ČESKÁ ELEKTROTECHNICKÁ SPOLEČNOST PRAHA

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

47. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE



VELKÉ KARLOVICE 2026

NZEE

www.nzee.cz

ČESKÁ ELEKTROTECHNICKÁ SPOLEČNOST PRAHA,
VUT V BRNĚ

47. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

www.nzee.cz

VELKÉ KARLOVICE 2026

Organizační výbor konference:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
Ing. Ladislav Chladil, Ph.D.
Gabriela Dominiková
Ing. Jiří Libich, Ph.D.

Programový výbor konference:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
doc. Ing. Zdeněk Dostál, CSc.
Ing. Ladislav Chladil, Ph.D.
prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.
prof. Ing. Dušan Kudelas, Ph.D.
Ing. Jiří Libich, Ph.D.
doc. Ing. Vítězslav Novák, Ph.D.
prof. Ing. Peter Tauš, Ph.D.
doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
prof. RNDr. Petr Vanýsek, CSc.

Výbor recenzentů:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
doc. Ing. Zdeněk Dostál, CSc.
Ing. Ladislav Chladil, Ph.D.
doc. Ing. Dušan Kudelas, Ph.D.
doc. Ing. Petr Křivík, Ph.D.
doc. Ing. Vítězslav Novák, Ph.D.
Ing. Pavel Šimon, CSc.
prof. Ing. Peter Tauš, Ph.D.

ISBN 978-80-02-03119-2

47. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Tato publikace obsahuje zkrácená znění původních sdělení a některých referátů přednesených na mezinárodní konferenci 47. Nekonvenční zdroje elektrické energie uspořádané ve Velkých Karlovicích ve dnech 1. - 3. června 2026 Českou elektrotechnickou společností (UOS pro chemické zdroje elektrické energie) a Fakultou elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně.

Textové podklady jednotlivých příspěvků byly pořizovány přímo z originálů dodaných autory. Z tohoto důvodu vydavatel neodpovídá za jazykovou ani věcnou správnost uveřejněných textů.

OBSAH SBORNÍKU

O.Čech, A. Šimek, L. Chladil, P. Bača a T. Kazda: Materiály pro sodno-iontové akumulátory 6

Z. Dostál: Prepínač poľa FV panelov 9

M. Hošek: Ekonomická realita obnovitelných zdrojů v praxi 12

L. Chladil: Energie do zásoby: technologie akumulace mezi laboratoří a průmyslem, které mohou změnit pravidla hry 14

K. Jandová, J. Vaněk a M. Janda: Stav fotovoltaiky v ČR 19

K. Jaššo: Elektrochemická impedanční spektroskopie Li-ion baterií 21

J. Jilčík a P. Bača: Záporná elektroda pro Na-ion akumulátory na bázi olova 25

J. Klement: Fotovoltaika, baterie a řídicí systém – praktické zkušenosti s provozem 29

O. Klvač, D. Trochta, L. Novák a T. Kazda: Solid-State Batteries in SEM: Sample Preparation and Imaging 33

D. Kudelas a A. Novysedlák: Vliv faktorů ovlivňujících přesnost predikce výroby energie z větrných elektráren vzhledem k ekonomikě projektu 35

J. Kurcz, J. Longauer, J. Poničan, P. Kozlík a R. Behul: Predikcia výroby FVE a skutočná výroba z FVE a jej využitie v komplexnom energetickom systéme výrobnej haly ÚMMS SAV 40

J. Longauer, P. Kurcz, J. Poničan a P. Oslanec: Hybridné panely PVT v reálnej prevádzke na ÚMMS SAV 45

J. Poničan, R. Adamčík, K. Iždinský, J. Španielka, M.Štepánek a F. Simančík: Plne bezemisný spaľovací motor existuje. 49

M. Řípa: Termojaderné hity 52

P. Šafl: Proč je energetické společenství budoucnost 56

M. Šedina: Integrace akumulátorů do bateriových systémů v elektromobilitě 60

A. Šimek, T. Kazda a O. Čech: Technologický pokrok Na-ion baterií a jejich integrace do současného trhu 63

J. Vaněk a P. Maule: Cesta k profesionalitě: Evoluce profesní certifikace a budoucnost fotovoltaiky v Česku 66

P. Vanýsek: Baterie a teplo: Tepelně aktivovaná baterie 69

MATERIÁLY PRO SODNO-IONTOVÉ AKUMULÁTORY

O.Čech, A. Šimek, L. Chladil, P. Bača a T. Kazda

Ústav elektrotechnologie, Vysoké učení technické v Brně, Technická 10, Brno

Abstract

Sodium-ion batteries represent one of the most significant alternatives to conventional lithium-ion batteries. This is mainly due to the high abundance of sodium, lower raw material costs, reduced dependence on critical materials, and the prospect of cheaper production of energy storage systems for stationary applications as well as electric mobility. Current research is primarily focused on the development of new cathode materials, optimization of carbon-based anodes, stabilization of the electrode–electrolyte interface, and the development of solid electrolytes. This paper summarizes the main directions of current research, the most important material systems, and promising trends that may influence the future of sodium-ion technologies.

Úvod

Rostoucí poptávka po akumulaci energie vede k intenzivnímu hledání alternativ ke klasickým lithium-iontovým bateriím. Přestože lithium-iontové technologie dominují trhu díky vysoké energetické hustotě a technologické vyspělosti, jejich další rozvoj naráží na několik omezení. Mezi nejvýznamnější patří omezené zásoby lithia, geopolitická koncentrace těžby kritických surovin, vysoké náklady na kobalt a nikl a rostoucí cena výroby. Sodno-iontové akumulátory představují perspektivní alternativu zejména pro aplikace, kde není kritická maximální energetická hustota, ale důležitá je nízká cena, bezpečnost a dlouhá životnost. Sodík je výrazně dostupnější než lithium a lze jej získávat z běžně dostupných zdrojů včetně mořské vody. Významnou výhodou je také možnost využití levnějších přechodových kovů, zejména železa a manganu. Významný zájem o sodno-iontové technologie v posledních letech vedl k rychlému rozvoji výzkumu v oblasti nových elektrodových materiálů, elektrolytů a stabilizace elektrochemických rozhraní. Výzkum se zaměřuje především na zvýšení energetické hustoty, prodloužení životnosti a zlepšení rychlonabíjecích schopností.

Základní princip a specifika sodno-iontových baterií

Princip fungování sodno-iontových baterií je podobný lithium-iontovým systémům. Během nabíjení a vybíjení dochází k reverzibilní interkalaci iontů sodíku mezi katodou a anodou. Přesto však existují zásadní rozdíly vyplývající z fyzikálních vlastností sodíku. Iont Na^+ má větší iontový poloměr než Li^+, což způsobuje pomalejší difuzi a výraznější objemové změny během cyklování. Tyto změny mohou vést k mechanické degradaci materiálů a ke zhoršení elektrochemické stability. Mezi hlavní výhody sodno-iontových systémů patří nízká cena surovin, vysoká dostupnost sodíku, možnost použití levnějších katodových materiálů, lepší tepelná stabilita a vyšší bezpečnost některých chemických systémů. Naopak mezi hlavní nevýhody patří nižší energetická hustota, větší objemové změny elektrod, horší stabilita některých elektrochemických rozhraní a nižší cyklická stabilita některých katodových materiálů. Přes uvedená omezení jsou sodno-iontové technologie považovány za velmi perspektivní zejména pro stacionární energetická úložiště.

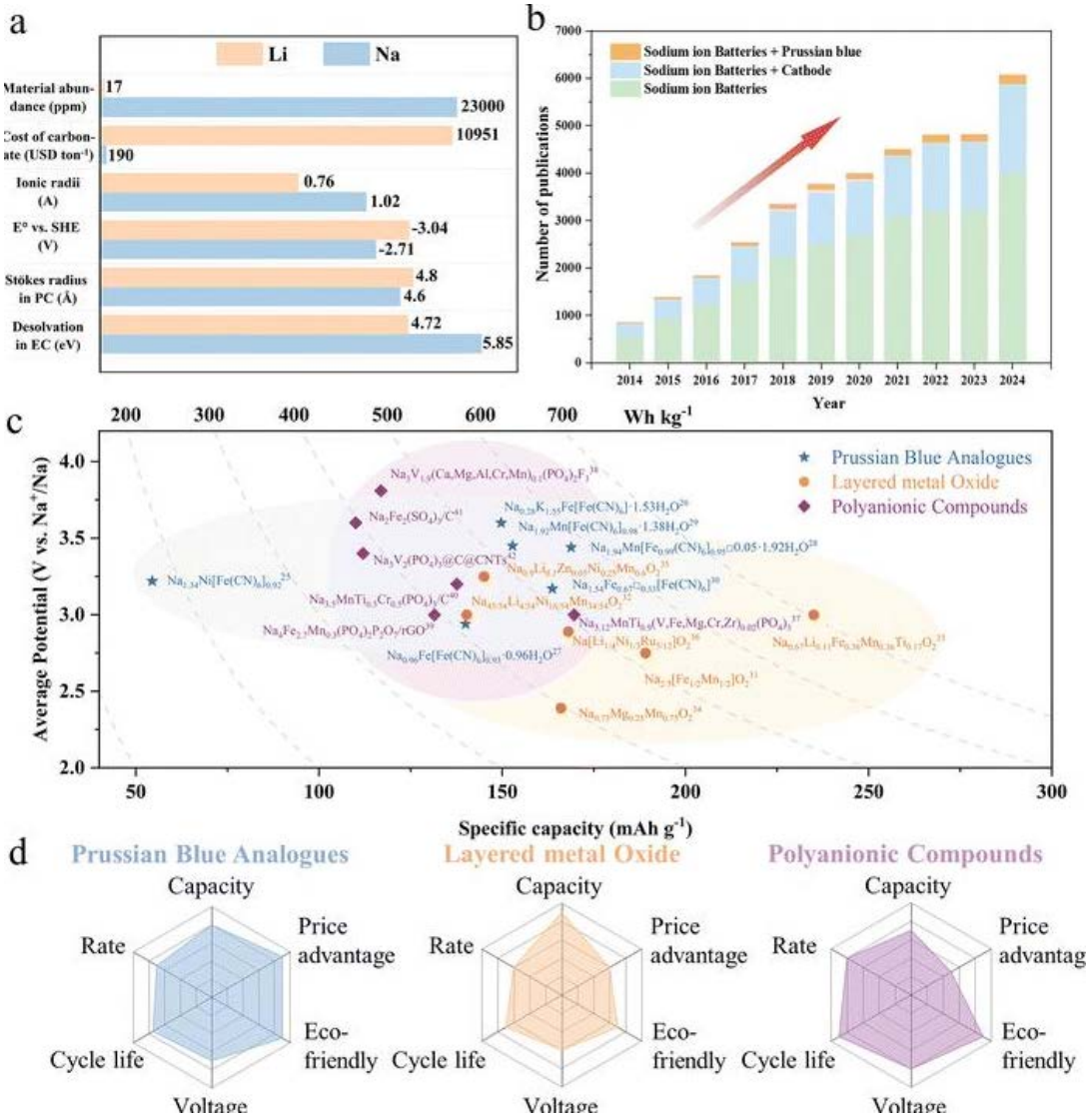
Vrstvené oxidové katody

Vrstvené oxidy představují jednu z nejvýznamnějších skupin katodových materiálů pro sodno-iontové akumulátory. Obecně lze jejich strukturu popsat vztahem NaxTMO2, kde TM představuje přechodový kov, například mangan, železo, nikl nebo měď. Tyto materiály poskytují relativně vysokou kapacitu i pracovní napětí. Díky tomu patří mezi nejperspektivnější kandidáty pro budoucí vysokokapacitní sodno-iontové články. Významným problémem vrstvených oxidů je však strukturální nestabilita během cyklování. Při změnách koncentrace sodíku dochází k fázovým přechodům mezi strukturami typu P2 a O2, což vede k degradaci materiálu a postupné ztrátě kapacity. Současný výzkum se zaměřuje především na stabilizaci krystalové struktury, optimalizaci složení přechodových kovů, řízení oxygen-redox reakcí, povrchové modifikace částic a dopování alkalickými kovy. Významného zlepšení stability bylo dosaženo například u draslíkem stabilizovaných P2 materiálů, kde malé množství draslíku omezuje nežádoucí fázové transformace a zvyšuje životnost katody.

47. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Prussian Blue Analogues

Prussian Blue Analogues představují jednu z nejvíce komercializačně připravených skupin katodových materiálů pro sodno-iontové baterie. Typická struktura těchto materiálů je založena na otevřené kubické mřížce $Na_xM[Fe(CN)_6]$. Velkou výhodou PBA materiálů je otevřená krystalová struktura, která umožňuje velmi **rychlou difuzi iontů sodíku**. Díky tomu dosahují vysokých výkonových parametrů a dobré rychlonabíjecí schopnosti. Významnou výhodou jsou rovněž nízké výrobní náklady, využití levných prvků na bázi železa a manganu a relativně jednoduchá syntéza. Hlavní nevýhodou těchto materiálů je citlivost na obsah vody a přítomnost vakancí v krystalové struktuře. Voda může negativně ovlivňovat elektrochemickou stabilitu a snižovat životnost článku. Současný výzkum se proto zaměřuje na optimalizaci obsahu vody, stabilizaci cyanidových vazeb, elektronovou optimalizaci struktury a řízení vakancí v krystalové mřížce. PBA materiály jsou dnes považovány za velmi perspektivní zejména pro levná stacionární úložiště energie.



Obr. 1: Srovnání vlastností jednotlivých chemií kladných elektrod sodno-iontových akumulátorů.

Polyaniontové katodové materiály

Další významnou skupinu představují polyaniontové materiály, mezi které patří například Na3V2(PO4)3. Tyto materiály jsou charakteristické vysokou strukturální stabilitou a dobrou bezpečností. Polyaniontové skupiny stabilizují krystalovou strukturu a omezují degradaci během cyklování. Mezi hlavní výhody těchto materiálů patří vysoká tepelná stabilita, bezpečný provoz, dlouhá životnost a dobrá stabilita při rychlém nabíjení. Nevýhodou bývá nižší elektrická vodivost a často také nižší kapacita ve srovnání s vrstvenými oxidy. Současný výzkum se zaměřuje zejména na zvyšování elektrické vodivosti pomocí uhlíkových povlaků, nanostrukturování a optimalizace krystalové struktury. Tyto materiály jsou velmi perspektivní pro aplikace vyžadující vysokou bezpečnost a dlouhou životnost.

47. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Uhlíkové anody typu hard carbon

Hard carbon představuje v současnosti nejrozšířenější anodový materiál pro sodno-iontové akumulátory. Na rozdíl od grafitu, který není pro ukládání sodíku příliš vhodný, disponuje hard carbon neuspořádanou strukturou s přítomností nanopórů a defektů umožňujících efektivní ukládání iontů sodíku. Tyto materiály se obvykle připravují pyrolýzou biomasy, ligninu, celulózy nebo polymerních prekurzorů. Významnou výhodou je možnost využití levných a obnovitelných zdrojů uhlíku. Současný výzkum se zaměřuje především na optimalizaci porozity, řízení velikosti nanopórů, heteroatomové dopování a stabilizaci vrstvy SEI. Jedním z hlavních problémů hard carbon anod zůstává nízká počáteční coulombická účinnost, která je spojena s vysokou spotřebou sodíku při tvorbě rozhraní elektroda–elektrolyt. Významným směrem současného výzkumu je rovněž využití metod strojového učení a atomistických simulací pro analýzu mechanismů ukládání sodíku v neuspořádaných uhlíkových strukturách.

Elektrolyty a pevné sodné elektrolyty

Elektrolyt představuje jednu z klíčových součástí sodno-iontového článku, protože významně ovlivňuje bezpečnost, životnost i výkonové parametry baterie. Klasické kapalné elektrolyty jsou obvykle založeny na organických rozpouštědlech obsahujících sodné soli.V posledních letech se intenzivně rozvíjí výzkum fluorovaných elektrolytů a aditiv umožňujících stabilizaci rozhraní elektroda–elektrolyt. Cílem je omezení degradace elektrod a prodloužení životnosti článků.Významnou oblast představují pevné elektrolyty, které mají potenciál výrazně zvýšit bezpečnost akumulátorů a umožnit využití kovového sodíku jako anody. Výzkum se soustředí zejména na sulfidy, chloridy, NASICON struktury a anti-perovskitové materiály. Hlavní výzvou pevných elektrolytů zůstává dosažení dostatečné iontové vodivosti a stabilního kontaktu mezi elektrodami a elektrolytem.

Degradace a stabilita elektrochemických rozhraní

Jedním z největších problémů sodno-iontových baterií je stabilita elektrochemických rozhraní. Během cyklování dochází ke vzniku vrstev SEI a CEI, které významně ovlivňují životnost a účinnost článků. Vzhledem k vyšší reaktivitě sodíku bývají tyto vrstvy méně stabilní než u lithium-iontových systémů. Dochází k jejich opakovanému rozpadu a obnovování, což vede ke ztrátám aktivního sodíku a postupnému snižování kapacity. Současný výzkum se zaměřuje na chemickou stabilizaci rozhraní pomocí elektrolytových aditiv, povrchových úprav elektrod a vývoje nových typů elektrolytů. Významnou roli hrají pokročilé analytické metody umožňující detailní studium degradace během provozu článků.

Závěr

Sodno-iontové akumulátory představují velmi perspektivní směr současného výzkumu elektrochemických zdrojů energie. Jejich hlavní výhodou je vysoká dostupnost sodíku, nižší cena materiálů a možnost využití ekologičtějších a levnějších chemických systémů. Současný výzkum se soustředí především na vývoj stabilních vrstvených oxidů, optimalizaci Prussian Blue Analogues, zdokonalení hard carbon anod a vývoj pokročilých elektrolytů. Významnou oblastí je rovněž stabilizace elektrochemických rozhraní a vývoj pevných elektrolytů. Přestože sodno-iontové baterie zatím nedosahují energetické hustoty nejmodernějších lithium-iontových systémů, jejich potenciál pro levná a bezpečná energetická úložiště je mimořádně vysoký. Očekává se, že během následujících let budou hrát stále významnější roli zejména v oblasti stacionární akumulace

Poděkování

Publikace vznikla za finanční podpory projektu specifického výzkumu na VUT (projekt č. FEKT-S-26-8946)

Literatura

[1] Hwang, J. Y., Myung, S. T., Sun, Y. K. Sodium-ion batteries: present and future. Chemical Society Reviews, 2017.
[2] Yabuuchi, N. et al. Research development on sodium-ion batteries. Chemical Reviews, 2014.
[3] Delmas, C. Sodium and sodium-ion batteries: 50 years of research. Advanced Energy Materials, 2018.
[4] Slater, M. D. et al. Sodium-ion batteries. Advanced Functional Materials, 2013.
[5] Li, M. et al. Layered oxide cathodes for sodium-ion batteries. Accounts of Chemical Research, 2023.
[6] Jian, Z. et al. Prussian blue analogues for rechargeable batteries. Nature Reviews Materials, 2022.
[7] Stevens, D. A., Dahn, J. R. High capacity anode materials for sodium-ion batteries. Journal of The Electrochemical Society, 2000.
[8] Xu, Y. et al. Hard carbon materials for sodium-ion batteries. Advanced Energy Materials, 2024.
[9] Pan, H. et al. Room-temperature stationary sodium-ion batteries. Nature Energy, 2023.
[10] Kim, H. et al. Recent progress in electrode materials for sodium-ion batteries. Advanced Energy Materials, 2016.

PREPÍNAČ POĽA FV PANELOV

Z. Dostál

Pod slivkou 519/5, 031 04 Liptovský Mikuláš, Slovensko, e-mail zdeno.dostal@gmail.com

Abstract

In smaller photovoltaic (PV) systems, the generated electricity is used to charge the storage (AKU) unit and to power the connected electrical appliance behind the inverter (INV). In case of sufficient insolation, this is controlled by the regulator (REG). However, in case of high insolation, the remaining electricity produced is not used. Built-in switches (SP) allow excess energy to be redirected to power other appliances.

Úvod

U menších fotovoltaických (FV) zostav sa vyrobená elektrická energia využíva na nabíjanie akumulačnej (AKU) jednotky a na napájanie pripojeného elektrického spotrebiča za invertorom (INV). V prípade dostatočnej insolácie toto riadi regulátor (REG). Avšak v prípade vysokej insolácie sa zvyšná vyrobená elektrická energia nevyužíva. Vstavané spínače (SP) umožňujú prebytočnú energiu presmerovať na napájanie iných spotrebičov.

Optimalizácia celoročnej prevádzky FV zostavy

Počet akumulátorov v akumulačnej jednotke bude stanovený charaktorom záťaže FV zostavy a použitým typom akumulátora. Budeme predpokladať, že akumulačná jednotka bude tvorená 6 kusy zalievaných olovených akumulátorov o kapacite 100 Ah. Odporúčaný maximálny nabíjací a vybíjací prúd je určený empiricky ako desatina hodnoty kapacity akumulátora, potom 10 A. Toto stanovuje maximálny nabíjací a vybíjací prúd predpokladanej akumulačnej jednotky na 60 A.

Predpokadáme použitý typ FV panelov polykryštalický FV panel Umpp = 19,28V, Impp = 9,08A.

Pre optimalizovanú celoročnú prevádzku FV zostavy musíme uvažovať difúzne žiarenie v danom období a vyrábaný elektrický prúd každým FV panelom. Potrebný počet FV panelov v danom období určíme (1, 2, 3).

$$\frac{Max.nabíjací\ prúd\ AKU\ \ jednotky\ za\ hodinu}{Difúzny\ prúd\ za\ hodinu.Dĺžka\ dňa} = Potrebný\ počet\ FVP \qquad (1)$$

Musíme predpokladať aj extrémne situácie (Tabulka 1).

Napríklad v zime bude difúzne žiarenie znížené v prípade hmly takmer na nulu. Avšak ak bude slnečno, difúzne žiarenie bude nahradené priamou insoláciou a vyrábaný prúd každým FV panelom bude výrazne vyšší. Táto situácia ale nemusí trvať po celý deň.

Alebo v lete bude difúzne žiarenie často nahradené priamoiu insoláciou. Vzhľadom k dvojnasobne dlhému dňu a často maximálnou insoláciou bude postačovať malý počet FV panelov na dobíjanie AKU jednotky.

Súčasne je potrebné regulovať aj odber elektrickej energie za invertorom. Stále platia požiadvky, aby spotrebiče s väčším odberom boli používané cez deň, kedy je vybíjanie akumulátorov spomalované priamou dodávkou elektrického prúdu priamo z FV panelov do invertora. Z toho dôvodu je potrebné mať minimálny počet FV panelov priamo pripojených na akumulátorvú jednotku.

Navrhovaná FV zostava umožňuje vyrobený elektrický prúd nad potreby dobíjania AKU jednotky presmerovať na priamy odber do ďalších spotrebičov.

Tabulka 1: Príklady prevádzky FV zostavy v roku.

Ročné obdobie	Max. nabíjací prúd AKU jednotky za hodinu [Ah]	Difúzny prúd 1 FVP za hodinu [A]	Dĺžka dňa [hod]	Potrebný počet FVP [ks]
Zima	60	0,5	8	15
Jar, Leto Jeseň	60	1	10	6
Extrémy				
Zima a hmla	60	0,1	8	75
Leto a slnečno	60	54 *	16	0,4 *

Zámysel funkcie prepínača FV panelov

Hlavná skupina FV panelov je priamo pripojená ku regulátoru bez vložených spínačov. Tato skupina je schopná dodávať maximálny prúd do regulátora pri maximálnej insolácii pola FV panelov (Obr. 1).

Ak bude insolácia klesať, dodávaný prúd z hlavnej skupiny bude klesať. Potom bude mikroprocesor µPC1 pripojí ďalší jeden FV panel ku regulátoru tak, aby nebol prekročený maximálny nabíjací prúd akumulátorov.

Pri ďalšom poklesu insolácie poklesne nabíjací prúd akumulátorov a µPC1 pripojí ďalší FV panel ku regulátoru. Analogicky pri poklesu insolácie budú pripájané postupne ďalšie FV panely až do posledného.

Nepripojené FV panely sú cez spínače pripojené na zbernicu, z ktorej je odber elektrickej energie riadený mikroprocesorom µPC2. Tento procesor na základe úrovne napätia na tejto zbernici pripája alebo odpája spotrebiče tak, aby nebola FV zostava preťažená. Pripájanie alebo odpájanie týchto iných spotrebičov je dynamické, preto je potrebné toto akceptovať. Iné spotrebiče môžu byť napríklad elektrické špirály v bojleri na ohrev vody.

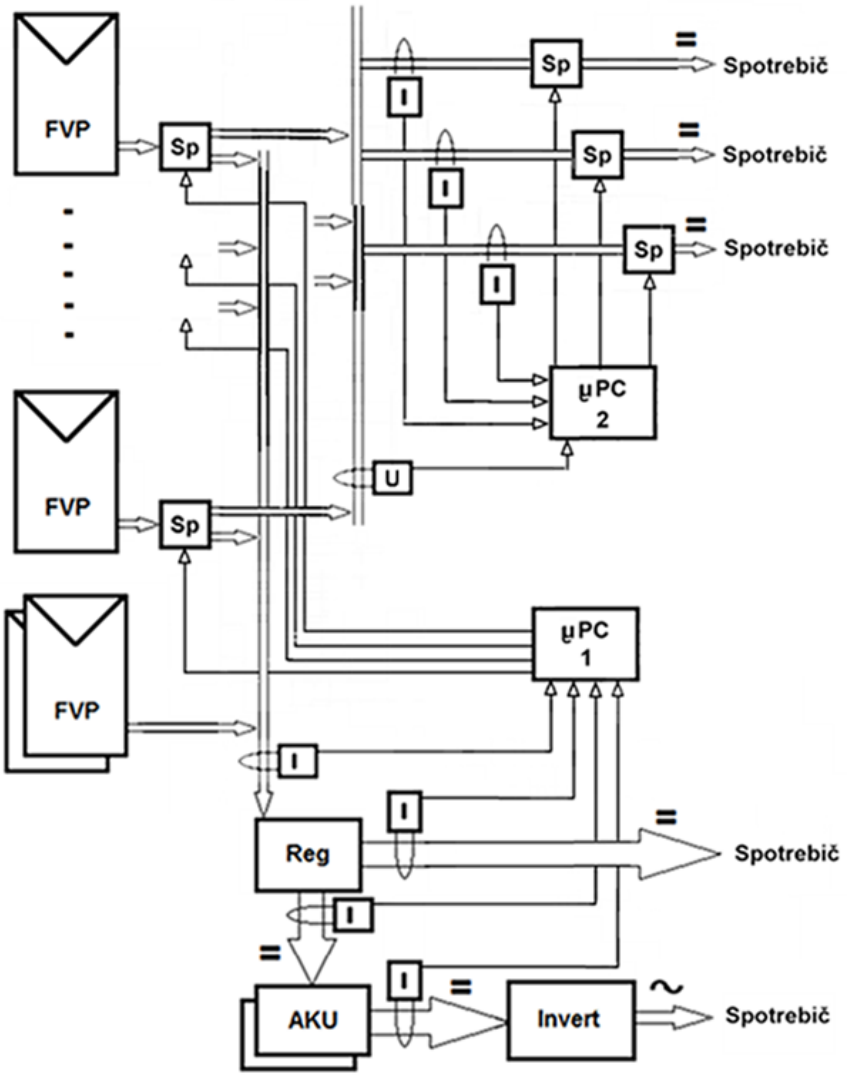
Pri ďalšom poklesu insolácie dochádza najskôr ku odpájaniu iných spotrebičov tak, aby bolo zabezpečené dobíjanie akumulátorov a prípadne spotrebiča za invertorom.

Pri opätovnom nárastu insolácie môžu byť opäť pripájané iné spotrebiče, ak dôjde ku odpájaní FV panelov, počnúc posledným. Prepínače za FV panelmi napájajú regulátor, alebo zbernicu pre priamy odber energie inými spotrebičmi.

Modifikácia uskupenia FV panelov

Pre niektoré konkrétne realizácie je možné zvoliť modifikované uskupenie FV panelov. Modifikácia spočívá v tom, že hlavná skupina FV panelov ostáva nezmenená. Ďalšie FV panely budú usporiadané tak, že najskôr budú pripájané 4 FV panely po jednom, nasledne po dvojici.

Modifikácia je výhodná v oblastiach, kde je insolácia nízka, prípadne je často nahrádzané difúznam žiarením. To je napr. vo vyšších zemepisných šírkach, prípadne v oblastiach s častou oblačnosťou. Modifikácia umožní rýchlejšie pripájanie FV panelov pri nízkej insolácii, prípadne pri dlhodobom difúznom žiarení.



Obr. 1: FV zostava s prepínačom FV panelov.

Odporúčania, získané z inej, prevádzky experimentálnej zostavy

Firemné nastavenie úrovní prepínania prepínačov pripájania FV panelov ku regulátoru a pripájania iných spotrebičov môže byť na úrovni 95% napäťového či prúdových intervalov. Avšak je žiaduce, aby konkrétna zostava na reálnej pozícii bola odskúšané s ohľadom na reálne meteorologické podmienky a insoláciu na tejto pozícii.

Vložené prepínače umožňujú využívať elektrickú energiu, vyrobenú na FV paneloch, avšak nevyužívanú na nabíjanie akumulačnej jednotky. Túto energiu presmerujú na napájania iných spotrebičov.

Literatúra

[1] BAČA, P.: Přehled možností akumulace elektrické energie z OZE. In.: Zborník konferencie „Alternatívne zdroje energie“ ALER 2011, Liptovský Ján 6.-7. 10. 2011, s. 135-140. ISBN 978-80-554-0427-1

[2] REKIOUA, D. - MATAGNE, E.: Optimization of Photovoltaic Power System. Springer-Verlag London Limited, 2012, pp. 283. ISSN 1865-3529, ISBN 978-1-4471-2348-0

[3] RYBÁR, Pavol - TAUŠ, Peter - RYBÁR, Radim: Alternatívne zdroje energie 1 : Slnečná energia. Košice: Elfa, 2001. 81 s.

EKONOMICKÁ REALITA OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ V PRAXI

M. Hošek

Autorizovaný inženýr oboru elektro ČKAIT ev. č. 1000717 ze dne 18.11.1993, energetický auditor ČKAIT, Certifikovaný fotovoltaický Expert ČFA dle § 10.D, vyhlášky MPO, evidenční číslo registrace oprávnění 1902424/26-014-11 ČFA, soudní znalec v oboru obnovitelné zdroje fotovoltaika a energetika, BESS, inteligentní systémy a energetika, energetický poradce MPO.

Abstract

This conference contribution examines current energy and economic challenges driven by geopolitical instability and rising energy costs. It critically evaluates widely promoted solutions such as heat pumps and photovoltaic systems, highlighting their limitations in real conditions. The contribution identifies photovoltaic systems with energy storage, combined with electromobility, as a viable approach for residential users. An economic assessment based on ROI demonstrates pathways toward improved energy independence, cost efficiency, and long-term sustainability.

Úvodní komentář k příspěvku

V současné turbulentní době zmítané válkami a energetickými krizemi zejména v souvislosti s problematickým získáváním ropných produktů, jejichž cena se na světovém trhu neustále mění a ve svém důsledku trvale zdražuje, se do popředí zájmu jak států, tak běžných občanů dostávají otázky jak ekonomiky provozu motorových vozidel, tak provozu domácností, a ve strachu o bezmezné zdražování rovněž pohled na energetickou nezávislost a dlouhodobě udržitelnou samostatnost.

Řešení nezávislosti na východních ropných produktech pomocí tepelných čerpadel po zahájení Ukrajinské války, intenzivně politicky podporované vládní garniturou se ukázalo jako naprosto fatální. Společně se štědrými dotacemi NZÚ na fotovoltaiku opět podporované vlastním loby, jako samospasitelné a nejlepší řešení se ukázalo jako naprosto katastrofické, a to přispěním nekompetentních firem, realizujících opět dotovaná tepelná čerpadla s nerespektováním fyzikálních zákonů a zásad topenářství a stavební fyziky, přivedla po této lákavé představě mnoho lidí na pokraj energetické bídy a potažmo k finančním kolapsům.

Přitom fakta, že slunce v zimě nesvítí a fotovoltaická elektrárna nedodává energii a tím ani nepokrývá spotřebu tepelného čerpadla, a nastupuje po překročení bivalentního bodu dodávka potřebné energie ze sítě, samozřejmě bez COP koeficientu TČ a v době současné krize za enormně vysokou cenu jsou obecně známa.

Po těchto všech eskapádách přišla zásadní změna NZÚ, tedy již ne dotace, ale bezúročné půjčky, čímž byla celá úspěšná éra budování FV systémů umrtvena. Prakticky to znamená dvojnásobné investice, a tedy dvakrát delší návratnost.

Po částečném ustálení vlivu východních událostí se ceny stabilizovaly, nicméně blízkovýchodní konflikt znovu důrazně a hlasitě uhodil na myšlení lidí, a dokonce vládu přinutil k zastropování cen ropných produktů.

Vítězové jsou v této hře výrobci elektromobilů, kteří zaznamenávají doposud nevídané prodejní nárusty v dvouciferných procentech a dále zejména loby dodavatelů větrných elektráren, které po zásahu východoevropských elit a vládní garnitury ve spojených státech ztrácí půdu pod nohama a tradičně v případě jejich krize se přesouvají na východ a snaží se nám s intenzívní podporou vlády vnutit myšlenku potřebnosti a nezbytnost budování větrných elektráren s obhajobou výroby elektrické energie, která je mnohonásobně dražší než jaderná a při státní míře exportu energie nepotřebná, ekologicky a zdravotně nepřijatelná.

Argumentace a propagace společenských uskupení jsou slabým hlasem proti síle nadnárodních a politicky motivovaných loby, která má jiné zájmy než ekologicky udržitelná energetika a životní prostředí.

Referát má za cíl reálně pojmenovat a pochopit nejen energeticko - ekonomické závislosti, ale zejména nastínit možná řešení z nastalé a zmatečně se vyvíjející ekonomické a energetické situace.

Je zřejmé, že energie se zlevňovat už nikdy nebudou a tučné dotace se rovněž nikdy nevrátí. Rovněž ukončení dotací čínské vlády na výrobu FV panelů je nenávratně pryč a jejich cena se dostává na reálnou úroveň, tedy až dvakrát vyšší.

