Зборник радова факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 621.311.243
ДОИ: https://doi.org/10.24867/35UI01Misura

# Одржавање кровних фотонапонских електрана

## *Maintenance of Rooftop Photovoltaic Power Plants*

Николета Мишура, Золтан Чорба, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

**Студијски програм: ЧИСТЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ**

**Кратак садржај –** *У овом раду анализирано је одржавање кровних ФН електрана. Дефинисан је програм прегледа, чишћења, мониторинга, безбедности и радни показатељи ради повећања поузданости, производње и економске исплативости.*

**Кључне речи:** *Кровне фотонапонске електране, одржавање и управљање, поузданост, мониторинг*

**Abstract** – *In this master's paper, the O&M system of rooftop PV power plants is analyzed, and an inspection, cleaning, monitoring, safety, and key performance indicators program is defined to improve reliability, energy yield, and economic profitability.*

**Keywords:** *Rooftop PV power plant, Operation and maintenance, Key performance indicators*

**НАПОМЕНА: Овај рад је проистекао из мастер рада чији је ментор био др Золтан Чорба, ванр. проф.**

## 1. УВОД

Соларна енергија представља један од најважнијих и најчистијих обновљивих извора, а фотонапонски (ФН) системи омогућавају њену директну конверзију у електричну енергију путем ФН ћелија [1]. Иако имају бројне предности, перформансе ФН система зависе од више фактора, при чему је запрљање панела један од кључних узрока пада производње и економских губитака, а може довести и до „врућих тачака“ (hot spots) и убрзане деградације [2]. Зато су редовно одржавање и чишћење неопходни, јер могу повећати принос и продужити век система, посебно код кровних електрана где приступ и безбедност имају посебан значај [3]. Циљ рада је анализа проблема запрљања, деградације и приказ препорука добре праксе за одржавање кровних ФН електрана.

## 2. ЕЛЕМЕНТИ КРОВНЕ ФОТОНАПОНСКЕ ЕЛЕКТРАНЕ

Кровна фотонапонска (ФН) електрана састоји се од више повезаних компоненти које омогућавају производњу и безбедан пренос електричне енергије (слика 1): ФН панели, носећа конструкција, ДЦ каблови, конектори, ДЦ/АЦ разводни ормари, inverter, мерење и мониторинг, као и заштита од пренапона/грома и уземљење [2].

ФН панели (различитих технологија: моно, поли, танкослојни, бифацијални, PERC, TOPCon, HJT) имају bypass диоде које смањују ризик од „hot-spot“ ефекта, а њихова ефикасност зависи од параметара попут снаге, напона/струје и температуре [5].




Слика 1 Елементи кровне ФН електране

Конструкција се бира према типу крова и мора издржати ветар, снег и корозију, док ДЦ део (каблови/конектори) захтева квалитетне спојеве због ризика од кварова и пожара [2].
Инвертер претвара једносмерни (ДЦ) напон у наизменични (АЦ) напон и оптимизује рад система (string, микро, хибридни, off-grid итд.), АЦ део омогућава прикључак на мрежу по правилима оператора, мониторинг прати производњу, а пренапонска заштита (SPD) и правилно уземљење штите опрему од пренапона и удара грома. Смарт метар мери токове енергије и може омогућити „zero-export“ режим (нема слања енергије у мрежу) [3].

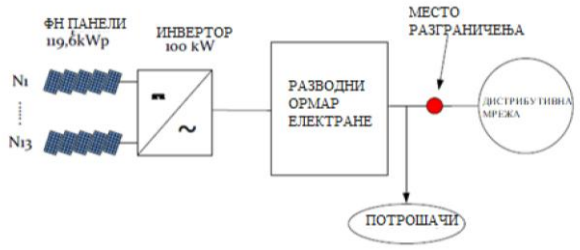
## 3. ПРИМЕР КРОВНЕ ФОТОНАПОНСКЕ ЕЛЕКТРАНЕ СНАГЕ 100kW

Приказан је пример кровне ФН електране називне излазне снаге 100 kW, димензионисане тако да усклади захтеве инвеститора, услове прикључења и могућности објекта. У табели 1 приказани су основни подаци пројектованог ФН система, појединачна снага, број и снага ФН панела и инвертора.

