

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE



### Photovoltaic devices –

**Part 5: Determination of the equivalent cell temperature (ECT) of photovoltaic (PV) devices by the open-circuit voltage method**

### Dispositifs photovoltaïques –

**Partie 5: Détermination de la température de cellule équivalente (ECT) des dispositifs photovoltaïques (PV) par la méthode de la tension en circuit ouvert**



## THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2022 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Secretariat  
3, rue de Varembe  
CH-1211 Geneva 20  
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11  
[info@iec.ch](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://www.iec.ch)

### About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

### About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigendum or an amendment might have been published.

#### IEC publications search - [webstore.iec.ch/advsearchform](http://webstore.iec.ch/advsearchform)

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee, ...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

#### IEC Just Published - [webstore.iec.ch/justpublished](http://webstore.iec.ch/justpublished)

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and once a month by email.

#### IEC Customer Service Centre - [webstore.iec.ch/csc](http://webstore.iec.ch/csc)

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: [sales@iec.ch](mailto:sales@iec.ch).

#### IEC Products & Services Portal - [products.iec.ch](http://products.iec.ch)

Discover our powerful search engine and read freely all the publications previews. With a subscription you will always have access to up to date content tailored to your needs.

#### Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 300 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 19 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

### A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

### A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

#### Recherche de publications IEC -

[webstore.iec.ch/advsearchform](http://webstore.iec.ch/advsearchform)

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études, ...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

#### IEC Just Published - [webstore.iec.ch/justpublished](http://webstore.iec.ch/justpublished)

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et une fois par mois par email.

#### Service Clients - [webstore.iec.ch/csc](http://webstore.iec.ch/csc)

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: [sales@iec.ch](mailto:sales@iec.ch).

#### IEC Products & Services Portal - [products.iec.ch](http://products.iec.ch)

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

#### Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 300 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 19 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE



### Photovoltaic devices –

### Part 5: Determination of the equivalent cell temperature (ECT) of photovoltaic (PV) devices by the open-circuit voltage method

### Dispositifs photovoltaïques –

### Partie 5: Détermination de la température de cellule équivalente (ECT) des dispositifs photovoltaïques (PV) par la méthode de la tension en circuit ouvert

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

ICS 27.160

ISBN 978-2-8322-6144-6

**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.**

**Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60904-5:2011+AMD1:2022 CSV

# REDLINE VERSION

## VERSION REDLINE



### Photovoltaic devices –

#### Part 5: Determination of the equivalent cell temperature (ECT) of photovoltaic (PV) devices by the open-circuit voltage method

### Dispositifs photovoltaïques –

#### Partie 5: Détermination de la température de cellule équivalente (ECT) des dispositifs photovoltaïques (PV) par la méthode de la tension en circuit ouvert

## CONTENTS

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| FOREWORD .....                                                      | 3  |
| INTRODUCTION .....                                                  | 5  |
| 1 Scope and object .....                                            | 6  |
| 2 Normative references .....                                        | 6  |
| 3 Measurement principle and requirements .....                      | 7  |
| 3.1 Principle .....                                                 | 7  |
| 3.2 General measurement requirements .....                          | 7  |
| 4 Apparatus .....                                                   | 8  |
| 5 Determination of required input parameters .....                  | 8  |
| 6 Procedure .....                                                   | 8  |
| 6.1 General .....                                                   | 8  |
| 6.2 Operating in a controlled environment .....                     | 9  |
| 6.3 Taking measurements under arbitrary irradiance conditions ..... | 9  |
| 7 Calculation of equivalent cell temperature .....                  | 9  |
| 8 Test report .....                                                 | 12 |
| Bibliography .....                                                  | 13 |

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60904-5:2011+AMD1:2022 CSV

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

### PHOTOVOLTAIC DEVICES –

#### **Part 5: Determination of the equivalent cell temperature (ECT) of photovoltaic (PV) devices by the open-circuit voltage method**

#### FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

**This consolidated version of the official IEC Standard and its amendment has been prepared for user convenience.**

**IEC 60904-5 edition 2.1 contains the second edition (2011-02) [documents 82/595/CDV and 82/626/RVC] and its amendment 1 (2022-11) [documents 82/2069/FDIS and 82/2082/RVD].**

**In this Redline version, a vertical line in the margin shows where the technical content is modified by amendment 1. Additions are in green text, deletions are in strikethrough red text. A separate Final version with all changes accepted is available in this publication.**

International Standard IEC 60904-5 has been prepared by IEC technical committee 82: Solar photovoltaic energy systems.

This second edition constitutes a technical revision.

The main technical changes with regard to the previous edition are as follows:

- added and updated normative references;
- added reporting section;
- added method on how to extract the input parameters;
- rewritten method on how to calculate ECT;
- reworked formulae to be in line with IEC 60891.

A list of all parts of IEC 60904 series, under the general title *Photovoltaic devices*, can be found on the IEC website.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

The committee has decided that the contents of the base publication and its amendment will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under [webstore.iec.ch](http://webstore.iec.ch) in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

**IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.**



## INTRODUCTION

When temperature sensors, such as thermocouples, are used to determine the cell temperature of PV devices under natural or simulated steady-state irradiance, two main problems arise. First, a considerable spread of temperature can be observed over the area of the module. Second, as the solar cells are usually not accessible, sensors are attached to the back of the module and the measured temperature thus is influenced by the thermal conductivity of the encapsulant and back materials. These problems are aggravated when determining the equivalent cell temperature for on-site measurements of array performance where all cells have slightly different temperatures and one cannot easily determine the average cell temperature.

The equivalent cell temperature (ECT) is the average temperature at the electronic junctions of the device (cells, modules, arrays of one type of module) which equates to the current operating temperature if the entire device were operating uniformly at this junction temperature.

For modules with large thermal inertia such as glass-glass construction for BIPV applications, measurements become even more challenging with increased temperature difference between the cell and module external temperatures during transient conditions. In addition, for bifacial PV modules the temperature sensors may shade an active cell, potentially even creating local hotspots where sensors are located on effective cell areas.

NOTE 1 NMOT is defined as the equilibrium mean solar cell junction temperature within an open-rack mounted module operating near peak power, in the following standard reference environment:

- Tilt angle:  $(37 \pm 5)^\circ$ .
- Total irradiance:  $800 \text{ W/m}^2$ .
- Ambient temperature:  $20^\circ\text{C}$ .
- Wind speed:  $1 \text{ m/s}$ .
- Electrical load: A resistive load sized such that the module will operate near its maximum power point at STC or an electronic maximum power point tracker (MPPT).

NOTE 2 NMOT is similar to the former NOCT except that it is measured with the module under maximum power rather than in open circuit. Under maximum power conditions (electric) energy is withdrawn from the module, therefore less thermal energy is dissipated throughout the module than under open-circuit conditions. Therefore NMOT is typically a few degrees lower than the former NOCT.

## PHOTOVOLTAIC DEVICES –

### Part 5: Determination of the equivalent cell temperature (ECT) of photovoltaic (PV) devices by the open-circuit voltage method

#### 1 Scope and object

This part of IEC 60904 describes the preferred method for determining the equivalent cell temperature (ECT) of PV devices (cells, modules and arrays of one type of module), for the purposes of comparing their thermal characteristics, determining NOCT (nominal operating cell temperature) or alternatively NMOT (nominal module operating temperature), and translating measured I-V characteristics to other temperatures.

This standard applies to linear devices with logarithmic  $V_{OC}$  dependence on irradiance and in stable conditions. It may be used for all technologies but one has to verify that there is no preconditioning effect influencing the measurement.

#### 2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60891, *Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics*

IEC 60904-1, *Photovoltaic devices – Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics*

IEC TS 60904-1-2:2019, *Photovoltaic devices – Part 1-2: Measurement of current-voltage characteristics of bifacial photovoltaic (PV) devices*

IEC 60904-2, *Photovoltaic devices – Part 2: Requirements for reference solar devices*

IEC 60904-3, *Photovoltaic devices – Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data*

IEC 60904-7, *Photovoltaic devices – Part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices*

IEC 60904-10, *Photovoltaic devices – Part 10: Methods of linearity measurement*

IEC 61215, *Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval*

IEC 61829, *Crystalline silicon photovoltaic (PV) array – On-site measurement of I-V characteristics*

~~ISO/IEC 17025, General requirements for competence of testing and calibration laboratories~~

### 3 Measurement principle and requirements

#### 3.1 Principle

The method described below is based on the fact that the open-circuit voltage ( $V_{OC}$ ) of a solar cell changes with temperature in a predictable fashion. If the open-circuit voltage of the device at standard test conditions is known, together with its temperature coefficient, the equivalent temperature of all the cells in the device can be determined. The open-circuit voltage is also slightly affected by the irradiance, so an additional correction may be required as outlined in IEC 60891. Experience shows that the equivalent cell temperature can be determined more precisely by the method described herein than by any alternative technique [1]<sup>1</sup>. However, as the temperature coefficient  $\beta$  drops rapidly increased variability and errors have been observed at irradiances below 200 400 W/m<sup>2</sup>, so this method should only be used at irradiances above this threshold.

#### 3.2 General measurement requirements

a) Use of the ECT method requires calibration of the device to be measured.