Tato situace vyžaduje o to větší důraz na koncepční technologická řešení s cílem zajištění a užívání co nejpřijatelnějších energetických řešení, zaměřených zejména na nejširší spektrum zákazníků, tj. zejména majitelů rodinných a bytových domů. Z obnovitelných zdrojů energie se logicky v našich zeměpisných podmínkách lze reálně bavit pouze o fotovoltaice. Vodní a geotermální energetická řešení jsou výjimečná a ekonomicky nenavrátitelná, pro běžné uživatele naprosto nereálná. Zůstává tedy pouze na řešení FV systémů s akumulací, výjimečně a nevhodně v kombinaci s tepelným čerpadlem a spolehnutím se na nezvyšující se cenu plynu, a tedy v kombinaci s plynovým kotlem.

Akumulaci pak nezavrhovat vodní jako ekonomicky výhodnou, i když spotřeba teplé vody je v rodině limitována, avšak v kombinaci s akumulací elektrickou jsou baterie nezbytným řešením výrazně zvyšujícím vlastní využitelnost vyrobené elektrické energie a částečnou a krátkodobou soběstačnost. Zcela v jiném světle nabývá na významu elektro akumulace, zejména v poslední době, kdy se ceny ropných produktů neustále mění, jeví se vlastní zdroj elektrické akumulované energie pro pohon elektro-vozidel jako přijatelné řešení. Racionální a optimalizované řešení velikosti kapacity akumulátorů v kontextu vyrobené a do elektromobilu potřebné energie pak dává smyl nejen ekonomický, ale rovněž ekologický. I když dotace na EV jsou opět nulové, racionální ekonomika pohonu z vlastní FVE, kde 1 kWh vyrábíme za cca 1kč, dává pak smysl při ceně na 1 km v řádu desítek haléřů a při ročním nájezdu v řádu desítek tisíc kilometrů nám zkracuje návratnost EM na polovinu oproti standardnímu provozu s klasickými spalovacími motory. Při současné ceně EV, která atakuje ceny spalovacích vozidel a životnosti baterií přesahují již životnosti karosérie a záruky a garance výrobců na 10 let a desítky tisíc cyklů jsou rovněž k zamyšlení. V neposlední řadě se EM stává pojízdnou energetickou bankou a při možném odběru standardních spotřebičů až několika kilowatů se nabízí v mnohem širším významu než doposud.

Tyto ekonomické závislosti budou v konferenčním příspěvku exaktně vysvětleny za pomocí výpočtů návratnosti R.O.I. zvolené kombinace a řešení.

ENERGIE DO ZÁSOBY: TECHNOLOGIE AKUMULACE MEZI LABORATOŘÍ A PRŮMYSLEM, KTERÉ MOHOU ZMĚNIT PRAVIDLA HRY

L. Chladil

Ústav elektrotechnologie, FEKT, VUT v Brně, Technická 10, 616 00 Brno, Česká Republika,
email: chladil@vut.cz

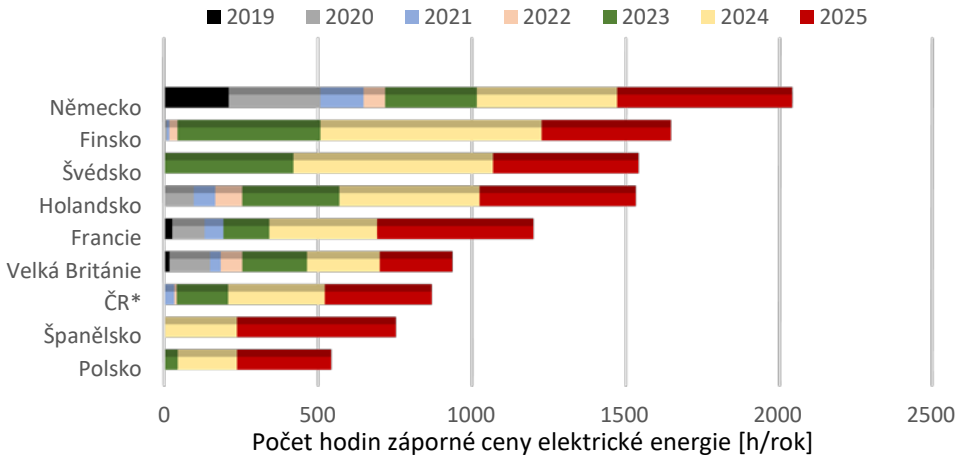
Abstract

The increasing penetration of renewable energy in Europe highlights the need for energy storage solutions beyond conventional pumped hydro and lithium-ion batteries, whose expansion is limited by geographical and economic constraints. This paper examines emerging storage technologies at the boundary between research and pilot deployment, including power-to-heat-to-power systems, gravitational storage, and thermodynamic concepts. Selected projects are evaluated in terms of technical parameters and development status. The results indicate that these technologies offer promising potential for medium- and long-duration energy storage, with future deployment dependent on cost reduction and system integration.

Úvod

V posledních letech dochází v evropských energetických soustavách k výraznému nárůstu instalovaných kapacit obnovitelných zdrojů elektrické energie (OZE), především fotovoltaických a větrných elektráren. S rostoucí akumulovanou výrobní kapacitou těchto zdrojů narůstá také jejich celkový vliv na provoz elektrizační soustavy a tvorbu cen elektrické energie na trhu. Obnovitelné zdroje jsou však charakteristické značnou závislostí na aktuálních meteorologických podmínkách, což vede k vysoké variabilitě jejich výroby. Zatímco spotřeba elektrické energie je z pohledu plánování relativně dobře predikovatelná, výroba z OZE vykazuje krátkodobé i dlouhodobé výkyvy, které mohou významně zatěžovat stabilitu elektrizační soustavy. Z hlediska stability sítě tak není rozhodující jen objem vyrobené bezemisní elektřiny, ale i schopnost jejího časového přenosu mezi obdobím nadprodukce a obdobím zvýšené poptávky.

S rostoucí instalovanou kapacitou OZE se zároveň stále častěji objevují situace, kdy výroba elektrické energie převyšuje aktuální spotřebu. V řadě evropských států se tak začínají pravidelně objevovat záporné ceny elektrické energie, zejména v obdobích vysoké výroby z fotovoltaických elektráren a nízké spotřeby. Výskyt záporných cen elektřiny je navíc umocněn skutečností, že část výroby z obnovitelných zdrojů má pevně nastavené výkupní ceny, které snižují jejich citlivost na aktuální tržní signály a vedou k zachování výroby i v obdobích přebytku energie. Tento trend ukazuje, že jedním z klíčových problémů současné energetiky není pouze samotná výroba nízko-emisní energie, ale především schopnost jejího časového přenosu mezi obdobím nadprodukce a obdobím zvýšené poptávky.



Obr. 1: Vývoj počtu hodin záporných cen na jednotlivých trzích v rámci EU v letech 2019-2025. [1,2]

47. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Rostoucí volatilita cen elektrické energie a častější výskyt cenových extrémů vytváří nové ekonomické prostředí, ve kterém se akumulace energie stává samostatně obchodovatelným prvkem trhu. Schopnost ukládat energii v době přebytku a využívat ji v obdobích vysoké poptávky se tak postupně stává jedním z klíčových nástrojů pro zajištění stability a flexibility moderních energetických soustav.

Dostupné způsoby akumulace

V současné evropské energetice představují dominantní technologie akumulace elektrické energie především přečerpávací vodní elektrárny a bateriová úložiště založená převážně na lithium-iontových článcích. Celková instalovaná kapacita energetických úložišť v Evropě dosáhla v roce 2024 přibližně 89 GW, přičemž přečerpávací elektrárny stále tvoří zhruba 90 % dlouhodobé akumulační kapacity. Pro lepší představu o rozsahu těchto kapacit lze uvést, že denní spotřeba elektrické energie v České republice se pohybuje přibližně okolo 180–200 GWh [3]. Přečerpávací elektrárny vynikají vysokou životností, velkými výkony a relativně vysokou účinností, jejich další rozvoj je však omezen geografickými a environmentálními podmínkami. Naopak bateriová úložiště zaznamenávají velmi dynamický růst – jejich kapacita v EU dosáhla v roce 2025 přibližně 77,3 GWh, přičemž jen v tomto roce bylo instalováno dalších 27,1 GWh nových systémů. V České republice je akumulace nadále dominována přečerpávacími elektrárnami Dlouhé stráně, Dalešice a Štěchovice II, zatímco bateriová úložiště jsou dosud relativně malá, avšak rychle se rozvíjejí. Vedle těchto hlavních technologií se v menší míře uplatňují také systémy akumulace stlačeným vzduchem (CAES), akumulace do tepla nebo setrvačníkové systémy, jejichž podíl na trhu je zatím omezený (viz Tab. 1). [4] Hodnoty a parametry tepelné akumulace uvedená v tabulce slouží primárně pro přímé využití tepla a nesouvisí se systémy umožňující zpětnou konverzi tepelné energie na elektrickou energii. Technologie zaměřené na zpětnou výrobu elektřiny se v Evropě nacházejí převážně ve fázi pilotních projektů, přičemž jejich instalovaný výkon dosahuje zatím pouze řádově desítek až nižších stovek megawattů.

Tab. 1: Přehled instalovaných kapacit hlavních technologií akumulace energie v EU, Německu a České republice. [5-7]

Technologie akumulace	EU – instalovaná kapacita	Německo	Česká republika	Potenciál dalšího rozvoje
Přečerpávací elektrárny	~500 - 600 GWh*	~ 39 GWh	~ 5 GWh	omezeno geograficky
Li-ion bateriová úložiště	~77,3 GWh (2025)	největší trh v EU	stovky MWh	velmi vysoký
CAES (stlačený vzduch)	~0,3–0,4 GW	~0,3 GW (Huntorf)	prakticky nulový	střední
Tepelná akumulace	>10 GW_{th} (teplo) / jednotky GW_e (ekv.)	několik GW_{th}	omezeně	vysoký
Setrvačníkové systémy	desítky MW	desítky MW	minimální	nízký

*Energetická kapacita přečerpávacích elektráren v EU je odhadována na přibližně 1 300 GWh, přičemž reálně využitelná hodnota je výrazně nižší, zhruba 500–600 GWh.

Vedle očekávaného dalšího rozvoje stávajících technologií akumulace energie, jako jsou bateriová úložiště a přečerpávací elektrárny, lze v evropském energetickém sektoru sledovat také postupný nástup nových konceptů, které se nacházejí na pomezí laboratorního vývoje a pilotního nasazení. Tyto technologie cílí především na překlenutí časového nesouladu mezi výrobou a spotřebou v řádu hodin až dnů, případně týdnů, a snaží se kombinovat výhody vysoké kapacity, dlouhé životnosti a nižších investičních nákladů. Právě tato fáze vývoje rozhoduje o tom, zda se z technologického konceptu stane relevantní součást budoucího energetického mixu.

Power-to-heat-to-power

Systémy typu power-to-heat-to-power představují jednu z nejzajímavějších cest dlouhodobé akumulace v elektroenergetice. Jejich společným jmenovatelem je převod přebytečné elektřiny na teplo, jeho uložení ve vhodném médiu a následná zpětná konverze na elektřinu, případně na kombinovaný výstup elektřina plus teplo. Z pohledu provozu i investic jde o odlišnou kategorii řešení než elektrochemické baterie: cílem není maximální elektrická účinnost, ale především nízká cena uložené energie, škálovatelnost a možnost využití i vedlejšího tepla.

V evropském kontextu se tato technologie prosazuje ve třech základních podobách. První jsou experimentální prototypy, které ověřují samotnou fyzikální funkci konceptu. Druhou skupinou jsou demonstrační piloty v měřítku reálného energetického zařízení, obvykle s kombinací akumulace a výroby elektřiny. Třetí představují publikované výzkumné systémy, u nichž jsou k dispozici měřené nebo alespoň detailně kvantifikované

výsledky účinnosti, kapacity a nákladů. Pro odbornou diskusi je vhodné tyto kategorie důsledně rozlišovat, protože srovnání bez ohledu na fázi vývoje vede k zavádějícím závěrům.

UCEEB ČVUT: ověření konceptu s kamenným médiem

Prvním příkladem je český pilot UCEEB ČVUT, který ověřoval skladování elektřiny prostřednictvím tepla uloženého do kamenného prachu. Podstata systému spočívá v tom, že elektrická energie je v době přebytku přeměněna na teplo, toto teplo je akumulováno v pevném loži a v okamžiku potřeby je znovu využito pro výrobu elektřiny přes tepelný oběh. Ve veřejně dostupných výstupech je potvrzena funkčnost celého konceptu, což je samo o sobě důležité, protože u podobných systémů bývá hlavní technologickou otázkou stabilita přenosu tepla, cyklická odolnost zásobníku a integrace jednotlivých komponent do funkčního celku.

Z hlediska energetiky je tento pilot cenný především jako důkaz proveditelnosti. Nejde primárně o demonstrační blok s detailně publikovanou elektrickou účinností, ale o fyzikální a systémové ověření toho, že power-to-heat-to-power lze realizovat v pevné tepelné skladovací matrici. [8]

ÚJV Řež: akumulační teplárna s elektřinou i teplem

Druhým relevantním příkladem je pilotní akumulační teplárna v ÚJV Řež, která je koncipována jako demonstrační zařízení s využitím fotovoltaické elektřiny, tepelného zásobníku a zpětné výroby elektřiny přes vysokoteplotní cyklus typu sCO2. Ve veřejně prezentovaných parametrech se uvádí vstupní elektrický výkon přibližně 2 MW z fotovoltaiky, pilotní elektrická účinnost okolo 35 % a očekávaná komerční účinnost 43 až 45 %. Současně je zdůrazněn i tepelný výstup, tedy schopnost využít zbytkové teplo pro dodávku užitečné tepelné energie. [9]

Z pohledu energetické praxe je tento pilot významný tím, že nepředstavuje jen laboratorní ověření, ale demonstrační konfiguraci s ambicí na integraci do reálného energetického hospodářství. Klíčový přínos spočívá v kombinované výrobě elektřiny a tepla, která umožňuje zlepšit celkovou využitelnost uložené energie. U těchto systémů je totiž čistě elektrická účinnost jen jedním z ukazatelů; stejně důležitý je celkový energetický výnos a flexibilita dodávky podle okamžité potřeby sítě nebo odběratele.

Absorpční Carnotova baterie: publikovaná čísla účinnosti a nákladů

Třetím příkladem je absorpční Carnotova baterie popsaná v odborné literatuře. Na rozdíl od výše uvedených pilotů zde nejsme odkázáni jen na obecný popis konceptu, ale máme k dispozici kvantifikované výsledky. Publikovaná studie uvádí round-trip efficiency až 45,8 %, energetickou hustotu 16,26 kWh/m^3 a levelized cost of storage 0,342 USD/kWh. V dalším rozsahu hodnot se uvádí účinnost 30,5 až 48,4 % a energetická hustota 7,6 až 21,8 kWh/m^3. [10]

Z hlediska odborného hodnocení jde o velmi důležitý zdroj, protože umožňuje technologii zasadit do rámce ekonomické i technické srovnatelnosti. Právě kombinace účinnosti, energetické hustoty a specifických nákladů na uloženou energii je pro tyto systémy zásadní. Vysoká účinnost sama o sobě nestačí, pokud je zásobník drahý nebo objemově neefektivní; naopak nižší účinnost může být akceptovatelná, pokud je médium levné, kapacitně škálovatelné a zařízení umožňuje velmi dlouhé skladování.

Tab. 2: Přehled vybraných systémů Power-to-Heat-to-Power a jejich technických parametrů

Projekt	Země	Princip	Účinnost / RTE	Energetická kapacita / hustota	Výstupní výkon	Náklady na uložení
UCEEB ČVUT – kamenný prach	ČR	Tepelné čerpadlo + zásobník s kamenným prachem + ORC	veřejně potvrzená funkčnost, bez zveřejněného přesného RTE	neuvedeno	neuvedeno	neuvedeno
ÚJV Řež – akumulační teplárna TES	ČR	Fotovoltaika + tepelné ukládání + sCO2 cyklus	cca 35% pilot, 43–45% očekávaná komerční hodnota	20 MWht	4 MWt nabíjení / vybíjení	neuvedeno
Absorpční Carnotova baterie	Mezinárodní studie	Absorpce-desorpce hygroskopických solí + power-heat-power cyklus	45,8%; Rozsah 30,5–48,4%	16,26 kWh/m^3; rozsah 7,6–21,8 kWh/m^3	neuvedeno	0,342 USD/kWh

Z uvedené trojice je patrné, že technologie power-to-heat-to-power se nachází ve třech odlišných fázích technologické zralosti. UCEEB představuje důkaz proveditelnosti základního principu, ÚJV Řež ukazuje integrační potenciál v energetickém provozu a absorpční Carnotova baterie poskytuje nejpřesnější veřejně doložená data pro technicko-ekonomické srovnání. Pro průmyslovou energetiku je přitom klíčové, že tyto systémy nemusejí soupeřit s elektrochemickými bateriemi na stejném poli; jejich hlavní výhoda spočívá v levném objemu akumulace, možnosti dlouhé doby uložení a v produkci využitelného tepla. Při hodnocení těchto technologií

je proto vhodné sledovat čtyři základní veličiny: round-trip efficiency, energetickou kapacitu, výstupní výkon a specifické náklady na uloženou energii.

Gravitační akumulace energie

Gravitační akumulace energie představuje mechanický způsob ukládání energie založený na přeměně elektrické energie na potenciální energii hmoty. V době přebytku elektřiny dochází ke zdvihání závaží (pevného materiálu nebo vody), zatímco při potřebě energie je tato hmota spouštěna zpět a přes generátor vyrábí elektřinu. Na rozdíl od přečerpávacích elektráren není tato technologie nutně vázána na specifické geografické podmínky a umožňuje realizaci i v průmyslových nebo brownfield lokalitách. Z pohledu technologického vývoje lze gravitační úložiště rozdělit obdobně jako u tepelných systémů do několika kategorií: experimentální prototypy, pilotní projekty a koncepty využívající existující infrastrukturu.

Energy Vault – modulární blokové úložiště

Technologie společnosti Energy Vault představuje jeden z nejpokročilejších konceptů gravitační akumulace energie. Princip spočívá ve zdvihání a spouštění bloků o hmotnosti desítek tun pomocí automatizovaného jeřábového systému, přičemž při vybíjení jsou elektromotory provozovány v generátorickém režimu. Oproti přečerpávacím elektrárnám není systém vázán na geografické podmínky a umožňuje instalaci v blízkosti obnovitelných zdrojů. Nejprokročilejším projektem je komerční jednotka EVx v čínském Rudongu s výkonem 25 MW a kapacitou 100 MWh (≈ 4 h). Udávaná round-trip efficiency dosahuje 75–80 % a životnost systému přesahuje 30 let bez významné degradace. Technologie je navržena jako modulární s potenciálem škálování do řádu stovek MWh až jednotek GWh a aktuálně je testována i v dalších projektech, zatím mimo Evropu. [11]

Gravitricity – důlní šachty

Projekt společnosti Gravitricity využívá princip zdvihání a spouštění masivního závaží v hlubokých důlních šachtách. Pilotní demonstrátor ve skotském Leithu ověřil funkčnost systému o výkonu 250 kW se dvěma 25tunovými závažími a potvrdil schopnost dosažení plného výkonu během méně než jedné sekundy. Budoucí komerční projekty počítají s využitím šachet o hloubce až 1500 m, závaží o hmotnosti až 5000 t a výkonem v řádu jednotek až desítek MW. Udávaná round-trip efficiency dosahuje přibližně 80–90 % a životnost systému přesahuje 25 let bez významné degradace. Technologie je zajímavá zejména možností využití opuštěných důlních lokalit a velmi rychlou odezvou vhodnou pro stabilizaci elektrizační soustavy.

Termodynamické úložiště

Energy Dome – CO_2 gravitační/termální hybrid

Technologie společnosti Energy Dome představuje hybridní systém na pomezí termodynamické a tlakové akumulace energie. Princip spočívá v kompresi a zkapalnění CO_2 při nabíjení systému, přičemž vznikající teplo je ukládáno v tepelném zásobníku. Při vybíjení je kapalný CO_2 znovu odpařen, expanduje přes turbínu a vyrábí elektřinu v uzavřeném termodynamickém cyklu. Výhodou technologie je použití běžně dostupných materiálů bez potřeby lithia nebo vzácných kovů.

Pilotní projekt byl spuštěn na Sardinii ve městě Ottana jako demonstrační jednotka o výkonu 2,5 MW a kapacitě 4 MWh. Tento projekt je již od roku 2022 úspěšně testován. Následně byla zahájena výstavba prvního komerčního systému v Ottaně s parametry 20 MW / 200 MWh a dobou vybíjení přibližně 10 hodin. Technologie deklaruje round-trip efficiency okolo 75 %, životnost přes 30 let bez významné degradace a cílové investiční náklady pod 200 €/kWh. Významnou výhodou je také modularita a nezávislost na geografických podmínkách, což systém odlišuje od přečerpávacích elektráren. [12]

Z pohledu dlouhodobé akumulace jde o jednu z nejpokročilejších evropských technologií v kategorii LDES (Long Duration Energy Storage), která se již posouvá z demonstrační fáze směrem ke komerčnímu nasazení. Oproti elektrochemickým bateriím cílí především na vícenásobně delší dobu ukládání energie (8–24 hodin) při nižších nákladech na jednotku uložené energie.

Shrnutí výsledků

Z hlediska budoucího vývoje evropské energetiky je zřejmé, že samotný růst instalovaného výkonu obnovitelných zdrojů nestačí. Stejně důležitá jako výroba bezemisní elektřiny bude schopnost tuto energii časově přesouvat, tedy ukládat ji v době přebytku a využívat v době vysoké poptávky. Právě zde se otevírá prostor pro technologie

akumulace, které nejsou založeny jen na elektrochemických bateriích, ale také na tepelných, gravitačních a termodynamických principech.

Z analyzovaných řešení vyplývá, že power-to-heat-to-power systémy jsou zajímavé zejména tam, kde je třeba dlouhá doba uložení, vysoká kapacita a možnost využít i výstupní teplo. Experimentální i demonstrační piloty ukazují, že tato koncepce je technicky proveditelná, zatímco publikované výzkumné výsledky už potvrzují, že v některých konfiguracích lze dosáhnout i konkurenceschopných hodnot účinnosti a nákladů. Ve srovnání s elektrochemickými bateriemi tak tyto systémy nemusí být náhradou, ale spíše doplňkem pro jiné časové horizonty a jiné provozní potřeby.

Vedle tepelných úložišť se zároveň rozvíjejí i další dlouhodobé akumulační koncepty, zejména gravitační a termodynamická úložiště. Jejich společným jmenovatelem je snaha nabídnout levnější a škálovatelnější kapacitní řešení pro hodiny až dny, případně i delší období. O dalším prosazení těchto technologií však nerozhodne jen technický princip, ale především schopnost dosáhnout nízkých investičních nákladů, dostatečné životnosti a provozní flexibility v podmínkách skutečné elektrizační soustavy. To jsou hlavní podmínky, aby se z technologických pilotů staly standardní prvky budoucí energetické infrastruktury.

Poděkování

Publikace vznikla za finanční podpory projektu specifického výzkumu na VUT (projekt č. FEKT-S-26-8946)

Literatura

[1] TZB-INFO (2025). Spotový trh s elektřinou v roce 2025: více záporných hodin, přesto meziročně o 15 % dražší. [online]. Dostupné z: tzb-info.cz
[2] IEA (2025). Fraction of negative hourly wholesale electricity prices in selected regions in Europe, 2019–2025. [online]. Dostupné z: iea.org
[3] OTE, a.s. (2025). Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy ČR. [online]. Dostupné z: ote-cr.cz
[4] EUROPEAN COMMISSION (2025). Energy storage – key facts and figures. [online]. Dostupné z: energy.ec.europa.eu
[5] QUARANTA, E. et al. (2024). Considerations on the existing capacity and future potential for energy storage in the European Union's hydropower reservoirs and pumped-storage hydropower. Journal of Energy Storage, 104, 114431. [online]. Dostupné z: sciencedirect.com
[6] ENERGY STORAGE EUROPE (2025). European Market Monitor on Energy Storage (EMMES 9.0). [online]. Dostupné z: energystorageeurope.eu
[7] INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION (2024). Hydropower Status Report. [online]. Dostupné z: hydropower.org
[8] UCEEB ČVUT (2024). Potvrdili jsme funkčnost našeho konceptu skladování elektřiny. Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT. [online]. Dostupné z: uceeb.cz
[9] FRÝBORT, O.; MELICHAR, T. (2021). Vývoj sCO2 oběhů a bezemisní teplárna. *All for Power*, 15(2), 90–91. [online]. Dostupné z: allforpower.cz
[10] SUI, Y.; LIN, H.; DING, Z.; LI, F.; SUI, Z.; WU, W. (2024). Compact, efficient, and affordable absorption Carnot battery for long-term renewable energy storage. Applied Energy, 357, 122504. [online].
[11] ENERGY VAULT (2025). Rudong EVx Gravity Energy Storage Project. [online]. Dostupné z: energyvault.com
[12] ENERGY DOME (2024). Energy Dome and ENGIE Sign Pioneering Storage Offtake Agreement for Ottana CO2 Battery Project. [online]. Dostupné z: energydome.com

STAV FOTOVOLTAIKY V ČR

K. Jandová[1], J. Vaněk [1] a M. Janda[2]

1 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, Technická 3058/10, Královo Pole, 61600, Brno, Česká republika
2 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, Technická 3058/10, Královo Pole, 61600, Brno, Česká republika

Abstract

This study examines the state of photovoltaics in the Czech Republic from the perspectives of legislation, technology, and development. The article analyzes the key factors behind the massive increase in the number of installations after 2020, focusing in particular on legislative changes, grant programs from the Modernization Fund and the "Nová zelená úsporám" program, and technological advances in energy storage. The research identifies the main barriers to further development, which are primarily the limited capacity of distribution grids and the administrative complexity of the permitting process. By comparing historical data and predictive models, the study assesses the potential for achieving the goals set out in the Czech Republic's National Energy and Climate Plan and proposes optimization steps for integrating decentralized sources into the national energy mix.

Úvod

Česká fotovoltaika prochází v posledních pěti letech nejvýraznější proměnou od dob privatizace v 90. letech. Zatímco dekádu po roce 2010 charakterizovala stagnace způsobená „solárním boomem" z let 2009–2010, současná vlna rozvoje fotovoltaických elektráren (FVE) je poháněna zcela odlišnými faktory. Geopolitická nestabilita, nárůst cen silové elektřiny a ambiciózní dekarbonizační cíle Evropské unie (Green Deal) vytvořily prostředí, kde se fotovoltaika stala nejen ekologickou volbou, ale především ekonomickou nutností pro domácnosti i průmysl.

Historický kontext a „druhá solární vlna"

Mezi lety 2011 a 2018 byl trh s FVE v České republice prakticky ustrnulý. Zlom nastal kolem roku 2020 s příchodem nových dotačních mechanismů a následně byl urychlen energetickou krizí v roce 2022. Také zde sehrála nemalou roli covidová doba, kdy lidé zůstali odděleni jeden od druhého a jediným spojením byl internet a jeho komunikační nástroje. Najednou narostla energetická spotřeba i v jednotlivých domácnostech.

Podle dat Solární asociace bylo v roce 2023 k distribuční síti připojeno přes 80 000 nových instalací o celkovém výkonu přesahujícím 1 GWp, což představuje meziroční nárůst o desítky procent. Na rozdíl od první vlny, která byla tažena vysokými výkupními cenami (feed-in tarify), je současný rozvoj charakteristický:

Vysokým podílem mikrozdrojů: Instalace na střechách rodinných domů s průměrným výkonem do 10 kWp.
Integrací akumulace: Více než 90 % nových rezidenčních FVE je vybaveno bateriovým úložištěm.
Vznikem velkých firemních instalací: Průmyslové areály využívají střechy pro snížení provozních nákladů.

1. Klíčové faktory rozvoje

1.1 Legislativní rámec a zjednodušení procesů

Zásadním milníkem byla novela energetického zákona, známá jako **Lex OZE I**, která zvýšila hranici pro instalace bez nutnosti licence na výrobu elektřiny a stavebního povolení na 50 kW. Následná novela **Lex OZE II** pak otevřela dveře komunitní energetice, což umožňuje sdílení vyrobené elektřiny mezi více odběrnými místy, čímž se zvyšuje efektivita využití lokálních zdrojů.

1.2 Dotační tituly

V České republice existuje pro rok 2026 několik hlavních dotačních titulů na fotovoltaiku (FVE), které se liší podle typu žadatele – od domácností přes nízkopříjmové skupiny až po firmy a obce. Finanční podpora hraje v ČR klíčovou roli. Hlavními pilíři jsou:

Nová zelená úsporám (NZÚ): Zaměřená na domácnosti, kde dotace pokrývá až 50 % uznatelných nákladů.
Modernizační fond (programy RES+): Určen pro velké fotovoltaické parky a obecní instalace, disponující desítkami miliard korun z prodeje emisních povolenek.

2. Technické a infrastrukturní výzvy

Rozvoj fotovoltaiky (FVE) přináší řadu technických a infrastrukturních výzev, které souvisejí především s integrací nestálého zdroje energie do soustavy původně navržené pro centralizovanou výrobu. Masivní rozvoj naráží na limity stávající infrastruktury. Distribuční soustava (ČEZ Distribuce, EG.D, PREdistribuce) nebyla historicky projektována na obousměrný tok energie v takovém rozsahu. Výzvy, které sebou rozmach fotovoltaiky přináší se dělí do následujících částí:

Kapacita sítě: V některých lokalitách dochází k vyčerpání kapacit distribuční sítě, což vede k zamítání žádostí o připojení nebo k omezování přetoků do sítě (tzv. nulové přetoky).

Stabilita soustavy: S rostoucím podílem nestabilních zdrojů rostou nároky na služby výkonové rovnováhy. Řešením je digitalizace sítě (Smart Grids) a rozvoj velkokapacitních bateriových úložišť.

Agrivoltaika: Novým tématem je spojení zemědělství a výroby energie, které řeší konflikt o využití půdního fondu.

3. Ekonomické aspekty a návratnost

Investice do FVE se v roce 2026 pohybuje v širokém rozmezí podle typu instalace. Pro průměrnou domácnost se návratnost bez dotace pohybuje kolem 10–12 let, s využitím NZÚ se zkracuje na 6–8 let. U firemních instalací, kde je vysoká míra okamžité vlastní spotřeby, může být návratnost ještě příznivější. Rizikem zůstává volatilita cen elektřiny na burze a budoucí nastavení distribučních poplatků.

4. Predikce do roku 2030

Plán ČR v oblasti energetiky a klimatu (NKEP) počítá s tím, že do roku 2030 by celkový instalovaný výkon FVE mohl dosáhnout 10 až 15 GWp. K dosažení tohoto cíle bude nutné:

1. Dokončit transformaci přenosové soustavy.
2. Masivně podpořit agrivoltaiku a instalace na brownfieldech.
3. Stabilizovat legislativní prostředí pro energetická společenství.

Shrnutí

Rozvoj fotovoltaiky v ČR již není pouze doménou nadšenců, ale stal se pilířem národní energetické bezpečnosti. Přestože výzvy v oblasti stability sítě a administrativy přetrvávají, technologický pokrok a ekonomický tlak činí z FVE nejrychleji rostoucí segment českého energetického mixu. Klíčem k úspěchu bude schopnost státu a distributorů držet krok s dynamikou soukromých investic.

Poděkování

This work was supported by the specific graduate research of the Brno University of Technology No. FEKT-S-26-8946.

Literatura

[1] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU ČR (2024). Vnitrostátní plán České republiky v oblasti energetiky a klimatu (NKEP). [online]. Dostupné z: mpo.cz
[2] SOLÁRNÍ ASOCIACE (2025). Výroční zpráva o stavu fotovoltaiky v ČR za rok 2024. [online]. Dostupné z: solarniasociace.cz
[3] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD (ERU). Čtvrtletní zprávy o provozu elektrizační soustavy ČR. [online]. Dostupné z: eru.cz
[4] HOSPODÁŘSKÁ KOMORA ČR (2023). Analýza bariér rozvoje obnovitelných zdrojů energie. Praha.
[5] ČEZ, a. s. (2024). Výroční zpráva: Transformace Skupiny ČEZ směrem k čisté energii.
[6] ZÁKON Č. 458/2000 SB., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích (Energetický zákon) v platném znění (Lex OZE I & II).
[7] IEA (2023). Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028. International Energy Agency.
[8] STÁTNÍ FOND ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ ČR. Pravidla programu Nová zelená úsporám 2021-2030. [online]. Dostupné z: sfzp.cz.

ELEKTROCHEMICKÁ IMPEDANČNÍ SPEKTROSKOPIE LI-ION BATERIÍ

K. Jaššo[1,2]

1 Ústav elektrotechnologie, FEKT, VUT v Brně, Technická 10, 616 00 Brno, Česká republika
2 Katedra elektrotechniky, FVT, Univerzita Obrany v Brně, Kounicova 65, 612 00 Brno, Česká republika

Abstract

Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) is a powerful diagnostic technique for analyzing the internal electrochemical processes of lithium-ion batteries. By applying a small AC perturbation over a wide frequency range, EIS enables the separation of charge-transfer kinetics, diffusion mechanisms, and interfacial phenomena. Despite its diagnostic value, practical implementation is often challenged by nonlinear system behavior, sensitivity to measurement conditions, and the complexity of equivalent circuit modeling. This contribution provides an overview of EIS principles, discusses requirements for high-quality measurements, and presents approaches for reliable data interpretation in Li-ion battery research.

Úvod

Lithno-iontové baterie představují v současnosti dominantní technologii pro uchovávání elektrické energie. Jejich široké využití v elektromobilitě, přenosné elektronice i stacionárních úložištích klade vysoké nároky na přesnou diagnostiku jejich stavu a predikci degradace. Elektrochemická impedanční spektroskopie (EIS) je jednou z nejúčinnějších metod, protože umožňuje neinvazivně sledovat dynamické procesy uvnitř baterie v širokém frekvenčním rozsahu. V posledních letech roste význam EIS nejen ve výzkumu, ale i v aplikacích, jako jsou systémy řízení baterií (BMS) nebo predikce degradace. Praktické využití této metody je však stále limitováno problémy spojenými s kvalitou měření, nelineárním chováním systému a nejednoznačností interpretace naměřených dat.

