

Ing. Petr Wolf, Ph.D.

Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.

Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, ČVUT v Praze

Srovnání vyráběných regulátorů pro ohřev vody pomocí fotovoltaiky

Abstrakt:

Článek po technické stránce srovnává na českém trhu dostupné regulátory pro ohřev vody pomocí fotovoltaiky. Regulátory byly zapůjčeny od výrobců pro testování v laboratoři centra UCEEB ČVUT. Byly napájeny elektronickým solárním simulátorem s předem definovanými profily voltampérové charakteristiky. Cílem měření bylo určit schopnost regulátoru sledovat bod maximálního výkonu, změřit vnitřní účinnost měniče, celkovou schopnost předání energie do zátěže, zhodnotit výstupní signál a celkové provedení regulátorů.

Klíčová slova: fotovoltaika, ohřev vody, regulace

ÚVOD

Ohřev vody s užitím elektrické energie získané z fotovoltaických (FV) modulů je nově rozšířená alternativa ke klasickému přímému ohřevu pomocí termických panelů. Oproti termickému systému má řadu výhod i nevýhod, které byly podrobně diskutovány v řadě publikací [1-3]. Jako výhody lze uvést jednoduchou instalaci a přenos energie pomocí kabeláže, v řadě případů též menší nároky na údržbu a vyšší efektivitu během chladného počasí (vztaženo k nominálnímu výkonu systému). Systém může být jednoduše vypnut v případě nahřátí zásobníku (FV moduly lze provozovat ve stavu naprázdno či ve zkratu bez dalších nutných opatření). Hlavní nevýhodou je pak nutnost větší plochy pro instalaci FV modulů a vyšší cena v případě požadavků na velké tepelné výkony. FV systém je tudíž vhodný obzvláště pro aplikace s celoročním provozem (příprava teplé vody) a v případech dodatečné montáže ve stávajících objektech.

Systémy s využitím FV modulů pro přípravu teplé vody se začaly ve velké míře instalovat na domech v době tzv. stop stavu FV elektráren v České republice. Řada firem vyvinula vlastní regulátor, který umožňuje efektivní předávání energie z FV modulů do topného tělesa. Často zahrnuje další funkce jako měření energií, řízení ohřevu dle teploty v zásobníku, kombinování s ohřevem ze sítě, případně přepnutí na jiné využití elektrické energie. Hlavní funkcí regulátoru vsazeného mezi FV moduly a topnou patrnou v ohřivači však zůstává sledování bodu maximálního výkonu, což ročně zvýší získanou energii o minimálně 30 % oproti systému bez sledovače bodu maximálního výkonu [3]. Pro označení maximálního bodu výkonu je používána anglická zkratka MPP – Maximum Power Point, pro funkci sledování tohoto bodu měničem pak MPPT – Maximum Power Point Tracking. Funkce sledování bodu maximálního výkonu je realizována pomocí řízení měniče, jedním z asi 20 dostupných algoritmů.

Od počátku roku 2017 je možné připojovat FV elektrárny s výkonem do 10 kW_P bez nutnosti licence, což je v řadě případů vhodnější řešení, nežli izolovaný systém pro ohřev vody. Získaná elektrická energie je pak, za využití měniče, primárně užitá pro provoz spotřebičů v domácnosti a pro ohřev vody lze užít přebytky energie (zásobník tak slouží jako řízený spotřebič). Toto řešení se často jeví jako vhodnější s ohledem na flexibilní užití energie. Přímý ohřev vody pomocí FV systému s regulátorem zůstává vhodný v případech, kdy není pro elektrickou energii jiné využití (resp. ohřev vody tvoří převážnou část spotřeby energie) nebo není k dispozici rozvodná síť.

CÍLE TESTŮ

Provedené testy mají za úkol zhodnotit chování předložených vzorků regulátorů dostupných na trhu v ČR. Testovat budeme:

1. Schopnost sledovat MPP v jednotlivých osvitových profilech,
2. průběh okamžité hodnoty účinnosti měniče v jednotlivých osvitových profilech,
3. schopnost využití dostupné energie z FV systému při změnách osvitu (profil B3 EN 50530).

TESTOVANÉ REGULÁTORY

V rámci měření byli osloveni výrobci a dodavatelé regulátorů do České republiky. Celkem bylo testováno 5 produktů, Tab. 1. Jeden z oslovených českých výrobců testování odmítl. Provedení jednotlivých regulátorů je patrné z Obr. 1.

Tab. 1 Přehled testovaných regulátorů pro ohřev pomocí FV modulů.

Typové značení	Označení výrobku v textu	Jmenovitý DC výkon (maximální DC výkon)	Rozsah DC napětí (maximální DC napětí)	Výrobce	Dodavatel, který regulátor zapůjčil
KERBEROS 320.B	KERB	2,1 kW (×)	140-310 V (340 V)	UNITES Systems, a.s., Česká republika	UNITES Systems, a.s., Česká republika
LOGITEX LXDC POWER BOX 1-2,3 kW DC	LXDC	2 kW (×)	85-350 V (350 V)	LOGITEX spol. s.r.o., Slovenská republika	LOGITEX spol. s.r.o., Slovenská republika
NECTAR SUN, Typ:S	NECT	1,5 kW (2 kW)	110-230 V (350 V)	LTD Super Solem, Litva	SOLVIS, s.r.o., Česká republika
CONTROL BOX 2.0	SUNW	× (3,4 kW),	100 – 230 V (350 V)	SUNNYW ATT GROUP a.s.	SUNNYWATT GROUP a.s.
MARKO 2kW	MARK	1-1,5 kW (2,6 kW)	200 - 300V (400 V) možno nastavit i na nižší startovací napětí	Ostrovni elektrárny s.r.o.	Ostrovni elektrárny s.r.o.

