



Centrum výzkumu a využití
obnovitelných zdrojů
energie



Metodika provozu HS

TH02020435

*Bezuhlíkový hybridní energetický systém s akumulací pracující jako aktivní
prvek elektrizační soustavy*

Řešitelský kolektiv:

doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.
Ing. Jan Morávek, Ph.D.
Ing. Michal Vrána
Ing. Filip Koval

Ing. Martin Vojtek, PhD.
Ing. Branislav Bátora, Ph.D.
Ing. Pavel Fišer
Ing. Miroslav Páleník

Verze: 11/2019

Brno

1	POPIS METODIKY PROVOZU HS.....	2
2	DOPORUČENÍ PRO INTEGRACI HYBRIDNÍCH SYSTÉMŮ (PROVOZNÍ VLASTNOSTI A PROBLÉMOVÉ OBLASTI)	2
2.1	Typová schémata zapojení	2
2.2	Topologie systému s možností překlenutí hybridního invertoru (bypass).....	4
2.3	Limitní provozní stavy systému	5
2.4	Doporučení pro implementaci požadavků do pravidel pro připojování zdrojů	6
3	TESTOVÁNÍ VLASTNOSTÍ PRVKŮ HYBRIDNÍCH SYSTÉMU (INVERTORŮ, BATERIÍ, KOMUNIKACE A ŘÍZENÍ)	6
4	DOPORUČENÍ PRO SYSTEMATICKÉ TESTOVÁNÍ/OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ – REVIZE PPDS A SOUVISEJÍCÍCH NOREM.....	7

1 Popis metodiky provozu HS

Základním podkladem pro zpracování Metodických podkladů pro provoz HS byly „Typové postupy – metodika provozu HS“, které byly výstupem druhé etapy řešení projektu. S využitím výsledků podrobného testování DC/AC inverterů a bateriových systémů v průběhu třetí etapy řešení, byly rozšířeny a zpřesněny podmínky pro provozování HS.

Na základě provedených analýz lze metodiku rozdělit do následujících souvisejících oblastí:

- Doporučení pro integraci hybridních systémů, jejich provozní vlastnosti a problémové oblasti.
- Testování vlastností prvků hybridních systému (inverterů, baterií, komunikace a řízení).
- Doporučení pro systematické testování/ověření vlastností – revize PPDS a souvisejících norem

2 Doporučení pro integraci hybridních systémů (provozní vlastnosti a problémové oblasti)

Součástí tohoto optimalizačního procesu byly i intenzivní konzultace se zástupci distribučních společností v ČR (především v rámci pracovních skupin CIRED) a zástupci společnosti EGC – EnerGoConsult ČB, s.r.o. Zástupci řešitele a spoluřešitele projektu se aktivně podíleli a podílejí na konzultačním procesu přípravy nových podmínek pro připojování a provoz zdrojů v distribuční soustavě.

Celá koncepce sestavené metodiky definuje podmínky pro několik stěžejních oblastí provozování hybridních systémů:

