

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60891:2009



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2009 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 la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: 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 corrigenda or an amendment might have been published.

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details twice a month all new publications released. Available on-line and also by email.

- Electropedia: www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary online.

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch

Tel.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 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 CEI

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

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.

- Electropedia: www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics

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

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

R

ICS 27.160

ISBN 978-2-88910-316-4

CONTENTS

FOREWORD.....	3
1 Scope.....	5
2 Normative references	5
3 Correction procedures	5
3.1 General.....	5
3.2 Correction procedure 1.....	6
3.3 Correction procedure 2.....	7
3.4 Correction procedure 3.....	8
4 Determination of temperature coefficients.....	13
4.1 General.....	13
4.2 Apparatus.....	13
4.3 Procedure in natural sunlight.....	14
4.4 Procedure with a solar simulator	15
4.5 Calculation of temperature coefficients.....	15
5 Determination of internal series resistance R_S and R'_S	15
5.1 General.....	15
5.2 Correction procedure 1.....	16
5.3 Correction procedure 2.....	17
6 Determination of the curve correction factor κ and κ'	18
6.1 General.....	18
6.2 Procedure	18
7 Reporting	19
Bibliography.....	21
Figure 1 – Example of the correction of the I-V characteristics by Equations (6) and (7)	10
Figure 2 – Schematic diagram of the relation of G_3 and T_3 which can be chosen in the simultaneous correction for irradiance and temperature, for a fixed set of T_1 , G_1 , T_2 , and G_2 by Equations (8) and (9).....	11
Figure 3 – Schematic diagram of the processes for correcting the I-V characteristics to various ranges of irradiance and temperature based on three measured characteristics	12
Figure 4 – Schematic diagram of the processes for correcting the I-V characteristics to various ranges of irradiance and temperature based on four measured characteristics	13
Figure 5 – Positions for measuring the temperature of the test module behind the cells	14
Figure 6 – Determination of internal series resistance.....	16
Figure 7 – Determination of V_{OC} irradiance correction factor and internal series resistance.....	18
Figure 8 – Determination of curve correction factor	19

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

PHOTOVOLTAIC DEVICES – PROCEDURES FOR TEMPERATURE AND IRRADIANCE CORRECTIONS TO MEASURED I-V CHARACTERISTICS

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.

International Standard IEC 60891 has been prepared by IEC technical committee 82: Solar photovoltaic energy systems.

This second edition cancels and replaces the first edition issued in 1987 and its Amendment 1 (1992) and constitutes a technical revision.

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

- extends edition 1 translation procedure to irradiance change during I-V measurement;
- adds 2 new translation procedures;
- revises procedure for determination of temperature coefficients to include PV modules;
- defines new procedure for determination of internal series resistance;
- defines new procedure for determination of curve correction factor.

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
82/581/FDIS	82/588/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

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

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the maintenance result date indicated on the IEC web site under "<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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60891:2009

PHOTOVOLTAIC DEVICES – PROCEDURES FOR TEMPERATURE AND IRRADIANCE CORRECTIONS TO MEASURED I-V CHARACTERISTICS

1 Scope

This standard defines procedures to be followed for temperature and irradiance corrections to the measured I-V (current-voltage) characteristics of photovoltaic devices. It also defines the procedures used to determine factors relevant for these corrections. Requirements for I-V measurement of photovoltaic devices are laid down in IEC 60904-1.

NOTE 1 The photovoltaic devices include a single solar cell with or without a protective cover, a sub-assembly of solar cells, or a module. A different set of relevant parameters for I-V correction applies for each type of device. Although the determination of temperature coefficients for a module (or sub-assembly of cells) may be calculated from single cell measurements, it should be noted that the internal series resistance and curve correction factor should be separately measured for a module or subassembly of cells.

NOTE 2 The term “test specimen” is used to denote any of these devices.

NOTE 3 Care should be taken regarding the use of I-V correction parameters. The parameters are valid for the PV device for which they have been measured. Variations may occur within a production lot or the type class.

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

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

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

IEC 60904-9, *Photovoltaic devices – Part 9: Solar simulator performance requirements*

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

3 Correction procedures

3.1 General

Three procedures for correcting measured current-voltage characteristics to other conditions of temperature and irradiance (such as STC) can be applied. The first is identical to the procedure given in Edition 1 of this standard, but the equation has been rewritten for easier understanding. The second procedure is an alternative algebraic correction method which yields better results for large irradiance corrections (>20 %). Both procedures require that correction parameters of the PV device are known. If not known they need to be determined prior to performing the correction. The third procedure is an interpolation method which does not require correction parameters as input: It can be applied when a minimum of three current-voltage curves have been measured for the test device. These three current-voltage curves span the temperature and irradiance range for which the correction method is applicable.

All methods are applicable to linear devices as defined in IEC 60904-10.

NOTE 1 An estimate on the translation accuracy is required (see Clause 7).

NOTE 2 All PV devices should be linear within a limited range of irradiances and device temperature. Details are described in IEC 61853-1.

Common to all procedures is that I-V characteristics of the PV device are to be measured in accordance with IEC 60904-1.

Usually irradiance G shall be calculated from the measured short circuit current (I_{RC}) of the PV reference device as defined in IEC 60904-2, and its calibration value at STC ($I_{RC,STC}$). A correction should be applied to account for the temperature of the reference device T_{RC} using the specified relative temperature coefficient of the reference device ($1/^\circ\text{C}$) which is given at 25°C and $1\,000\text{ W/m}^2$.

$$G = \frac{1\,000\text{ Wm}^{-2} \cdot I_{RC}}{I_{RC,STC}} [1 - \alpha_{RC} \cdot (T_{RC} - 25^\circ\text{C})]$$

The PV reference device shall either be spectrally matched to the test specimen, or a spectral mismatch correction shall be performed 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.

3.2 Correction procedure 1

The measured current-voltage characteristic shall be corrected to standard test conditions or other selected temperature and irradiance values by applying the following equations:

$$I_2 = I_1 + I_{SC} \cdot \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right) + \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (1)$$

$$V_2 = V_1 - R_S \cdot (I_2 - I_1) - \kappa \cdot I_2 \cdot (T_2 - T_1) + \beta \cdot (T_2 - T_1) \quad (2)$$

where:

I_1, V_1 are coordinates of points on the measured characteristics;

I_2, V_2 are coordinates of the corresponding points on the corrected characteristic;

G_1 is the irradiance measured with the reference device;

G_2 is the irradiance at the standard or other desired irradiance;

T_1 is the measured temperature of the test specimen;

T_2 is the standard or other desired temperature;

I_{SC} is the measured short-circuit current of the test specimen at G_1 and T_1 ;

α and β are the current and voltage temperature coefficients of the test specimen in the standard or target irradiance for correction and within the temperature range of interest;

R_S is the internal series resistance of the test specimen;

κ is a curve correction factor.

NOTE 1 As the data point V_{oc1} will be shifted off the current axis when translating from lower to higher irradiance, the translated V_{oc2} has to be determined by linear extrapolation from at least 3 data points near and below V_{oc1} or the original IV curve has to be measured sufficiently far beyond V_{oc1} .

NOTE 2 The units of all correction parameters should be consistent.

NOTE 3 If the test specimen is a module the cell I-V correction parameters can be derived from the interconnection circuit. These cell parameters may be used to calculate the module I-V correction parameters for other module types using the same cells.

NOTE 4 For crystalline silicon PV devices α is normally positive and β negative.

Procedures for determination of the I-V correction parameters of the test specimen are described in sections 4 to 6.

Equation (1) is only applicable for I-V curves measured at irradiances which are constant during the acquisition of the entire I-V curve. For pulsed solar simulators with decaying irradiance or any other kind of irradiance fluctuations during I-V measurement Equation (1) is not applicable as such. In this case, each measured I-V curve has to be corrected to an equivalent I-V curve at constant irradiance which requires an additional scaling factor in front of I_{SC} . For practical reasons this scaling factor is related to the irradiance corresponding to measured I_{SC} . For non-constant irradiance Equation (1) will become the following translation equation.

$$I_2 = I_1 + \frac{G'_1}{G_{SC}} \cdot I_{SC} \cdot \left(\frac{G_2}{G'_1} - 1 \right) + \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (3)$$

where G_{SC} is the irradiance value at the time of I_{SC} measurement and G'_1 is the irradiance measured at time of data acquisition of individual I-V data points.

3.3 Correction procedure 2

This procedure is based on the simplified one-diode model of PV devices. The semi-empirical translation equations contain 5 I-V correction parameters which can be determined by measurement of I-V curves at different temperature and irradiance conditions. Besides the temperature coefficients for short circuit current (α) and open circuit voltage (β) an additional temperature coefficient (κ') is commonly used which accounts for changes of the internal series resistance (and fill factor) with temperature.

The correction procedure is defined by the following equations for current and voltage:

$$I_2 = I_1 \cdot (1 + \alpha_{rel} \cdot (T_2 - T_1)) \cdot \frac{G_2}{G_1} \quad (4)$$

$$V_2 = V_1 + V_{OC1} \cdot \left(\beta_{rel} \cdot (T_2 - T_1) + a \cdot \ln \left(\frac{G_2}{G_1} \right) \right) - R'_S \cdot (I_2 - I_1) - \kappa' \cdot I_2 \cdot (T_2 - T_1) \quad (5)$$

where:

I_1, V_1 are coordinates of points on the measured I-V characteristic;

I_2, V_2 are coordinates of the corresponding points on the corrected I-V curve;

G_1 is the irradiance as measured with the reference device;

G_2 is the target irradiance for the corrected I-V characteristic;

T_1 is the measured temperature of the test specimen;

T_2 is the target temperature of the test specimen;

V_{OC1} the open circuit voltage at test conditions;

α_{rel} and β_{rel} are the relative current and voltage temperature coefficients of the test specimen measured at 1 000 W/m². They are related to short circuit current and open circuit voltage at STC;

a is the irradiance correction factor for open circuit voltage which is linked with the diode thermal voltage D of the pn junction and the number of cells n_S serially connected in the module;

R'_S is the internal series resistance of the test specimen;

κ' is interpreted as temperature coefficient of the internal series resistance R'_S .

NOTE 1 A typical value for the irradiance correction factor a is 0,06.

NOTE 2 Care should be taken that the numerical values for R'_S for procedure 2 may be different to R'_S of correction procedure 1.