* dle datového listu, × není uveden



KERB



LXDC



MARK



NECT



SUNW

Obr. 1 Provedení testovaných regulátorů

ZHODNOCENÍ REGULÁTORŮ (PROVEDENÍ, DOPLŇKOVÉ FUNKCE)

KERB

Regulátor KERB se na první pohled od ostatních odlišuje svými většími rozměry (395×322×105 mm). Nabízí kromě přímého ohřevu další funkce jako sledování vyrobené a spotřebované energie, řízený ohřev na základě měřené teploty v zásobníku, možnosti přepnutí FV výkonu (v rozšířené variantě). Funguje i bez elektrické sítě. Kabeláž se připojuje přes průchodky ve dnu přístroje, nevýhodou je nutnost odkrytování přístroje během montáže. Vnitřní uspořádání pak může vést k nechtěnému poškození elektroniky při neopatrné montáži silových vodičů.

LXDC

Regulátor je proveden v masivním hliníkovém pouzdru (montážní krabici), provozní stav je indikován LED diodou. Toto provedení zajišťuje vyšší stupeň krytí (výrobce udává IP45). Tudíž je možná instalace i do vlhkých prostor, nebo míst, kde by při havarijním stavu mohlo dojít k úniku vody. Připojení je jednoduché pomocí MC4 konektorů. Kromě regulace výkonu neposkytuje v základní variantě žádné další přidané funkce (např. měření energie či teploty).

NECT

Regulátor byl rozměry nejmenší z testovaných. Je proveden v plastovém pouzdru, s konektory MC4 a napevno připojenou slaněnou kabeláží ve spodní části přístroje. Svrchu je displej ukazující provozní stav a měřenou teplotu. Součástí regulátoru je i komunikace prostřednictvím WiFi. Výrobce udává možný provoz bez elektrické sítě, což bylo během měření vyvráceno. Provoz přístroje je podmíněn přítomností napětí AC síťovém vstupu, nicméně v režimu „bez sítě“ je odebírán velmi malý proud, nutný pro spolehlivou funkci zařízení a komunikaci WiFi během doby bez slunečního svitu. Problémem přístroje je hlučnost (pískání) tělesa při provozu, což vylučuje možnost instalace zásobníku s topnou patronou v místech zdržování se osob (např. přímo v koupelně).

SUNW

Vnější provedení regulátoru je velmi obdobné regulátoru LXDC, má jen o něco menší rozměry. LED dioda přímo indikuje v několika stupních dodávaný relativní výkon, žádná další komunikace či měření teplot přímo přístrojem není realizováno. Podobně jako regulátor NECT topné těleso při provozu vydává hluk, je však tišší. Výstupem je pulzní stejnosměrný proud. Proto musí být topná spirála v případě natopení či havarijního stavu odepnuta prvkem určeným pro stejnosměrný proud (např. DC stykačem).

MARK

Zajímavostí regulátoru jsou dva analogové měřiče proudu a napětí vestavěné do krytu přístroje, které okamžitě ukazují provozní stav. Připojení je realizováno pomocí konektorů a průchodky na stranách přístroje. Podstatnou nevýhodou je nutnost přístroj během instalace správně seřadit. Provádí se to odkrytováním přístroje a nastavením několika vnitřních trimrů. Pokud se toto nevhodně provede, přístroj nepracuje v ideálních podmínkách (dochází k značným ztrátám). Pokyny pro nastavení jsou součástí dodaného manuálu, nicméně vyžadují jistou dávku šikovnosti a zkušeného uživatele.