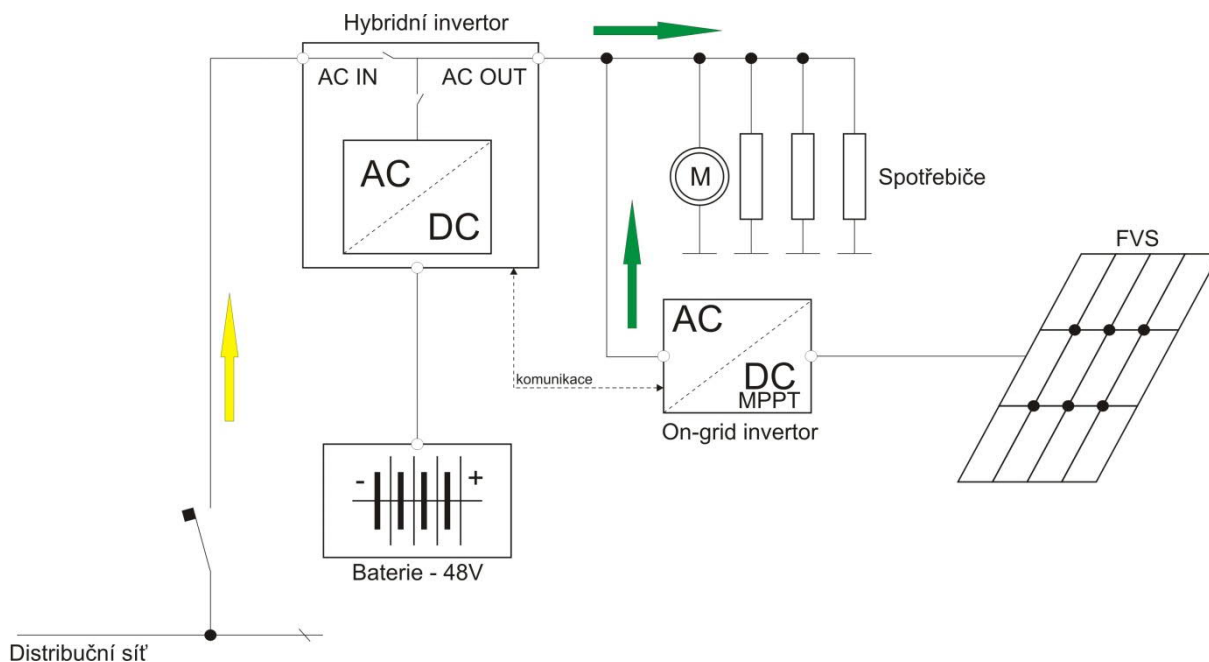
- Typová schémata zapojení.
- Řešení přechodu HS mezi síťovým a ostrovním provozem bez přerušení dodávky elektrické energie.
- Limitní provozní stavy systému ve vazbě na využití akumulace a hodnotu SOC.
- Požadavky na pasivní a aktivní podporu distribuční soustavy ze strany hybridních i on-grid systémů.

2.1 Typová schémata zapojení

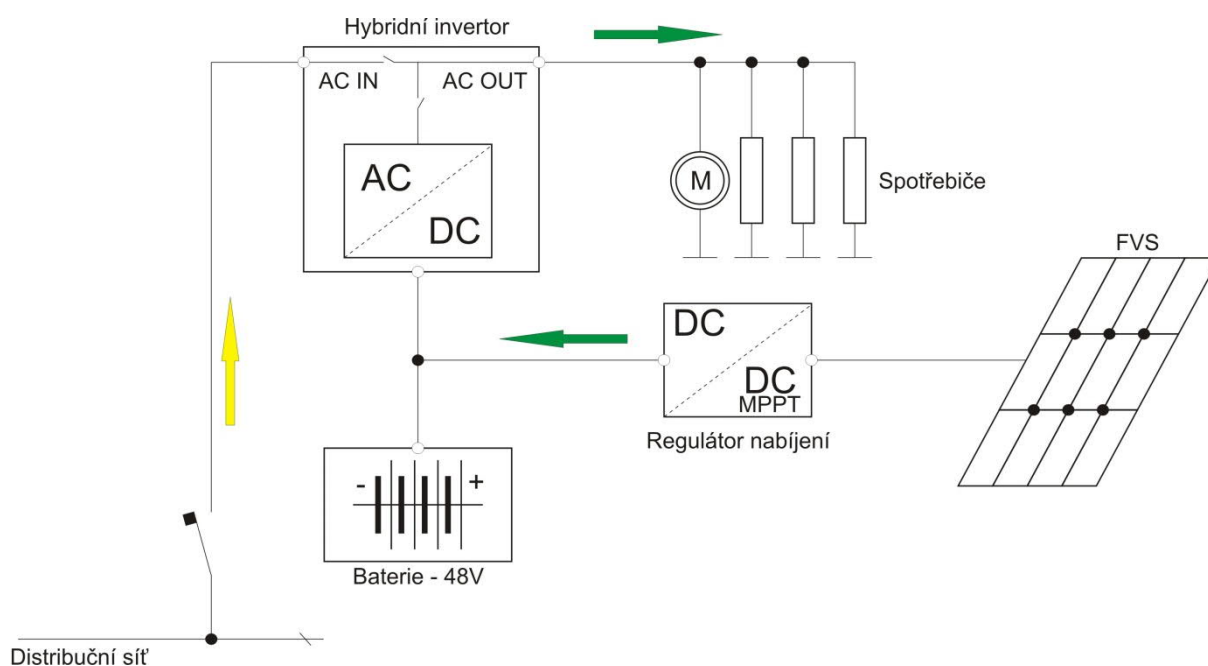
Pro další růst podílu obnovitelných zdrojů na výrobě elektrické energie v ČR a možnost snížení závislosti spotřebitelů na dodávce elektrické energie z distribuční sítě je způsob integrace fotovoltaického (FV) systému s akumulací možné realizovat prostřednictvím dvou základních variant, které závisí na topologii vnitřního zapojení FV systému:

- AC coupling (střídavá vazba) – připojení FV systému prostřednictvím DC-AC invertoru na AC sběrnici systému (Obr. 1).
- DC coupling (stejnoseměrná vazba) – připojení FV systému (nebo i jednotlivých řetězců) prostřednictvím DC-DC měniče s funkcí MPPT na baterii (Obr. 2).

Topologické provedení uvedených variant závisí na použité technologii měniče. Ve střídavé vazbě je pro integraci FV systému použit síťový střídač, který přímo převádí stejnosměrný proud na střídavý proud. V této architektuře se používají konvenční fotovoltaické střídače určené pro paralelní provoz s distribuční sítí nízkého napětí (nn). V AC vazbě jsou baterie připojeny obousměrnými čtyřkvadrantními střídači. Stejně jako fotovoltaické střídače jsou tyto obousměrné měniče jednostupňové, a proto i efektivní, spolehlivé s nízkou cenou.



Obr. 1 Schéma hybridního systému s AC vazbou FV systému



Obr. 2 Schéma hybridního systému s DC vazbou FV systému

DC coupling vyžaduje odlišný přístup a uplatňuje odlišnou topologii měniče. V tomto případě jsou zdroje stejnosměrného proudu (FV panely) připojeny na společnou stejnosměrnou sběrnici prostřednictvím DC-DC měniče. Pracovní bod FV systému je regulován DC měničem s MPPT (regulátorem nabíjení) pro zajištění maximálního výkonu s ohledem na intenzitu slunečního záření a teplotu panelů. Napětí baterie je závislé na aktuálním stavu nabití, teplotě a odebíraném/dodávaném proudu do baterie. Dále je důležité, že baterie mohou energii přijímat, ale i poskytovat, zatímco připojené fotovoltaické panely jsou pouze zdrojem energie. DC měnič musí zabránit zpětnému toku energie do fotovoltaického pole, které by tak mohlo být poškozeno. Stejně tak je třeba zabránit přebíjení baterie z důvodu chemických a fyzikálních vlastností baterie a optimalizace jejího životního cyklu. V případě kombinace různých zdrojů energie (např. FV systém o více polích nebo kombinace FV pole a větrné elektrárny) je třeba dále koordinovat nastavení DC-DC měničů. Z těchto důvodů se používají samostatné DC-DC měniče na jednotlivých stejnosměrných zdrojích. Tyto měniče následně zajišťují