3.4 Correction procedure 3

3.4.1 General

This procedure is based on the linear interpolation or extrapolation of two measured I-V characteristics. It uses a minimum of two I-V characteristics, and requires no correction parameters or fitting parameters. The measured current-voltage characteristics shall be corrected to standard test conditions or other selected temperature and irradiance values by applying the following equations:

$$V_3 = V_1 + a \cdot (V_2 - V_1) \quad (6)$$

$$I_3 = I_1 + a \cdot (I_2 - I_1) \quad (7)$$

The pair of (I_1, V_1) and (I_2, V_2) should be chosen so that $I_2 - I_1 = I_{SC2} - I_{SC1}$:

where:

I_1, V_1 are coordinates of points on the measured characteristics at an irradiance G_1 and temperature T_1 .

I_2, V_2 are coordinates of points on the measured characteristics at an irradiance G_2 and temperature T_2 .

I_3, V_3 are coordinates of the corresponding points on the corrected characteristics at an irradiance G_3 and temperature T_3 .

I_{SC1}, I_{SC2} are the measured short-circuit current of the test specimen.

a is a constant for the interpolation, which has the relation with the irradiance and temperature as follows.

$$G_3 = G_1 + a \cdot (G_2 - G_1) \quad (8)$$

$$T_3 = T_1 + a \cdot (T_2 - T_1) . \quad (9)$$

This method should be applicable to most PV technologies. Equations (6) to (9) can be used for the irradiance correction, temperature correction, and simultaneous correction of irradiance and temperature.

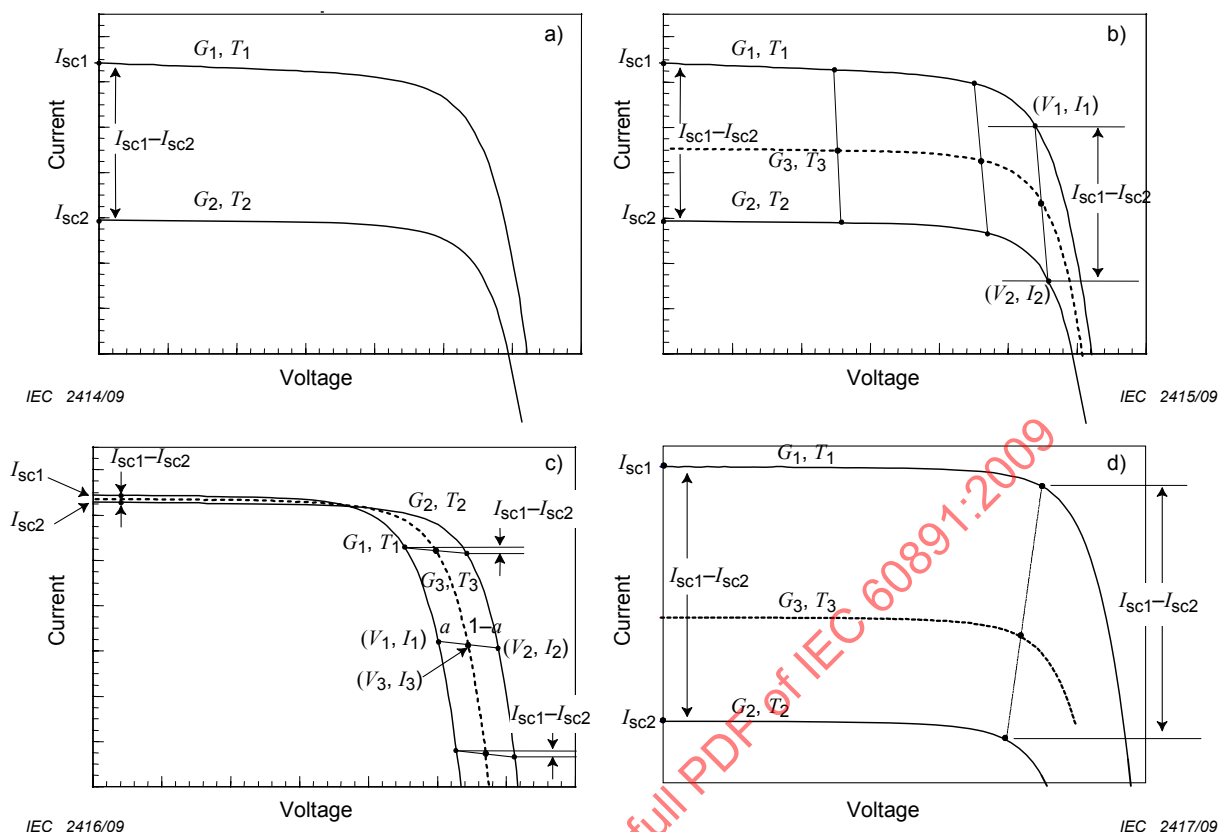
3.4.2 Correction for the irradiance and temperature from two measured I-V characteristics

The procedure to correct the I-V characteristics to the irradiance and temperature (G_3 , T_3) from two I-V characteristics measured at the irradiances and temperatures of (G_1 , T_1) and (G_2 , T_2) is as follows (Figures 1(a) and 1(b)).

- a) Measure the two I-V characteristics at the irradiances and temperatures of G_1 , T_1 and G_2 , T_2 , respectively (solid lines in Figure 1(a)). Find the values of I_{SC1} and I_{SC2} .
- b) Calculate a by Equation (8) or (9). For example, when the two measured I-V curves were made at:
 $G_1 = 1\,000\text{ W/m}^2$ and $T_1 = 50\text{ °C}$
 $G_2 = 500\text{ W/m}^2$ and $T_2 = 40\text{ °C}$.
 And the irradiance of interest is $G_3 = 800\text{ W/m}^2$:
 Then using Equation (8) $a = 0,4$.
 And using Equation (9) $T_3 = 46\text{ °C}$.
- c) Choose a point (V_1 , I_1) on the I-V characteristic 1. Find a point (V_2 , I_2) on the I-V characteristic 2, so that the relation $I_2 - I_1 = I_{SC2} - I_{SC1}$ is satisfied (Figure 1(b)).
- d) Calculate V_3 and I_3 by Equations (6) and (7).
- e) Select multiple sets of data points (V_1 , I_1) on the I-V characteristics 1, and calculate (V_3 , I_3) for each by the procedures (c) and (d).
- f) The I-V characteristics 3 at the irradiance G_3 and temperature T_3 are given by the set of data points (V_3 , I_3) (broken line in Figure 1(b)).

Figures 1(a) and 1(b) show an example of an irradiance correction. Figures 1(c) shows an example of a temperature correction. Figure 1(d) shows a simultaneous correction of irradiance and temperature. When $0 < a < 1$, the procedure is interpolation. Otherwise, the procedure is extrapolation.

It should be noted that when G_1 , G_2 , T_1 and T_2 are fixed, G_3 and T_3 cannot be chosen independently, because they have the relationships given in Equations (8) and (9) (Figure 2). For example, when $G_1 = 1\,000\text{ W/m}^2$, $T_1 = 20\text{ °C}$, $G_2 = 0\text{ W/m}^2$, $T_2 = 60\text{ °C}$ (dark I-V curve at 60 °C), and you wish to have the new curve at $G_3 = 750\text{ W/m}^2$, a is calculated to be 0,25 by Equation (8). Therefore, T_3 should be 30 °C from Equation (9).



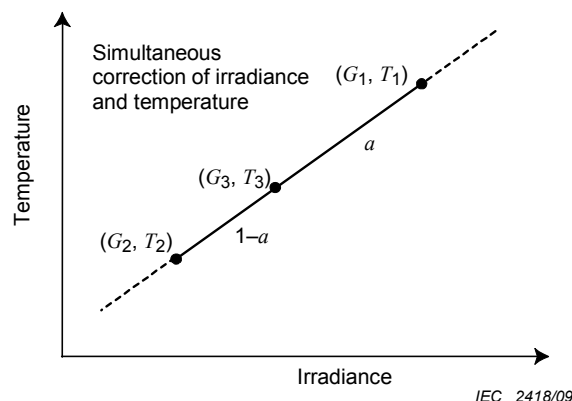
Subfigures (a) and (b) show irradiance corrections, (c) shows a temperature correction and (d) shows simultaneous correction of irradiance and temperature.

Figure 1 – Example of the correction of the I-V characteristics by Equations (6) and (7)

NOTES 1 Interpolation usually gives better results than extrapolation.

NOTE 2 When $I_{sc1} \neq I_{sc2}$ and the corrected I-V characteristics around the open-circuit voltage is required, the measured characteristics should extend beyond V_{oc} .

NOTE 3 When there are no measured data points which exactly satisfy $I_2 = I_1 + (I_{sc2} - I_{sc1})$, the V_2 and I_2 may be calculated from interpolation of the data points in the I-V curve 2.



The solid line and broken line show the range of G_3 and T_3 which are calculable by the interpolation and extrapolation, respectively.

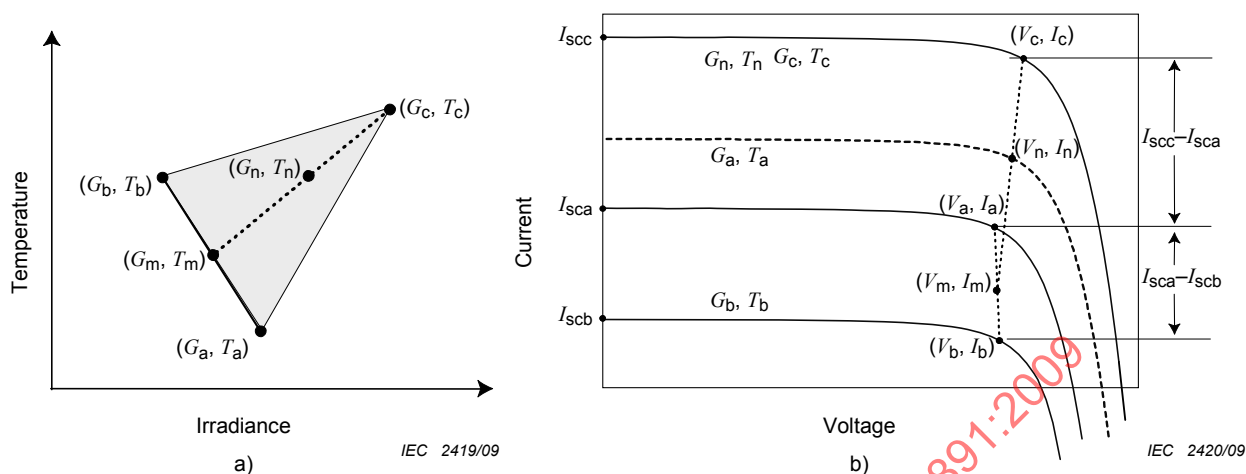
Figure 2 – Schematic diagram of the relation of G_3 and T_3 which can be chosen in the simultaneous correction for irradiance and temperature, for a fixed set of T_1 , G_1 , T_2 , and G_2 by Equations (8) and (9)

3.4.3 Correction to various irradiances and temperatures from three I-V characteristics

The correction of the I-V characteristics to various ranges of irradiance and temperature is possible by combining the procedures described in 3.4.2. For example, when three characteristics measured at irradiances and temperatures of (G_a, T_a) , (G_b, T_b) and (G_c, T_c) are available as shown in Figure 3(a), the I-V characteristics at any irradiances and temperatures (G_n, T_n) can be calculated as follows.