POPIS MĚŘENÍ

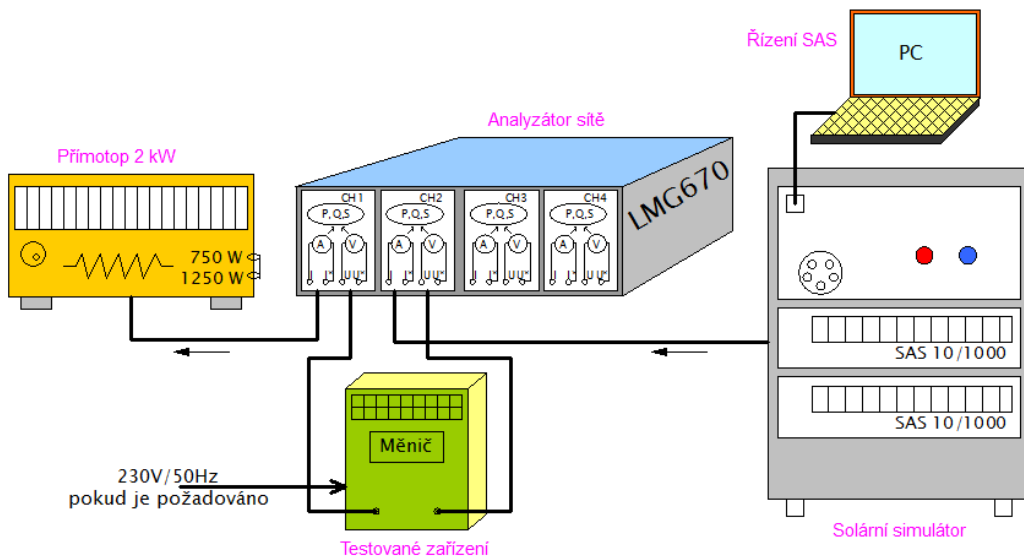
Měření bylo zaměřeno na zjištění chování a účinností při provozu pomocí zvolených typizovaných zkoušek. Během měření byl vstup regulátoru připojen k solárnímu simulátoru a výstup k topnému tělesu (přímotopný ohříváč). Solární simulátor řízený pomocí PC sloužil jako zdroj s V-A charakteristikou, kterou mají FV moduly při definovaných provozních podmínkách (osvit, teplota). Pomocí analyzátoru výkonu byly měřeny a zaznamenány vstupní i výstupní hodnoty napětí, proudu a výkonu, Obr. 2.

Schopnost předání energie z fotovoltaických modulů do zátěže závisí na účinnosti sledování MPP a na účinnosti konverze použitého měniče v regulátoru. Účinnost sledování MPP lze měřit při statickém režimu, kdy se nemění V-A charakteristika na vstupu regulátoru a při dynamickém režimu, což je reálná situace při proměnném osvitu či teplotě modulů.

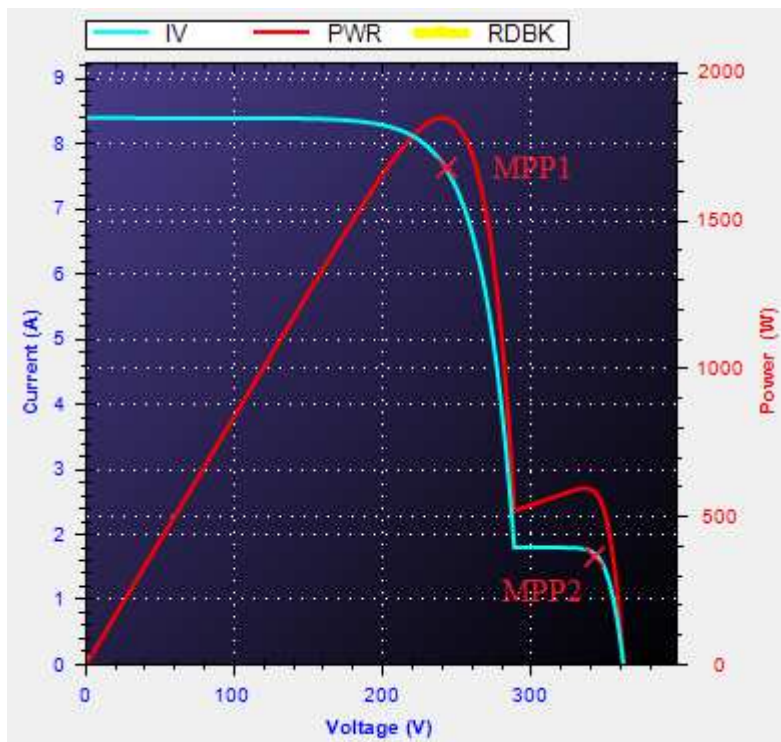
Ve statickém režimu, kdy je V-A charakteristika modulů (resp. simulátoru) konstantní, bude docházet k odchýlení od bodu MPP vlivem nepřesností měření vnitřními prvky regulátoru či z důvodu velikosti kroku při řízení měniče. Při nestandardním tvaru V-A charakteristiky způsobené např. lokálním stíněním, může dojít ke vzniku lokálních maxim výkonu a chybnému nalezení bodu MPP regulátorem. Příklad výstupu solárního simulátoru, simulující tento stav je na obrázku 3. Tato schopnost bývá často také součástí testování fotovoltaických měničů, nicméně toto porovnání je zaměřeno na dynamické vlastnosti použitých MPPT.

Měření dynamické účinnosti MPP je náročné s ohledem na vhodné určení dynamického profilu. Na zvoleném profilu totiž budou následně záviset naměřené výsledky. Měl by v maximální možné míře reflektovat typické chování FV modulů během jejich provozu ve vnějších podmínkách. To pochopitelně závisí na způsobu instalace (sklon a azimut modulů, způsob instalace FV modulů s ohledem na jejich chlazení...) a charakteru počasí (vliv lokality, roční doby...). Pro testování všech regulátorů byl vybrán profil V-A charakteristiky B3 dle EN 50530. Ten definuje měření při náběhových a sestupových rampách s minimem intenzity záření 300 W/m^2 a maximem 1000 W/m^2 . Počáteční celková délka náběhové a sestupové rampy činí 140 s, čas se postupně snižuje až na 14 s. Obr. 4 ukazuje časovou závislost výstupního výkonu simulátoru, při řízení tímto profilem, kdy maximální výkon odpovídající ozáření 1000 W/m^2 je 2 kW.

