

Možnosti aplikace renovovaných fotovoltaických modulů

prof. Ing. Jaroslav Knápek, CSc., ČVUT v Praze; Ing. Ladislava Černá, Ph.D., ČVUT v Praze; Ing. Karel Soukup, Ph.D., ÚCHP AV ČR, v.v.i.; Tomáš Pešek, REMA Systém, a. s.; Ing. Bc. Kamila Vávrová, Ph.D., Výzkumný ústav pro krajinu, v. v. i.

Souhrn

Práce se zabývá možnostmi opětovného využití (reuse) fotovoltaických modulů v agrivoltaických aplikacích, konkrétně ve skleníkových systémech. Vybrané moduly byly podrobeny diagnostice zahrnující UV fluorescenční zobrazování, měření izolačního stavu, elektroluminiscenční analýzu a měření elektrických parametrů. U modulů s nevyhovujícím izolačním stavem byla aplikována renovace pomocí silikonového zapouzdření zadní strany. Následně byly moduly znovu testovány a instalovány na konstrukci skleníku. Výsledky potvrzují technickou proveditelnost navrženého řešení, přičemž identifikovaným kritickým prvkem se ukázaly být konektorové spoje.

Summary

This study addresses the possibilities of reusing photovoltaic (PV) modules in agrivoltaic applications, specifically in greenhouse systems. Selected modules were subjected to diagnostic assessment including UV fluorescence imaging, insulation resistance measurements, electroluminescence analysis, and electrical parameter characterization. Modules exhibiting insufficient insulation properties were refurbished using silicone encapsulation applied to the rear side. Subsequently, the modules were retested and installed on a greenhouse structure. The results confirm the technical feasibility of the proposed approach, while connector assemblies were identified as a critical limiting factor.

Klíčová slova: reuse; fotovoltaika; LCOE

Úvod

S prudkým rozvojem fotovoltaiky začala vyvstávat otázka likvidace odpadu z fotovoltaických (PV) modulů, též nazývaných (nesprávně) solární panely. Ačkoliv se celosvětově řeší problematika budoucího velkého množství odpadu, již méně se diskutuje o hierarchii odpadového hospodářství, kde je na prvním místě příprava k opětovnému použití - reuse. Koncept opětovného využití fotovoltaických modulů (reuse) umožňuje prodloužení jejich životního cyklu bez nutnosti energeticky náročného materiálového zpracování. Tento přístup je zvláště relevantní v situaci, kdy moduly již nespĺňují požadavky pro standardní instalace, avšak jejich funkčnost zůstává zcela nebo částečně zachována. Reuse však není univerzálně aplikovatelný a jeho realizace vyžaduje systematické posouzení technického stavu, bezpečnosti a vhodnosti konkrétní aplikace.

Agrivoltaické systémy představují vhodné prostředí pro aplikaci takto repasovaných modulů, jelikož kombinují výrobu elektrické energie s ochranou pěstovaných plodin. V případě skleníkových konstrukcí může instalace modulů zároveň ovlivnit mikroklimatické podmínky, což otevírá další výzkumné otázky.

Reuse fotovoltaických modulů

Opětovné využití fotovoltaických modulů přináší kromě splnění legislativní povinnosti několik zásadních benefitů:

- Environmentální přínos – prodloužení životního cyklu modulů vede ke snížení potřeby výroby nových zařízení a tím i ke snížení uhlíkové stopy a materiálové náročnosti.
- Ekonomická dostupnost – repasované moduly mohou výrazně snížit investiční náklady, což je výhodné zejména pro aplikace s nižšími požadavky na výkonovou hustotu (tzn. nejsou limity z pohledu plochy instalace).
- Vhodnost pro specifické aplikace – např. agrivoltaika, kde není maximální výkon na jednotku plochy vždy prioritou a částečné zastínění může být dokonce žádoucí.

Kromě benefitů však existují také značná rizika:

- Technická rizika
 - degradace izolačních vlastností → riziko úrazu elektrickým proudem
 - pronikání vlhkosti → další degradace
 - selhání konektorů (potvrzeno experimentem)
- Provozní rizika
 - nižší a nestabilní výkon
 - vyšší pravděpodobnost poruch
- Bezpečnostní a legislativní rizika
 - absence jasných standardů pro reuse
 - otázky odpovědnosti za provoz
- Ekonomická rizika
 - cena reuse modulů ve vztahu k návratnosti celého budoucího systému

Technické parametry

První tři typy rizik jsou do značné míry svázány s technickými parametry PV modulů a k jejich eliminaci je nutné provést důkladný výběr modulů, které jsou následně otestovány, a tím se stanoví parametry, které je dále možné zahrnout do klasických provozních rizik. V první řadě je třeba určit, které moduly jsou pro reuse vhodné a které nikoliv. Mezi klíčová technická kritéria pro výběr modulů lze zařadit několik zásadních kritérií:

- mechanická integrita (poškození skla a dalších částí modulu, mikrotrhliny, delaminace),
- izolační stav modulu,
- absence elektrochemické koroze,
- stav periferních komponent.