- The characteristics at (G_m, T_m) are calculated from those at (G_a, T_a) and (G_b, T_b) .
- The characteristics at (G_n, T_n) are calculated from those at (G_m, T_m) and (G_c, T_c) .

For example, when (G_a, T_a) , (G_b, T_b) , (G_c, T_c) and (G_n, T_n) are $(950 \text{ W/m}^2, 15^\circ\text{C})$, $(850 \text{ W/m}^2, 25^\circ\text{C})$, $(1\,100 \text{ W/m}^2, 30^\circ\text{C})$ and $(1\,000 \text{ W/m}^2, 25^\circ\text{C})$ respectively, then (G_m, T_m) are $(900 \text{ W/m}^2, 20^\circ\text{C})$.



The shaded area in (a) shows the range which can be calculated by interpolation only. Sub-figure (b) shows an example of the I-V characteristics which correspond to (a).

Figure 3 – Schematic diagram of the processes for correcting the I-V characteristics to various ranges of irradiance and temperature based on three measured characteristics

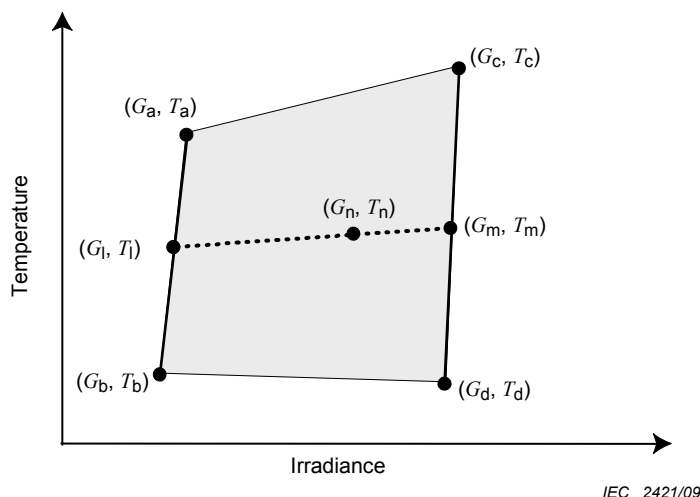
3.4.4 Correction to various irradiances and temperatures from four measured I-V curves

When four I-V characteristics measured at irradiances and temperatures of (G_a, T_a) , (G_b, T_b) , (G_c, T_c) and (G_d, T_d) are available as shown in Figure 4, the I-V characteristics at any irradiances and temperatures (G_n, T_n) can be calculated as follows. This process is useful for correction of the characteristics in a wide range of irradiance and temperature. Although the pair of (G_l, T_l) and (G_m, T_m) to calculate the characteristics at (G_n, T_n) is not unique, good correction results are usually available when $(G_a - G_l)/(G_a - G_b) = (G_c - G_m)/(G_c - G_d)$ is satisfied.

- The characteristics at (G_l, T_l) are calculated from those at (G_a, T_a) and (G_b, T_b) .
- The characteristics at (G_m, T_m) are calculated from those at (G_c, T_c) and (G_d, T_d) .
- The characteristics at (G_n, T_n) are calculated from those at (G_l, T_l) and (G_m, T_m) .

For example, when (G_a, T_a) , (G_b, T_b) , (G_c, T_c) , (G_d, T_d) and (G_n, T_n) are $(500 \text{ W/m}^2, 55^\circ\text{C})$, $(400 \text{ W/m}^2, 31^\circ\text{C})$, $(1\,000 \text{ W/m}^2, 60^\circ\text{C})$, $(950 \text{ W/m}^2, 32^\circ\text{C})$ and $(800 \text{ W/m}^2, 45^\circ\text{C})$ respectively, then (G_l, T_l) and (G_m, T_m) are $(450 \text{ W/m}^2, 43^\circ\text{C})$ and $(975 \text{ W/m}^2, 46^\circ\text{C})$ respectively.

The I-V characteristics in the range of irradiance and temperature shown by the shaded area of Figure 4 can be calculated by interpolation. The characteristics in the range other than the shaded area can be calculated by using extrapolation. However, care should be taken that extensive extrapolation not result in bad correction results and a poor correction accuracy.



The shaded area shows the range which can be calculated by interpolation only.

Figure 4 – Schematic diagram of the processes for correcting the I-V characteristics to various ranges of irradiance and temperature based on four measured characteristics

4 Determination of temperature coefficients

4.1 General

For PV devices temperature coefficients are commonly used for the following parameters: short-circuit current (α), open-circuit voltage (β) and peak power (δ).

These parameters may be determined from measurements in natural sunlight or simulated sunlight. The coefficients so determined are valid at the irradiance at which the measurements were made. For linear PV devices, they are valid over an irradiance range of $\pm 30\%$ of this level.

The temperature coefficients of a thin-film module may depend upon the irradiation, spectral irradiance and the thermal history of the module. When temperature coefficients are referred to, the history concerning the conditions and the results of irradiation along with thermal history shall be indicated.

See IEC 60904-10 for evaluation of module temperature coefficients at different irradiance levels.

4.2 Apparatus

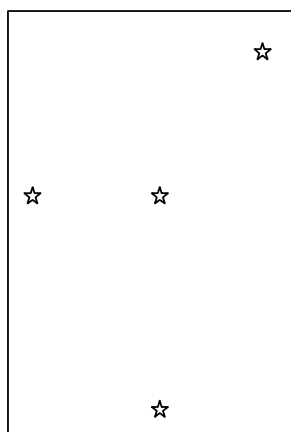
The measuring apparatus shall comply with the following:

- The apparatus and instrumentation shall comply with the requirements of IEC 60904-1.
- If a solar simulator is used as radiant source it shall comply with class BBB or better in accordance with IEC 60904-9.
- The apparatus includes equipment necessary to change the temperature of the test specimen over the range of interest.

NOTE The following equipment has been used successfully:

- blowers, allowing cooling and heating of the specimen by airflow;
- mounting blocks with variable temperature in close contact with a single cell or an entire module;

- chambers with a transparent window, where internal temperature can be controlled;
 - a removable shade when natural sunlight is used.
- d) If the test device is a module, the temperature of the module shall be measured at approximately the four positions shown in Figure 5 (assuring that each position is directly behind a cell) and their values averaged.



IEC 2422/09

Figure 5 – Positions for measuring the temperature of the test module behind the cells

4.3 Procedure in natural sunlight

Measurement in natural sunlight shall only be made when:

- the total irradiance is at least as high as the upper limit of the range of interest;
- the irradiance variation caused by short-term oscillations (clouds, haze, or smoke) is less than ± 2 % of the total irradiance as measured by the reference device;
- the wind speed is less than $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

NOTE 1 Measurements in natural sunlight shall be made as expeditiously as possible within a few hours on the same day to minimize the effect of changes in the spectral conditions. If not, spectral corrections may be required.

- a) If the test specimen and reference device (IEC 60904-2) are equipped with temperature controls, set the controls at the desired level.
- b) If temperature controls are not used, shade the specimen and the reference device from the sun and wind until its temperatures are uniform within ± 2 °C of the ambient air temperature. Alternately, allow the test specimen to equilibrate to its stabilized temperature, or cool the test specimen to a point below the required test temperature and then let the module warm up naturally. The reference device should also stabilize within ± 2 °C of its equilibrium temperature before proceeding.

NOTE 2 For large-area modules an alternate approach is to use the equivalent cell temperature (ECT) in accordance with IEC 60904-5, if the temperature requirement is not met.

- c) Record the I-V characteristic and temperature of the specimen concurrently with recording the short-circuit current and temperature of the reference device at the desired temperatures. If necessary, make the measurements immediately after removing the shade. Take the values of I_{SC} , V_{OC} and P_{max} .

- d) Adjust the device temperature by means of a temperature control or alternately exposing and shading the test module as required to achieve and maintain the desired temperature. Alternately, the test device may be allowed to warm-up naturally with the data recording procedure of item b) performed periodically during the warm-up.
- e) Ensure that the test device and reference device temperature are stabilized and remain constant within $\pm 2^\circ\text{C}$ and that the irradiance as measured by the reference device remains constant within $\pm 1\%$ during the recording period for each data set.
- f) If necessary, translate data to the irradiance level for which temperature coefficients shall be reported using one of the procedures in this standard. The translation can only be performed within the range of irradiance where the module is linear as defined in IEC 60904-10.
- g) Repeat steps d) through f). Module temperatures shall be such that the range of interest is at least 30°C and that it is spanned in at least four approximately equal increments.

4.4 Procedure with a solar simulator

The procedure using a solar simulator is as follows:

- a) Heat or cool the module to the temperature of interest until its temperature is uniform within $\pm 2^\circ\text{C}$. Once the module temperature has stabilized, set the irradiance to the desired level, using the reference device (IEC 60904-2).
- b) Record the current-voltage characteristic and temperature of the specimen and take the values of I_{SC} , V_{OC} and P_{max} .
- c) Change the module temperature in steps of approximately 5°C over a range of interest of at least 30°C and repeat steps a) and b).

4.5 Calculation of temperature coefficients

4.5.1 Plot the values of I_{SC} , V_{OC} and P_{max} as functions of the device temperature and construct a least-squares-fit curve through each set of data.

4.5.2 From the slopes of the least squares fit, draw straight lines for current, voltage and P_{max} . Calculate α , the temperature coefficient of short circuit current, β , the temperature coefficient of open circuit voltage, and δ , the temperature coefficient of P_{max} , for the module.

NOTE 1 See IEC 60904-10 to determine if the test modules can be considered to be linear devices.