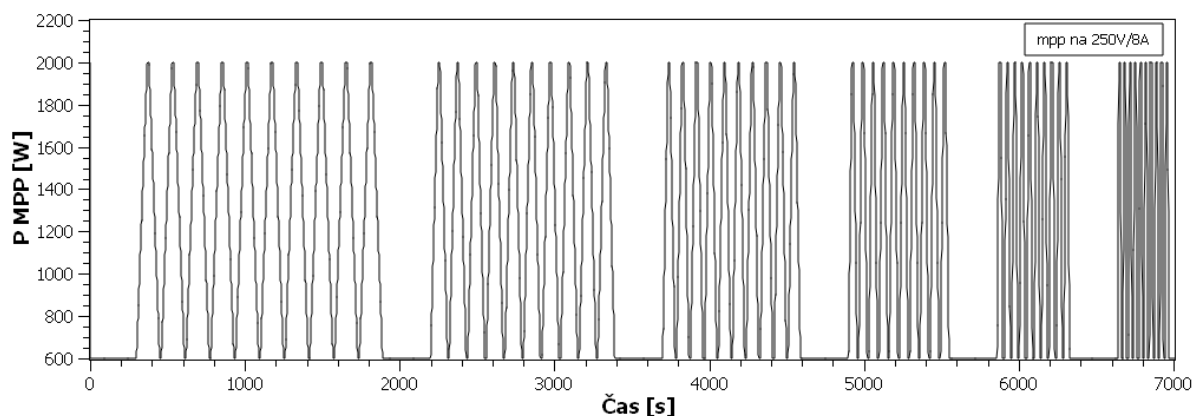
Regulátory dle vnitřního algoritmu sledují MPP, může však být dosažena jistá hranice, při které se algoritmus nestihá přizpůsobovat rychlým dynamickým změnám V-A charakteristiky. Pracovní bod se následně začne od bodu MPP vzdalovat. Tato odchylka od MPP způsobená dynamickými změnami se přičte k odchylce ve statickém stavu. Větší odchylka pracovního bodu měniče od MPP znamená ve výsledku nižší účinnost – FV modul není optimálně využit. Vlastní účinnost regulátoru úzce souvisí s jeho topologií, konkrétním zapojením a použitými součástkami. U měničů DC/DC může být použit v sérii jen jeden spínací polovodičový prvek na rozdíl od DC/AC měničů s můstkovým zapojením, kde budou tyto prvky v sérii minimálně dva a tím narostou i ztráty v měniči. Dále může docházet ke ztrátám na vstupních a výstupních filtrech a dalších prvcích měniče (převážně indukčnostech). Odběry pro řízení a další pomocné obvody (např. rozhraní) bývají v případě dobrého návrhu zanedbatelné.



Obr. 2 Měřicí sestava



Obr. 3 Příklad V-A charakteristiky s více lokálními body MPP (MPP1, MPP2) Zdroj: Terra SAS software, výřez kopie obrazovky solárního simulátoru.

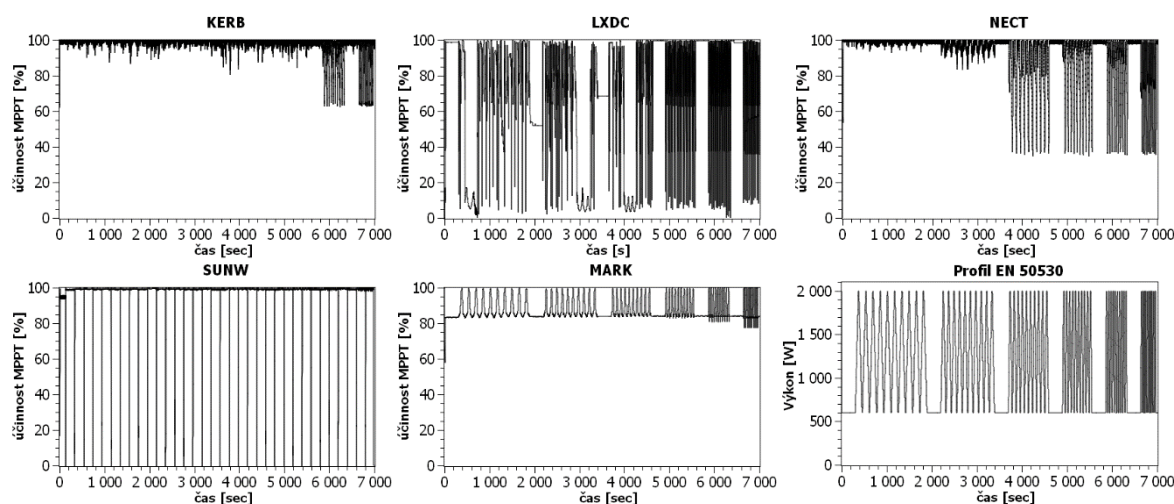


Obr. 4 Výstup solárního simulátoru při řízení dle osvitového profilu B3 - EN 50530

VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Schopnost sledování MPP v jednotlivých osvitových profilech

