

MILYEN HATÁSSAL VAN A NAPELEM BORÍTÓRÉTEGÉNEK TÖRÉSE A NAPELEM VILLAMOS KARAKTERISZTIKÁIRA?

EFFECTS OF THE CRACKS IN THE COATING LAYER ON THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF A SOLAR CELL

Hörömpöli Balázs^{1, 2*}, Dr. Rácz Ervin²

¹ Óbudai Egyetem Alkalmazott Informatikai és Alkalmazott Matematikai Doktori Iskola
1034 Budapest, Bécsi út 96/B Budapest, Hungary

² Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Villamosenergetikai Intézet
1034 Budapest, Bécsi út 96/A Budapest, Hungary

Kulcsszavak:

törött borítórétegű napelem,
villamos áram–feszültség
karakterisztika, Pasan Flasher

Keywords:

broken covering sheet, electric
current-voltage characteristic,
Pasan flasher

Cikktörténet:

Beérkezett 2018. augusztus 01.
Átdolgozva 2018. szeptember 04.
Elfogadva 2018. október 01.

Összefoglalás

Cikkünk célja, hogy megmutassuk, milyen hatással van egy hagyományos kristályos szilícium napelemre a napelemet borító védőréteg károsodása, törése, behálósodása. Cél még a kapcsolatkeresés a már ismert és megfigyelt napelem hibás működését leíró jelenséggel és a köztük lévő lehetséges párhuzam bemutatása.

Abstract

Aim of the paper is showing effect of some kinds of damages like breaking or broken mesh structure generation on the covering sheet of the general crystalline solar cell. Another aim is to look for connections between the mentioned effects and the phenomenon describes some malfunctions at the operation of photovoltaic panel. Additional goal of the paper is introducing connections in between them.

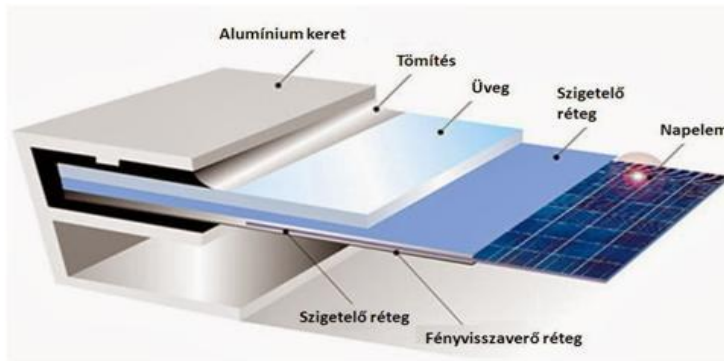
1. Bevezetés

Napjainkban a folyamatosan növekvő villamosenergia igény miatt egyre nagyobb teret nyernek a megújuló energiaforrások. Ennek egyik megjelenési formája a napelem. A ma használatos konvencionális napelemek szilícium bázisú félvezető struktúrák, amelyek a fényelektromos jelenség elvén működnek. A napelemeket tervezésük és gyártásuk során számos környezeti paraméterre és fizikai hatásra is tesztelik, hogy még ellenállóbbak legyenek a környezeti viszonyosságokkal szemben. Ennek ellenére előfordul, hogy jégverés, kavics felverődés (pl.: utak mellett), emberi mulasztás stb. károsítja ezeket a modulokat. Ennek következtében a napelemeket borító védő üvegréteg összetörik, behálósodik. Sok esetben ilyenkor a napelem nem megy tönkre teljesen; tovább üzemel. Az ilyen esetekben kérdéssé válik, hogy a meghibásodás a napelem rendszerből történő kivételét teszi-e szükségessé, vagy sem. A cikkünk egy törött borítórétegű napelem villamos paramétereinek vizsgálata során kapott eredményeket ismerteti, hasonlítja össze az ideális villamos áram–feszültség karakterisztikákkal. [1-4]

* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 1 666 5868; fax: +36 1 666 5829
E-mail cím: horompoli.balazs@kvk.uni-obuda.hu

2. A napelem általános felépítése

A napelemek cikkünk megértéséhez szükséges általános felépítését az alábbi 1. ábra mutatja.