NOTE 2 Temperature coefficients are only valid at the irradiance level and spectrum at which they were measured.

NOTE 3 Relative temperature coefficients expressed as percentages can be determined by dividing the calculated value of α , β , and δ by the values of current, voltage and peak power at 25°C .

NOTE 4 Because the fill factor of the module is a function of temperature, it is not sufficient to use the product of α and β as the temperature coefficient of peak power.

5 Determination of internal series resistance R_{S} and R'_{S}

5.1 General

The experimental method for determination of R_{S} or R'_{S} is different for correction procedures 1 and 2 although they both start from the same data set of I-V curves. These parameters may be determined in natural sunlight or simulated sunlight by the following procedure.

Trace current-voltage characteristics of the test specimen at constant temperature and at three or more different irradiances ($G_1 \dots G_N$) covering the range of interest within which the curve translation shall be performed. The exact values of irradiances need not be known. For

linear devices they can be calculated according to $G_N = I_{SC,N}/I_{SC1} \times G_1$. During the I-V measurements the device temperature shall be stable within $\pm 2^\circ\text{C}$. Plot the I-V curves in a diagram (Figure 6a).

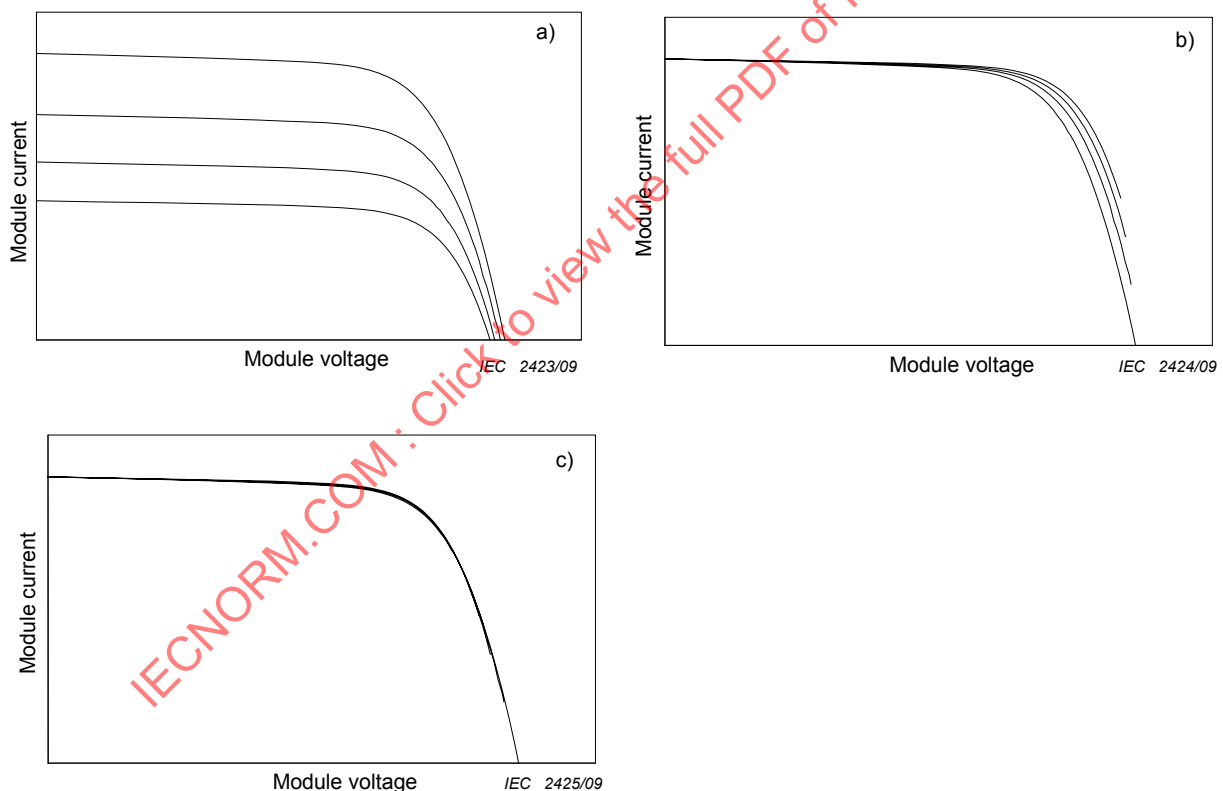
NOTE For the purpose of changing irradiance, large area meshes with uniform transmittance can be used. Regarding spectral irradiance, these can be considered as neutral mesh filters.

5.2 Correction procedure 1

5.2.1 Assuming that I_{SC1} is the short-circuit current of the I-V characteristic recorded at highest Irradiance G_1 , translate sequentially all other (N-1) curves recorded at lower irradiance ($G_2 \dots G_N$) to the G_1 , using $R_S = 0 \Omega$.

5.2.2 Plot the corrected I-V curves in a diagram (Figure 6b).

5.2.3 Change R_S in steps of $10 \text{ m}\Omega$ in the positive or negative direction. The proper value of " R_S " has been determined, if the deviation of maximum output power values of the transposed I-V characteristics coincide within $\pm 0,5 \%$ or better (see Figure 6c).



- a) Measured I-V characteristics at different irradiances and constant temperature
- b) Corrected I-V characteristics at $R_S = 0 \Omega$
- c) Corrected I-V characteristics at $R_S = \text{optimal}$

Figure 6 – Determination of internal series resistance

5.3 Correction procedure 2

5.3.1 Assuming that I_{SC1} is the short-circuit current of the I-V characteristic recorded at highest Irradiance G_1 , translate sequentially all other (N–1) curves recorded at lower irradiance ($G_2 \dots G_N$) to the G_1 , using $R'_S = 0 \Omega$, $a = 0$ as starting values using Equations (4) and (5).

5.3.2 Plot the corrected I-V curves in a diagram (see Figure 7b).

NOTE At given start values $R'_S = 0 \Omega$, $a = 0$ only the translated short circuit currents will coincide.

5.3.3 Increase the parameter "a" of Equation (5) in steps of 0,001 and keep $R'_S = 0 \Omega$. The proper value of "a" has been determined, when the open circuit voltages of the transposed I-V characteristics coincide within $\pm 0,5 \%$ or better (see Figure 7c).

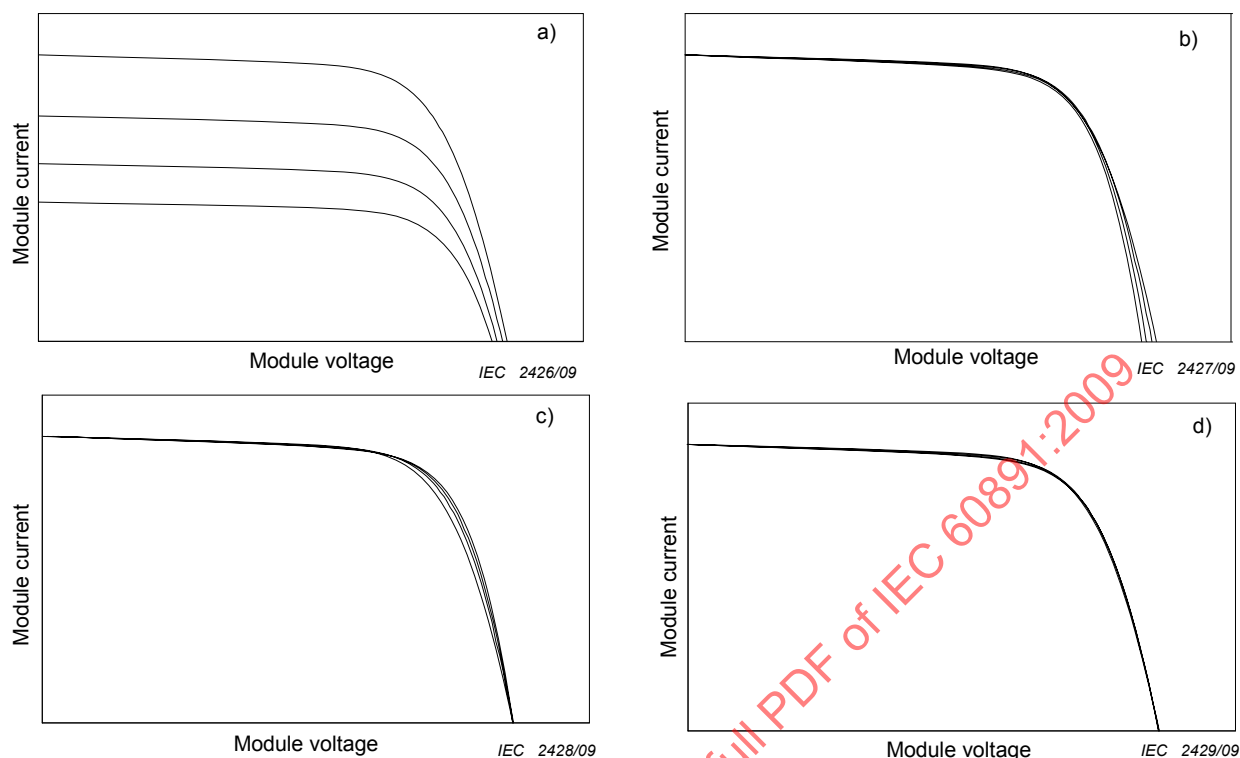
NOTE 1 If it is not possible to find a suitable parameter resulting in conformance of translated V_{OC} values, the correction procedure is not suitable for this PV device technology.

NOTE 2 The V_{OC} irradiance correction factor is typically $< 0,1$ for linear PV devices

5.3.4 Fix "a" to the value determined in step 5.3.3. Use $n_S/n_P \times 10 \text{ m}\Omega$ as an estimate for the internal series resistance R'_S where n_S is the number of serially connected cells and n_P is the number of parallel connected blocks in the test device.

5.3.5 Change R'_S in steps of $10 \text{ m}\Omega$ in the positive or negative direction. The proper value of " R'_S " has been determined, if the deviation of maximum output power values of the transposed I-V characteristics coincide within $\pm 0,5 \%$ or better (see Figure 7d).

