



## REFERAT - IX

**Viktor Martinčič univ. dipl. inž. el.,**  
*viktor.martincic@eti.si*

**mag. Mitja Koprivšek, univ. dipl. inž. el.**  
*mitja.koprivsek@eti.si*

**Brane Lebar, inž. el.,**  
*brane.lebar@eti.si*

### **ZAŠČITA ENOSMERNIH TOKOKROGOV V FOTOVOLTAIČNIH ELEKTRARNAH**

**Povzetek:**

*Prispevek v prvem delu obravnava novosti na področju uporabe varovalk v PV elektrarnah, še posebej glede na hitro rastoče področje uporabe obnovljivih virov energije, pri čemer ni zanemarljiv tudi prispevek hitrega razvoja standardizacije na tem področju. Obravnavani bodo tudi nekateri dodatni pogoji obratovanja, ki do sedaj niso bili poznani, povezani pa so z dodatnimi cikličnimi preskusi varovalk. Drugi del je namenjen škodljivemu pojavu obloka v PV tokokrogih, njegovemu vzroku in škodljivim posledicam. Obravnavani bodo nekateri principi zaščite pred serijskim in paralelnim oblokom, ki so dandanes znani v svetu. Na koncu pa bodo podani nekateri novi predlogi za rešitev tega problema.*

## 1. PRIMER IZRAČUNA PREOBREMENITVENE ZAŠČITE PV SISTEMA

### UVOD

Na svetu je v obratovanju že na tisoče PV (fotonapetostnih – oziroma »PhotoVoltaičnih« inštalacij različnih moči - od tistih najmanjših moči nekaj 100W do več deset MW PV central. To dejstvo bi nam morda dalo misliti, da je določanje pravilne pretokovne zaščite utečeno in rutinsko delo, vendar na žalost ni tako.

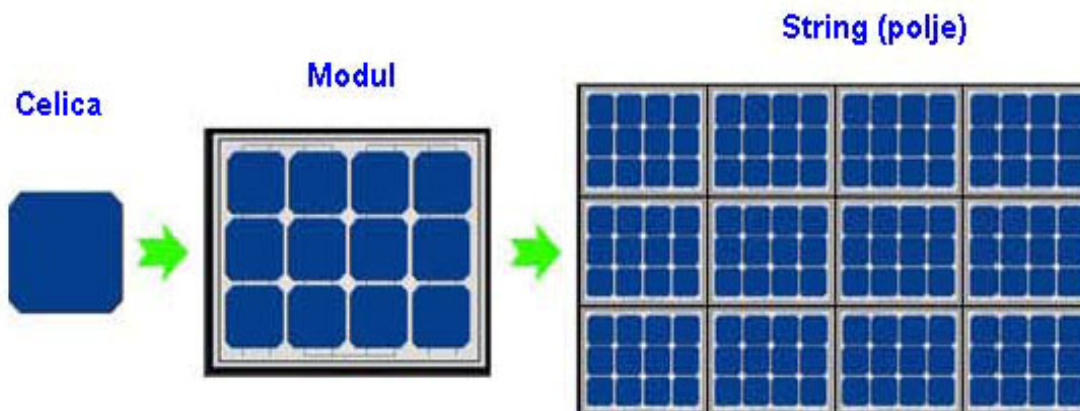
Če pogledamo stanje v praksi nekoliko podrobneje, vidimo da napr. proizvajalci PV modulov za določen tip priporočajo uporabo talilnega vložka z nazivnim tokom 20A, proizvajalci inverterjev prisegajo na 16A talilni vložek, medtem ko inštalaterji izberejo talilni vložek z nazivnim tokom 12A. Podobno je tudi pri izboru napetosti – nekateri izberejo nazivno napetost talilnega vložka na osnovi podatka o napetosti odprtih sponk instalacije ( $U_{OC\ INST}$  - Open Circuit INSTalation) pri standardnih testnih pogojih (STC – standard Test Condition), drugi si za osnovo izberejo maksimalno sončno sevanje, ki se lahko pojavi naprimer samo v Španiji....

### Katero priporočilo je torej pravilno in katero pot naj izbere konstrukter pretokovne zaščite PV sistema?

Enega od odgovorov in eno od možnih poti bomo poskušali prikazati v naslednjih nekaj korakih, kjer bo prikazan primer izbora pravilne varovalke in navedeni bodo tudi razlogi za določene odločitve.

