

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 60891:2021



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2021 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 Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
info@iec.ch
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

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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

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

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

IEC online collection - oc.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

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 000 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 18 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

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

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

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

IEC online collection - oc.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

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 000 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

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

ICS 27.160

ISBN 978-2-8322-1036-0

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.

CONTENTS

FOREWORD.....	4
1 Scope.....	6
2 Normative references	6
3 Terms and definitions, symbols and abbreviated terms	7
4 Correction procedures	8
4.1 General.....	8
4.2 Correction procedure 1	11
4.3 Correction procedure 2	12
4.4 Correction procedure 3	14
4.4.1 General	14
4.4.2 Correction for the irradiance and temperature from two measured $I-V$ curves	14
4.4.3 Correction to various irradiances and temperatures from three $I-V$ curves	17
4.4.4 Correction to various irradiances and temperatures from four measured $I-V$ curves	17
4.5 Correction procedure 4	18
5 Determination of temperature coefficients.....	20
5.1 General.....	20
5.2 Apparatus	20
5.3 Procedure in natural or steady-state simulated sunlight	22
5.4 Procedure with a pulsed solar simulator	23
5.5 Calculation of temperature coefficients	23
6 Determination of internal series resistance R_S and R'_S	24
6.1 General.....	24
6.2 Determination of R_S in correction procedures 1 and 4	25
6.3 Determination of B_1 and B_2 in correction procedure 2	27
6.4 Determination of R'_S in correction procedure 2	28
6.5 Determination of R_S in correction procedure 4	30
7 Determination of the curve correction factor κ and κ'	31
7.1 General.....	31
7.2 Procedure	31
8 Reporting	32
Annex A (informative) Alternative procedures for series resistance determination	34
A.1 General.....	34
A.2 Differential resistance at V_{OC} against inverse irradiance method.....	34
Bibliography.....	35
Figure 1 – Example of the correction of the $I-V$ characteristics by formulae (10) and (11)	16
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 formulae (12) and (13)	16

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	17
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	18
Figure 5 – Example positions for measuring the temperature of the test module behind the cells	21
Figure 6 – Determination of internal series resistance	26
Figure 7 – Determination of internal series resistance when the corrected I - V characteristics intersect	27
Figure 8 – Determination of irradiance correction factors B_1 and B_2 and internal series resistance, R'_S	29
Figure 9 – Determination of internal series resistance of a PV module from a single I - V curve	31
Figure 10 – Determination of curve correction factor	32
Figure A.1 – Determination of internal series resistance	34
Table 1 – Overview of correction procedures for irradiance corrections (i.e. $T_1 = T_2$)	9
Table 2 – Overview of correction procedures for temperature corrections (i.e. $G_1 = G_2$)	10

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60891:2021

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 third edition cancels and replaces the second edition published in 2009. This edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- adds guidance on which correction procedure shall be used depending on application;
- introduces translation procedure 4 applicable to c-Si technologies with unknown temperature coefficients;
- introduces various clarifications in existing procedures to improve measurement accuracy and reduce measurement uncertainty;
- adds an informative annex for supplementary methods that can be used for series resistance determination.

The text of this International Standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
82/1936/FDIS	82/1957/RVD

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

The language used for the development of this International Standard is English.

This document was drafted in accordance with ISO/IEC Directives, Part 2, and developed in accordance with ISO/IEC Directives, Part 1 and ISO/IEC Directives, IEC Supplement, available at www.iec.ch/members_experts/refdocs. The main document types developed by IEC are described in greater detail at www.iec.ch/standardsdev/publications.

The committee has decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under webstore.iec.ch in the data related to the specific document. At this date, the document will be

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60891:2021

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

1 Scope

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

The PV 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 curve correction applies for each type of device. The determination of temperature coefficients for a module (or sub-assembly of cells) may be calculated from single cell measurements, but this is not the case for the internal series resistance and curve correction factor, which should be separately measured for a module or subassembly of cells. Refer to Annex A for alternative procedures for series resistance determination.

The use of I - V correction parameters is valid for the PV device for which they have been measured. Variations may occur within a production lot or the type of class.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements 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 TS 60904-1-2, *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 60904-7, *Photovoltaic devices – Part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices*

IEC 60904-8, *Photovoltaic devices – Part 8: Measurement of spectral responsivity of a photovoltaic (PV) device*

IEC 60904-9, *Photovoltaic devices – Part 9: Classification of solar simulator characteristics*

IEC 60904-10:2020, *Photovoltaic devices – Part 10: Methods of linear dependence and linearity measurements*

IEC 61215-2, *Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 2: Test procedures*

IEC TS 61836, *Solar photovoltaic energy systems – Terms, definitions, and symbols*

3 Terms and definitions, symbols and abbreviated terms

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC TS 61836, together with the following, apply.

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

3.1

B_1

irradiance correction factor for open-circuit voltage which is linked with the diode thermal voltage, V_t of the p-n junction and n_s

Note 1 to entry: It is used in correction procedure 2.

3.2

B_2

irradiance correction factor for open-circuit voltage which accounts for non-linearity of V_{OC} with irradiance scaling

Note 1 to entry: It is used in correction procedure 2.

3.3

DUT

device under test

3.4

R_s

internal series resistance of the DUT employed by correction procedures 1 and 4

3.5

R'_s

internal series resistance of the DUT employed by correction procedure 2

Note 1 to entry: Although determined by a different method than R_s , both quantities share the same physical meaning and therefore their values for the same DUT are similar.

3.6

n_s

number of cells serially connected in the DUT

3.7

a

interpolation constant employed in correction procedure 3, that has a relation with the irradiance and temperature

3.8

ε

product of ideality factor of the DUT with the bandgap of the photovoltaic material divided by electron's elementary charge

Note 1 to entry: It is used in correction procedure 4.

4 Correction procedures

4.1 General

This document provides four procedures for correcting measured current-voltage characteristics to other conditions of temperature and irradiance, such as Standard Test Conditions (STC), that can be applied. The first procedure describes a system of linear equations for current and voltage, which is best applicable for irradiance corrections within $\pm 40\%$ of the target irradiance. The second procedure is an alternative algebraic correction method which yields better results for large irradiance corrections (exceeding $\pm 40\%$). 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 two current-voltage curves have been measured for the DUT. This correction method is applicable in the temperature and irradiance range spanned by the two current voltage curves. The fourth procedure is based on the single-diode model and provides a methodology for determining a correction parameter R_S from a single I - V curve, when the parameter is unknown. The method is best applicable to irradiance corrections when the measured and target irradiance are both in the range 300 W/m^2 to $1\,200 \text{ W/m}^2$ and the series resistance R_S is unknown. It is suitable for translations when the characteristics under STC have to be estimated from a single experimental I - V curve.

Table 1 and Table 2 provide an overview of the four different correction procedures, and describe qualitatively the advantages, disadvantages and required correction parameters for each procedure. The purpose of these tables is to provide guidance to the user of this document on which correction procedure to use for different applications.

For simultaneous corrections of irradiance and temperature, the benefits and limitations listed in Table 1 and Table 2 apply concurrently.

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

All PV devices should be linear, at least within the range of irradiances and device temperature over which corrections are made. Details on how to assess the deviation from the ideal linear dependence are described in IEC 60904-10.

An estimate of the translation accuracy is required (see Clause 8).

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

$$G = \frac{1000 \text{ Wm}^{-2} \times I_{RC}}{I_{RC,STC} \times [1 + \alpha_{RC,rel} \times (T_{RC} - 25^\circ\text{C})]} \quad (1)$$

Ideally, the reference device shall be linear in short-circuit current over the entire irradiance range of interest, as defined in IEC 60904-10. In practice, even for linear devices it is recommended to apply a correction for linearity of the reference device according to IEC 60904-10. If the device is not linear according to IEC 60904-10 over the entire irradiance range of interest, then corrections shall be applied to avoid errors in the corrections of its I - V characteristics. The PV reference device shall either be spectrally matched to the DUT, or a spectral mismatch (SMM) correction shall be performed in conformance with IEC 60904-7. Since the spectral responsivity of the device can vary with temperature, the apparent change in temperature coefficient with spectra should be taken into account in the correction. An interpolation method of temperature against SMM correction can minimize the error sources.