Табела 1 Основни подаци о електрани

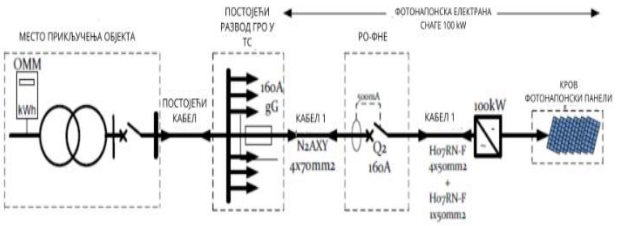
| Номинална излазна снага ФН електране 100kW | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Номинална улазна снага ФН електране (номинална снага ФН панела) 115kWp | | | | | |
| Инвертор | | | ФН панели | | |
| Појединачна снага | Број | Укупна снага | Појединачна снага | Број | Укупна снага |
| [kW] | Ком. | [kW] | [Wp] | Ком. | [kWp] |
| 100 | 1 | 100 | 460 | 250 | 115 |

Систем је пројектован са једним стринг инвертером снаге 100kW, док је ФН панел снаге 460 Wp. Панели се монтирају на кров од трапезастог лима помоћу алуминијумске конструкције. Блок шема је приказана на слици 2.

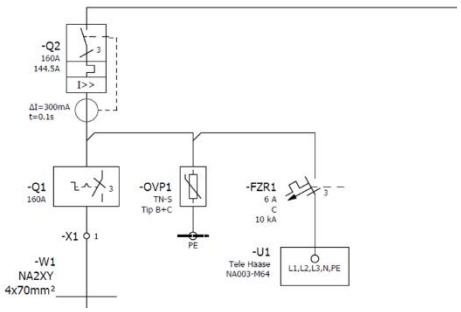



Слика 2 Блок шема ФН електране

ДЦ део је изведен кроз повезивање панела у стрингове који се доводе на МППТ улазе invertera ради оптималног рада, а АЦ део обухвата прикључење преко постојећег развода уз одговарајуће каблове, прекидаче и заштите (главна склопка, пренапонска заштита, прекидач 160 А са диференцијалном заштитом), као и мрежни заштитни релеј Tele Haase NA003-M64 за надзор напона, фреквенције и antiostrvcky заштиту [3]. На слици 3 је дата блок шема наизменичног струјног кола, а на слици 4 део једнополне шеме, улазно нисконапонско коло.




Слика 3 Блок шема наизменичног струјног кола




Слика 4 Улазно нисконапонско коло

## 4. ПРЕПОРУКЕ У ОДРЖАВАЊУ КРОВНИК ФОТОНАПОНСКИХ ЕЛЕКТРАНА

Правилно одржавање кровних фотонапонских електрана је кључно за стабилну производњу, безбедност и дугорочну исплативост, јер приступ „инсталирај и заборави" води паду перформанси, застојима и већим трошковима. Систем одржавања и управљања (O&M - Operation & Maintenance) смањује техничке и финансијске ризике, снижава цену електричне енергије, повећава период отплате инвестиције, продужава век опреме и обезбеђује усклађеност са регулативом и гаранцијама [2].

### 4.1 Стратегија одржавања

Стратегија одржавања обухвата следеће елементе:

Предиктовно (анализа података за прогнозу кварова планирање интервенција; може смањити трошкове 10–40%, али тражи напредан мониторинг).

- Одржавање засновано на ризику (фокус на критичне компоненте и оптималан однос трошка и ризика).
- Превентивно (временски или према стању; редовне инспекције, али може довести до непотребних трошкова без доброг критеријума).
- Коративно (после квара; скупо због губитка производње; интервенције од једноставних рестартова до сложених сервиса).
- Ванредно/реактивно (после олуја, града, пожара, поплава; најскупље и са дугим застојима) [3].

### 4.2 Специфичност одражвања кровних ФН система

Специфичности кровних система су рад на висини, тежи приступ, близина људи, чешће сенчење и већи релативни трошкови интервенција, па се наглашава поуздан мониторинг и добра даљинска дијагностика [4].

Препоручена динамика прегледа по компонентама:

- Конструкција: визуелно 6 месеци; механички 1× годишње; дотезање и антикорозија по потреби.
- Панели: визуелно квартално; термовизија 1× годишње; I–V мерења на ~2 године; чишћење 2–4× годишње према губицима.
- ДЦ каблови/конектори: визуелно квартално; термовизија и изолација 1× годишње; замена при оштећењу или прегревању.
- Инвертер: мониторинг месечно; физички преглед квартално; сервис годишње; вентилатори 3–5 годишње, инвертер 10–15 година.
- Развод и заштите: месечна контрола; квартално затезање/чистоћа; годишње термовизија и тест заштита; SPD типично до 5 година или по индикатору.
- Громобранска инсталација и уземљење: 1× годишње, уземљење <10 Ω; контрола размака LPS–DC >50 cm.