Kot osnovo za izračun pravilne zaščite s PV talilnimi vložki si bomo izbrali inštalacijo srednje velike fotonapetostne elektrarne s skupno močjo **30kW z devetimi stringi povezanimi paralelno, v vsakem stringu je zaporedno vezanih 18 modulov.**

Na na sliki 1. je grafično prikazano kaj je »fotonapetostna celica«, kaj je »modul« in kaj je »string« oz. polje ali angl. »array«.



Slika 1.

Za osnovo v tem primeru bomo izbrali kristalno-silicijev fotonapetostni modul vršne moči 221W, proizvajalca BISOL d.o.o. iz Prebolda in podatke o pretokovni zaščiti serije talilnih vložkov CH10 PV proizvajalca ETI d.d. iz Izlak.

Podatki iz kataloga BISOL d.o.o. so prikazani na slikah 2. in 3. električni podatki izbranega modula so označeni z rumeno barvo.

Razredi moči							
Vršna moč	$P_{mpp}$	210 W <sub>p</sub>	215 W <sub>p</sub>	218 W <sub>p</sub>	221 W <sub>p</sub>	224 W <sub>p</sub>	227 W <sub>p</sub>
Napetost vršne moči	$U_{mpp}$	28,2 V	28,5 V	28,7 V	28,7 V	28,9 V	29,1 V
Tok vršne moči	$I_{mpp}$	7,45 A	7,55 A	7,60 A	7,70 A	7,75 A	7,80 A
Napetost odprtih sponk	$U_{oc}$	36,5 V	36,6 V	36,7 V	36,8 V	36,8 V	36,9 V
Kratkostični tok	$I_{sc}$	8,15 A	8,20 A	8,25 A	8,30 A	8,35 A	8,40 A

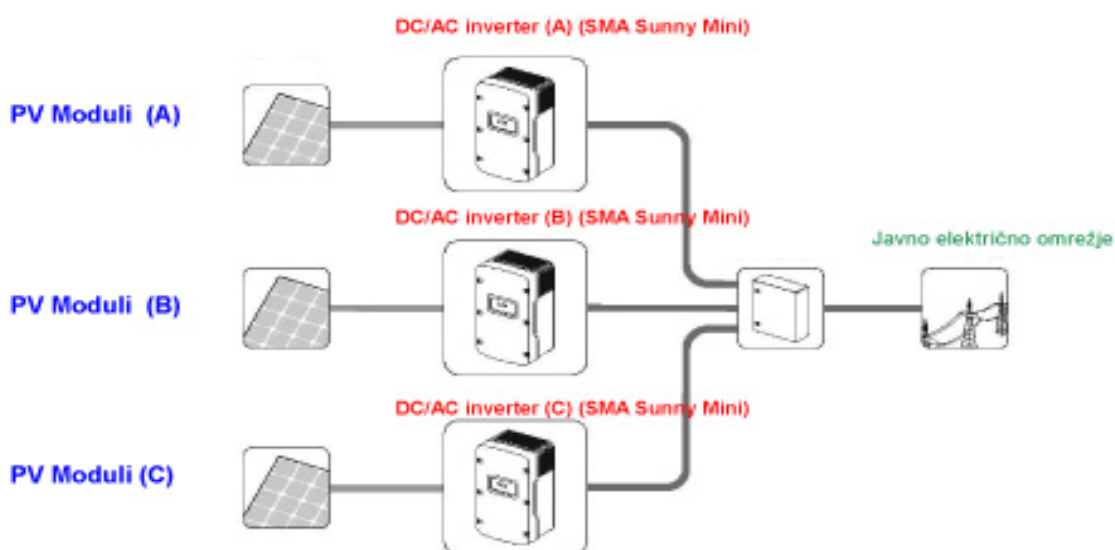
Vsi električni parametri so podani pri standardnih pogojih testiranja (AM 1,5; 1.000 W/m<sup>2</sup>; 25°C).

Slika 2.

Električne Lastnosti	
Tip sončnih celic	Multikristalni silicij
Dimenzije sončnih celic	156 x 156 mm (6+")
Število celic in vezava	60 zaporedno
Toleranca izhodne moči	± 3 %
Temperaturni koeficient toka	$\alpha$ + 5,5 mA/°C
Temperaturni koeficient napetosti	$\beta$ - 120 mV/°C
Temperaturni koeficient moči	$\gamma$ - 0,40 %/°C
NOCT	44 °C
Maksimalna sistemska napetost	1000 V <sub>DC</sub> (IEC)
Dolžina x Širina x Debelina	1649 x 991 x 40 mm
Teža	18,5 kg
Učinkovitost pretvorbe celic	$\eta_c$ 14,4 % - 15,7 %
Učinkovitost pretovrbe modula	$\eta_m$ 12,9 % - 14,1 %

Slika 3.