Table 1 – Overview of correction procedures for irradiance corrections (i.e. $T_1 = T_2$)

Procedure 1 Correction parameter requirement: R_S	
Advantages	Disadvantages
Suitable where R_S is determined (typically within ± 40 % of the irradiance at which R_S was determined)	Assumes superposition of current at all voltages
Works reasonably well over a broader range of irradiance (typically within ± 80 % of the irradiance at which R_S was determined) for devices that are linear with respect to irradiance according to IEC 60904-10. This is typically the case for c-Si.	Cannot produce complete I-V curves for higher irradiance corrections (part of I-V curve between $P_{\max}$ and V_{OC} is missing), when the I-V curve is not measured sufficiently far into the negative current regime. In this case extrapolation for V_{OC} is necessary
Procedure 2 Correction parameter requirement: B_1 , B_2 , R'_S , κ' and β_{rel}	
Advantages	Disadvantages
Suitable in the irradiance range where R'_S is determined (typically within ± 40 % of the irradiance at which R'_S was determined)	Requires more parameters to be known than procedures 1 and 4
Works reasonably well over a broader range of irradiance (typically within ± 80 % of the irradiance at which R'_S was determined) for devices that are linear with respect to irradiance according to IEC 60904-10. This is typically the case for c-Si.	Not recommended for I-V translation over irradiance exceeding ± 40 % of the target irradiance, when the DUT has significant leakage current (low shunt resistance)
Can produce complete I-V curves for higher irradiance corrections	
Provides information for relative comparison of the DUT modelling parameters used in single-diode model (ideality factor and R'_S)	
Procedure 3 Correction parameter requirement: None	
Advantages	Disadvantages
Best accuracy for I-V corrections when interpolating	Requires knowledge of I-V curves at higher and lower levels of irradiance compared to target irradiance
Fitting parameters not required	Not possible to perform comparison between different technologies, because fitting parameters cannot be extracted
Least technology specific method	Interpolation gives better results than extrapolation. Extrapolation should be practiced with caution

Procedure 4 Correction parameter requirement: None	
Advantages	Disadvantages
Suitable when the correction parameter R_S is unknown	Approximate R_S is determined from a single $I-V$ curve
Does not require multiple $I-V$ curves measured at different levels of irradiance for R_S determination	Not suitable for technologies which do not follow the single-diode model

Table 2 – Overview of correction procedures for temperature corrections (i.e. $G_1 = G_2$)

Procedure 1 Correction parameter requirement: R_S , κ , α and β	
Advantages	Disadvantages
Suitable as long as the measured irradiance is within ± 30 % of the irradiance at which temperature coefficients were determined	Not recommended when the measured irradiance differs by more than ± 30 % from the irradiance at which the temperature coefficients were determined
Procedure 2 Correction parameter requirement: B_1 , B_2 , R'_S , κ' , α_{rel} and β_{rel}	
Advantages	Disadvantages
Suitable as long as the measured irradiance is within ± 30 % of the irradiance at which temperature coefficients were determined	Requires more parameters to be known than procedures 1 and 4
Applicable over the entire range of irradiance for which the device is proven to be linear with respect to irradiance according to IEC 60904-10. This is typically the case for c-Si.	Not recommended for devices that are not linear with respect to irradiance when the measured irradiance differs by more than ± 30 % from the irradiance at which the temperature coefficients were determined
Procedure 3 Correction parameter requirement: None	
Advantages	Disadvantages
Best accuracy for $I-V$ corrections when interpolating	Requires knowledge of $I-V$ curves at higher and lower temperatures
Fitting parameters not required	Fitting parameters cannot be extracted
Least technology specific method	Interpolation gives better results than extrapolation. Extrapolation should be practiced with caution
Procedure 4 Correction parameter requirement: ε , α_{rel} and n_S	
Advantages	Disadvantages
The same value of the device dependent constant, ε can be used for all c-Si PV devices	Not suitable for technologies which do not follow the single-diode model
ε is independent of temperature and irradiance	

4.2 Correction procedure 1

The first procedure relies on the principle of superposition of the currents at all voltages, which assumes that the diode current does not depend on photocurrent [1]¹. This is typically not the case when the target irradiance is significantly different from the measured irradiance.

The current-voltage characteristic measured at condition 1 shall be corrected to STC or other selected temperature and irradiance values (condition 2) by applying the following formulae:

$$I_2 = I_1 + I_{SC1} \times \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right) + \alpha \times (T_2 - T_1) \quad (2)$$

$$V_2 = V_1 - R_S \times (I_2 - I_1) - \kappa \times I_2 \times (T_2 - T_1) + \beta \times (T_2 - T_1) \quad (3)$$

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, corrected for temperature and linearity of the reference device and the SMM;
- G_2 is the target irradiance for the DUT;
- T_1 is the measured temperature of the DUT;
- T_2 is the target temperature of the DUT;
- I_{SC1} is the measured short-circuit current of the DUT at G_1 and T_1 ;
- α and β are the short-circuit current and open-circuit voltage temperature coefficients, respectively, of the DUT at the target irradiance for correction and within the temperature range of interest (e.g. $\beta = -2,3 \text{ mV/}^\circ\text{C}$);
- R_S is the internal series resistance of the DUT;
- κ is a curve correction factor.

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

As the data point V_{OC1} will be shifted off the original axis when translating from lower to higher irradiance, the translated V_{OC2} has to be determined by linear extrapolation near and above V_{OC2} (i.e. for negative currents), or by linear extrapolation near V_{OC2} if there are no voltage points above V_{OC2} . To minimize errors caused by extrapolation, it is recommended that I - V curves shall be measured as far into forward bias beyond V_{OC} as possible.

V_{OC2} may be also extrapolated by polynomial fit of the I - V curve. In particular, this is recommended if measured V_{OC1} is translated to an I - V data point with current offset. For the polynomial curve fit all I - V data points in the voltage range larger than V_{Pmax} shall be considered. The resulting curve shall be plausible in the whole voltage range V_{Pmax} to V_{OC} . Alternative methods to linear extrapolation (such as diode fitting) are also allowed.

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

The extrapolation method used has to be stated in the report together with a statement of its estimated uncertainty on the translated V_{OC2} .

Procedures for determination of the I - V correction parameters of the DUT are described in Clauses 5 to 7.

Formula (2) 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, formula (2) 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_{SC1} . For practical reasons, this scaling factor is related to the irradiance corresponding to measured I_{SC1} . For non-constant irradiance, formula (2) will become the following translation formula.

$$I_2 = I_1 + \frac{G'_1}{G_{SC1}} \times I_{SC1} \times \left(\frac{G_2}{G'_1} - 1 \right) + \alpha \times (T_2 - T_1) \quad (4)$$

where G_{SC1} is the irradiance value at the time of I_{SC1} measurement and G'_1 is the irradiance measured at time of data acquisition of individual I - V data points.

Correction procedure 1 assumes that the normalized spectra corresponding to G_1 and G_2 are identical. If they are not, an additional uncertainty component is required to account for the variation of α with spectrum by calculating the effect based on the measured spectral responsivity of the DUT as a function of temperature or of irradiance and on the measured spectral irradiance. Spectral mismatch corrections shall be implemented in accordance with IEC 60904-7.

