The cost of storage-how to calculate the levelized cost of stored energy and applications to renewable energy generation,“ *Energy Procedia*, sv. 46, pp. 68-77, 2014
- 35) J. Escudero-González a P. López-Jiménez, „Iron redox battery as electrical energy storage system in the Spanish energetic framework,“ *Electrical Power and Energy Systems*, sv. 61, pp. 421-428, 23. 3. 2014
- 36) A. Shcherbakova, A. Kleit a J. Cho, „The value of energy storage in South Korea's electricity market: A Hotelling approach,“ *Applied Energy*, sv. 125, pp. 93-102, 16. 4. 2014
- 37) P. Nardi, „Transmission network unbundling and grid investments: Evidence from the UCTE countries,“ *Utilities Policy*, pp. 50-58, 2012

- 38) K. Gugler, M. Rammerstorfer a S. Schmitt, „Ownership unbundling and investment in electricity markets — A cross country study,“ *Energy Economics*, sv. 40, pp. 702-713, 14. 9. 2013
- 39) J. Knápek, B. M., O. Starý, J. Vašíček a J. Vastl, „Studie k problematice obnovitelných zdrojů energie a kombinované výroby elektřiny a tepla,“ Elektra, Praha, 2009
- 40) P. Magazine, „Germany: First 15 MW Steag Storage System Complete,“ 8. 7. 2016. [Online]. Available: http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/germany--first-15-mw-steag-storage-system-complete_100025322/#axzz4E137xXvj. [Přístup získán 8. 8. 2016]
- 41) ČEPS, „KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY - Část II. Podpůrné služby (PpS),“ 1. 2014. [Online]. Available: https://www.eru.cz/documents/10540/479698/CII_k_prip.pdf/098792a3-e424-4a52-a1a3-a51a983bf8bc. [Přístup získán 8. 8. 2016]

Seznam prací disertanta vztahujících se k disertaci

Publikace v impaktovaných časopisech

Článek čekající na recenzi v International Journal of Photoenergy (IF 1,23) - How aggregation of individual PV load diagrams can influence the overall power deviation in the small geographic region

Kapitola v knize

- 1) KRÁLÍK, T. a BENEŠ, M. Economic Evaluation of Energy Storage Using the Power Deviation Prices - the Load Diagram Pricing Method. In: KNÁPEK, J., HAAS, R., a AJANOVIC, A., eds. Energy for Sustainable Development IV: Evidence from Czech Republic and Austria. Praha: Wolters Kluwer ČR, a. s.. 2015, s. 131-142. ISBN 978-80-7478-993-9. Podíl 51 %

Publikace v recenzovaných časopisech

- 2) HROCHOVÁ, M., et al. Renewable sources integration in context to electricity market, case Czech Republic. Economy And Entrepreneurship. 2015, 9(1), s. 34-41. ISSN 1999-2300. Podíl: 15 %

Ostatní publikace

- 3) KRÁLÍK, T. Grid Integration of Renewable Energy Sources. In: HUSNÍK, L., ed. POSTER 2010 - Proceedings of the 14th International Conference on Electrical Engineering. POSTER 2010 - 14th International Conference on Electrical Engineering. Praha, 06.05.2010. Praha: ČVUT v Praze, FEL. 2010, ISBN 978-80-01-04544-2.
- 4) KRÁLÍK, T. INTERMITTENT RENEWABLE ENERGY SOURCES-CURRENT STATUS AND LIMITING FACTORS FOR THE FUTURE DEVELOPMENT. In: VILEMAS, J., ed. Energy Economy, Policies and Supply Security: Surviving the Global Economic Crisis. 11th IAEE European Conference - Energy Economy, Policies and Supply Security: Surviving the Global Economic Crisis. Vilnius, 25.08.2010 - 28.08.2010. Cleveland: IAEE. 2010, ISSN 1559-792X.
- 5) KRÁLÍK, T. Electricity Storage for Power Systems. In: POSTER 2011 - 15th International Student Conference on Electrical Engineering. POSTER 2011 - 15th International Student Conference on Electrical Engineering. Praha, 12.05.2011. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. 2011, s. 1-5. ISBN 978-80-01-04806-1.
- 6) KRÁLÍK, T. ZAŘÍZENÍ PRO SKLADOVÁNÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE Z PRINCIPÁLNĚ NEŘÍDITELNÝCH OZE. In: Power Engineering 2011. Power Engineering 2011. Tatranské Matliare, 07.06.2011 - 09.06.2011. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava. 2011, s. 1-6. ISBN 978-80-89402-40-3.
- 7) KNÁPEK, J. a KRÁLÍK, T. Jak dál podporovat OZE po roce 2020. Pro-Energy magazín. 2013, (4), s. 54-57. ISSN 1802-4599. Podíl 40 %