Grafični prikaz obravnavane inštalacije je prikazan na naslednji shemi, Obravnavali bomo PV sistem, ki je sestavljen iz devetih stringov, v vsakem od njih je zaporedno vezanih 18 modulov. Po trije stringi so vezani na DC/AC inverter, torej za predstavljen PV sistem rabimo tri DC/AC inverterje, ki so na shemi označeni kot A, B, in C. Podatki, potrebni za izračun vseh pomembnih parametrov PV sistema pa so prikazani v Tabelah 1 in 2 :



Slika 4.

<b>Tabela 1: Podatki uporabljenega PV modula</b>	
Napetost vršne moči $P_{MPP}$	$U_{MPP\ MOD} = 28,7V$
Napetost odprtih sponk	$U_{OC\ MOD} = 36,8V$
Tok vršne moči	$I_{MPP\ MOD} = 7,7A$
Kratkostični tok	$I_{SC\ MOD} = 8,3A$
Temperaturni koeficient toka $I_{SC}$	$\alpha = 5,5mA/^{\circ}C$
Temperaturni koeficient napetosti $U_{OC}$	$\beta = 120mV/^{\circ}C$
Maksimalna temperatura celice	$44^{\circ}C$

<b>Tabela 2: Podatki izbrane inštalacije</b>	
Število stringov	$N = 9$
Število modulov v stringu	$M = 18$
Napetost polja $U_{MPP\ MOD} \times M$	$U_{ARRAY} = 516V$
Napetost odprtih sponk stringa $U_{OC\ MOD} \times M$	$U_{OC\ ARRAY} = 662V$
Temperatura v razdelilni omari	$70^{\circ}C$
Najnižja dovoljena okoliška temperatura	$-25^{\circ}C$
Sevanje	$1200\ W/m^2$

Izbor pravilnega gPV talilnega vložka za zaščito 30MW sončne elektrarne, v kateri so uporabljeni PV moduli proizvajalca BISOL s podatki navedenimi v tabelah 1. in 2. bo prikazan v naslednjih štirih korakih:

## 1. Določitev nazivne napetosti varovalke $U_{PV\ MAX}$

Za določitev nazivne napetosti varovalke je najpomembnejši podatek o napetosti odprtih sponk modula – glej tabelo 1. Ta napetost se seveda lahko pojavi v primeru najnižje dovoljene temperature okolice (glej podatke v tabeli 2), ki so jo še sposobni prenesti vgrajeni moduli. To napetost bomo imenovali testna napetost PV sistema  $U_{TPV\ MAX}$  (ne pa nazivna napetost !!) in je seveda višja od maksimalne napetosti odprtih sponk stringa. Vsa oprema, torej tudi talilni vložki morajo biti dimenzionirani na to napetost.

Določanje  $U_{TPV\ MIN}$  pri  $-25^{\circ}C$  poteka torej po naslednjem postopku:

- vsi podatki za točko MPP, torej Maximum Power Point ali »Točka Največje Moči« veljajo za  $+25^{\circ}C$
- STC (Standard Test Condition) pomeni standardne testne pogoje pri sevanju  $1000\ W/m^2$ , okoliško temperaturo  $+25^{\circ}C$ . in spektralno porazdelitev (AM – Air Mass) 1,5
- $\Delta T = 50^{\circ}C$  (razlika med najnižjo dovoljeno temperaturo  $-25^{\circ}C$  in STC temperaturo  $+25^{\circ}C$ )

Izračun za en modul:

$$U_{OC\ MOD\ STC} \geq U_{OC\ MOD} + (\beta \times \Delta T)$$

$$U_{OC\ MOD\ STC} \geq 36,8V + (120mV/^{\circ}C \times 50^{\circ}C)$$

$$U_{OC\ MOD\ STC} \geq 36,8V + (6V)$$

(Napetost odprtih sponk modula je pri  $-25^{\circ}C$  je lahko za 6V višja od tiste pri  $25^{\circ}C$ )

$$U_{OC\ MOD\ STC} \geq 42,8V$$

Maksimalna (teoretično) dosežena napetost stringa je torej

$$U_{P\ MAX} \geq U_{OC\ MOD\ STC} \times M$$

$$U_{TPV\ MAX} \geq 42,8 \times 18 = 770V$$

V primeru MPP toka modula 7,7A in napetosti odprtih sponk celetnega stringa 770V, torej kot preobremenitveno zaščito PV modulov izberemo **CH10 gPV talilne vložke ETI nazivne napetosti vsaj 770V**, kar v praksi pomeni izbor 1000V/900V d.c. talilnih vložkov.

Izračun nazivnega toka talilnega vložka je predstavljen v naslednji točki.