4.3 Correction procedure 2

This procedure is based on the simplified one-diode model of PV devices [2]. The semi-empirical translation formulae contain six I - V curve correction parameters which can be determined by measurement of I - V curves at different temperature and irradiance conditions (see Clauses 5 to 7). Besides the relative temperature coefficients for short-circuit current (α_{rel}) and open-circuit voltage (β_{rel}) an additional temperature coefficient (κ') is commonly used which accounts for changes of the internal series resistance (and fill factor) with temperature. Furthermore, correction procedure 2 introduces a quadratic irradiance factor $f(G)$ with coefficients B_1 and B_2 , which accounts for the non-linear scaling of diode's ideality factor with irradiance. The correction procedure is defined by the following formulae for current and voltage:

$$I_2 = \frac{G_2}{G_1} I_1 \frac{(1 + \alpha_{rel} \times (T_2 - 25^\circ C))}{(1 + \alpha_{rel} \times (T_1 - 25^\circ C))} \quad (5)$$

$$V_2 = V_1 - R'_{S1} \times (I_2 - I_1) - \kappa' \times I_2 \times (T_2 - T_1) + V_{OC,STC} \times \left\{ \beta_{rel} \times [f(G_2) \times (T_2 - 25^\circ C) - f(G_1) \times (T_1 - 25^\circ C)] + \frac{1}{f(G_2)} - \frac{1}{f(G_1)} \right\} \quad (6)$$

$$f(G) = \frac{V_{OC,STC}}{V_{OC}(G)} = B_2 \times \ln^2 \left(\frac{1\,000\,Wm^{-2}}{G} \right) + B_1 \times \ln \left(\frac{1\,000\,Wm^{-2}}{G} \right) + 1 \quad (7)$$

$$R'_{S1} = R'_S + \kappa' \times (T_1 - 25^\circ C) \quad (8)$$

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, corrected for temperature and linearity of the reference device and the SMM;
G_2	is the target irradiance for the corrected I - V characteristic;
T_1	is the measured temperature of the DUT;
T_2	is the target temperature of the DUT;
V_{OC1}	is the open-circuit voltage at test conditions G_1 and T_1 ;
$V_{OC,STC}$	is the open-circuit voltage at standard test conditions;
α_{rel} and β_{rel}	are the relative short-circuit current and open-circuit voltage temperature coefficients, respectively, of the DUT measured at 1 000 W/m ² . They express the relative change of short-circuit current and open-circuit voltage with respect to their values at STC; both coefficients are expressed in percent per unit temperature and should be scaled by a fraction of 100 when used in the formulae (e.g. $\alpha_{rel} = 0,045 \text{ \% K}^{-1} = 0,00045 \text{ K}^{-1}$);
B_1	is the irradiance correction factor for open-circuit voltage which is linked with the diode thermal voltage D of the p-n junction and the number of cells n_S serially connected in the DUT;
B_2	is the irradiance correction factor for open-circuit voltage which accounts for non-linearity of V_{OC} with irradiance scaling;
R'_S	is the internal series resistance of the DUT determined at 25 °C;
R'_{S1}	is the internal series resistance of the DUT at measured temperature T_1 ;
κ'	is interpreted as temperature coefficient of the internal series resistance R'_S .

Care should be taken that the numerical values for κ' and R'_S for procedure 2 can be different from κ and R_S of correction procedure 1, as correction procedure 2 requires the series resistance to be explicitly determined at 25 °C.

When unknown, $V_{OC,STC}$ can be derived from the actual measurement using the following expression:

$$V_{OC,STC} = \frac{V_{OC1} \times f(G_1)}{1 + \beta_{rel} \times (T_1 - 25^\circ\text{C}) \times f^2(G_1)} \quad (9)$$

NOTE 1 For c-Si modules when V_{OC} scales with the irradiance term $\ln(1\,000/G)$ linearly, a typical range for the irradiance correction factor B_1 is $0,05 \pm 0,01$ while B_2 is 0. When V_{OC} scales non-linearly with the irradiance term $\ln(1\,000/G)$, B_1 typically varies in the range of $0,04 \pm 0,01$ and B_2 in the range of $0,004 \pm 0,001$.

NOTE 2 A typical range for the temperature coefficient α_{rel} of c-Si modules is from 0,03 %/°C to 0,06 %/°C with respect to the I_{SC} at STC. A typical range for the temperature coefficient β_{rel} of c-Si modules is from -0,35 %/°C to -0,2 %/°C with respect to the V_{OC} at STC.

4.4 Correction procedure 3

4.4.1 General

This procedure may be applied only to devices proven to be linear according to IEC 60904-10. It is based on the linear interpolation or extrapolation of two measured I - V characteristics [3]. The method 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 STC or other target temperature and irradiance values by applying the following formulae:

$$V_3 = V_1 + a \times (V_2 - V_1) \quad (10)$$

$$I_3 = I_1 + a \times (I_2 - I_1) \quad (11)$$

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 DUT at irradiances G_1 and G_2 .

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

$$G_3 = G_1 + a \times (G_2 - G_1) \quad (12)$$

$$T_3 = T_1 + a \times (T_2 - T_1) \quad (13)$$

This method should be applicable to most PV technologies. Formulae (10) to (13) can be used for the irradiance correction, temperature correction, and simultaneous correction of irradiance and temperature. This procedure assumes that the normalized spectra corresponding to G_1 , G_2 and G_3 are identical. If they are not, then there will be an additional source of uncertainty in G_3 . Measuring G_1 and G_2 with SMM corrections based upon the spectral responsivity measured at T_1 and T_2 according to IEC 60904-8 will minimize these errors. If the spectral responsivity is nonlinear in relation to irradiance then it should be measured at bias light intensities equal to G_1 and G_2 .

4.4.2 Correction for the irradiance and temperature from two measured I - V curves

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 (Figure 1a) and 1b):

- 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 1a)). Find the values of I_{SC1} and I_{SC2} .

- b) Calculate α by formula (12) or (13) choosing a target irradiance or temperature. For example, when the two measured I - V curves were made at:

$$G_1 = 1\,000 \text{ W/m}^2 \text{ and } T_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$G_2 = 500 \text{ W/m}^2 \text{ and } T_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}.$$

and the target irradiance is $G_3 = 800 \text{ W/m}^2$:

then, using formula (12) $\alpha = 0,4$

and using formula (13) $T_3 = 46 \text{ }^\circ\text{C}$.

- c) Choose a point (V_1, I_1) on the I - V curve 1. Find a point (V_2, I_2) on the I - V curve 2, so that the relation $I_2 - I_1 = I_{SC2} - I_{SC1}$ is satisfied (Figure 1b)).
- d) Calculate V_3 and I_3 by formulae (10) and (11).
- e) Select multiple sets of data points (V_1, I_1) on the I - V curve 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 is given by the set of data points (V_3, I_3) (broken line in Figure 1 b)).

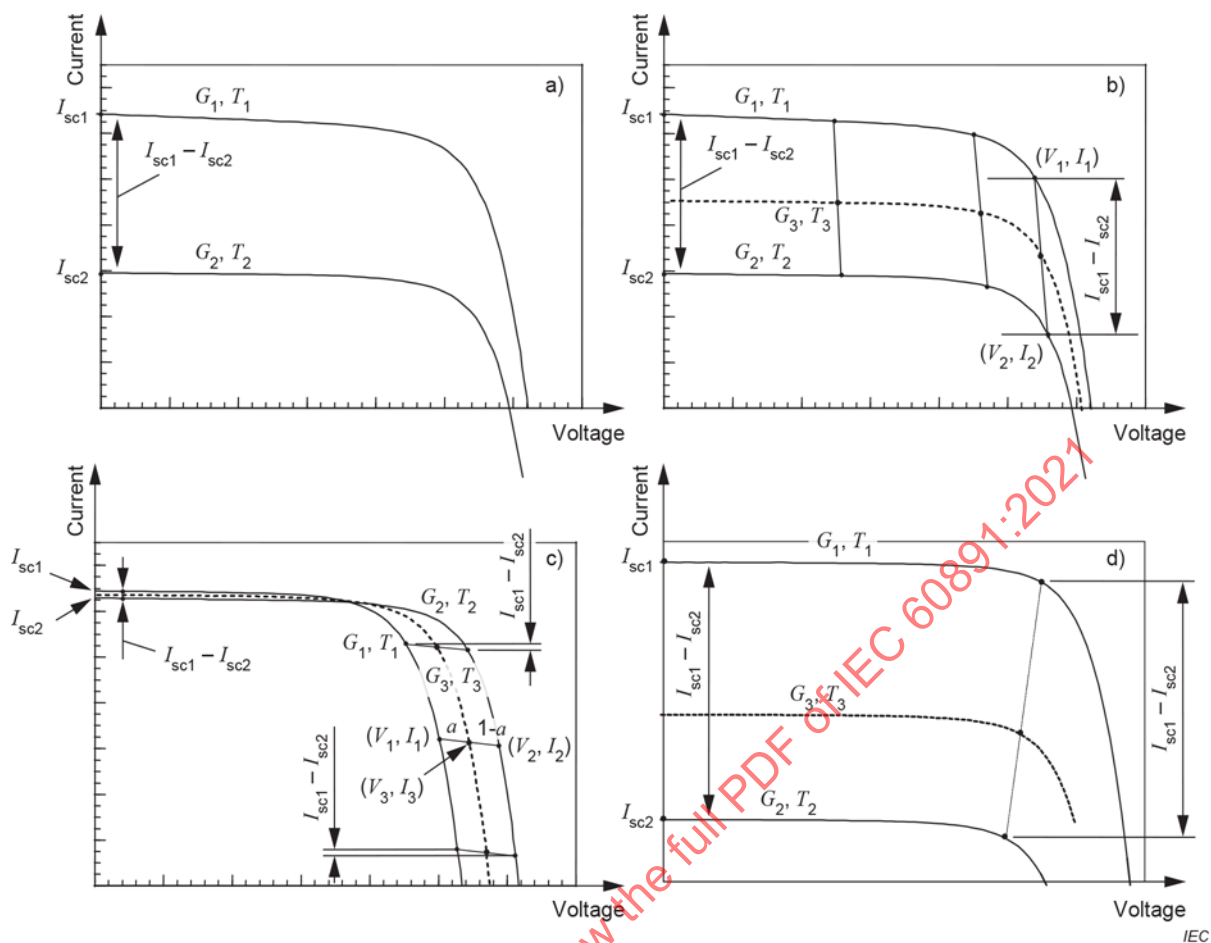
Figure 1a) and Figure 1b) show an example of an irradiance correction ($T_1 = T_2$). Figure 1c) shows an example of a temperature correction ($G_1 = G_2$). Figure 1d) shows a simultaneous correction of irradiance and temperature. When $0 \leq \alpha \leq 1$, the procedure is interpolation. Otherwise, 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 may not be chosen independently, because they have the relationships given in formulae (12) and (13) (Figure 2). For example, when $G_1 = 1\,000 \text{ W/m}^2$, $T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $G_2 = 0 \text{ W/m}^2$, $T_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ (dark I - V curve at $60 \text{ }^\circ\text{C}$), and you wish to have the new curve at $G_3 = 750 \text{ W/m}^2$, α is calculated to be 0,25 by formula (12). Therefore, T_3 is $30 \text{ }^\circ\text{C}$ from formula (13).