- Смарт метар: комуникација месечно; провера/калибрација по потреби [5].

На слици 5 приказани су примери оштећења ДЦ конектора и инвертора.

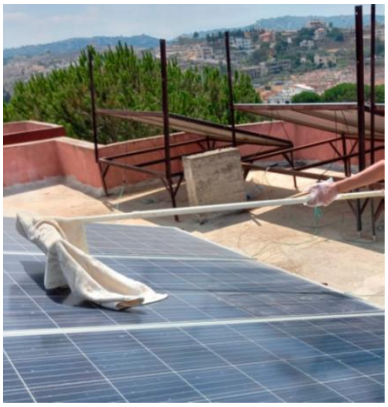


Слика 5 Оштећени ДЦ конектор и изгорели инвертер

### 4.3 Методе чишћења ФН панела

Постоји више метода чишћења ФН панела. Неки од њих су:

- природно (зависи од климе),
- ручно (скупо и ризично) (слика 6),
- машинско (ризик од оштећења),
- аутоматизовано (брисачи, млазнице, роботи),
- камионско (за велика поља уз услове простора) (слика7),
- дронови (без контакта, углавном прашина),
- самочишћење и хлађење (аутономно), самочистећи премази (уз ограничења),
- електростатичко – без воде, врло ефикасно у сувим условима, али скупље.



Слика 6 Ручно чишћење ФН панела



Слика 7 Камионско чишћење ФН панела

### 4.4 Показатељи и параметри за ефикасно управљање и одржавање ФН система

Ефикасно управљање и одржавање (O&M) фотонапонских електрана захтева континуирано праћење перформанси, трошкова и поузданости система. У ту сврху дефинишу се различити радни показатељи перформанси (KPI - Key Performance Indicators) који омогућавају:

- процену стања електране, идентификацију техничких и енергетских губитака,
- доношење оптималних одлука у процесу одржавања,
- праћење испуњења уговорних обавеза (O&M уговори, гаранције перформанси).

Енергетски индекс перформанси представља алтернативни приступ вредновању перформанси читавог система:

$$\boldsymbol{EPI} = \frac{\boldsymbol{Y}_{\text{meas}}}{\boldsymbol{Y}_{\text{exp}}} \quad (1)$$

где су:
$\boldsymbol{Y}_{\text{meas}}$– измерени принос,
$\boldsymbol{Y}_{\text{exp}}$– очекивани принос из модела.
Енергетски индекс упоређује измерени принос ФН електране са очекиваним приносом. IEC 61724-3 сатндард дефинише енергетску расположивост као однос енергије која би била очекивана у периодима када је електрана расположива и укупне очекиване енергије:

$$\boldsymbol{A}_{\text{energy}} = \frac{\boldsymbol{Y}_{\text{exp}} - \boldsymbol{Y}_{\text{unavailable}}}{\boldsymbol{Y}_{\text{exp}}} = \frac{\boldsymbol{Y}_{\text{exp,available}}}{\boldsymbol{Y}_{\text{exp,total}}} \quad (2)$$

где су:
$\boldsymbol{Y}_{\text{exp}}$ – укупно очекивани принос у посматрном периоду
$\boldsymbol{Y}_{\text{unavailable}}$ или $\boldsymbol{Y}_{\text{exp,loss}}$– очекивана изгубљена енергија због недоступности система,
$\boldsymbol{Y}_{\text{exp,available}}$– очекивана енергија у периодима када је систем био доступан.

### 4.5 Безбедносни аспекти монтаже ФН система на објектима

Фотонапонске електране, без обзира да ли су постављене на тлу или на објекте, представљају електроенергетска постројења са значајним безбедносним ризицима. Основне групе ризика укључују:

- електрични удар (ДЦ и АЦ кола),
- пад са висине,
- пожар,
- механичке повреде,
- неповољни временски услови (ветар, лед, снег, екстремне температуре),
- животиње (глодари, птице, инсекти),
- хемикалије (чистачи, пестициди, хербициди).

Пожарна заштита мора бити пројектована тако да омогући безбедну интервенцију ватрогасаца.
За системе снаге веће од 30 kW:

- препоручује се ватрогасна инспекција,
- присуство ватрогасаца на пуштању у рад,
- израда специјалног плана поступања за ватрогасце.