## 2. Določitev nazivnega toka PV talilnega vložka

Standardne testne okoliščine (STC - Standard test conditions) so seveda pomembne tudi pri izračunu »pravega« nazivnega toka talilnega vložka, torej

Tabela 3: Podatki uporabljenega PV modula	
Temperatura okolice 70 <sup>0</sup> C (glej karakteristiko temperaturne odvisnosti ETI PV talilnih vložkov na sl. 5)	<b>K<sub>TH</sub> = 0,9</b>
Faktor ciklične obremenitve (za gPV talilne vložke)	<b>A<sub>2</sub> = 0,9</b>
Prilagoditveni faktor (zaradi večjega števila varovalčnih ločilnikov v razdelilni omari)	<b>K<sub>25</sub> = 1</b> <b>(samo trije talilni vložki v eni skupini)</b>

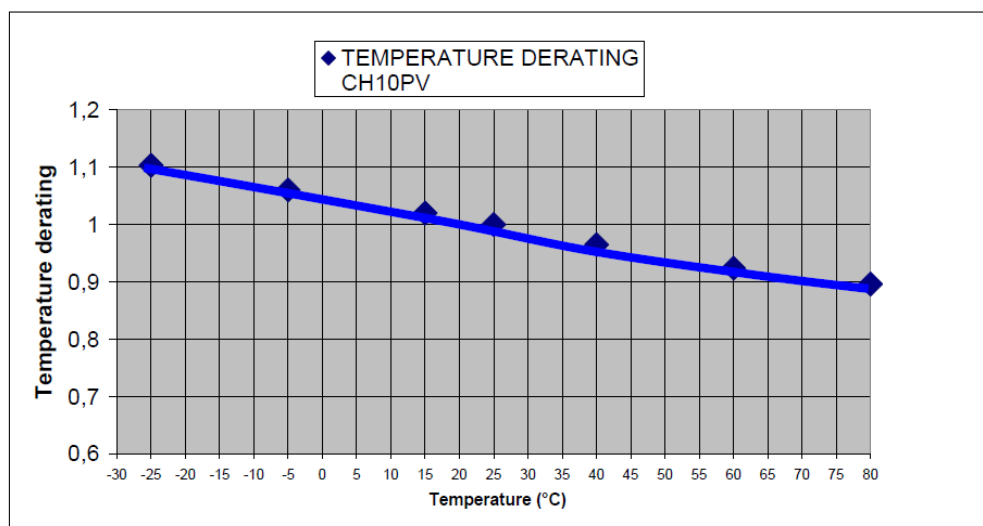
Izračun:

$$I_{N\ MIN} = I_{MPP\ MOD} / K_{TH} / A_2 / K_{25}$$

$$I_{N\ MIN} = 7,7 / 0,90 / 0,90 / 1$$

$$I_{N\ MIN} \geq 9,5A$$

**Izberemo I<sub>N</sub> = 10A** (kot naslednjo standardno vrednost nazivnega toka talilnega vložka)



Slika 5.

V naslednjem delu preračunavanja bo potrebno izbrani nazivni tok preveriti »reducirati« še enkrat, tokrat z redukcijskimi faktorji, povezanimi s temperaturnim koeficientom toka I<sub>sc</sub>, vplivom okoliške temperature in maksimalne dovoljene temperature celice.

Dobljeni »reducirani« tok bomo imenovali I<sub>N RED</sub> in mora biti višji od kratkostičnega toka modula I<sub>sc</sub>'.

### 3a. Določitev »reduciranega« nazivnega toka talilnega vložka – prvi poskus

$$I_{N\text{RED}} = I_N \times K_{TH} \times A_2 \times K_{25} = 10 \times 0,90 \times 0,90 \times 1 = 8,1 \text{ A}$$

Pri izračunu kratkostičnega toka  $I_{SC}'$  upoštevamo razliko med STC temperaturo  $+25^{\circ}\text{C}$  in maksimalno temperaturo celice, ki je  $44^{\circ}\text{C}$ , torej je temperaturna razlika  $\Delta T=19^{\circ}\text{C}$

$$I_{SC}' = I_{SC\text{MOD}} \times (1 + (\Delta T \times \alpha)) = 8,3 \times (1 + 19 \times 5,5 \cdot 10^{-3}) = 8,34 \text{ A}$$

Dovoljena osvetljenost je  $1200 \text{ W/m}^2$ , torej moramo vrednost kratkostičnega toka preračunati na to vrednost osvetljenosti in sicer:

$$I_{SC}' = 8,34 \times 1,2 = 10 \text{ A}$$

**Zahteva  $I_{N\text{RED}} > I_{SC}'$  ni izpolnjena, ker  $8,1 \text{ ni} > 8,34 \text{ !!}$**

Zato je potreben izbor naslednjega nazivnega toka CH PV talilnega vložka, **torej 16A !!**, ki je prikazan na naslednji sliki 6.