- 8) HROCHOVÁ, M., et al. RES integration impact on market environment in the Czech Republic. In: POSTER 2014 - 18th International Student Conference on Electrical Engineering. 18th International Student Conference on Electrical Engineering. Praha, 15.05.2014. Prague: Czech Technical University. 2014, ISBN 978-80-01-05499-4. Podíl: 25 %
- 9) HROCHOVÁ, M., KNÁPEK, J., a KRÁLÍK, T. RES LOAD DIAGRAM ANALYSES - STEP TOWARDS VIRTUAL POWER PLANT [online]. In: Sustainable Energy Policy and Strategies for Europe. 14th IAEE European Energy Conference 2014. Rome, 28.10.2014 - 31.10.2014. Cleveland: IAEE. 2014, Podíl: 20 %

Výše uvedené práce jsou bez citačních ohlasů.

SUMMARY

The utilization of fossil fuels as a dominant energy source is not sustainable in long term, especially due to the current estimation of fossil fuels reserves. In a short term fossil fuel usage is limited by the security situation at the regions, in which those fuels are mined. Therefore it is only logical, considering also ecological impact of utilization of fossil fuels that especially developed countries are seeking for alternative energy sources that can ensure long term stability, such as renewables.

Renewable energy sources (RES) combine a vast range of positive attributes. They are widely available, their operating costs can be extremely low (wind, photovoltaics, hydro) and they are not polluting harmful emissions (with the exception on CO₂ neutral biomass). These renewable sources can also increase the energy security and self-sufficiency of energy supply.

However the key limiting factor for extensive further development of RES is the fact that some of these sources cannot be controlled in terms of their load diagram. It is therefore impossible to fully substitute fossil fuels with renewables without additional technical solution now.

Energy storage units can overcome this fundamental drawback of RES. It is however necessary to solve not only the technical problems connected to energy storage utilization but also the economic consequence of installation and operation of such units. This thesis is therefore aimed at energy storage economy, more precise it is focused on economic benefits of energy storage installation and operation.

The proposed innovating methodology for calculation of energy storage economic benefits is based on the difference of valuation of load diagram with and without energy storage unit.

RESUMÉ

Využívání fosilních paliv jako dominantního zdroje energie je, při současných odhadech jejich těžitelných zásob a objemu produkovaných emisí při jejich využívání, dlouhodobě neudržitelné. V krátkodobém horizontu pak využití fosilních paliv komplikuje i bezpečnostně politická situace v oblastech s významnou těžbou. Z tohoto pohledu je logické, že zejména vyspělé země hledají alternativní (obnovitelné) zdroje energie, které mají potenciál tato fosilní paliva nahradit.

Obnovitelné zdroje v sobě kumulují řadu výhod. Jsou všeobecně dostupné a jejich provozní náklady mohou být v některých případech (sluneční, větrné či vodní zdroje) extrémně nízké v porovnání s klasickými zdroji energie. Jejich využívání nevyvolává emise CO₂ (s výjimkou CO₂ neutrálních zdrojů využívajících biomasu) ani jiných škodlivých látek do ovzduší, dokáží zvýšit energetickou bezpečnost a soběstačnost atd.

Značnou překážkou pro využití některých (intermitentních) obnovitelných zdrojů je však jejich neřiditelnost. Z tohoto důvodu tak není možné, bez dodatečných technických řešení, využívat tyto intermitentní zdroje v takové míře, aby mohly plně nahradit klasické (fosilní) zdroje.

Zařízení pro akumulaci energie však tuto fundamentální překážku dokáží technicky vyřešit. Pro plné využití akumulčních zařízení je však nutno také vyřešit ekonomické aspekty instalace a provozu, což si tato práce klade za cíl.

Navrhovaný inovativní metodický postup ohodnocení ekonomických benefitů instalace a provozu akumulčních zařízení je principiálně založen na rozdílu v ohodnocení diagramu výroby s akumulčním zařízením a bez něj. Pokud má tedy akumulční zařízení ekonomický přínos, je při jeho provozu potřeba nakupovat méně vyrovnávací energie (odchylek) a hodnota původního výrobního diagramu je takto zvýšena.