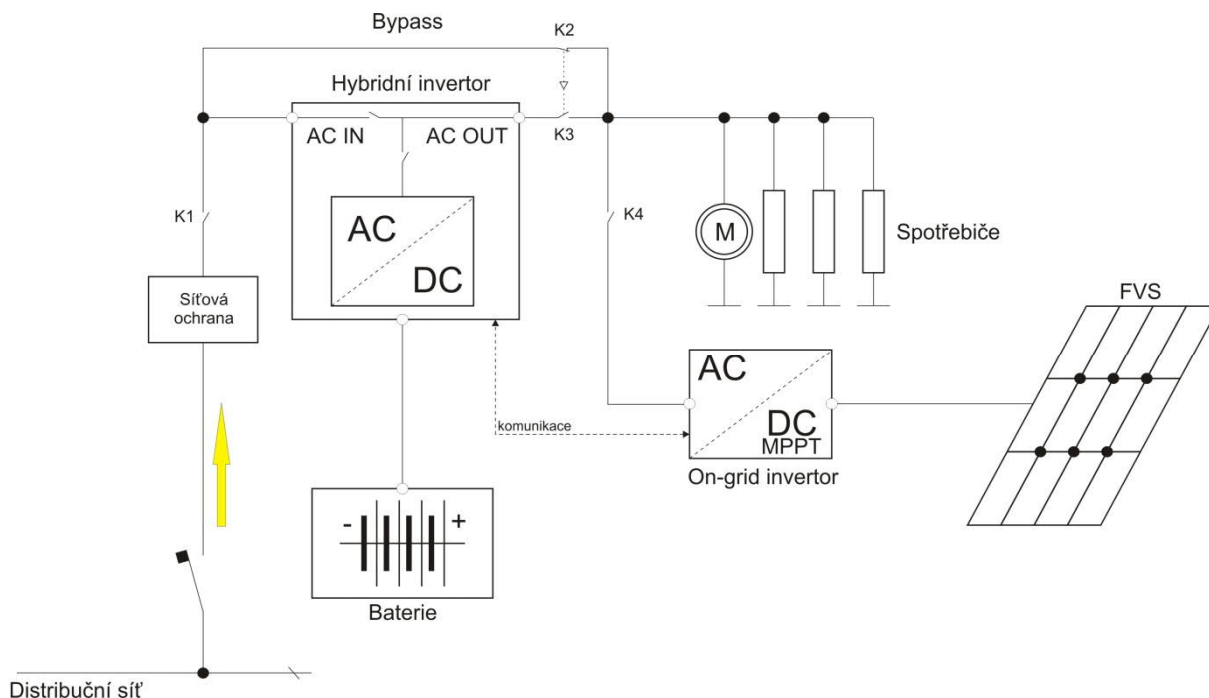
správnou regulaci napětí. Měniče dále zajišťují elektrické oddělení, které FV systém a baterie vyžadují. Pokud je k dispozici více než jeden stejnosměrný vstup, jedná se obecně o "víceportové" měniče. Vzhledem k tomu, že jednotlivé porty vyžadují elektrické oddělení, jsou měniče řešeny jako vícestupňové. V této koncepci je tedy napětí několikrát transformováno, což zvyšuje celkové ztráty systému oproti AC couplingu.

Vnitřní zapojení hybridního invertoru se může v praxi lišit podle typu a výrobce. V uvedených schématech (Obr. 1 a Obr. 2) jsou v rámci vnitřní topologie uvažovány interní stykače, které mohou zajistit odpojení celého systému, případně zajišťující korektní fázování invertoru. Systém tak může na základě vnitřní programovatelné logiky zajišťovat přechod do ostrovního režimu, regulaci jednotlivých zdrojů na základě měření na vstupních svorkách, aby nedocházelo k nežádoucím přetokům elektrické energie do sítě aj.

2.2 Topologie systému s možností překlenutí hybridního invertoru (bypass)

V případě, že je z provozních důvodů nutné zajistit odstavení hybridního systému nebo některého z jeho prvků (řídící systém, hybridní inverter, akumulační systém), je oprávněným požadavkem zákazníků možnost, provozovat spotřebiče přímo ze sítě (v rámci limitů rezervované připojovací kapacity). Na základě získaných poznatků, je problematika bypassu hybridního systému důležitá a komplexní oblast, se kterou souvisí především požadavek na bezpečný přechod systému s jednoho způsobu napájení na druhý.

