

Analýza problematiky zariadení na uskladnenie elektriny a ich vplyvu na prevádzku a rozvoj distribučnej sústavy

Bc. Radovan Šikuda¹, Ing. Jakub Zárecký², Peter Chmela², Ing. Peter Burian²

¹ Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky, FEI STU v Bratislave

² Západoslovenská distribučná, a.s.

xsikuda@stuba.sk

Abstrakt – Táto práca sa zaoberá integráciou zariadení na uskladňovanie elektriny (ZUE), predovšetkým batériových systémov (BESS), do distribučných sústav. Špecifikom týchto zariadení je dvojrežimová prevádzka, počas nabíjania pôsobia ako odberné zariadenia a počas vybíjania ako zdroje elektrickej energie. Práca analyzuje vplyv tejto charakteristiky na rezervovanú kapacitu (MRK) pripojenia, hodnotí rôzne prevádzkové scenáre a skúma dopady na stabilitu, bezpečnosť a rozvoj distribučnej siete. Porovnanie štúdií pripojiteľnosti s ohľadom a bez ohľadu na nabíjanie ZUE ukazuje, ako správne riadené batériové úložiská môžu zvýšiť flexibilitu a efektívnosť prevádzky distribučnej sústavy. Zároveň hodnotíme vplyv prevádzkových režimov na zaťaženie prvkov v okolí pripojenia ZUE. Práca zahŕňa aj analýzu reálneho batériového úložiska na VN úrovni.

1 Úvod

Zariadenia na uskladnenie elektriny (ZUE), najmä batériové systémy (BESS), sa v súčasnosti stávajú kľúčovým prvkom modernej elektroenergetiky. Ich prínos spočíva v schopnosti flexibilného riadenia tokov energie, poskytovania regulačných služieb a zvyšovania stability elektrizačnej sústavy. V distribučných sústavách majú ZUE špecifické postavenie, keďže ich prevádzka je dvojrežimová a teda v čase nabíjania pôsobia ako zariadenie odberu, zatiaľ čo počas vybíjania sa menia na zariadenie výroby.

Táto dvojité prevádzková funkcia zásadne ovplyvňuje proces pripájania ZUE do distribučných sústav, spôsob určovania výkonových parametrov a hodnotenie dopadov na prevádzku sústavy. Zásadnou otázkou je, ako sa tieto zariadenia správajú pri rôznych prevádzkových scenároch a aké dôsledky z toho vyplývajú pre distribučné spoločnosti. Téma práce sa zameriava na problematiku pripájania zariadení na uskladňovanie elektriny do distribučných sústav z legislatívneho aj technického hľadiska. Pozornosť je venovaná najmä špecifikám vyplývajúcim z dvojrežimovej prevádzky týchto zariadení, teda z ich schopnosti odoberať aj dodávať elektrickú energiu do siete. Táto vlastnosť má významný vplyv na určovanie výkonových parametrov pripojenia, predovšetkým maximálnej rezervovanej kapacity (MRK).

Cieľom práce je analyzovať vplyv zariadení na uskladnenie elektriny na prevádzku distribučnej sústavy a posúdiť ich dopady na určovanie maximálnej rezervovanej

kapacity v bode pripojenia. Súčasťou riešenia je porovnanie štúdií pripojiteľnosti pri zohľadnení a nezohľadnení nabíjania batériového úložiska a vyhodnotenie vplyvu jednotlivých prevádzkových scenárov na prevádzku, stabilitu a ďalší rozvoj distribučnej sústavy. Zároveň poukazujeme na to, ako jednotlivé prevádzkové režimy vplyvajú na zaťaženie prvkov v okolí pripojenia ZUE. Nakoniec uvedieme príklad reálneho ZUE pripojeného do VN siete a priblížime jej správanie pri prepínaní medzi prevádzkovými režimami.

2 Legislatívno-regulačný rámec pripájania ZUE

Pripájanie energetických zariadení do distribučnej sústavy je upravené kombináciou európskej legislatívy, národných zákonov a technických podmienok prevádzkovateľov distribučných sústav.

2.1 Európsky legislatívny rámec

Smernica Európskeho parlamentu a Rady (EÚ) 2019/944 a Nariadenie (EÚ) 2019/943 definujú ZUE ako zariadenia umožňujúce odber aj dodávku elektriny, čo im v energetickom systéme dáva štatút hybridných zariadení. Európska legislatíva zároveň zdôrazňuje integráciu flexibility a aktívne riadenie distribučných sústav, čo vytvára priestor pre širšie zapojenie ZUE [1].

2.2 Národný legislatívny rámec

V slovenskej legislatívnej praxi sa pripojenie zariadení na výrobu alebo akumuláciu elektriny opiera najmä o zákon č. 251/2012 Z. z. o energetike a zákon 259/2025 Z. z., ktorý ho dopĺňa. Tento zákon stanovuje základné pravidlá pripojenia zariadení do distribučnej sústavy, definuje účastníkov trhu s elektrinou a určuje povinnosti prevádzkovateľov distribučných sústav [2].

Na zákonnú úpravu nadväzujú vykonávacie predpisy a regulačné rozhodnutia vydávané orgánom Úrad pre reguláciu sieťových odvetví (ÚRSO), ktoré upravujú najmä pravidlá trhu s elektrinou, kvalitu dodávky a technické podmienky pripojenia [3].