1. ábra. Szilícium kristályos napelem általános, réteges felépítése. [5]

Amint az az ábrán látható, egy átlagos szilícium bázisú félvezető napelemet egy szigetelő réteg után egy edzett üveg réteg követ, ami a mechanikai behatásokkal szembeni védelemért felelős. Az éleket egy alumínium keret óvja a környezet mechanikai hatásaitól. Ennek ellenére a panelek számos módon megsérülhetnek (pl. villámcsapás, jégeső, jégverés, emberi mulasztás stb. ...). Természetesen a napelemgyártók, különböző töréstanulmányokkal (jégagyúval különböző szögekből, nagy sebességű baseball labdával és azzal közel azonos méretű jégdarabokkal lövik meg a paneleket) próbálják kiküszöbölni ezen hibákat, de teljesszörű, mindenre kiterjedő védelmet így sem tudnak biztosítani. [5]

3. A törött borítórétegű napelem és villamos áram–feszültség karakterisztikájának mérése

3.1. A törött borítórétegű napelem

A fentebb felsoroltakból adódóan – amint az a 2. ábra alapján is elmondható – megесik, hogy a napelemeket borító üvegréteg megsérül, behálósodik.

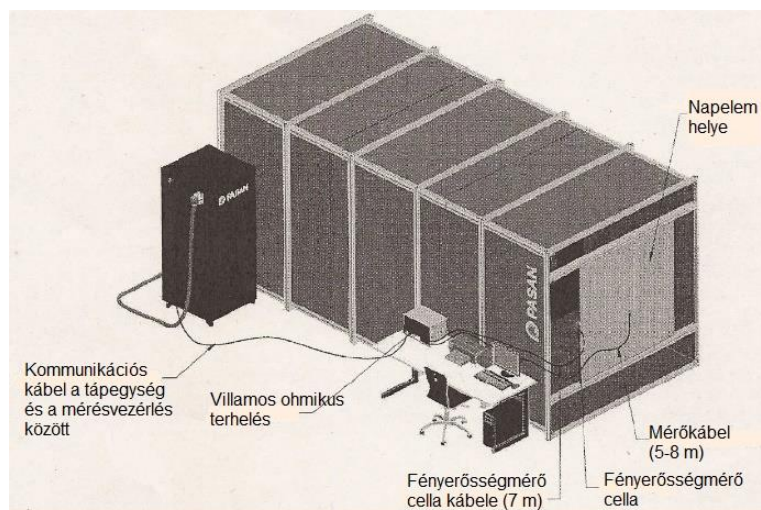


2. ábra. Az általunk vizsgált törött borítórétegű napelem.

A kép az általunk vizsgált polikristályos napelemről készült. A panel névleges adatai: maximális teljesítmény (P_{max}) 55 W (watt), munkaponti feszültség (U_{mp}) 17,3 V (volt) munkaponti áramerősség (I_{mp}) 3,18 A (amper).

3.2. A napelem villamos paramétereinek mérése

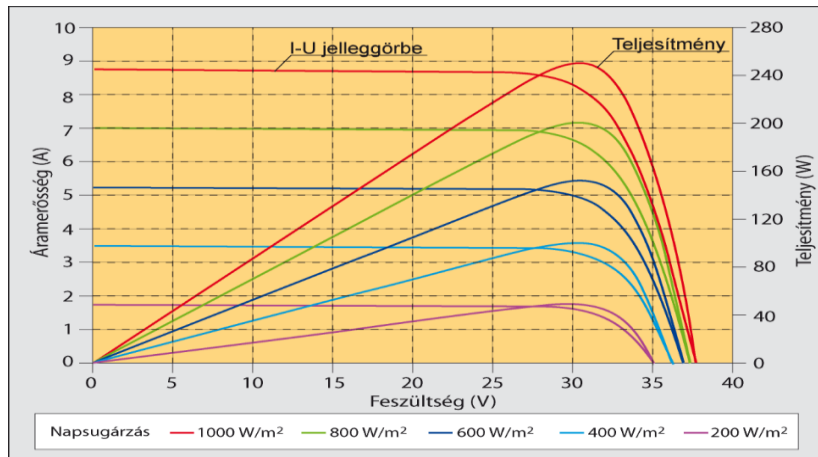
A törött napelem villamos paramétereinek vizsgálatát egy professzionális, Pasan Flasher villanólámpás berendezéssel végeztük el a németországi Hochschule Ulm egyetemen. A mérőrendszer nagy teljesítményű, jól definiált fényintenzitású, homogén, fehér fénnel (napfényszerű fénnel = napszimulátor) világítja meg a sötétkamra elejébe behelyezett napelemeket 10 ms hosszú időtartamig. Ezen idő alatt a berendezés 1900 mérést végez úgy, hogy a napelemre terhelőellenállásokat kapcsol, és így határozza meg az elektromos áram-feszültség, villamos teljesítmény-feszültség karakterisztikákat. Az eredményeket a rendszer részét képező személyi számítógépen szinte azonnal grafikus formában megjeleníti. Ezeket adatként CSV formátumban lehet elmenteni. A berendezés a mérési sorozatot 200 W/m^2 , 400 W/m^2 , 700 W/m^2 , 800 W/m^2 , 900 W/m^2 , $3 \times 1000 \text{ W/m}^2$ céltárgyra eső fényintenzitásokon végzi el. Vizsgálatunkhoz csak az 1000 W/m^2 és a 200 W/m^2 mérési eredményeket használtuk fel, mivel a napelem „meghibásodása” (=törött borítórétege) miatt csak ezek voltak mérhetőek. A mérési lánc az első villantást követően leállt és a többi intenzitáson óhajtott mérést már nem végezte el. Mivel a mérőlánc megfordítható, így az előzőekből következően csak a minimális 200 W/m^2 és a maximális 1000 W/m^2 fényintenzitás értékeken tudtunk használható adatokat lementeni. Ezen adatsorokat feldolgozva a napelem villamos paramétereiből előállított villamos karakterisztikákon megjelenő ideálistól eltérő jelleg volt megfigyelhető. A Pasan Flasher mérőberendezés felépítése a 3. ábrán látható. [6]