Slika 6.

### 3b. Določitev »reduciranega« nazivnega toka talilnega vložka – ponovljeni poskus

$$I_{N\text{RED}} = I_N \times K_{TH} \times A_2 \times K_{25} = 16 \times 0,90 \times 0,90 \times 1 = 13 \text{ A}$$

Pri izračunu kratkostičnega toka  $I_{SC}'$  upoštevamo razliko med STC temperaturo  $+25^{\circ}\text{C}$  in maksimalno temperaturo celice, ki je  $44^{\circ}\text{C}$ , torej je temperaturna razlika  $\Delta T=19^{\circ}\text{C}$

$$I_{SC}' = I_{SC\text{MOD}} \times (1 + (\Delta T \times \alpha)) = 8,3 \times (1 + 19 \times 5,5 \cdot 10^{-3}) = 8,34 \text{ A}$$

Dovoljena osvetljenost je  $1200 \text{ W/m}^2$ , torej moramo vrednost kratkostičnega toka preračunati na to vrednost osvetljenosti in sicer:

$$I_{SC}' = 8,34 \times 1,2 = 10 \text{ A}$$

**Zahteva  $I_{N\text{RED}} > I_{SC}'$  je izpolnjena, ker je  $13 > 10 \text{ !!}$**

## 4. Določitev izklopnih časov izbranega talilnega vložka

Osnovni kratkostični tok stringa izračunamo po enačbi

$$I_{SC\ STRING''} = I_{SC\ MOD} \times (N-1) = 8,3 (9 - 1) = 66A$$

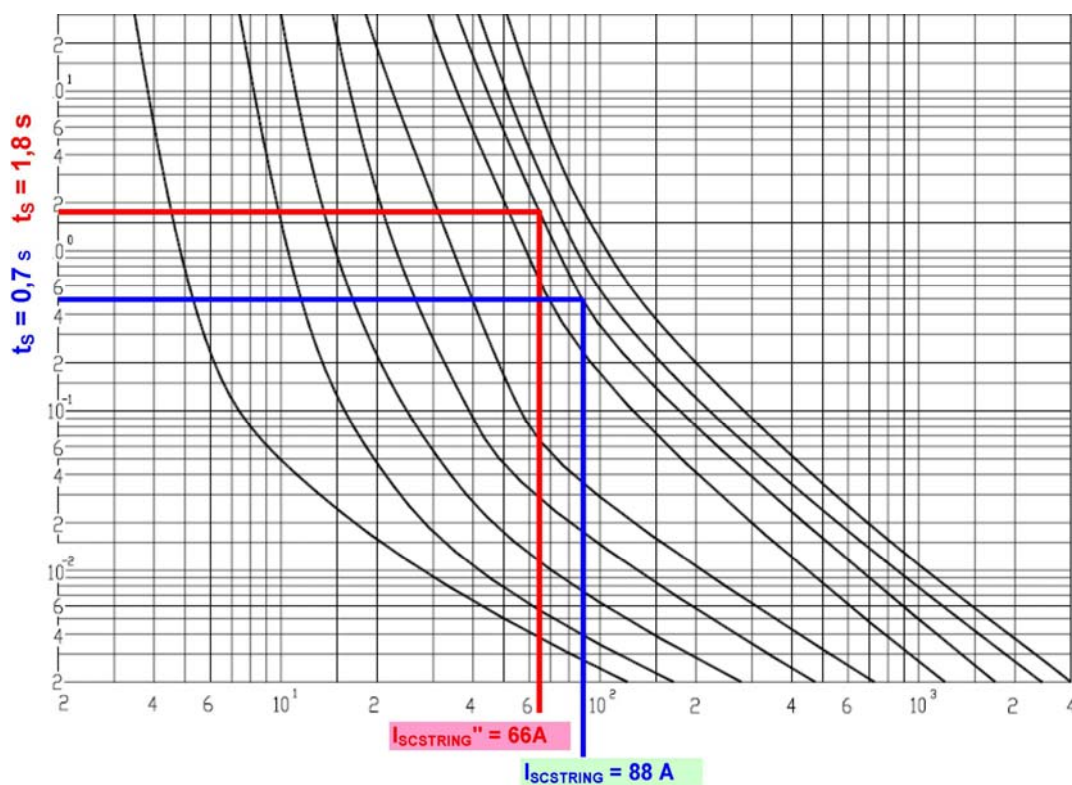
Pri izračunu kratkostičnega toka string-a  $I_{SC\ STRING'}$  moramo seveda upoštevati tudi razliko med STC temperaturo  $+25^{\circ}C$  in maksimalno temperaturo celice, ki je  $44^{\circ}C$ , torej je temperaturna razlika  $\Delta T=19^{\circ}C$

$$I_{SC\ STRING'} = I_{SC\ STRING''} \times (1 + (\Delta T \times \alpha)) = 66,4 \times (1 + (19 \times 5,5 \times 10^{-3})) = 73A$$