Impedanční odezva baterie

Impedance elektrochemického systému představuje frekvenčně závislou odezvu na malé harmonické buzení. Měřením v širokém frekvenčním rozsahu lze rozlišit několik charakteristických procesů [1]:

- **Vysoké frekvence (kHz-MHz)** – ohmický odpor elektrolytu, separátoru, proudových kolektorů a kontaktů
- **Střední frekvence (Hz-kHz)** – kinetika elektrochemických reakcí (přenos náboje) na rozhraní elektroda/elektrolyt, kapacitní chování (dvojvrstva) na rozhraní elektroda/elektrolyt
- **Nízké frekvence (mHz-Hz)** – transport lithných iontů v porézní elektrodě – difuze (Warburgova impedance)

Tyto procesy se projevují v různých frekvenčních pásmech a jejich superpozice tvoří výsledné impedanční spektrum. Zásadním předpokladem správné interpretace je lineární a stacionární chování systému. Reálné baterie však tyto podmínky často porušují, zejména v závislosti na stavu nabití, teplotě nebo degradace.

Experimentální podmínky a zdroje chyb v impedančních měřeních

Kvalita impedančních měření je zásadně ovlivněna experimentálními podmínkami a vlastnostmi měřeného systému. Teoretický základ metody EIS předpokládá lineární, časově invariantní a kauzální systém [2]. Reálné lithno-iontové baterie však tyto podmínky často nesplňují. V praxi se proto předpokládá, že při dostatečně malé amplitudě buzení se systém chová pseudolineárně, ačkoli jeho skutečná odezva je nelineární. Volba vhodné amplitudy buzení je proto klíčovým faktorem – příliš vysoká amplituda vede k nelineární odezvě a vzniku vyšších harmonických složek, zatímco příliš nízká amplituda zhoršuje poměr signálu k šumu a tím i přesnost měření.

Dalším významným faktorem je nestacionarita systému (tzv. drift), která se projevuje zejména v nízkofrekvenční oblasti [1]. Měření při velmi nízkých frekvencích může trvat desítky minut až hodiny, během nichž dochází ke změnám stavu nabití, teploty nebo vnitřní rovnováhy měřeného systému. Tyto změny vedou k porušení podmínky časové invariance a mohou způsobovat deformaci impedančního spektra, například ve formě posunů nebo zkreslení fázové charakteristiky.

Významnou roli hrají také parazitní vlastnosti měřicího řetězce. Odpor kontaktů, indukčnost vodičů nebo elektromagnetické rušení mohou výrazně ovlivnit naměřená data, zejména ve vysokofrekvenční oblasti [1]. Důležité je také zvolené zapojení – rozdíl mezi dvouvodičovým (2-wire) a čtyřvodičovým (4-wire) připojením může mít v případě měření Li-ion baterií zásadní vliv na přesnost výsledků. Zatímco dvouvodičové zapojení zahrnuje do výsledku i odpor přívodních vodičů a kontaktů, čtyřvodičové zapojení umožňuje tyto parazitní složky eliminovat a poskytuje přesnější hodnoty zejména při měření nízkých impedancí. Tyto vlivy se mohou projevit jako artefakty v impedančním spektru a vést k jejich nesprávné interpretaci jako fyzikálních vlastností baterie. Minimalizace těchto efektů vyžaduje vhodné konstrukční uspořádání měření, kvalitní stínění a optimální zapojení.

Je zřejmé, že spolehlivost impedanční analýzy je podmíněna nejen kvalitou měřicí techniky, ale především správným nastavením experimentálních podmínek a kritickým posouzením platnosti předpokladu pseudolineárního chování systému.

Kvalita naměřených impedančních dat

Praktická aplikace elektrochemické impedanční spektroskopie vyžaduje systematické posouzení kvality naměřených dat, protože samotné impedanční spektrum neposkytuje informaci o tom, zda byly splněny základní předpoklady metody. I při zdánlivě věrohodným impedančním spektru mohou být data zatížena chybami, které vedou k nesprávné interpretaci. Z tohoto důvodu jsou moderní měřicí systémy vybaveny nástroji umožňujícími kvantifikovat kvalitu odezvy přímo během měření. Mezi nejpoužívanější patří indikátory založené na frekvenční analýze signálu, zejména celkové harmonické zkreslení (Total Harmonic Distortion, THD), nestacionární zkreslení (Non-Stationary Distortion, NSD) a poměr šumu k signálu (Noise-to-Signal Ratio, NSR). [3]

Celkové harmonické zkreslení (THD) charakterizuje míru odchylky odezvy od ideální harmonické reakce na budicí signál. V lineárním systému by měl být výstupní signál tvořen pouze základní frekvenční složkou. Přítomnost vyšších harmonických složek se proto interpretuje jako důsledek nelinearity systému. THD je obvykle definováno jako poměr efektivní hodnoty vyšších harmonických k amplitudě základní složky. Nízké hodnoty THD indikují, že odezva odpovídá podmínkám malého signálu a lze ji považovat za aproximativně lineární.

Nestacionární zkreslení (NSD) popisuje časovou stabilitu měřeného systému během měření. NSD vyhodnocuje změny odezvy v čase, typicky prostřednictvím energie rozprostřené v okolí základní frekvence. Zvýšené hodnoty NSD indikují, že systém není během měření stacionární a jeho vlastnosti se mění, což je kritické zejména v nízkofrekvenční oblasti.

Poměr šumu k signálu (NSR) vyjadřuje podíl náhodných nebo nežádoucích složek signálu vzhledem k užitečné odezvě na základní frekvenci. Tento indikátor poskytuje informaci o kvalitě měření z hlediska citlivosti a přesnosti. Vysoké hodnoty NSR znamenají, že amplituda odezvy je srovnatelná s úrovní šumu, což komplikuje spolehlivé určení impedance.

Tyto indikátory umožňují identifikovat problematické části naměřeného impedančního spektra ještě před jeho interpretací. Významná výhoda spočívá v jejich frekvenční lokalizaci, která umožňuje rozlišit, zda se problém vyskytuje pouze v určité části spektra, nebo ovlivňuje celé měření. Na základě těchto informací lze následně upravit experimentální podmínky nebo vyloučit nespolehlivá data z další analýzy.

Vedle těchto diagnostických nástrojů se stále častěji využívají také metody založené na transformaci impedančních dat, například **distribuce relaxačních časů (DRT)**. Tato metoda převádí spektrum z frekvenční oblasti do prostoru časových konstant a umožňuje tak detailnější rozlišení jednotlivých procesů. Současně poskytuje citlivý nástroj pro detekci anomálií v datech – například vznik nefyzikálních nebo silně rozmazaných píků může indikovat přítomnost šumu, nekonzistenci dat nebo porušení základních předpokladů měření. [4]

Dalším důležitým nástrojem pro posouzení kvality impedančních dat je validace pomocí **Kramers–Kronigových (K–K) relací**, které vycházejí z vlastností lineárních, kauzálních a časově invariantních systémů a propojují reálnou a imaginární složku impedance [1]. Nesplnění těchto vztahů indikuje porušení předpokladů metody EIS, například vlivem nelinearity, nestacionarity nebo šumu. K–K validace poskytuje globální test konzistence dat a doplňuje lokální ukazatele, jako jsou THD, NSD a NSR.

Vzhledem k tomu, že klasické K-K relace vyžadují ideálně kompletní data v celém frekvenčním rozsahu ($0 \rightarrow \infty$) a jsou citlivé na okrajové podmínky, se v praxi často využívají aproximativní metody vycházející z těchto vztahů, například metoda Z-HIT. **Metoda Z-HIT** používá aproximovaný přístup založený na lokálním zpracování dat – rekonstruuje jednu složku impedance z druhé pomocí aproximace a je méně náročná na rozsah i kvalitu vstupních dat [5]. Díky tomu je robustnější pro experimentální použití, avšak méně přesná než validace pomocí K-K relací v plném rozsahu. Systematické využití uvedených přístupů výrazně zvyšuje spolehlivost impedanční analýzy a představuje nezbytný krok mezi samotným měřením a fyzikální interpretací získaných dat.

Interpretace naměřených impedančních dat

Interpretace impedančních spekter představuje jednu z nejnáročnějších částí analýzy, neboť naměřené spektrum přímo neodpovídá jednotlivým fyzikálním veličinám, ale vzniká superpozicí více elektrochemických procesů s různými časovými konstantami, které se ve frekvenční oblasti překrývají a jejich oddělení vyžaduje použití vhodného interpretačního modelu.

V praxi je nejčastěji využíván přístup založený na ekvivalentních obvodových modelech, které aproximují chování elektrochemického systému pomocí ideálních elektrických prvků reprezentujících ohmický odpor, přenos náboje, kapacitní dvojvrstvu či difuzi. Parametry modelu jsou určovány numerickým fitováním naměřených dat (např. metodou nejmenších čtverců), což umožňuje kvantitativní popis stavu systému a jeho změn. Ekvivalentní obvodové modely nabízejí jednoduchou a intuitivní interpretaci, jejich použití je však omezeno jejich empirickým charakterem.

Hlavním problémem je nejednoznačnost řešení, kdy různé topologie i kombinace parametrů mohou vést k podobné aproximaci naměřeného spektra. S tím úzce souvisí otázka identifikovatelnosti parametrů modelu, tedy schopnosti jednoznačně určit jejich hodnoty na základě dostupných dat. V praxi se často projevuje silná korelace mezi jednotlivými parametry, kdy změna jednoho parametru může být kompenzována změnou jiného bez výrazného zhoršení kvality fitu, zejména v případě překryvu více procesů v podobném frekvenčním rozsahu. To snižuje spolehlivost fyzikální interpretace, která proto vyžaduje nejen kvalitní fit, ale i znalost systému a kritické posouzení získaných para metrů. [1]

Dalším významným aspektem je, že se v praxi často používají zjednodušené modely, které nepostihují plnou komplexitu elektrochemického systému. Typickým příkladem je Randlesův obvod, který sice dobře popisuje základní rysy impedančního spektra, ale nezohledňuje např. heterogenitu elektrod, distribuci reakčních rychlostí či strukturu porézních materiálů. Parametry těchto modelů proto představují spíše efektivní než jednoznačně fyzikální veličiny. Jednotlivé prvky ekvivalentního obvodu navíc často reprezentují kolektivní odezvu mnoha mikroskopických procesů, takže jeden parametr zahrnuje široké spektrum lokálních dějů s různou kinetikou, což dále komplikuje jeho interpretaci. Například odpor přenosu náboje nebo kapacitní prvek dvojvrstvy reálně odpovídají souhrnné odezvě reakcí probíhajících na mnoha aktivních místech elektrody, například na povrchu jednotlivých částic materiálu. [1][6]

Alternativu k ekvivalentním obvodům představují fyzikálně založené modely vycházející z transportních rovnic a popisu elektrochemických procesů v baterii. Tyto modely umožňují přímé propojení mezi impedanční odezvou a materiálovými nebo provozními parametry systému, jejich použití je však výrazně náročnější z hlediska parametrizace i výpočetní složitosti. Volba přístupu je proto kompromisem mezi jednoduchostí, fyzikální interpretovatelností a přesností, přičemž ekvivalentní obvody zůstávají základním nástrojem EIS ana lýzy. [1][7]

Závěr

Elektrochemická impedanční spektroskopie představuje účinný nástroj pro diagnostiku lithium-iontových baterií, jehož spolehlivost je zásadně ovlivněna kvalitou měření a splněním základních předpokladů metody. Hodnocení kvality dat pomocí indikátorů, jako jsou THD, NSD a NSR, spolu s Kramers–Kronigovou validací, je klíčové pro správnou interpretaci výsledků. Ekvivalentní obvodové modely zůstávají praktickým nástrojem analýzy, avšak jejich interpretace je omezena nejednoznačností a empirickým charakterem. Další rozvoj metod interpretace a jejich integrace do praktických aplikací představují důležitý směr budoucího výzkumu.

Poděkování

Tato publikace vznikla za institucionální podpory Ministerstva obrany ČR a finanční podpory projektu specifického výzkumu na VUT (projekt č. FEKT-S-26-8946).

Literatura

[1] ORAZEM, Mark E. a Bernard TRIBOLLET. Electrochemical Impedance Spectroscopy. 2. vyd. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017. ISBN 978-1-118-52739-9.
[2] MEDDINGS, N., et al. Application of electrochemical impedance spectroscopy to commercial Li-ion cells: A review. Journal of Power Sources. 2020, roč. 480, s. 228742. ISSN 0378-7753. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228742
[3] BIOLOGIC. AN #64: Introducing EC-Lab® EIS quality indicators: THD, NSD and NSR. Seyssinet-Pariset: BioLogic Sciences Instruments, 2018. Application Note, č. 64.
[4] SCHIESSL, Andreas, et al. Characterizing Li-ion batteries by the distribution of relaxation times. Applied Physics Reviews. 2020, roč. 7, č. 4, s. 041305. ISSN 1931-9401. Dostupné tiež z: doi:10.1063/5.0021487

[5] LASIA, Andrzej. Electrochemical Impedance Spectroscopy and its Applications. New York: Springer, 2014. ISBN 978-1-4614-8933-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4614-8933-7
[6] BARDE, A. J. a L. R. FAULKNER. Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications. 2. vyd. New York: Wiley, 2001. ISBN 978-0-471-04472-7.
[7] NEWMAN, J. a K. E. THOMAS-ALYEA. Electrochemical Systems. 3. vyd. Hoboken: Wiley, 2004. ISBN 978-0-471-47756-3.

ZÁPORNÁ ELEKTRODA PRO NA-ION AKUMULÁTORY NA BÁZI OLOVA

J. Jilčík a P. Bača[1]

1 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, Technická 3058/10, Královo Pole, 61600, Brno, Česká republika

Abstract

This paper investigates lead as promising anode material for sodium-ion batteries (SIBs) aimed at stationary energy storages. The experimental study compares the influence of electrolyte composition on the performance of a 50 µm thick lead foil. The results shows that a carbon-based electrolyte with fluoroethylene carbonate (FEC) additive provides superior electrochemical activity, achieving a current response threefold higher capacity than an ether-based (DME) system. However, the stability of the carbon-based system was limited by extreme volume changes during cycling. Massive expansion led to mechanical pulverization and subsequent loss of electrical contact. In contrast, the DME based system exhibited rapid surface passivation and negligible capacity, leading to premature short-circuiting. These finding, supported by SEM analysis, highlight that FEC is essential for the initial activation of lead anodes. Managing the mechanical integrity remains a critical challenge for practical applications.

Úvod

Sodno-iontové baterie (SIBs) v současnosti představují perspektivní doplněk k dominantní lithium-iontové technologii, a to právě díky vysokému přirozenému výskytu sodíku, jeho nízké ceně a environmentální udržitelnosti. Vzhledem k rostoucí poptávce po velkokapacitních stacionárních úložištích energie je vývoj účinných a levných anodových materiálů pro SIBs klíčovou technologickou výzvou [1][2].

Olovo se v tomto kontextu jeví jako slibný kandidát pro anody SIBs díky své schopnosti tvořit slitiny se sodíkem, které při maximálním nasycení a vzniku fáze $Na_{15}Pb_4$ nabízí teoretickou kapacitu 485 mAh/ g [3]. Další značná výhoda oproti ostatním slitinovým materiálům spočívá v jeho ekonomické a logistické dostupnosti. Olovo je celosvětově nejvíce recyklovaným kovem s mírou recyklace přesahující 99 %, což je dáno dlouhou historií a zavedenou infrastrukturou olověných akumulátorů. Díky nízké ceně (cca 2 USD/kg) a vysoké dostupnosti je olovo ideálním adeptem pro rozsáhlá stacionární úložiště, kde hmotnost nehraje přílišnou roli [4].

Hlavní výzvy olověných anod představují obrovské objemové změny dosahující až 400 % během procesů sodiace a desodiaci. Tyto expanze vedou k mechanické degradaci materiálu a ztrátě elektrického kontaktu, který znamená pokles kapacity. Dalším problémem je vysoká reaktivita olova, která vede k masivnímu katalytickému rozkladu elektrolytu. Tento proces vede k vytvoření vysoce odporové pasivační vrstvy, která znatelně zvyšuje vnitřní odpor článku [3][5].

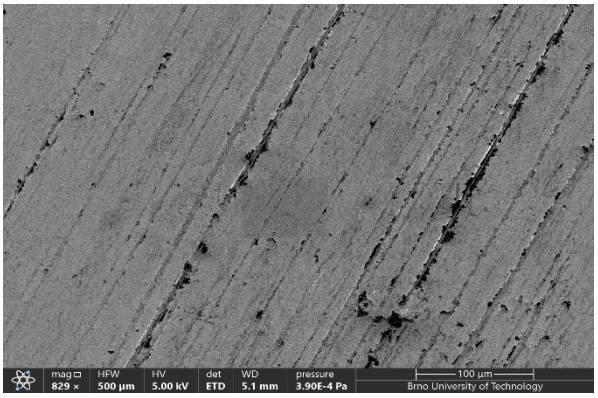
K řešení problémů s katalytickým rozkladem elektrolytu na povrchu se používají různé metody presodiace, které vytvoří počáteční slitinu se sodíkem na povrchu, která již není reaktivní. Další možností je použití etherových rozpouštědel jako je dimethoxyethan (DME) nebo přidání aditiv do elektrolytu, např. fluoroethylen karbonát (FEC). V prostředí s DME nebo s FEC dochází k vytvoření stabilnější SEI vrstvy, která chrání povrch elektrody [3][4][5].

Tato práce se zaměřuje na experimentální srovnání vlastností elektrody z olověné fólie v prostředí karbonátového elektrolytu s aditivem FEC a elektrolytem s rozpouštědlem DME.

Experiment

Elektrody byly vyrobeny z olověného plechu pro olověné akumulátory. Po mechanickém a chemickém očištění ethanolem byl materiál vyválcován na tloušťku 50 µm. Z této fólie byly vyseknuty kruhové elektrody o průměru 16 mm, které byly následně znovu očištěny ethanolem a sušeny ve vakuové sušárně při 60 °C po dobu 48 hodin.

Analýza pomocí elektronového mikroskopu potvrdila homogenní povrch fólie vykazující pouze stopy po válcování (Obr. 1). Čistota materiálu byla ověřena pomocí EDS, která prokázala dominantní zastoupení olova.



Obr. 1: Snímek olověné elektrody při zvěštní 829×.

Pro experiment byly použity dva typy elektrolytů s vodivostní solí $NaPF_6$:

1. Karbonátový elektrolyt: Směs EC:PC:DEC (1:1:1) s aditivem 5 hm.% FEC

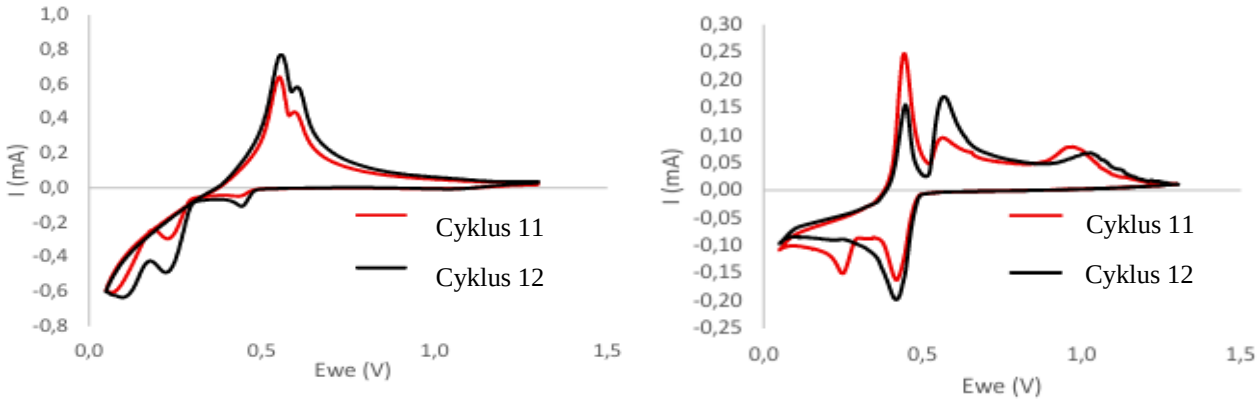
2. Etherový elektrolyt: Čistý dimethoxyethan (DME)

Směs karbonátového elektrolytu je tvořena základními rozpouštědly jako je ethylen karbonát (EC), propylen karbonát (PC) a diethyl karbonát (DEC).

Poločlánky byly sestaveny v argonové atmosféře s využitím testovacích cel značky EL-CELL. Jako proti elektroda byl použit kovový sodík. Byly použity dva separátory pro jednu celu, kdy na každý bylo použito 100 µl elektrolytu (tedy 200 µl na celu). Obě testované elektrody měly stejnou hmotnost.

Základní srovnání proběhlo pomocí cyklické voltametrie (CV) v potenciálovém okně 0,05 V až 1,3 V s postupným snižováním rychlosti skenu (5,1 a 0,1 mV/s). Následně byla provedena galvanostatická měření (GCPL) v potenciálovém okně 0,1 V až 1,3 V.

Cyklická voltametrie odhalila zásadní vliv složení elektrolytu na aktivitu olova. Systém s karbonátovým elektrolytem a aditivem FEC vykazoval přibližně trojnásobně vyšší proudovou odezvu oproti systému s DME. Katodické píky v oblasti okolo 0,4 V odpovídají tvorbě fáze $NaPb_3$, následující pík v oblasti 0,25 V – 0,30 V odpovídá slitině NaPb a oblast pod 0,15 V zahrnuje přechody do nejvíce nasycených slitin Na_9Pb_4 a $Na_{15}Pb_4$. Píky v oxidační části okolo 0,6 V odpovídají zpětné desodiaci [4] . U systému s FEC byl pozorován postupný nárůst píků, což indikuje stabilní prostředí a nárůst aktivní plochy vlivem pulverizace olova. Naopak u systému s DME došlo po 11. cyklu k vymizení píku v oblasti 0,25 V a celkovému poklesu proudové odezvy, což značí že nadále neprobíhá hlubší nasycování. Pík v oxidační části v oblasti 1 V je podle studie [4] spojován s tvorbou pasivační vrstvy na povrchu elektrody.



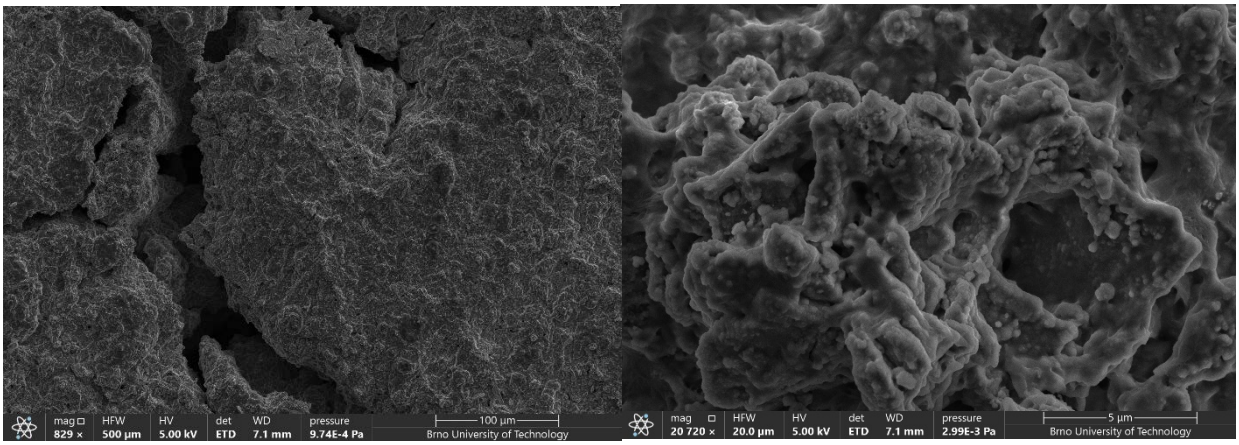
a) Karbonátový systém b) Etherový systém

Obr. 3: Cyklické voltametrie měřených elektrod v karbonátovém a etherovém systému.

Rozdílná kinetika se projevila i během galvanostatického cyklování v napěťovém okně 0,1 V až 1,3 V. V systému s karbonátovým rozpouštědlem byl proud postupně zvyšován až na 1 mA. V druhém cyklu bylo vybito 280 mAh/g, ale projevila se obrovská objemová expanze, která překročila mez integrity olova, což vedlo k následné pulverizaci a totálnímu rozpadu elektrody na prach. Oproti tomu systém s DME vykazoval výrazně

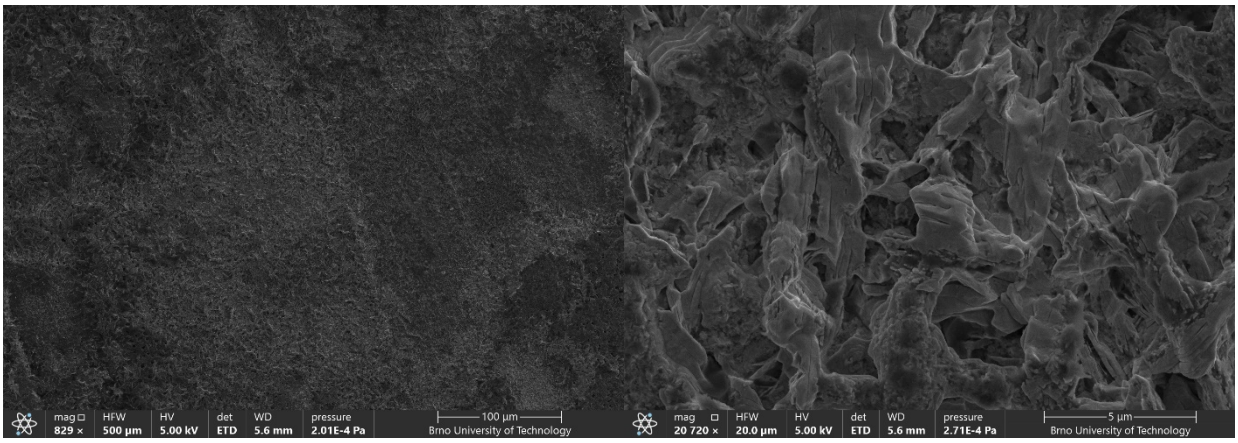
nižší kinetickou dostupnost. Při proudovém zatížení 0,26 mA byla kapacita nanejvýš 0,5 mA/g a po snížení na 0,1 mA dosahovala kapacita pouze 1 mAh/g a následně po čtyřech cyklech došlo ke zkratu.

Provedená post mortem analýza pomocí elektronového mikroskopu poskytla informace o omezeních těchto systémů. U systému s FEC je patrná totální transformace z původně celistvého povrchu vlivem objemových změn (Obr. 3a). Při detailnějším zvětšení (Obr. 3b) je možné pozorovat vysoce porézní strukturu s obrovským měrným povrchem. Kdežto u systému s DME je při nižším zvětšení (Obr. 4a) pozorován relativně plochý a kompaktní povrch pokrytý prasklinami, a i nánosy sodíku a produktů rozpadu elektrolytu. Detailní snímek (Obr. 4b) zobrazuje strukturu, která připomíná náhodně uspořádané krystalické bloky a fragmenty olova. Tato struktura nepůsobí jako jemná pulverizovaná hmota, ale spíše jako mechanicky namáhaný povrch, který byl pasivován a nadále nedocházelo k dalšímu nasycování.



a) b)

Obr. 3: Snímky olověné elektrody z karbonátového systému.



a) b)

Obr. 4: Snímky olověné elektrody z etherového systému.

Shrnutí výsledků

Systém s karbonátovým elektrolytem s aditivem FEC vykazoval větší proudovou odezvu během měření CV a stabilitu píků značících formování slitin. Během měření GCPL byl systém aktivní a docházelo k hlubokému nasycení, které nakonec vedlo k totální pulverizaci elektrody. Oproti tomu systém s DME jevil známky nižší kinetické dostupnosti a během měření CV bylo pozorováno, že s dalším cyklem vymizely píky spojené s formací nasycenějších slitin. Také byl pozorován pík, který podle studie [4] značí formování zmíněné pasivační vrstvy.

Ze SEM snímků vyplývá, že v systému s karbonátovým rozpouštědlem s aditivem FEC probíhalo hluboké nasycování v celém objemu elektrody. Oproti tomu v DME reagoval pouze povrch, který se nasytil a pasivoval a nadále neprobíhalo další nasycování sodíkem.

Poděkování

Autor by rád poděkoval svému vedoucímu, doc. Ing. Petru Bačovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady a podporu při zpracování této práce. Poděkování patří také Ústavu elektrotechnologie FEKT VUT v Brně za poskytnutí laboratorního zázemí a technickou podporu při pořízení SEM snímků.

Literatura

[1] A. Eftekhari and D. -W. Kim, “Sodium-ion batteries: New opportunities beyond energy storage by lithium”, Journal of Power Sources, vol. 395, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.05.089.
[2] J. F. Peters, A. Peña Cruz, and M. Weil, “Exploring the Economic Potential of Sodium-Ion Batteries”, Batteries, vol. 5, no. 1, 2019, doi: 10.3390/batteries5010010.
[3] J. Zhang et al., “Identifying Problematic Phase Transformations in Pb Foil Anodes for Sodium-Ion Batteries”, Journal of The Electrochemical Society, vol. 171, no. 9, Sep. 2024, doi: 10.1149/1945-7111/ad76e0.
[4] A. Darwiche, R. Dugas, B. Fraisse, and L. Moncodiut, “Reinstating lead for high-loaded efficient negative electrode for rechargeable sodium-ion battery”, Ournal of Power Sources, Art. no. vol. 304, pp. 1-8, 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.10.087.
[5] C. Kim et al., “A high rate and long-cycle-life anode based on micrometer-sized Pb powder for sodium-ion batteries”, Journal of Alloys and Compounds, vol. 886, 2021, doi: 10.1016/j.jallcom.2021.161240.

FOTOVOLTAIKA, BATERIE A ŘÍDICÍ SYSTÉM – PRAKTICKÉ ZKUŠENOSTI S PROVOZEM

J. Klement

Abstract

The article describes the situation from the initial considerations of installing photovoltaic panels on the roofs on production halls, which ultimately was not realized. The project was revived a year ago when a photovoltaic system with a capacity of 99,45 kWp was installed on the roof and complemented by a battery energy storage system with a capacity of 92,8 kWh. The article further discusses the challenges related to commissioning and operating this system, as well as identifying operational issues that had not been anticipated in the project due to the lack of practical experience at the time. After successful commissioning and fine-tuning of the control system, the described project is already serving as a basis for two additional projects: another PV plant combined with a BESS for a railway vehicle manufacturing hall, followed by the installation of a BESS for a pressure vessel manufacturing plant.

Úvod

Přibližně před pěti lety se objevily první úvahy o výrobě elektřiny na třech střechách výrobních hal ve společnosti, která se zabývá výrobou bezešvých tlakových lahví pro přepravu a skladování technických plynů o vysokém tlaku. Z těchto úvah postupně sešlo, jednak z důvodu nevyhovujících nosností střech a jednak z problematického vyvedení výkonu z jednotlivých instalací. Před rokem byl vytypován objekt, který záměru instalace FVE a BESS plně vyhovoval.

Jedná se o objekt, kde se připravují obědy pro konzumaci v provozovně a je prováděna i rozvážka balených pokrmů. Úvaha o instalaci samotné FVE byla odmítnuta hned v úvodní části projektu, podmínkou byla instalace BESS, jednalo se o typický příklad akumulace elektřiny vyrobené ze slunce s odloženou spotřebou.

Cíle projektu

Provozovna pracuje výhradně v pracovních dnech na ranní směně, špičkový odběr elektřiny dosahuje hodnoty 75 kW, vařit se začíná v 5:30 hod., část jídel se předvařuje den předem a hned se šokově zchlazuje.

Cíle tohoto projektu:

- Uchování energie z denní výroby EE na FVE na brzké ranní vaření
- Úspora nákladů za distribuci EE z vnější sítě
- Nabíjení baterie při nízkých (záporných) tarifních cenách
- Úspora při snížení odběru EE při vysokých tarifních cenách řízeným vybíjením baterie
- Odzkoušet tento projekt jako pilotní a připravit podmínky pro další 2 podobné projekty

Pro inspiraci, jak to vypadalo na střeše objektu před a po instalaci fotovoltaických panelů je připojen Obr. 1, který zobrazuje pohled na objekt shora a po instalaci fotovoltaických panelů na střeše objektu.

47. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE



Obr. 1: a) Pohled na objekt shora, b) instalace fotovoltaických panelů na střeše.

Technické parametry

Fotovoltaická elektrárna, Pinst = 99,45 kWp:

- 234 panelů, á = 425 Wp, IP 68, typ Longi LR5 54 HTH, počet stringů = 6
- dovozce : LONGI Green Energy Technology DE
- FVE pořízena s dotací 30 %

Hybridní střídač, zdánlivý výkon 66,6 kVA:

- jmenovitý proud 98,5 A, cos fí = 0,98, typ SE 66,6 K
- výrobce : SolarEdge Technologies, Izrael

Základní technické parametry BESS:

- kapacita 92,80 kWh, výkon 50 kW, IP 55
- použité baterie : $LiFePO_4$ (lithium-železo-fosfátová baterie)
- dovozce GBC Solino ČR, výrobce Čína

Ještě v průběhu investičních prací bylo rozhodnuto o propojení dvou objektů ve vlastnictví investora, tzn. Jídelny Lesík a Vzdělávacího centra Kotkova. Propojení obou objektů je graficky zobrazeno na Obr. 2.



Obr. 2: Grafické zobrazení propojení objektů Jídelna Lesík a Vzdělávací centrum Kotkova.