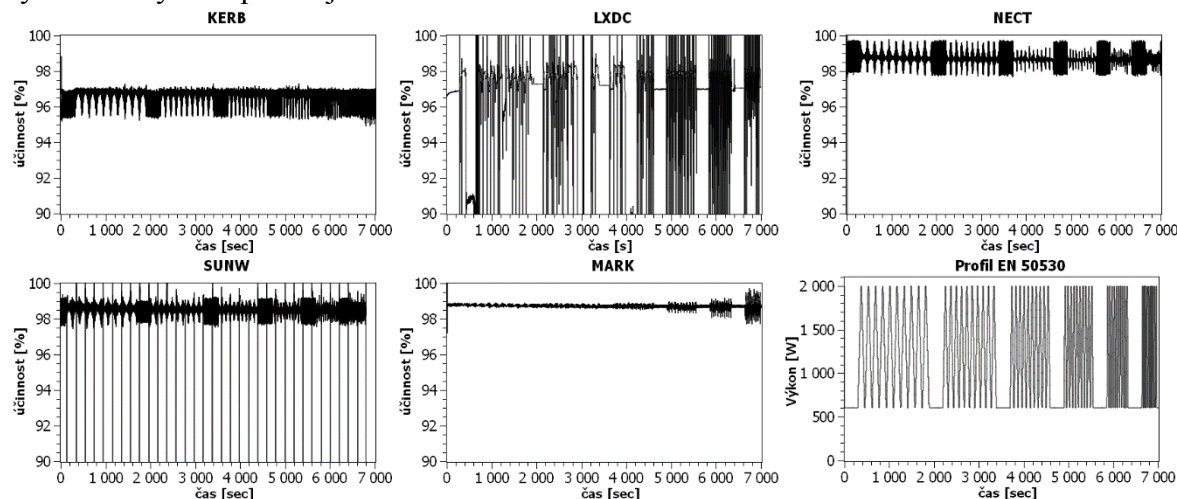
Účinnost sledování MPP u všech uvedených regulátorů při vstupním profilu B3 dle EN 50530 je ukázána na Obr. 5. Nejlépe se choval regulátor SUNW, který držel hodnotu schopnosti sledovat MPP nad 98 % v celém profilu s tím, že občas po krátkou dobu kontroloval VA charakteristiku, tedy účinnost MPPT krátkodobě klesla. Velmi dobrý výsledek získal i regulátor KERB a NECT, jen při rychlých změnách simulované intenzity záření již nestíhal měnit se MPP sledovat, což se projeví krátkodobými poklesy účinnosti MPPT v oblasti rychlých změn výkonu. U regulátoru LXDC již pomalejší změny intenzity záření znamenaly odchýlení od MPP a tím i poměrně významné periodické změny účinnosti MPPT. Regulátor MARK sice držel hodnotu schopnosti sledování MPP v rozsahu 85 – 100 %, nicméně ani na pomalé změny intenzity v testovaném rozsahu nereguloval dostatečně rychle.



Obr. 5 Schopnost sledovat bod maximálního výkonu (účinnost MPPT) při testovacím profilu B3 dle EN 50530

Účinnost konverze měniče

V případě konverzní účinnosti regulátorů dosáhly nejvyšší hodnoty MARK, NECT a SUNW (cca 98,5 %). KERB dosahoval mírně nižších hodnot (cca 96,5 %). Účinnost u LXDC nebyla stabilní, nicméně v průměru se pohybovala také kolem vysokých hodnot (97 %), Obr. 6. Nestabilita účinnosti měniče při rychlých změnách na vstupu je způsobena především nedokonalostí MPPT a tak přesto, že je na obrázcích 5 a 6 zobrazena pokaždé jiná veličina, tyto obrázky si odpovídají.

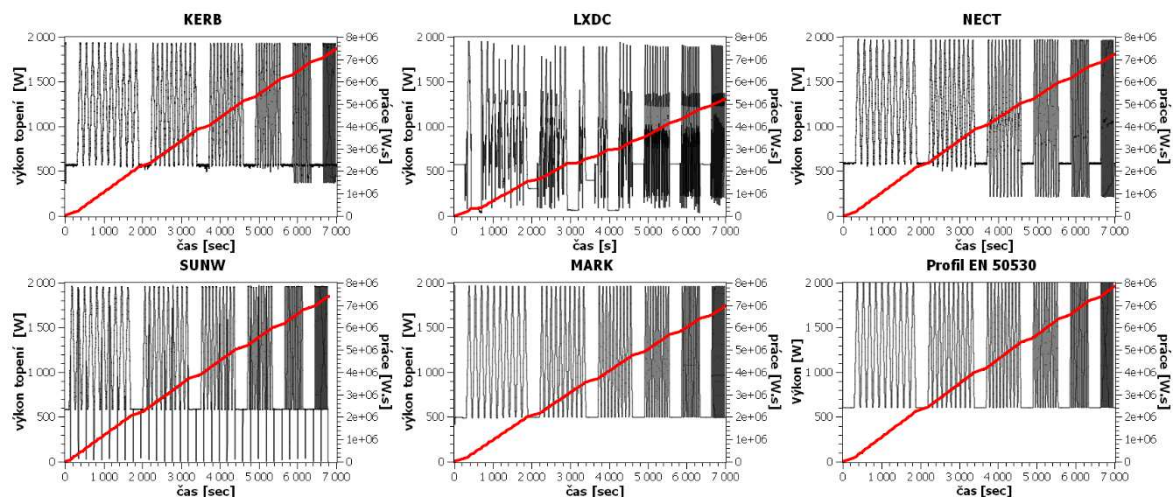


Obr. 6 Průběh okamžité hodnoty účinnosti měniče při testovacím profilu B3 EN 50530