NOTE It is not sufficient to use calibration of another device of the same type, because even small differences in parameters between a calibrated device and a similar one can lead to significant errors (e.g. 0,3 % variation in module  $V_{OC}$  leads to 1 °C impact on ECT temperature).

ab) The device under test needs to match the following criteria:

- 1) The variation of  $V_{OC}$  needs to be linear as defined in IEC 60904-10 with respect to temperature.
- 2) The variation of  $V_{OC}$  with respect to irradiance needs to follow a logarithmic dependence with irradiance have a quadratic dependence on the logarithm of irradiance.
- 3) It needs to have an ohmic series resistance as otherwise there will be different ECT-coefficients for different temperature regions.
- 4) The shunt resistances of the device need to be reasonably high, as for the majority of commercially available devices, as otherwise there will be different ECT-coefficients for different temperature regions.

bc) The irradiance measurements shall be made using a PV reference device packaged and calibrated in conformance with IEC 60904-2 or a pyranometer. The PV reference device shall either be spectrally matched to the test specimen, or a spectral mismatch correction shall be performed. Either use a PV reference device that is spectrally matched to the device under test (DUT), or perform a spectral mismatch correction and report in conformance with IEC 60904-7. The reference device shall be linear in short-circuit current as defined in IEC 60904-10 over the irradiance range of interest.

In accordance with IEC 60904-2, to be considered spectrally matched, a reference device shall be constructed using the same cell technology and encapsulation package as the test device under test. Otherwise the spectral mismatch will have to be reported.

NOTE Some devices might have a significant spectral dependency in the open-circuit voltage. In such a case, a spectroradiometer would be needed to ensure stable incident spectrum.

d) Some devices, in particular multi-junction, might have a spectral dependency of the open-circuit voltage [2]. For these devices, the spectral irradiance shall be determined with a spectroradiometer.

ee) The active surface of the specimen device under test shall be coplanar within  $\pm 2^\circ$  of the active surface of the reference device.

df) Voltages shall be measured to an accuracy of  $\pm 0,2 \%$  of the open-circuit voltage using independent leads from the terminals of the specimen and keeping them as short as possible. The measurement ranges of the data acquisition should be carefully chosen. If the test specimen is a module, the 4-wire connection should start at the terminals or connectors. If the test specimen is a cell, the 4-wire connection should start at the bus

<sup>1</sup> Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

~~bars.~~ For appropriate connection method and measurement of voltages refer to IEC 60904-1.

## 4 Apparatus

In addition to the general measurement requirements of Clause 3 the following equipment is required to perform I-V characteristic measurements:

- a) A PV reference device that meets the conditions stated in 3 ac).
- b) Equipment to measure the open-circuit voltage to an ~~an-precision~~ instrumental measurement uncertainty better than  $\pm 0,2$  %.
- c) Equipment to measure temperature to an ~~an-precision~~ instrumental measurement uncertainty of  $\pm 1$  K.

## 5 Determination of required input parameters

The procedure requires a number of input parameters. These are:

- ~~Temperature coefficient of the open circuit voltage,  $\beta$ . This shall be determined from cell or module measurements of representative samples in accordance with IEC 60891.~~
- ~~Open circuit voltage ( $V_{OC1}$ ) at a reference condition ( $G_1, T_1$ ) in accordance with IEC 60904-1 for a cell or module or in accordance with IEC 61829 for a PV array. The reference condition is often chosen to be the standard test conditions as defined in IEC 61215, i.e.  $G_{STC} = 1\,000\text{ W/m}^2$  and  $T_{STC} = 25^\circ\text{C}$ .~~
- ~~The procedure requires a constant,  $a$ , which is also interpreted as the thermal diode voltage. The determination of this requires the measurement of the open-circuit voltage at two different irradiance levels  $G_3$  and  $G_4$ , one of which may be the point  $G_1, T_1$ .~~
- Relative temperature coefficient of open circuit voltage,  $\beta_{rel}$ . This shall be determined from cell or module measurements of representative samples in accordance with IEC 60891.

For bifacial modules, the temperature coefficient only needs to be determined from front side measurements.

- Open-circuit voltage ( $V_{OC1}$ ) at a reference condition ( $G_1, T_1$ ) in accordance with IEC 60904-1 or IEC TS 60904-1-2 for a cell or module or in accordance with IEC 61829 for a PV array. The reference condition is often chosen to be the standard test conditions, i.e.  $G_{STC} = 1\,000\text{ W/m}^2$  and  $T_{STC} = 25^\circ\text{C}$  with a reference spectral irradiance distribution as defined in IEC 60904-3.
- When outdoor measurement ( $G_1, T_1$ ) is carried out, it is recommended to apply insulating thermal tape, e.g. polyethylene foam, 1 mm thickness, with mass density less than  $0,03\text{ g/cm}^3$ , to cover the temperature sensor which is fixed by either aluminium or polyimide tape. If the temperature around the module is subjected to spatial and temporal variability, use of insulating thermal tape shields the temperature sensor from influence of environmental factors such as wind, allowing more accurate measurements.

NOTE A method to determine the mass density can be found in ISO 7214[4].

- The procedure requires the irradiance correction factors,  $B_1$  and  $B_2$ .  $B_1$  is linked to the thermal diode voltage and  $B_2$  accounts for non-linearity of  $V_{OC}$  with irradiance scaling. The determination of these constants requires the measurement of the module I-V characteristic in accordance with IEC 60891 under at least five different irradiance levels.

## 6 Procedure

### 6.1 General

The procedure can be carried out either in a controlled environment or by taking measurements at arbitrary irradiances and correcting to the reference irradiance  $G_1$ .

## 6.2 Operating in a controlled environment

- a) Mount the radiation sensor coplanar with the test device to an agreement better than  $\pm 2^\circ$ .
- b) Set the irradiance to be equal to that of the reference condition  $G_1$  using the reference device.
- c) For bifacial modules, a non-irradiated background is required as described in IEC TS 60904-1-2.
- d) Take simultaneous readings of the open-circuit voltage of the ~~test~~ device under test  $V_{OC2}$  and the incident irradiance ( $G_2$ ). Should there be any variation in the irradiance, treat as a measurement in arbitrary irradiance conditions as given in 6.3 and carry out the appropriate correction. An irradiance correction should be carried out if the scatter in the determined ECT is more than 1 K.
- e) Calculate the ECT as described in Clause 7.

## 6.3 Taking measurements under arbitrary irradiance conditions

- a) Mount the radiation sensor coplanar with the ~~test~~ device under test to an agreement better than  $\pm 2^\circ$ .
- b) For bifacial modules, two different setups are recommended for the measurement:  
 Method 1: use a low reflectivity black cover material to reduce back-to-front irradiance ratio to  $< 1\%$ , in order to minimize the rear irradiance contribution. The cover should be mounted behind the module in a way to limit interference with the module natural convective heat dissipation as much as possible.  
 Method 2: measure the plane-of-array irradiance on front side  $G_{fi}$  and the average irradiance on the rear side  $G_{ri}$  using PV reference devices compliant to IEC 60904-2.  $G_{ri}$  is the average of at least 5 measurement points located per the requirements of IEC TS 60904-1-2:2019, 6.3.2. The equivalent irradiance  $G_E$  on the bifacial module is then determined by:

$$G_{E_i} = G_{f_i} + \varphi \times G_{r_i} \quad (1)$$

where  $\varphi$  is the module bifaciality coefficient as determined in accordance with IEC TS 60904-1-2.

NOTE 1 Decision on which method to use is left to the user, on consideration of the targeted measurement uncertainty budget. Method 1 is expected to enable lower uncertainty when applied to NOCT or NMOT measurements, and for translating field measured I-V characteristics to standard test conditions.

NOTE 2 When applying method 2, particularly for bifacial systems, proper selection of the modules to be tested has to consider thermal and irradiance non-uniformities at the system level. IEC 61829 provides some guidance on the selection of typical modules within a PV array, recommending in particular to avoid selecting modules at ends of rows.

- b)c) Take simultaneous readings of the open-circuit voltage of the ~~test~~ device under test  $V_{OC2}$  and the incident plane-of-array irradiance  $G_2$  (method 1), or alternatively of the irradiance on front side  $G_{f2}$  and average irradiance on the rear side  $G_{r2}$  (method 2).
- d) Carry out a correction of  $V_{OC2}$  to an irradiance equal to  $G_1$ .
- e) Calculate the ECT as described in Clause 7.

## 7 Calculation of equivalent cell temperature

The equivalent cell temperature ECT is derived from the single diode equations describing the current voltage characteristic.

~~Solving the equation for  $V_2 = V_{OC2}$ , with  $V_1 = V_{OC1}$  and  $I_2 = I_1 = 0$  results in the following dependence of the open circuit voltage:~~

$$V_{OC2} = V_{OC1} + V_{OC1} \left[ \frac{\beta(T_2 - T_1)}{V_{OC1}} + a \ln \frac{G_2}{G_1} \right] \quad (1)$$

where

$V_{OC1}$  is the open-circuit voltage measured in Clause 5 at the irradiance  $G_1$  and module temperature  $T_1$ ;

$V_{OC2}$  is the open-circuit voltage measured in Clause 6 at irradiance  $G_2$  and module temperature  $T_2$ ;

the temperature coefficient of the open-circuit voltage  $\beta$  has also been measured as part of Clause 5 in accordance with IEC 60891;

the parameter,  $a$ , is the thermal diode voltage, which can be determined from measurements at different light intensities but identical temperatures as:

$$a = \frac{V_{OC4} - V_{OC3}}{V_{OC3} \ln (G_4/G_3)} \quad (2)$$

where  $V_{OC3}$  and  $V_{OC4}$  are the voltages measured in Clause 5 at the same module temperatures but at different irradiances  $G_3$  and  $G_4$ , respectively.