Základní parametry propojení:

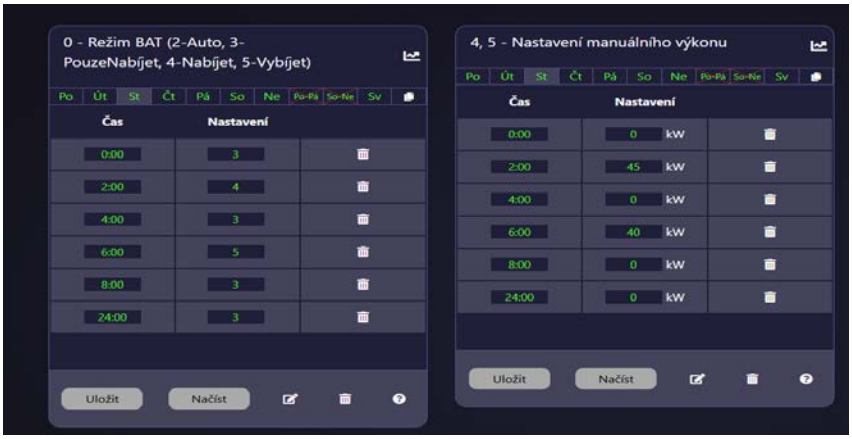
- původně 2 OM (Lesík = 3 x 630 A, Kotkova = 3 x 125 A)
- vzdálenost mezi objekty = 180 m
- propojovací nn kabel AYKY 3 x 240 + 120 mm^2

Cíle tohoto propojení :

- zrušit jedno připojení s síti distributora
- snížit distribuční poplatky za jištění
- nejít cestou sdílení elektřiny
- vyhnout se zřízení skupiny pro sdílení v EDC
- najít další možnosti pro podobná propojení mezi blízkými objekty

Běžný provoz a zkušenosti

V běžném provozu při programování řídicího systému je nastavován režim spolupráce fotovoltaiky s baterií, nastavení režimů pro středu 17.3.2026 je zobrazeno na Obr. 3.



Obr. 3: Nastavení režimů nabíjení a vybíjení sestavy FVE a BESS.

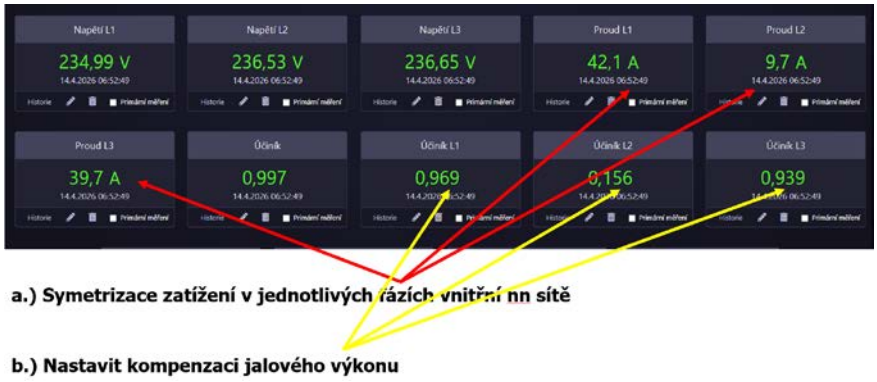
V průběhu zkušebního provozu byl odmítnut režim provozu „AUTO“, kdy si řídicí systém doslova „pohrával“ s cenovými tarify stahovanými z portálu OTE a střídal nabíjení a vybíjení baterie v porovnání s ručně nastaveným režimem vybíjení. Zde panovala obava z možného snížení životnosti baterie vlivem cyklování, průběhy obou režimů jsou zobrazeny na Obr. 4.



Obr. 4: Průběhy nabíjení v režimu AUTO a ručně nastaveno.

Zůstalo k dořešení

V průběhu zkušebního provozu bylo zjištěno, že chod baterie je silně ovlivněn dvěma faktory: nesymetrií zatížení v jednotlivých fázích vnitřní sítě provozovny a stejně tak i nesymetrie v účiníku, kdy fáze L2 zatížením vybočuje normálu a stejně tak je fáze L2 silně podkompenzována. Tento problém je připisován indukčním ohřevům. Náprava tohoto stavu je naplánována na období prázdnin. Situace se symetrií fází a účiníku je zobrazena na Obr. 5.



Obr. 5: Nesymetrie fází a účiníku ve vnitřní síti 0,4 / 0,231 kV provozovny.

Shrnutí výsledků

Projekt instalace fotovoltaiky ve spojení s akumulací je hodnocen velmi pozitivně z pohledu TOP managementu investora na dosahované úspory jak na straně snížení distribučních nákladů při decentralizované vlastní výrobě elektřiny z FVE, tak i na straně snížení ceny za nakupovanou komoditu vlivem řízení nákupu dle cenových tarifů na portálu OTE, nabíjení baterie při nízkém tarifu a vybíjení baterie při vysokém tarifu pro snížení drahého odběru elektřiny z vnější sítě.

Po vyladění nedostatků se symetrií fází a účiníku tento pilotní projekt poslouží jako reference pro další 2 projekty – FVE / BESS / ŘS a BESS / ŘS.

Poděkování

Autor příspěvku touto cestou děkuje organizátorovi 47. konference Nekonvenční zdroje elektrické energie za možnost se podělit o praktické zkušenosti s provozováním ekonomicky výhodné sestavy fotovoltaické elektrárny a baterie.

SOLID-STATE BATTERIES IN SEM: SAMPLE PREPARATION AND IMAGING

O. Klvač[1,2], D. Trochta[1,2], L. Novák[2] a T. Kazda[1]

1 Ústav elektrotechnologie, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, Technická 10, 616 00 Brno, Česká Republika
2 Thermo Fisher Scientific Brno, Vlastimila Pecha 12, 627 00, Brno, Česká Republika

Abstract

Scanning electron microscopy enables detailed investigation of battery materials. However, its application to solid-state batteries is limited by challenging sample preparation. This work highlights the role of broad ion beam polishing and optimized workflows to preserve structural and electrochemical integrity. The approach enables operando scanning electron microscopy observation of degradation phenomena such as cracking, expansion, and lithium growth in solid-state battery systems.

Úvod

Rostoucí nároky na výkon, bezpečnost a životnost elektrochemických zdrojů energie vedou k intenzivnímu vývoji pokročilých bateriových systémů, včetně solid-state baterií (SSB). Ty slibují vyšší energetickou hustotu a lepší bezpečnost oproti konvenčním lithno-iontovým článkům (Li-ion) s kapalným elektrolytem. Současně však přinášejí nové výzvy spojené s komplexními degradačními mechanismy, které probíhají na mikro i makro úrovni. Pro jejich pochopení je nezbytné využití pokročilých charakterizačních metod umožňujících sledování strukturálních změn v reálném čase [1–3].

Skenovací elektronová mikroskopie (SEM) představuje klíčový nástroj pro studium morfologie a mikrostruktury bateriových materiálů s vysokým prostorovým rozlišením. In-situ a zejména operando přístupy umožňují sledovat dynamické procesy během elektrochemického cyklování, čímž překonávají omezení ex-situ metod. Tyto techniky umožňují přímo pozorovat jevy jako například objemové změny elektrod, praskání částic nebo vznik dendritů – klíčové degradační mechanismy [4–9].

Elektrochemický článek je komplexní systém tvořený vrstvami a jejich rozhraními (aktivní materiál, pojivo, elektrolyt, separátor, proudové kolektory), přičemž vlastnosti rozhraní mezi nimi určují jeho funkčnost. Z tohoto důvodu je nezbytné analyzovat vzorky v řezu, který umožňuje vizualizaci vnitřní struktury článku a studium interakcí mezi jednotlivými vrstvami [10,11].

Experimentální přístup a příprava vzorku

Přestože většina operando publikovaných studií se úspěšně zaměřuje na systémy s kapalným elektrolytem, aplikace těchto metod na SSB představuje několik výzev. Zásadní roli zde hraje příprava vzorku, která musí zajistit nejen dostatečnou kvalitu povrchu pro SEM analýzu, ale zároveň zachovat elektrochemickou funkčnost systému.

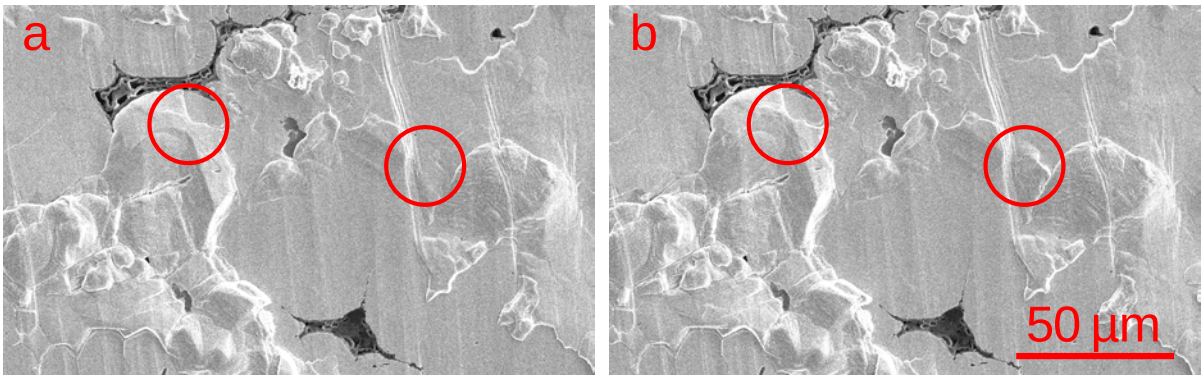
V první fázi byl článek řízeně fragmentován na menší vzorky kompatibilní s geometrií BIB držáku. Tento krok probíhal v rukavicovém boxu s argonovou atmosférou. Již během tohoto kroku může dojít ke změně mechanických vlastností, poškození rozhraní nebo úplné ztrátě funkčnosti článku. Z tohoto důvodu bylo do workflow zahrnuto průběžné elektrické monitorování vzorku, které umožnilo sledovat jeho stav v jednotlivých krocích přípravy.

Následně byl vzorek z rukavicového boxu přenesen do Broad ion beam (BIB) systému CleanMill (Fischer Scientific) pomocí CleanConnect (Fischer Scientific) inert gas transfer system pro zamezení expozice vzduchu. Pomocí argonového iontového svazku byla vytvořena široká analyzovatelná oblast s minimem artefaktů. Oproti mechanickému leštění nebo metodám založeným na fokusovaném iontovém svazku poskytuje tento přístup větší oblast řezu za kratší čas a nižší míru mechanického poškození. Takto připravený řez umožňuje sledovat strukturální změny od úrovně celé elektrody až po jednotlivá zrna aktivního materiálu a jejich rozhraní.

Současně bylo prokázáno, že i samotné BIB leštění může v případě SSB představovat kritický krok. Během přípravy může docházet k redepozici aktivního materiálu na povrch tuhého elektrolytu, což může vést ke

zkratování článku. Argonový iontový svazek může také indukovat nabíjení nebo vybíjení vzorku, a tím ovlivnit jeho elektrochemický stav.

Finálně byl vzorek umístěn do dedikovaného SEM držáku a pomocí systému CleanConnect přenesen do SEM komory, kde byl vložen do předem instalovaného adaptéru. Ten byl elektricky propojen s potenciostatem (Biologic SP-200) umístěným mimo komoru prostřednictvím vakuové průchodky. Článek byl následně cyklován a současně snímán v definovaných časových nebo napěťových intervalech. Příklad pozorovaného jevu je uveden na obr. 1, kde lze pozorovat místa růstu lithia během nabíjení článku.



Obr. 1: Operando SEM analýza systému LiIn – Li_6PS_5Cl – NMC: Li anoda na počátku experimentu před formací (a) a po prvním nabíjecím kroku (b). Červené kruhy označují místa růstu lithia; tmavé oblasti odpovídají pojivu s amorfním uhlíkem.

Závěr

Příspěvek se zabývá problematikou přípravy vzorků pro analýzu SSB pomocí SEM, se zaměřením na nutnost přípravy kvalitních řezů a zachování funkčnosti systému. Diskutovány jsou jednotlivé kroky experimentálního workflow, včetně fragmentace vzorku, BIB leštění a manipulace v inertní atmosféře, spolu s jejich kritickými místy a omezeními.

Součástí práce je prezentace vybraných výsledků jak z procesu přípravy vzorku, tak z následné operando analýzy během elektrochemického cyklování, které ilustrují možnosti i limity této metodiky při studiu degradačních jevů v SSB.

Poděkování

Publikace vznikla za finanční podpory projektu specifického výzkumu na VUT (projekt č. FEKT-S-26-8946). Práce je vyvíjena ve spolupráci s Thermo Fisher Scientific Brno.

Literatura

[1] V. Etacheri, R. Marom, R. Elazari, G. Salitra, and D. Aurbach, Energy & Environmental Science, 4 (2011)
[2] Y. Liang et al., InfoMat, 1, 6-32 (2019)
[3] H. -J. Kim et al., Electronics, 9 (2020)
[4] G. Q. Liu et al., Journal of Solid State Electrochemistry, 14, 2191-2202 (2010)
[5] M. Rana et al., Energy Storage Materials, 18, 289-310 (2019)
[6] C. D. Rahn, Battery systems engineering, John Wiley & Sons Ltd., Publication, Chichester, West Sussex, United Kingdom, (2013)
[7] C. Lin et al., Journal of Chemistry, 2015, 1-11 (2015)
[8] T. Kato et al., Scientific Reports, 15 (2025)
[9] O. Klvač et al., Energy Storage Materials, 81, 104516 (2025)
[10] E. P. Alsaç et al., Chemical Reviews, 125, 2009-2119 (2025)
[11] J. A. Lewis, J. Tippens, F. J. Q. Cortes, and M. T. McDowell, Trends in Chemistry, 1, 845-857 (2019)

VLIV FAKTORŮ OVLIVŇUJÍCÍCH PŘESNOST PREDIKCE VÝROBY ENERGIE Z VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN VZHLEDEM K EKONOMIKĚ PROJEKTU

D. Kudelas[1] a A. Novysedlák[2]

1 Fakulta BERG TU v Košiciach, Ústav zem. zdrojov, Oddelenie OZE, dusan.kudelas@tuke.sk
2 Fakulta BERG TU v Košiciach, Ústav zem. zdrojov, Oddelenie OZE, adam.novysedlak@student.tuke.sk

Abstract

Unsteady aerodynamic phenomena, turbulence, wind shear, changes in wind direction, and the wake effect have a significant impact on the accuracy of wind power generation prediction and, consequently, on project economics. Underestimating these effects leads to overestimation of expected energy production, which can negatively affect investment returns and overall project profitability. Therefore, accurate modeling of these phenomena is essential not only for the technical design of wind turbines and wind farms, but also for realistic economic evaluation. The implementation of advanced models and consideration of real operating conditions helps reduce prediction uncertainties and contributes to more efficient and sustainable utilization of wind energy.

Úvod

Jedným z problémov pri návrhu umiestnenia, odhade výkonu ale aj prevádzke veterných turbín je určenie nestacionárnych aerodynamických javov ku ktorým dochádza na profile ich lopatiek. Potrebujeme určiť nestacionárne aerodynamické zaťaženie lopatiek, výkon rotora, dynamické namáhanie a aeroelastické správanie listov turbíny. To všetko sa prejaví v skutočnej výrobe resp. množstve vyrobenej elektriny, nákladoch na prevádzku, servis a celkovú ekonomike projektu využitia veterných turbín. Opomenutie tohto, alebo nesprávny odhad môže viesť k naddimenzovaniu množstva vyrobenej elektriny a negatívne ovplyvniť ekonomický výsledok a rentabilitu. Predložený príspevok sa zaoberá kvantifikáciou nestacionárnych aerodynamických parametrov, ich vplyvom na výkon zariadenia a ekonomiku využitia veterného zariadenia, resp. veternej farmy.

Nestacionárne aerodynamické efekty

Výskum nestacionárnych aerodynamických efektov (unsteady aerodynamic effects) predstavuje jednu z najkomplexnejších výziev pri navrhovaní moderných veterných turbín. Keďže sa lopatky turbín neustále zväčšujú a stávajú sa flexibilnejšími, vplyv premenlivého prúdenia vzduchu na ich štrukturálnu integritu a efektivitu rastie. V kontexte veternej energetiky ide o analýzu neustáleného obtekania lopatiek veterných turbín, ktoré sú vystavené dynamickým zmenám prúdenia spôsobeným atmosférickými podmienkami a rotáciou rotora.

Nestacionárna aerodynamika predstavuje oblasť aerodynamiky, ktorá sa zaoberá časovo premenlivými javmi prúdenia vzduchu a ich interakciou s pevnými alebo pohyblivými telesami. Na rozdiel od stacionárnych modelov, ktoré predpokladajú ustálené prúdenie, reálne prevádzkové podmienky zahŕňajú turbulenciu, nárazy vetra a zmeny smeru prúdenia, čo vedie k dynamickému charakteru aerodynamických síl. Atmosférické prúdenie v oblasti veterných turbín je ovplyvnené viacerými faktormi: turbulenciou atmosférickej hraničnej vrstvy, vertikálnym profilom rýchlosti vetra (wind shear), nárazmi vetra (gusts), tieňovým efektom veže, interakciou medzi turbínami (wake effect).

Tieto faktory spôsobujú časovú závislosť uhla nábehu $\alpha(t)$, čo vedie k nestacionárnym aerodynamickým silám. Pohyb tekutín je opísaný pomocou Navier–Stokesove rovnice:

$$\rho\left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}\cdot\nabla)\mathbf{v}\right) = -\nabla p + \mu\nabla^2\mathbf{v} + \mathbf{f}$$

kde: $\mathbf{v}$ je rýchlostné pole, p tlak, ρ hustota, μ dynamická viskozita. Nestacionárnosť je reprezentovaná členom $\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}$, ktorý vyjadruje časovú zmenu prúdenia.

Jedným z najvýznamnejších javov je dynamické odtrhnutie prúdu (dynamic stall). Na rozdiel od stacionárneho prípadu, kde k odtrhnutiu dochádza pri kritickom uhle nábehu, pri nestacionárnom prúdení dochádza

k oneskoreniu tohto javu. Dynamic stall čiastočne predstavuje oneskorenie nástupu separácie toku pri vyšších uhloch nábehu ako to, ktoré by malo nastať štatisticky. Je však potrebné pri tomto oneskorení zobrať do úvahy aj vírové porušenie ktoré nastane na nábehovej strane lopatky. V závislosti od dĺžky trvania vírového porušenia na profile lopatky sa bude vytvárať a zvyšovať vztlak. Vírové prúdenie nie je stabilné a vír sa rýchlo presúva nad tetivou lopatky. Toto prúdenie produkuje rýchly pohyb v zadnej časti tlakového stredu a výsledkom je veľký moment nakláňania a zvýšenie torzného zaťaženia na lopatku.

S rastom uhla nábehu dochádza k separácii prúdenia v bode tlakového gradientu na prednej strane lopatky v dôsledku pôsobenia dynamických podmienok. Experimentálnymi metódami sa zistilo, že formovanie šmykovej vrstvy je možné len na nábehovej strane lopatky v smere prúdenia, ktoré sa rýchlo zroluje a spôsobí vírenie. Po krátkom čase od vzniku vírenie opúšťa nábehovú hranu a je vedené nad povrchom krídla turbíny. Tento proces indukuje tlakovú vlnu, vztlak ako aj zaťaženia pri rovnakom uhle nábehu. Pri rýchlych zmenách uhla nábehu alebo rýchlosti vetra nevzniká okamžitá zmena vztlaku a odporu. Tento jav sa opisuje pomocou pamäťových efektov prúdenia (tzv. wake memory). Matematicky sa často modeluje pomocou diferenciálnych rovníc s časovými konštantami. Pri rotujúcich lopatkách vzniká indukovaná rýchlosť prúdenia, ktorá sa mení v čase. Zmena zaťaženia lopatky sa neprejaví okamžite v celom prúde za turbínou. Tento efekt je kľúčový pri modelovaní pomocou metód ako: Blade Element Momentum (BEM) s dynamickou indukciou, Pitt–Peters model, Øye model.

Nestacionárna aerodynamika je úzko prepojená s aeroelasticitou. Lopatky turbíny sa deformujú v dôsledku aerodynamických síl, pričom táto deformácia spätne ovplyvňuje prúdenie. Tento obojsmerný proces môže viesť k: tlmeniu alebo zosilneniu vibrácií, aeroelastickej nestabilite (napr. flutter), zmene účinnosti turbíny. Nestacionárne javy majú zásadný dopad na: **únavovú životnosť** komponentov (lopatky, náboj, veža), **výkon turbíny**, najmä pri premenlivých veterných podmienkach, **riadiace algoritmy** (pitch a yaw regulácia), **akustické emisie** (hluk spôsobený turbulenciou a odtrhnutím prúdu).

Preto je ich správne modelovanie kľúčové pri návrhu moderných veterných turbín. Na analýzu nestacionárnych javov sa používajú rôzne prístupy s rôznou mierou presnosti a výpočtovej náročnosti: **A)Inžinierske modely:** rozšírené BEM metódy s dynamickými korekciami, empirické modely dynamického stall-u (napr. Beddoes–Leishman model), **B) Vortexové metódy:** free wake modely, lifting line metódy, ktoré umožňujú detailnejšie zachytiť vírové štruktúry v prúde. **C) Numerické simulácie (CFD), tj. p**okročilé metódy založené na riešení rovníc prúdenia (napr. Navier–Stokesove rovnice) umožňujú presnú analýzu nestacionárnych javov vrátane turbulencie a vírových interakcií. Nevýhodou je vysoká výpočtová náročnosť.

Turbulencia a strih vetra

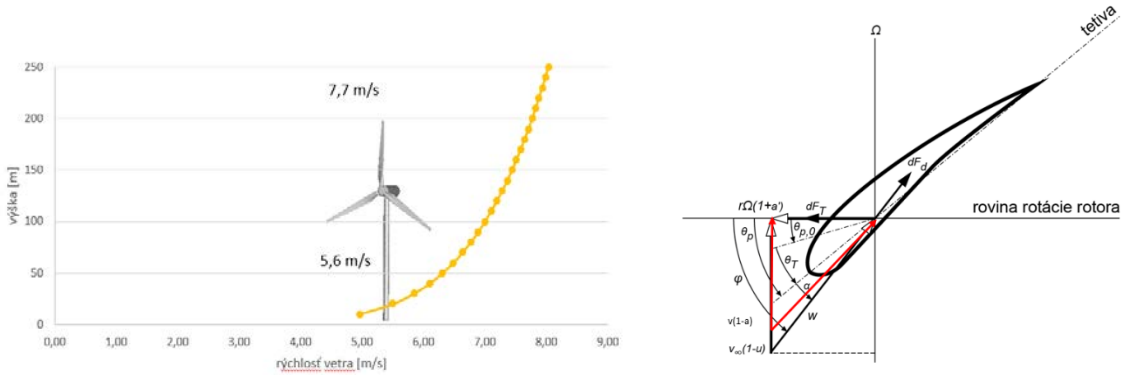
Turbulencia v atmosférickej hraničnej vrstve predstavuje jeden z faktorov ovplyvňujúcich aerodynamiku veterných turbín. Ide o chaotické, trojrozmerné a časovo premenlivé fluktuácie rýchlosti a tlaku vzduchu, ktoré vznikajú v dôsledku interakcie prúdenia s povrchom Zeme a tepelnými procesmi v atmosfére. Atmosférická hraničná vrstva (AHV) je spodná časť troposféry, ktorej vlastnosti sú priamo ovplyvnené zemským povrchom. Jej hrúbka sa pohybuje približne od 100 m do 2 km v závislosti od dennej doby, teplotnej stratifikácie a drsnosti povrchu. Turbulencia atmosférickej hraničnej vrstvy vstupuje do výpočtu zaťaženia lopatiek veternej turbíny prostredníctvom časovo premenlivej rýchlosti vetra. Táto premenlivosť spôsobuje zmenu relatívnej rýchlosti prúdenia na profile lopatky a zmenu uhla nábehu, čím priamo ovplyvňuje súčinitele vztlaku a odporu. Následne dochádza k časovo závislým zmenám normálových a tangenciálnych síl pôsobiacich na jednotlivé elementy lopatky. Integráciou týchto síl po dĺžke lopatky sa získavajú ohybové momenty, ktoré predstavujú základný vstup pre pevnostné a únavové posúdenie konštrukcie. Vyššia intenzita turbulencie vedie k väčším amplitúdam zaťaženia, čo sa prejavuje zvýšeným únavovým poškodením a skrátením životnosti lopatky.

V tejto vrstve dochádza k výraznému **gradientu rýchlosti vetra** (wind shear), ktorý sa často aproximuje logaritmickým profilom:

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

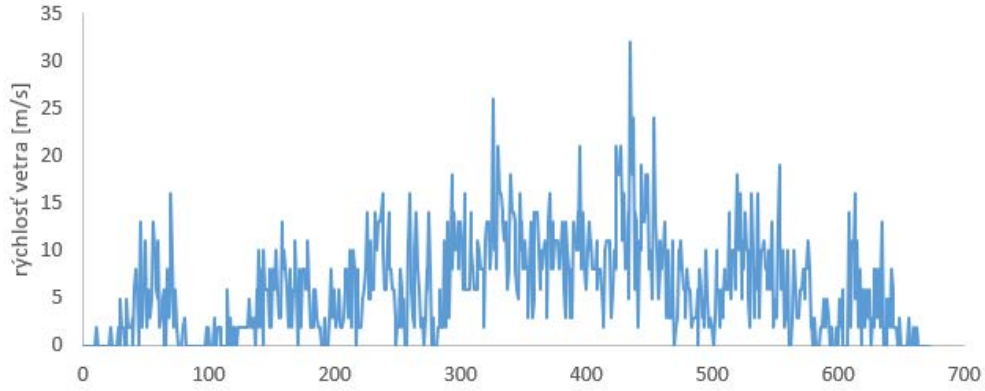
kde: $U(z)$je rýchlosť vetra vo výške z, u_*je trecia rýchlosť, κje von Kármánova konštanta (~0,4), $z_0$je drsnostná dĺžka povrchu.

47. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE



Obr. 1: Strih vetra a pôsobenie síl na profil lopatky.

Turbulentné prúdenie je charakterizované rozkladom rýchlosti na strednú a fluktuačnú zložku $u(t) = \bar{u} + u'(t)$ kde: $\bar{u}$ je stredná hodnota rýchlosti, $u'(t)$ je turbulentná fluktuácia. Turbulencia je generovaná dvoma hlavnými mechanizmami a to m**echanickou turbulenciou (**trenie prúdenia o zemský povrch a vplyv prekážok (budovy, vegetácia, terén) a t**ermickou (konvektívnou) turbulenciou** (v dôsledku teplotných rozdielov). Turbulencia sa nepopisuje deterministicky, ale štatisticky. Základným parametrom je **intenzita turbulencie**: $I = \frac{\sigma_u}{\bar{U}}$kde: $\sigma_u$je smerodajná odchýlka rýchlosti, $\bar{U}$je stredná rýchlosť vetra.



Obr. 2: Priebeh rýchlosti vetra - Košice, 21 – 27.5.2012.

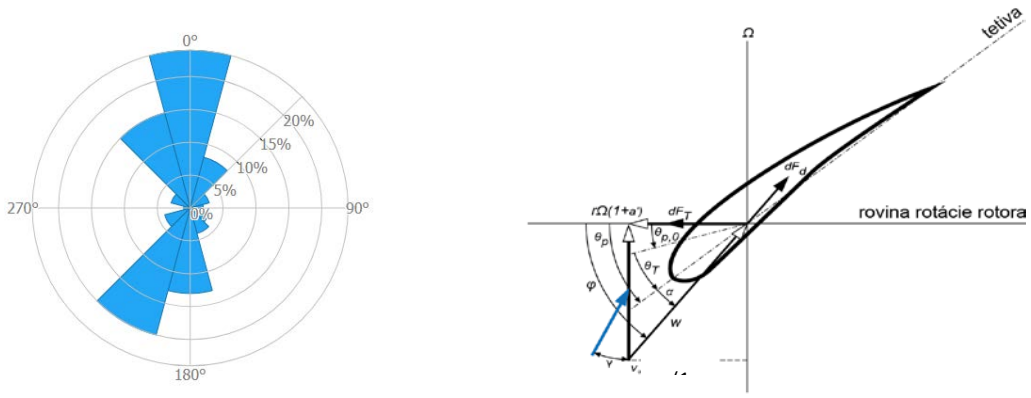
Zmena smeru vetra a úplav za veternou turbínou

Náhle zmeny rýchlosti vetra, označované ako nárazy vetra, predstavujú významný zdroj nestacionárneho zaťaženia veterných turbín. Tieto javy spôsobujú rýchle zmeny relatívnej rýchlosti prúdenia a uhla nábehu na lopatkách, čo vedie k dynamickým zmenám aerodynamických síl. V dôsledku kvadratickej závislosti vztlaku od rýchlosti prúdenia môžu nárazy vetra vyvolať výrazné špičky zaťaženia, ktoré majú zásadný význam pre dimenzovanie konštrukcie a hodnotenie únavovej životnosti lopatiek.

Zmeny smeru prúdenia predstavujú významný zdroj nestacionárnosti vetra, pretože nemenia iba veľkosť rýchlosti vetra, ale aj **orientáciu vektora prúdenia vzhľadom na rovinu rotora, os turbíny a jednotlivé profily lopatiek**. V dôsledku toho sa mení uhol, pod ktorým prúd vzduchu nateká na rotor, čo priamo ovplyvňuje aerodynamické sily, momenty aj dynamickú odozvu celej turbíny, čo spôsobí celkový pokles výkonu zariadenia.

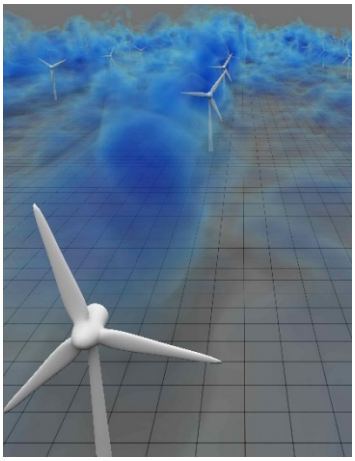
Pri analýze veterných turbín je preto potrebné zmenu smeru vetra chápať ako jav, ktorý vyvoláva: zmenu uhla natočenia prúdu voči osi rotora, nerovnomerné zaťaženie po ploche rotora, časovo premenlivý uhol nábehu na lopatkách, dodatočné ohybové a torzné zaťaženie. Pri návrhu veterných turbín sa zmeny smeru vetra posudzujú aj ako extrémne prevádzkové stavy. Dôležité sú najmä situácie, keď dôjde k: náhlej zmene smeru pri vysokej rýchlosti vetra, súčasnej zmene smeru a veľkosti rýchlosti, koherentnej zmene smeru na veľkej časti rotora. Takéto stavy sú kritické, pretože môžu vyvolať vysoké asymetrické zaťaženie ešte skôr, ako zareaguje yaw systém.

47. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE



Obr. 3: Smer vetra a pôsobenie síl na profil lopatky.

Interakcia prúdenia vetra s prekážkami a inými veternými turbínami vedie k vzniku závetria (wake), ktoré je charakterizované zníženou rýchlosťou vetra a zvýšenou turbulenciou. Turbíny pracujúce v závetrí iných turbín sú vystavené nižšej strednej rýchlosti vetra, čo spôsobuje pokles výkonu, a zároveň vyššej úrovni turbulencie, ktorá vedie k zvýšenému dynamickému a únavovému zaťaženiu lopatiek. Wake efekt tak predstavuje významný faktor pri návrhu veterných parkov aj pri analýze životnosti veterných turbín.



Obr. 4: Úplav veterných turbín

Vplyv na výkon zariadení

Efekty nestacionárnej aerodynamiky významne ovplyvňujú výkon veterných zariadení a tým aj celkové množstvo vyrobenej elektrickej energie. Tieto javy sa prejavujú vo forme aerodynamických strát, ktoré je nevyhnutné zohľadniť pri návrhu a dimenzovaní veterných parkov. Pri určovaní optimálneho umiestnenia veterných zariadení je potrebné uvažovať so stratami dosahujúcimi až približne 15 % v porovnaní s ideálne predpokladanou výrobou elektrickej energie.

Pre názornosť uvádzame tabuľku návrhu veterných turbín pre rovinatú krajinu (VESTAS) a hornatú (Nordex) s ich ekonomickými parametrami a ich umiestnenie na Slovensku so zarátaním strát.

Tabulka 1: Ekonomické parametre dimenyovanej veternej turbíny.

PARAMETER	VESTAS V162-6.2 MW	NORDEX N175/6.X
NETTO VÝROBA	15 004,8 MWh/rok	15 336 MWh/rok
TRŽBY PRI 80 €/MWH	1 200 384 €	1 226 880 €
OPEX	585 187 €	628 776 €
EBITDA	615 197 €	598 104 €
CAPEX	10,2 mil. €	10,8 mil. €
JEDNODUCHÁ NÁVRATNOSŤ	16,6 roka	18,1 roka
ORIENTAČNÉ LCOE	102,7 €/MWh	107,0 €/MWh

Ak by sa do výpočtu nezarátavali straty vo výrobe energie by boli zančné. Takéto odchýlky môžu výrazne ovplyvniť ekonomickú efektívnosť projektov využívajúcich veternú energiu.

Záver

Na základe analyzovaných faktorov je zrejmé, že nestacionárne aerodynamické javy, turbulencia, strih vetra, zmeny smeru prúdenia a wake efekt majú zásadný vplyv na presnosť predikcie výroby elektrickej energie z veterných turbín a tým aj na ekonomiku projektov. Ich podcenenie vedie k nadhodnoteniu očakávanej výroby, čo môže negatívne ovplyvniť návratnosť investícií a celkovú rentabilitu. Presné modelovanie týchto javov je preto nevyhnutné nielen z hľadiska technického návrhu turbín a veterných parkov, ale aj pre realistické ekonomické hodnotenie projektov. Implementácia pokročilých modelov a zohľadnenie reálnych prevádzkových podmienok umožňuje znížiť neistoty v predikcii a prispieva k efektívnejšiemu a udržateľnému využívaniu veternej energie.