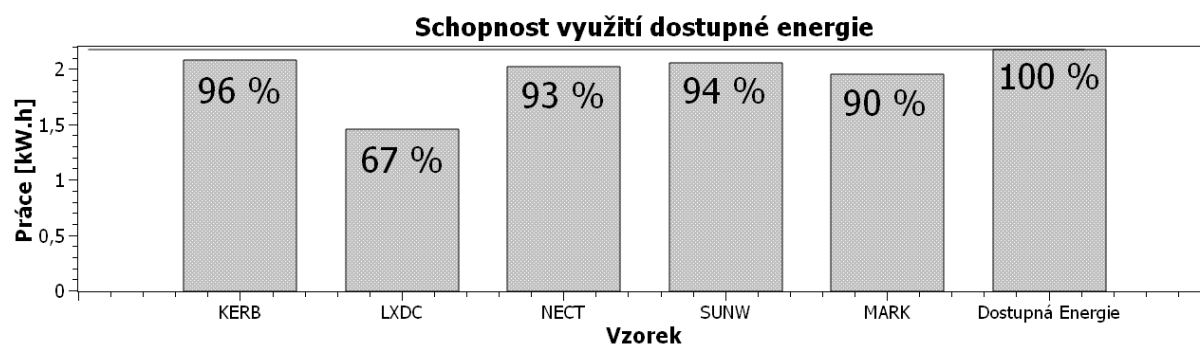
Využití dostupné energie z FV systému

Pro fixně nastavený testovací výkonový profil (B3 EN 50530) byl měřen okamžitý výkon a práce dodávaná přes systém měniče do umělé zátěže (topení). Byla tak zjištěna celková schopnost měniče využít dostupnou energii. Hodnoty v sobě zahrnují jak účinnost měniče, tak účinnost sledování bodu maximálního výkonu při dynamickém profilu B3 EN 50530. Práce je počítána jako integrální veličina a jejím porovnáním s integrálem testovacího profilu je možno odhadnout kombinované ztráty na měniči při dynamickém chování, Obr. 7.

Nejlépe energii při testovacím provozu využil regulátor KERB, následně s mírným odstupem SUNW, NECT a MARK. Regulátor LXDC dosáhl výrazně nižších hodnot celkové předané energie, Obr. 8. Dle výrobce regulátoru je nižší předaný výkon v testu způsoben přidáním funkcí, která při změně osvětlení zajišťuje skenování V-A charakteristiky a tímto je regulátor schopen nalézt globální bod MPP (Obr. 3). Je tedy možné, že v případě nehomogenního osvětlení by regulátor lépe využil dostupnou energii. Uvedený poznatek byl zjištěn zpětnou vazbou od výrobce až po ukončení testů a proto ho nebylo možné ověřit.



Obr. 7 Schopnost měniče využít dostupnou energii. Šikmá čára odpovídá vykonané práci (tepelné energii) předané do odporové spirály náhradní zátěže. V případě určení integrálu z křivky profilu EN 50530 získáme teoretické maximum, které lze využít pro porovnání (viz obrázek 8)

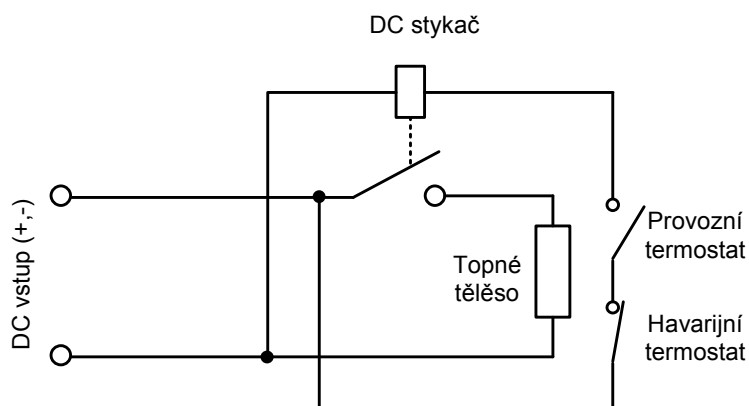


Obr. 8 Porovnání měničů z hlediska schopnosti využití dostupné energie. Snížená hodnota u LXDC je diskutována v textu.

Výstupní signál do zátěže

Uváděné regulátory patří svým výkonem v prostředí residenčního bydlení mezi jedny z nejvýkonnějších zařízení. Jsou sice připojeny na čistě odporovou zátěž (např. topná spirála v zásobníku TV), nicméně vnitřní měnič pracující na vyšších frekvencích může způsobovat značné rušení. To se může šířit buďto po vodičích (jak na výstupu tak vstupu regulátoru) nebo z regulátoru či vodičů elektromagnetickou cestou do prostoru. Některé z regulátorů při provozu způsobovali zvuk, o frekvenci spínání, na topném tělese, což přímo nevádí, pokud se jedná o nízkou hladinu zvuku či je systém instalován mimo např. v technické místnosti. Pokud má výstupní signál střídavý průběh, lze regulátor provozovat přímo s běžnými topnými patronami (resp. s běžnými bojlerly).