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60891:2009



- a) Measured I-V characteristics at different irradiances and constant temperature
- b) Corrected I-V characteristics at $a=0$ and $R'_S=0 \Omega$
- c) Corrected I-V characteristics at $a=\text{optimal}$ and $R'_S=0 \Omega$
- d) Corrected I-V characteristics at $a=\text{optimal}$ and $R'_S=\text{optimal}$

Figure 7 – Determination of V_{OC} irradiance correction factor and internal series resistance

6 Determination of the curve correction factor κ and κ'

6.1 General

The experimental method for determination of curve correction factors κ and κ' is identical for both correction procedures 1 and 2. They may be determined in natural sunlight or simulated sunlight by the following procedure. The temperature coefficients α and β must be known as they are used as inputs for determination of κ and κ' .

6.2 Procedure

6.2.1 Trace current-voltage characteristics of the test specimen at a constant irradiance and at different temperatures ($T_1 \dots T_N$) covering the range of interest within which curve translation shall be performed. During the I-V measurements irradiance shall not differ by more than $\pm 1 \%$. The irradiance value shall lie within the range which has been used for determination of the irradiance correction parameters in Clause 5 (see Figure 8a).

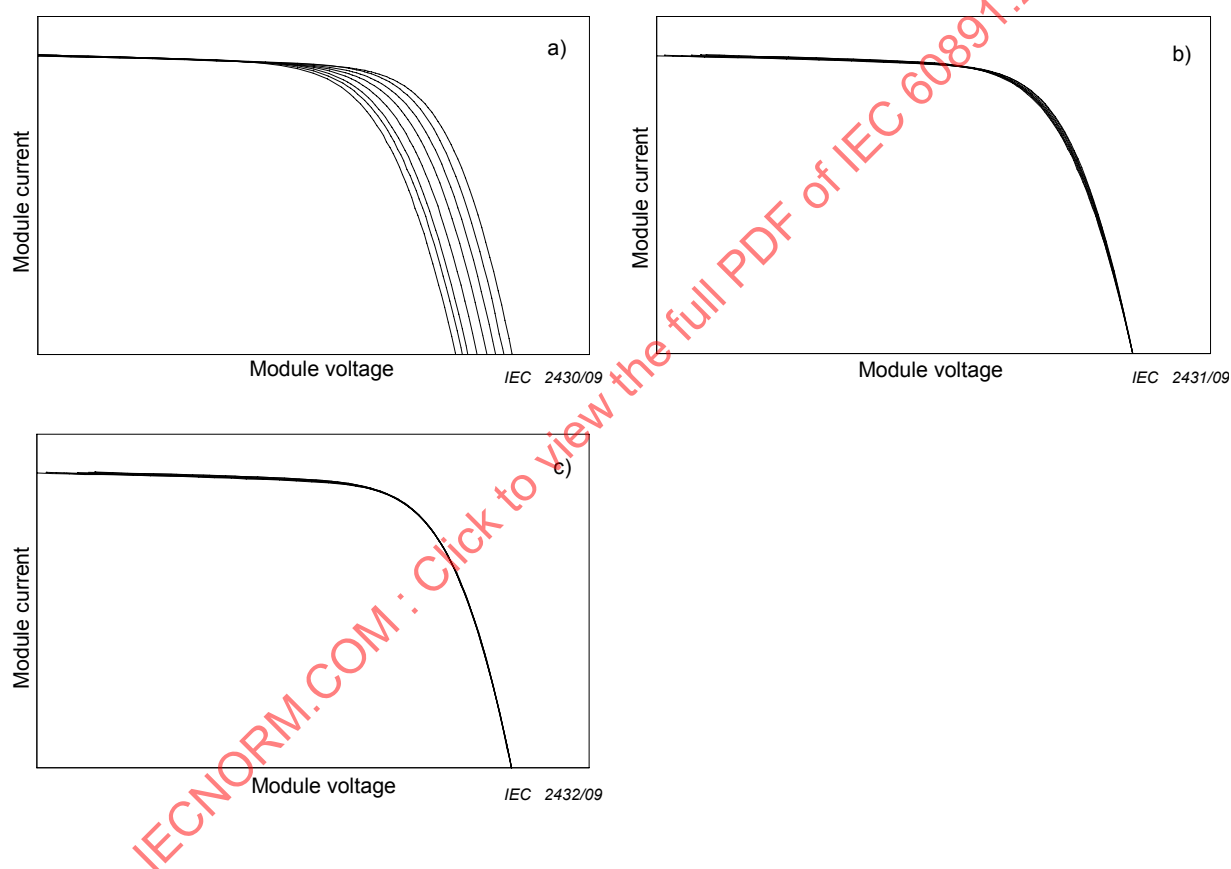
NOTE 1 See 4.1 for information on equipment and measurement techniques for temperature control

NOTE 2 When measuring the I-V characteristics of a module, precautions must be taken to ensure uniformity of the device temperature within ± 2 °C of the intended level.

6.2.2 Assuming that T_1 is the lowest device temperature, translate sequentially all other (N–1) curves recorded at higher temperatures ($T_2 \dots T_N$) to T_1 using $\kappa = 0$ Ω/K in Equation (2) or $\kappa' = 0$ Ω/K in Equation (5).

6.2.3 Plot the corrected I-V curves in a diagram (see Figure 8b).

6.2.4 Starting from 0 mΩ/K change κ or κ' in steps of 1 mΩ/K in the positive or negative direction. The proper value of κ or κ' has been determined, if the deviation of maximum output power values of the transposed I-V characteristics coincide within $\pm 0,5$ % or better (see Figure 8c).



- a) Measured I-V characteristics at different device temperatures.
- b) Temperature corrected I-V characteristics with $\kappa = 0$ Ω/K or $\kappa' = 0$ Ω/K.
- c) Corrected I-V characteristics with $\kappa = \text{optimal}$ or $\kappa' = \text{optimal}$.

Figure 8 – Determination of curve correction factor

7 Reporting

The following information shall be given if temperature and irradiance corrections are applied to measured I-V characteristics:

- a) description of the test device;

- b) measurement conditions of irradiance and device temperature. If the linear interpolation method is applied all sets of (G_i, T_i) shall be reported;
- c) identification of the correction procedure used;
- d) values and origin of I-V correction parameters;
- e) irradiance level to which temperature coefficients are referred;
- f) a statement of the estimated translation accuracy.

If I-V correction parameters are measured the following information shall be given:

- identification of measurement method used;
- ranges for irradiance and device temperature that were used as basis for determination of I-V correction parameters;
- measurement protocol and derived results supported by tables, graphs and photographs as appropriate;
- spectral irradiance distribution of the light source;
- a statement of estimated measurement uncertainty for I-V correction parameters;
- statement whether the PV device can be regarded as linear in accordance with IEC 60904-10 and over what range of irradiances and temperatures it is linear;
- electrical condition of the test specimen regarding history of temperature and light treatment prior to the measurements, if applicable;
- any deviations from, additions to, or exclusions from the measurement procedures for determination of I-V correction parameters.

Bibliography

IEC 60904-5, *Photovoltaic devices – Part 5: Determination of the equivalent cell temperature (ECT) of photovoltaic (PV) devices by the open-circuit voltage method*

IEC 61853-1, *Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating – Part 1: Irradiance and temperature performance measurements and power rating*¹⁾

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60891:2009

¹⁾ To be published.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	23
1 Domaine d'application	25
2 Références normatives	25
3 Procédures de correction.....	25
3.1 Généralités.....	25
3.2 Procédure de correction 1	26
3.3 Procédure de correction 2	27
3.4 Procédure de correction 3	28
4 Détermination des coefficients de température	32
4.1 Généralités.....	32
4.2 Appareillage	32
4.3 Procédure sous éclairage solaire naturel	33
4.4 Procédure utilisant un simulateur solaire	34
4.5 Calcul des coefficients de température	34
5 Détermination des résistances-série internes R_S and R'_S	35
5.1 Généralités.....	35
5.2 Procédure de correction 1	35
5.3 Procédure de correction 2	36
6 Détermination des facteurs de correction de la courbe κ et κ'	37
6.1 Généralités.....	37
6.2 Procédure	38
7 Rapport	39
Bibliographie.....	40
Figure 1 – Exemple de correction des caractéristiques I-V par les Equations (6) et (7)	30
Figure 2 – Diagramme schématique de la relation de G_3 et T_3 qui peuvent être choisis dans la correction simultanée de l'éclairage et de la température, pour un ensemble donné T_1 , G_1 , T_2 , et G_2 obtenu en appliquant les Equations (8) et (9)	30
Figure 3 – Diagramme schématique des procédés de correction des caractéristiques I-V en fonction de plages variables d'éclairage et de température basés sur trois caractéristiques mesurées	31
Figure 4 – Diagramme schématique des procédés de correction des caractéristiques I-V en fonction de plages variables d'éclairage et de température basés sur quatre caractéristiques mesurées	32
Figure 5 – Positions pour mesurer la température du module en essai derrière les cellules	33
Figure 6 – Détermination de la résistance-série interne	36
Figure 7 – Détermination du facteur de correction de l'éclairage V_{oc} et de la résistance-série interne	37
Figure 8 – Détermination du facteur de correction de la courbe	38

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**DISPOSITIFS PHOTOVOLTAÏQUES – PROCÉDURES POUR
LES CORRECTIONS EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE ET DE
L'ÉCLAIREMENT À APPLIQUER AUX CARACTÉRISTIQUES I-V MESURÉES**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI 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, la CEI – 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 la CEI"). 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 la CEI, participent également aux travaux. La CEI 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 la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI 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 la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI 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 la CEI. La CEI 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 la CEI, 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 la CEI, 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 la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, 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 la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60891 a été établie par le comité d'études 82 de la CEI: Systèmes de conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.

Cette seconde édition annule et remplace la première édition publiée en 1987 ainsi que son Amendement 1 (1992) et constitue une révision technique.

Les principales modifications techniques par rapport à l'édition précédente sont les suivantes:

- extension de la procédure de transposition de l'édition 1 au changement d'éclairement pendant la mesure I-V;
- ajout de deux nouvelles procédures de transposition;
- révision de la procédure utilisée pour déterminer les coefficients de température pour inclure les modules PV;
- définition d'une nouvelle procédure pour déterminer la résistance-série interne;

- définition d'une nouvelle procédure pour déterminer le facteur de correction de la courbe.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
82/581/FDIS	82/588/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

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

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de maintenance indiquée sur le site web de la CEI sous "<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.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60891:2009

DISPOSITIFS PHOTOVOLTAÏQUES – PROCÉDURES POUR LES CORRECTIONS EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE ET DE L'ÉCLAIREMENT À APPLIQUER AUX CARACTÉRISTIQUES I-V MESURÉES

1 Domaine d'application

La présente norme définit des procédures à suivre pour les corrections en fonction de la température et de l'éclairement à appliquer aux caractéristiques I-V (courant-tension) mesurées des dispositifs photovoltaïques. Elle définit également les procédures utilisées pour déterminer les facteurs appropriés pour ces corrections. Les exigences pour la mesure I-V des dispositifs photovoltaïques sont données dans la CEI 60904-1.