Literatura

[1] D. KUDELAS ET ALL.: The Unsteady Aerodynamic Effects on Wind Equipment, monograph, 2013
[2] KUDELAS, D.: Modelovanie nestacionárnych aerodynamických procesov pri návrhu veterného zariadenia. In: Acta Montanistica Slovaca. Roč. 15, č. 2 (2010), s. 153-158. - ISSN 1335-1788
[3] LEISHMAN, G. : Principles of Helicopter aerodynamics. Cambgidge university press. 2006, ISBN 978-0-521-85860
[4] SANDERSE, B., VAN DER PIJL, S. P, KOREN, B.: Review of computational fluid dynamics for wind turbine wake aerodynamics, Wind Energy 2011
[5] URBANOVÁ, M., KUDELAS, D.: Prejavy nestacionárnych aerodynamických javov na lopatke veternej turbíny. In: Elektrorevue. No. 11 (2012), p. 11-1-11-7. - ISSN 1213-1539
[6] LEISHMAN, J.G.: Challenges in modelling the unsteady aerodynamics of wind turbines. Wind Energ., 5: 85-132. https://doi.org/10.1002/we.62

PREDIKCIA VÝROBY FVE A SKUTOČNÁ VÝROBA Z FVE A JEJ VYUŽITIE V KOMPLEXNOM ENERGETICKOM SYSTÉME VÝROBNEJ HALY ÚMMS SAV

J. Kurcz[1], J. Longauer[1], J. Poničan[2], P. Kozlík[3] a R. Behul[4]

1 Ústav materiálov a mechaniky strojov SAV v.v.i., Dúbravská cesta 9/6319, 845 13 Bratislava
2 Ústav materiálov a mechaniky strojov SAV v.v.i , INOVAL - Inovačné centrum, Priemyselná 525, Ladomerská Vieska, 965 01 Žiar nad Hronom
3 Ústav informatiky SAV v.v.i., Dúbravská cesta 9/6319, 845 13 Bratislava
4 Slovenské centrum digitálnych inovácii (SCDI), Nivy Tower, Mlynské Nivy II. 18890/5, 821 09 Bratislava

Abstract

This paper investigates the accuracy of photovoltaic (PV) power generation forecasting, which is influenced by multiple factors. Each input parameter of the forecasting model exhibits a specific degree of impact as well as stochastic behavior. The study analyzes the influence of selected external factors on forecasting accuracy, with primary focus on weather variability and the impact of surrounding objects. The results indicate that forecasting accuracy decreases significantly during partly cloudy conditions and during summer afternoon hours. In the second part of the paper, the authors describe the importance of PV power generation forecasting for the operation of the production hall of the Institute of Materials and Machine Mechanics of the Slovak Academy of Sciences. Furthermore, the effects of inaccurate or erroneous forecasts on this facility, as well as on similar types of facilities, are analyzed. The paper highlights the necessity of PV power forecasting even for smaller energy systems that possess a certain degree of flexibility in electricity consumption and energy storage capabilities. The final part of the paper evaluates the amount of efficiently utilized electrical energy and the achieved cost savings. The paper concludes with a discussion of further possibilities for increasing the efficient utilization of electricity generated by photovoltaic systems.

Úvod

Rozvoj fotovoltických systémov a ich integrácia do elektroenergetických sústav predstavujú významnú technickú a prevádzkovú výzvu. Medzi základné požiadavky kladené na výrobné zdroje elektrickej energie patria najmä stabilita, predikovateľnosť, spoľahlivosť a bezpečnosť dodávky elektrickej energie. Fotovoltické elektrárne (FVE), podobne ako viaceré obnoviteľné zdroje energie (OZE), premieňajú primárny energetický tok s výrazne stochastickým charakterom na elektrickú energiu v reálnom čase. Z tohto dôvodu sú z pohľadu prevádzky elektrizačnej sústavy a trhu s elektrinou považované za intermitentné zdroje [1,2].

V súčasnosti sa odhad výroby elektrickej energie z FVE realizuje prostredníctvom predikčných modelov a softvérových nástrojov, ktorých vstupnými parametrami sú okrem technických charakteristík FV systému aj meteorologické podmienky, degradácia komponentov, znečistenie panelov, tienenie okolitými objektmi a ďalšie prevádzkové faktory [3]. S rozvojom big-data analytiky a metód umelej inteligencie založených na neurónových sieťach sú tieto modely čoraz častejšie trénované na historických dátach, čo vedie k postupnému zvyšovaniu presnosti predikcie.

Cieľom tejto štúdie je identifikovať súvislosti medzi nepresnosťou predikcie výroby elektrickej energie z FV systémov a vybranými externými faktormi, ktoré je možné ďalším rozšírením modelu eliminovať alebo aspoň kvantifikovať. Zároveň sa analyzujú podmienky, pri ktorých možno očakávať zvýšenú mieru stochastickosti výroby a tým aj vyššiu chybu predikcie.

Článok analyzuje predikčné dáta poskytnuté spoločnosťou Solargis a prevádzkové merania realizované na Ústave materiálov a mechaniky strojov Slovenskej akadémie vied (ÚMMS SAV). Model predikcie explicitne nezohľadňuje priestorové rozloženie objektov v okolí FV systému; vplyv tienenia je preto zahrnutý iba nepriamo prostredníctvom validácie dlhodobých nameraných dát. Predikčný model je zároveň prispôsobovaný požiadavkám konkrétneho používateľa alebo nadradeného energetického systému, ktorý výsledky predikcie ďalej spracováva.

Analýza

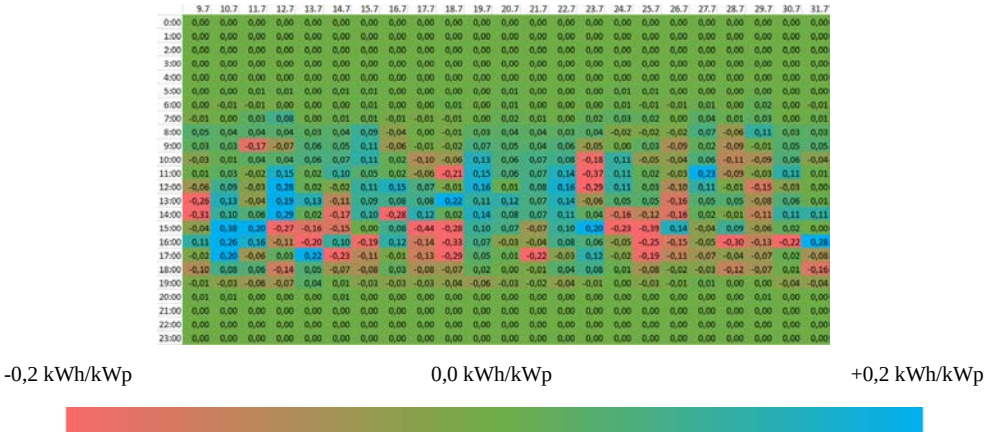
Pre účely hodnotenia a vzájomného porovnania modelov predikcie bol zavedený ukazovateľ presnosti predikcie Δp, definovaný ako súčet kladných a záporných odchýlok (chýb) medzi skutočnou a predikovanou výrobou elektrickej energie vztiahnutý na inštalovaný výkon FV systému (1). Parameter ΔE vyjadruje odchýlku (chybu) medzi reálnou a predikovanou výrobou v jednotlivých časových intervaloch, pričom kladná hodnota reprezentuje výrobu prevyšujúcu predikciu a záporná hodnota naopak stav, keď predikcia prevyšuje skutočnú výrobu. Parameter P_{inst} predstavuje inštalovaný výkon elektrárne.

$$\Delta p_{-} = \frac{\sum_{t=0}^{t=n} \Delta E_t^{-}}{P_{inst}} \quad \text{a} \quad \Delta p_{+} = \frac{\sum_{t=0}^{t=24\cdot365} \Delta E_t^{-}}{P_{inst}} \qquad (1)$$

V ďalšej analýze sa pracuje s predikčnými horizontmi T-1 h, T-24 h a T-48 h, ktoré reprezentujú predikciu výroby jednu hodinu, dvadsaťštyri hodín a štyridsaťosem hodín pred skutočnou výrobou. Analýza ukázala, že priemerné sumárne záporné chyby predikcie T-1 h dosahujú približne 8,0 % a kladné chyby 9,8 % z predpokladanej priemernej ročnej výroby FV systému [4]. V prípade predikcie T-24 h dosahovali záporné aj kladné chyby približne 13,3 %, resp. 13,4 % (Tabulka 1). Ukážka mapy chýb pre vybrané dni horizontu T-24 h je zobrazený na Obr. 1.

Tabulka 1: Popis ročnej presnosti modelu pre predikciu výroby FVE spoločnosti Solargis
("Solar resource data © 2026 Solargis")

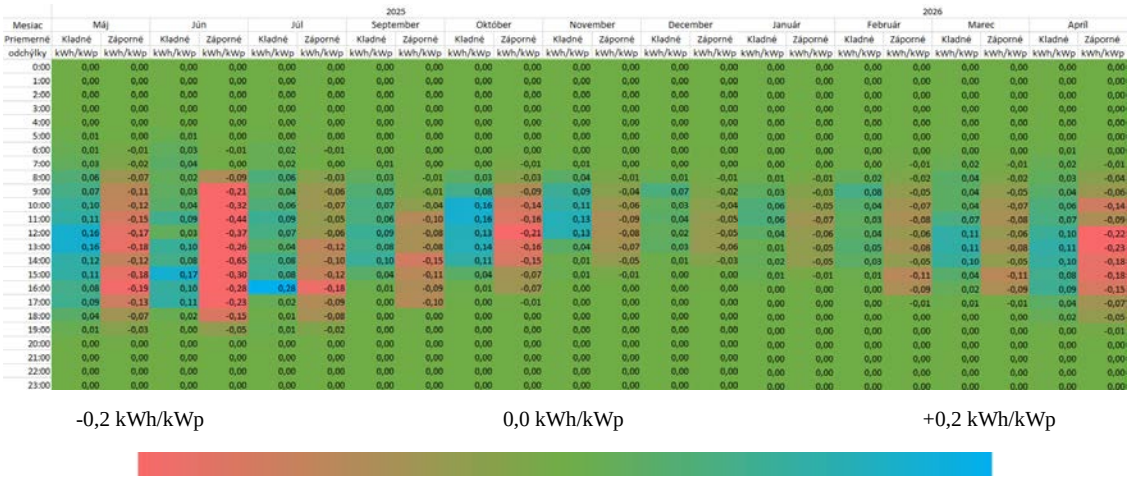
Ukazovateľ presnosti	Predikcia T-1 h	Predikcia T-24 h	Predikcia T-48 h
Δp-	-96,97 kWh/kWp	-161,37 kWh/kWp	-183,76 kWh/kWp
Δp+	+119,26 kWh/kWp	+163,00 kWh/kWp	+168,01 kWh/kWp
RMSE	5,53%	7,37%	8,07%
Dostupnosť dát	69,61%	76,5%	76,3%



Obr. 1: Ukážka mapy presnosti predikcie medzi dňami 9.7.2025 a 31.7.2025 pre predikciu T-24 h.

Analýza priemerných hodinových chýb v jednotlivých mesiacoch poukázala na výrazne vyššie chyby predikcie, predovšetkým záporného charakteru, v období od apríla do októbra (Obr. 2). Naopak, nižšie chyby boli zaznamenané počas zimných mesiacov, čo pravdepodobne súvisí so stabilnejším charakterom počasia a nižším výskytom premenlivej oblačnosti. Zvýšené chyby boli zároveň identifikované najmä v popoludňajších hodinách počas vegetačného obdobia, pričom ich časový posun korešpondoval s pohybom slnka vzhľadom na letný slnovrat. Predpokladá sa, že významný vplyv na tieto odchýlky má tienenie spôsobené okolitými stromami a objektmi nachádzajúcimi sa v severozápadnom až severnom smere od FV systému.

47. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE



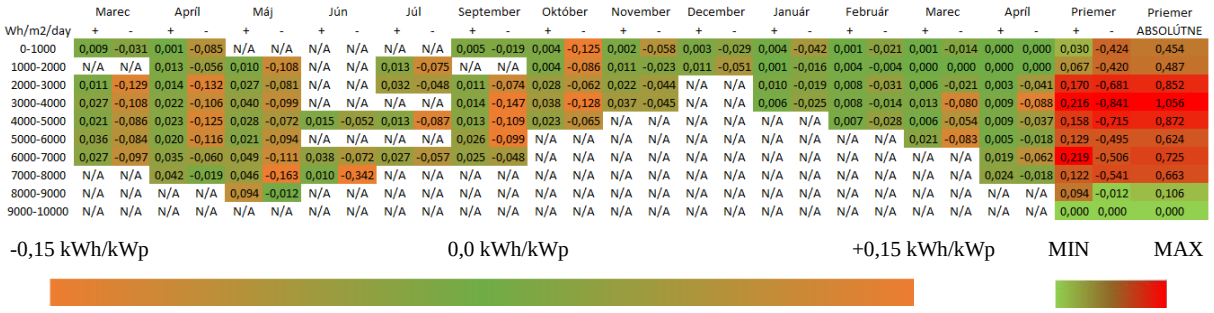
Obr. 2: Ukážka mapy chýb predikcie v období 1.5.2025-30.4.2026 pre predikciu T-24hod.

Na kvantifikáciu stochastickosti výroby bol analyzovaný aj parameter minimálnej a maximálnej predikovanej výroby elektrickej energie. Výsledky (Tab. 2) ukázali, že presnosť predikcie minimálnej výroby sa zlepšuje so skracovaním predikčného horizontu, zatiaľ čo presnosť predikcie maximálneho výkonu nevykazuje významné zlepšenie, v niektorých prípadoch dokonca dochádza k jej zhoršeniu (2026).

Tab. 2: Početnosť prekročenia predikovanej minimálnej a maximálnej výroby vyjadrená percentuálne voči počtu predpovedaných hodnôt.

	Parameter	T-1Hod	T-24Hod	T-48Hod
2025 (apríl - december)	Maximum	7,49%	7,67%	7,75%
	Minimum	3,79%	5,23%	5,73%
2026 (január – apríl)	Maximum	6,22%	5,33%	4,74%
	Minimum	5,52%	7,36%	8,54%

Ďalšia časť štúdie analyzuje vzťah medzi presnosťou predikcie a celkovou dennou dopadnutou slnečnou energiou (Obr. 3). Výsledky ukázali, že najväčšie chyby predikcie sa vyskytujú pri dennej globálnej irradiácii približne 2000–5000 Wh/m², pričom maximum chýb bolo zaznamenané v intervale 3000–4000 Wh/m². Takéto podmienky sú typické pre polooblačné dni s nesúvislou oblačnosťou, počas ktorých je veľmi náročné presne predikovať krátkodobé zmeny intenzity slnečného žiarenia.



Obr. 3: Diagram priemernej kladnej a zápornej odchýlky v danom mesiaci na v závislosti od množstva dopadnutej slnečnej energie na FV elektráreň.

Experiment

Experimentálna časť článku opisuje implementáciu predikčného systému v prevádzke výrobnej (experimentálnej) haly ÚMMS SAV, kde sú prevádzkované tri FVE inštalovanými výkonmi 8,5 kWp, 10,5 kWp a 15,5 kWp. Elektrická energia z FVE je využívaná na napájanie spotrebičov s rôznou mierou flexibility prevádzky, medzi ktoré patria tepelné čerpadlá, kompresory, zásobníkové ohrievače vody a ďalšie technologické zariadenia.

Za účelom zvýšenia miery využitia elektrickej energie z FVE bol implementovaný batériový systém (BESS) riadený podľa tokov elektrickej energie cez hlavný prívod objektu. Riadiaci systém zabezpečuje nabíjanie alebo vybíjanie BESS v závislosti od aktuálneho výkonu FVE a spotreby objektu. Súčasne bol vytvorený

prediktívny systém riadenia flexibilných spotrebičov, ktorý umožňuje obsluhe plánovať prevádzku zariadení podľa očakávanej energetickej bilancie objektu v horizonte troch dní (Obr. 4). Toto zariadenie signalizuje obsluhe energetický stav pre 3 dni (aktuálny a 2 ďalšie). Obsluha navolí predpokladaný časový interval prevádzky daného zariadenia (doobeda, poobede, večer). Systém voľbu vyhodnotí, prepočíta energetický stav a signalizácia zobrazí predpokladaný stav (zelená – predpokladané prebytky, modrá – dostatok elektrickej energie, červená – nutnosť dodávky elektrickej energie zo siete).



Obr. 4: Zľava: časť skriptu predikčného algoritmu, zariadenie pre voľbu pracovného intervalu, výstup predikovania prevádzky.

Na základe prevádzkových záznamov bolo analyticky vyhodnotené, že v období február až apríl 2026 bolo prostredníctvom prediktívneho riadenia využitých približne 167,64 kWh elektrickej energie na nabíjanie elektromobilov a 311,62 kWh na prevádzku tepelného čerpadla. Ďalšie flexibilné zariadenia využili približne 20–30 kWh elektrickej energie optimalizovanej na základe predikcie výroby. Na základe priemerných cien elektrickej energie pre daný objekt bola celková úspora viac ako 120€. Pre dané aplikácie je úplne postačujúca základná predikcia, ktorá je dostupná už aj od 18 €/mesiac [5]. V rámci projektu SPICE bol vyvinutý predikčný softvér na základe open-source algoritmov, ktorý v prvom kroku dosiahol chybovosť RMSE o 177% horšiu ako model Solargis. Následne metódou, ktorá kombinuje váženie obtiažnosti, horizontu a režimu so stratami po častiach vyvinutým Ústavom informatiky SAV bol model horší už len o 91%. Takáto predikcia je tiež postačujúca pre prevádzky bez obchodovania s elektrinou z FVE. Pre prevádzky s FVE, kde je dostupné už aj menšie zariadenie s flexibilným výkonom aspoň 10-20 kW a ročnou spotrebou >5 MWh (v závislosti od miery flexibility) je predikcia určite prínosná.

Zhrnutie

Výsledky štúdie potvrdzujú, že presnosť predikcie výroby elektrickej energie z FVE je významne ovplyvnená najmä lokálnym tienením a stabilitou meteorologických podmienok. Vplyv tienenia je možné do značnej miery eliminovať využitím dlhodobých historických dát, zatiaľ čo eliminácia chýb spôsobených krátkodobými zmenami oblačnosti zostáva náročná. Presnejšie krátkodobé predikcie by bolo možné dosiahnuť implementáciou lokálnych meteorologických senzorov alebo využitím dát z okolitých FV systémov [6].

Štúdia zároveň potvrdzuje, že implementácia aj relatívne jednoduchej predikcie výroby elektrickej energie môže významne zvýšiť mieru lokálneho využitia energie z FVE, najmä v objektoch disponujúcich flexibilnými spotrebičmi alebo systémami akumulácie energie.

Ďalšie zvýšenie využiteľnosti FVE je možné docieliť zavedením alternatívne iných flexibilných zariadení ako napríklad

výroba dusíka a s ním spojená prevádzka vysokotlakového kompresora
inteligentná prevádzka nízkotlakového kompresora so vzdušníkom
prispôsobenie experimentov

ÚMMS sa priamo na základe týchto výsledkov podieľa na projekte TIK (Transformation and Inovation Consortium)s názvom Smart Data Pipeline for Cognitive Compute Continuum (SPICE). Cieľom projektu je vytvoriť inovačnú platformu „Smart Data Pipeline“ , ktorá bude bezpečne a dôveryhodne a štruktúrovane schopná extrahovať dôležité a spoľahlivé dáta z heterogénnych a diverzifikovaných zdrojov a spracovávať dáta z oblasti výroby, energetiky, medicíny a potenciálne mnohých ďalších odvetví. Cieľom je tiež dosiahnuť integráciu s „European Open Service Cloud“ a „European Common Data Space“ . ÚMMS je integrované v projekte SICE ako jedno zo zatiaľ z dvoch pilotných pracovísk v spolupráci s partnerom projektu SPICE - Slovenského centra digitálnych inovácií (SCDI). Prostredníctvom SCDI sa ÚMMS podieľa na realizácii „Use case“ č.3 Smart Gridu, zameraného na optimalizáciu manažmentu získavania energie a jej využitia jednak z technicko-energetického hľadiska ako aj z komerčnej stránky pri úspore energií, resp. tvorby zisku. Silnou stránkou v danom pilote sú predikčné modely v oblasti získavania energií a jej spotreby s využitím umelej inteligencie.

Poďakovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci programu Obnoviteľná energia pre vytvorenie vyváženého ekologického programu znižovania emisií uhlíka. Financované EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu 09I04-03-V02-00033.

Funded by the EU NextGenerationEU through the Recovery and Resilience Plan for Slovakia under the project No. 09I02-03-V01-00012.

Literatúra

[1] J. KURCZ et al.: 11th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, Dynamic Changes of Photovoltaic Power Plants Power Supply, str. 251-255, 2022.
[2] J. KURCZ et al.: Elektrotechnologie 2023, Fotovoltické elektrárne a energetický trh, 2023
[3] L. LANZILAO, A. MEYER Intraday spatiotemporal PV power prediction at national scale using satellite-based solar forecast models., 2026, 10.48550/arXiv.2601.04751.
[4] European Commission Joint Research Centre (JRC), PVGIS © European Communities, 2001–2026, https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/, Dataset: SARAH-3, Accessed: 10 May 2026
[5] steadysun https://steady-sun.com/pricing/ Accessed: 10 May 2026
[6] L. ZHENYU et al: Attention-BiLSTM Ultra-Short-Term Photovoltaic Power Output Forecasting Method Based on Multidimensional IoT Data Acquisition. International Journal of High Speed Electronics and Systems. (2026) 10.1142/S0129156426400264.

HYBRIDNÉ PANELY PVT V REÁLNEJ PREVÁDZKE NA ÚMMS SAV

J. Longauer[1], P. Kurcz[1], J. Poničan[2] a P. Oslanec[2]

1 Ústav materiálov a mechaniky strojov, SAV, Dúbravská cesta 9, 845 13 Bratislava, Slovenská republika
2 Inoval – SAV, Priemyselná 525. Ladomerská Vieska 965 01 Žiar nad Hronom, Slovenská republika

Abstract

This study evaluates hybrid PVT collectors developed at UMMS SAV, utilizing aluminum foam to enhance cooling and thermal energy extraction. Experimental measurements compare these prototypes with conventional panels under both static positioning and dual-axis solar tracking. By analyzing the influence of coolant temperature and structural connection details across different seasons, key data are obtained to optimize insulation and PV panel cooling. The results directly contribute to increasing the overall efficiency of hybrid systems in practical applications.

Úvod

Fotovolticko-termické panely (PVT), označované aj ako hybridné solárne kolektory, predstavujú zariadenia na súčasnú výrobu elektrickej a tepelnej energie zo slnečného žiarenia. Pri štandardných fotovoltických (PV) moduloch zostáva významná časť dopadajúcej energie nevyužitá vo forme tepla, pričom rast prevádzkovej teploty zároveň spôsobuje pokles elektrickej účinnosti PV článkov. PVT panel kombinuje fotovoltický modul s tepelným absorbérom, ktorý odvádza odpadové teplo teplonosnou kvapalinou a umožňuje jeho ďalšie využitie. Kovové hliníkové peny (Al-foam) predstavujú perspektívny materiál pre kompaktné tepelné výmenníky najmä vďaka nízkej hmotnosti, veľkej aktívnej ploche a nízkej materiálovej náročnosti. Pri návrhu absorbéra z kovovej peny je potrebné zohľadniť najmä tepelný kontakt s PV modulom, efektivitu prestupu tepla, hydraulický odpor, mechanickú pevnosť a výslednú hmotnosť konštrukcie. Vhodne navrhnutý Al-foam absorbér umožňuje zníženie rozmerov výmenníka a môže priniesť zjednodušenie celkovej konštrukcie PVT panelu.

Hlavnou motiváciou vývoja hybridného PVT panelu je eliminácia poklesu elektrickej účinnosti PV modulov pri zvýšenej prevádzkovej teplote. Bežné kremíkové fotovoltické články vykazujú pokles výkonu približne o 0,4–0,5 % na každý stupeň Celzia. Teoretický limit účinnosti (Shockley-Queisser) pre jednovrstvový PV článok je 33,7 %.

Chladenie PV modulu prostredníctvom absorbéra z Al peny umožňuje stabilizovať jeho prevádzkovú teplotu a zároveň využívať odvedené teplo v technologickom alebo vykurovacom systéme.

Riešenie: Použitie vhodného chladenia, odvodu tepla absorbérom **hliníkovej peny** (AL-foam). Tento materiál efektívne odvádza teplo z panelov, čím ich chladí a zároveň umožňuje toto teplo využiť.

Výhody: Technologicky a ekonomicky nenáročné riešenie, ktoré zjednodušuje konštrukciu PV panelu a eliminuje potrebu ďalších nosných prvkov.

Technické riešenie zachytávania tepelnej energie a chladenia PV panelu tvorí

Hybridný systém (PVT): Kombinuje výrobu elektriny a tepelnej energie (Cooling/Heating).

Konštrukcia: Na obr. 1 je schéma zapojenia modulov "absorbéra z hliníkovej peny s trubkovými rozvodmi".

Navrhovaný PVT systém kombinuje výrobu elektrickej a tepelnej energie v jednej konštrukcii. Schéma zapojenia absorbéra z Al peny s integrovanými trubkovými rozvodmi je zobrazená na obr. 1.

Experimentálne testovanie

Testovanie bolo zamerané na overenie funkčnosti kompaktného tepelného absorbéra z Al peny v kombinácii s polykryštalickým PV modulom typu poly c-Si. Cieľom bolo porovnať jeho parametre s komerčnými PVT panelmi využívajúcimi klasický trubkový alebo doskový výmenník tepla umiestnený na zadnej strane PV modulu.

Vyvinutý PVT panel pozostáva z Al-foam absorbéra s integrovanými nerezovými trubkami. V porovnaní s komerčnými riešeniami umožňuje zjednodušenie konštrukcie pri zachovaní porovnateľných parametrov prestupu tepla. Významným faktorom zostáva kvalita tepelného kontaktu medzi absorbérom a zadnou stranou PV modulu. Zámerom sú kompaktné a ľahké výmenníky tepla, ktoré umožňujú: zmenšenie rozmerov absorbéra, zvýšenie

účinnosti aktívnej teplovýmennej plochy, zníženie výrobných nákladov na prepojenie absorbéra s povrchom PV panelu.

Bilancia vyhodnocovania celkovej účinnosti PVT pozostáva z častí:

1. Elektrickej účinnosti: $\eta_{el} = P_{el} / (G \cdot A)$ Elektrický výkon FV závisí od teploty článku T_{cell}. (Nižšia teplota zvyšuje elektrický výkon premeny slnečného žiarenia.)

2. Tepelná účinnosť: $\eta_{th} = Q_{th} / (G \cdot A)$

$$Q_{th} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in})$$

Kľúčové merané parametre: - globálne žiarenie G, vonkajšia teplota T_{amb}, teploty T1–T4, prietok média, elektrické výkony PV/PVT panelov.

3. Pre vyhodnotenie toku energie do tepla je kľúčová identifikácia strát v rozvodoch, ktoré sa identifikujú porovnaním teploty výstupu z PVT a vstupu do zberného zásobníka pri rovnakom prietoku, pričom výkon výmenníka v zásobníku je limitovaný teplotným gradientom teplonosného média, t.j. solanky:

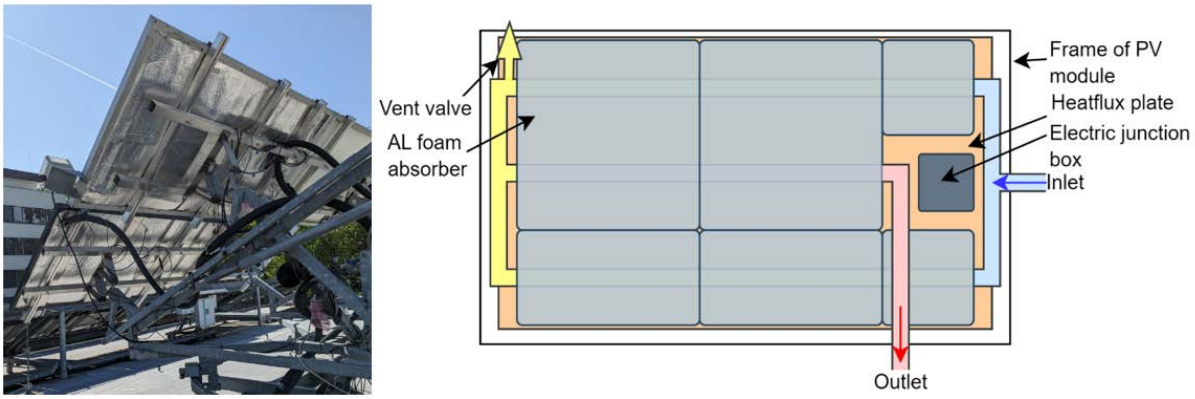
$$Q_{loss_pipe} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T2 - T3)$$

Pri experimentálnom porovnaní boli testované dva typy PVT panelov a referenčný PV panel typu poly c-Si. Všetky panely boli umiestnené na solárnom trackeri a hydraulicky prepojené s akumulačnou nádržou prostredníctvom izolovaného potrubného systému s regulovaným prietokom teplonosnej kvapaliny.

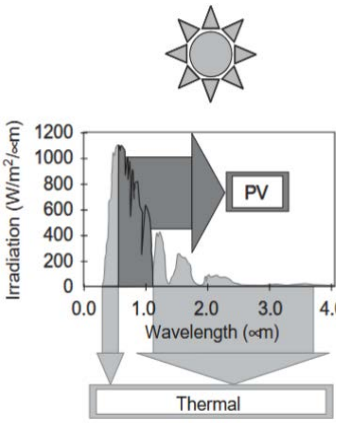
Súčasťou experimentov bolo aj testovanie reverznej prevádzky PVT panelov v režime pasívneho chladenia. V nočných hodinách môže panel odvádzať akumulované teplo z objektu do okolitého prostredia prostredníctvom zadnej strany absorbéra. Merania bez tepelnej izolácie zadnej strany panelov boli realizované počas letných, jarných a jesenných mesiacov.

Konfigurácia absorbéra pozostáva z prefabrikovaných modulov z Al peny s kombinovaným zapojením tokov teplonosnej kvapaliny. Testované PVT moduly boli pripojené k solárnemu okruhu so soľankou a k systému tepelného hospodárstva s riadenou vstupnou teplotou. Meranie a regulácia boli realizované prostredníctvom systému SCADA Simatic PCS7 a dataloggerov založených na platforme RPi.

Kvantifikácia energetických účinností a efektívností je kľúčovým krokom pri identifikovaní životaschopnosti kombinovanej konfigurácie PVT pri výrobe elektrickej a tepelnej energie. Avšak kľúčovým atribútom je priame využívanie tepla, bez ktorého je efektivita PVT dokonca horšia ako pri samostatnom PV paneli!



Obr. 1: Inštalácia panelov na trackeri so schematickým znázornením zapojenia AL-foam modulov na PVT paneli.



Dopadajúce žiarenie	Vlnová dĺžka (λ)	Podiel energie (%)	Sumárna energia
Ultrafialové (UV)	< 400 nm	cca 5 %	~ 50 W/m²
Viditeľné svetlo	400 – 700 nm	cca 43 %	~ 430 W/m²
Infračervené (IR)	> 700 nm	cca 52 %	~ 520 W/m²

Štúdia /typ PVT	η_el	η_th	η_total	T_max	Zdroj (Link)
MDPI 2025	16.5%	24%	41%	60 °C	Srinivas et al. (2025)
Commercial PVT	15–18%	20–45%	35–60%	55 °C	Joshi et al. (2025)
PCM PVT	12–18%	30–55%	45–65%	90 °C	Hossain et al. (2021)
a-Si PVT	8–12%	40–60%	50–70%	90 °C	Brogren et al. (2012)
Hybrid PVT	10%	n/a	n/a	100 °C	Yamada et al. (2012)

Obr. 2 Rozdelenie slnečného spektra na komponenty pre PV, rozdelenie energií a tepelného žiarenia podľa spektra ako aj účinnosti PVT panelov v Tab. 1 a 2. (A.G. Imenes, D.R. Mills / Solar Energy Materials & Solar Cells 84 (2004) 19–69)

Výsledky a diskusia

Priame testovanie za identických prevádzkových podmienok potvrdilo funkčnosť navrhnutého Al-foam absorbéra s integrovanými trubkovými kanálmi (obr.2 a tab.1). Experimenty preukázali porovnateľné parametre prestupu tepla v porovnaní s komerčnými PVT panelmi. Významným faktorom ovplyvňujúcim účinnosť systému bol prenos tepla medzi absorbérom a trubkovými kanálmi. Použitie vlnovcových trubiek zvýšilo účinnosť prestupu tepla v rámci panelu približne o 30–43 %.

Testovaný a vyhodnocovaný bol aj vplyv tepelnej izolácie absorbéra. Táto je dôležitá, pretože PVT panel je zvažovaný aj pre reverznú prevádzku a to na chladiace účely v letných mesiacoch, počas nočného režimu, keď môže odvádzať v objekte akumulované teplo do okolia. Tieto merania bez izolácie boli realizované počas letných mesiacov.

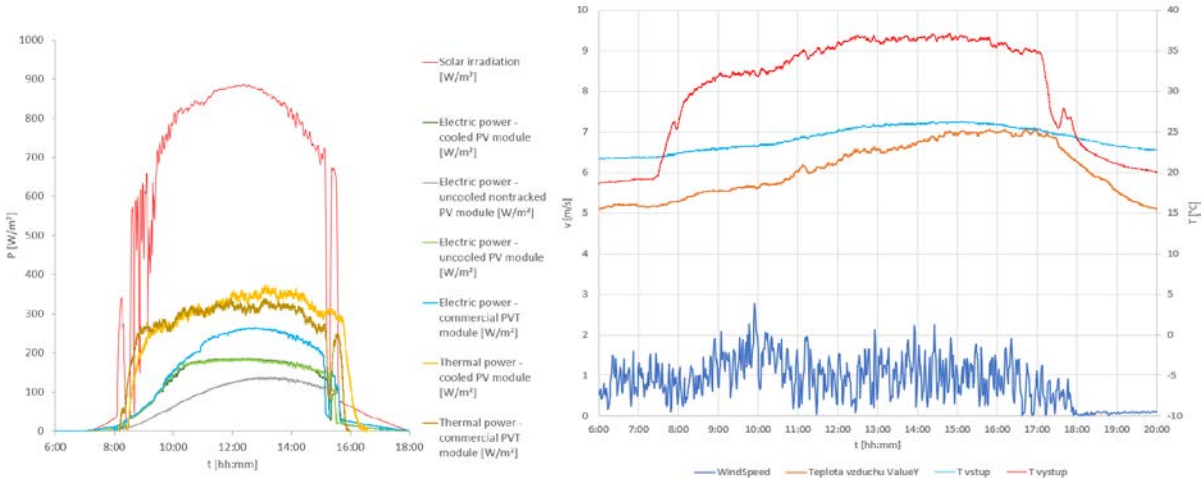
PVT panel s Al-foam absorbérom, komerčný PVT panel aj referenčný PV panel sú od septembra 2024 dlhodobo prevádzkované na streche experimentálnej haly ÚMMS SAV. Použitie solárneho trackera umožňuje simulovať rôzne prevádzkové podmienky, sklony a orientácie panelov pri zachovaní identických klimatických podmienok počas merania.