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} .

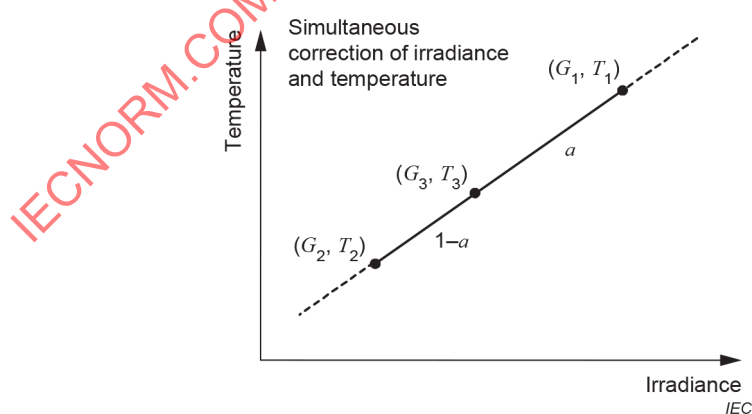
When there are no measured data points which exactly satisfy $I_2 = I_1 + (I_{SC2} - I_{SC1})$, the V_2 and I_2 may be calculated from interpolation of the data points in the I - V curve 2.

This method is applicable to both interpolation ($0 \leq \alpha \leq 1$) and extrapolation ($\alpha < 0$ or $\alpha > 1$). Interpolation gives better results than extrapolation. Extrapolation should be practiced with caution; the user should avoid extrapolating in I - V curve regions beyond the known range and especially in I - V curve regions where steps or kinks may interfere.



Subfigures a) and b) show irradiance corrections ($T_1 = T_2$), c) shows a temperature correction ($G_1 = G_2$) and d) shows simultaneous correction of irradiance and temperature.

Figure 1 – Example of the correction of the I - V characteristics by formulae (10) and (11)



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

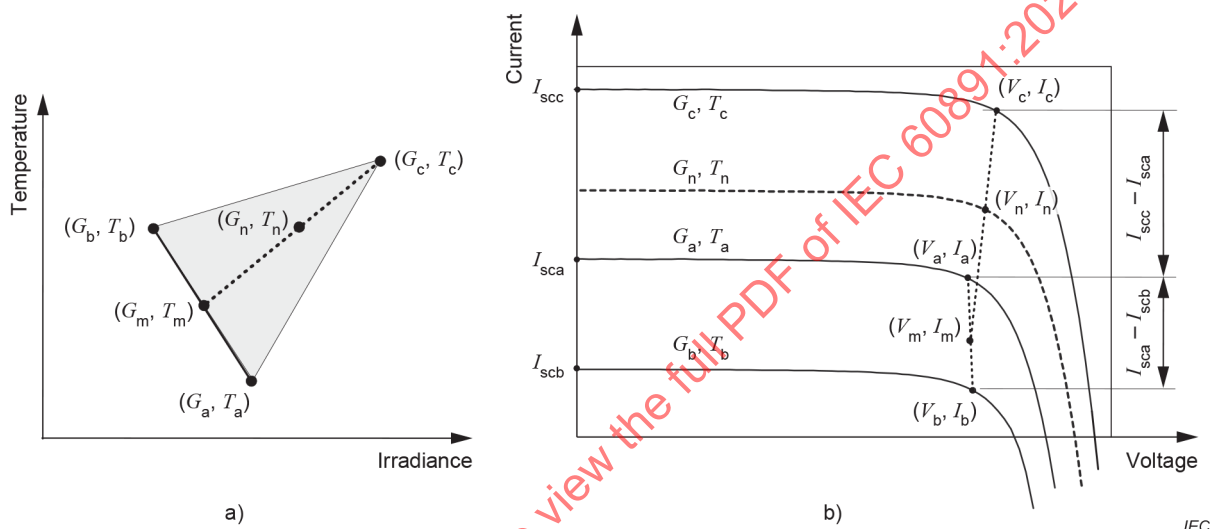
Figure 2 – Schematic diagram of the relation of G_3 and T_3 which can be chosen in the simultaneous correction for irradiance and temperature, for a fixed set of T_1 , G_1 , T_2 , and G_2 by formulae (12) and (13)

4.4.3 Correction to various irradiances and temperatures from three I - V curves

The correction of the I - V characteristics to various ranges of irradiance and temperature is possible by combining the procedures described in 4.4.2. For example, when three I - V 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 irradiance and temperature (G_n, T_n) can be calculated as follows, assuming a linear PV device.

- 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) .

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 subfigure a) shows the range which can be calculated by interpolation only. Subfigure b) shows an example of the I - V characteristics which correspond to subfigure 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

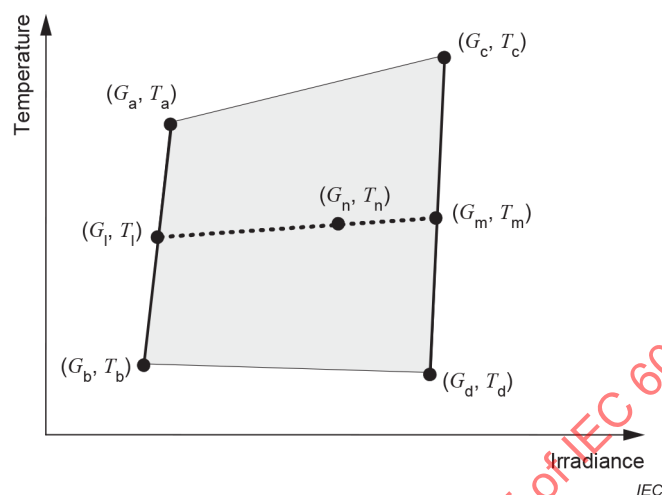
4.4.4 Correction to various irradiances and temperatures from four measured I - V curves

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 irradiance and temperature (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) .

EXAMPLE 2: 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 linear interpolation. The characteristics in the range other than the shaded area may be calculated by using linear extrapolation. However, care should be taken that extrapolation not result in 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

4.5 Correction procedure 4

When the correction performance parameters are unknown, correction procedure 4 provides a method for I - V curve corrections [4]. The procedure is fundamentally based on the single-diode model and requires only the bandgap of the material and the number of cells connected in series to be known. The method has been validated under a broad range of temperatures for c-Si technologies. It is best applicable to irradiance corrections when the measured and target irradiance are both in the range 300 W/m² to 1 200 W/m². This procedure may not be applicable to devices which do not follow the single-diode model, such as degraded devices and partially shaded devices.