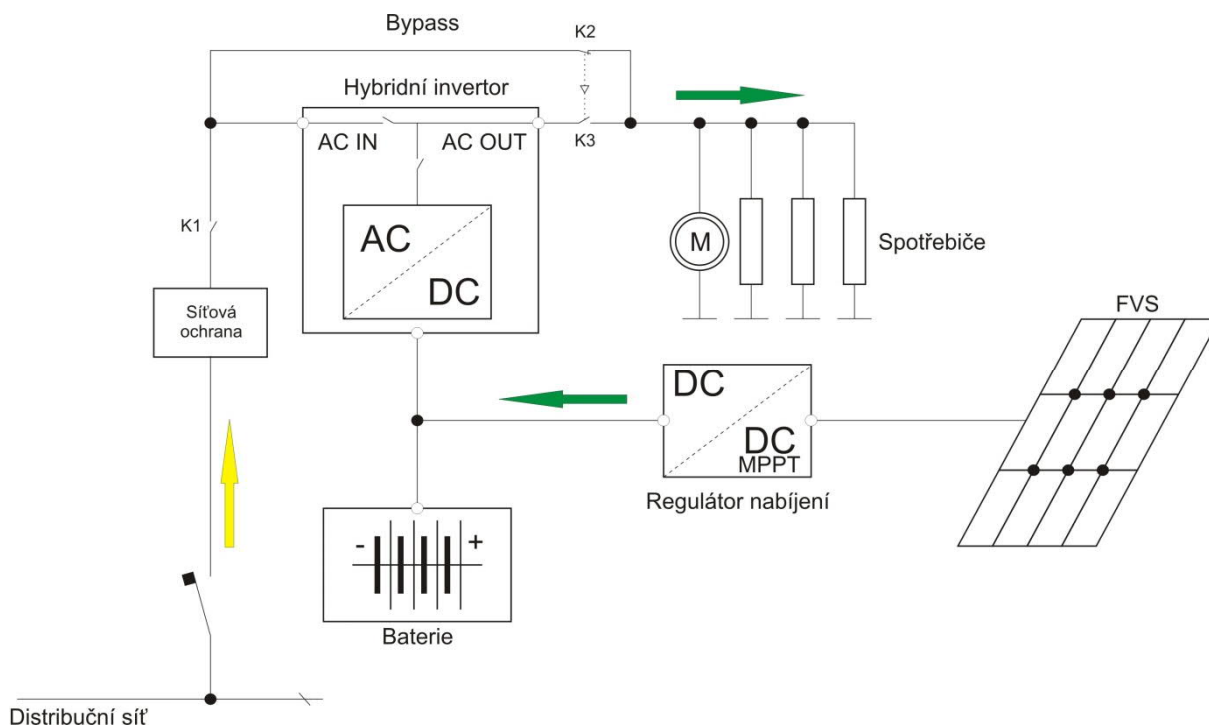
Základní schémata hybridních systémů s bypassem pro jednotlivé varianty zapojení jsou zobrazeny na Obr. 3 a Obr. 4.



Obr. 3 Schéma hybridního systému – AC coupling s možností bypassu invertoru

Vzhledem k velké variabilitě dostupných invertorů a odlišným přístupům k implementaci řídicích algoritmů a ochran jsou schémata uvedená na Obr. 3 a Obr. 4 doplněna o externí síťovou ochranu, která ovládá stykače K1 (eventuálně K4), a tím jednoznačně zajišťuje odpojení celého systému od sítě v případě problémů na straně distribuční sítě (např. beznapěťový stav z důvodu servisních prací), a opětovné připojení k síti po uplynutí definované doby.

Pro případ, kdy hybridní inverter pracuje v ostrovním provozu (není synchronizován s DS) doporučujeme, aby stykače K2 a K3, které zajišťují bypass hybridního invertoru, byly vzájemně elektricky a mechanicky blokovány. Vzhledem k tomu, že stykače K2 a K3 mohou oddělovat síť s odlišnou frekvencí (odlišná frekvence DS a ostrovního systému), je třeba použít stykače s kontakty s dostatečnou elektrickou pevností.



Obr. 4 Schéma hybridního systému – DC coupling s možností bypassu invertoru

2.3 Limitní provozní stavy systému

Z provozního hlediska je v obou případech typových zapojení (AC i DC coupling) potřeba řešit především provozní stavy související se stavem nabití (SOC) připojeného akumulčního systému. Jedná se o stav, kdy je akumulční systém plně nabit (SOC=100%) a vybit na maximální možnou úroveň (s ohledem na životnost Li akumulátoru typicky SOC=20%)

- SOC=100%
 - V případě AC couplingu mohou nastat dvě situace. Je-li povolen přetok el. energie do sítě, je dostupná energie z FV systému dodávána do sítě. Pokud není možné dodávat energii do sítě, je nutné zajistit odepnutí DC-AC střídačů. Odpojení střídačů lze provést prostřednictvím komunikace, případně mechanickým odpojením stykačem K4)
 - V případě DC couplingu je situace jednodušší, DC-DC regulátor je zpravidla řízen napětím akumulčního systému a v tomto případě postupně omezí odebíraný výkon.
 - Pro oba případy platí, že není-li dovolena dodávka do sítě, je část potenciálně vyrobitelné energie FV systémem nevyužita.
- SOC=20%
 - V případě vybitého akumulátoru jsou spotřebiče připojeny k distribuční síti prostřednictvím hybridního invertoru, který zároveň vyhodnocuje aktuální výkon FV systému, což v případě AC couplingu znamená, že se snaží na základě měření zajistit nulovou bilanci výkonu v předávacím místě. Záleží tedy na rychlosti a reakční době hybridního invertoru, což určuje, do jaké míry bude regulace úspěšná.
 - U varianty s DC couplingem problematika řízení přetoku energie odpadá.