Instead of the irradiances  $G_1$  and  $G_2$ , one can also use the ratio of short circuit currents, which then is called self-reference. This requires short circuit current to be linear according to IEC 60904-10. This simplifies the measurements to be taken significantly as one essentially eliminates the requirement for measuring the irradiance and the dependence on the spectrally matched devices.

The relation between the different values of  $V_{OC}$  can then be rewritten to calculate the equivalent ECT as:

$$ECT = T_2 = T_1 + \frac{1}{\beta} \left[ \frac{V_{OC2}}{V_{OC1}} - 1 - a \ln \left( \frac{G_2}{G_1} \right) \right] \quad (3)$$

NOTE This assumes that the spatial and thermal non-uniformity between the two  $V_{OC}$  is identical. For non-uniform temperature or illumination there will be a small error in ECT because the equivalent circuit model assumes uniform temperature and illumination.

In the case of base measurements described in Clause 5 being taken at standard test conditions, the ECT can be determined as:

$$ECT = 25^\circ\text{C} + \frac{1}{\beta} \left[ \frac{V_{OC2}}{V_{OC,STC}} - 1 - a \ln \left( \frac{G_2}{1\,000} \right) \right] \quad (4)$$

This equation is closely related to the formulation of method 1 in the standard for temperature and irradiance corrections (IEC 60891). The factor  $a$  is linked to the number of cells (junctions) in series in the module ( $n_s$ ) as well as the thermal voltage  $D$  as defined in IEC 60891. Thus one can write the ECT in terms of this standard as:

$$ECT = T_2 = T_1 + \beta^{-1} \left[ \frac{V_{OC2}}{V_{OC1}} - 1 + D \times n_s \times \ln \left( \frac{G_2}{G_1} \right) \right] \quad (5)$$

Solving the equation for  $V_2 = V_{OC2}$ , with  $V_1 = V_{OC1}$  and  $I_2 = I_1 = 0$  results in the

following dependence of the open circuit voltage:

$$f(G_1, G_2) = 1 + B_1 \times \ln \frac{G_1}{G_2} + B_2 \times \ln^2 \left( \frac{G_1}{G_2} \right)$$

$$V_{oc2} = \frac{V_{oc1} \times \left[ 1 + \beta_{rel} \times (T_2 - T_1) \times f^2(G_1, G_2) \right]}{f(G_1, G_2)}$$

where

$V_{OC1}$  is the open-circuit voltage measured in Clause 5 at the chosen reference conditions, irradiance  $G_1$  and module temperature  $T_1$ ;

$V_{OC2}$  is the open-circuit voltage measured in Clause 6 at irradiance  $G_2$  and module temperature  $T_2$ ;

the relative temperature coefficient of the open-circuit voltage  $\beta_{rel}$  and the irradiance correction factors  $B_1$  and  $B_2$  are determined in Clause 5.

NOTE These formulae are derived from the IEC 60891 correction procedure 2 [3].

For measurement of bifacial modules using method 2, the irradiance  $G_2$  has to be replaced by the equivalent irradiance  $G_{E2}$ .

$$f(G_1, G_{E2}) = 1 + B_1 \times \ln \frac{G_1}{G_{E2}} + B_2 \times \ln^2 \left( \frac{G_1}{G_{E2}} \right)$$

$$V_{oc2} = \frac{V_{oc1} \times \left[ 1 + \beta_{rel} \times (T_2 - T_1) \times f^2(G_1, G_{E2}) \right]}{f(G_1, G_{E2})}$$

The relation between the different values of  $V_{OC}$  can then be rewritten to calculate the equivalent ECT per the formulas given below, for monofacial (6) and bifacial (7) devices.

$$ECT = T_2 = T_1 + \frac{1}{\beta_{rel} \times f^2(G_1, G_2)} \times \left[ \frac{V_{OC2}}{V_{OC1}} \times f(G_1, G_2) - 1 \right]$$

$$ECT = T_2 = T_1 + \frac{1}{\beta_{rel} \times f^2(G_1, G_{E2})} \times \left[ \frac{V_{OC2}}{V_{OC1}} \times f(G_1, G_{E2}) - 1 \right]$$

In the case of base measurements described in Clause 5 being taken at standard

test conditions, the ECT for monofacial devices can be determined as:

$$ECT = T_2 = 25 + \frac{1}{\beta_{rel} \times f^2(1000, G_2)} \times \left[ \frac{V_{OC2}}{V_{OC, STC}} \times f(1000, G_2) - 1 \right]$$

## 8 Test report

~~A test report with measured performance characteristics and test results shall be prepared by the test agency in accordance with ISO/IEC 17025.~~ The test report shall contain the following data:

- a) A title.
- b) Name and address of the test laboratory and location where the tests were carried out.
- c) Unique identification of the report and of each page.
- d) Name and address of client.
- e) A description and identification of the ~~specimen~~ device under test (solar cell, sub-assembly of solar cells or PV module).
- f) Description of the test environment (natural or simulated sunlight and, in the latter case, brief description and class of simulator).
- g) Date of receipt of test item and date(s) of calibration or test, where appropriate.
- h) Reference to sampling procedure, where relevant.
- i) Identification of calibration or test method used.
- j) Any deviations from, additions to or exclusions from the calibration or test method, and any other information relevant to a specific calibration or test, such as environmental conditions.
- k) Identification of the method for determination of input parameters.
- l) A statement of the result and the estimated uncertainty of test results.
- m) A signature and title, or equivalent identification of the person(s) accepting responsibility for the content of the test report, and the date of issue.
- n) A statement to the effect that the results relate only to the ~~specimen~~ device tested.
- o) A statement that the test report shall not be reproduced except in full, without the written approval of the laboratory.



## Bibliography

- [1] S. Krauter, A. Preiss, "Comparison of module temperature measurement methods", *Conference record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 10.1109/PVSC.2009.5411669
- [2] M. Pravettoni, A. Virtuani, K. Keller, M. Apolloni, H. Mullejans, "Spectral Mismatch Effect to the Open-circuit Voltage in the Indoor Characterization of Multi-junction Thin-film Photovoltaic Modules", 2013 *IEEE 39<sup>th</sup> Photovoltaic Specialists Conference*, 10.1109/PVSC.2013.6744249
- [3] C. Monokroussos, H. Mullejans, Q. Gao, W. Herrmann, "I-V translation procedure for higher accuracy and compliance with PERC cell technology requirements", 35<sup>th</sup> *European Photovoltaic Solar Energy Conference (EUPVSEC)*, online, 2020, 10.4229/EUPVSEC20202020-4AV.2.19
- [4] ISO 7214: *Cellular plastics – Polyethylene – Methods of test*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60904-5:2011+AMD1:2022 CSV

## SOMMAIRE

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| AVANT-PROPOS .....                                                        | 15 |
| INTRODUCTION.....                                                         | 17 |
| 1 Domaine d'application et objet.....                                     | 18 |
| 2 Références normatives .....                                             | 18 |
| 3 Principe et exigences de mesure .....                                   | 19 |
| 3.1 Principe.....                                                         | 19 |
| 3.2 Exigences générales de mesure .....                                   | 19 |
| 4 Appareillage .....                                                      | 20 |
| 5 Détermination des paramètres d'entrée exigés .....                      | 20 |
| 6 Procédure .....                                                         | 21 |
| 6.1 Généralités.....                                                      | 21 |
| 6.2 Fonctionnement dans un environnement contrôlé.....                    | 21 |
| 6.3 Relevé de mesures dans des conditions d'éclairement arbitraires ..... | 21 |
| 7 Calcul de la température de cellule équivalente.....                    | 22 |
| 8 Rapport d'essai .....                                                   | 24 |
| Bibliographie.....                                                        | 26 |

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60904-5:2011+AMD1:2022 CSV

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

### DISPOSITIFS PHOTOVOLTAÏQUES –

#### Partie 5: Détermination de la température de cellule équivalente (ECT) des dispositifs photovoltaïques (PV) par la méthode de la tension en circuit ouvert

#### AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses Publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets.

**Cette version consolidée de la Norme IEC officielle et de son amendement a été préparée pour la commodité de l'utilisateur.**

**L'IEC 60904-5 édition 2.1 contient la deuxième édition (2011-02) [documents 82/595/CDV et 82/626/RVC] et son amendement 1 (2022-11) [documents 82/2069/FDIS et 82/2082/RVD].**

**Dans cette version Redline, une ligne verticale dans la marge indique où le contenu technique est modifié par l'amendement 1. Les ajouts sont en vert, les suppressions sont en rouge, barrées. Une version Finale avec toutes les modifications acceptées est disponible dans cette publication.**

La Norme internationale IEC 60904-5 a été établie par le comité d'études 82 de l'IEC: Systèmes de conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.

Cette deuxième édition constitue une révision technique.