3.ábra. A Pasan Flasher mérőberendezés és főbb részei. [6]

4. Mérési eredmények

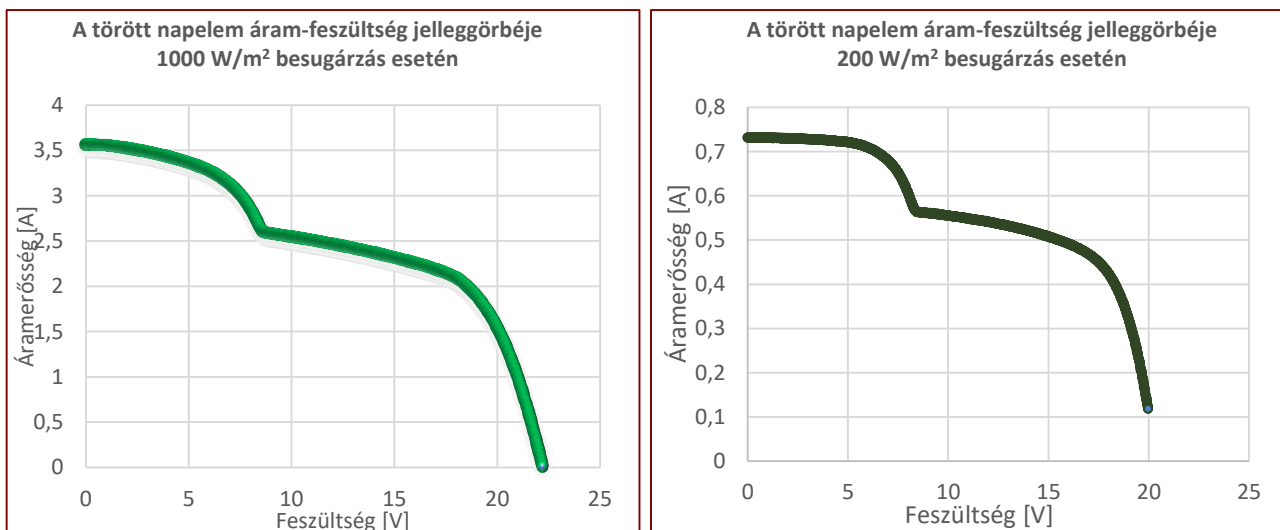
Annak érdekében, hogy érthetőek legyenek az általunk kapott eredmények és a sztenderd napelemekre jellemző eredmények közötti eltérések, fontos ismerni a szokványos szilícium alapú napelemek áram-feszültség, teljesítmény-feszültség karakterisztikáját, amelyek a 4. ábrán láthatók. Az ábrákon a függőleges tengelyen a napelem által termelt áram és a villamos teljesítmény, a vízszintes tengelyen pedig a villamos feszültség van feltüntetve.