NOTE 1 Les dispositifs photovoltaïques comportent une seule cellule solaire avec ou sans couverture de protection, un sous-ensemble de cellules solaires ou un module. Un ensemble différent de paramètres appropriés à la correction I-V s'applique à chaque type de dispositif. Bien que la détermination des coefficients de température pour un module (ou un sous-ensemble de cellules) puisse être effectuée à partir de mesures sur une seule cellule, il convient de noter que la résistance-série interne et le facteur de correction de la courbe seront mesurés séparément pour un module ou un sous-ensemble de cellules.

NOTE 2 L'expression "spécimen en essai" est utilisée pour désigner l'un de ces dispositifs.

NOTE 3 Il convient de prêter une attention particulière à l'utilisation des paramètres de correction I-V. Les paramètres sont valables pour le dispositif PV pour lequel ils ont été mesurés. Des variations peuvent apparaître au sein d'un lot de fabrication ou de la classe type.

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 (y compris les éventuels amendements) s'applique.

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

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

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

CEI 60904-9, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 9: Exigences pour le fonctionnement des simulateurs solaires*

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

3 Procédures de correction

3.1 Généralités

Trois procédures pour la correction des caractéristiques courant-tension mesurées peuvent être appliquées à d'autres conditions de température et d'éclairement (telles que STC). La première est identique à la procédure donnée dans l'Édition 1 de la présente Norme, mais l'équation a été réécrite pour une meilleure compréhension. La seconde procédure est une méthode de correction algébrique alternative qui donne de meilleurs résultats pour des corrections importantes en fonction de l'éclairement (> 20 %). Ces deux procédures

requièrent la connaissance des paramètres de correction du dispositif PV. S'ils ne sont pas connus, il est nécessaire de les déterminer avant d'appliquer la correction. La troisième procédure est une méthode d'interpolation qui ne requiert pas la connaissance des paramètres de correction en entrée. Elle peut être appliquée quand au moins trois courbes courant-tension ont été mesurées pour le dispositif d'essai. Ces trois courbes courant-tension couvrent la plage de température et d'éclairement pour laquelle la méthode de correction est applicable.

Toutes ces méthodes sont applicables aux dispositifs linéaires tels que définis dans la CEI 60904-10.

NOTE 1 Une estimation de la précision de la transposition est requise (voir Article 7).

NOTE 2 Il convient que tous les dispositifs PV soient linéaires sur une plage limitée d'éclairement et de température du dispositif. Des précisions sont données dans la CEI 61853-1.

L'élément commun à toutes les procédures est que les caractéristiques I-V du dispositif PV doivent être mesurées conformément à la CEI 60904-1.

En général l'éclairement G doit être calculé à partir du courant de court-circuit mesuré (I_{RC}) du dispositif PV de référence tel que défini dans la CEI 60904-2 et de sa valeur d'étalonnage aux STC ($I_{RC,STC}$). Il convient d'appliquer une correction pour prendre en compte la température du dispositif de référence T_{RC} en utilisant le coefficient de température relative spécifié du dispositif de référence ($1/^\circ\text{C}$), lequel est donné à 25°C et $1\,000\text{ W/m}^2$.

$$G = \frac{1\,000\text{ Wm}^{-2} \cdot I_{RC}}{I_{RC,STC}} [1 - \alpha_{RC} \cdot (T_{RC} - 25^\circ\text{C})]$$

Le spectre du dispositif PV de référence doit être adapté au spécimen en essai ou une correction de désadaptation des réponses spectrales doit être appliquée conformément à la CEI 60904-7. Le dispositif de référence doit être linéaire en courant de court-circuit, tel que défini dans la CEI 60904-10, sur la plage d'éclairement présentant un intérêt.

3.2 Procédure de correction 1

La caractéristique courant-tension mesurée doit être corrigée par rapport aux conditions normales d'essai ou par rapport à des valeurs de température et d'éclairement choisies, différentes de celles-ci, en appliquant les équations suivantes:

$$I_2 = I_1 + I_{SC} \cdot \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right) + \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (1)$$

$$V_2 = V_1 - R_S \cdot (I_2 - I_1) - \kappa \cdot I_2 \cdot (T_2 - T_1) + \beta \cdot (T_2 - T_1) \quad (2)$$

où:

- I_1, V_1 sont les coordonnées des points des caractéristiques mesurées;
- I_2, V_2 sont les coordonnées des points correspondants des caractéristiques corrigées;
- G_1 est l'éclairement mesuré avec le dispositif de référence;
- G_2 est l'éclairement à l'éclairement normalisé ou à un autre éclairement choisi;
- T_1 est la température mesurée du spécimen en essai;
- T_2 est la température normalisée ou une autre température choisie;
- I_{SC} est le courant de court-circuit mesuré du spécimen en essai à G_1 et T_1 ;

α et β sont les coefficients de température du courant et de la tension du spécimen en essai dans l'éclairement normalisé ou l'éclairement cible pour la correction et dans la plage de température présentant un intérêt;

R_S est la résistance-série interne du spécimen en essai;

κ est un facteur de correction de la courbe.

NOTE 1 Comme le point de donnée V_{oc1} sera décalé sur l'axe des abscisses lors de la transposition d'un éclairement plus faible vers un éclairement plus fort, V_{oc2} transposé doit être déterminé par une extrapolation linéaire à partir d'au moins trois points près de et en dessous de V_{oc1} , ou la courbe I-V d'origine doit être mesurée largement au delà de V_{oc1} .

NOTE 2 Il convient que les unités de tous les paramètres de correction soient cohérentes.

NOTE 3 Si le spécimen en essai est un module, les paramètres de correction I-V de la cellule peuvent être dérivés du circuit d'interconnexion. Ces paramètres de la cellule peuvent être utilisés pour calculer les paramètres de correction I-V du module pour d'autres types de module utilisant les mêmes cellules.

NOTE 4 Pour les dispositifs PV au silicium cristallin, α est généralement positif et β négatif.

Les procédures utilisées pour déterminer les paramètres de correction I-V du spécimen en essai sont décrites aux articles 4 à 6.

L'Equation (1) est applicable uniquement aux courbes I-V mesurées à des éclairements constants pendant l'acquisition de l'intégralité de la courbe I-V. Pour les simulateurs solaires à impulsions avec un éclairement décroissant ou tout autre type de variations de l'éclairement pendant la mesure I-V, l'Equation (1) n'est pas applicable en l'état. Dans ce cas, chaque courbe I-V mesurée doit être corrigée en une courbe I-V équivalente à éclairement constant qui exige un facteur d'échelle supplémentaire par rapport à I_{SC} . Pour des raisons pratiques ce facteur d'échelle est lié à l'éclairement correspondant à I_{SC} mesuré. Pour un éclairement non constant, l'Equation (1) deviendra l'équation de transposition suivante.

$$I_2 = I_1 + \frac{G'_1}{G_{SC}} \cdot I_{SC} \cdot \left(\frac{G_2}{G'_1} - 1 \right) + \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (3)$$

où G_{SC} est la valeur de l'éclairement au moment de la mesure d' I_{SC} et G'_1 est l'éclairement mesuré au moment de l'acquisition des données des points de données I-V individuels.

3.3 Procédure de correction 2

Cette procédure est basée sur le modèle simplifié à une diode des dispositifs PV. Les équations de transposition semi-empirique contiennent 5 paramètres de correction I-V qui peuvent être déterminés par la mesure des courbes I-V à des conditions de température et d'éclairement diverses. Outre les coefficients de température pour le courant de court-circuit (α) et la tension en circuit ouvert (β), un coefficient de température supplémentaire (κ') est fréquemment utilisé pour rendre compte des modifications de la résistance-série interne (et du facteur de remplissage) en fonction de la température.

La procédure de correction est définie par les équations suivantes pour le courant et la tension:

$$I_2 = I_1 \cdot (1 + \alpha_{rel} \cdot (T_2 - T_1)) \cdot \frac{G_2}{G_1} \quad (4)$$

$$V_2 = V_1 + V_{OC1} \cdot \left(\beta_{rel} \cdot (T_2 - T_1) + a \cdot \ln \left(\frac{G_2}{G_1} \right) \right) - R'_S \cdot (I_2 - I_1) - \kappa' \cdot I_2 \cdot (T_2 - T_1) \quad (5)$$

où:

- I_1, V_1 sont les coordonnées des points de la caractéristique I-V mesurée;
 I_2, V_2 sont les coordonnées des points correspondants de la courbe I-V corrigée;
 G_1 est l'éclairement mesuré avec le dispositif de référence;
 G_2 est l'éclairement cible pour la caractéristique I-V corrigée;
 T_1 est la température mesurée du spécimen en essai;
 T_2 est la température cible du spécimen en essai;
 V_{OC1} la tension en circuit ouvert aux conditions d'essai;
 α_{rel} et β_{rel} sont les coefficients de température relatifs du courant et de la tension du spécimen en essai mesurés à 1 000 W/m². Ils sont fonction du courant de court-circuit et de la tension en circuit ouvert aux STC;
 a est le facteur de correction de l'éclairement pour la tension en circuit ouvert qui est liée à la tension thermique de la diode D de la jonction pn et au nombre de cellules n_S connectées en série dans le module;
 R'_S est la résistance-série interne du spécimen en essai;
 κ' est interprété comme le coefficient de température de la résistance-série interne R'_S .

NOTE 1 Une valeur type du facteur de correction de l'éclairement a est 0,06.

NOTE 2 Il convient de veiller à ce que les valeurs numériques de R'_S pour la procédure 2 soient éventuellement différentes de celles de R'_S pour la procédure de correction 1.