The R_S which is used for the irradiance correction in formula (15), can be determined from a single I - V curve as described in 6.5. The value of ε , which is used for the temperature correction in formula (17), is basically independent of temperature and irradiance. A typical value of 1,232 V is applicable to c-Si PV devices.

The measured current-voltage curve shall be translated to the target temperature and irradiance values by applying the following formulae:

$$I'_1 = I_1 + I_{SC1} \times \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right) \quad (14)$$

$$V'_1 = V_1 - R_S \times (I'_1 - I_1) \quad (15)$$

$$I_2 = I'_1 + \alpha_{rel} \times I_{SC,STC} \times (T_2 - T_1) \quad (16)$$

$$V_2 = V'_1 + (T_2 - T_1) \times \frac{1}{T_1} \times (V'_1 - n_S \times \varepsilon) \quad (17)$$

where:

- I_1, V_1 are coordinates of points on the measured characteristics;
- I'_1, V'_1 are coordinates of points on the characteristics corrected for irradiance;
- I_2, V_2 are coordinates of the corresponding points on the characteristic corrected for irradiance and temperature;
- G_1 is the irradiance measured with the reference device, corrected for temperature and linearity of the reference device and the SMM;
- G_2 is the target irradiance for the DUT;
- T_1 is the measured temperature of the DUT;
- T_2 is the target temperature;
- I_{SC1} is the measured short-circuit current of the DUT at G_1 and T_1 ;
- $I_{SC,STC}$ is the short-circuit current of the DUT at STC ;
- α_{rel} is the relative current temperature coefficient of the DUT measured at 1 000 W/m². It expresses the relative change of short-circuit current with respect to its value at STC; the coefficient is expressed in percent per unit temperature and should be scaled by a fraction of 100 when used in the formulae (e.g. $\alpha_{rel} = 0,045 \text{ \% K}^{-1} = 0,00045 \text{ K}^{-1}$). For commercial c-Si a typical value of 0,045 % K⁻¹ may be used when the specific value is not available;
- R_S is the internal series resistance of the DUT;
- n_S is the number of cells connected in series;
- ε is a device dependent constant expressed in units of volt. The constant represents the product of ideality factor of the DUT with the bandgap of the photovoltaic material and divided by electron's elementary charge; for c-Si it is typically 1,232 V. For devices other than c-Si, the value should be optimized to yield best translation results.

When unknown $I_{SC,STC}$ can be derived from the actual measurement using the following expression:

$$I_{SC,STC} = \frac{1000 \text{ W m}^{-2}}{G_1} \times \frac{I_{SC}}{(1 + \alpha_{rel} \times (T_1 - 25^\circ \text{C}))} \quad (18)$$

NOTE A typical range for the temperature coefficient α_{rel} of c-Si modules is from 0,03 %/K to 0,06 %/K with respect to the I_{SC} at STC.

5 Determination of temperature coefficients

5.1 General

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

These parameters may be determined from measurements in natural or simulated sunlight. A distinction has to be made between temperature coefficients (in respective unit/K or unit/°C) and the relative temperature coefficient expressed in percentage per unit temperature (%/K or %/°C).

- Temperature coefficients (α , β and δ) expressed in units of current, voltage or power per unit temperature (A/K, V/K and W/K or A/°C, V/°C and W/°C respectively) are only valid at the irradiance level and spectrum at which they were measured. For linear PV devices with respect to irradiance (typically the case for c-Si), α , δ coefficients scale approximately linearly with irradiance, while β remains approximately constant. This approximation may be used over an irradiance range of ± 30 % of this level.
- Relative temperature coefficients (α_{rel} , β_{rel} and δ_{rel}) expressed in percentage per unit temperature (%/K or %/°C) can be determined by dividing the calculated value of temperature coefficients α , β , and δ by the values of short-circuit current, open-circuit voltage and maximum power respectively determined from the least squares fit at 25 °C corresponding to an irradiance of 1 000 W/m². The relative coefficients so determined are valid at the irradiance and spectrum at which the measurements were made. For linear PV devices with respect to irradiance (typically the case for c-Si), relative temperature coefficients α_{rel} and β_{rel} are valid over the entire range of irradiance for which the device is linear according to IEC 60904-10.

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

Formula (1) can be utilized to determine the irradiance from the measured short-circuit current of the reference cell, in order to measure the temperature coefficients of the DUT at irradiance levels other than 1 000 W/m². Formula (1) only holds for linear reference cells which are linear in I_{SC} with irradiance, otherwise a correction according to IEC 60904-10 should be made. A linearity check according to IEC 60904-10 on the DUT should be performed if interpolation of temperature coefficients between irradiances is needed.

Some technologies, such as silicon heterojunction (SHJ)[5], or thin-film may exhibit a non-linear temperature coefficient with temperature. For these devices, it is recommended to measure the temperature dependence over a broad temperature range (e.g. 15 °C to 75 °C) and specify the temperature range for which the determined temperature coefficient is applicable.

5.2 Apparatus

The measuring apparatus shall comply with the following:

- a) The apparatus and instrumentation shall comply with the requirements of IEC 60904-1 and its relevant subparts.

- b) If a solar simulator is used as radiant source it shall comply with class BBB or better in accordance with IEC 60904-9. The solar simulator shall produce continuous spectral irradiance (i.e. uninterrupted in wavelength) near the bandgap of the DUT in order to avoid measurement artefacts due to a possible shift of the spectral responsivity edge with temperature and therefore a change in the spectral mismatch of the DUT during the measurement sequence. IEC 60904-10 provides guidance on how to deal with the possible changes in spectral mismatch due to temperature for measurements with solar simulators and under natural sunlight.
- c) The apparatus includes equipment necessary to change and/or control the temperature of the DUT over the range of interest. Each equipment used to change temperature can produce a different temperature non-uniformity on the DUT and therefore a specific uncertainty calculation is necessary to account for this.

NOTE The following equipment has been used successfully:

- blowers, allowing cooling and heating of the DUT 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 or steady-state simulated sunlight is used.

If the DUT is a module, the temperature of the module should be measured at least at four positions. Each sensor shall be placed in such a way that is located directly behind a cell. The position of the four sensors shall be optimised, so the average temperature of all sensors coincides with the average effective junction temperature of the module at thermal equilibrium. Deviations between the average sensor temperature and the average effective junction temperature of the module shall be accounted for in the measurement uncertainty analysis. There is no general optimum position for the temperature sensors, but this rather depends on the measurement set-up. An example configuration is shown in Figure 5, which corresponds to a set-up where the temperature non-uniformity is vertically distributed without significant effects around the edges.

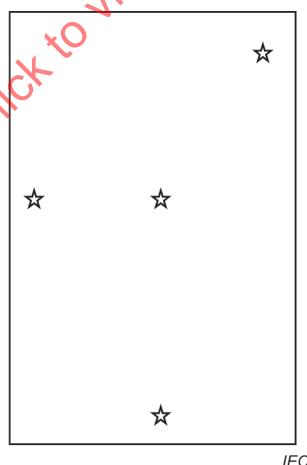


Figure 5 – Example positions for measuring the temperature of the test module behind the cells

- d) For bifacial modules, temperature coefficient measurements can be performed utilising either single-side, or double-side illumination method. When the single-side illumination method is employed determine the temperature coefficients utilizing the same procedure as in mono-facial modules but insuring no backside irradiation. The backside shall be covered such that the contribution from the non-exposed side of the module is limited to or below the levels specified for “non-irradiated background” in IEC TS 60904-1-2. When the double-side illumination method is employed, care shall be taken to minimise shading from the temperature sensors. When contact sensors are used, sensors should be placed preferably along the solar cell busbars and fixed with transparent thermal tape.

- e) If contact temperature sensors are used, heat transfer paste can also be utilised to enhance the thermal coupling between the module and the sensor. Thermal tape shall be also used to locally insulate sensors to the ambient.
- f) If infrared temperature sensors are used care shall be taken to account for the emissivity of glass, or polymeric backsheet. Typical emissivity values are 0,85 to 0,90 for glass and 0,90 to 0,95 for white polymeric backsheet.
- g) If the DUT undergoes heating or cooling, thermal equilibrium is not reached. In this case care shall be taken as back surface temperatures may strongly differ from the effective junction temperature. The temperature difference between cell junction and back surface should be minimized by maintaining the temperature of the DUT stable at the level of interest for sufficient time. The module V_{OC} can be used as indicator to confirm if the cell junction temperature has been stabilized.