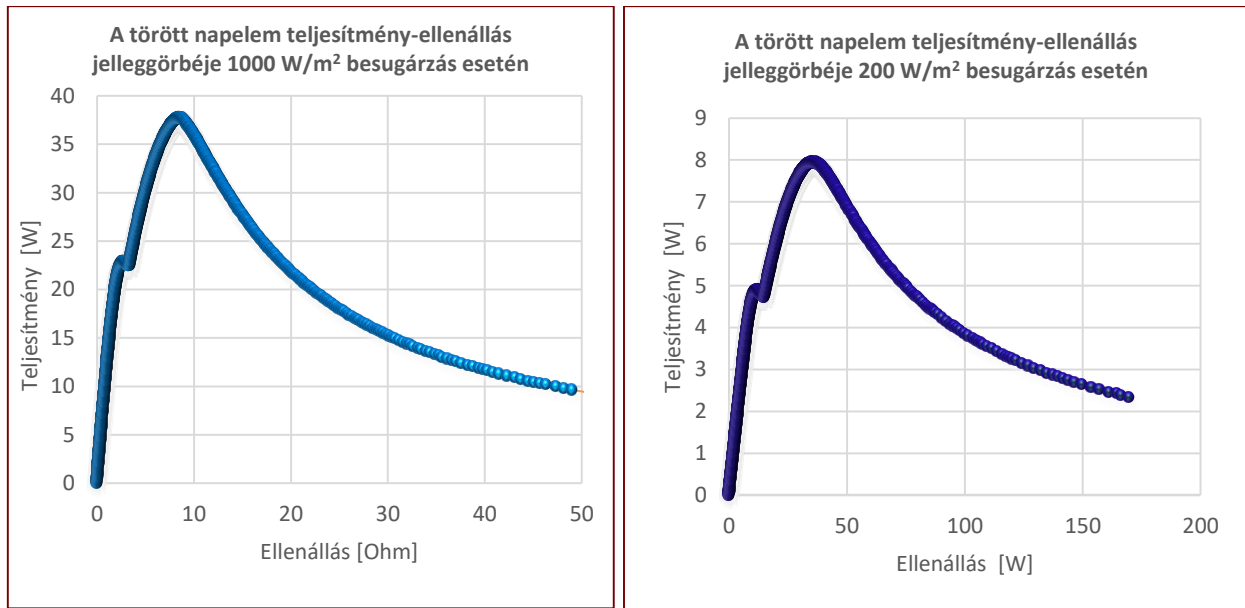
4. ábra. A napelemek ideális áram–feszültség , teljesítmény–feszültség karakterisztikái 1000 W/m², 800 W/m², 600 W/m², 400 W/m² és 200 W/m² besugárzott napfény intenzitások mellett. [8]

Amint az a 4. ábrán látszik, mind a két karakterisztika homogén és egyenletes lefolyású, töréspontokat a görbék nem tartalmaznak. Az áram–feszültség karakterisztika (az ábrán I-U jelleggörbe) telítésben futást követően adott feszültség értékek környezetében egy „ívelt letörést, lehajlást” tartalmaz, ami alapján könnyen meghatározható a napelemhez és adott paraméterek melletti működéséhez rendelhető maximális teljesítményű pont. A teljesítmény–feszültség karakterisztika pedig minden esetben egy helyen, azaz jól meghatározható feszültséghez tartozó globális maximumot tartalmaz. (Ugyanez lenne igaz a teljesítmény–ellenállás karakterisztikára, ami a fizikai mennyiségek közti kapcsolat alapján könnyen belátható.) A napelemes rendszereket ezekre a maximális teljesítményű pontokra kell bekalibrálni a megfelelő terhelő ellenállásokkal úgy, hogy a lehető legjobb hatásfokot érjük el a működés során.

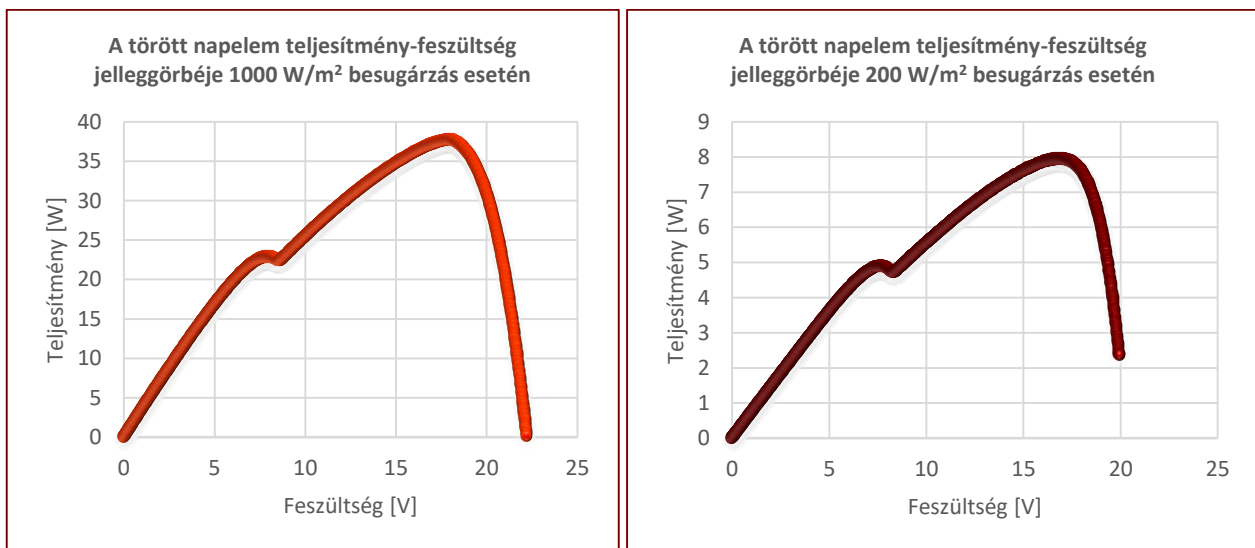
A következő ábrákon a felületi töredezett védőréteget tartalmazó napelem panel fentebb bemutatott Pasan Flasher mérőrendszerrel történt villamos paraméter meréseinek eredményei láthatók. Az 5.a, 5.b ábrákon a sérült napelem villamos áram–feszültség, 6.a, 6.b ábrákon a villamos teljesítmény–ellenállás, valamint 7.a, 7.b ábrákon a villamos teljesítmény–feszültség karakterisztikái láthatók 1000 W/m² és 200 W/m² céltárgyra beeső fényintenzitásokra.