3.4 Procédure de correction 3

3.4.1 Généralités

Cette procédure est basée sur l'interpolation ou l'extrapolation linéaire de deux caractéristiques I-V mesurées. Elle utilise au minimum deux caractéristiques I-V et ne requiert pas de paramètres de correction ou de paramètres d'ajustement. Les caractéristiques courant-tension mesurées doivent être corrigées aux conditions d'essais normalisées ou à d'autres valeurs de température et d'éclairement choisies en appliquant les équations suivantes:

$$V_3 = V_1 + a \cdot (V_2 - V_1) \quad (6)$$

$$I_3 = I_1 + a \cdot (I_2 - I_1) \quad (7)$$

Il convient de choisir les couples (I_1, V_1) et (I_2, V_2) tel que $I_2 - I_1 = I_{SC2} - I_{SC1}$:

où:

- I_1, V_1 sont les coordonnées des points des caractéristiques mesurées à un éclairement G_1 et une température T_1 .
 I_2, V_2 sont les coordonnées des points des caractéristiques mesurées à un éclairement G_2 et une température T_2 .
 I_3, V_3 sont les coordonnées des points correspondants des caractéristiques corrigées à un éclairement G_3 et une température T_3 .
 I_{SC1}, I_{SC2} sont les courants de court-circuit mesurés du spécimen en essai.
 a est une constante pour l'interpolation, qui dépend de l'éclairement et de la température comme suit.

$$G_3 = G_1 + a \cdot (G_2 - G_1) \quad (8)$$

$$T_3 = T_1 + a \cdot (T_2 - T_1) . \quad (9)$$

Il convient d'appliquer cette méthode à la plupart des technologies PV. Les Equations (6) à (9) peuvent être utilisées pour la correction de l'éclairement, la correction de la température et la correction simultanée de l'éclairement et de la température.

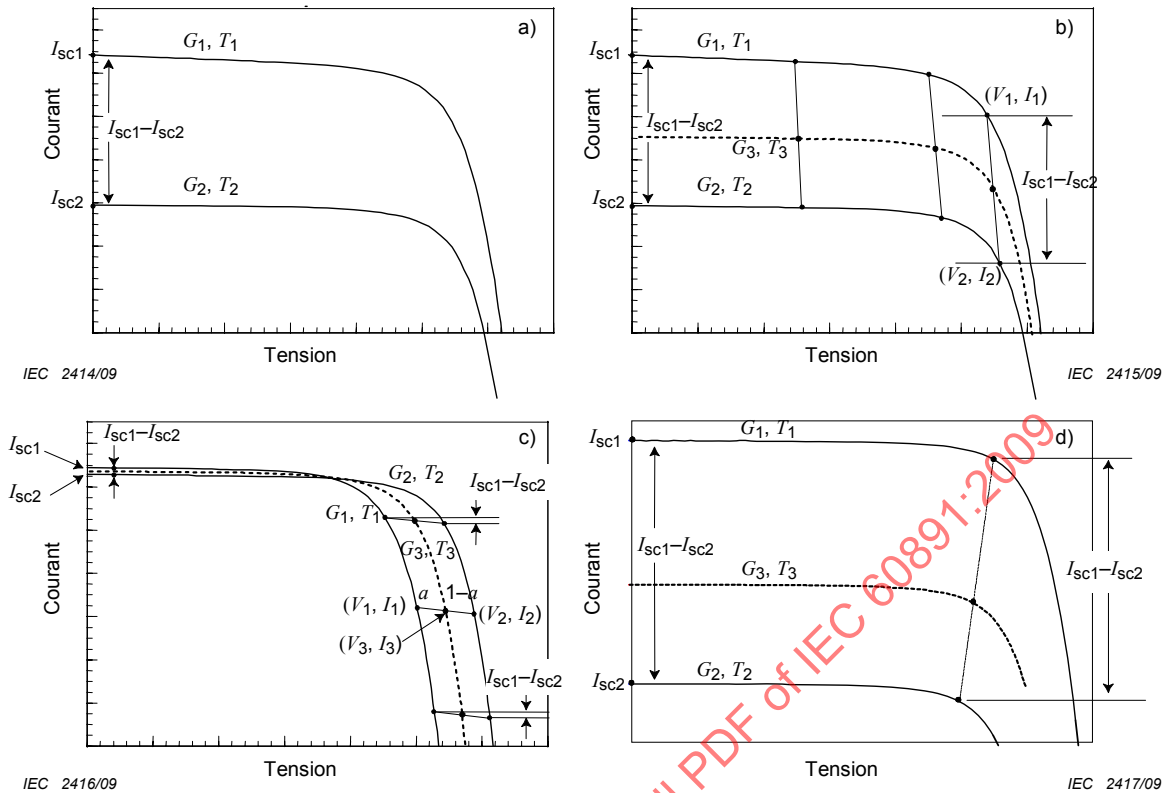
3.4.2 Correction en fonction de l'éclairement et de la température à partir de deux caractéristiques I-V mesurées

La procédure pour corriger les caractéristiques I-V en fonction de l'éclairement et de la température (G_3 , T_3) à partir de deux caractéristiques I-V mesurées aux éclairements et températures (G_1 , T_1) et (G_2 , T_2) est la suivante (Figures 1(a) et 1(b)).

- Mesurer les deux caractéristiques I-V aux éclairements et températures G_1 , T_1 et G_2 , T_2 , respectivement (lignes continues de la Figure 1(a)). Déterminer les valeurs de I_{SC1} et I_{SC2} .
- Calculer a en appliquant l'Equation (8) ou (9). Par exemple, lorsque les deux courbes I-V mesurées ont été tracées à:
 $G_1 = 1\,000\text{ W/m}^2$ et $T_1 = 50\text{ °C}$
 $G_2 = 500\text{ W/m}^2$ et $T_2 = 40\text{ °C}$
 Et l'éclairement présentant un intérêt est $G_3 = 800\text{ W/m}^2$:
 Puis appliquer l'Equation (8) $a = 0,4$.
 Et appliquer l'Equation (9) $T_3 = 46\text{ °C}$.
- Choisir un point (V_1 , I_1) de la caractéristique I-V 1. Déterminer un point (V_2 , I_2) des caractéristiques I-V 2, tel que la relation $I_2 - I_1 = I_{SC2} - I_{SC1}$ soit satisfaite (Figure 1(b)).
- Calculer V_3 et I_3 en appliquant les Equations (6) et (7).
- Choisir plusieurs ensembles de points de données (V_1 , I_1) des caractéristiques I-V 1 et calculer (V_3 , I_3) pour chacun d'entre eux en utilisant les procédures (c) et (d).
- Les caractéristiques I-V 3 à l'éclairement G_3 et à la température T_3 sont données par un ensemble de points de données (V_3 , I_3) (ligne pointillée de la Figure 1(b)).

Les Figures 1(a) et 1(b) montrent un exemple de correction de l'éclairement. La Figure 1(c) montre un exemple de correction de la température. La Figure 1(d) montre une correction simultanée de l'éclairement et de la température. Lorsque $0 < a < 1$, la procédure à appliquer est l'interpolation. Sinon, la procédure à appliquer est l'extrapolation.

Il convient de noter que lorsque G_1 , G_2 , T_1 et T_2 sont fixés, G_3 et T_3 ne peuvent pas être choisis indépendamment, parce qu'ils sont liés par les relations données dans les Equations (8) et (9) (Figure 2). Par exemple, lorsque $G_1 = 1\,000\text{ W/m}^2$, $T_1 = 20\text{ °C}$, $G_2 = 0\text{ W/m}^2$, $T_2 = 60\text{ °C}$ (courbe I-V dans l'obscurité à 60 °C) et que l'on veut obtenir une nouvelle courbe à $G_3 = 750\text{ W/m}^2$, a vaut 0,25 par l'Equation (8). C'est pourquoi, Il convient d'obtenir T_3 à 30 °C en appliquant l'Equation (9).



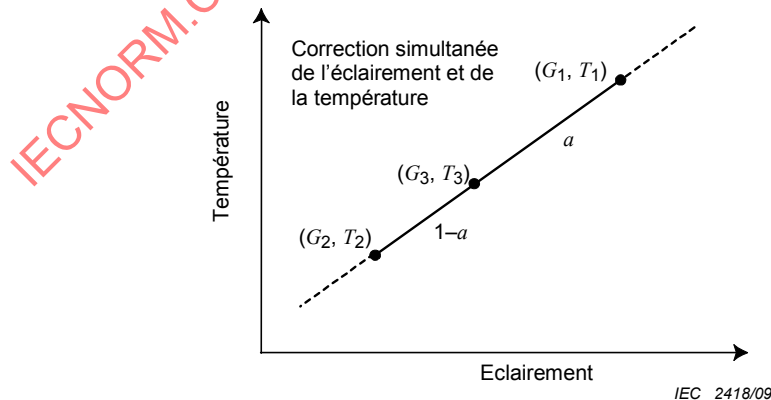
Les sous-figures (a) et (b) montrent des corrections de l'éclairement, (c) montre une correction de température et (d) montre une correction simultanée de l'éclairement et de la température.

Figure 1 – Exemple de correction des caractéristiques I-V par les Equations (6) et (7)

NOTE 1 L'interpolation donne généralement de meilleurs résultats que l'extrapolation.

NOTE 2 Lorsque $I_{sc1} \neq I_{sc2}$ et que les caractéristiques I-V corrigées autour de la tension de court-circuit sont requises, il convient d'étendre les caractéristiques mesurées au delà de V_{oc} .

NOTE 3 Lorsqu'il n'y a pas de points de données mesurés qui satisfont exactement la relation $I_2 = I_1 + (I_{sc2} - I_{sc1})$, V_2 et I_2 peuvent être calculés par interpolation des points de données de la courbe I-V 2.



La ligne continue et la ligne pointillée montrent les plages de G_3 et T_3 calculables respectivement par interpolation et extrapolation.