Мора постојати јасна документација:

- положај АЦ и ДЦ ормара,
- положај заштите диференцијалне струје,
- положај инвертора,
- положај "против-пожарног прекидача",
- положај разводног ормара, приступи крову, пролази и зоне опасности [6].

### 4.6 Управљање резервним деловима

Управљање резервним деловима (Spare Parts Management) један је од кључних елемената за смањење застоја и обезбеђење високе расположивости кровних ФН система. Добра пракса је да резервни делови формално припадају власнику електране, док је O&M сервисер одговоран за њихово складиштење, услове чувања, евиденцију потрошње и благовремено допуњавање [5].

### 4.7 Подаци мониторинг и сајбер-безбедност

Савремени O&M за кровне ФН системе у великој мери зависи од доброг мониторинга, јер омогућава да се кварови и пад производње уоче на време. Типичан систем мониторинга обухвата логер података који прикупља информације са инвертора, енергетских бројила, сензора сунчевог зрачења (пиранометар), температуре панела, као и са локалне метеоролошке станице. Пожељно је да логер има меморију за најмање један месец података, са временском резолуцијом до 15 минута. Подаци се затим приказују преко веб портала или SCADA платформе, где се прате графици, аларми и извештаји. Отворени интерфејси додатно олакшавају интеграцију са аналитичким алатима и прелазак на друге платформе.

### 4.8 Циркуларна економија и крај животног века

Како број ФН панела расте, расте и проблем опреме на крају животног века. O&M се зато све више ослања на циркуларну економију: продужење употребе, поправка и поновна употреба, реупотреба панела у мање захтевним условима и рециклажа.
Крај животног века и циркуларност подразумева планирање поправке, поновне употребе и рециклаже, праћење опреме кроз цео животни циклус и избор конструкције која олакшава демонтажу и замену [4].

## 5. ЗАКЉУЧАК

Одржавање кровних ФН електрана је кључно да систем током целог радног века испоручује планирану енергију уз минималне застоје и контролисане трошкове. Због специфичности кровова (приступ, простор, нагиб и безбедност рада), O&M мора бити прилагођен објекту, јер приступ „инсталирај и заборави" доводи до пада перформанси, застоја и већих трошкова. Систематичан програм прегледа обухвата панеле и конструкцију, ДЦ каблове, конекторе, инвертор, разводне ормане као и мониторинг, уз праћење радних показатеља ради ране детекције кварова и деградације. Савремени O&M се ослања на податке, даљински надзор и сајбер-безбедност (контрола приступа, шифрована комуникација, ажурирања), док дронови, термовизија и вештачка интелигенција подижу одржавање ка предиктивном и смањују непотребне интервенције. Заштитта на раду је основа свих активности (рад на висини, електрични ризици, пожар), а будућност O&M укључује циркуларну економију кроз поправку, поновну употребу и рециклажу опреме. Квалитетан O&M смањује ризике, снижава цену електричне енергије, побољшава период отплате инвестиције и продужава век опреме, па је стратешки важан део животног циклуса кровних ФН система.

## 6. ЛИТЕРАТУРА


[1] Anitha Shaju; Rani Chacko, „Soiling of photovoltaic modules- Review'', IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Bristol, UK, 2018.

[2] Javed, Wasim, and Bing Guo. Laboratory calibration of a light scattering soiling sensor. Sol. Energy 236 (2022)

[3] MCS: *Guide to the Installation of Photovoltaic Systems*, London, 2012.

[4] Barkhouse DAR, Gunawan O, Gokmen T, Todorov TK, Mitzi DB. Identification of technical risks in the photovoltaic value chain and quantification of the economic impact. Prog Photovolt, Res Appl 2015;20(1):6–11

[5] Rediske G, Michels L, Cezar Mairesse Siluk J, Donaduzzi Rigo P, Brum Rosa C, Jochann Franceschi Bortolini R. Management of operation and maintenance practices in photovoltaic plants: Key performance indicators. Int J Energy Res 2022;46(6):7118–36

[6] Технички документ 73822 – Фотонапонски с истеми и његове компоненте 2021


**Кратка биографија:**




**Николета Мишура** рођена је у Сремској Митровици 2001. године. Дипломски рад на Факултету техничких наука из области Енергетских технологија – Утицај запрљања на карактеристике фотонапонских панела – одбранила је 2024. год.
Контакт: misuranikoleta@gmail.com





**др Золтан Чорба** докторирао је на Факултету техничких наука 2016. год., а од 2021. је у звању ванредни професор. Област интересовања су фотонапонски системи и други обновљиви извори енергије.