5.a-b, ábra. A napelem áram–feszültség karakterisztikája 1000 W/m² és 200 W/m² besugárzás esetén. [saját mérési eredmény]



6.a-b, ábra. A napelem teljesítmény-ellenállás karakterisztikája 1000 W/m² és 200 W/m² besugárzás esetén. [saját mérési eredmény]



7.a-b, ábra. A napelem teljesítmény-feszültség karakterisztikája 1000 W/m² és 200 W/m² besugárzás esetén

A 5.a és 5.b ábrákon a napelem áram-feszültség karakterisztikája látható 1000 W/m² és 200 W/m² intenzitású műfény besugárzás esetén. Amint az észrevehető, a jelleggörbe lefutása jelentősen különbözik a 4. ábrán látható ideális áram-feszültség karakterisztika futásától. A töredezett borítórétegű napelem mérési görbéin megjelent plusz egy letörési pont kb. 8,7 V feszültségértéknél. Ez a jelleg mind az 1000 W/m² és mind a 200 W/m² fény besugárzás esetén megjelent. Ebből lefutási tulajdonságból arra lehet következtetni, hogy egyrészt a napelem működik, tehát a töréstől, a mechanikai sérüléstől nem ment tönkre, másrészt a működő töredezett napelem villamos teljesítményének két lokális teljesítmény maximuma van. A megjelenő letörési pont két részre bontja a jelleggörbét. Egyik a 0 V-tól 8,7 V-ig tartó szakasz és a 8,7 V-tól a 22,23 V-ig (1000 W/m² villantás esetén) ill. 19,96 V-ig (200 W/m² villantás esetén) terjedő tartomány. A két intervallumra eső kétféle lokális maximum érték a későbbiekben komolyabb problémákhoz is vezet.

A fentiek okán ugyanez a jelenség várható, és figyelhető is meg a napelem teljesítmény-ellenállás (6.a, 6.b ábra) és teljesítmény-feszültség (7.a, 7.b ábra) karakterisztikáinál is. Azaz

minden esetben plusz egy új letörés jelent meg a karakterisztikákon a besugárzó fény intenzitásától függetlenül, mind az 1000 W/m^2 mind pedig a 200 W/m^2 értékek esetén. Az 1000 W/m^2 -es besugárzáshoz tartozó teljesítmény–ellenállás karakterisztika (6.a ábra) esetén 3,17 ohm-nál a 200 W/m^2 -es fény besugárzáshoz tartozó karakterisztika esetén (6.b ábra) pedig 14,85 ohmnál jelennek meg a maximumok. A maximális teljesítmény értékek az ábrákról már le is olvashatók. Az 1000 W/m^2 -es besugárzás esetén az első maximum a 0 ohm-tól 3,17 ohm-ig terjedő szakaszon 22,95 W (watt) a 3,17 ohm-tól kezdődő szakaszon pedig 37,78 W. A 200 W/m^2 besugárzás esetén kapott teljesítmény–ellenállás karakterisztikán pedig a 0 ohm-tól a 14,85 ohm-ig tartó szakaszon 4,91 W a 14,85 ohm-tól induló szakaszon pedig 7,96 W.