5.3 Procedure in natural or steady-state simulated sunlight

TCs measurement in natural sunlight shall only be made when:

- the irradiance variation caused by short-term oscillations (clouds, haze, or smoke) is less than ± 2 % of the total in-plane irradiance as measured by the reference device;
- the wind speed is less than 2 m s^{-1} .

Measurements in natural sunlight shall be made as expeditiously as possible to minimize the effect of changes in the spectral irradiance conditions. If this is not possible, SMM calculation according to IEC 60904-7 is required if the reference device is not spectrally matched to the DUT. The SMM calculation can then be applied as SMM correction to every single measurement at all temperatures or, if the change in SMM is not larger than 1 % over the entire range of temperatures, it may be included as component of the SMM uncertainty in the measurement uncertainty calculation.

- a) If the DUT 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, expose and shade the DUT and the reference device from the natural or the steady-state simulated sunlight and from the wind until their temperature is uniform within ± 2 °C of the target temperature. Alternatively, allow the DUT to equilibrate to its stabilized temperature, or cool the DUT to a point below the required test temperature and then let it warm up naturally. The reference device should also stabilize within ± 2 °C of its equilibrium temperature before proceeding.
- c) Record the I - V characteristic (or only the short-circuit current, if appropriate) and temperature of the DUT concurrently with recording the output and temperature of the reference device at the desired temperatures. If necessary, make the measurements immediately after removing the shade. Determine the values of I_{SC} , V_{OC} and P_{max} .
- d) Adjust the device temperature by means of a temperature control or alternatively exposing and shading the DUT as required to achieve and maintain the desired temperature. Alternately, the DUT may be allowed to warm-up naturally with the data recording procedure of item c) performed periodically during the warm-up.
- e) Ensure that, during the recording period for each data set, the DUT and reference device temperatures are stabilized and remain constant within ± 2 °C and that the irradiance as measured by the reference device remains constant within ± 1 %.
- f) If necessary, and only for devices proven to be linear according to IEC 60904-10 with respect to irradiance, translate data to the irradiance level for which temperature coefficients shall be reported using one of the procedures in this document (see Clause 4).

Repeat steps c) to f). The DUT temperatures shall be such that the range of interest is at least 30 °C and that it is spanned in at least six approximately equal increments. In the laboratory practice, the range of interest is often smaller than 30 °C (e.g. from 20 °C to 40 °C). In such cases, the TCs can be derived from interpolation of at least six approximately equal increments in the same restricted range of interest. Extrapolation of TCs outside that range shall not be performed. If the range of temperature used to determine temperature coefficients is less than 30 °C, then the range of temperature shall be listed together with the temperature coefficient; in this case the results may not be reliable outside of this range and shall not be used to fulfil IEC 61215-2, MQT 04 requirements, or as nameplate, or datasheet information.

For technologies which may exhibit a non-linear temperature coefficient with temperature, consider expanding the temperature range (e.g. 15 °C to 75 °C) to determine their value.

5.4 Procedure with a pulsed solar simulator

The procedure using a pulsed solar simulator is as follows:

- Heat or cool the DUT to the temperature of interest until its temperature is uniform within ± 2 °C. If the device is a module, the temperature uniformity should be checked by measurements at four positions (an example of temperature sensors position is shown in Figure 5) or assumed by setup conditions (e.g. closed-box temperature controller and repeatability measurements). Once the device temperature has stabilized, set the irradiance to the desired level, using the reference device (IEC 60904-2).
- Record the current-voltage characteristic and temperature of the DUT and determine the values of I_{SC} , V_{OC} and P_{max} .
- 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).

In the laboratory practice, the range of interest is often smaller than 30 °C (e.g. from 20 °C to 40 °C). In such cases, the TCs can be derived from interpolation of at least six approximately equal increments in the same restricted range of interest. Extrapolation of TCs outside that range shall not be performed. If the range of temperature used to determine temperature coefficients is less than 30 °C, then the range of temperature shall be listed together with the temperature coefficient; in this case the results may not be reliable outside of this range and shall not be used to fulfil IEC 61215-2, MQT 04 requirements, or as nameplate, or datasheet information.

For technologies which may exhibit a non-linear temperature coefficient with temperature, consider expanding the temperature range (e.g. 15 °C to 75 °C) to determine their value.

5.5 Calculation of temperature coefficients

The procedure to calculate temperature coefficients is as follows:

- From the values of I_{SC} , V_{OC} and P_{max} as functions of the measured device temperature calculate the linear least squares fit for each set of data. A plot of the data sets is also suggested to visually check the data points.
- The slopes of the linear least squares fit for I_{SC} , V_{OC} and P_{max} are, respectively, the temperature coefficient α of the short-circuit current, the temperature coefficient β of the open-circuit voltage, and the temperature coefficient δ of maximum power for the DUT. When possible, it is desirable to account for the measurement uncertainty of the components involved to calculate the percentage deviation from a linear function, as defined in IEC 60904-10:2020, 9.3.

NOTE 1 See IEC 60904-10 to determine if the DUT can be considered to be linear towards temperature and irradiance.

NOTE 2 Because the fill factor of the DUT is a function of temperature, it is not sufficient to use the product of α and β as the temperature coefficient of maximum power.

Temperature coefficients are particularly sensitive to solar simulator spectra close to the bandgap of the PV DUT. Depending on the technology, change in temperature can change the spectral responsivity of the DUT near the bandgap, causing temperature-dependent spectral mismatch. Under natural sunlight spectrum, the effect of the spectral mismatch change is usually insignificant due to the very close spectral match between the test and reference spectra. For solar simulator spectra, the dependence of SMM on the temperature of the DUT is usually much larger. Therefore, spectral mismatch corrections should be performed for each measured temperature, or an uncertainty analysis should be included that provides an estimation of the magnitude of these errors.

For technologies which exhibit a non-linear temperature coefficient the temperature range used to extract the temperature coefficient shall be specified. If required, separate temperature coefficients for different application ranges of temperature may be assigned.

6 Determination of internal series resistance R_S and R'_S

6.1 General

Series resistance, R_S and R'_S , describe the electrical resistance encountered by the bulk of the semiconductor material, the metallic contacts and interconnections between elements connected in series. Typically, series resistances are valid within ± 40 % of the irradiance where they were determined. For linear devices, (typically the case for c-Si) they are valid within ± 80 % of the irradiance at which the series resistance was determined.

The experimental method for determination of R_S or R'_S (depending on the chosen procedure for I - V curve correction) is different for correction procedures 1 or 4 (with R_S) and 2 (with R'_S) although they all start from the same data set of I - V curves. Another difference is that R_S should be ideally determined at the temperature corresponding to the uncorrected I - V which needs to be translated, while R'_S corresponds to the value of series resistance at 25 °C. These parameters may be determined in natural sunlight or simulated sunlight by the following procedure.

Tracing of current-voltage characteristics of the DUT at constant temperature and at two 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 do not need to be known. For linear devices they can be calculated according to the proportionality $G_N = I_{SC,N} / I_{SC1} \times G_1$ (see IEC 60904-10).

For the purpose of determining the R'_S , I - V measurements shall be practiced with device temperature controlled within (25 ± 1) °C. For the purpose of determining the R_S , there is no such limitation, although device temperature should ideally be as close as possible to the temperature corresponding to the uncorrected I - V measurement, which needs to be corrected.

Furthermore, during the I - V measurements, the device temperature and its uniformity shall be stable within $\pm 0,5$ °C. The stability of the device temperature is critical as any variation of device temperature that is not corrected for will lead to a different result for the internal series resistance. Ideally, the temperature should be stable to $\pm 0,1$ °C and in this case the contribution of the temperature variation to the uncertainty of internal series resistance can be of the order of 5 % [6]. Larger temperature variations will invariably lead to larger uncertainties in the determined internal series resistance. In fact, when measuring large-area PV modules the temperatures can be typically controlled within $\pm 0,5$ °C, thus producing larger uncertainties than what would be the ideal case. The contribution of the temperature variations of the actual measurements to the uncertainty of the internal series resistance as determined below shall be explicitly considered.