Praktické technické požiadavky na pripojenie zariadení sú ďalej konkretizované v dokumentoch jednotlivých prevádzkovateľov distribučných sústav, ako napríklad

spoločnosť Západoslovenská distribučná, a.s., ktorá vo svojich technických podmienkach pripojenia určuje konkrétne požiadavky na zariadenia pripojené do siete [4].

Z uvedeného legislatívno-technického rámca vyplýva, že každé zariadenie schopné dodávať elektrický výkon do siete je posudzované ako zdroj elektriny, zatiaľ čo zariadenie schopné odoberať výkon je posudzované ako odberné zariadenie. Zariadenia umožňujúce oba režimy prevádzky tak z pohľadu distribučnej sústavy vystupujú ako dvojité entita, teda ako výrobca aj odberateľ [4].

3 Technické vlastnosti ZUE z hľadiska distribučných sústav

Zariadenia na uskladňovanie elektriny (ZUE) predstavujú významný nástroj na zvyšovanie flexibility a spoľahlivosti moderných distribučných sústav. Ich význam rastie najmä v súvislosti s narastajúcim podielom distribuovaných energetických zdrojov, predovšetkým fotovoltických a veterných elektrární, ktorých výroba je charakteristická vysokou mierou variability a neistoty. Distribučné sústavy preto čelia novým prevádzkovým výzvam súvisiacim so zabezpečením rovnováhy medzi výrobou a spotrebou elektriny. Batériové úložiská umožňujú túto nerovnováhu vyrovnávať tým, že dokážu v krátkom čase reagovať na zmeny v systéme a ukladať prebytočnú energiu alebo ju naopak dodávať späť do siete [5].

Z technického hľadiska sa batériové úložiská vyznačujú vysokou dynamikou regulácie výkonu a veľmi krátkym časom odozvy, ktorý môže dosahovať rádovo milisekundy. Vďaka týmto vlastnostiam môžu poskytovať rôzne podporné služby v elektrizačnej sústave, napríklad reguláciu frekvencie, vyrovnávanie špičiek zaťaženia (peak shaving), časový posun dodávky energie (energy arbitrage) alebo stabilizáciu výkonu obnoviteľných zdrojov energie. Okrem toho môžu pomáhať pri riadení rýchlosti zmeny toku výkonu zdrojov, znižovaní preťaženia prvkov distribučnej siete a zlepšovaní kvality dodávky elektriny [5].

Dôležitou vlastnosťou batériových úložísk je ich schopnosť pracovať v rôznych prevádzkových režimoch v závislosti od aktuálnych potrieb siete. Ich využitie v distribučných sústavách zahŕňa napríklad riadenie zaťaženia distribučných transformátorov, zabezpečenie záložného napájania pre kritické odbory, vyrovnávanie výroby z lokálnych obnoviteľných zdrojov alebo optimalizáciu nákupu elektriny v závislosti od časovo diferencovaných taríf. Pri návrhu a implementácii týchto systémov je však potrebné zohľadniť technické parametre batérií, ako sú maximálna hĺbka vybitia, účinnosť cyklu nabíjania a vybíjania, prevádzkové okno stavu nabitia (State of Charge – SoC) a obmedzenia rýchlosti nabíjania a vybíjania. Tieto faktory významne ovplyvňujú nielen technickú životnosť úložiska, ale aj jeho optimálne začlenenie do prevádzky distribučnej sústavy [5].

3.1 Dvoježimová prevádzka

V režime nabíjania batériové úložisko odoberá elektrickú energiu zo siete alebo z lokálne pripojených zdrojov. V tomto prípade sa zariadenie z pohľadu distribučnej sústavy správa ako odberné zariadenie, ktoré zvyšuje celkový odber výkonu v danom uzle siete. Naopak v režime vybíjania dochádza k

dodávke elektrickej energie z úložiska späť do siete alebo k pokrytiu spotreby lokálneho odberu, pričom zariadenie vystupuje ako zdroj elektrickej energie [6].

Riadenie týchto parametrov zabezpečuje systém správy batérie (BMS), ktorý monitoruje a kontroluje prevádzkové podmienky jednotlivých batériových článkov. BMS zabezpečuje ochranu batérie pred nadmerným nabitím alebo hlbokým vybitím, optimalizuje prevádzkové režimy a prispieva k predĺženiu životnosti batériového systému. Správne riadenie dvoježimovej prevádzky je preto nevyhnutné nielen z hľadiska bezpečnosti a spoľahlivosti zariadenia, ale aj z pohľadu jeho efektívnej integrácie do distribučnej sústavy [6].

Dvoježimový charakter batériových úložísk zároveň predstavuje špecifickú výzvu z pohľadu plánovania a prevádzky distribučnej sústavy. Keďže zariadenie môže v rôznych časových intervaloch vystupovať ako zdroj alebo ako odberné miesto, je potrebné pri jeho pripojení zohľadniť oba režimy prevádzky a ich vplyv na prevádzkové parametre distribučnej siete, ako sú prúdové zaťaženie vedení, napäťové pomery alebo maximálna rezervovaná kapacita pripojenia [6].