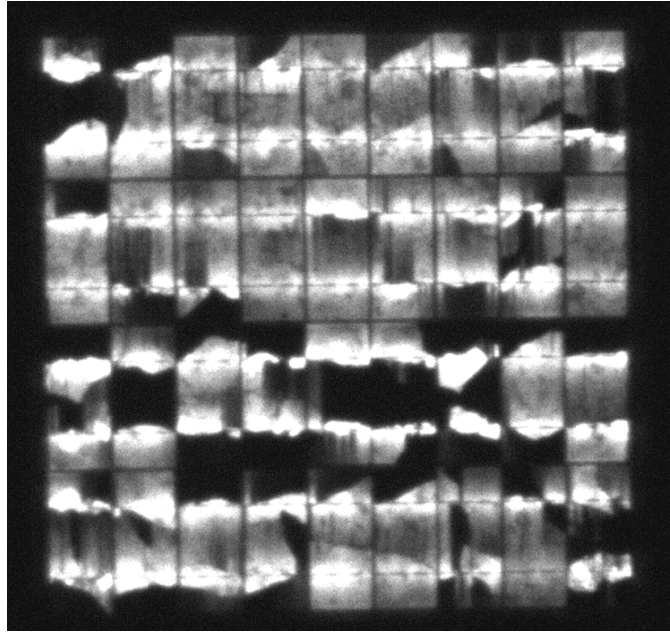
A villamos teljesítmény–feszültség karakterisztikákról értelemszerűen ugyanezen teljesítmény értékek olvashatók le mind a két besugárzás esetén a 8,7 V-os törési pontok előtt és után. Azaz az 1000 W/m^2 esetén először 22,95 W majd pedig 37,78 W a 200 W/m^2 esetén először 4,91 W majd pedig 7,96 W.

A hétköznapi használatban lévő napelemek legfontosabb paramétere a maximális villamos teljesítmény. A normálisan működő napelemek esetén ez az érték egy darab lokális maximum, ami globális maximum is egyben, és amit a környezeti viszonyok, hőmérséklet besugárzás stb. tudnak befolyásolni. Amint az látható, esetünkben a napelem összetörésének eredménye azt eredményezte, hogy megjelent plusz egy lokális maximum teljesítmény érték. Ennek eredményeképpen az úgynevezett munkaponti optimalizálók (Solaredge) nem biztos, hogy a számunkra legideálisabb munkapontot fogják beállítani. Ugyanis ezen eszközök egy része csak egy maximum keresést végez, és amint azt megtalálta leáll a kereséssel. Ennek eredményeképpen feltehető, hogy a legelső maximum után beállítja a rendszert arra a munkapontra, ami ugyan lokális maximum, de nem minden esetben jelenti azt, hogy az a globális maximum is. [8]

4.1. Elektrolumineszcens mérés és eredménye

A fentebb tárgyaltakon felül az is megfigyelhető, hogy a mért villamos paraméterek jelentősen eltérnek a korábban bemutatott névleges értékektől. Azaz a napelem teljesítménye romlott a károsodás hatására. A mechanikai hatás okozta rongálódás mérésére a napelemet elektrolumineszcens vizsgálatnak vetettük alá. A vizsgálat a napelem azon képességére épít, hogy ha megfelelő elektromos áramot folytatunk át a napelem panelen, akkor a napelem olyan fotonokat bocsát ki, amiket infrakamerával detektálhatunk. Ehhez a korábban bemutatott Pasan Flasher mérőberendezés sötétkamrájába helyeztük a napelemet és a névleges áramának kétszeresét hajtottuk át rajta. Ennek eredményeképpen a kristályos napelem cella rendszer működő cella részei az infrakamera által készített képen világítottak, világosak voltak, míg a meghibásodott területek sötéten maradtak.