Další srovnání typových zapojení lze provést pro případ, kdy např. dojde k poruše hybridního invertoru. V tomto případě lze spotřebiče napájet přímo ze sítě prostřednictvím bypassu. V případě AC couplingu je možné FV systém provozovat (AC-DC inverter se synchronizuje k síti), nicméně není možné regulovat přetoky energie, které závisí na aktuální bilanci spotřeby a výroby el. energie v objektu. Zároveň není možné využívat akumulční systém, ani zajistit jeho případné dobíjení v případě potřeby.

U varianty s DC couplingem je v tomto případě možné provozovat spotřebiče napájením přímo ze sítě. DC-DC měnič neumožňuje využití energie z FV systému k jinému účelu než je dobíjení akumulčního systému, který ovšem nebude degradovat vlivem dlouhodobě nízkého SOC, který může nastat v případě varianty s AC couplingem.

2.4 Doporučení pro implementaci požadavků do pravidel pro připojování zdrojů

Na základě dosavadních zkušeností získaných v průběhu ověřovacích provozů uvedených typů řešení, lze pro praktické nasazení hybridních systémů v širším měřítku doporučit komplexní otestování zvoleného řešení (tj. topologického uspořádání, použitých měničů a odezvy řídicího systému) a ověřit tak odezvu celého systému na přesně definované provozní stavy. Laboratorní testování umožní vytvořit stejné podmínky pro vyhodnocení rozdílů chování jednotlivých typů invertorů, které nyní mohou vykazovat odlišné vlastnosti, protože nyní může každý výrobce přistoupit k implementaci požadavků odlišným způsobem.

Výstupem testování je certifikované uspořádání a nastavení systému s konkrétními typy invertorů, měničů, akumulárního a řídicího systému, které by splňovalo požadavky na připojení definované ze strany provozovatelů DS dle prováděcí legislativy a zároveň zajistilo bezpečný provoz i minimalizaci negativních vlivů na distribuční síť (např.: odezva systému na změny velikosti napětí v distribuční síti, přechodný děj při připojení k distribuční síti (přifázování), přechodný děj při odpojení od distribuční sítě (přechod do ostrovního provozu), ověření funkcí ochran (nadměti, podměti, výpadek jedné fáze).

Alternativně lze doporučit možnost využití mobilního testovacího zařízení pro ověření požadovaných vlastností a korektních funkcí hybridního systému přímo v místě instalace.

3 Testování vlastností prvků hybridního systému (invertorů, baterií, komunikace a řízení)

S využitím výsledků projektu v třetí etapě řešení (Testování hybridního systému) bylo zjištěno, že reálné chování jednotlivých prvků tvořících hybridní energetický systém se v reálném provozu může značně odlišovat od očekávaného, resp. deklarovaného způsobu chování, popřípadě nastavení.

Praktickým příkladem je testování autonomních funkcí invertorů, které primárně slouží k podpoře distribuční soustavy, tzn. v důsledku využití pokročilých vlastností hybridních systémů. Tyto požadavky jsou kladeny na systémy pracující paralelně s distribuční soustavou (vztahují se na ně platné normy a PPDS). Jedním z možných přístupů k řešení je provozování systému v ostrovním režimu, tzn. odpojení od distribuční soustavy, kdy v ostrovním režimu nejsou autonomní funkce vyžadovány.

V rámci hybridních energetických systémů je problematika testování jednotlivých prvků velice komplexní, protože se vyznačují značnou variabilitou dílčích komponent a technického uspořádání. Základní požadavky však zůstávají stejné pro všechny systémy. Jedná se o bezpečný a spolehlivý provoz při běžných provozních ale i poruchových stavech. Chování systému vzhledem k síti musí splňovat předepsané parametry a nesmí negativně ovlivňovat její provoz. Z uživatelského pohledu je významná především celková přehlednost systému a intuitivnost ovládání s možností dálkového monitoringu avšak se zabezpečeným přístupem, aby nemohlo dojít k nežádoucí změně nastavených parametrů.