Dovoljena osvetljenost je  $1200\ W/m^2$ , torej moramo vrednost kratkostičnega toka stringa preračunati na to vrednost osvetljenosti in sicer:

$$I_{SC\ STRING} = I_{SC\ STRING'} \times 1,2 = 73 \times 1,2 = 88A$$

Izklopni časi pri  $I_{SC\ STRING''}$  in  $I_{SC\ STRING}$  so prikazani na sliki 7.



Slika 7.

Viri:

1. ETI d.d. Izlake, interni merilni rezultati, slikovno in izobraževalno gradivo
2. Prospektni material BISOL d.o.o., <http://bisol.si>
3. U.Hass, SIBA DE, »Just four steps to getting the PV fuse that suits your needs«

## 2. Problem obloka v PV sistemih

### Uvod:

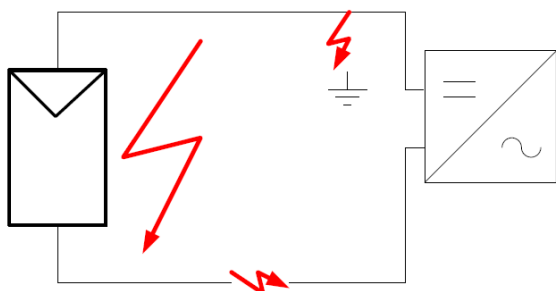
V tem članku želim predstaviti problem, ki je poznan trenutno le ožji strokovni javnosti. To je pojav obloka v PV sistemih. Pri nas problemov z oblokom zaenkrat še ni, v tujini pa jih je iz dneva v dan več.

Trg fotovoltaike v zadnjih letih raste skoraj po eksponencialni krivulji. Množica elektrarn, s tem pa tudi množica električnih spojev vodi do tega, da se nevarnost oblokov, ki lahko nastanejo zaradi slabih spojev, slabe izolacije strmo povečuje. K temu prispeva močno tudi časovna komponenta.

Verjetnost da bo prišlo do obloka je pri starejših sistemih je večja (slabša izolacija zaradi staranja, neodpornosti izolacije na UV žarke, popuščanje-oksidacija spojev) in s starostjo še narašča.

### Poznamo tri vrste oblokov v fotovoltaiki:

- serijski
- paralelni
- in oblok na ozemljitev



Slika 1

**Serijski oblok:** Nastane v seriji z bremenom. Vzrok zanj je povečevanje upornosti spoja, ki je lahko vijaki, konektorski. Spoj se zaradi povečane upornosti začne segrevati in če so izpolnjeni vsi pogoji za nastanek obloka oblok tudi nastane. Serijski oblok ni tako nevaren, ker se enostavno pogasi z izklopom bremena-inverterja. Zaradi tega je med PV generator in inverter potrebno vgraditi stikalo.

**Paralelni oblok:** Oblok nastane vzporedno z bremenom, PV generatorjem. Vzrok zanj je v slabi izolaciji, popuščanju izolacije s starostjo...Te vrste oblok je bolj problematičen za prekinitev. Ni ga možno pogasiti s tem da odklopimo breme. Gašenje je tudi otežkočeno zaradi tega ker panele ni možno v tej meri zasenčiti, da bi oblok ugasnil. Ponavadi ugasne sam preko noči, ko se mu prekine dovod energije zaradi sončnega obsevanja. Do takrat pa se na objektu lahko marsikaj zgodi, še posebno če je strešna konstrukcija lesena. (privat hiša...)

**Oblok na zemljo:** Nastane pri sistemih, ki nimajo ločilnega transformatorja in pri sistemih pri katerih je negativna (-) sponka ozemljena. Tipičen oblok na ozemljitev je lahko oblok ki nastane na prenapetostni zaščiti.