Třídění je vhodné provést už přímo v místě původní instalace, jelikož jsou tím optimalizovány náklady na demontáž a následnou přepravu modulů (v případě nevyhovujícího stavu není při demontáži nutné brát na moduly přílišný ohled). Pro základní třídění je možné využít vizuální kontrolu, která nevyžaduje speciální vybavení, pro starší moduly lze využít s úspěchem také tzv. UV fluorescenci, která sice není příliš rozšířenou metodou, ale pro třídění starších typů modulů se ukázala jako velmi užitečná.

UV fluorescence u PV modulů je diagnostická metoda založená na tom, že některé materiály v modulu (zejména pouzdrící materiály jako EVA – ethylenvinylacetát) po ozáření vhodným ultrafialovým (UV) světlem vyzařují viditelné světlo – fluorescenci. Při buzení UV zářením dochází v materiálu k excitaci elektronů v chemických vazbách nebo v přítomných degradačních produktech, a jejich následná relaxace vede k emisi světla o delší vlnové délce. Rozložení a intenzita fluorescence se využívá k neinvazivnímu hodnocení stavu modulů, a to díky různým vlastnostem EVA v závislosti na vlhkosti. V případě průniku vlhkosti ze zadní strany modulu na přední stranu modulu, např. přes mikrotrhlinu, dochází ke zničení UV absorbérů v EVA, a tím k „zániku“ fluorescence. Výsledkem je vizualizace takto postižených oblastí. Nevýhodou metody je, že je velice závislá na konkrétním složení PV modulu, a tudíž u některých typů nemusí k fluorescenci docházet vůbec (např. nové typy PV modulů obecně fluoreskují jen velice v malé míře). Metoda tudíž není univerzální.

Podrobnější metodou, která je schopná u již předtříděných modulů ukázat další vady, je elektroluminescence. Metoda využívá rekombinačního záření, kdy je modul napájen zdrojem proudu a rekombinační záření je snímáno speciální kamerou. Části, které „nesvítlí“, představují defekty. Na základě závažnosti defektů je pak možné rozhodnout, zda je modul nadále vhodný pro provoz či nikoliv.

Izolační stav modulu je nutné ověřit pomocí standardních metod pro testování izolačního stavu – tzv. HiPot testy (měření izolačního odporu, elektrické pevnosti). Vzhledem k časové náročnosti je vhodné tyto testy využít až v případě, kdy modul v ostatních testech vyhoví.

Poslední kontrolou je pak stav elektrických parametrů, který může být značně ovlivněn také periferními komponenty, zejména konektory. Pro určení štítkových parametrů je možné využít standardních metod jako např. flash testu.

Ekonomické parametry reuse PV modulů

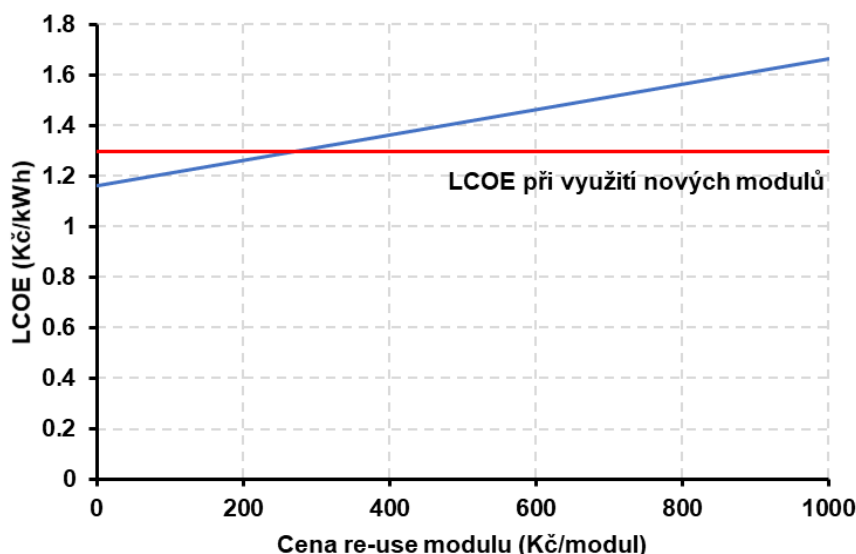
Přestože reuse moduly jsou ve své podstatě odpadem, jejich cena není nulová, jak by se mohlo zdát, ale je potřeba zvážit další náklady spojené se znovužitím. Jedná se zejména o náklady na sběr, třídění, testování, případnou renovaci (náštřík, konektory), atp. Pro hodnocení výhodnosti lze využít standardní metodiku pro stanovení nákladů, a to LCOE – levelized cost of electricity:

$$LCOE = \frac{CAPEX(PV) + CAPEX(BOS) + \sum_{t=1}^N \frac{OPEX}{(1 + Cena_{peněz})^t}}{\sum_{t=1}^N EY \cdot \frac{(1 - Degradace)^t}{(1 + Cena_{peněz})^t}}$$

kde CAPEX představuje pořizovací náklady na PV moduly a Balance of System Components (BOS), OPEX provozní náklady (v podstatě údržbu), t rok provozu, EY energetickou výtěžnost v prvním roce provozu a $Cena_{peněz}$ diskontní sazbu.

Tabulka 1: LCOE re-use modulů, použité hodnoty pro výpočet vycházejí částečně z [2] po přepočtu na Kč, částečně z vlastních analýz

Parametr	Jednotka	Nový modul	Re-use modul
MPP	W_p	310	224
Životnost	Roky	30	15
Cena modulu	Kč/kW _p	6250	2150
Cena BOS - závislé na ploše	Kč/kW _p	3800	5250
Cena BOS - nezávislé na ploše	Kč/kW _p	1875	1875
OPEX	Kč/kW _p /rok	425	425
Degradace	%	0,7	0,7
Diskont (cena peněz,	%	4,9	4,9
EY v 1. roce	kWh/kW _p /rok	1000	1000
LCOE	Kč/kWh	1,29	1,38



Obrázek 3: Citlivostní analýza LCOE ve vztahu k ceně reuse modulů

Z uvedené analýzy je patrné, že cena modulu hraje u komerčních instalací značný vliv, a tudíž je nutné je instalovat buď tam, kde není dostatečná kupní síla pro pořízení investice, nebo převládají jiné parametry (např. taxonomie a environmentální kritéria).

Případová studie – systém na skleníku s využitím reuse PV modulů

Výběr modulů a měření parametrů

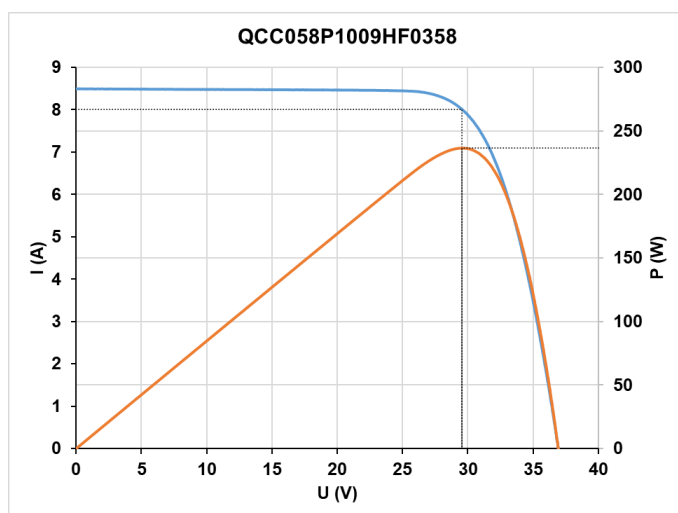
Pro ověření možností instalace a také další sledování parametrů instalovaných modulů v čase byl uveden do provozu PV systém na skleníku, který zároveň umožňuje sledovat vliv instalace na pěstované plodiny (květiny) uvnitř skleníku.

Pro experimentální část byly vybrány fotovoltaické moduly s degradovaným izolačním stavem, avšak bez známek pokročilé materiálové a výkonové degradace. Tyto moduly byly mimo jiné vybrány s ohledem na fakt, že by za normálních okolností byly určeny přímo k likvidaci, a jejich využitím je zároveň možné zkoumat vlastnosti a funkčnost nástřiků pro dodatečnou izolaci zadní strany.