Výstupy testování poskytují ucelený pohled na hybridní energetický systém, deklarují jeho parametry, odezvu a bezpečnost.

Z hlediska životnosti systému jsou nejvíce problematickou oblastí baterie. Zpracovaná metodika doporučuje následující opatření z hlediska provozu:

- Obecně platí, že nelze definovat jeden konkrétní způsob využívání baterie, vždy bude záležet na účelu využití systému s akumulací jako celku. Primárně jde o to, že pro některé případy může být výhodné využívat jen omezenou část kapacity baterie, jindy zase bude nezbytné využívat téměř celou dostupnou kapacitu (množství energie bude záviset na typu baterie – 50% pro Pb a 80-90% pro Li). Důležitým parametrem, který velmi ovlivňuje životnost baterie, je provozní teplota. Pro Li baterie je optimální provozní teplota 25°C - v případě, že je systém dlouhodobě provozován při teplotách nad provozní, dochází k velmi rychlé degradaci baterie a tedy i ke zkrácení její životnosti.
- Základní informace o závislosti životnosti baterie LiFePO (počtu cyklů) na hloubce vybití je uvedena v Tabulka 1. Důležité je, že jeden cyklus (vybití/nabití) nezávisí na hloubce vybití, tedy

ať už bude DoD 10% nebo 80%, vždy to bude započítáno jako jeden cyklus. Z dostupných údajů vyplývá, že počet dosažitelných cyklů roste s nižším využíváním kapacity baterie.

Tabulka 1 Počet cyklů baterií v závislosti na hloubce vybití

Hloubka vybití	Počet vybíjecích cyklů	
	NMC	LiPO ₄
100% DoD	~300	~600
80% DoD	~400	~900
60% DoD	~600	~1,500
40% DoD	~1,000	~3,000
20% DoD	~2,000	~9,000
10% DoD	~6,000	~15,000

- Základní doporučení výrobců pro baterie na bázi lithia je udržovat baterie v případě jejich delšího nevyužívání nabité na 80-90% SoC. Jak ukazují praktické zkušenosti z provozu akumulčních systémů, není u tohoto typu baterií problematické ani delší setrvání např. na hodnotě 50% SoC - za předpokladu, že následně (alespoň jednou měsíčně) dojde k balancování článků baterie u Li článků, respektive dosažení absorpčního napětí u Pb článků.

4 Doporučení pro systematické testování/ověření vlastností – revize PPDS a souvisejících norem

Dosavadní, přibližně roční, testování různých typů střídačů ukazuje, že se čím dál tím víc, a současně naléhavěji, projevuje potřeba systematického testování/ověřování funkcí střídačů, které budou v distribuční síti přibývat. Současné výsledky ukazují na určitý nesoulad mezi požadovanými vlastnostmi na střídače ze strany provozovatele soustavy (v souladu s PPDS) a faktickými funkcemi střídačů, které se na trhu objevují. V tomto směru by při absenci určitého kontrolního mechanismu mohlo postupem času dojít k situaci, kdy bude v soustavě značné množství střídačů bez korektně nastavených řídicích a regulačních charakteristik, což může velmi nepříznivě ovlivnit provozování elektrizační soustavy.

Na základě zkušeností získaných v průběhu řešení projektu vyplývá, že je potřebné jednoznačně definovat podmínky pro ověřování nastavení střídačů před jejich uvedením na český trh, případně doplnit tuto „certifikaci“ o možnost terénního či virtuálního testování. Jednotlivé úrovně testování by měly jednoznačně definovaný účel/cíl.

Základní laboratorní testování (certifikace) slouží především na ověření všech požadovaných funkcí střídačů dle PPDS. Výstupem takového testování je protokol s ověřením, zda testovaný střídač skutečně vyhovuje definovaným připojovacím podmínkám, případně jaké jsou jeho odchylky od těchto definovaných podmínek (zde by již bylo na provozovateli soustavy, zda by připojování střídače s nějakou odchylkou od PPDS umožnil).

Primárním cílem terénního testování by bylo ověření funkčnosti ochran, P(U) a Q(U) regulace - ověření mezních bodů křivky a také by tento typ testování mohl být využíván jako kontrolní mechanismus při změně firmware střídače při podezření na jeho nesprávnou funkci nebo nestandardním chováním odbočky s vyšší podílem instalovaných střídačů.