Les principaux changements techniques par rapport à l'édition précédente sont les suivants:

- ajout et mise à jour de références normatives;
- ajout d'une section concernant le rapport;
- ajout d'une méthode explicitant comment extraire les paramètres d'entrée;
- réécriture de la méthode explicitant comment calculer ECT;
- travail sur les formules pour qu'elles soient cohérentes avec l'IEC 60891.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60904, présentées sous le titre général *Dispositifs photovoltaïques*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Le comité a décidé que le contenu de la publication de base et de son amendement ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous [webstore.iec.ch](http://webstore.iec.ch) dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

**IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.**

## INTRODUCTION

Quand des sondes de température, telles que des thermocouples, sont utilisées pour déterminer la température de cellule des dispositifs photovoltaïques sous un éclairage naturel ou simulé à l'équilibre, deux problèmes majeurs se posent. Premièrement, on peut observer une dispersion de température considérable à la surface du module. Deuxièmement, étant donné que les cellules solaires ne sont généralement pas accessibles, les sondes sont placées à l'arrière du module et la température ainsi mesurée est influencée par la conductivité thermique de l'encapsulant et des matériaux composant les faces arrière du module. Ces problèmes sont aggravés quand on détermine la température de cellule équivalente pour des mesures sur site de performance d'un champ de modules, où toutes les cellules ont des températures légèrement différentes et il n'est pas facile de déterminer la température de cellule moyenne.

La température de cellule équivalente (ECT)<sup>1</sup>, est la température moyenne aux jonctions électroniques d'un dispositif (cellules, modules, champs d'un type de module), qui équivaut à la température de fonctionnement, si le dispositif entier fonctionnait uniformément à cette température de jonction.

Pour les modules dont l'inertie thermique est importante, comme les modules bi-verre pour applications BIPV, les mesurages deviennent même de plus en plus difficiles au fur et à mesure que la différence entre les températures externes de la cellule et du module augmente pendant les conditions transitoires. De plus, pour les modules photovoltaïques bifaces, les capteurs de température peuvent obturer des cellules actives et même, potentiellement, même créer des points chauds aux endroits où les capteurs sont situés sur des zones utiles de cellules.

NOTE 1 La température nominale de fonctionnement du module (NMOT - nominal module operating temperature) est définie comme la température moyenne d'équilibre de jonction des cellules PV dans un module installé sur un bâti ouvert fonctionnant quasiment à sa puissance maximale, dans l'environnement de référence normal suivant:

- angle d'inclinaison:  $(37 \pm 5)^\circ$  ;
- éclairage total:  $800 \text{ W/m}^2$  ;
- température ambiante:  $20^\circ\text{C}$  ;
- vitesse du vent  $1 \text{ m/s}$  ;
- charge électrique: Une charge résistive dimensionnée de telle manière que le module fonctionne à une valeur proche de son point de puissance maximale dans les conditions normales d'essai (STC - standard test conditions) ou selon le suivi électronique du point de fonctionnement à puissance maximale (MPPT - maximum power point tracking).

NOTE 2 La NMOT est similaire à la température nominale de fonctionnement d'une cellule (NOCT - nominal operating cell temperature) utilisée précédemment, la différence est qu'elle est mesurée alors que le module est à sa puissance maximale plutôt qu'en circuit ouvert. Dans les conditions de fonctionnement à puissance maximale, de l'énergie (électrique) est extraite du module. Par conséquent, une quantité moins importante d'énergie thermique est dissipée en passant par le module que dans les conditions de circuit ouvert. Par conséquent, la NMOT est ainsi généralement plus basse de quelques degrés par rapport à la NOCT utilisée précédemment.

<sup>1</sup> ECT en anglais: *Equivalent cell temperature*.

## DISPOSITIFS PHOTOVOLTAÏQUES –

### Partie 5: Détermination de la température de cellule équivalente (ECT) des dispositifs photovoltaïques (PV) par la méthode de la tension en circuit ouvert

#### 1 Domaine d'application et objet

La présente partie de l'IEC 60904 décrit la méthode préférentielle pour déterminer la température de cellule équivalente (ECT - *equivalent cell temperature*) des dispositifs photovoltaïques (cellules, modules et ~~champs~~ groupes d'un type de module), dans les buts de comparer leurs caractéristiques thermiques, de déterminer leur NOCT (~~température nominale d'utilisation des cellules~~)<sup>2</sup> ou leur NMOT et de transposer les caractéristiques I-V mesurées à d'autres températures que celles de leur ~~mesure~~ mesurage.

Cette norme s'applique aux dispositifs linéaires dont  $V_{oc}$  dépend de façon logarithmique de l'éclairement, dans des conditions stables. Elle peut être utilisée pour toutes les technologies mais il doit être vérifié qu'il n'y a pas d'effet de préconditionnement qui influence la mesure.

#### 2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60891, *Dispositifs photovoltaïques – Procédures pour les corrections en fonction de la température et de l'éclairement à appliquer aux caractéristiques I-V mesurées*

IEC 60904-1, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 1: Mesure des caractéristiques courant-tension des dispositifs photovoltaïques*

IEC TS 60904-1-2:2019, *Photovoltaic devices – Part 1-2: Measurement of current-voltage characteristics of bifacial photovoltaic (PV) devices (Disponible en anglais seulement)*

IEC 60904-2, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 2: Exigences relatives aux dispositifs solaires de référence*

IEC 60904-3, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 3: Principes de mesure des dispositifs solaires photovoltaïques (PV) à usage terrestre incluant les données de l'éclairement spectral de référence*

IEC 60904-7, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 7: Calcul de la correction de désadaptation des réponses spectrales dans les mesures de dispositifs photovoltaïques*

IEC 60904-10, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 10: Méthodes de mesure de la linéarité*

IEC 61215, *Modules photovoltaïques (PV) au silicium cristallin pour application terrestre – Qualification de la conception et homologation*

<sup>2</sup> ~~NOCT en anglais: Nominal operation cell temperature.~~

~~ISO/IEC 17025, Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais~~

### 3 Principe et exigences de mesure

#### 3.1 Principe

~~La méthode décrite ci-dessous est basée sur le fait que la tension en circuit ouvert ( $V_{OC}$ ) d'une cellule solaire varie en fonction de la température de façon prévisible. Si la tension en circuit ouvert du dispositif dans des conditions d'essai normalisées est connue, ainsi que son coefficient de température, la température équivalente de toutes les cellules dans le dispositif peut être déterminée. La tension en circuit ouvert est aussi légèrement affectée par l'éclairement, et une correction supplémentaire peut donc être nécessaire comme indiqué dans l'IEC 60891.~~ L'expérience montre que la température de cellule équivalente peut être déterminée plus précisément par la méthode décrite ici que par toute technique alternative [1]<sup>3</sup>. Cependant, ~~comme le coefficient de température  $\beta$  chute rapidement~~ une variabilité accrue ainsi que des erreurs ont été observées pour des éclairements inférieurs à ~~200~~ 400 W/m<sup>2</sup>, aussi, il convient que la présente méthode ne soit utilisée que pour des éclairements supérieurs à ce seuil.

#### 3.2 Exigences générales de mesure

a) L'utilisation de la méthode ECT exige l'étalonnage du dispositif qui doit être mesuré.

NOTE Il ne suffit pas d'utiliser l'étalonnage d'un autre dispositif du même type, car même de petites différences dans les paramètres entre un dispositif étalonné et un dispositif similaire peuvent donner lieu à des erreurs importantes (par exemple 0,3 % de variation pour la valeur  $V_{OC}$  du module a un impact de 1 °C sur la température ECT).

ab) Il est nécessaire que le dispositif soumis à l'essai satisfasse aux critères suivants:

- 1) Il est nécessaire que la variation de  $V_{OC}$  soit linéaire ~~en fonction de la température, tel que~~ comme cela est défini dans l'IEC 60904-10 en ce qui concerne la température.
- 2) Il est nécessaire que la variation de  $V_{OC}$  dépende de façon logarithmique quadratique de l'éclairement.
- 3) ~~Il est nécessaire d'avoir une résistance série ohmique sinon les coefficients ECT seront différents pour des régions de températures différentes.~~
- 4) ~~Il est nécessaire que les résistances shunt du dispositif soient raisonnablement élevées, comme pour la majorité des dispositifs disponibles commercialement, sinon les coefficients ECT seront différents pour des régions de températures différentes.~~

bc) Les ~~mesures~~ mesurages de l'éclairement doivent être effectués à l'aide d'un dispositif PV de référence ~~emballé~~ conditionné et étalonné conformément à l'IEC 60904-2 ou d'un pyranomètre. ~~Le spectre du dispositif PV de référence doit être adapté au spécimen en essai, ou une correction de désadaptation des réponses spectrales doit être réalisée.~~ Soit utiliser un dispositif PV de référence dont le spectre est adapté au dispositif soumis à l'essai (DUT), soit réaliser une correction de désadaptation des réponses spectrales et consigner les éléments conformément à l'IEC 60904-7. Le dispositif de référence doit être linéaire dans le courant de court-circuit, comme cela est défini dans l'IEC 60904-10 dans la plage d'éclairement concernée.

Conformément à l'IEC 60904-2, pour être considéré comme adapté spectralement, un dispositif de référence doit être construit en utilisant la même technologie de cellule et un ~~emballage~~ conditionnement d'encapsulation identique à celui du dispositif ~~d'essai~~ soumis à l'essai. ~~A part cela, la désadaptation des réponses spectrales devra être consignée.~~

<sup>3</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

NOTE Quelques dispositifs peuvent avoir une dépendance spectrale significative avec la tension en circuit ouvert. Un spectroradiomètre serait alors nécessaire pour assurer un spectre incident stable.