4 Maximálna rezervovaná kapacita (MRK) a jej špecifiká pri ZUE

Pri posudzovaní možnosti pripojenia nových zariadení do distribučnej sústavy je jedným z kľúčových parametrov maximálna rezervovaná kapacita (MRK). Tento parameter vyjadruje maximálny výkon, ktorý môže byť v danom bode distribučnej sústavy bezpečne prenášaný bez porušenia technických alebo prevádzkových limitov siete, pričom ide o maximálnu úroveň výkonu nových zariadení, ktorú je možné pripojiť do siete bez potreby jej zásadnej rekonštrukcie alebo posilnenia [7].

Stanovenie maximálnej dostupnej kapacity distribučnej siete je komplexný proces, ktorý zahŕňa analýzu viacerých technických obmedzení elektrizačnej sústavy. Medzi najvýznamnejšie patrí predovšetkým prúdové zaťaženie vedení a transformátorov, napäťové pomery v jednotlivých uzloch siete, ako aj straty elektrickej energie v distribučnej sústave. Pri prekročení týchto limitov môže dôjsť k zhoršeniu kvality dodávky elektriny, preťaženiu sieťových prvkov alebo k porušeniu prevádzkových pravidiel elektrizačnej sústavy. Z tohto dôvodu je pri pripájaní nových zdrojov alebo odberných zariadení nevyhnutné vykonať analýzu maximálnej dostupnej kapacity siete, ktorá umožňuje identifikovať limity jej bezpečnej prevádzky [7, 8].

Rastúci počet distribuovaných zdrojov energie, najmä fotovoltických elektrární, ako aj nových typov spotrebičov, napríklad nabíjacích staníc pre elektromobily, výrazne mení charakter zaťaženia distribučných sústav. Tieto zariadenia spôsobujú dynamické zmeny tokov výkonu v sieti a môžu viesť k situáciám, keď sú niektoré časti distribučnej sústavy vystavené zvýšenému zaťaženiu alebo napäťovým odchýlkam. Z tohto dôvodu je pri plánovaní rozvoja distribučnej sústavy čoraz častejšie využívaný koncept maximálnej dostupnej kapacity, ktorý umožňuje systematicky hodnotiť možnosti integrácie nových zariadení do existujúcej infraštruktúry [7, 8].

V prípade ZUE je posudzovanie maximálnej rezervovanej kapacity špecifické najmä v dôsledku ich dvoježimovej prevádzky. ZUE totiž môžu v rôznych časových intervaloch

vystupovať ako zdroj alebo ako odberné zariadenie, čo znamená, že ich vplyv na distribučnú sústavu závisí od aktuálneho prevádzkového režimu. Pri analýze pripojiteľnosti je preto potrebné zohľadniť oba smery toku výkonu, teda nielen dodávku energie do siete počas vybíjania, ale aj odber energie počas nabíjania batériového úložiska [8].

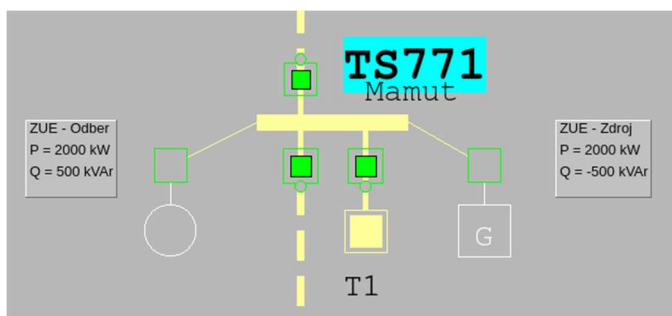
Táto skutočnosť môže viesť k odlišným výsledkom pri určovaní maximálnej rezervovanej kapacity v porovnaní s tradičnými zdrojmi alebo odbernými zariadeniami. Zatiaľ čo klasické výrobné zdroje zvyšujú tok výkonu smerom do distribučnej sústavy, batériové úložiská môžu v určitých časových intervaloch zvyšovať aj lokálny odber. Preto je pri hodnotení ich vplyvu na distribučnú sústavu potrebné analyzovať rôzne prevádzkové scenáre, ktoré zohľadňujú časovú variabilitu nabíjania a vybíjania úložiska [7, 8].

5 Štúdie pripojiteľnosti pre ZUE

V tejto kapitole sa realizujú štúdie pripojiteľnosti ZUE, ktorá bude navrhnutá pre jedno transformátorovú stanicu TS 771 nachádzajúcu sa v mestskej časti Staré Mesto v Bratislave. Trafostanica je napojená z VN linky číslo V444. Stanica disponuje transformátorom s menovitým výkonom 630 kVA. Cieľom štúdií je posúdiť vplyv pripojenia ZUE v danom bode distribučnej sústavy a analyzovať prevádzkové dopady jej dvojrežimovej prevádzky na transformátor a súvisiacu sieť.

Na tento účel bol v softvérovom prostredí SCADA vytvorený upravený model existujúcej stanice. Do uzla na strane vysokého napätia (VN zbernica) je v modeli pripojená fotovoltaická elektrárňa s inštalovaným výkonom 2 MW a účinníkom -0,97. Do toho istého uzla je zároveň pripojený aj odber o rovnakej veľkosti 2 MW.