Hlavným cieľom experimentov bolo overiť limity prestupu tepla medzi zadnou vrstvou FV modulu, Al-foam absorbérom a teplonosnou kvapalinou. Napriek nižšej tepelnej vodivosti Al peny boli dosiahnuté porovnateľné parametre prestupu tepla ako pri komerčných plochých výmenníkoch používaných v PVT paneloch.

Tabulka 1: Podiely energií pri meraní 21. septembra 2025.

Podiel energie [%]	**Relat. energia [kWh/m²]**	**Transformovaná energia**
100,0	5,888	Celková energia slnečného žiarenia (Mencke and Tegtmeyer Si-420TC-T-K)
12,4	0,732	Elektrina – komerčný PVT panel Cellafreda HC panel
12,1	0,713	Elektrina – nechladený PV panel
15,2	0,893	Elektrina – hybridný PVT Al-foam panel
31,0	2,457	Tepelná energia – chladenie panelu (Qt-Alf)
32,0	2,477	Tepelná energia – komerčného PVT panelu (Qt-komerc)

Hoci priemerná denná teplota koncom septembra (22,0 °C) prevyšuje októbrovú (17 °C), aj koncom októbra stále existuje významný teplotný potenciál, ktorý možno optimalizovať sériovým zapojením panelov alebo znížením prietoku vody. Zatiaľ čo v októbri je vplyv chladenia na elektrickú účinnosť pre nízke okolité teploty zanedbateľný, v septembri chladený FV modul vyprodukoval o 2,57 % viac elektriny než nechladený (Tab.1). Celkovo systém získava **trikrát viac tepelnej energie** v porovnaní s vyrobenou elektrinou a to aj po dvoch rokoch prevádzky s minimálnymi nárokmi na údržbu (2 × kontrola tlaku a doplnenie solanky).



Obr. 3: Meranie z 21. Septembra 2025. Od 9:00 do 15:00 (priemerná denná teplota vzduchu 20,8 °C, rýchlosť vetra 1,21 m/s a teplota vstupnej chladiacej vody 24,1 °C).

Z dostupných dát na Obr. 3 je zrejmé, že systém vykazoval stabilný tepelný výkon s výstupnou teplotou vody na úrovni 37 °C.

Z hľadiska ekonomiky (ceny 2024) predstavujú hybridné PVT technológie efektívne riešenie, ktoré dokáže znížiť počiatočné investičné náklady o približne 10 % v porovnaní s oddelenou inštaláciou fotovoltiky a termických kolektorov. Návratnosť týchto systémov sa pri súčasných cenách energií odhaduje na 10 až 15 rokov, pričom v priemyselných aplikáciách (napr. sušiarenský, textilný priemysel), ale aj v službách (v hoteloch s bazénmi), kde môžu znížiť náklady na energiu až o 30 %.

Porovnanie komerčných PVT panelov a panelu vyvinutého na ÚMMS SAV potvrdilo porovnateľné výsledky aj počas prechodných období s nižšou intenzitou slnečného žiarenia. Zvýšenie elektrickej účinnosti bolo najvýraznejšie pri aktívnom chladení panelov počas teplejších dní, pričom získané teplo malo prevažne nízkopotenciálny charakter.

Záver

Porovnávacie experimenty preukázali, že Al-foam absorbér dosahuje konkurencieschopné parametre v oblasti prestupu tepla pri súčasnom zjednodušení konštrukcie PVT panelu. Navrhované riešenie znižuje materiálovú náročnosť, hmotnosť systému a potenciálne aj náklady na recykláciu po ukončení životnosti panelu.

Cieľom ďalšieho vývoja je zamerať sa na integráciu Al-foam absorbéra ako nosnej konštrukcie s bezrámovými FV modulmi, kde by absorbér súčasne plnil tepelnú aj nosnú funkciu. Takéto riešenie môže významne znížiť hmotnosť a výrobné náklady PVT panelov a zároveň rozšíriť možnosti ich integrácie v stavebných aplikáciách.

Poďakovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci programu Obnoviteľná energia pre vytvorenie vyváženého ekologického programu znižovania emisií uhlíka. Financované EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu 09I04-03-V02-00033

Literatúra

[1] J. LONGAUER, J. KURCZ, J. PONICAN, P. OSLANEC, F. SIMANCIK: Hybrid photovoltaic and photothermal panel based on aluminium foam structure, 8th International Conference on Cellular Materials – CellMAT 2024, Magdeburg, Germany, 27–29 Nov. 2024

[2] M. HERRANDO, A. RAMOS, I. ZABALZA, C. N. MARKIDES: A comprehensive assessment of alternative absorber-exchanger designs for hybrid PVT-water collectors, Applied Energy 235 (2019) 1583–1602

[3] V. TIRUPATI RAO, Y. RAJA SEKHAR: Hybrid Photovoltaic/Thermal (PVT) Collector Systems With Different Absorber Configurations For Thermal Management – A Review, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy 237(3) (2023)

[4] T. MARKVART: Shockley–Queisser Detailed Balance Limit after 60 Years, WIREs Energy and Environment 11(4) (2022).

PLNE BEZEMISNÝ SPAĽOVACÍ MOTOR EXISTUJE.

J. Poničan, R. Adamčík, K. Iždinský, J. Španielka, M.Štepánek a F. Simančík[1],

1 Ústav materiálov a mechaniky strojov, Slovenská akadémia vied

Abstract

This article presents the concept of utilizing recycled magnesium and its alloys as energy carriers within a closed material–energy cycle. In this cycle, electrical energy is stored in magnesium through the electrolytic decomposition of magnesium chloride, $MgCl_2$, and after the magnesium is used in a suitable structural application, it is subsequently recovered by controlled combustion of magnesium scrap with water to MgO. This closed-cycle approach enables long-term storage of surplus electrical energy in a stable solid form, without the need for high-pressure or cryogenic storage systems. At the same time, it provides the possibility of flexible electrolyzer operation according to the actual availability of electricity in the energy system. The significance of the proposed closed cycle lies particularly in its potential application for the utilization of excess electricity from renewable energy sources and in the reduction of emissions associated with alternative energy storage methods. Metallic magnesium is a safely transportable, and after its primary use in structural applications is reusable as an energy carrier, making it suitable for decentralized and long-term energy storage. The article further presents a real prototype of a magnesium reactor in which the controlled chemical reaction of magnesium combustion can be maintained for the purpose of thermal energy production. The generated thermal energy may subsequently be utilized in a heat engine for the production of mechanical or electrical energy.

Úvod

Rastúci podiel obnoviteľných zdrojov energie zvyšuje potrebu technológií, ktoré umožňujú dlhodobú akumuláciu prebytočnej elektrickej energie a jej spätné využitie v čase alebo na mieste zvýšenej spotreby. Jednou z perspektívnych možností je ukladanie energie do kovového horčíka, ktorý môže slúžiť ako stabilný pevný chemický nosič energie. Výhodou horčíka oproti plynným nosičom, najmä vodíku, je jeho možnosť dlhodobého skladovania v pevnej forme, jednoduchšia manipulácia a preprava bez potreby vysokotlakových alebo kryogénnych systémov. Podstata riešenia spočíva v tom, že elektrická energia sa vloží do výroby kovového Mg z chloridu horečnatého a po použití horčíka napr. v konštrukčnom odliatku sa následne energia získa späť vo forme vysokopotenciálneho tepla, vodíka, ktorú možno znovu transformovať na elektrickú energiu. Horčíkový cyklus je možné prevádzkovať v uzavretom cykle, teda nie len ako jednorazové palivo, ale ako súčasť uzavretého materiálovo-energetického cyklu. Pri recyklácii Mg šrotu sa energia uložená v horčíku uvoľňuje riadenou oxidáciou horčíka vodou podľa rovnice (1):

$$Mg + H_2O \rightarrow MgO + H_2 \quad (1)$$

Táto reakcia je exotermická a umožňuje získať približne 4,7 kWh.kg^{-1}Mg Súčasne vzniká vodík, ktorý možno ďalej energeticky využiť jeho spaľovaním, podľa rovnice (2):

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \quad (2)$$

Dodatočná energia zo spaľovania vzniknutého vodíka sa odhaduje približne na 2,2 kWh.kg^{-1}. Celkovo tak môže riadená oxidácia horčíka poskytnúť takmer 7 kWh.kg^{-1} Mg vysokoteplotného tepla [1, 3]. Z metodického hľadiska je rozhodujúce najmä bezpečné riadenie prívodu kyslíka prostredníctvom vody, stabilizácia reakcie, odvod vzniknutého vodíka, odstraňovanie MgO a účinný prenos tepla do tepelného motora alebo iného konverzného zariadenia. Proces môže byť realizovaný napríklad spaľovaním granulátu z recyklovaných Mg odliatkov v uzavretom reaktore. Produkty oxidácie horčíka, najmä oxid horečnatý alebo hydroxid horečnatý, nepredstavujú odpad, ale dôležitú surovinu do následnej obnovy kovového Mg. Transformácia prebieha cez tvorbu $MgCl_2$ reakciou s kyselinou chlorovodíkovou podľa rovníc (3,4):

$$MgO + 2HCl \rightarrow MgCl_2 + H_2O \quad (3)$$

$$Mg(OH)_2 + 2HCl \rightarrow MgCl_2 + 2H_2O \quad (4)$$

pričom na výrobu HCl sa použije chlór uvoľnený pri elektrolýze $MgCl_2$ Tým sa uzatvára nielen horčíkový, ale aj chlórový cyklus. Reakčným produktom rozpúšťania je hydratovaný chlorid horečnatý, $MgCl_2.6H_2O$, ktorý musí byť pred ďalšou elektrolýzou vysušený na anhydrid $MgCl_2$, pričom sa spotrebováva tepelná energia.

Dehydratácia $MgCl_2$ je energeticky náročná časť procesu, pri realizácii celého recyklačného konceptu je preto vhodné využitie zvyškového tepla z elektrolýzy, tuhnutia roztaveného Mg alebo exotermických reakcií pri rozpúšťaní oxidovaných zvyškov v HCl. Vhodne navrhnutý uzavretý horčíkový cyklus tak predstavuje technológiu, v ktorej hlavným externým vstupom zostáva elektrická energia, ideálne z prebytkov OZE, resp. z riadenia elektrizačnej siete na základe poskytovania podpornej služby v sústave (regulovanie odchýlky vo forme aktivácie spotreby), alebo na základe vývoja ceny elektriny na vnútrodennom trhu (záporné ceny elektriny).

Lacná elektrina sa využíva najmä pri elektrolytickom rozklade bezvodého chloridu horečnatého – podľa rovnice (5). Pri tomto procese sa elektrická energia premieňa na chemickú energiu uloženú v kovovom horčíku. Teoretická energetická potreba je približne 24,4 $MJ.kg^{-1}$, teda 6,78 $kWh.kg^{-1}$ Mg, pričom pri praktickej účinnosti elektrolýzy približne 50 % sa reálna spotreba odhaduje na 14,4 $kWh.kg^{-1}$ [1]. Súčasne vzniká zvyškové teplo, ktoré možno pri vhodnom technologickom usporiadaní spätne využiť najmä v krokoch dehydratácie a recyklácie. Dôležitým metodickým aspektom je možnosť prerušovanej prevádzky elektrolýzy $MgCl_2$. Elektrolyzéry môžu byť prevádzkované pri prebytku alebo nízkej cene elektriny a obmedzené pri jej nedostatku, čím sa z procesu stáva flexibilný regulovateľný odber vhodný na stabilizáciu elektrizačnej sústavy. Prerušovateľnosť elektrolýzy bola preukázaná v rámci experimentov, z ktorých vyplýva, že prerušovaná elektrolýza je možná. Je však potrebné potvrdiť výskum vo väčšom elektrolyzéri, v ktorom by sa dala overiť aj stabilita prúdovej účinnosti elektrolýzy a stabilita zloženia produktu. [4].

$$MgCl_2\ (l) \rightarrow Mg(l) + Cl_2(g) \tag{5}$$

Z prevádzkového hľadiska je prínos navrhovaného riešenia najmä v možnosti kombinovať dlhodobú akumuláciu energie, materiálovú recykláciu a flexibilitu odberu elektriny. Horčíkový cyklus môže absorbovať prebytky elektriny v čase nízkej spotreby alebo vysokej výroby z OZE, uložiť ich do stabilného pevného materiálu a následne umožniť ich spätné využitie vo forme tepla, vodíka alebo elektriny. V prípade vhodného technologického zvládnutia tak nejde iba o chemický spôsob skladovania energie, ale aj o nástroj podpory stability elektrizačnej sústavy a sezónnej akumulácie prebytkovej energie. Treba poznamenať, že horčík sa v rámci celého životného cyklu najskôr použije na zhotovenie ultraľahkých odliatkov, a nie je preto len nosičom energie ale aj potrebnou surovinou napr. pri odľahčovaní automobilových konštrukcií. Kvôli súčasnej 100% závislosti na jeho dovoze najmä z Číny ho EK už dlhodobo zaraďuje medzi kritické kovy s vysokou dôležitosťou pre európsky priemysel.

Zhrnutie výsledkov

Z praktického hľadiska vývoja a výroby prototypu reaktora na spaľovanie kovového horčíka vo forme zliatiny – drôtu AM60 bol vyrobený reaktor, na testovanie spaľovania horčíka, v ktorom bola preukázateľne overená riadená chemická reakcia rozkladu kovového horčíka za presného dávkovania vody vo forme kvapiek do roztavenej taveniny. Tavenina bola v reaktore najskôr pripravená elektrickým odporovým ohrevom až na teplotu približne 700 °C v ochrannej atmosfére reaktora. Následne sa elektrický ohrev odstavuje, nakoľko po prvej dávke vody do taveniny začne exotermická reakcia uvoľňujúca teplo, ktoré niekoľkonásobne prevyšuje teplo potrebné na ďalšie tavenie Mg. Reakcia prebieha podľa rovníc (1,2), a je presne kontrolovateľná množstvom pridávanej vody. Počas reakcie teplota v reaktore rastie – s množstvom reagovaného materiálu. Vyvíjaný vodík sa odvádza cez výduch, kde ho možno buď zachytávať alebo spáliť a získať tak ďalšiu tepelnú energiu. Ilustračné znázornenie experimentálneho reaktora je uvedené na obr.1. Experiment spočíval v riadenom spaľovaní kovového horčíka v inertnej argónovej atmosfére. Počas experimentu bolo do reaktora s teplotou 700 °C dávkované presné množstvo vody peristaltickým čerpadlom, pričom dávkovanie vody presne ovládalo chemickú reakciu – rozklad horčíka a tvorbu tepelnej energie a plynného vodíka. Vznikajúci plynný vodík bol vedený cez výduch k plameňu, ktorý zabezpečoval zapálenie a kontrolované horenie vodíka.

47. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE



Obr. 1: Experiment – riadené spaľovanie kovového horčíka v prototype reaktora.

Dosiahnuté doterajšie výsledky ukazujú, že koncept využitia kovového horčíka ako recyklovateľného nosiča energie možno technicky rozpracovať do možného priemyselného využitia. Doposiaľ boli v čiastkových experimentoch potvrdené možnosti prerušovania (aj dlhodobého) elektrolytickej výroby horčíka podľa dostupnosti elektrickej energie, riadeného spaľovanie horčíka pomocou vody alebo vodnej pary, konverzie vzniknutého tepla na mechanickú a následne elektrickú energiu a recyklácie produktov spaľovania späť na $MgCl_2$ [2]. V súčasnosti je vytvorená laboratórna platforma, ktorá umožňuje kvantifikovať vplyv prerušovaného napájania na výťažnosť elektrolýzy, stabilitu elektród a elektrolytu, ako aj energetickú využiteľnosť horčíka pri riadenom spaľovaní.

Za významný technický výsledok možno považovať prípravu elektrolytického pracoviska vrátane kalibrácie pecí a overenia systému bezpečného zachytávania chlóru s účinnosťou vyššou ako 99,9 % [5]. Ďalším prínosom je návrh uzavretého tlakového reaktora na spaľovanie horčíka s regulovaným dávkovaním vody alebo vodnej pary, odberom tepla cez výmenník a možnosťou zberu vodíka. Paralelne bol overený aj princíp spaľovania horčíkového drôtu vo vodnej plazme, čo predstavuje alternatívnu cestu priameho využitia expandujúceho prúdu produktov reakcie. Pre premenu tepla boli vybrané prakticky realizovateľné riešenia podľa výkonovej úrovne, najmä Braytonov cyklus, impulzná turbína a doplnkové ejektorové chladenie.

Získané výsledky potvrdzujú technickú uskutočniteľnosť navrhnutej experimentálnej architektúry. Prototyp vytvoril praktický základ pre následné merania energetickej účinnosti, materiálovej recyklovateľnosti a prevádzkovej stability systému Mg výroba – spaľovanie – energetické zhodnotenie – recyklácia. V tomto zmysle predstavuje dosiahnutý prínos dôležitý krok k posúdeniu horčíka ako potenciálneho média pre dlhodobejšie, recyklovateľné a flexibilné ukladanie energie.

Poďakovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci programu Plánu obnovy a odolnosti SR. Financované EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu č. 09I04-03-V02-00058.

Literatúra

[1] Simančík, F., et.al: *Štúdia realizovateľnosti technologického spracovania slovenského magnezitu,* Aktivita 2.6: Možnosti výroby primárneho horčíka na Slovensku, ÚMMS SAV, 2013.
[2] [5] Levenstein, S.: Clean Magnesium Energy Cycle Hints at Fossil Fuel Freedom. <httpp://inventorspot.com/articles/japan_magnesium_energy_cycle_5887>
[3] Ecklund H., et al.: An improved process for the production of magnesium, Magnesium Technology, 2002
[4] Danielik, V., Technická správa FCHPT STU k výstupu projektu „MAGRESTOR“, kód projektu 09I04-03-V02-00058, 2025
[5] Simančík, F., Plán obnovy a odolnosti SR - *Preskúmanie možnosti použitia kovového horčíka ako multifunkčného a plne recyklovateľného materiálu na ukladanie energie „MAGRESTOR“*, kód projektu 09I04-03-V02-00058

TERMOJADERNÉ HITY

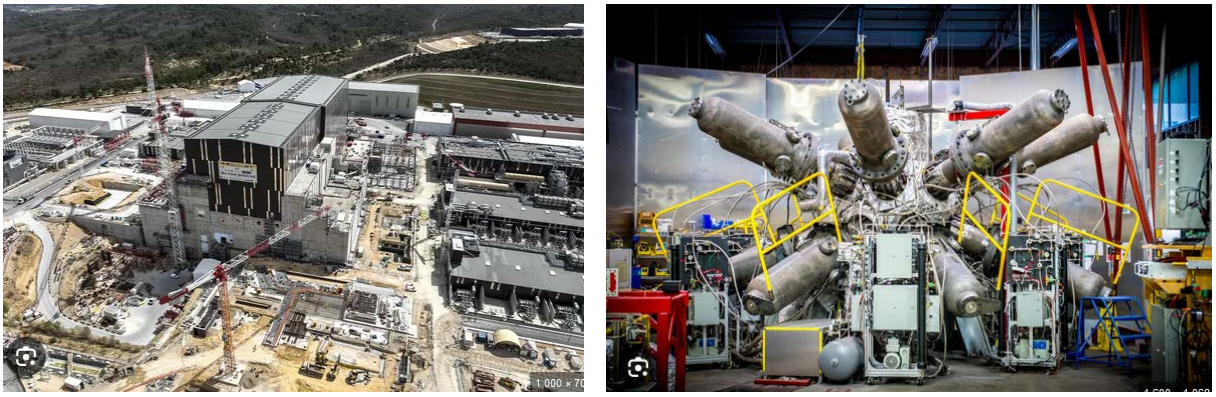
M. Řípa

Abstract

Currently, startups that study fusion with private money are playing an increasingly important role in controlled fusion research. I wrote the first overview of nine startups in 2017, "Private Capital in Controlled Fusion Research." In 2019, the DOE (US Department of Energy) established a government-private fusion collaboration called INFUSE, and in 2024, the ITER organization began organizing a workshop "How ITER Can Help?" for the same purpose. Today, about 45 startups are operating.

Úvod

Poprvé v roce 2019 se startupů chopila vládní organizace DOE v USA. Založila INFUZI, která vládní peníze prostřednictvím laboratoří PPPL a ORLN za přísně daných pravidel rozděluje mezi jednotlivé startupy. Přístup k penězům mají přihlášené startupy, ale ne všechny, jen ty, kteří mají **silnou vazbu na USA (projekty, pobočky, spolupráce s DOE labs). I tak je mezi INFFUZI více jak dvacet start upů**: Commonwealth Fusion Systems, Helion Energy, TAE Technologies, Tokamak Energy, Type One Energy, Thea Energy, Focused Energy, Realta Fusion, Pacific Fusion, Xcimer Energy, Marvel Fusion, Kyoto Fusioneering, Blue Laser Fusion, Helicity Space, Westinghouse Electric Company, General Fusion, Magneto Inertial Fusion Technologies, Princeton Stellarators, Energy Driven Technologies, Renaissance Americas.



Obr. 1: Současné staveniště tokamaku ITER ve Francii (vlevo) a jeden ze sturt upů – kanadský General Fusion T4 (vpravo).

Mimo USA v INFUZI fungují Britská Tokamak Energy, Marvel Fusion, Německo, Kyoto Fusioneering, Japonsko a General Fusion, Kanada. INFUSION následoval v roce 2024 workshop: Jak vám může ITER pomoci? a letos se konal již jeho třetí ročník.

Mají pravdu pamětníci, kteří soužití dvou komunit vládní a soukromé přirovnávají k prolomení fúzní opony sovětskou delegací v roce 1956, v čele s generálním tajemníkem Nikitou Chruščovem, kterého doprovázel „otec" sovětské atomové bomby Igor Kurčatov. Jeho přednášku o výbojích v plynech, jako možností zvládnou řízenou termojadernou fúzi, sledovalo v Harwellu více, jak 300 posluchačů za absolutního ticha. Auditorium mělo totiž přísný zákaz se cokoli ptát, aby Sověti nepoznali, jak je Moskva s fúzí daleko. Již v roce 1958 v Ženevě na mezinárodní konferenci Atomy pro mír bylo odpřednášeno více jak 100 referátů o fúzi.

World Fusion Energy Group

V roce 2024 byla pod křídly Mezinárodní agentury pro atomovou energii IAEA založena **World Fusion Energy Group** (WFEG), což je **mezinárodní iniciativa** zaměřená na **energii fúze**. WFEG je globální platforma vytvořená IAEA s cílem sjednotit vlády, výzkumné organizace, soukromý sektor, průmysl, akademickou obec a další klíčové aktéry kolem tématu fúzní energie. Jejím úkolem je urychlit přechod od výzkumu ke komerčnímu nasazení fúzní energie, podpořit mezinárodní spolupráci, sdílení technologií, výměnu informací, vytváření regulačních rámců a dalších společných aktivit.

47. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Takže WFEG má za úkol posílení mezinárodní spolupráce ve fúzním výzkumu a vývoji:
identifikace technologických a inženýrských mezer.
podpora regulačních rámců a bezpečnostních standardů.
propojení veřejného a soukromého sektoru
zvýšení informovanosti veřejnosti a zapojení mladé generace.
přeměna fúze z laboratoře do komerční reality

Shrnutí: WFEG není soukromá firma nebo sdružení se sídlem samostatně mimo IAEA, ale je to mezinárodní iniciativa vedená IAEA jako fórum pro koordinaci a dialog o fúzní energetice, jejímž cílem je společně urychlit uvolnění bezpečné a udržitelné fúzní energie pro svět.

Vysokoteplotní supravodič REBCO

Vedle zmíněného hitu - spolupráce soukromé a vládní fúze, se má k světu další termojaderný hit – vysokoteplotní supravodič REBCO. Keramické REBCO (Rare Earth Barium Copper Oxide) cívky produkují velmi silné magnetické pole (**kolem 17 tesla**) – mnohem silnější než většina ucpávek prvních magnetických zrcadel.

Technologie cívek REBCO:
cívky se vyrábějí z materiálu REBCO – pásků (tapes) - tenká vrstva supravodiče na kovovém substrátu.
pásky se navíjejí do cívek podobně jako klasický vodič
při ochlazení na teplotu tekutého dusíku → **nulový elektrický odpor**

Jedním z prvních zařízení, které použilo HT materiál REBCO je magnetické zrcadlo WHAM - Wisconsin HT Axisymetric Mirror.

Posuďte, jaké objemy plazmatu mají současná experimentální zařízení – viz Tabulka 1. Tabulka 2 představuje budoucnost výzkumu termojaderné fúze v plánovaných více či méně experimentálních zařízení.

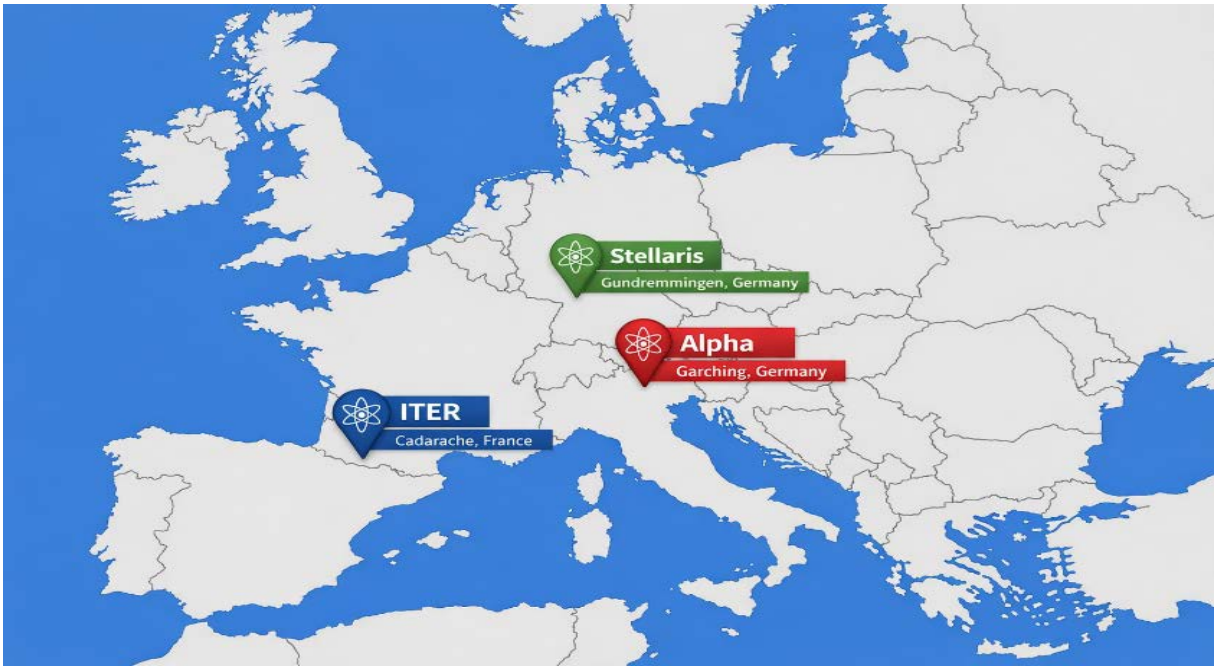
Všimněte si stelarátorů v Německu. Jistě potomci světové stelarátorové jedničky **Wendelstein 7-X** spuštěného roku 2015. Ostatní ústavy sází na současné tokamaky. Německá zařízení nemají ještě určená místa a dokonce se uvažuje o stavbě mimo Německo.

Tabulka 1: Objemy plazmatu vybraných současných experimentálních řízení.

Zařízení	Země	Typ	Objem plazmatu (≈)	Poznámka
Alpha	DE	Stellarátor (demo)	~5–15 m³	technologický demonstrátor
SPARC (pro kontext)	USA	Tokamak	~25–30 m³	předchůdce ARC
Wendelstein 7-X	DE	Stellarátor	~30 m³	dlouhý stabilní provoz
JET	UK	Tokamak	~90 m³	dosud největší evropský tokamak
ARC	USA	Tokamak (elektrárna, koncept)	~100–150 m³	vysoké pole, kompaktní
Stellaris	DE	Stellarátor (elektrárna)	~100–200 m³	cílově komerční
JT-60SA	JAPONSKO	Tokamak	160 m³	supravodivý
ITER	FR	Tokamak	~840 m³	extrémní škálovací experiment

Tabulka 2: Budoucnost výzkumu termojaderné fúze v plánovaných více či méně experimentálních zařízení.

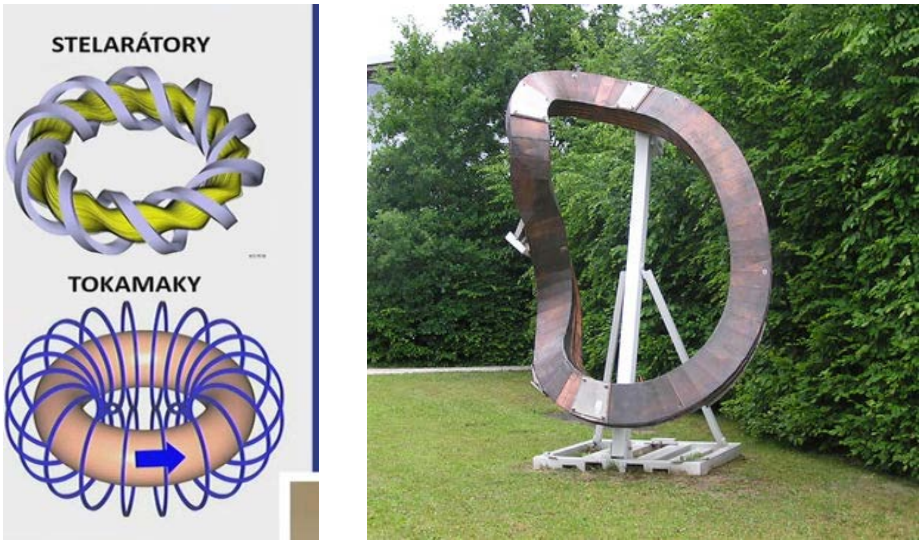
Země / region	Projekt	Typ zařízení	Cíl / horizont
Čína	CFETR/CFEDR	Tokamak	DEMO v 2030s
EU	EU-DEMO	Tokamak	DEMO ~ do 2050
Jižní Korea	K-DEMO	Tokamak	DEMO po 2050
Rusko	DEMO-RF / FNS	Tokamak / hybrid	2030–2050+
Japonsko	JA-DEMO	Tokamak (+ R&D stellarator)	DEMO střed 21. st.
Indie	SST-2 → DEMO	Tokamak	DEMO ~ 2037+
UK	STEP	Sférický tokamak	DEMO~2040
Německo	Alpha	Stelarátor	DEMO 2031
Německo	Stelaris ?	Stelarátor	2035-2040 komerce



Obr. 2: Umístění vybraných experimentálních zařízení - projektů pro testování termojaderné fúze.

Stelarátory jsou stacionární zařízení, bez elektrického proudu v plazmatu – tudíž stabilnější než tokamamky. Pro generaci stabilizujího spirálového pole potřebují 3D cívky. Existuje koncept stellarátoru s výhradně planárními cívkami, vyvíjený např. firmou Thea Energy. Superpozicí mnoha plochých cívek posunutých vůči sobě se nechá vytvořit požadované spirálové magnetické pole. Výhody: jednodušší výroba, aktivní ladění, možnost kontinuálního provozu. Rotační transformace je dosažena geometrií a asymetrií pole, bez proudu v plazmatu, na rozdíl od tokamaku (např. ITER)

47. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

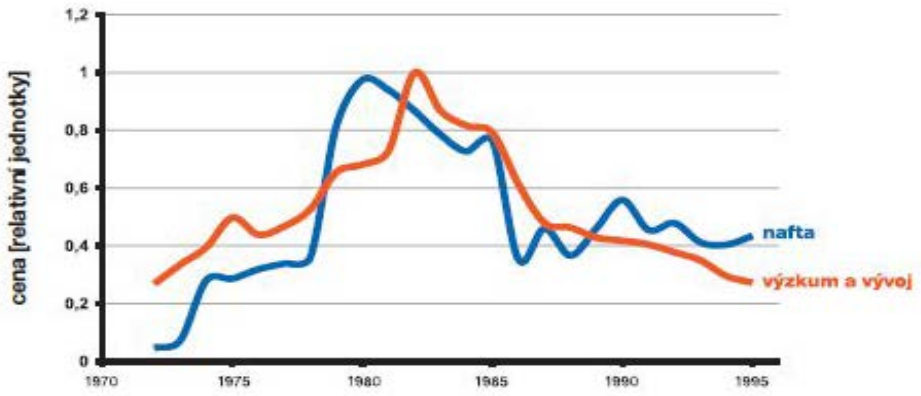


Obr. 3: Jedna z 3D cívek německého stelarátoru Wendelstein 7-X.

TRUMP A TERMOJADERNÁ FÚZE

Na závěr přednášky o termojaderné fúzi v roce 2026 se zeptal posluchač, zda se nějak dotkla výzkumu termojaderné fúze první ropná krize v roce 1970. Přednášející z Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT rezolutně odpověděl. NE! Výzkum fúze je dlouhodobá záležitost…Nu, mýlil se.

Neměl pravdu - viz Obr. 4 (Milan Řípa a kolektiv: Řízená termojaderná fúze pro každého, UFP AVČR 2011). Jsem zvědav, zda současná Trumpova politika bude mít podobný efekt, jako měla ropná krize v roce 1970. Nicméně silně pochybuji, že americký muž číslo jedna zaútočil na Irán s úmyslem podpořit výzkum termojaderné fúze.



Obr. 4: Srovnání vývoje cen nafty a dotací na výzkum energetických zdrojů v Německu v letech 1970 až 1995. Zřejmá je zpožděná reakce dotací výzkumu za cenou nafty.

PROČ JE ENERGETICKÉ SPOLEČENSTVÍ BUDOUCNOST

P. Šafl

Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Brno, CZ

Abstract

Community energy and electricity sharing in the Czech Republic, legislatively anchored by the LEX OZE II amendment, are experiencing dynamic development accompanied by high interest from both municipalities and households. However, the expectations of energy community (EC) founders often clash with the technical and economic limits of real-world operation. Using the case study of the development strategy for the town of Židlochovice, this article analyzes the operation of a community split into two sharing groups in accordance with the rules of the Electricity Data Centre (EDC). Utilizing modeled 15minute load and production profiles of photovoltaic power plants (PVPP) generated by the GENEKOM software, the paper quantifies the technical potential of sharing and examines the economic impacts of community involvement.