- d) Certains dispositifs, en particulier ceux avec cellules multijonctions, peuvent présenter une dépendance spectrale de la tension en circuit ouvert [2]. Pour ces dispositifs, l'éclairement spectral doit être déterminé à l'aide d'un spectroradiomètre.
- ce) La surface active du ~~spécimen~~ dispositif soumis à l'essai doit être coplanaire à  $\pm 2^\circ$  par rapport à la surface active du dispositif de référence.
- df) ~~Les tensions doivent être mesurées avec une précision de  $\pm 0,2$  % de la tension en circuit ouvert en utilisant des fils indépendants à partir des bornes du spécimen et en les maintenant aussi courts que possible. Il convient que les plages de mesure pour l'acquisition des données soient choisies avec soin. Si le spécimen en essai est un module, il convient que la connexion à 4 fils commence aux bornes ou aux connecteurs. Si le spécimen en essai est une cellule, il convient que la connexion à 4 fils commence aux barres omnibus. Se reporter à l'IEC 60904-1 pour la méthode de connexion adaptée et le mesurage des tensions.~~

## 4 Appareillage

En supplément des exigences générales de mesure de l'Article 3, l'équipement suivant est exigé pour effectuer les mesures de la caractéristique I-V:

- a) Un dispositif PV de référence qui satisfait aux conditions mentionnées en 3 a c).
- b) Un équipement pour mesurer la tension en circuit ouvert avec une ~~précision supérieure~~ à incertitude de mesure de l'instrument meilleure que  $\pm 0,2$  %.
- c) Un équipement pour mesurer la température avec une ~~précision~~ incertitude de mesure de l'instrument de  $\pm 1$  K.

## 5 Détermination des paramètres d'entrée exigés

La procédure nécessite un certain nombre de paramètres d'entrée, qui sont:

- ~~Le coefficient de température de la tension en circuit ouvert,  $\beta$ . Celui-ci doit être déterminé à partir des mesures de cellule ou de module pour des échantillons représentatifs conformément à l'IEC 60891.~~
- ~~La tension en circuit ouvert ( $V_{OC1}$ ) aux conditions de référence ( $G_1, T_1$ ), conformément à l'IEC 60904-1 pour une cellule ou un module ou conformément à l'IEC 61829 pour un générateur PV. Les conditions de référence sont généralement choisies pour correspondre aux conditions normales d'essai telles que définies dans l'IEC 61215, c'est-à-dire  $G_{STC} = 1\,000\text{ W/m}^2$  et  $T_{STC} = 25^\circ\text{C}$ .~~
- ~~La procédure nécessite une constante,  $a$ , laquelle est également interprétée comme la tension thermique de la diode. Sa détermination nécessite la mesure de la tension en circuit ouvert à deux niveaux d'éclairement différents  $G_3$  et  $G_4$ , l'un deux pouvant être le point  $G_1, T_1$ .~~
- Coefficient de température relatif de la tension en circuit ouvert,  $\beta_{rel}$ . Celui-ci doit être déterminé à partir des mesurages de cellule ou de module des échantillons représentatifs conformément à l'IEC 60891.

Pour les modules bifaces, le coefficient de température ne doit être déterminé que par des mesurages en face avant.

- La tension en circuit ouvert ( $V_{OC1}$ ) à une condition de référence ( $G_1, T_1$ ) conformément à l'IEC 60904-1 ou à l'IEC TS 60904-1-2 pour une cellule ou un module ou conformément à l'IEC 61829 pour un groupe PV. La condition de référence est souvent choisie pour correspondre aux conditions normales d'essai, c'est-à-dire  $G_{STC} = 1\,000\text{ W/m}^2$  et  $T_{STC} = 25^\circ\text{C}$  avec une distribution spectrale de l'éclairement de référence comme cela est défini dans l'IEC 60904-3.



- Lors du mesurage à l'extérieur ( $G_1$ ,  $T_1$ ), il est recommandé d'appliquer du ruban thermique isolant, par exemple de la mousse de polyéthylène d'une épaisseur de 1 mm et d'une masse volumique inférieure à 0,03 g/cm<sup>3</sup>, pour recouvrir le capteur de température qui est fixé à l'aide d'un ruban d'aluminium ou de polyimide. Si la température autour du module est soumise à une variabilité spatiale et temporelle, l'utilisation d'un ruban thermique isolant qui protège le capteur de température de l'influence des facteurs environnementaux comme le vent permet des mesurages avec une plus grande exactitude.

NOTE Une méthode pour la détermination de la masse volumique peut être tirée de l'ISO 7214 [4].

- La procédure exige les facteurs de correction d'éclairement,  $B_1$  et  $B_2$ .  $B_1$  est lié à la tension de la diode thermique et  $B_2$  rend compte de la non-linéarité de  $V_{OC}$  par rapport à l'échelle d'éclairement. La détermination de ces constantes exige le mesurage de la caractéristique I-V du module conformément à l'IEC 60891 avec au minimum cinq niveaux d'éclairement différents.

## 6 Procédure

### 6.1 Généralités

La procédure peut être mise en œuvre soit dans un environnement contrôlé, soit en prenant les mesures à des éclairements arbitraires et en les corrigeant pour un éclairement de référence  $G_1$ .

### 6.2 Fonctionnement dans un environnement contrôlé

- Monter la sonde de rayonnement dans un plan parallèle à celui du dispositif d'essai avec une précision supérieure à  $\pm 2^\circ$ .
- Régler l'éclairement pour qu'il soit égal à celui des conditions de référence  $G_1$  en utilisant le dispositif de référence.
- Pour les modules bifaces, un arrière de module non éclairé est exigé, comme cela est décrit dans IEC TS 60904-1-2.
- d) Relever simultanément la tension en circuit ouvert du dispositif d'essai soumis à l'essai  $V_{OC2}$  et l'éclairement incident ( $G_2$ ). ~~Il convient que toute variation de l'éclairement soit traitée comme une mesure~~ En cas de variation quelconque de l'éclairement, traiter cette variation comme un mesurage dans des conditions d'éclairement arbitraires, comme cela est mentionné en 6.3, et d'appliquer la correction appropriée. Il convient d'appliquer une correction de l'éclairement si la dispersion de l'ECT déterminée est supérieure à 1 K.
- d)e) Calculer l'ECT comme cela est décrit à l'Article 7.

### 6.3 Relevé de mesures dans des conditions d'éclairement arbitraires

- Monter ~~la sonde~~ le capteur de rayonnement dans un plan parallèle à celui du dispositif ~~d'essai avec une précision supérieure à~~ soumis à l'essai avec une tolérance meilleure que  $\pm 2^\circ$ .
- Pour les modules bifaces, deux montages différents sont recommandés pour le mesurage:  
Méthode 1: utiliser un matériau occultant noir dont la réflectivité est faible afin de réduire le rapport d'éclairement entre la face avant et la face arrière à une valeur  $< 1\%$  afin de réduire le plus possible la contribution de l'éclairement arrière. Il convient de placer le matériau occultant à l'arrière du module de manière à limiter le plus possible les interférences avec la dissipation de chaleur convective naturelle du module.

Méthode 2: mesurer l'éclairement dans le plan du groupe PV sur la face avant  $G_{fi}$  et l'éclairement moyen sur la face arrière  $G_{ri}$  à l'aide de dispositifs PV de référence conformes à l'IEC 60904-2.  $G_{ri}$  est la moyenne de cinq points de mesure au moins, disposés comme cela est exigé dans l'IEC TS 60904-1-2:2019, 6.3.2. L'éclairement équivalent GE sur le module biface est alors déterminé par:

$$G_{E_i} = G_{f_i} + \varphi \times G_{r_i} \quad (1)$$

où  $\varphi$  est le coefficient de bifacialité du module, déterminé selon l'IEC TS 60904-1-2.

NOTE 1 La décision du choix de la méthode à utiliser est laissée à l'utilisateur, à partir du bilan d'incertitude de mesure cible. Il est attendu que la méthode 1 permette une incertitude plus faible lorsqu'elle est appliquée aux mesurages de la NOCT ou de la NMOT, et pour transposer des caractéristiques I-V mesurées sur le terrain aux conditions normales d'essais.

NOTE 2 Lors de l'application de la méthode 2, et en particulier pour les groupes PV avec modules bifaces, une sélection correcte des modules à soumettre aux essais doit prendre en considération les non-uniformités thermiques et d'éclairement au niveau du système. L'IEC 61829 fournit des recommandations relatives au choix de modules types dans un groupe PV, et recommande en particulier d'éviter de choisir des modules qui se situent en bout de rang.

- ~~b)~~c) Relever simultanément la tension en circuit ouvert du dispositif ~~en~~ soumis à l'essai  $V_{OC2}$  et l'éclairement incident dans le plan du groupe PV  $G_2$  (méthode 1), ou l'éclairement sur la face avant  $G_{f_2}$  et l'éclairement moyen sur la face arrière  $G_{r_2}$  (méthode 2).
- ~~c)~~d) Appliquer une correction à  $V_{OC2}$  pour un éclairement égal à  $G_1$ .
- ~~d)~~e) Calculer l'ECT comme décrit à l'Article 7.

## 7 Calcul de la température de cellule équivalente

La température de cellule équivalente ECT est ~~dérivée~~ obtenue à partir des équations de diode unique décrivant les caractéristiques courant-tension.