Takto zvolená konfigurácia umožňuje vytvoriť stav, v ktorom sa výkon zo simulovanej výroby okamžite spotrebúva, čím sa celková energetická bilancia uzla približuje správaniu akumulačného systému. Fotovoltaika v modeli plní funkciu zdroja, zatiaľ čo odber vystupuje ako umelá záťaž imitujúca „nabíjanie baterky“. Tento prístup zabezpečuje stabilné prevádzkové podmienky pre analýzu a umožňuje jednoznačne identifikovať vplyvy tokov výkonu na transformátor a jednotlivé prvky siete.

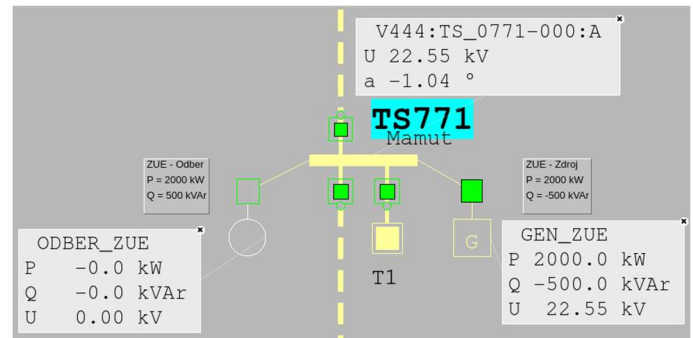


Obr. 1 Simulačný model stanice zo softvéru SCADA

5.1 Bez uvažovania nabíjania ZUE

Prvým posudzovaným scenárom v rámci štúdie pripojiteľnosti bol vplyv zmeny napätia pri prevádzke ZUE v

čisto výrobnom režime, teda v situácii, keď zariadenie dodáva energiu do siete a jeho nabíjanie sa neuvažuje.



Obr. 2 Model bez uvažovania nabíjania ZUE

Porovnali sme výsledky pre dva stavy, bez zohľadnenia dodávky a odberu zo ZUE a so zohľadnením jej dodávky. Na základe tohto porovnania sme určili, aký vplyv má batéria ako zdroj na prislúchajúcu sieť a jej jednotlivé uzly. Zo systému SCADA sme získali hodnoty zmien napätia v okolitých uzloch, ktoré sú znázornené na obrázku nižšie.

Meno prvku	Typ	Súhl.	PA[MW]	PB[MW]	UA[kV]	UB[kV]	IdU/Un[%]
GEN_ZUE	gen	⊗	2.00	0.00	22.55	0.00	102.493
V427:TS_091...	trf	⊗	0.06	0.06	22.53	22.55	0.073
V427:TS_034...	trf	⊗	0.04	0.04	22.53	22.55	0.073
V427:TS_156...	trf	⊗	0.06	0.06	22.54	22.55	0.073
V427:TS_036...	sbus	⊗	0.00	0.00	22.54	22.55	0.073
V427:TS_034...	sbus	⊗	0.00	0.00	22.53	22.55	0.073
V427:TS_097...	trf	⊗	0.06	0.06	22.54	22.55	0.073
V427:TS_156...	sbus	⊗	0.00	0.00	22.54	22.55	0.073
V427:TS_097...	sbus	⊗	0.00	0.00	22.54	22.55	0.073
V427:TS_036...	trf	⊗	0.06	0.06	22.54	22.55	0.073
V427:TS_034...	trf	⊗	0.04	0.04	22.53	22.55	0.073
V427:TS_091...	sbus	⊗	0.00	0.00	22.53	22.55	0.073
V427:TS_091...	trf	⊗	0.06	0.06	22.53	22.55	0.073
V427:TS_036...	trf	⊗	0.06	0.06	22.54	22.55	0.073

Obr. 3 Zmeny napätia na okolité uzly v sieti bez napájania ZUE

Z obrázka je možné vidieť, že pripojenie ZUE vyvolalo väčšiu zmenu napätia na inej VN linke ako bolo pripojené. Je to spôsobené zmenou toku výkonu v rozvodni. Batériový systém (BESS) pri účinníku -0,97 dodáva do siete okrem činného výkonu aj jalový výkon, ktorý lokálne zvyšuje napätie v mieste pripojenia a zároveň znižuje potreby dodávky jalového výkonu zo strany transformátora v rozvodni VVN/VN. V dôsledku toho klesá prúd pretekajúci vetvou vedení napájaných z vedenia V444, čo vedie k zníženiu napätíových úbytkov.

Naopak, vývod V427, na ktorom nie je pripojený žiadny zdroj ani kompenzačný prvok, zostáva napájaný výhradne zo strany transformátora VVN/VN. Jeho zaťaženie sa po pripojení ZUE ako odberného zariadenia nemení, a preto pretrváva pôvodná úroveň prúdov aj úbytkov napätia. Keďže vedenia v tejto vetve majú menšie prierezy a vyššiu impedanciu, je napätie na vývode V427 výrazne citlivejšie na akúkoľvek zmenu napätíových pomerov v zberni.