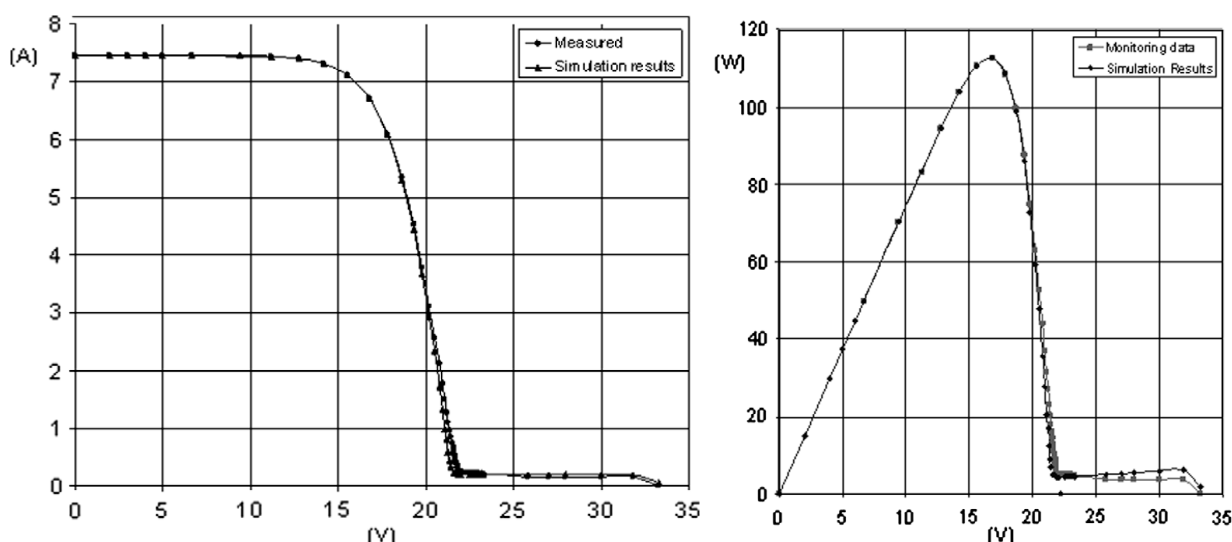
Az elektrolumineszcens fényképek megtekintése és értékelése alapján elmondható, hogy a napelemnek nem csak a védő borítórétege sérült meg, hanem maga a félvezető, kristályos napelem cella réteg (wafer) is. A cellák nagy része megsérült és valamekkora részük nem működőképes, ugyanakkor vannak olyan cellák, amik teljesen sértetlenek és épek maradtak. Teljesen meghibásodott cella a kapott elektrolumineszcens kép alapján nincs a panelon. Mindezek után elmondható, hogy a napelem adataiban a névleges teljesítményértékektől való lényeges visszaesése, eltérése a törés miatt következett be, amit a cellák meghibásodása, törése okozhat. A cellák felületének egy része nem működik. A sérült napelem elektrolumineszcens képe a 8. ábrán látható. [9]



8. ábra. A törött borítórétegű napelem elektrolumineszcens képe. A világos helyek az épen maradt, jól működő cella részeket, míg a sötét, esetenként fekete helyek a sérült, nem működő cella részeket mutatják. [saját képfelvétel]

5. Az árnyékhataás és az általunk kapott eredmények közötti kapcsolat

A napelemeknél jelentkező egyik leggyakoribb hibajelenség az úgynevezett árnyékhataás (shadow effect). Ez a jelenség akkor jön létre, amikor a napelem panelre valamilyen tárgy, élőlény stb. árnyékot vet és ezáltal a napelem panel egy részét a fénytől kitakarja. Ennek hatására a napelem árnyékos része kevésbé vagy egyáltalán nem termel villamos áramot. Ez a jelenség korábbi gyártású, azaz öregebb napelem moduloknál – a cellák sorba kötéséből adódóan – sok esetben azt is eredményezhette, hogy a panelt tartalmazó teljes félvezető szilícium cella (wafer) sor kiesett a termelésből. Ez a probléma kiküszöbölhető azzal, hogy az egyes cellákhoz beépítettek egy-egy bypass diódát, aminek az a funkciója, hogy megakadályozza a fentebb leírt következményt, és így a cellasorban le nem árnyékolt, megfelelően működő cellák is részt vegyenek a termelésben. (Ne legyen teljes cellasor kiesés.) A bypass diódák rendszerbe illesztése a fentebb bemutatott árnyékhataás okozta problémát megoldotta, ugyanakkor megjelent/jelen van ugyanezen árnyékhataásnak egy, a villamos paraméterekre gyakorolt hatása. A napelemek áramfeszültség, teljesítmény–feszültség, teljesítmény–ellenállás karakterisztikái torzultak, és megjelent a jelleggörbéken egy-egy plusz letörés. Az árnyékeffektus hatására megjelenő változás az alábbi 9. ábrán látható. [10] [11]



9. ábra. Az árnyékeffektus hatására megjelenő változás a napelem villamos paramétereiből képzett karakterisztikákban. [10]

Amint az jól látszik az árnyékolás hatására megjelenő villamos karakterisztikákban megjelenő torzulás rendkívül hasonlatos az általunk kapott eredményekkel (5.a,b, 6.a,b, 7.a,b ábra). Ezek alapján elmondható, hogy a napelem felületi rétegének sérülése és a napelemet tartalmazó réteg együttes sérülése nagyon hasonló hatással van a napelem villamos áram–feszültség, teljesítmény–feszültség, teljesítmény–ellenállás karakterisztikájára, mint az árnyékeffektus, ugyanis nagyon hasonló letörés jelent meg a karakterisztikák mindegyikében. Annak vizsgálata, hogy a plusz letörés milyen okból helyezkedik el az adott pontokon, a törés esetén még nem tisztázott és további vizsgálatokat, méréseket igényel.