~~La résolution de l'équation pour  $V_2 = V_{OC2}$ , avec  $V_1 = V_{OC1}$  et  $I_2 = I_1 = 0$  résulte de la dépendance suivante à la tension en circuit ouvert:~~

$$V_{OC2} = V_{OC1} + V_{OC1} \left[ \beta(T_2 - T_1) + a \ln \frac{G_2}{G_1} \right] \quad (4)$$

où

~~$V_{OC1}$  est la tension en circuit ouvert mesurée à l'Article 5 pour un éclairement  $G_1$  et une température de module  $T_1$ ;~~

~~$V_{OC2}$  est la tension en circuit ouvert mesurée à l'Article 6 pour un éclairement  $G_2$  et une température de module  $T_2$ ;~~

~~le coefficient de température de la tension en circuit ouvert  $\beta$  a également été mesuré selon une partie de l'Article 5, conformément à l'IEC 60891;~~

~~le paramètre,  $a$ , est la tension thermique de la diode, laquelle peut être déterminée à partir des mesures pour différentes intensités lumineuses mais pour des températures identiques selon:~~

$$a = \frac{V_{OC4} - V_{OC3}}{V_{OC3} \ln (G_4/G_3)} \quad (2)$$

~~où  $V_{OC3}$  et  $V_{OC4}$  sont les tensions mesurées à l'Article 5 pour des températures de module identiques mais pour des éclairements différents,  $G_3$  et  $G_4$ , respectivement.~~

~~Au lieu des éclairements  $G_1$  et  $G_2$ , le rapport des courants de court-circuit peut aussi être utilisé, lequel est alors appelé référence propre. Cela nécessite que le courant de court-circuit soit linéaire conformément à l'IEC 60904-10. Cela simplifie significativement les mesures à prendre puisqu'essentiellement, l'exigence relative à la mesure de l'éclairement et de la dépendance des dispositifs dont le spectre est adapté est éliminée.~~

~~La relation entre les différentes valeurs de  $V_{OC}$  peut alors être réécrite pour calculer l'ECT équivalent selon:~~

$$\text{ECT} = T_2 = T_1 + \frac{1}{\beta} \left[ \frac{V_{OC2}}{V_{OC1}} - 1 - a \ln \left( \frac{G_2}{G_1} \right) \right] \quad (3)$$

~~NOTE Cela suppose que les non-uniformités spatiale et thermique entre les deux  $V_{OC}$  soient identiques. Pour un éclairage ou une température non uniforme, il y aura une petite erreur pour l'ECT, parce que le modèle de circuit équivalent suppose un éclairage et une température uniformes.~~

~~Dans le cas des mesures de base décrites à l'Article 5 et obtenues dans les conditions normales d'essai, l'ECT peut être déterminée selon:~~

$$\text{ECT} = 25^\circ\text{C} + \frac{1}{\beta} \left[ \frac{V_{OC2}}{V_{OC,STC}} - 1 - a \ln \left( \frac{G_2}{1\,000} \right) \right] \quad (4)$$

~~Cette équation est étroitement liée à la formulation de la méthode 1 de la norme pour les corrections en fonction de la température et de l'éclairement (IEC 60891). Le facteur  $a$  est lié au nombre de cellules (jonctions) en série dans le module ( $n_s$ ) ainsi qu'à la tension thermique  $D$  définie dans l'IEC 60891. De ce fait, l'ECT peut être écrite selon les termes de cette norme comme:~~

$$\text{ECT} = T_2 = T_1 + \beta^{-1} \left[ \frac{V_{OC2}}{V_{OC1}} - 1 - D \times n_s \times \ln \left( \frac{G_2}{G_1} \right) \right] \quad (5)$$

La résolution de l'équation pour  $V_2 = V_{OC2}$ , avec  $V_1 = V_{OC1}$  et  $I_2 = I_1 = 0$  donne la dépendance suivante de la tension en circuit ouvert:

$$f(G_1, G_2) = 1 + B_1 \times \ln \frac{G_1}{G_2} + B_2 \times \ln^2 \left( \frac{G_1}{G_2} \right)$$

$$V_{OC2} = \frac{V_{OC1} \times \left[ 1 + \beta_{rel} \times (T_2 - T_1) \times f^2(G_1, G_2) \right]}{f(G_1, G_2)}$$

où

$V_{OC1}$  est la tension en circuit ouvert mesurée à l'Article 5 dans les conditions de référence choisies, pour un éclairement  $G_1$  et une température de module  $T_1$ ;

$V_{OC2}$  est la tension en circuit ouvert mesurée à l'Article 6 pour un éclairement  $G_2$  et une température de module  $T_2$ ;

le coefficient de température relatif de la tension de circuit ouvert  $\beta_{rel}$  et les facteurs de correction d'éclairement  $B_1$  et  $B_2$  sont déterminés à l'Article 5.

NOTE Ces formules proviennent de la procédure de correction 2 de l'IEC 60891 [3].

Pour le mesurage des modules bifaces à l'aide de la méthode 2, l'éclairement  $G_2$  doit être remplacé par l'éclairement équivalent  $G_{E2}$ .

$$f(G_1, G_{E2}) = 1 + B_1 \times \ln \frac{G_1}{G_{E2}} + B_2 \times \ln^2 \left( \frac{G_1}{G_{E2}} \right) \quad (4)$$

$$V_{oc2} = \frac{V_{oc1} \times \left[ 1 + \beta_{rel} \times (T_2 - T_1) \times f^2(G_1, G_{E2}) \right]}{f(G_1, G_{E2})} \quad (5)$$

La relation entre les différentes valeurs de  $V_{OC}$  peut alors être réécrite afin de calculer l'ECT équivalente en utilisant les formules données ci-dessous, pour les dispositifs monofaces (6) et bifaces (7)

$$ECT = T_2 = T_1 + \frac{1}{\beta_{rel} \times f^2(G_1, G_2)} \times \left[ \frac{V_{OC2}}{V_{OC1}} \times f(G_1, G_2) - 1 \right]$$

$$ECT = T_2 = T_1 + \frac{1}{\beta_{rel} \times f^2(G_1, G_{E2})} \times \left[ \frac{V_{OC2}}{V_{OC1}} \times f(G_1, G_{E2}) - 1 \right]$$

Dans le cas des mesurages de base décrits à l'Article 5 et effectués dans des conditions normales d'essai, l'ECT pour les dispositifs monofaces peut être déterminée selon:

$$ECT = T_2 = 25 + \frac{1}{\beta_{rel} \times f^2(1000, G_2)} \times \left[ \frac{V_{OC2}}{V_{OC, STC}} \times f(1000, G_2) - 1 \right]$$

## 8 Rapport d'essai

~~Un rapport d'essai contenant les caractéristiques de performance mesurées et les résultats d'essais doit être préparé par le laboratoire d'essai conformément à l'ISO/IEC 17025. Le rapport d'essai doit contenir les données suivantes:~~

- Un titre.
- Le nom et l'adresse du laboratoire d'essai et le lieu où les essais ont été réalisés.
- L'identification unique du rapport et de chaque page.
- Le nom et l'adresse du client.
- Une description et l'identification du ~~spécimen~~ dispositif soumis à l'essai (~~cellule solaire, sous-assemblage de cellules solaires~~ cellule PV, ensemble de cellules PV ou module PV).
- Description de l'environnement d'essai (ensoleillement naturel ou simulé et, dans ce dernier cas, une rapide description et la classe du simulateur).
- Date de réception de l'unité d'essai et date(s) de l'étalonnage ou de l'essai, s'il y a lieu;
- La référence de la procédure d'échantillonnage, s'il y a lieu.
- L'identification de la méthode d'étalonnage ou d'essai utilisée.
- Tout écart par rapport à, tout complément à ou toute exclusion de la méthode d'étalonnage ou d'essai, et toute autre information appropriée à un étalonnage ou essai spécifique, telles que les conditions d'environnement.
- L'identification de la méthode utilisée pour déterminer les paramètres d'entrée.
- Une indication sur le résultat et l'incertitude estimée des résultats d'essai.

- m) Une signature et un titre, ou une identification équivalente de la ou des personne(s) acceptant d'être responsable(s) du contenu du rapport d'essai, et la date d'édition.
- n) Une indication du fait que les résultats ne se rapportent qu'au ~~spécimen~~ **dispositif** soumis aux essais.
- o) Une spécification indiquant que le rapport d'essai ne doit pas être reproduit, sauf dans sa totalité, sans l'approbation écrite du laboratoire.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60904-5:2011+AMD1:2022 CSV

### Bibliographie

- [1] S. Krauter, A. Preiss, "Comparison of module temperature measurement methods", *Conference record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 10.1109/PVSC.2009.5411669
- [2] M. Pravattoni, A. Virtuani, K. Keller, M. Apolloni, H. Mullejans, "Spectral Mismatch Effect to the Open-circuit Voltage in the Indoor Characterization of Multi-junction Thin-film Photovoltaic Modules", 2013 *IEEE 39<sup>th</sup> Photovoltaic Specialists Conference*, 10.1109/PVSC.2013.6744249
- [3] C. Monokroussos, H. Mullejans, Q. Gao, W. Herrmann, "I-V translation procedure for higher accuracy and compliance with PERC cell technology requirements", 35<sup>th</sup> *European Photovoltaic Solar Energy Conference (EUPVSEC)*, online, 2020, 10.4229/EUPVSEC20202020-4AV.2.19
- [4] ISO 7214: *Plastiques alvéolaires – Polyéthylène – Méthodes d'essai*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60904-5:2011+AMD1:2022 CSV