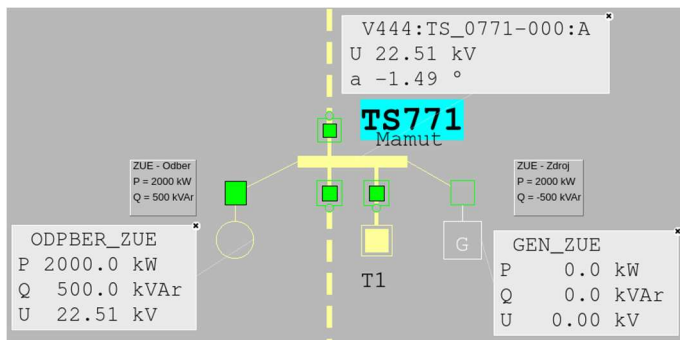
Výsledkom je, že po pripojení ZUE ako odberného zariadenia sa napätie na vývode V444 mení minimálne, čo je spôsobené kombináciou nižšieho zaťaženia vedení a dodávky kapacitného jalového výkonu.

Tab. 1 Vplyv pripojenia ZUE na zaťaženie vývodu vedenia

Prvok	ZUE ako zdroj	Bez pripojenia ZUE
Vedenie V444	8,63%	25,08 %
Vedenie V427	10,93 %	10,93 %

5.2 S uvažovaním nabíjania ZUE

Druhým scenárom v rámci štúdie pripojiteľnosti bol vplyv zmeny napätia pri prevádzke ZUE v režime spotreby, teda v situácii, kedy je ZUE v režime nabíjania a následne sa prepne do režimu dodávky ako zdroj.



Obr. 4 Model s uvažovaním nabíjania ZUE

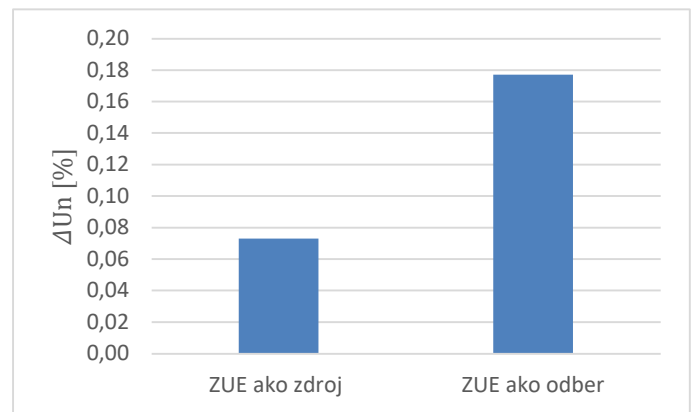
V tomto prípade sme porovnávali výsledky pre stav, keď batéria vystupuje ako odber v režime nabíjania, a stav, keď je nabitá alebo sa prepne do režimu dodávky, teda správa sa ako zdroj.

Meno prvku	Typ	Súhl.	PA[MW]	PB[MW]	UA[kV]	UB[kV]	dU/Un [%]
GEN_ZUE	gen	✗	2.00	0.00	22.55	0.00	102.493
ODBER_ZUE	load	✗	0.00	2.00	0.00	22.51	102.317
V444:TS_043...	trf	✗	0.24	0.24	22.52	22.48	0.177
V444:TS_043...	sbus	✗	0.00	0.00	22.52	22.48	0.177
V444:TS_043...	trf	✗	0.15	0.15	22.52	22.48	0.177
V444:TS_115...	trf	✗	0.10	0.10	22.52	22.48	0.177
V444:TS_115...	sbus	✗	0.00	0.00	22.52	22.48	0.177
V444:TS_057...	trf	✗	0.10	0.10	22.52	22.48	0.177
V444:TS_057...	trf	✗	0.10	0.10	22.52	22.48	0.177
V444:TS_057...	trf	✗	0.10	0.10	22.52	22.48	0.177
V444:TS_057...	sbus	✗	0.00	0.00	22.52	22.48	0.177
V444:TS_057...	sbus	✗	0.00	0.00	22.52	22.48	0.177
V444:TS_015...	trf	✗	0.06	0.06	22.52	22.48	0.177
V444:TS_015...	sbus	✗	0.00	0.00	22.52	22.48	0.177

Obr. 5 Zmeny napätia na okolité uzly v sieti s napájaním ZUE

5.3 Porovnanie vplyvu prevádzky ZUE na zmeny napätia

Na základe vyššie uvedenej analýzy môžeme vidieť, že režim prevádzky ZUE priamo ovplyvňuje zmeny napätia v okolitej sieti. Z výsledkov je môžeme vidieť, že ZUE pri nabíjaní, má väčší vplyv na zmenu napätie ako pri dodávaní energie nakoľko odoberá prúd zo zbernice, čo zvyšuje úbytok v uzloch a na vedeniach, zatiaľ čo pri dodávaní energie lokálne dodáva časť prúdu do zbernice.



Obr. 6 Zmena napätia v závislosti od režimu prevádzky ZUE

5.4 Porovnanie vplyvu prevádzky ZUE na zaťaženie transformátora a vedenia

V tabuľke nižšie je na základe simulačných výpočtov analyzovaný aj vplyv prevádzky na zaťaženie transformátora VVN/VN a VN/NN a vedenia pred trafostanicou TS771 a za ňou.