Problemi z oblokom so široko opisani v raznih tehničnih prezentacijah, ki jih najdemo na internetni strani:

<http://labs.hti.bfh.ch/index.php?id=2161&L=2>

### **Informacije s trga:**

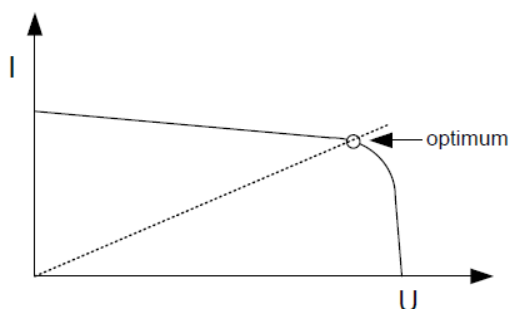
Prve informacije s trga že opisujejo probleme na posameznih PV elektrarnah, predvsem starejših od 10 let, kjer je prišlo do požarov. Najbolj poznan je požar na dveh elektrarnah Mt. Soleil 1992, CH-farmhouse 1994, v zadnjem času pa tudi Photon 8/06, Burgdorf).

Ker je elektrarn, ki so starejše od 10 let v svetu še malo, se lahko v prihodnosti pričakuje prava epidemija težav katerih vzrok bodo raznorazni obloki. Najboljši poznavalci celo trdijo, da bo ta problem osnovni problem zaščite PV sistemov v prihodnosti.

### **Karakteristika PV sistemov:**

PV sistemi so še posebno izpostavljeni obloku, ker imajo specifično karakteristiko PV generatorja. Karakteristika PV generatorja (Slika 2) je tokovni generator-tok je konstanten v večjem delu karakteristike neglede na napetost.

To je tudi razlog, da »klasični« pretokovni zaščitni elementi ob paralelnem obloku ali obloku na ozemljitev ne prekinejo tokokroga.



Slika 2

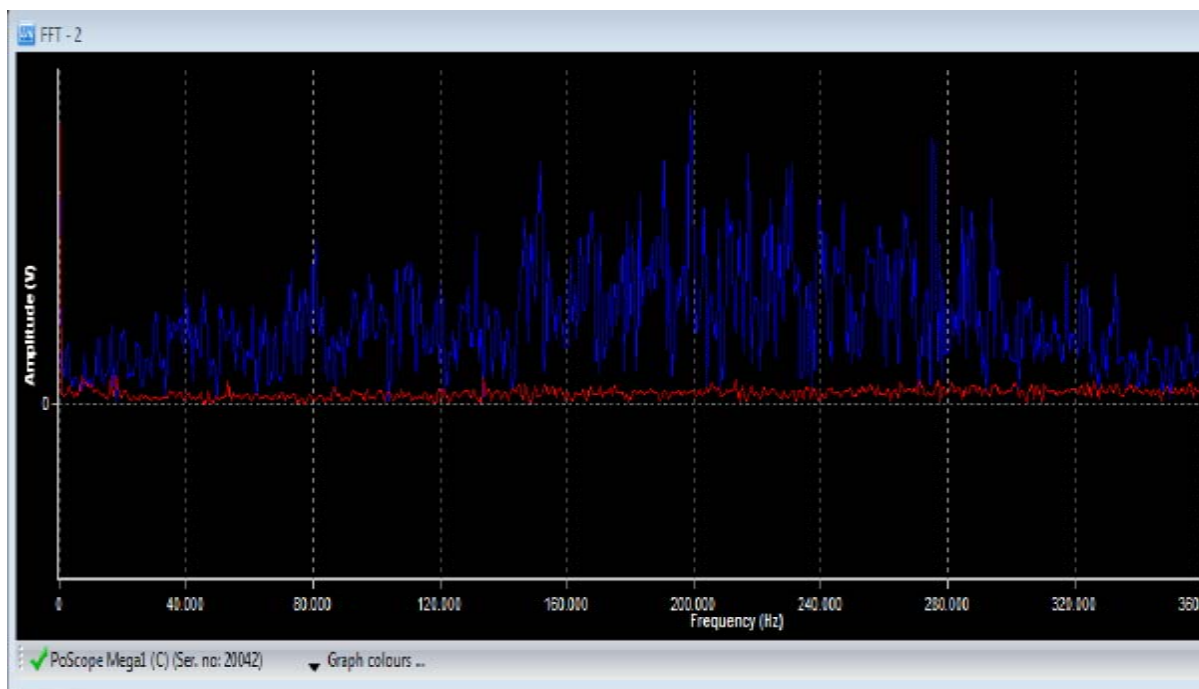
### **Spektralna analiza serijskega obloka:**

Za prve raziskave obloka smo izdelali simulator obloka, ki je generiral oblok pri enosmerni napetosti 500V d.c. in toku cca. 500mA (slika 3).