V případě stejnosměrného signálu musí být provozní i bezpečnostní spínání topného tělesa zajištěno vhodným DC prvkem (např. DC stykač). S ohledem na bezpečnost je sporné provedení jednoho DC stykače řízeného v sérii řazeným provozním i bezpečnostním spínačem, Obr. 9. Nejde totiž o dva oddělené systémy vypnutí - DC stykač je zde společným prvkem. Při jeho poruše nebude ohřev přerušen a bezpečnostní tlakový ventil není v případě zanedbání kontroly jeho funkčnosti (což je bohužel častým jevem) spolehlivou ochranou.

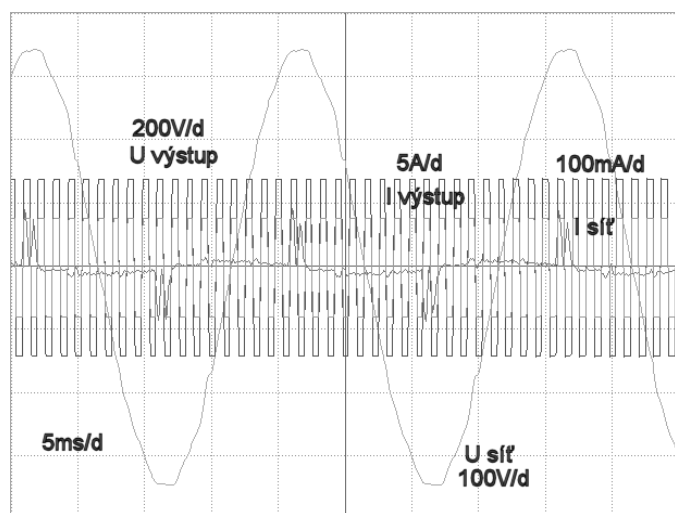


Obr. 9 Příklad provedení vypínání topného tělesa pomocí jednoho DC stykače.

V následujících odstavcích budou znázorněny některé typické průběhy napětí a proudů v obvodu, tak jak je zachytil síťový analyzátor LMG670. Výstupní průběhy budou pro názornost ukázány na třech testovaných regulátorech, které mají různě řešen vnitřní měnič.

Střídavý obdélníkový signál o vyšší frekvenci

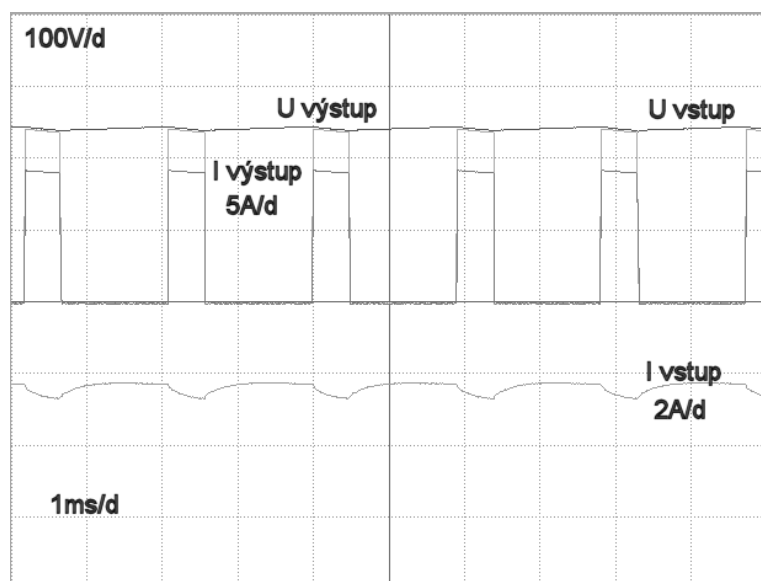
Obr. 10 ukazuje průběhy napětí a proudu na výstupu měniče NECT společně s průběhy napětí a proudu odebíraného ze sítě při režimu napájení z FVE. Měnič ze sítě odebírá jen velmi malý výkon, který slouží k provozu elektroniky (jednotky wattů). Měnič poskytuje na svém výstupu střídavý proud obdélníkového průběhu s frekvencí přibližně 1 kHz.



Obr. 10 Charakteristické výstupní signály u vybraných regulátorů - NECT. Kopie obrazovky LMG670, s doplněním měřítek jednotlivých signálů. Časová základna je 5 ms/d, síťové napětí má sinusový průběh, měnič odebírá ze sítě zanedbatelný proud, se špičkami typickými pro můstkový usměrňovač s kapacitní zátěží (bez PFC). Výstupní napětí je obdélníkové a díky odporovému charakteru zátěže, tvarově shodné s výstupním proudem.