**FINAL VERSION****VERSION FINALE****Photovoltaic devices –****Part 5: Determination of the equivalent cell temperature (ECT) of photovoltaic (PV) devices by the open-circuit voltage method****Dispositifs photovoltaïques –****Partie 5: Détermination de la température de cellule équivalente (ECT) des dispositifs photovoltaïques (PV) par la méthode de la tension en circuit ouvert**

## CONTENTS

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| FOREWORD .....                                                      | 3  |
| INTRODUCTION .....                                                  | 5  |
| 1 Scope and object .....                                            | 6  |
| 2 Normative references .....                                        | 6  |
| 3 Measurement principle and requirements .....                      | 7  |
| 3.1 Principle .....                                                 | 7  |
| 3.2 General measurement requirements .....                          | 7  |
| 4 Apparatus .....                                                   | 7  |
| 5 Determination of required input parameters .....                  | 7  |
| 6 Procedure .....                                                   | 8  |
| 6.1 General .....                                                   | 8  |
| 6.2 Operating in a controlled environment .....                     | 8  |
| 6.3 Taking measurements under arbitrary irradiance conditions ..... | 8  |
| 7 Calculation of equivalent cell temperature .....                  | 9  |
| 8 Test report .....                                                 | 10 |
| Bibliography .....                                                  | 12 |

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60904-5:2011+AMD1:2022 CSV



## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

### PHOTOVOLTAIC DEVICES –

#### **Part 5: Determination of the equivalent cell temperature (ECT) of photovoltaic (PV) devices by the open-circuit voltage method**

#### FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

**This consolidated version of the official IEC Standard and its amendment has been prepared for user convenience.**

**IEC 60904-5 edition 2.1 contains the second edition (2011-02) [documents 82/595/CDV and 82/626/RVC] and its amendment 1 (2022-11) [documents 82/2069/FDIS and 82/2082/RVD].**

**This Final version does not show where the technical content is modified by amendment 1. A separate Redline version with all changes highlighted is available in this publication.**

International Standard IEC 60904-5 has been prepared by IEC technical committee 82: Solar photovoltaic energy systems.

This second edition constitutes a technical revision.

The main technical changes with regard to the previous edition are as follows:

- added and updated normative references;
- added reporting section;
- added method on how to extract the input parameters;
- rewritten method on how to calculate ECT;
- reworked formulae to be in line with IEC 60891.

A list of all parts of IEC 60904 series, under the general title *Photovoltaic devices*, can be found on the IEC website.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

The committee has decided that the contents of the base publication and its amendment will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under [webstore.iec.ch](http://webstore.iec.ch) in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

## INTRODUCTION

When temperature sensors, such as thermocouples, are used to determine the cell temperature of PV devices under natural or simulated steady-state irradiance, two main problems arise. First, a considerable spread of temperature can be observed over the area of the module. Second, as the solar cells are usually not accessible, sensors are attached to the back of the module and the measured temperature thus is influenced by the thermal conductivity of the encapsulant and back materials. These problems are aggravated when determining the equivalent cell temperature for on-site measurements of array performance where all cells have slightly different temperatures and one cannot easily determine the average cell temperature.

The equivalent cell temperature (ECT) is the average temperature at the electronic junctions of the device (cells, modules, arrays of one type of module) which equates to the current operating temperature if the entire device were operating uniformly at this junction temperature.

For modules with large thermal inertia such as glass-glass construction for BIPV applications, measurements become even more challenging with increased temperature difference between the cell and module external temperatures during transient conditions. In addition, for bifacial PV modules the temperature sensors may shade an active cell, potentially even creating local hotspots where sensors are located on effective cell areas.

NOTE 1 NMOT is defined as the equilibrium mean solar cell junction temperature within an open-rack mounted module operating near peak power, in the following standard reference environment:

- Tilt angle:  $(37 \pm 5)^\circ$ .
- Total irradiance:  $800 \text{ W/m}^2$ .
- Ambient temperature:  $20^\circ\text{C}$ .
- Wind speed:  $1 \text{ m/s}$ .
- Electrical load: A resistive load sized such that the module will operate near its maximum power point at STC or an electronic maximum power point tracker (MPPT).

NOTE 2 NMOT is similar to the former NOCT except that it is measured with the module under maximum power rather than in open circuit. Under maximum power conditions (electric) energy is withdrawn from the module, therefore less thermal energy is dissipated throughout the module than under open-circuit conditions. Therefore NMOT is typically a few degrees lower than the former NOCT.

## PHOTOVOLTAIC DEVICES –

### Part 5: Determination of the equivalent cell temperature (ECT) of photovoltaic (PV) devices by the open-circuit voltage method

#### 1 Scope and object

This part of IEC 60904 describes the preferred method for determining the equivalent cell temperature (ECT) of PV devices (cells, modules and arrays of one type of module), for the purposes of comparing their thermal characteristics, determining NOCT (nominal operating cell temperature) or alternatively NMOT (nominal module operating temperature), and translating measured I-V characteristics to other temperatures.

This standard applies to linear devices with logarithmic  $V_{OC}$  dependence on irradiance and in stable conditions. It may be used for all technologies but one has to verify that there is no preconditioning effect influencing the measurement.

#### 2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60891, *Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics*

IEC 60904-1, *Photovoltaic devices – Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics*

IEC TS 60904-1-2:2019, *Photovoltaic devices – Part 1-2: Measurement of current-voltage characteristics of bifacial photovoltaic (PV) devices*

IEC 60904-2, *Photovoltaic devices – Part 2: Requirements for reference solar devices*

IEC 60904-3, *Photovoltaic devices – Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data*

IEC 60904-7, *Photovoltaic devices – Part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices*

IEC 60904-10, *Photovoltaic devices – Part 10: Methods of linearity measurement*

IEC 61215, *Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval*

IEC 61829, *Crystalline silicon photovoltaic (PV) array – On-site measurement of I-V characteristics*

### 3 Measurement principle and requirements

#### 3.1 Principle

Experience shows that the equivalent cell temperature can be determined more precisely by the method described herein than by any alternative technique [1]<sup>1</sup>. However, increased variability and errors have been observed at irradiances below 400 W/m<sup>2</sup>, so this method should only be used at irradiances above this threshold.

#### 3.2 General measurement requirements

- a) Use of the ECT method requires calibration of the device to be measured.

NOTE It is not sufficient to use calibration of another device of the same type, because even small differences in parameters between a calibrated device and a similar one can lead to significant errors (e.g. 0,3 % variation in module  $V_{OC}$  leads to 1 °C impact on ECT temperature).

- b) The device under test needs to match the following criteria:

- 1) The variation of  $V_{OC}$  needs to be linear as defined in IEC 60904-10 with respect to temperature.
- 2) The variation of  $V_{OC}$  with respect to irradiance needs to have a quadratic dependence on the logarithm of irradiance.

- c) The irradiance measurements shall be made using a PV reference device packaged and calibrated in conformance with IEC 60904-2 or a pyranometer. Either use a PV reference device that is spectrally matched to the device under test (DUT), or perform a spectral mismatch correction and report in conformance with IEC 60904-7. The reference device shall be linear in short-circuit current as defined in IEC 60904-10 over the irradiance range of interest.

In accordance with IEC 60904-2, to be considered spectrally matched, a reference device shall be constructed using the same cell technology and encapsulation package as the device under test.

NOTE Some devices might have a significant spectral dependency in the open-circuit voltage. In such a case, a spectroradiometer would be needed to ensure stable incident spectrum.

- d) Some devices, in particular multi-junction, might have a spectral dependency of the open-circuit voltage [2]. For these devices, the spectral irradiance shall be determined with a spectroradiometer.
- e) The active surface of the device under test shall be coplanar within  $\pm 2^\circ$  of the active surface of the reference device.
- f) For appropriate connection method and measurement of voltages refer to IEC 60904-1.

### 4 Apparatus

In addition to the general measurement requirements of Clause 3 the following equipment is required to perform I-V characteristic measurements:

- a) A PV reference device that meets the conditions stated in 3 c).
- b) Equipment to measure the open-circuit voltage to an instrumental measurement uncertainty better than  $\pm 0,2$  %.
- c) Equipment to measure temperature to an instrumental measurement uncertainty of  $\pm 1$  K.

### 5 Determination of required input parameters

The procedure requires a number of input parameters. These are:

- Relative temperature coefficient of open circuit voltage,  $\beta_{rel}$ . This shall be determined from cell or module measurements of representative samples in accordance with IEC 60891.

<sup>1</sup> Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

For bifacial modules, the temperature coefficient only needs to be determined from front side measurements.

- Open-circuit voltage ( $V_{OC1}$ ) at a reference condition ( $G_1$ ,  $T_1$ ) in accordance with IEC 60904-1 or IEC TS 60904-1-2 for a cell or module or in accordance with IEC 61829 for a PV array. The reference condition is often chosen to be the standard test conditions, i.e.  $G_{STC} = 1\,000\text{ W/m}^2$  and  $T_{STC} = 25\text{ °C}$  with a reference spectral irradiance distribution as defined in IEC 60904-3.
- When outdoor measurement ( $G_1$ ,  $T_1$ ) is carried out, it is recommended to apply insulating thermal tape, e.g. polyethylene foam, 1 mm thickness, with mass density less than  $0,03\text{ g/cm}^3$ , to cover the temperature sensor which is fixed by either aluminium or polyimide tape. If the temperature around the module is subjected to spatial and temporal variability, use of insulating thermal tape shields the temperature sensor from influence of environmental factors such as wind, allowing more accurate measurements.