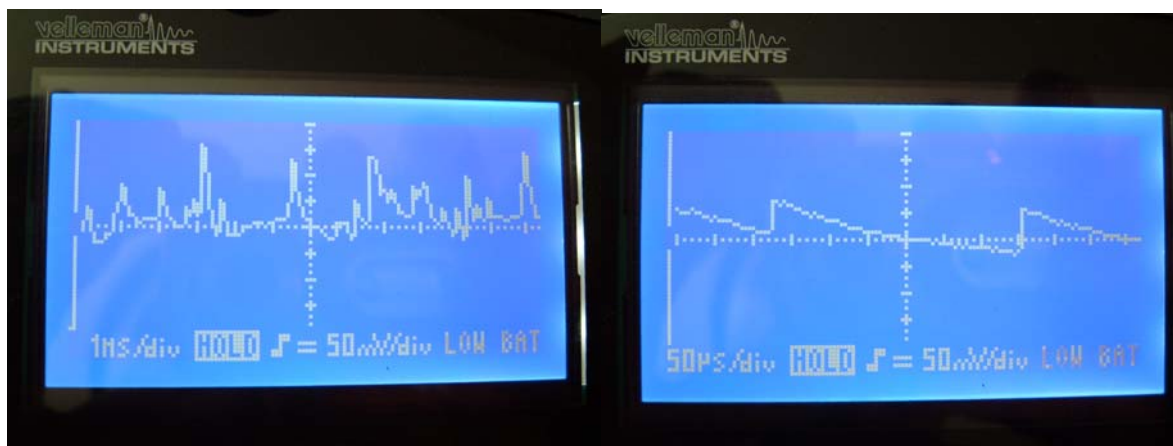


Slika 3

V naslednji fazi smo posneli spektralno sliko-frekvenčni odtis obloka, glej prilogo 1. Rezultat te analize je spekter frekvenc od nekaj kHz do nekaj 100kHz. Najmočnejše izstopajo frekvence od 100 do 300kHz. V prihodnosti nameravamo raziskavo še razširiti na višje tokove do 10A. Pri teh tokovih pričakujemo v spektru močnejše zastopane nižje frekvence.



Priloga 1-spektralna analiza signala, ki ga generira serijski oblok, 500V d.c., 500mA d.c.

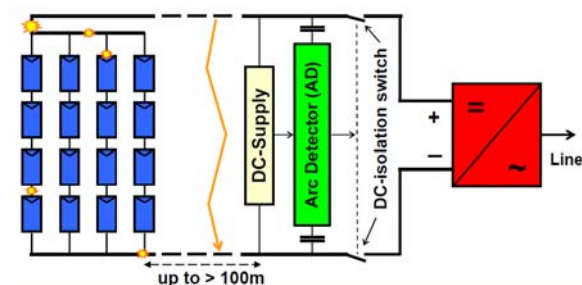


Priloga 2-Oblika signala, ki ga generira serijski oblok, 500V d.c., 500mA d.c.

Časovna baza 1ms in 50  $\mu$ s

### **Tehnična rešitev problema:**

V svetu obstaja kar nekaj rešitev za detekcijo obloka, ki so v glavnem elektronske.



Slika 4, elektronski detektor, slika vir "H\_Haeberlin\_Arc-det Workshop 2007-10-31"

### Njihova slabost je:

- elektronska izvedba (občutljivost na prenapetosti)
- potrebujejo zunanje napajanje
- relativno visoka lastna poraba (5-10W)
- kompliciran sistem detekcije
- običajna montaža je pred inverterjem

### Idejna rešitev ETI-ja, ki je že v fazi patentiranja je:

- robustna elektromehanska izvedba s samo pasivnimi elektronskimi elementi ( neobčutljiva na prenapetosti)
- stikalo ne potrebuje zunanjega napajanja
- lastna poraba je zanemarljiva
- možna vključitev kjerkoli v tokokrogu, lahko tudi med paneli (ne potrebuje napajanja)

**»AFSD- Arc fault switch disconnecter«**

bo obločno stikalo katerega osnovna funkcija bo zmožnost prekinitve kjerkoli v tokokrogu. Stikalo bo imelo dodatno funkcijo detekcije serijskega in paralelnega obloka.

**Zaključek:**

V tem kratkem članku je bil problem obloka nakazan kot problem, ki se bo v prihodnosti čedalje pogosteje pojavljal. ETI d.d. je s tem problemom seznanjen in že razvija izdelek ki bo na tem področju zaščite pomenil novost.

**Literatura:**

-interno gradivo ETI d.d.

-<http://labs.hti.bfh.ch/>