The results demonstrate that without adequate accumulation, achieving 100 % utilization of PVPP surpluses is an illusion, and extensively expanding sharing groups by hundreds of consumption points (CPs) leads to an unsustainable increase in administrative and operational complexity. The optimal development strategy appears to be targeted expansion of groups up to the limit of 50 delivery points, which allows for the utilization of the full five-iteration calculation process by the EDC. In the case study, this approach increased the share of shared surpluses from the initial 42–51 % to an effective 71–73 %.

Furthermore, the article delves into the pricing of shared electricity, which must reflect the community's operational costs and additional source maintenance expenses. Lastly, the paper describes the response of electricity suppliers to the specific deformation of residual load profiles. CPs involved in sharing primary draw grid electricity during periods with higher systemic costs, which increases their average specific costs from the supplier by 365 to 600 CZK/MWh. The paper thus provides a realistic guide for the correct architectural and economic setup of newly emerging energy communities.

Úvod: Od legislativní euforie k realitě prvního roku provozu

Schválení novely energetického zákona LEX OZE II a spuštění činnosti Elektroenergetického datového centra (EDC) v srpnu 2024 odstartovalo v ČR éru decentralizované energetiky. Možnost legálně sdílet elektřinu vyvolala vysoký zájem municipalit a domácností, které v energetických společenstvích (ES) spatřovaly nástroj pro dosažení energetické soběstačnosti a snížení výdajů.

Počáteční euforie však byla často živena nerealistickými představami, že přebytky z fotovoltaických elektráren (FVE) lze v rámci komunity distribuovat bez omezení a zdarma. Reálný provoz ukazuje, že zakladatelé ES narážejí na technické limity distribuční soustavy, algoritmy zúčtování EDC a ekonomickou reakci tradičních obchodníků. Tento článek na základě dat z Technické a Ekonomické studie rozvoje ES města Židlochovice, modelovaných pomocí softwaru GENEKOM, analyzuje technickoekonomické mantinely a pravidla cenotvorby nezbytná pro dlouhodobou udržitelnost společenství.

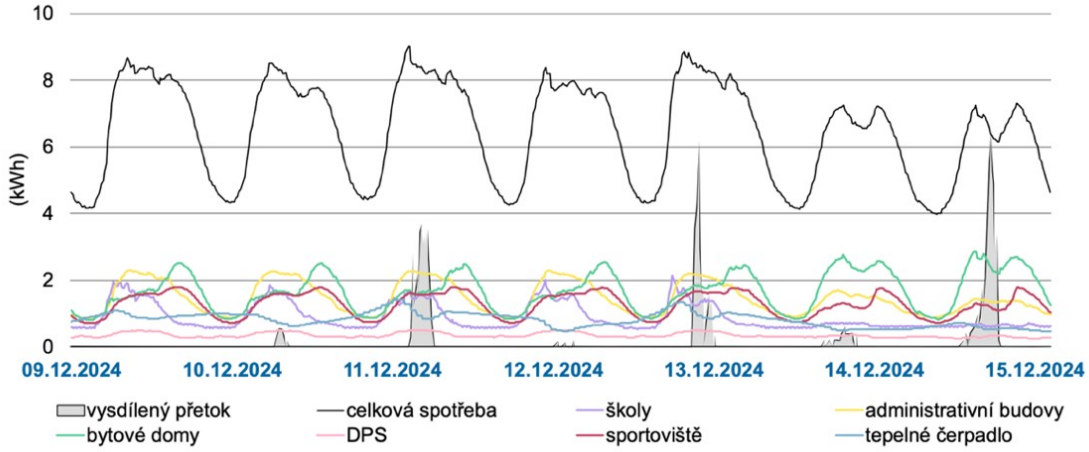
Experiment: Metodika a technické limity sdílení

Pro kvantifikaci technického potenciálu sdílení elektřiny v Židlochovicích byl využit simulační software GENEKOM. Tento nástroj generuje syntetické 15minutové profily spotřeby a výroby jednotlivých odběrných míst (OM) na základě reálných historických dat, typových diagramů dodávek (TDD) a parametrů instalovaných FVE.

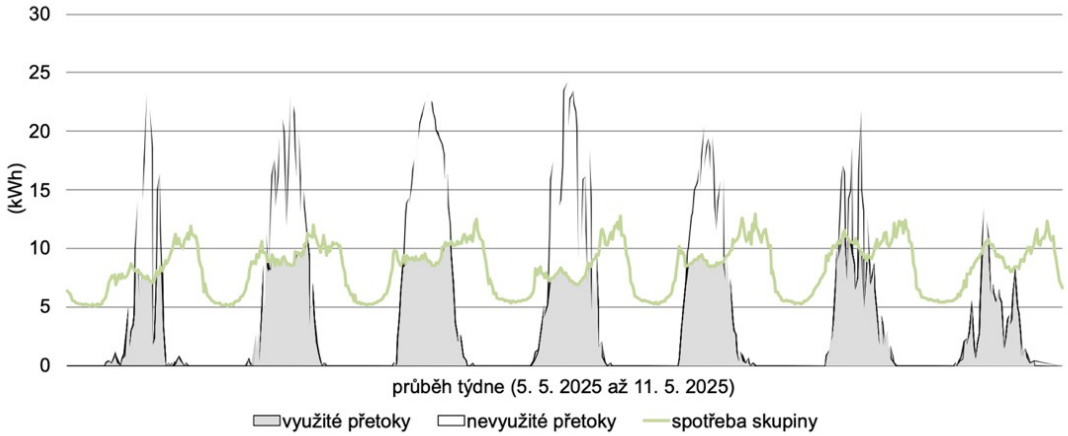
Zásadním regulatorním faktorem ovlivňujícím architekturu ES v ČR je limit 50 předávacích míst v jedné sdílecí skupině, do kterého systém EDC provádí plný pětiiterační výpočet alokačního klíče. Tento algoritmus v pěti po sobě jdoucích krocích optimálně přerozděluje nevyužité přebytky z FVE mezi volná OM. Při překročení tohoto limitu výpočetní a administrativní náročnost prudce roste a efektivita alokace klesá.

Analýza modelových dat ukázala, že extenzivní připojování dalších spotřebitelů bez akumulace je neefektivní. V základním, neoptimalizovaném rozložení skupin se podíl reálně vysdílených přetoků z městských FVE pohyboval pouze mezi 42 % a 51 %. Cílenou optimalizací – rozdělením komunity na dvě dedikované skupiny

a jejich matematicky přesným doplněním do limitu 50 předávacích míst tak, aby profily spotřeby zrcadlily křivku výroby – však podíl efektivně vysdílených přetoků vzrostl na 71 % až 73 %. Reálný čtvrthodinový průběh simulace před optimalizací ukazuje graf na Obr. 1. Efektivnější vykrytí přetoků po optimalizaci skupin demonstruje graf na Obr. 2. Podrobné srovnání efektivity shrnuje Tabulka 1.



Obr. 1: Graf z Technické studie zobrazující 15minutový profil výroby vs. spotřeby.



Obr. 2: 15minutové profily současnosti výroby FVE a spotřeby optimalizovaných skupin v systému GENEKOM.

Tabulka 1: Podíl vysdílených přetoků FVE před optimalizací a po optimalizaci skupin.

Stav společenství	Skupina 1 (vysdíleno)	Skupina 2 (vysdíleno)	Celková efektivita
Základní (neoptimalizovaný)	42 %	51 %	Cca 46 %
Optimalizovaný (do 50 OM)	71 %	73 %	Cca 72 %

Shrnutí výsledků: Ekonomická realita a deformace odběrových diagramů

Dopady komunitního sdílení nelze chápat pouze jako ušlý zisk obchodníka z nedodané energie. Klíčovým problémem pro tradiční dodavatele je strukturální změna a deformace zbytkového odběrového diagramu zákazníků zapojených do ES.

Pokud společenství v letních měsících pokryje spotřebu svých členů z vlastních FVE, diagram odběru od tradičního obchodníka prudce klesne. Obchodníkovi však zůstává povinnost dodávat elektřinu v obdobích, kdy komunitní zdroje nevyrábějí (v zimě, v noci a během ranních či večerních špiček), kdy jsou nákupní ceny na velkoobchodním trhu OTE nejvyšší. Výsledná průměrná nákupní cena silové elektřiny pro zákazníky se sdílením je tak pro obchodníka vyšší. Další nákladovou položku představují vícenáklady spojené s predikcí a vyrovnáváním odchylek, neboť diagramy komunity jsou silně závislé na meteorologických podmínkách.

47. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Na základě reálných tržních dat byly pro modelový případ Židlochovic kvantifikovány specifické vícenáklady obchodníka spojené s dodávkou, dorovnáním pozice a rizikem odchylek. Celkový dopad těchto profilových vícenákladů dosahuje v součtu 900 Kč/MWh. Strukturovaný rozpad rizikových příplatků je přehledně zobrazen v Tabulce 2. Tato data jasně vyvracejí mýtus, že komunitní sdílení je pro vnější tržní prostředí neutrální.

Tabulka 2 Analytický rozpad vícenákladů obchodníka generovaných sdílením elektřiny.

Složka vícenákladů obchodníka	Výše příplatku [Kč/MWh]
Příplatek za dodávku silové elektřiny (deformovaný	304 Kč
Příplatek za dorovnání obchodní pozice na krátkodobých	94 Kč
Příplatek za rizika a zúčtování odchylek v systému OTE	498 Kč
Celkové profilové a rizikové vícenáklady	900 Kč

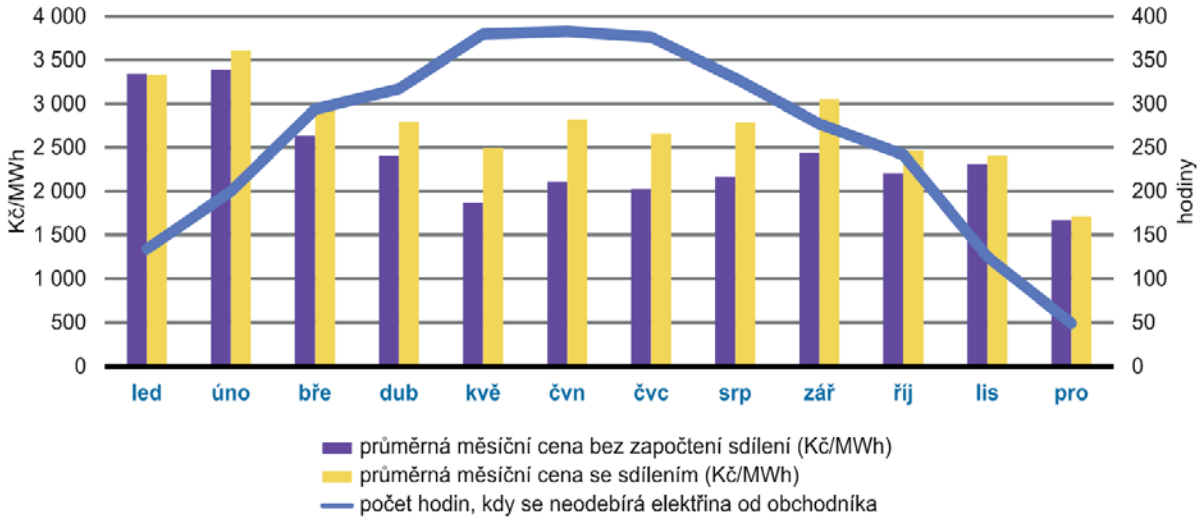
Architektura udržitelné komunity: cenotvorba a správa

Provoz ES je spojen s fixními náklady na administrativní správu, registraci v EDC, rozúčtování energií a tvorbu rezerv na údržbu a budoucí obnovu technologických prvků. V případové studii města Židlochovice byly roční vnitřní provozní náklady vyčísleny na 107 tisíc Kč. Aby byla komunita udržitelná, musí se tyto režijní náklady promítnout do ceny sdílené energie. Minimální nákladová cena vnitřního sdílení byla stanovena na 1 483 Kč/MWh.

Při návrhu vnitřních vztahů se jako transparentní jeví model tzv. středové ceny na úrovni 1 850 Kč/MWh, který představuje spravedlivý kompromis mezi zájmy spotřebitele a investora. V reálných podmínkách je však nutné tento model modifikovat o kompenzační mechanismy. Vlivem alokačního klíče EDC a proměnlivosti osvitu část přetoků z FVE vždy odejde mimo komunitu za marginální výkupní ceny. Po započtení kompenzací za nevysdílené přebytky byla optimální vnitřní cena pro komerční vztahy upravena na 2 507 Kč/MWh. Rozdíly mezi navrženými variantami vnitřního zúčtování ilustruje Tabulka 3. Tato cenotvorba zajišťuje dlouhodobou ekonomickou stabilitu celého systému. Změnu ceny elektřiny nám zobrazuje Obr. 3.

Tabulka 3: Srovnání variant vnitřní cenotvorby v ES Židlochovice s ohledem na rizika nevysdílení.

Varianta vnitřního cenového modelu	Výše ceny [Kč/MWh]	Hlavní účel a ekonomická funkce
Minimální nákladová cena	1 483 Kč	Pokrytí ročních režijních a provozních nákladů správy ES
Středová cena	1 850 Kč	Spravedlivý kompromis a vyvážený tarif pro spotřebitele i investora
Optimalizovaná komerční cena	2 507 Kč	Zahrnutí kompenzačních mechanismů za nevysdílené přebytky



Obr. 3: Graf z Technické studie zobrazující 15minutový profil výroby vs. spotřeby.

Závěr: Doporučení pro praxi

Případová studie energetického společenství města Židlochovice ukázala, že úspěch projektů komunitní energetiky závisí na striktním respektování technických a ekonomických zákonitostí. Z technického hlediska analýza potvrdila, že namísto extenzivního připojování stovek odběrných míst je výhodnější rozdělovat společenství do logických skupin s limitem do 50 předávacích míst, což umožňuje plné využití pětiiteračního výpočtu EDC a zvyšuje efektivitu sdílení přetoků z 42–51 % na 71–73 %. V oblasti ekonomiky je nezbytné kalkulovat s tržní reakcí dodavatelů na deformaci odběrových diagramů, která generuje vícenáklady až 900 Kč/MWh. Dlouhodobá udržitelnost ES je proto podmíněna robustní vnitřní cenotvorbou (minimálně 1 483 Kč/MWh pro pokrytí správy a optimálně 2 507 Kč/MWh pro komerční vztahy). Realizace komunitních projektů musí probíhat na základě exaktních simulací a tvrdých ekonomických dat.

Poděkování

Publikace vznikla za finanční podpory projektu specifického výzkumu na VUT (projekt č. FEKT-S-26-8946).

Literatura

[1] Caramizaru, E. and Uihlein, A. (2020): Energy communities: an overview of energy and social
[2] Innovation.
[3] ČESKO. Zákon č. 469/2023 Sb., kterým se mění zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon), ve znění pozdějších předpisů (LEX OZE II). In: Sbírka zákonů České republiky. 2023.
[4] ELEKTROENERGETICKÉ DATOVÉ CENTRUM (EDC). Metodika zúčtování a alokační klíče pro komunitní energetiku v ČR. Praha: EDC, s.r.o., 2024. Dostupné z: https://www.edc-cr.cz
[5] Technická studie rozvoje energetického společenství města Židlochovice. Židlochovice: Město Židlochovice, 2024. Modelace energetických toků v simulačním softwaru GENEKOM.
[6] Ekonomická studie a návrh cenotvorby energetického společenství města Židlochovice. Židlochovice: Město Židlochovice, 2024. Analýza finanční udržitelnosti a vnitřních cenových modelů.

INTEGRACE AKUMULÁTORŮ DO BATERIOVÝCH SYSTÉMŮ V ELEKTROMOBILITĚ

M. Šedina

Ústav elektrotechnologie, FEKT, VUT v Brně, Technická 10, 616 00 Brno, Česká republika

Abstract

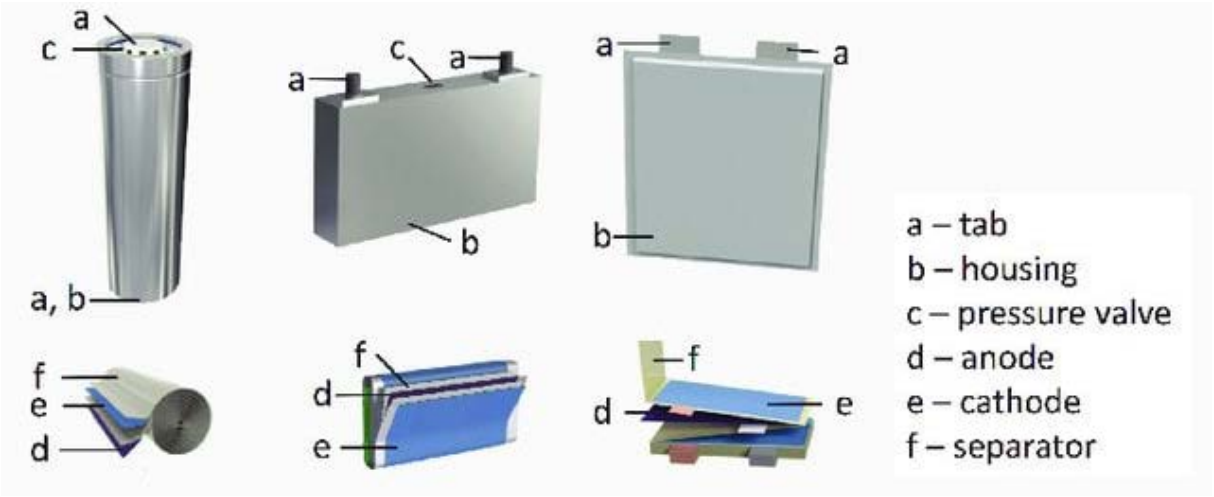
This paper describes the technological differences in the design of battery systems for electric vehicles, ranging from traditional modular architectures (CTM) to highly integrated Cell-to-Pack (CTP) and Cell-to-Body (CTB) systems. The paper focuses on the impact of cell format on integration efficiency, thermal management, and vehicle structural integrity. It also discusses the significance of EU Regulation 2023/1542 and UN ECE R100 safety standards with regard to heat dissipation and future battery design.

Úvod

Aktuálně probíhá v automobilovém průmyslu elektrifikace portfolia vozidel nabízených všemi výrobci. Cílem je poskytnout zákazníkům co největší elektrický dojezd za co nejnižší možné náklady. Při návrhu vozidel se již baterie neuvažuje jen jako zdroj energie, ale jako funkční součást podvozku vozidla. Postupně se dostáváme do fáze, kde se odstraňují nadbytečné součásti a zvyšuje se tak zástavba baterií ve vozidlech.

Vliv tvaru článků na integraci do vozidla

Typ článku je klíčovým faktorem, který určuje konstrukci celého modulu. Každý typ vyžaduje specifický přístup k fyzické integraci a odvodu tepla. Přehled jednotlivých tvarů je na Obr. 1.



Obr. 1: Přehled jednotlivých typů článků. [2]

Cylindrické články nabízejí díky svému tvaru největší mechanickou odolnost. V rámci efektivity zástavby jde o nejhorší variantu, kdy mezi články vzniká mezera. Výrobci tento prostor využívají typicky pro vedení chlazení a výhřevu. To v kombinaci s kovovým obalem vede ke snadnému tepelnému managementu. Mezi nejběžnější formáty v elektromobilitě patří 18650, 21700 a nejnovější 46800. [1]

Prizmatické články díky svému tvaru umožňují efektivní instalaci do vozidla. Mají pevný obal, který je typicky vyrobený z kovu či plastu, což zajišťuje vysokou mechanickou odolnost. Aktuálně jsou primární volbou článků pro technologii cell-to-pack. Rozměrově je možné články škálovat a aktuálně jsou na trhu články přesahující délku 2 m. [1]

Pouch články jsou články uložené v polymerním obalu. To snižuje jejich hmotnost a cenu, navíc to zvyšuje efektivitu zástavby článku. Nevýhodou je jejich nízká mechanická odolnost a náročnost teplotního

managementu. Jedná se o nejvhodnější články pro technologii cell-to-module . Tvar i rozměr se dá jednoduše přizpůsobit požadavku aplikace. [1]

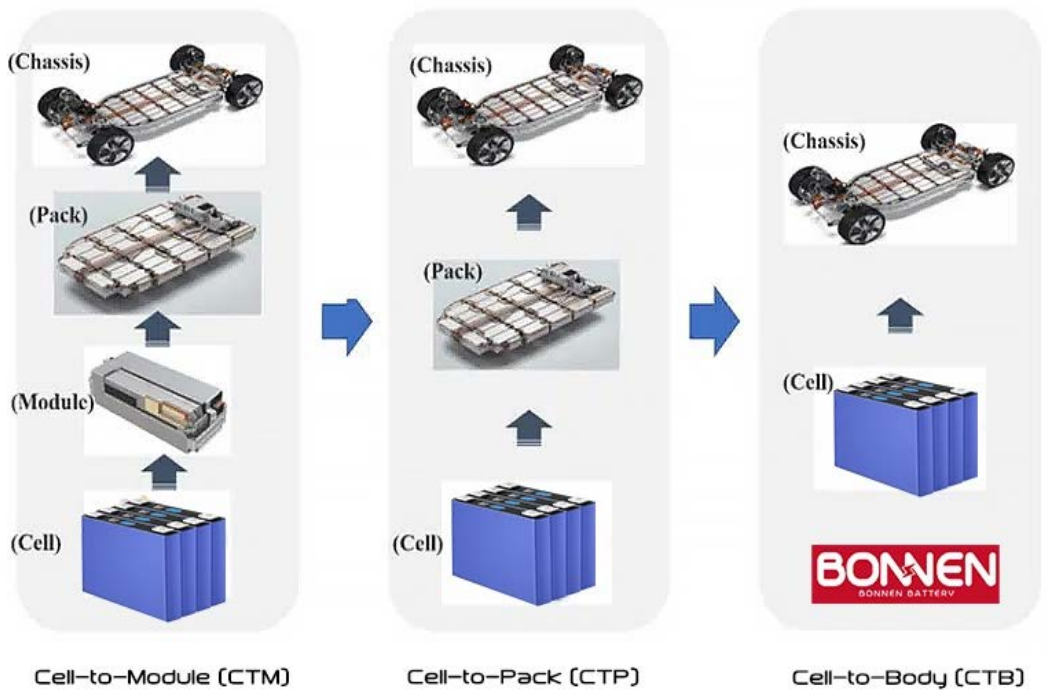
Architektura bateriových packů

V rámci dnešní pokročilé elektromobility došlo k jakémusi tvaru bateriového packu. Díky tomu, že dnešní vozidla jsou typicky navrhována jako elektromobily, se počítá s tím, že se baterie vždy nachází mezi nápravami. U starších vozidel se baterie nacházela i v podlaze kufru a případně v tunelu pro kardan/výfuk.

Prvním a nejstarším typem vnitřní architektury je technologie cell-to-module, kdy se baterie skládá z modulů a jednotlivé moduly obsahují samotné články. Výhodou je opravitelnost a jednoduché vyjmutí samotného modulu. Nevýhodou je pak vyšší hmotnost a neefektivní využití prostoru. [3]

Modernější architekturou je poté metoda cell-to-pack, kde se přeskakuje integrování článků do modulů a přímo se integrují do packu. Výhodou je tak zjednodušení konstrukce (méně dílů), nižší hmotnost. V rámci stejného rozměru packu lze s touto technologií dosáhnout větší kapacity a delšího dojezdu. [3]

Nejmodernější architekturou je pak technologie cell-to-body, u které jsou baterie přímo nosnou a strukturální částí karoserie vozidla. Díky tomu lze vynechat samotný rám baterie a ušetřit tím váhu a cenu, další výhodou je nižší podlaha vozidla. Nevýhodou je poté náročný návrh packu. [3]



Obr. 2: Ukázka potřebných kroků integrace u jednotlivých architektur. [3]

Bateriový pack pak neobsahuje jen články nebo moduly, ale může obsahovat jednotky BMS, propojky nebo výkonové sběrnice a další prvky výkonové elektroniky. Další částí je poté chlazení článků/modulů. To se liší mezi jednotlivými výrobci. Prvním typem chlazení bylo chlazení vzduchem (pasivní a aktivní). To se již moc dnes nevyužívá z důvodu nízké efektivity. Dalším typem chlazení je chlazení chladící kapalinou. Zde se buď využívá umístění chlazení mezi jednotlivými články, nebo velký chladicí plát umístěný pod nebo nad články. Chlazení kapalinou je dnes nejrozšířenějším řešením. Moderním řešením, které je dnes spíše ve vývoji, je ponorné chlazení, kdy jsou samotné články ponořeny v dielektrickém médiu, které slouží k odvodu tepla. [4]

Legislativní požadavky

V rámci nových požadavků musí každý výrobce v EU od roku 2027 splňovat nařízení EU 2023/1542, které má sloužit k delší udržitelnosti a opravitelnosti vozidel. Každá vyrobená baterie bude mít vlastní digitální pas a bude tak možné sledovat celý její životní cyklus od výroby po recyklaci a může tak zákazníkům dát i dobré informace o tom, zda proběhla na baterii oprava nebo ne. Dále tento předpis určuje, jaké jsou recyklační cíle a také jaké procento recyklátu musí být v bateriích použito. [5]

Ve vozidlech je aktuálně taktéž povinný standard UN EC R100, který má zabezpečit bezpečnost posádky elektromobilu. Aktuálně platí pravidlo 5 minut, kdy pokud by v baterii vozidla došlo k termální propagaci, tak vozidlo musí řidiče upozornit minimálně 5 minut předtím, než situace začne být nebezpečná pro posádku. Tento čas se bude postupně v budoucích letech navyšovat. Z tohoto důvodu jsou často packy osazeny slídovými deskami, které mají zabránit prohoření, případně jako ochrana slouží právě chladící plát nebo další materiály zabraňující šíření požáru. Dále jsou dnes baterie osazeny ventilačními otvory, které odvádějí jedovaté spaliny mimo prostor dveří, tak, aby se zvýšila možná bezpečnost posádky při incidentu. [6] [7]

Shrnutí výsledků

Vývoj baterií v elektromobilech směřuje k jejich přímému zabudování do konstrukce vozu, což šetří hmotnost a snižuje celkovou cenu. Hlavním úkolem konstruktérů je však skloubit integraci baterií s bezpečností. Nové evropské předpisy vyžadují, aby tyto složité systémy byly snadno demontovatelné pro budoucí opravy a recyklaci. Zároveň musí tato vozidla splňovat přísná bezpečnostní opatření. Konstrukce baterie tak musí dokonale propojit vysoký výkon baterie, maximální bezpečnost posádky a šetrnost k životnímu prostředí.

Poděkování

Publikace vznikla za finanční podpory projektu specifického výzkumu na VUT (č.FEKT-S-26-8946).

Literatura

[1] BU-301a: Types of Battery Cells, 2019. *Battery university* [online]. [cit. 2026-05-14]. Dostupné z: https://www.batteryuniversity.com/article/bu-301a-types-of-battery-cells/

[2] SCHRÖDER, Robert, Muhammed AYDEMIR a Günther SELIGER, 2017. Comparatively Assessing different Shapes of Lithium-ion Battery Cells. *Procedia Manufacturing* [online]. Elsevier BV, **8**, 104-111 [cit. 2026-05-14]. ISSN 2351-9789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2017.02.013

[3] Návrhy bateriových sad pro elektromobily: Od modulů k integrovanému napájení karoserie, 2026. Bonnet batteries [online]. [cit. 2026-05-14]. Dostupné z: https://www.bonnenbatteries.com/cs/ev-battery-pack-designs-from-modules-to-body-integrated-power/

[4] Understanding 5 Types of Cooling Systems in EVs and HEVs, 2024. In: *T-Global Technology* [online]. 13.6.2024 [cit. 2026-05-14]. Dostupné z: https://www.tglobalcorp.com/news/blog/Cooling_in_EVs_and_HEVs/

[5] Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2023/1542, 2023.

[6] Concerning the Adoption of Harmonized Technical United Nations Regulations for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these United Nations Regulations, 2022.

[7] YE, Zibo a Xingfeng FU, 2024. Experimental and simulation investigation on suppressing thermal runaway in battery pack. *Scientific Reports* [online]. Springer Science and Business Media, 2024-6-3, **14**(1) [cit. 2026-05-14]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-024-62408-1

TECHNOLOGICKÝ POKROK NA-ION BATERIÍ A JEJICH INTEGRACE DO SOUČASNÉHO TRHU

A. Šimek, T. Kazda a O. Čech

Ústav elektrotechnologie, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, Technická 10, 616 00 Brno, Česká republika

Abstract

Sodium-ion (Na-ion) batteries are emerging as a highly viable substitute for lithium-ion systems, particularly excelling in areas like safety, affordability, and the abundance of raw materials. This paper comprehensively examines the commercial progress of Na-ion technology, evaluating crucial materials, recent technological breakthroughs, and overall market readiness. We analyze the performance, scalability, and drawbacks of primary components, notably hard carbon anodes alongside Prussian blue analogue and layered oxide cathodes. Additionally, the review evaluates the progress of key manufacturers and pilot-scale manufacturing, while acknowledging ongoing hurdles such as lower energy density. Finally, we explore future prospects—including material improvements, environmental impact, and applications in electric vehicles and grid storage—highlighting Na-ion technology as a crucial partner to lithium-based solutions in the future energy sector.

Úvod

Každoročně stoupající zastoupení bateriových systému na trhu zvyšuje v posledních letech zájem o sodno-iontové (Na-ion) baterie jako komplementární technologii k dobře známým lithno-iontovým (Li-ion) systémům. Aktuálně díky své vysoké hustotě energie a již lety prověřené technologii dominují trhu Li-ion baterie. Ovšem obavy ohledně geopolitickému rozložení nezbitých surových materiálů, jako je kobalt a lithium urychlují potřebu po alternativních technologiích. Na-ion baterie nabízejí několik výhod, včetně dostupnosti a nízké ceny sodíku, vyšší bezpečnosti a lepšího výkonu při nízkých teplotách. Ačkoli mají Na-ion systémy obecně nižší gravimetrickou hustotu energie (100-160 Wh/kg) ve srovnání s Li-ion (150-280 Wh/kg) a nižší provozní napětí, jsou stále více považovány za vhodné pro aplikace, jako jsou stacionární úložiště energie a levná elektromobilita, kde jsou rozhodující náklady a udržitelnost zdrojů. [1; 2]

Výzkum Na-ion baterií započal společně s výzkumem Li-ion, ale velkého rozmachu dosáhl převážně v posledních několika letech.Neustále se objevují nové materiály a technologie pro jejich zdokonalení a zajištění udržitelnosti. Jako katodové materiály se využívají tři hlavní skupiny materiálů, mezi něž patří vrstevnaté oxidy přechodných kovů (Layered Transition Metal Oxides); polyanoynické sloučeniny (Polyanionic Compounds) a analogy pruské modři (Prussian Blue Analogues – PBA, neboli materiály na bázi ferrikyanidu) [3]. Jako anodový materiál dominuje tvrdý uhlík (Hard Carbon), který je charakteristický svou neuspořádanou vnitřní strukturou. V této struktuře dochází k několika mechanismům ukládání sodíku, jako je adsorpce, akumulace a vyplňování pórů. Díky této kombinaci dokáže tvrdý uhlík efektivně, ale především reverzibilně ukládat sodné ionty [4]. Elektrolyty se obvykle skládají z organických rozpouštědel, jako je ethylen karbonát a propylen karbonát, v kombinaci se sodnými solemi, jako je $NaPF_6$ (hexafluorfosforečnan sodný) nebo $NaClO_4$ (chloristan sodný). Současně pak probíhá výzkum vodných a solid-state alternativ, jako je tomu u Li- ion baterií [5].

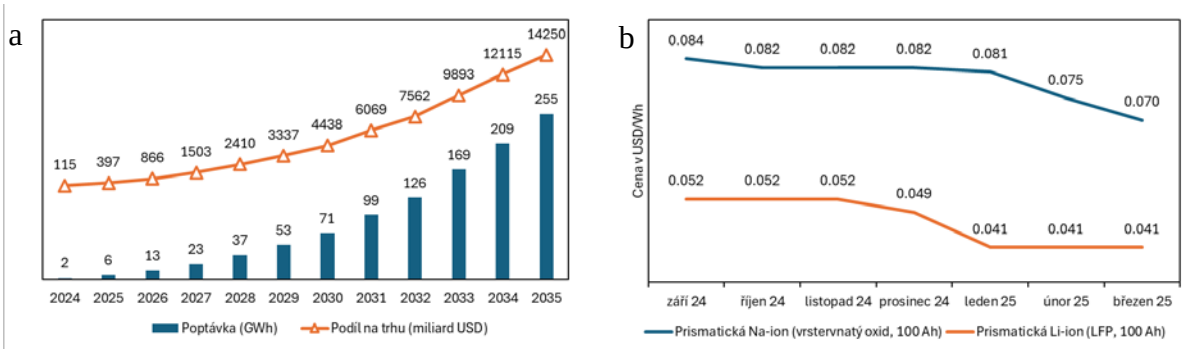
Výkonnost Na-ion za nízkých teplot

Jednou z nejvýznamnějších předností Na-ion baterií, která jim dává obrovskou výhodu oproti zavedené Li-ion technologii, je jejich excelentní výkon a stabilita i za hlubokých mrazů. Za touto vlastností stojí hned několik fyzikálně-chemických odlišností. Ačkoliv má sodík větší iontový poloměr než lithium, vyznačuje se paradoxně slabší vazební (desolvatační) energií. Díky tomu je přechod iontů přes fázové rozhraní mezi elektrolytem a elektrodou mnohem snazší a rychlejší i při nedostatku tepelné energie v chladném prostředí. K této vynikající kinetice výrazně přispívá i odlišné složení pasivační vrstvy (SEI) na elektrodách. Ta je u sodíkových článků typicky tenší a propustnější, což zásadně snižuje vnitřní odpor baterie. Zcela stěžejní je pak samotný mechanismus ukládání iontů na záporné elektrodě, kde Na-ion baterie nejčastěji využívají tvrdý uhlík (hard carbon). Zatímco Li-ion články spoléhají na čistou interkalaci do grafitu, která je v mrazu velmi pomalá a neefektivní, sodík se do struktury ukládá kombinací tří různých mechanismů – adsorpcí na povrchových defektech, částečnou interkalací

do grafenových domén a plněním nanopórů. Tyto procesy jsou kineticky mnohem flexibilnější a méně náročné. Výsledkem je nejen zachování vysoké využitelné kapacity při teplotách až –40 °C, ale především dramatické zvýšení bezpečnosti – u Na-ion baterií totiž v mrazu prakticky odpadá riziko nebezpečného pokovování anody (tzv. plating) a tvorby zkratujících dendritů, což je jeden z největších limitů současných lithiových akumulátorů. [6; 7]

Současná pozice Na-ion na trhu

Na-ion baterie se v posledních letech začali objevovat na trhu, čímž se začíná zvyšovat poptávka a roste jejich podíl na trhu, jak je znázorněno na obrázku 1a. Z perspektivního výzkumného tématu se tak v posledních letech stala již komerčně dostupná technologie. Hlavním důvodem tohoto růstu je srovnatelná energetická hustota Na-ion baterií (průměrně 150 Wh/kg) s Li-ion bateriemi využívající katodový materiál $LiFePO_4$ – LFP (160 Wh/kg). Ačkoliv mají Na-ion baterie velký potenciál snížit cenu výsledné baterie díky menší cenové náročnosti surových materiálů a možnosti využívat stávající výrobní kapacity pro Li-ion, jejich cena za kWh je aktuálně přibližně 1,7 × vyšší, než je tomu u Li-ion baterií využívajících LFP, jak ukazuje obrázek 1b. Hlavním důvodem je stále relativně malá poptávka a dosud lety neprověřená funkčnost této technologie. S rostoucím zájmem a jistější pozicí na trhu se očekává výrazný pokles ceny Na-ion baterií. Už během několika let by se tak měly cenově vyrovnat zavedeným Li-ion článkům. Do budoucna navíc naplní očekávání a stanou se jejich mnohem levnější a dostupnější alternativou.