Different irradiance levels can also lead to different spatial non-uniformity patterns of irradiance across the DUT depending on the method chosen to vary it (see IEC 60904-10). If the DUT consists of series-connected cells, the short-circuit currents corresponding to different irradiance levels can be affected by the spatial non-uniformity of irradiance. Therefore, in such cases the ratio of short-circuit currents of the DUT itself may not be a suitable parameter for calculating the effective irradiance. In this case, the irradiance measured with the reference cell should be considered and the non-uniformity accounted for in the uncertainty calculation.

NOTE For the purpose of changing irradiance, see IEC 60904-10, where procedures for measurements at varying irradiance are described with relevant requirements.

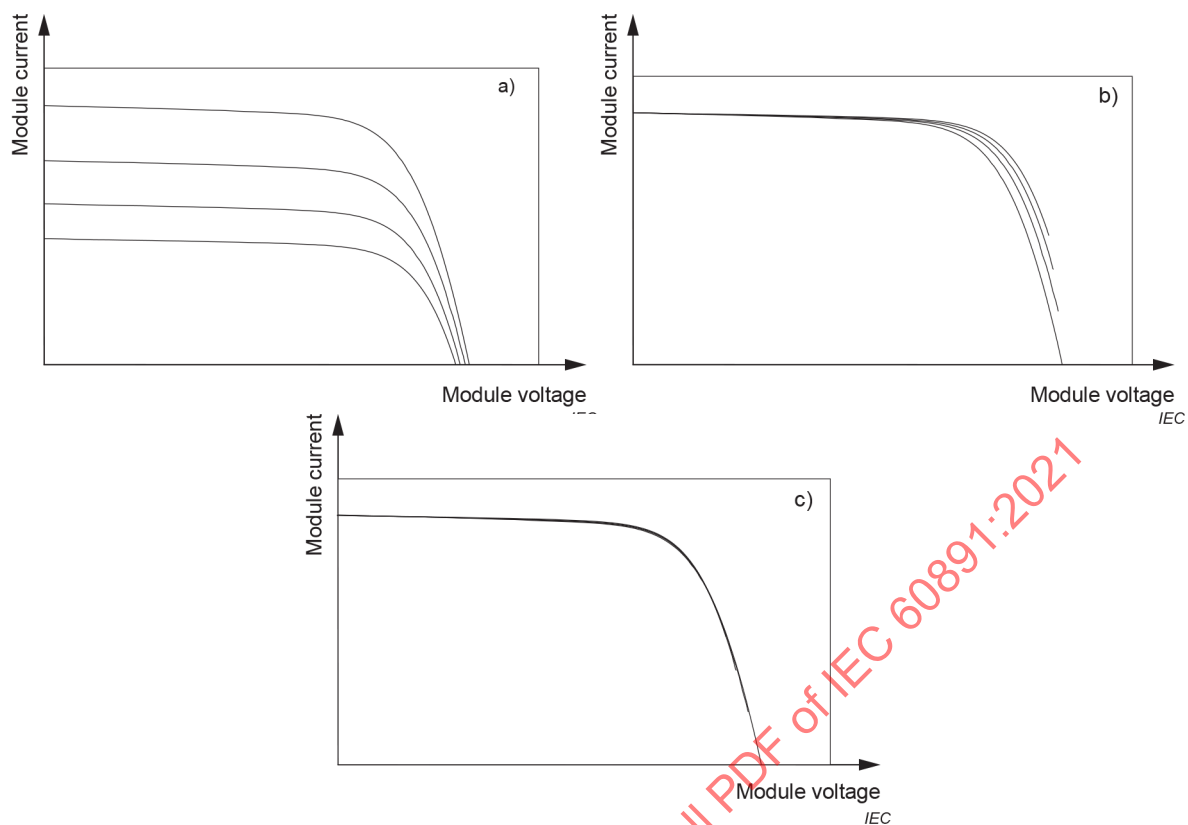
6.2 Determination of R_S in correction procedures 1 and 4

The determination of R_S in correction procedures 1 and 4 is as follows:

- a) Assuming that I_{SC1} is the short-circuit current of the I - V characteristic recorded at the 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 $R_S = 0 \Omega$ as starting value for the formulae (2) and (3) or (14) to (17).
- b) Plot the corrected I - V curves in a diagram (Figure 6b)).
- c) Increase R_S in steps of 1 m Ω for PV-modules and 0,1 m Ω for solar cells. The proper value of R_S has been determined when the deviation of maximum power values of the translated I - V characteristics coincide within 0,5 % or better (see Figure 6c)). Alternatively, it is possible to determine R_S by minimizing the difference in maximum power values.

Generally, the suggested method for determining R_S is a practical recommendation, which is easy to implement by the end user. The optimum algorithm to determine R_S depends on module and cell technology. Hence, numerical methods that optimise the value of R_S can be utilized to increase accuracy and reduce effort.

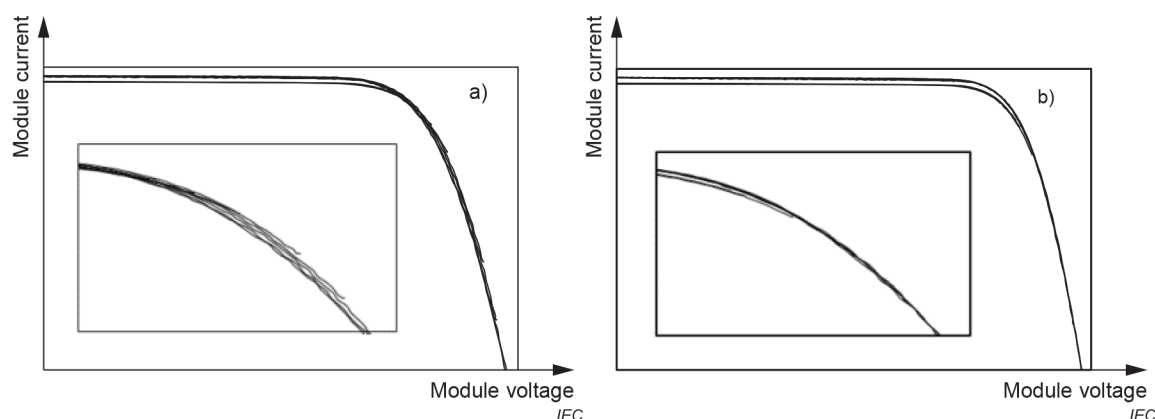
Care shall be taken that after optimising the series resistance, the translated I - V curves do not intersect. This can be caused for example by variation of non-uniformity of irradiance at different irradiance levels. In that case, I - V curve agreement over the whole section of the I - V curves in the range of P_{max} to V_{OC} shall be considered for optimal match. When measuring modules with I - V curves showing steps or kinks in the I_{SC} to P_{max} region due to mismatch of cells short-circuit current, module degradation, non-uniformity of irradiance or shading (e.g. for bifacial module rear shading), the whole section of the I - V curves in the range of V_{Pmax} to V_{OC} shall be considered for optimal match (Figure 7b)).



Key

- 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



Key

- a) Inaccurate correction: Corrected I - V characteristics determined by optimising the value of R_s , so the maximum power values of the I - V curves coincide (R_s = optimal at P_{max}).
- b) Accurate correction: Corrected I - V characteristics determined by optimising the value of R_s , so the whole section of the I - V curves in the range of V_{Pmax} to V_{OC} coincides (R_s = optimal at V_{Pmax} to V_{OC}).

Multiple sets of I - V curves are measured at different irradiance levels. The embedded zoom in plots in each subfigure show the I - V curves in the range of V_{Pmax} to V_{OC} . Two of the measured I - V curves exhibit measurement artefacts, which were caused by spatial non-uniformity of irradiance. The set of the affected I - V characteristics can be recognised when translating all curves to the same level of irradiance by their: i) difference in I_{SC} to the other I - V curves, and ii) their intersection with the other I - V curves in the region close to P_{max} , (as shown in subfigure a)). In such cases the optimal value of R_s shall be determined by considering the whole section of the I - V from V_{Pmax} to V_{OC} for all I - V curves (as shown in subfigure b)).

Figure 7 – Determination of internal series resistance when the corrected I - V characteristics intersect

6.3 Determination of B_1 and B_2 in correction procedure 2

The determination of B_1 and B_2 , used in the irradiance correction factor $f(G)$, in correction procedure 2 is as follows:

- a) 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 $R'_s = 0 \, \Omega$ and $B_1 = B_2 = 0$ as starting values using formulae (5) and (6).
- b) Plot the corrected I - V curves in a diagram (see Figure 8b)).