6. Összegzés

Az eredményeket összegezve elmondható, hogy egy törött borítórétegű napelem villamos paramétereit sikeresen megmértük egy professzionális Pasan Flasher villanólámpás mérőberendezésben 1000 W/m^2 és 200 W/m^2 intenzitású beeső napspektrumú fény esetén. Az adatokat feldolgozva előállítottuk a napelem villamos áram–feszültség, teljesítmény–ellenállás teljesítmény–feszültség karakterisztikáit az adott intenzitásokon. Ezek alapján elmondható, hogy az általunk vizsgált sérült napelem minden jellegzőgörbéje az ideálistól jelentősen eltér. A karakterisztikákon megjelent egy plusz letörési pont, ebből következik, hogy a napelemnek egy helyett két lokális teljesítmény maximuma van a megfelelő fizikai paraméter függvényében. Ebből számunkra a globális maximum érték a fontos, hiszen a lehető legtöbb teljesítményt szeretnénk kivenni a rendszerből. Ennek a pontnak a megtalálása nem minden telepített rendszer esetében oldható meg, vagy másképpen fogalmazva: a maximális teljesítményű pont megtalálása több lokális maximum esetén nem minden esetben megoldott. Ez pedig hibás működést, veszteséget eredményezhet a napelem működésében, üzemében.

A villamos teljesítmény névleges értékektől történő eltérése miatt a napelemet elektrolumineszcens vizsgálatnak vetettük alá, ami alapján megállapítható, hogy nem csak a napelem borítórétege hanem maga a félvezető kristályos napelem réteg is sérülést szenvedett. Jónéhány cella megtört és csak egy része maradt működőképes.

Végül, de nem utolsó sorban az általunk kapott villamos paramétereiből képzett karakterisztikák és az árnyékhataásra jellemző karakterisztikák közötti lehetséges párhuzamot ismertettük, mutattuk be.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk megköszönni az ulmi egyetemnek a lehetőséget, hogy használhattuk a laboratóriumukat, valamint Erik Rene Neuchel-nek a mérések során nyújtott számtalan segítséget.

Köszönet illeti az Óbudai Egyetem Erasmus irodáját, hogy segítettek megvalósítani a külföldi tanulmányutat, aminek keretén belül a méréseinket elvégezhettük.

Irodalomjegyzék

- [1] Dr. Szentiday Klára, „Félvezető eszközök konstrukciója”, Műszaki könyvkiadó Budapest 1983, 5-91. oldal
- [2] Dr. Nemcsics Ákos, „A napelemek működése és alkalmazás”, Műszaki ökológia villamosmérnököknek 3. rész, Budapest, 2013
- [3] Nemcsics Ákos, „Fizikai szemle”, 2006/9 szám 293-299 oldal
- [4] Claudio Vita-Finzi, „The Sun A User's Manual”, [Online]. Available: <https://books.google.hu/books> [Megtekintés 28-jul-2018]
- [5] Ökrös László, „A napelem cella felépítése” [Online]. Available: <http://nvsolar.hu/napelem-cella/> [Megtekintés: 28-Jun-2018]
- [6] Dr. Ervin Rácz, Balázs Horómpöli, Andrea Varga, Erik Rene Neuchel, „Experimental investigation based on analyzation of electric current-voltage characteristics on Pasan-flasher flashlight irradiated photovoltaic cells aged by various processes” Elektroenergetika, pp. 718 September 2017
- [7] Varga Pál, „Napelemes rendszerek” [Online] Available: <http://docplayer.hu/44797118-Napelemes-rendszerek.html> [Megtekintés: 28-Jun-2018]
- [8] <https://www.solaredge.com/sites/default/files/se-homeowners-brochure-hu.pdf> [2018.09.30]
- [9] Erik Rene Neuchel, “Measurement of the characteristics of PV modules”, Dezentrale Energiesysteme, Laborversuch, Institut für Energie- und Antriebstechnik, Hochschule Ulm, Ulm, Germany, July 2016, pp.I.-1.
- [10] S. Silvestre , A. Boronat, A. Chouder, „Study of bypass diodes configuration on PV modules” Applied Energy 86, 2009, 1632-1640 o.]
- [11] J. W. Bishop „Computer simulation of the effects of electrical Mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits” ESTI Project, Commission of the European Communities Joint Research Centre, 21020 Ispra, Varese (Italy) Solar Cells, 25 (1988) 73 - 89