Diagnostika zahrnovala:

- UV fluorescenční analýzu pro identifikaci elektrochemické koroze – předvýběr,
- měření izolačního stavu,
- elektroluminiscenční (EL) zobrazování pro detekci mikrotrhlin a defektů článků,
- měření výkonových parametrů PV modulů.

Na základě UV fluorescenčního měření byly nejprve z dalšího zpracování vyřazeny moduly vykazující známky elektrochemické degradace. Do renovace byly zahrnuty pouze moduly bez těchto defektů, u nichž bylo možné předpokládat zachování funkčnosti po úpravě. Po roztřídění byl na všechny vybrané PV moduly aplikován speciální silikonový nástřik [1] a následně změřeny parametry v laboratoři pomocí flash testeru. Všechny testované moduly měly výkon prakticky převyšující očekávanou úroveň - jednalo se o moduly s původním výkonem 240 W_p a změřený výkon byl v průměru cca 230 W_p . Podle garancí by však mohl být výkon teoreticky i na úrovni 195 W_p .



$I_{sc} =$	8,49	A
$V_{oc} =$	36,93	V
$\eta =$	14,17	%
FF =	75,48	%
$P_{MAX} =$	236,60	W
$V_{Pmax} =$	29,55	V
$I_{Pmax} =$	8,01	A
$R_s =$	0,50	Ω
$R_p =$	621,52	Ω

Obrázek 1: Ukázka naměřených dat na jednom PV modulu

Instalace modulů

Repasované moduly byly instalovány na konstrukci skleníku s důrazem na:

- statické zatížení konstrukce,
- způsob ukotvení,
- zachování provozní funkčnosti skleníku (světelné podmínky, přístup, ventilace).

Během instalace se jako kritický prvek ukázaly konektorové spoje. V důsledku opakované manipulace a stárnutí materiálu docházelo ke zhoršení jejich těsnosti, což vedlo nakonec k jejich nefunkčnosti již ve fázi uvádění do provozu. Všechny konektory tak musely být vyměněny. Tento faktor představuje

významné praktické omezení při reuse starších modulů, resp. ukazuje na nutnost preventivní výměny konektorů. Přestože v laboratorních podmínkách moduly fungují.

S ohledem na instalaci, kdy bude sledováno stárnutí a chování komponent, byly ke všem PV modulům instalovány také výkonové optimizéry, které umožňují sledování výkonu jednotlivých modulů. Konfigurace modulů byla zvolena východ-západ, do spodní části skleníku (viz Obrázek 2).



Obrázek 2: Instalace reuse PV modulů na skleníku v areálu VÚKOZ

Závěr

V rámci práce byly zkoumány možnosti využití reuse modulů z pohledu technicko-ekonomických kritérií. Při výběru modulů byly využity moduly s nevyhovujícím izolačním stavem, což na rozdíl od klasických instalací nemusí být nutně limitující, jelikož provádění nástřiku jako součást reuse v místě zpracování modulů je násobně méně náročné než v případě provádění v místě instalace. Pro rychlé třídění je možné využít i méně známé metody, jako např. UV fluorescence. Kritickým místem z pohledu technických parametrů jsou zejména konektory, kde lze doporučit jejich výměnu vždy.

Z environmentálního hlediska představuje reuse významnou možnost snížení materiálové náročnosti a prodloužení životního cyklu výrobků. Na druhou stranu z pohledu ekonomického je vždy nutné přesně zvážit všechny aspekty budoucí instalace.

V budoucí práci bude studován kromě technických parametrů systému také vliv částečného zastínění na mikroklima a pěstební procesy, které jsou předmětem probíhajícího experimentu.

Tento projekt je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu NCK, projekt č. TN02000044 BIOCIRKL.

Reference

- [1] Finsterle, Tomáš & Kasper, Jan & Hrzina, Pavel & Knap, Vaclav & Cerna, Ladislava. (2025). The effect of backsheet repairs on insulation resistance in photovoltaic modules. *Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly*. 156. 10.1007/s00706-025-03314-8.
- [2] N. Rajagopalan, A. Smeets, K. Peeters, S. De Regel, T. Rommens, K. Wang, P. Stolz, R. Frischknecht, G. Heath, D. Ravikumar. c2021. Preliminary Environmental and Financial Viability Analysis of Circular Economy Scenarios for Satisfying PV System Service Lifetime. In: *Home - IEA-PVPS* [online]. Německo: IEA-PVPS, 11-2021. Dostupné z: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/11/IEA_PVPS_T12_Preliminary-EnvEcon-Analysis-of-module-reuse_2021_report.pdf