Tab. 2 Vplyv prevádzky ZUE na zaťaženie okolitých prvkov

Prvok	ZUE ako zdroj	ZUE ako odber	Bez pripojenia ZUE
Transformátor VVN/NN	26,56 %	36,53 %	31,69 %
Transformátor VN/NN	24,06 %	24,06 %	24,06 %
Vedenie pred TS	3,36 %	27,82 %	15,61 %
Vedenie za TS	14,70 %	14,72 %	14,70 %

Na základe výsledkov simulačných výpočtov môžeme z tabuľky pozorovať rozdielne zaťaženia prvkov v sieti v závislosti od prevádzkového režimu ZUE. Jediné zaťaženie, ktoré je nemenné môžeme pozorovať pri transformátore VN/NN, ktorý je zapojený v nami skúmanej trafostanici TS771. Zaťaženie zostáva nezmenené nakoľko pripájanie ZUE je realizované na zbernici VN v trafostanici a teda nebude meniť zaťaženie transformátora, ktorého zaťaženie sa mení na základe úrovni NN.

Pri transformátore VVN/VN dochádza v režime odberu k zvýšeniu zaťaženia oproti stavu bez ZUE, zatiaľ čo v režime zdroja sa jeho zaťaženie mierne znižuje. Tento rozdiel je spôsobený tým, že pri dodávke energie batéria pokrýva časť potreby výkonu na úrovni VN, čím znižuje odber zo strany vyššej napäťovej hladiny. Výsledkom je aj nižšie zaťaženie vedenia pred trafostanicou TS771, keďže klesá potreba prenášať výkon smerom z nadradenej siete.

V režime spotreby naopak dochádza k nárastu zaťaženia, pretože sieť musí zabezpečiť dodatočný výkon potrebný na nabíjanie ZUE. Rovnaký efekt sa prejavuje aj na vedení pred trafostanicou TS771, ktorého zaťaženie rastie z rovnakého dôvodu ako u transformátora VVN/VN. Vedenie za trafostanicou pritom vykazuje medzi jednotlivými režimami iba minimálne rozdiely, čo potvrdzuje, že jeho prúdové zaťaženie nie je prevádzkou ZUE výrazne ovplyvnené.

Z porovnania vyplýva, že na zmenu prevádzkového režimu ZUE najcitlivejšie reagujú vedenie pred trafostanicou a transformátor VVN/VN, zatiaľ čo transformátor VN/NN a vedenie za TS zostávajú zaťažené takmer identicky vo všetkých sledovaných scenároch.

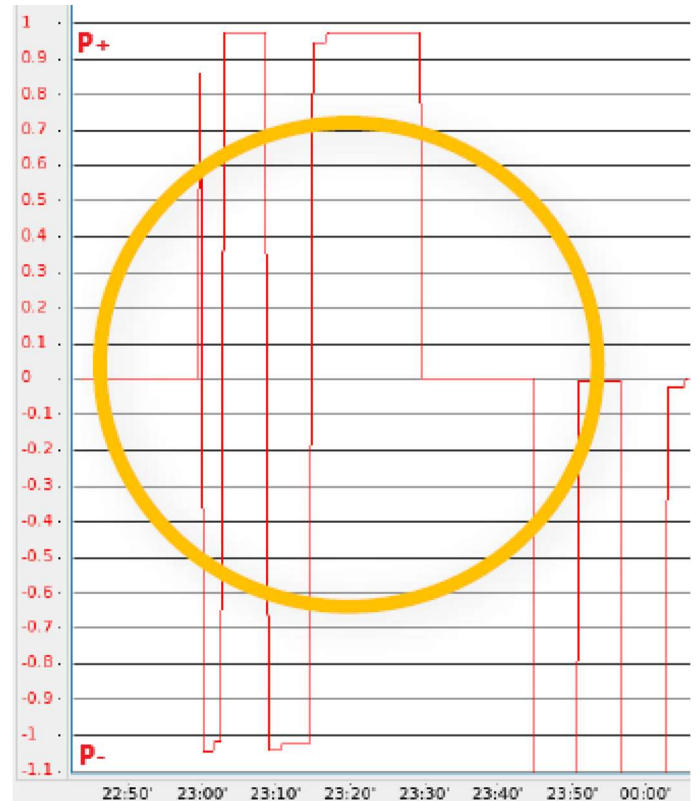
6 Príklad reálne pripojeného ZUE do VN siete

Na základe predchádzajúcej analýzy dvojrežimovej prevádzky ZUE, ktorú sme vykonali formou simulácií, by sme chceli naviazať na konkrétny príklad reálne pripojeného ZUE do VN siete. Chceli by sme poukázať na jeho správanie pri prechode z jedného režimu prevádzky do druhého. Graf priebehu bol získaný zo softvéru Gview, v ktorom sme načítali údaje z inteligentného meracieho systému (IMS). Ten poskytol detailný záznam o priebehu dodávky a spotreby energie ZUE.

Inštalovaný výkon ZUE je 3,861 MW. V prípade režimu prevádzky ZUE ako zdroj je výkon označovaný ako P+ a v režime spotreby je výkon označený ako P-.



Obr. 7 Priebeh ZUE pri dodávke a spotrebe z programu Gview



Obr. 8 Detail priebehu ZUE pri dodávke a spotrebe

Z obrázka môžeme vidieť, že medzi nabíjaním a vybijaním ZUE nemusí byť časové oneskorenie a, teda batéria môže prejsť z jedného režimu do druhého okamžite. Takýto stav je taktiež potrebné zohľadniť pri výpočte štúdií pripojiteľnosti.