Pulzující DC napětí

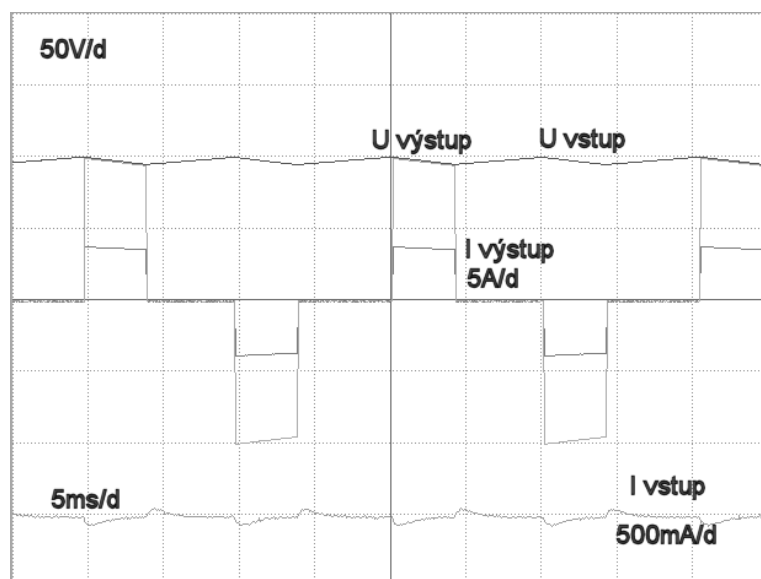
Odlisný průběh proudu a napětí je na výstupu regulátoru SUNW, Obr. 11. Tento měnič poskytuje na svém výstupu tepavý stejnosměrný proud s frekvencí přibližně 500 Hz.



Obr. 11 Charakteristické výstupní signály u vybraných regulátorů - SUNW. Kopie obrazovky LMG670, s doplněním měřitek jednotlivých signálů. Časová základna je 1 ms/d. Vstupní proud z FV pole má mírné zvlnění (na obrázku je průběh proudu invertován) Vstupní napětí je také mírně zvlněno, jeho hodnota je totožná se špičkovou hodnotou napětí výstupního (obě křivky mají měřítko 100 V/d) Výstupní proud a napětí mají charakter obdélníkových DC pulsů s periodou 2 ms.

Modifikovaný sinus, 50Hz

Regulátor MARK poskytuje na výstupu průběh nazývaný modifikovaný sinus s frekvencí blízkou 50 Hz, Obr. 12.



Obr. 12 Charakteristické výstupní signály u vybraných regulátorů - MARK. Kopie obrazovky LMG670, s doplněním měřitek jednotlivých signálů. Časová základna je 5 ms/d. Vstupní

proud z FV pole má mírné zvlnění (na obrázku je průběh invertován). Vstupní napětí je také mírně zvlněno, jeho hodnota je totožná se špičkovou hodnotou napětí výstupního (obě křivky mají měřítko 50 V/d). Výstupní proud i napětí mají shodný obdélníkový průběh, výstup má charakter střídavého napětí (obdélníky s mezerou) které je nazýváno modifikovaný sinus.

ZÁVĚR

V rámci testů bylo měřeno 5 typů regulátorů určených pro ohřev vody pomocí FV modulů. Ukázalo se, že všechny regulátory jsou provozuschopné, nicméně jsou mezi nimi rozdíly, co se týče provozní účinnosti, požadavků na vlastní instalaci i doplňkových funkcí. Provedené hodnocení mělo za úkol ověřit především dynamické vlastnosti těchto regulátorů. Všechny regulátory prokázali schopnost sledovat bod maximálního výkonu, bohužel některé z testovaných vzorků poněkud zaostávali v rychlosti reakcí na změny, tyto systémy jsou pak logicky méně účinná v podmínkách s proměnou intenzitou slunečního záření. Z hlediska okamžitých hodnot účinnosti jsou na tom všechny regulátory více méně stejně i když i zde je vidět vliv rozdílu v použité topologii měničů. Pro konečné hodnocení byl aplikován kombinovaný test, který nejlépe vyjadřuje schopnosti zařízení získávat energii z FV systému. Výstupem tohoto testu je graf na obrázku 8, který demonstruje schopnost měniče využít dostupnou energii v dynamickém režimu osvitů a předat ji do zátěže.

Důležitá při výběru je též cena regulátoru včetně případného nutného dalšího příslušenství, která nebyla v uvedeném testu hodnocena. Hodnotit cenu je problematické, protože u tohoto typu zařízení je nutno počítat i životnost systému. Cena je také ovlivněna dalším dostupným příslušenstvím, jako jsou datová rozhraní pro monitoring a vzdálenou správu systému a v neposlední řadě obchodní marží.

Závěrem bychom rádi poděkovali všem výrobcům či dodavatelům za bezplatné zapůjčení regulátorů.

Použité zdroje

- [1] BECHNÍK, B. Příprava teplé vody – fotovoltaika nebo solární tepelné kolektory? *TZB-Info*. 2013
- [2] MATUŠKA, T., ŠOURE, B. Porovnání solárního fototermického a fotovoltaického ohřevu vody. *TZB-Info*. 2014
- [3] WOLF, P. Optimalizace fotovoltaického systému pro přípravu teplé vody. *TZB-Info*. 2013