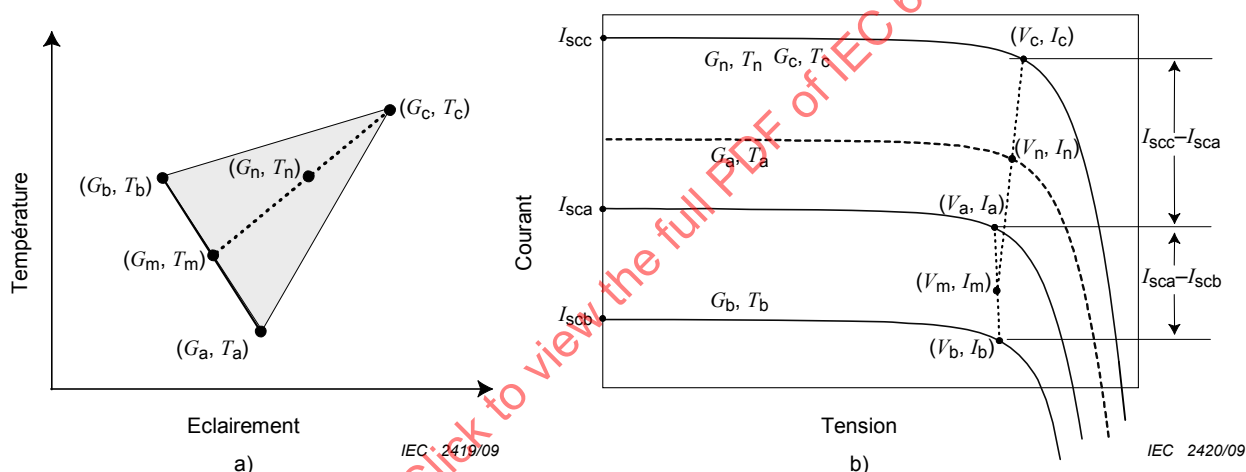
Figure 2 – Diagramme schématique de la relation de G_3 et T_3 qui peuvent être choisis dans la correction simultanée de l'éclairement et de la température, pour un ensemble donné T_1 , G_1 , T_2 , et G_2 obtenu en appliquant les Equations (8) et (9)

3.4.3 Correction en fonction d'éclairements et de températures variables à partir de trois caractéristiques I-V

La correction des caractéristiques I-V en fonction de plages variables d'éclairements et de températures est possible en combinant les procédures décrites en 3.4.2. Par exemple, lorsque trois caractéristiques mesurées aux éclairements et températures (G_a, T_a) , (G_b, T_b) et (G_c, T_c) sont disponibles comme le montre la Figure 3(a), les caractéristiques I-V à n'importe quels éclairements et températures G_n, T_n peuvent être calculés comme suit.

- Les caractéristiques à (G_m, T_m) sont calculées à partir de celles à (G_a, T_a) et (G_b, T_b) .
- Les caractéristiques à (G_n, T_n) sont calculées à partir de celles à (G_m, T_m) et (G_c, T_c) .

Par exemple, lorsque (G_a, T_a) , (G_b, T_b) , (G_c, T_c) et (G_n, T_n) valent respectivement $(950 \text{ W/m}^2, 15^\circ\text{C})$, $(850 \text{ W/m}^2, 25^\circ\text{C})$, $(1\,100 \text{ W/m}^2, 30^\circ\text{C})$ et $(1\,000 \text{ W/m}^2, 25^\circ\text{C})$, alors (G_m, T_m) vaut $(900 \text{ W/m}^2, 20^\circ\text{C})$.



La zone ombrée en (a) montre la plage qui peut être calculée uniquement par interpolation. Sous-figure (b) montre un exemple de caractéristiques I-V qui correspondent à (a).

Figure 3 – Diagramme schématisant les procédures de correction des caractéristiques I-V en fonction de plages variables d'éclairement et de température basés sur trois caractéristiques mesurées

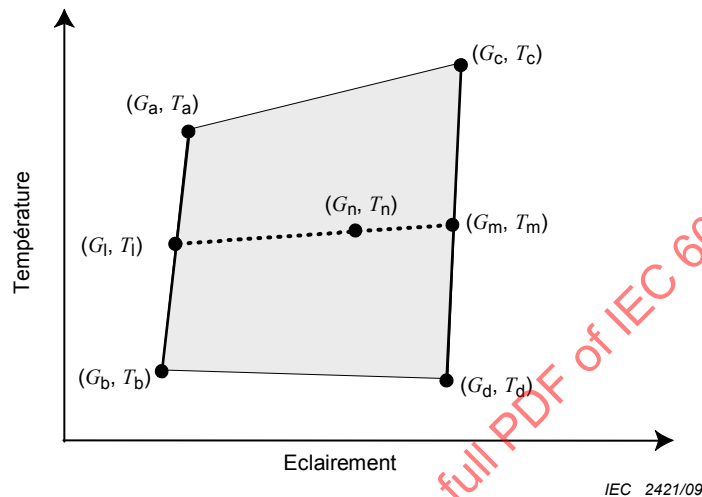
3.4.4 Correction en fonction d'éclairements et de températures variables à partir de quatre caractéristiques I-V

Lorsque quatre caractéristiques I-V mesurées aux éclairements et températures (G_a, T_a) , (G_b, T_b) , (G_c, T_c) et (G_d, T_d) sont disponibles comme le montre la Figure 4, les caractéristiques I-V à n'importe quels éclairements et températures (G_n, T_n) peuvent être calculées comme suit. Ce procédé est utile pour la correction des caractéristiques sur une plage étendue d'éclairement et de température. Bien que les couples (G_l, T_l) and (G_m, T_m) utilisés pour calculer les caractéristiques à (G_n, T_n) ne soient pas uniques, de bons résultats de correction sont généralement obtenus lorsque la relation $(G_a - G_l)/(G_a - G_b) = (G_c - G_m)/(G_c - G_d)$ est satisfaite.

- Les caractéristiques à (G_l, T_l) sont calculées à partir de celles à (G_a, T_a) et (G_b, T_b) .
- Les caractéristiques à (G_m, T_m) sont calculées à partir de celles à (G_c, T_c) et (G_d, T_d) .
- Les caractéristiques à (G_n, T_n) sont calculées à partir de celles à (G_l, T_l) et (G_m, T_m) .

Par exemple, lorsque (G_a, T_a) , (G_b, T_b) , (G_c, T_c) , (G_d, T_d) et (G_n, T_n) valent respectivement $(500 \text{ W/m}^2, 55 \text{ °C})$, $(400 \text{ W/m}^2, 31 \text{ °C})$, $(1\,000 \text{ W/m}^2, 60 \text{ °C})$, $(950 \text{ W/m}^2, 32 \text{ °C})$ et $(800 \text{ W/m}^2, 45 \text{ °C})$, alors (G_l, T_l) et (G_m, T_m) valent respectivement $(450 \text{ W/m}^2, 43 \text{ °C})$ et $(975 \text{ W/m}^2, 46 \text{ °C})$.

Les caractéristiques I-V dans la plage d'éclairement et de température représentée par la zone ombrée de la Figure 4 peuvent être calculées par interpolation. Les caractéristiques dans la plage en dehors de la zone ombrée peuvent être calculées par extrapolation. Cependant, il convient de veiller à ce qu'une extrapolation importante n'entraîne pas de mauvais résultats de correction et une précision de correction médiocre.



La zone ombrée montre la plage qui peut être calculée uniquement par interpolation.

Figure 4 – Diagramme schématisant les procédés de correction des caractéristiques I-V en fonction de plages variables d'éclairement et de température basés sur quatre caractéristiques mesurées

4 Détermination des coefficients de température

4.1 Généralités

Les coefficients de température des dispositifs PV sont généralement utilisés pour les paramètres suivants: courant de court-circuit (α), tension en circuit ouvert (β) et puissance crête (δ).

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir de mesures sous éclairement solaire naturel ou éclairement solaire simulé. Les coefficients ainsi déterminés sont valables à l'éclairement auquel les mesures ont été faites. Pour les dispositifs PV linéaires, ils sont valables au-delà de la plage d'éclairement à $\pm 30 \%$ de ce niveau.

Les coefficients de température d'un module à couche mince peuvent dépendre de l'éclairement, de l'éclairement spectral et de l'histoire thermique du module. Lorsque les coefficients de température sont mentionnés, l'histoire des conditions et des résultats de l'éclairement et l'histoire thermique doivent être indiqués.

Voir la CEI 60904-10 pour l'évaluation des coefficients de température du module à différents niveaux d'éclairement.

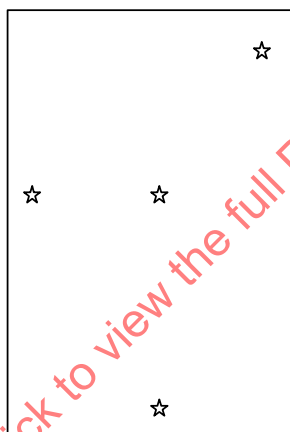
4.2 Appareillage

L'appareillage de mesure doit être conforme avec ce qui suit:

- a) L'appareillage et l'instrumentation doivent être conformes aux exigences de la CEI 60904-1.
- b) Si un simulateur solaire est utilisé comme source de rayonnement, il doit être conforme au moins à la classe BBB conformément à la CEI 60904-9.
- c) L'appareillage comprend l'équipement nécessaire pour modifier la température du spécimen en essai sur la plage présentant un intérêt.

NOTE L'équipement suivant a été utilisé avec succès:

- ventilateurs, permettant le refroidissement et le réchauffement du spécimen par un débit d'air;
 - blocs de montage à température variable en contact étroit avec une seule cellule ou un module entier;
 - chambres avec une fenêtre transparente, où la température interne peut être commandée;
 - un écran amovible lorsque l'éclairement solaire naturel est utilisé.
- d) Si le dispositif en essai est un module, la température du module doit être mesurée approximativement aux quatre positions présentées sur la Figure 5 (en s'assurant que chaque position est directement derrière une cellule) et les valeurs relevées doivent être moyennées.



IEC 2422/09

Figure 5 – Positions pour mesurer la température du module en essai derrière les cellules

4.3 Procédure sous éclairement solaire naturel

La mesure sous éclairement solaire naturel doit être effectuée uniquement lorsque:

- l'éclairement total est supérieur ou égal à la limite supérieure de la plage présentant un intérêt;
- la variation de l'éclairement causée par des oscillations à court terme (nuages, brume ou fumée) est inférieure à $\pm 2\%$ de l'éclairement total mesuré par le dispositif de référence;
- la vitesse du vent est inférieure à $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

NOTE 1 Les mesures sous éclairement solaire naturel doivent être faites aussi rapidement que possible en quelques heures et le même jour pour minimiser les effets des variations des conditions spectrales. Si cela n'est pas le cas, des corrections spectrales peuvent être nécessaires.

- a) Si le spécimen en essai et le dispositif de référence (CEI 60904-2) sont équipés de dispositifs de réglage de la température, régler ces dispositifs au niveau souhaité.
- b) Si des dispositifs de réglage de la température ne sont pas utilisés, protéger du soleil et du vent le spécimen et le dispositif de référence jusqu'à ce que leur température soit uniforme à $\pm 2^\circ\text{C}$ de la température de l'air ambiant. Sinon, laisser le spécimen en essai atteindre sa température d'équilibre ou refroidir le spécimen en essai jusqu'à une température inférieure à la température d'essai requise, puis laisser le module se