7 Záver

V práci sme analyzovali integráciu zariadení na uskladňovanie elektriny (ZUE) do distribučných sústav s dôrazom na ich dvojrežimovú prevádzku. Z analýzy legislatívneho a technického rámca vyplýva, že ZUE sú špecifickým typom hybridného zariadenia, ktoré môže v rôznych časových intervaloch vystupovať ako odberné aj ako výrobné zariadenie, čo zásadne ovplyvňuje parametre pripájania a prevádzku distribučnej sústavy.

Simulačné štúdie pripojiteľnosti pre trafostanicu TS771 ukázali, že režim prevádzky ZUE ovplyvňuje napäťové pomery a zaťaženie jednotlivých prvkov siete, pričom jeho dopad môže byť odlišný na rôznych vývodoch trafostanice. Pri prevádzke ZUE ako zdroj sa zaťaženie vedení a transformátora VVN/VN mierne znižujú, čo vedie k stabilnejšiemu napätiu na vývodoch s baterkou a k odľahčeniu vedení pred trafostanicou. Pri nabíjaní ZUE naopak dochádza k zvýšeniu zaťaženia vo vedeniach a na transformátore VVN/VN, čo spôsobuje vyšší úbytok napätia v uzloch a citlivejšie reagovanie siete na zmenu zaťaženia. Tieto výsledky zdôrazňujú, že ZUE môže pôsobiť ako účinný stabilizačný prvok pre lokálne napätie.

Analýza reálneho batériového úložiska pripojeného na VN sieť potvrdila flexibilitu dvojrežimovej prevádzky. Batéria dokáže okamžite prechádzať medzi režimom odberu a dodávky, čo je dôležité pri plánovaní štúdií pripojiteľnosti a hodnotení

maximálnej rezervovanej kapacity pripojenia. Z výsledkov vyplýva, že správne riadené batériové úložiská zvyšujú flexibilitu distribučnej siete, umožňujú efektívnejšie využitie existujúcich vedení a transformátorov a môžu podporiť integráciu obnoviteľných zdrojov energie.

Na záver možno konštatovať, že batériové úložiská predstavujú významný nástroj pre optimalizáciu prevádzky distribučnej sústavy a jej rozvoj. Ich implementácia si však vyžaduje dôkladné posúdenie dopadov na napäťové pomery, prúdové zaťaženie prvkov siete a maximálnu rezervovanú kapacitu pripojenia, pričom režim prevádzky zariadenia zohráva kľúčovú úlohu pri hodnotení jeho vplyvu na distribučnú sústavu.

Pod'akovanie

Tento článok bol financovaný EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu c. 09I04-03-V02-00033. Tento článok bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-20-0157 pre projekt „Efektívne prepojenie energetických systémov miest pomocou pokročilých otvorených technológií“. Zároveň ďakujem doc. Mgr. Miroslave Farkas Smitkovej, PhD. za odborné konzultácie, cenné podnety a podporu pri tvorbe tohto článku.

Literatúra

- [1] Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU (recast) (Text with EEA relevance.) [online], 5. červen 2019 [vid. 2026-02-27]. Dostupné z: <http://data.europa.eu/eli/dir/2019/944/oj>
- [2] 251/2012 Z.z. - Zákon o energetike a o zmene a doplnení niektorých zákonov [online]. [vid. 2026-02-27]. Dostupné z: <https://www.slov-lex.sk/ezbierky/pravne-predpisy/SK/ZZ/2012/251/>
- [3] Hlavné činnosti úradu v oblasti regulácie elektroenergetiky | Úrad pre reguláciu sieťových odvetví [online]. [vid. 2026-02-27]. Dostupné z: <https://www.urso.gov.sk/hlavne-cinnosti-uradu-v-oblasti-regulacie-elektroenergetiky/>
- [4] Zariadenie na uskladňovanie elektriny - Západoslovenská distribučná, a. s. [online]. [vid. 2026-03-05]. Dostupné z: https://www.zsdis.sk/Uvod/Vyrobcovia/Uvedenie-do-prevadzky/Zariadenie-na-uskladnovanie-elektliny?utm_source=chatgpt.com
- [5] Battery Energy Storage and Operational Use-Cases at the Electricity Distribution Network Level - IEEE Smart Grid [online]. [vid. 2026-03-05]. Dostupné z: <https://smartgrid.ieee.org/bulletins/march-2021/battery-energy-storage-and-operational-use-cases-at-the-electricity-distribution-network-level>

- [6] KACZOROWSKA, Dominika, Jacek REZMER, Michal JASINSKI, Tomasz SIKORSKI, Vishnu SURESH, Zbigniew LEONOWICZ, Pawel KOSTYLA, Jaroslaw SZYMANDA a Przemyslaw JANIK. A Case Study on Battery Energy Storage System in a Virtual Power Plant: Defining Charging and Discharging Characteristics. *Energies* [online]. 2020, **13**(24), 6670. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en13246670
- [7] GUO, Yong, Qiuyan LI, Jie MA, Shaoli QUAN, Pengzhe REN, Zhengbo LI a Youbo LIU. Maximum available capacity evaluation of distribution network considering photovoltaics and electric vehicles. *Energy Reports* [online]. 2022, **8**, 2022 The 5th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy, 1143–1151. ISSN 2352-4847. Dostupné z: doi:10.1016/j.egy.2022.08.145
- [8] Všeobecné informácie týkajúce sa pripojenia zariadenia na výrobu elektriny do distribučnej sústavy - Západoslovenská distribučná, a. s. [online]. [vid. 2026-03-05]. Dostupné z: <https://www.zsdis.sk/Uvod/Vyrobcovia/Pred-pripojenim/Vseobecne-informacie--tykajuca-sa-pripojenia-zariadenia-na-vyrobu-elektliny-do-distribucnej-sustavy>