NOTE A method to determine the mass density can be found in ISO 7214[4].

- The procedure requires the irradiance correction factors,  $B_1$  and  $B_2$ .  $B_1$  is linked to the thermal diode voltage and  $B_2$  accounts for non-linearity of  $V_{OC}$  with irradiance scaling. The determination of these constants requires the measurement of the module I-V characteristic in accordance with IEC 60891 under at least five different irradiance levels.

## 6 Procedure

### 6.1 General

The procedure can be carried out either in a controlled environment or by taking measurements at arbitrary irradiances and correcting to the reference irradiance  $G_1$ .

### 6.2 Operating in a controlled environment

- Mount the radiation sensor coplanar with the test device to an agreement better than  $\pm 2^\circ$ .
- Set the irradiance to be equal to that of the reference condition  $G_1$  using the reference device.
- For bifacial modules, a non-irradiated background is required as described in IEC TS 60904-1-2.
- Take simultaneous readings of the open-circuit voltage of the device under test  $V_{OC2}$  and the incident irradiance ( $G_2$ ). Should there be any variation in the irradiance, treat as a measurement in arbitrary irradiance conditions as given in 6.3 and carry out the appropriate correction. An irradiance correction should be carried out if the scatter in the determined ECT is more than 1 K.
- Calculate the ECT as described in Clause 7.

### 6.3 Taking measurements under arbitrary irradiance conditions

- Mount the radiation sensor coplanar with the device under test to an agreement better than  $\pm 2^\circ$ .

- For bifacial modules, two different setups are recommended for the measurement:

Method 1: use a low reflectivity black cover material to reduce back-to-front irradiance ratio to  $< 1\%$ , in order to minimize the rear irradiance contribution. The cover should be mounted behind the module in a way to limit interference with the module natural convective heat dissipation as much as possible.

Method 2: measure the plane-of-array irradiance on front side  $G_{fi}$  and the average irradiance on the rear side  $G_{ri}$  using PV reference devices compliant to IEC 60904-2.  $G_{ri}$  is the average of at least 5 measurement points located per the requirements of IEC TS 60904-1-2:2019, 6.3.2. The equivalent irradiance  $G_E$  on the bifacial module is then determined by:

$$G_{E_i} = G_{f_i} + \varphi \times G_{r_i} \quad (1)$$

where  $\varphi$  is the module bifaciality coefficient as determined in accordance with IEC TS 60904-1-2.

NOTE 1 Decision on which method to use is left to the user, on consideration of the targeted measurement uncertainty budget. Method 1 is expected to enable lower uncertainty when applied to NOCT or NMOT measurements, and for translating field measured I-V characteristics to standard test conditions.

NOTE 2 When applying method 2, particularly for bifacial systems, proper selection of the modules to be tested has to consider thermal and irradiance non-uniformities at the system level. IEC 61829 provides some guidance on the selection of typical modules within a PV array, recommending in particular to avoid selecting modules at ends of rows.

- c) Take simultaneous readings of the open-circuit voltage of the device under test  $V_{OC2}$  and the incident plane-of-array irradiance  $G_2$  (method 1), or alternatively of the irradiance on front side  $G_{f_2}$  and average irradiance on the rear side  $G_{r_2}$  (method 2).
- d) Carry out a correction of  $V_{OC2}$  to an irradiance equal to  $G_1$ .
- e) Calculate the ECT as described in Clause 7.

## 7 Calculation of equivalent cell temperature

The equivalent cell temperature ECT is derived from the single diode equations describing the current voltage characteristic.

Solving the equation for  $V_2 = V_{OC2}$ , with  $V_1 = V_{OC1}$  and  $I_2 = I_1 = 0$  results in the following dependence of the open circuit voltage:

$$f(G_1, G_2) = 1 + B_1 \times \ln \frac{G_1}{G_2} + B_2 \times \ln^2 \left( \frac{G_1}{G_2} \right)$$

$$V_{OC2} = \frac{V_{OC1} \times \left[ 1 + \beta_{rel} \times (T_2 - T_1) \times f^2(G_1, G_2) \right]}{f(G_1, G_2)}$$

where

$V_{OC1}$  is the open-circuit voltage measured in Clause 5 at the chosen reference conditions, irradiance  $G_1$  and module temperature  $T_1$ ;

$V_{OC2}$  is the open-circuit voltage measured in Clause 6 at irradiance  $G_2$  and module temperature  $T_2$ ;

the relative temperature coefficient of the open-circuit voltage  $\beta_{rel}$  and the irradiance correction factors  $B_1$  and  $B_2$  are determined in Clause 5.

NOTE These formulae are derived from the IEC 60891 correction procedure 2 [3].

For measurement of bifacial modules using method 2, the irradiance  $G_2$  has to be replaced by the equivalent irradiance  $G_{E2}$ .

$$f(G_1, G_{E2}) = 1 + B_1 \times \ln \frac{G_1}{G_{E2}} + B_2 \times \ln^2 \left( \frac{G_1}{G_{E2}} \right) \quad (4)$$

$$V_{oc2} = \frac{V_{oc1} \times \left[ 1 + \beta_{rel} \times (T_2 - T_1) \times f^2(G_1, G_{E2}) \right]}{f(G_1, G_{E2})}$$

The relation between the different values of  $V_{OC}$  can then be rewritten to calculate the equivalent ECT per the formulas given below, for monofacial (6) and bifacial (7) devices:

$$ECT = T_2 = T_1 + \frac{1}{\beta_{rel} \times f^2(G_1, G_2)} \times \left[ \frac{V_{OC2}}{V_{OC1}} \times f(G_1, G_2) - 1 \right]$$

$$ECT = T_2 = T_1 + \frac{1}{\beta_{rel} \times f^2(G_1, G_{E2})} \times \left[ \frac{V_{OC2}}{V_{OC1}} \times f(G_1, G_{E2}) - 1 \right]$$

In the case of base measurements described in Clause 5 being taken at standard test conditions, the ECT for monofacial devices can be determined as:

$$ECT = T_2 = 25 + \frac{1}{\beta_{rel} \times f^2(1000, G_2)} \times \left[ \frac{V_{OC2}}{V_{OC, STC}} \times f(1000, G_2) - 1 \right]$$

## 8 Test report

The test report shall contain the following data:

- A title.
- Name and address of the test laboratory and location where the tests were carried out.
- Unique identification of the report and of each page.
- Name and address of client.
- A description and identification of the device under test (solar cell, sub-assembly of solar cells or PV module).
- Description of the test environment (natural or simulated sunlight and, in the latter case, brief description and class of simulator).
- Date of receipt of test item and date(s) of calibration or test, where appropriate.
- Reference to sampling procedure, where relevant.
- Identification of calibration or test method used.
- Any deviations from, additions to or exclusions from the calibration or test method, and any other information relevant to a specific calibration or test, such as environmental conditions.



- k) Identification of the method for determination of input parameters.
- l) A statement of the result and the estimated uncertainty of test results.
- m) A signature and title, or equivalent identification of the person(s) accepting responsibility for the content of the test report, and the date of issue.
- n) A statement to the effect that the results relate only to the device tested.
- o) A statement that the test report shall not be reproduced except in full, without the written approval of the laboratory.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60904-5:2011+AMD1:2022 CSV

## Bibliography

- [1] S. Krauter, A. Preiss, "Comparison of module temperature measurement methods", *Conference record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 10.1109/PVSC.2009.5411669
- [2] M. Pravattoni, A. Virtuani, K. Keller, M. Apolloni, H. Mullejans, "Spectral Mismatch Effect to the Open-circuit Voltage in the Indoor Characterization of Multi-junction Thin-film Photovoltaic Modules", 2013 *IEEE 39<sup>th</sup> Photovoltaic Specialists Conference*, 10.1109/PVSC.2013.6744249
- [3] C. Monokroussos, H. Mullejans, Q. Gao, W. Herrmann, "I-V translation procedure for higher accuracy and compliance with PERC cell technology requirements", 35<sup>th</sup> *European Photovoltaic Solar Energy Conference (EUPVSEC)*, online, 2020, 10.4229/EUPVSEC20202020-4AV.2.19
- [4] ISO 7214: *Cellular plastics – Polyethylene – Methods of test*

---

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60904-5:2011+AMD1:2022 CSV

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60904-5:2011+AMD1:2022 CSV

## SOMMAIRE

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| AVANT-PROPOS .....                                                        | 15 |
| INTRODUCTION.....                                                         | 17 |
| 1 Domaine d'application et objet.....                                     | 18 |
| 2 Références normatives .....                                             | 18 |
| 3 Principe et exigences de mesure .....                                   | 19 |
| 3.1 Principe.....                                                         | 19 |
| 3.2 Exigences générales de mesure .....                                   | 19 |
| 4 Appareillage .....                                                      | 19 |
| 5 Détermination des paramètres d'entrée exigés .....                      | 20 |
| 6 Procédure .....                                                         | 20 |
| 6.1 Généralités.....                                                      | 20 |
| 6.2 Fonctionnement dans un environnement contrôlé.....                    | 20 |
| 6.3 Relevé de mesures dans des conditions d'éclairement arbitraires ..... | 20 |
| 7 Calcul de la température de cellule équivalente.....                    | 21 |
| 8 Rapport d'essai .....                                                   | 22 |
| Bibliographie.....                                                        | 24 |

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60904-5:2011+AMD1:2022 CSV