Obr. 1: a) Očekávaný vývoj rostoucí poptávky po Na-ion bateriích a jejich tržního podílu; b) srovnání ceny za Wh Li-ion a Na-ion baterií na článcích se srovnatelnými parametry

Přehled výrobců zabývajících se vývojem a výrobou Na-ion baterií

Celosvětový vývoj sodíko-iontových (Na-ion) baterií rychle nabírá na obrátkách, přičemž technologický pokrok určují různé materiálové přístupy a cílové aplikace. Hlavní hybnou silou trhu jsou v současnosti čínští producenti, kteří tyto články již úspěšně integrují do praxe v obrovském měřítku. Absolutní lídr trhu CATL nasazuje své baterie nejen do osobních vozů, jako jsou modely značky Chery nebo elektromobil Changan Nevo A06, ale v rámci projektu Tectrans II cílí také na elektrické dodávky pro lehký transport. CATL navíc představil druhou generaci s očekávanou energetickou hustotou až 200 Wh/kg a odolností v mrazech do –40 °C, jejíž hromadná produkce má odstartovat v roce 2027 [8; 9]. Pozadu nezůstává ani HiNa Battery, která vedle využití v elektromobilech (Sehol E10X) zprovoznila masivní sodíkové stacionární úložiště s úctyhodnou kapacitou 200 MWh [10]. Silnou asijskou dominanci pak umocňuje gigant BYD, druhý největší výrobce baterií a automobilka v jednom, který již v roce 2024 otevřel specializovanou gigafactory na Na-ion články. BYD na trh intenzivně protlačuje cenově dostupné elektromobily poh áněné touto technologií a díky spolupráci se společností SUNPARK ji rozšiřuje i do bateriových úložišť pro fotovoltaiku [11].

Evropské firmy, často vzniklé jako univerzitní spin-offy, se naproti tomu snaží najít uplatnění spíše ve specifičtějších segmentech trhu. Britský Faradion cílí na lehkou elektromobilitu, francouzský Tiamat se soustředí na elektrické nářadí a švédská společnost Altris AB klade důraz na vývoj nehořlavých článků bez obsahu fosforu. Technologie Altris díky tomu našla uplatnění jako záložní zdroje pro datová centra Polarium, ve vojenských aplikacích švédské armády a ve spolupráci s firmou Clarios také při vývoji nových 12 V startovacích akumulátorů. Přestože se v Evropě i ve světě objevilo mnoho slibných pokusů o vybudování silné lokální produkce, snahy některých ambiciózních západních start-upů nakonec nevyšly. Vzhledem k obrovskému tlaku, bezkonkurenčnímu tempu inovací a masivním výrobním kapacitám asijské konkurence tyto projekty nedokázaly na trhu ekonomicky přežít a byly nuceny svou činnost u končit [12].

Závěr

V posledních letech došlo k obrovskému posunu ve vývoji Na-ion baterií. Z technologie, která byla ještě nedávno pouze ve fázi výzkumu, se rychle stává reálná a vysoce konkurenceschopná alternativa k zavedeným Li-ion systémům. Celý trh se neustále dynamicky rozvíjí, což s sebou přináší soustavné zlepšování energetické hustoty, jež u nejnovějších generací již plně konkuruje zavedené LFP technologii, a zároveň očekávaný trvalý pokles výrobních cen. Na-ion články se tak stávají mimořádně atraktivní volbou nejen díky celkové bezpečnosti a bezproblémové dostupnosti levných surovin, ale především proto, že naprosto vynikají spolehlivým fungováním i za extrémně nízkých teplot, čímž překonávají mnohá stávající řešení. Na trhu se dnes již běžně objevují komerční produkty, a i přes silnou dominanci asijské konkurence se do vývoje a hledání specializovaných aplikací nadále aktivně zapojují také evropské společnosti. Rozvoj této technologie tak stále představuje strategickou příležitost pro posílení evropské surovinové soběstačnosti, omezení závislosti na východních dodavatelských řetězcích a lepší geopolitické rozložení výroby baterií.

Poděkování

Publikace vznikla za finanční podpory projektu specifického výzkumu na VUT (projekt č. FEKT-S-26-8946)

Literatura

[1] J. -M. Tarascon, “Na-ion versus Li-ion Batteries: Complementarity Rather than Competitiveness”, Joule, vol. 4, no. 8, 2020, doi: 10.1016/j.joule.2020.06.003.
[2] K. Chayambuka, G. Mulder, D. L. Danilov, and P. H. L. Notten, “From Li-Ion Batteries toward Na-Ion Chemistries: Challenges and Opportunities”, Advanced Energy Materials, vol. 10, no. 38, Aug. 2020, doi: 10.1002/aenm.202001310.
[3] M. He, S. Liu, J. Wu, and J. Zhu, “Review of cathode materials for sodium-ion batteries”, Progress in Solid State Chemistry, vol. 74, 2024, doi: 10.1016/j.progsolidstchem.2024.100452.
[4] E. O. Eren, E. Senokos, E. Scoppola, Z. Song, M. Antonietti, and P. Giusto, “An enhanced three-stage model for sodium storage in hard carbons”, Energy, vol. 18, no. 16, 2025, doi: 10.1039/d4ee06029f.
[5] N. Aslfattahi et al., “State-of-the-art review on electrolytes for sodium-ion batteries: Potential recent progress and technical challenges”, Journal of Energy Storage, vol. 72, 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.108781.
[6] M. Li et al., “Low-temperature performance of Na-ion batteries”, Carbon Energy, vol. 6, no. 10, Aug. 2024, doi: 10.1002/cey2.546.
[7] K. Mukai, T. Inoue, Y. Kato, and S. Shirai, “Superior Low-Temperature Power and Cycle Performances of Na-Ion Battery over Li-Ion Battery”, ACS Omega, vol. 2, no. 3, Mar. 2017, doi: 10.1021/acsomega.6b00551.
[8] “CATL's First Sodium-ion Battery to Power Chery EV Models”, Apr. 16, 2023. https://www.catl.com/en/news/6013.html (accessed May 14, 2026).
[9] P. Vecchiotti, “CATL launches Tectrans II, new sodium-ion battery for light commercial vehicles”, Jan. 23, 2026. https://www.sustainabletruckvan.com/catl-sodium-ion-battery/ (accessed May 14, 2026).
[10] “Hina Battery Becomes 1st Battery Maker to Put Sodium-ion Batteries in Evs in China”, Feb. 23, 2023. https://1url.cz/5J1mo (accessed May 14, 2026).
[11] T. Lombardo, L. Paoli, A. Fernandez Pales, and T. Gül, “Sodium-ion battery momentum grows, but challenges remain”, IEA, Feb. 17, 2026. https://www.iea.org/commentaries/sodium-ion-battery-momentum-grows-but-challenges-remain (accessed May 14, 2026).
[12] P. S. Molina and M. Lynas, “All European sodium-ion battery manufacturers at a glance”, 002-05-2026. https://www.ess-news.com/2026/03/02/all-european-sodium-ion-battery-manufacturers-at-a-glance/ (accessed May 14, 2026).

CESTA K PROFESIONALITĚ: EVOLUCE PROFESNÍ CERTIFIKACE A BUDOUCNOST FOTOVOLTAIKY V ČESKU

J. Vaněk[1,2] a P. Maule[1,3]

1 Ústav elektrotechnologie. FEKT., Vysoké učení technické v Brně, Technická 10, 612 00 Brno
2 Katedry elektrotechniky Fakulta vojenských technologií Univerzita obrany
3 Česká fotovoltaická asociace, Teslova 1202/3, 301 00 Plzeň

Abstract

This paper provides a technical analysis of the professional qualification frameworks within the Czech Republic's decentralized energy sector, specifically focusing on the National System of Qualifications (NSK). As the penetration of renewable energy resources increases, the transition from general technical roles to specialized, standardized certifications for Photovoltaic (PV) and Electric Vehicle (EV) infrastructure installers has become a strategic necessity for grid stability and consumer safety. The study evaluates the evolution from Version 1 to Version 2 of the PV qualification standard (26-014-H), highlighting the rectification of previous regulatory loopholes regarding electrical competence. Furthermore, it identifies a "Designer Gap," advocating for higher European Qualifications Framework (EQF) levels—specifically EQF 5 and 6—for system designers. By synthesizing legislative requirements from Government Decree No. 194/2022 Sb. and industry findings from the Czech Photovoltaic Association, this document establishes the relationship between rigorous examination protocols and the reduction of systemic technical failures in modern power electronic installations.

Úvod

Současný rozmach obnovitelných zdrojů energie (OZE) v České republice staví energetiku do bezprecedentní situace. Masivní vlna instalací, poháněná snahou o energetickou soběstačnost a dekarbonizaci, přináší zásadní otázku: Je naše profesní připravenost dostatečná pro zajištění stability rozvodné sítě? Strategický význam odbornosti montérů a projektantů dnes není jen otázkou funkčnosti jednoho domu, ale pilířem bezpečnosti celého systému, který musí být v přísném souladu s evropskou legislativou RfG (Requirements for Generators).

Ocitáme se v paradoxu, kdy kvantita instalací často předbíhá kvalitu jejich provedení. Tempo růstu trhu vytváří tlak na rychlost, což může přímo ohrožovat bezpečnost a dlouhodobou udržitelnost OZE projektů. Jsme skutečně připraveni obětovat preciznost za cenu rychlých čísel v tabulkách instalovaného výkonu? Odpověď leží v historickém vývoji standardů, které měly tento divoký růst regulovat.

Historické poučení: Když „elektrikář“ nebyl podmínkou

Pochopení dnešních rizik vyžaduje pohled do minulosti, která jasně ilustruje, jak fatální následky může mít podcenění kvalifikačních nároků. První verze profesní kvalifikace **26-014-H**, platná od září 2011 do **10. 6. 2017**, byla poznamenána kritickým systémovým nedostatkem.

Tehdejší nastavení umožňovalo získat státní profesní zkoušku i osobám bez prokazatelné elektrotechnické kvalifikace. V praxi tak mohl fotovoltaiku instalovat člověk bez odborné způsobilosti (tehdejší vyhláška č. 50/1978 Sb.). Tento „divoký západ“ skončil až s revizí standardu, která zavedla povinnost doložit odbornou způsobilost v elektrotechnice v rozsahu minimálně **§ 6 nařízení vlády č. 194/2022 Sb.** (dříve vyhl. 50) jako striktní vstupní předpoklad pro připuštění ke zkoušce.

„Dnes je hanba se podívat na výtvory starších i mladších projektantů, které neudržely vědomosti a sledování nových legislativních a normativních změn, někdy i křížení norem a absentování a skloubení všech norem do bezpečné instalace,“ uvádí Petr Maule, výkonný ředitel České fotovoltaické asociace (ČFA).

Absence sledování legislativního vývoje v minulosti vytvořila technologický dluh, který moderní standardy nyní pracně napravují.

Moderní standard: Anatomie kvalifikovaného elektromontéra

Dnešní instalace fotovoltaiky vyžaduje komplexní soubor dovedností přesahující pouhou montáž. Obor vstupuje do nové éry standardizace – aktuální znění kvalifikace 26-014-H, s platností od **20. 5. 2025**, definuje elektromontéra jako specialistu na úrovni EQF 3, který však nese vysokou míru odpovědnosti za technickou integritu díla.

47. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Klíčové pilíře kompetencí zahrnují:

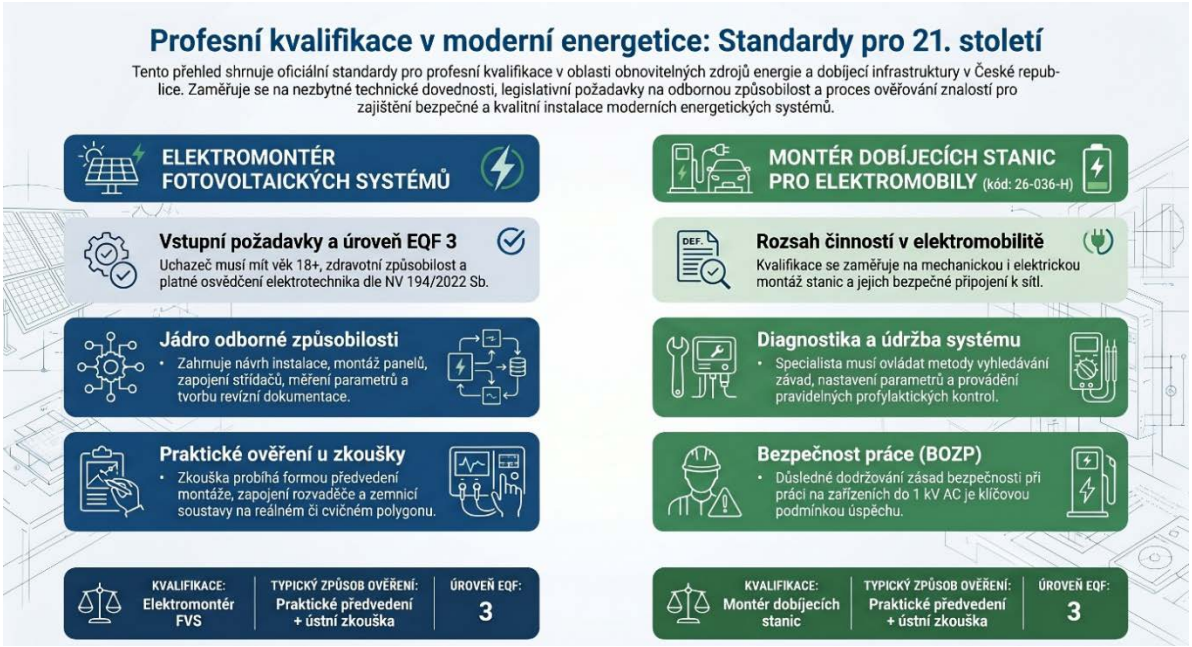
Návrh a dimenzování podle zadání: Montér na základě předloženého projektu vybírá vhodné umístění prvků, zřizuje zemnicí soustavy a stanovuje výkonové parametry včetně přesného dimenzování vodičů.

Měření a interpretace dat: Zahrnuje nejen volbu měřicích metod, ale i kontrolu způsobů zajištění přenosu dat a celkové funkčnosti systému.

Legislativní shoda a kontrola firmwaru: Kritickým úkolem je posouzení, zda navržené řešení včetně firmwaru zařízení plně odpovídá evropským požadavkům RfG na stabilitu sítě.

Bezpečnost a první pomoc: Detailní znalost opatření pro práci pod napětím a požární bezpečnosti, včetně schopnosti poskytnout první pomoc při úrazu elektrickým proudem.

Po definování role montéra jako realizátora však vyvstává otázka: Stačí tato úroveň odbornosti pro komplexní inženýrský návrh celého systému?



Obr. 1: Srovnání kvalifikací elektromontéra FVS a montéra dobíjecích stanic.

EQF 3 vs. EQF 6: Proč montér není projektant

V energetickém ekosystému existuje zásadní rozdíl mezi realizací (EQF 3) a koncepčním návrhem. Pokud energetický poradce (66-058-N) vyžaduje kvalifikační úroveň EQF 5, pak komplexní projektant FVS musí aspirovat na EQF 6. Projektant totiž nenese odpovědnost jen za elektrické schéma, ale za celkovou stabilitu a ekonomickou životaschopnost investice.

Kompetence	Elektromontér (EQF 3)	Projektant (EQF 5/6 - návrh)
Technický návrh	Realizace zapojení podle zadání	Výpočet proudů, výměr vodičů a návrh ochran
Analýza objektu	Instalace prvků vně a uvnitř budovy	Výpočet statického a dynamického zatížení střechy
Ekonomika	Kontrola provozních parametrů	Vypracování komplexního ekonomického rozboru
Legislativa	Kontrola firmwaru dle RfG	Tvorba technické zprávy a požárně bezpečnostního řešení

Realizační fáze nemůže suplovat chyby v projektu. Chybějící výpočty statiky nebo podcenění dynamického zatížení budov jsou riziky, která montér na střeše již nevyřeší.

Synergie s elektromobilitou: Nová fronta profesní odbornosti

Provázání OZE s infrastrukturou pro elektromobilitu (EV) rozšiřuje nároky na odbornost o kvalifikaci **Montér dobíjecích stanic (26-036-H).** Zde se ukazuje unikátní vzdělávací mechanismus: pokud uchazeč není držitelem elektrotechnické kvalifikace (§ 6), musí autorizovaná osoba provést **povinné proškolení a přezkoušení dle § 9 nařízení vlády č. 194/2022 Sb.** ještě před zahájením samotné zkoušky.

V této oblasti je diagnostika závad v komunikaci mezi vozidlem a stanicí a pravidelná **profylaktická kontrola** stejně důležitá jako samotná mechanická montáž. Cílem je zajistit, aby dobíjecí infrastruktura byla bezpečným článkem širší energetické sítě.



Obr. 2: Schéma kompetencí projektanta fotovoltaických systémů včetně technických a bezpečnostních požadavků.

Závěr: Cesta ke skutečné profesionalitě

Kvalitní projekt obnovitelných zdrojů nestojí na technologiích, ale na pevných základech vzdělání a certifikace. V energetice je „levná odbornost“ největším rizikem, které se v dlouhodobém horizontu nevyhnutelně prodraží.

Skutečná profesionalita oboru je dnes přímo závislá na přísnosti Autorizovaných osob (AOs), které musí kompetence ověřovat na moderních „polygonech“ – cvičných zařízeních simulujících reálné podmínky. Jen důsledné vyžadování standardů zajistí, že český solární boom bude postaven na pevných základech bezpečnosti a kvality.

Poděkování

Tato práce byla podporovaná grantem Brno University of Technology No. FEKT-S-23-8286 a vznikla za podpory Fakulty vojenských technologií., Univerzity obrany a České Fotovoltaické Asociace.

Literatura

[1] Ministry of Industry and Trade: Qualification Standard 26-014-H (Photovoltaic Systems Installer), NSK, 2025
[2] Ministry of Industry and Trade: Qualification Standard 26-036-H (EV Charging Station Installer), NSK, 2022
[3] Maule, P.: Profesním vzděláním ke kvalitě: Profesní kvalifikace Projektant fotovoltaických systémů, ČFA, 2021, 1-22
[4] Government of the Czech Republic: Decree No. 194/2022 Sb. on Professional Competence in Electrical Engineering, Sbírka zákonů, 2022
[5] ČSN 33 2000-7-712: Low-voltage electrical installations - Solar photovoltaic (PV) power supply systems, Czech Standards Institute, 2016

BATERIE A TEPLO: TEPELNĚ AKTIVOVANÁ BATERIE

P. Vanýsek

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie, Technická 3058/10, Královo Pole, 61600, Brno, Česká republika

Abstract

Thermal batteries are a specific class of primary power sources, which use molten salt as an electrolyte. Their fundamental property is that at room temperature they are inactive; they do not produce any energy, but at the same time they do not undergo any self-discharge. Activation occurs only after heating and meting the electrolyte. This is typically done by chemical thermal expansion. In introduction, schemes for heating the electrolyte are explained. Then, various chemistries and arrangements are described on the backdrop of historical and current uses.

Úvod

Termální baterie představují specifickou skupinu prim8rn9ch elektrochemických zdrojů elektrické energie, které se od běžných baterií zásadně liší jak svým principem aktivace tak provozu. Zatímco konvenční galvanické články pracují při pokojových teplotách a jsou vždy ve stavu připraveném k okamžitému použití, termální baterie zůstávají po většinu své životnosti v neaktivním stavu. Aktivují se až v okamžiku potřeby, a to pomocí pyrotechnického podnětu, který zahřeje pevný elektrolyt na teplotu, při níž se stává vodivým.

Tento příspěvek si klade za cíl přiblížit nejen samotný princip a konstrukci termálních baterií, ale také širší kontext jejich aktivace – tedy základy pyrotechniky, výbušnin a třaskavin. Tyto oblasti jsou pro pochopení funkce termálních baterií klíčové, přestože mnoho posluchačů s nimi má jen omezené zkušenosti.

Základy pyrotechniky, výbušnin a třaskavin

Pyrotechnika je obor zabývající se řízeným využitím chemických reakcí, při nichž dochází k rychlému uvolnění energie ve formě tepla, světla, plynných produktů či mechanické práce. Zahrnuje široké spektrum aplikací od zábavní pyrotechniky přes iniciační systémy až po vojenské a průmyslové využití.

Z chemického hlediska lze energetické materiály rozdělit na výbušniny, třaskaviny a pyrotechnické složе. Výbušniny jsou látky nebo směsi schopné velmi rychlé exotermní reakce, při níž dochází k prudkému uvolnění energie a tvorbě plynů. Reakce může probíhat buď jako deflagrace (rychlé hoření), nebo detonace (reakce šířící se rázovou vlnou). Deflagrace je typ technického spalování nebo výbuchu, který se šíří nezreagovaným materiálem podzvukovou rychlostí. Na rozdíl od detonace, kde se šíří rázová vlna nadzvukově, deflagrace spaluje materiál přenosem tepla a molekulární difúzí (horké spaliny zapalují další vrstvu). Typická rychlost šíření je od několika milimetrů za sekundu až po stovky metrů za sekundu. Detonace je na rozdíl od přenosu tepla při deflagraci řízena rázovou vlnou, která stlačuje, zahřívá a zapaluje výbušnou směs před sebou. Rychlost šíření detonační vlny se obvykle pohybuje v rozmezí 1500 až 9000 m/s, tedy rychlostí nadzvukovou (rychlost šíření zvuku asi 340 m/s při pokojové teplotě). Z toho důvodu je tedy detonace na rozdíl od deflagrace provázena typickým sonickým třeskem.

Třaskaviny jsou zvlášť citlivé výbušniny, které se používají jako iniciační náplně v rozbuškách méně citlivých trhavin. Jsou schopny detonace při velmi malém podnětu (mechanickém, tepelném či elektrickém). Rychlost šíření detonační vlny může být až nad 10000 m/s. Ničivý účinek výbušniny a třaskaviny na krátkou vzdálenost je díky drtivému účinku (brizanci). Změna tlaku na materiál je tak rychlá, že nestačí pružit a drtí se. Na delší vzdálenosti pak dochází k odhazování materiálu, trhání. Efekt je v krátkosti trvání, tedy ve výkonu, nikoliv v celkové dodané energii. Jeden kilogram TNT má energii asi 4,2 MJ, vosková svíčka o stejné váze 46 MJ.

Pro aktivaci termálních baterií se používají pyrotechnické složе, což jsou směsi paliva a oxidačního činidla, které hoří řízenou rychlostí bez detonace. Ty po iniciaci generují dostatečné množství tepla k roztavení elektrolytu. Klíčovým požadavkem je zde stabilita při skladování a zároveň spolehlivá a rychlá aktivace. Je také důležité, aby při hoření vznikalo co možná nejmenší množství plynu, což potlačí mechanické jevy (trhání, tříště), pro tepelnou baterii nevhodné [1]. Termity jsou pyrotechnické práškové směsi méně ušlechtilého kovu (kupř. hliníku) a oxidu kovů, které po zapálení hoří extrémně vysokou teplotou [2]. Je to jeden z příkladu materiálu, které se hodí pro ohřev termálních baterií.

47. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Princip termálních baterií

Termální baterie jsou elektrochemické články, jejichž elektrolyt je za běžných podmínek v pevném, nevodivém stavu. Typicky se jedná o anorganické soli (například chloridy nebo fluoridy alkalických kovů), které se po zahřátí nad určitou teplotu (obvykle 300–600 °C) roztaví a stanou se iontově vodivými. Po aktivaci probíhá v baterii klasická elektrochemická reakce mezi anodou a katodou. Anoda bývá tvořena kovem s nízkým elektrochemickým potenciálem (např. lithium nebo slitiny lithia). Katoda obsahuje oxid kovu (např. FeS_2, CoS_2 apod.). Elektrolyt je směs solí, která po roztavení umožňuje transport iontů. Výhodou tohoto systému je, že v neaktivním stavu prakticky neprobíhají žádné degradační procesy. Termální baterie tak mohou být skladovány i desítky let bez významné ztráty funkčnosti [3].

První termální baterie

Uvádí se, že první baterie tohoto typu vyvinul německý vědec Georg Otto Erb za druhé světové války pro použití v raketě V2. Vzhledem utajení tohoto výzkumu neexistuje citovatelná publikace a v dostupné literatuře o elektrických zdrojích ve V2 se hovoří pouze o nikl kadmiových bateriích. Nicméně, další vývoj těchto baterií byl po druhé světové válce převzat Spojenými státy. Dostala se tak to do detonátorů atomových zbraní a do raket Tomahawk. Během šedesátých let se výzkum dostal do akademické sféry jako koncept akumulátoru s roztaveným elektrolytem, používající sodík, relativně laciný a dostupný, jako aktivní materiál. Potřeba vysoké teploty (245 - 350 °C) a nutnost objemné tepelné izolace činila tyto návrhy nepraktické.

Ca/WO_3 a Mg/WO_3 systémy byly používány v raných aplikacích, ale vhledem k jejich vojenskému použití není dostupná literatura. Později se začal používat systém $Ca/CaCrO_4$ s eutektikem elektrolytů LiCl-KCl (600 °C)

Základní anodová reakce je $Ca + 2\ Li + \rightarrow CaLi_2 + Ca^{2+}$

Katodová reakce $CrO_4^{2-} + e^- \rightarrow CrO_4^{3-}$

Konstrukce a aktivace

Typická termální baterie se skládá z několika vrstev (článků), které jsou uspořádány do sendvičové struktury. Každý článek obsahuje anodu, katodu a separátor napuštěný elektrolytem. Mezi články jsou umístěny pyrotechnické vrstvy, které slouží jako zdroj tepla. Aktivace probíhá následovně: Iniciační impuls (mechanický, elektrický) odpálí iniciační složku. Ta zapálí pyrotechnickou směs. Pyrotechnická reakce generuje teplo, které se rychle šíří baterií. Elektrolyt se roztaví a stane se vodivým. Baterie začne dodávat elektrickou energii. Celý proces aktivace trvá typicky desítky milisekund až několik sekund.

V principu je hlavní odlišnost od jiných baterií přítomnost pyrotechnické směsi k ohřevu a tavení elektrolytu. V prvních bateriích byl použit současně pro ohřev a jako elektrochemicky aktivní materiál chroman draselný ($KCrO_4$) s železným prachem. Zjevnou výhodou je jednodušší systém, nevýhodou je tvorba reakčních produktů v elektrolytu, což snižuje jeho vodivost. Proto se poměrně brzy přešlo na neelektrochemické pyrotechnické složky. Ta však vyžadovalo vložit další komponentu do článku, t.zv. pyrotechnický topný papír, tvořený kupříkladu směsí $BaCrO_4$ a práškového zirkonia, spojenou keramickými vlákny a lisovanou do podoby papíru [4] [5].

Pyrochemie

Pyrotechnické složky v termálních bateriích se obvykle skládají z oxidovadla a paliva, podobně jako klasické pyrotechnické směsi. Nejčastěji se používají jako oxidovadla oxidy (Fe_2O_3, Fe_3O_4), chromany nebo dusičnany, jemně práškové kovy, typicky železo, hliník nebo zirkonium. Zirkonium má v této oblasti výjimečné postavení díky své schopnosti snadno reagovat s širokou škálou oxidovadel a generovat vysoké množství tepla při relativně spolehlivé iniciaci. Kromě čistých kovů se mohou uplatňovat i pokročilejší materiály, například intermetalické směsi nebo kompozitní prášky, které umožňují optimalizaci reakční kinetiky a homogenity. Tyto látky se vyznačují vysokou chemickou i tepelnou stabilitou a nízkou hygroskopičností, což je činí vhodnými pro dlouhodobě skladovatelné systémy. Přísady slouží jako pojiva či stabilizátory pro mechanickou pevnost a kontrolu reakce. Velmi rozšířenou variantou je tzv. termitová směs [2] (např. Fe_2O_3 + Al), která při reakci uvolňuje velké množství tepla.

Z hlediska silnějších oxidačních činidel se uplatňují také dusičnany, chlorečnany a zejména chloristany. Dusičnany, jako je dusičnan draselný nebo barnatý, se vyznačují nižší reaktivitou a teplotou reakce, a proto mají spíše doplňkový nebo historický význam. Chlorečnany, například chlorečnan draselný, poskytují vysoký obsah kyslíku a značnou reaktivitu, avšak jejich vyšší citlivost na náraz a tření omezuje jejich praktické využití v moderních konstrukcích. Naproti tomu chloristany, zejména chloristan draselný, sodný nebo amonný,

představují důležitou skupinu oxidovadel díky kombinaci vysoké oxidační schopnosti, relativní stability a nižší citlivosti ve srovnání s chlorečnany. Tyto vlastnosti je předurčují k využití především v zapalovacích a iniciačních složích.

Palivovou složku tvoří převážně jemně práškové kovy, mezi nimiž dominují hliník, hořčík, titan a zejména zirkonium. Zirkonium má v této oblasti výjimečné postavení díky své schopnosti snadno reagovat s širokou škálou oxidovadel a generovat vysoké množství tepla při relativně spolehlivé iniciaci. Kromě čistých kovů se mohou uplatňovat i pokročilejší materiály, například intermetalické směsi nebo kompozitní prášky, které umožňují optimalizaci reakční kinetiky a homogenity.

V konstrukci termální baterie se obvykle neuplatňuje pouze jedna pyrotechnická složka, ale systém několika vrstev s odlišnou funkcí. Zapalovací složka (igniter) je navržena tak, aby se snadno iniciovala a spolehlivě zapálila následující vrstvy; často obsahuje kombinace zirkonia s chloristany nebo chromany. Na ni navazuje přechodová vrstva, která zajišťuje stabilní přenos reakce, a konečně hlavní tepelná složka, tvořená méně citlivými, ale energeticky vydatnými směsmi, typicky na bázi oxidů kovů a hliníku. Tato hierarchická struktura umožňuje přesně řídit průběh reakce a zajistit rovnoměrné zahřátí elektrolytu.

Současný vývoj v oblasti pyrotechnických složí pro termální baterie směřuje především k nahrazování toxických nebo citlivějších komponent, zejména chromanů a chlorečnanů, bezpečnějšími alternativami. Důraz je kladen také na optimalizaci mikrostruktury směsí, která ovlivňuje rychlost reakce, přenos tepla a celkovou spolehlivost systému. Výsledkem jsou vysoce stabilní a výkonné zdroje energie schopné dlouhodobého skladování a okamžité aktivace v náročných podmínkách.

Shrnutí výsledků

Termální baterie představují zajímavé propojení elektrochemie a pyrotechniky. Jejich unikátní vlastnosti vycházejí právě z kombinace těchto dvou oblastí – stabilní chemický systém, který je aktivován řízenou energetickou reakcí. Porozumění základům pyrotechniky a energetických materiálů je proto nezbytné pro pochopení jejich funkce i konstrukce. Navzdory své relativně úzké specializaci hrají termální baterie klíčovou roli v aplikacích, kde selhání není přípustné. Jejich význam proto zůstává i v současnosti vysoký a další vývoj směřuje ke zvýšení energetické hustoty, bezpečnosti a miniaturizace. Termální baterie se používají především tam, kde je vyžadován spolehlivý zdroj energie po dlouhé době skladování a okamžité aktivaci. Typické aplikace zahrnují vojenské systémy (např. řízené střely), záchranné a nouzové systémy, kosmické technologie a speciální průmyslové aplikace.

Poděkování

Publikace vznikla za finanční podpory projektu specifického výzkumu na VUT (projekt č. FEKT-S-26-8946).

Literatura

[1] Koch, E.-C., Defence Technology, 15, 254 (2019).
[2] Leventis, N., Donthula, S., Mandal, C., Ding, M. S. and Sotiriou-Leventis, C., Chemistry of Materials., 27, 8126 (2015).
[3] Masset, P. J., Chapter 3.7 - Thermally Activated Batteries, in Treatise on Process Metallurgy, S. Seetharaman, et al., Editors. 2025, Elsevier. p. 643.
[4] Guidotti, R. A., Thermal batteries: A technology review and future directions. 1995, Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States): United States.
[5] Guidotti, R. and Preston, S., Electrode Fabrication Processes for Thermal Batteries, in 5th International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC).

Generální partneři:





Hlavní partneři:











Partneři:







Centrum výzkumu a využití
obnovitelných zdrojů
energie

Odborní partneři:





Mediální partneři konference:









Druh:	Neperiodická účelová publikace
Název:	47. Nekonvenční zdroje elektrické energie
Místo konání:	Wellness hotel Horal - Velké Karlovice
Vydavatel:	Česká elektrotechnická společnost, ÚOS chemické zdroje elektrické energie
Zodpovědný editor:	Ing. Ladislav Chladil, Ph.D. doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
ISBN:	978-80-02-03119-2
Stran:	76
Výtisků:	dostupné on-line
Web pro zveřejnění:	http://www.nzee.cz
Formát:	A4
Měsíc a rok vydání:	červen 2026
Vydání:	první