Zborník vybraných prác študentskej vedeckej a odbornej činnosti

Študentská vedecká a odborná činnosť
14. apríl 2026

Organizátor:

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Editori:

Peter Benko
Stanislav Sojak

Vydala Slovenská technická univerzita v Bratislave vo Vydavateľstve SPEKTRUM STU.
Náklad 50 ks CD nosičov

ISBN 978-80-227-5591-7

2.3	FM vysieláč Samuel Bukva	78
2.4	Inteligentná vizuálna kontrola vo výrobnom závode Matej Bašista, Oto Haffner	88
2.5	Využitie Siemens Robot Library na interoperabilné ovládanie kolaboratívneho robota UR3e Samuel Hacker, Oto Haffner	94
2.6	Rozpoznávanie 3D identifikátorov pre účely ovládania výrobnéj linky v rozšírenej realite Egor Shveygert, Erik Kučera	100
2.7	Rozpoznávanie 3D identifikátorov Denis Pudelka, Oto Haffner	105
3	Elektroenergetika, Jadrové a fyzikálne inžinierstvo	111
3.1	Analýza vplyvu geometrie lopatiek na výkonové charakteristiky modelu malej veternej elektrárne Martin Bezák, Marek Pípa	112
3.2	Validácia PV Sol modelu fotovoltaickej elektrárne v MatLabe Robert Irgel, Milan Perný	118
3.3	Porovnanie vybraných softvérových nástrojov pri návrhu fotovoltaických systémov Damián Dalibor Kusovský, Miroslava Farkas Smitková	123
3.4	Porovnanie presnosti katastrálnych máp a CLC pri vyhodnotení potenciálu agrovoltiky Illia Lazarenko, Matej Cenký, Milan Perný	128
3.5	Influence of Layer Thickness and Substrate Temperature on Superconducting Properties of NbTiN Thin Films Nad'a Pániková, Tomáš Ščepka, Marián Precner	135
3.6	Analýza vplyvu rastových podmienok na elektrické vlastnosti súčiastok na báze Ga ₂ O ₃ Zuzana Pospechová, Fridrich Egyenes, S. G. Vadlamudi, et al.	141
3.7	Analýza problematiky zariadení na uskladnenie elektriny a ich vplyvu na prevádzku a rozvoj distribučnej sústavy Radovan Šikuda, Miroslava Farkas Smitková, Jakub Zárecký, et al.	147
3.8	Bezpečnostné analýzy plynom chladeného rýchleho reaktora Adam Turcel, Jakub Lúley	153
4	Elektronika a fotonika	158
4.1	Optimisation of Annealing Temperature for Conductivity Enhancement in Polycrystalline β -Ga ₂ O ₃ Thin Films Grown on Quartz Using Liquid-Injection MOCVD Tadeáš Lukáč, Michal Sobota, Dagmar Gregušová, et al.	159
4.2	Investigation of anisotropy in β -Ga ₂ O ₃ thin films on sapphire substrates Marcel Petřík, Ondrej Pohorelec, Dagmar Gregušová, et al.	164

Členovia programového a recenzného výboru

doc. Ing. Daniel Arbet, PhD
doc. Mgr. Daniela Chudá, PhD.
RNDr. Juraj Chlpík, PhD.
Ing. Marián Choma
doc. Ing. Aleš Chvála, PhD.
Ing. Martin Dekan, PhD.
doc. Ing. Martin Ernek, PhD.
doc. Mgr. Miroslava Farkas Smitková, PhD.
doc. Ing. Miroslav Halás, PhD.
doc. Ing. Mária Hypiusová, PhD.
doc. Ing. Peter Janiga, PhD.
Ing. Tomáš Janvars, PhD.
doc. Ing. Kvetoslava Kotuliaková, PhD.
doc. Ing. Jaroslav Kováč, PhD.
Ing. Soňa Kováčová, PhD.
doc. Ing. Ladislav Körösi, PhD.
doc. Ing. Erik Kučera, PhD.
Ing. Matej Matuš, PhD
Ing. Patrik Novák, PhD.
Ing. Vladislav Novák
Ing. Kristián Ondrejčka, PhD.
Ing. Milan Perný, PhD.
Ing. Štefan Počarovský, PhD.
prof. Ing. Rastislav Róka, PhD.
Ing. Dávid Szépvölgyi
Ing. Šimon Tibenský
Ing. Michal Tölgyessy, PhD.
Ing. Izabela Trepáčová
doc. Ing. Erik Vavrinský, PhD.
doc. Ing. Milan Vojvoda, PhD
prof. Ing. Pavol Zajac, PhD.
Ing. Filip Zúbek