NOTE 1 At given start values $R'_s = 0 \, \Omega$, $B_1 = B_2 = 0$ only the translated short-circuit currents will coincide.

- c) Plot the ratio of open-circuit voltage of the DUT at STC over the measured open-circuit voltage, corresponding to different irradiance levels G , $V_{OC,STC} / V_{OC}$, over the logarithmic ratio of irradiance at STC over the corresponding measured irradiances G , $\ln(1\,000/G)$ (see Figure 8c)).
- d) Determine the irradiance factors B_1 and B_2 by computing the second order polynomial regression for $y = (V_{OC,STC} / V_{OC})$ against $x = \ln(1\,000/G)$ according to formula:

$$y = B_2 \times x^2 + B_1 \times x + 1 \quad (19)$$

The correct values of the irradiance factors B_1 and B_2 have been determined when the open-circuit voltages of the translated I - V characteristics assuming $R'_s = 0 \, \Omega$ coincide within $\pm 0,5 \, \%$ or better (see Figure 8d)). If it is not possible to find a suitable parameter B_1 and B_2 that fulfils

the $\pm 0,5$ % requirement for translated V_{OC} values, the correction procedure is not suitable for this PV device.

NOTE 2 Step d) is applicable when I - V characteristics are available over a broad range of irradiance (e.g. 100 W/m² to 1 100 W/m²). When the measured I - V characteristics correspond to a narrow range of irradiance (i.e. ± 30 % of the target irradiance), or when V_{OC} scales linearly with the logarithm of irradiance, a simplified approach can be employed where $B_2 = 0$ and B_1 is determined by linear regression of the formula: $y = B_1 \times x + 1$.

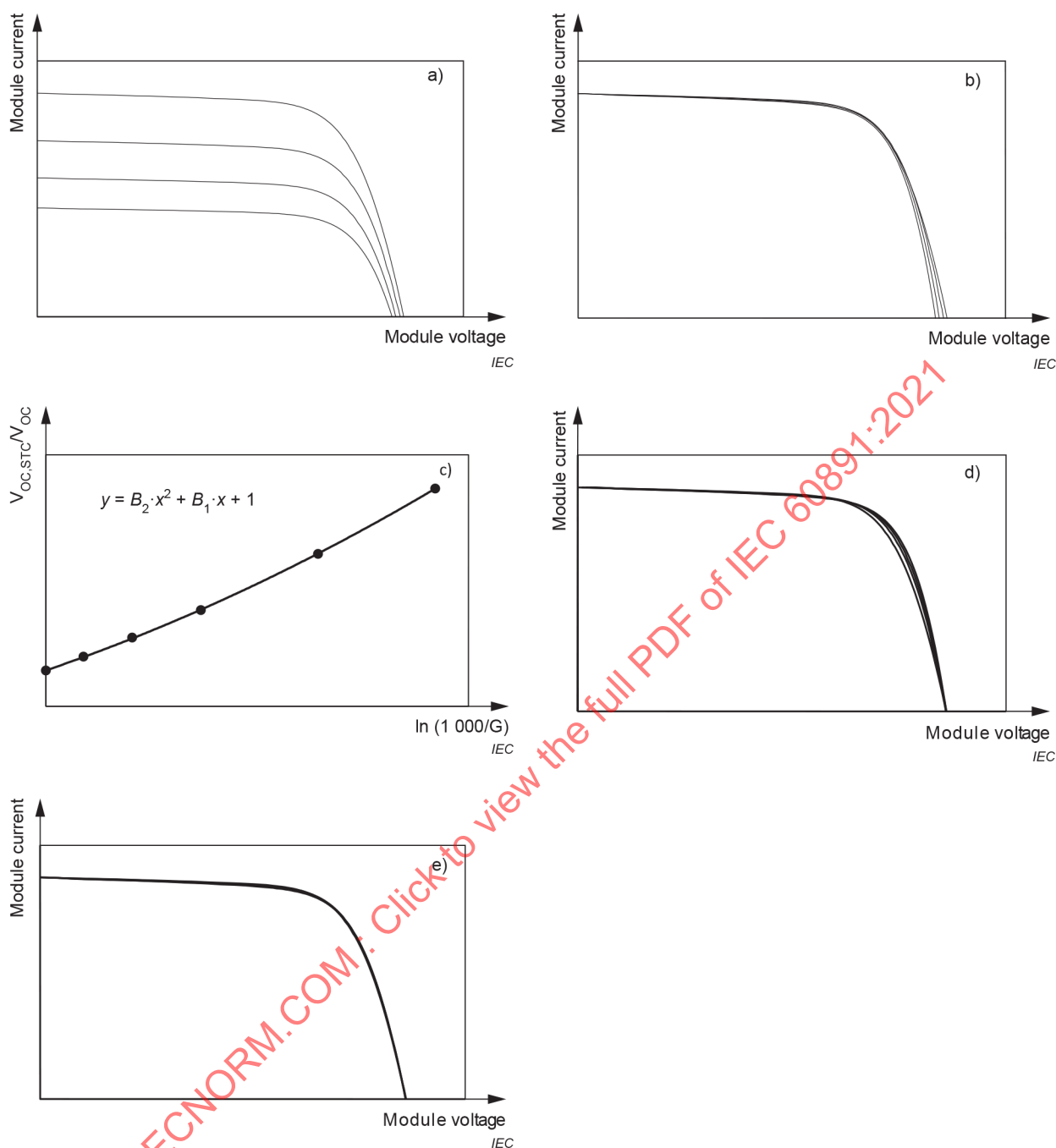
NOTE 3 The V_{OC} irradiance correction factor B_1 is typically $< 0,1$ for linear PV devices.

6.4 Determination of R'_S in correction procedure 2

The determination of R'_S in correction procedure 2 is as follows:

- a) Fix B_1 and B_2 to the value determined in step 6.3d). Use $(n_S / n_P) \times (5 \text{ m}\Omega)$ as an estimate for the internal series resistance R'_S , where n_S is the number of series-connected cells and n_P is the number of parallel-connected blocks in the DUT.
- b) Increase R'_S in steps of 1 m Ω for PV-modules and 0,1 m Ω for solar cells. The proper value of R'_S has been determined when the deviation of maximum power values of the translated I - V characteristics coincide within 0,5 % or better (see Figure 8e)). Alternatively, it is possible to determine R'_S by minimizing the difference in maximum power values.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60891:2021



Key

- a) Measured I - V characteristics at different irradiances and constant temperature
- b) Corrected I - V characteristics at $B_1 = B_2 = 0$ and $R'_S = 0 \Omega$
- c) Measured $V_{OC,STC} / V_{OC}$ over $\ln(1\,000 / G)$ and the second order polynomial fit
- d) Corrected I - V characteristics at $B_1 = \text{optimal}$, $B_2 = \text{optimal}$ and $R'_S = 0 \Omega$
- e) Corrected I - V characteristics at $B_1 = \text{optimal}$, $B_2 = \text{optimal}$ and $R'_S = \text{optimal}$

Figure 8 – Determination of irradiance correction factors B_1 and B_2 and internal series resistance, R'_S

Generally, the suggested method for determining R'_S is a practical recommendation, which is easy to implement by the end user. The optimum algorithm to determine R'_S depends on module and cell technology. Hence, numerical methods that optimise the value of R'_S can be utilized to increase accuracy and reduce effort.

Care shall be taken that after optimising the series resistance, the translated I - V curves do not intersect. This can be caused for example by variation of spatial non-uniformity of irradiance at different irradiance levels. In that case, I - V curve agreement over the whole section of the I - V curves in the range of $P_{\max}$ to V_{OC} shall be considered for optimal match. When measuring modules with I - V curves showing steps or kinks in the I_{SC} to $P_{\max}$ region due to mismatch of cells short-circuit current, module degradation, non-uniformity of irradiance or shading (e.g. for bifacial module rear shading), the whole section of the I - V curves in the range of $V_{P_{\max}}$ to V_{OC} shall be considered for optimal match (as previously shown in Figure 7b)).

6.5 Determination of R_S in correction procedure 4

The determination of R_S in correction procedure 4 is as follows:

This method is used to determine R_S from a single experimental I - V curve of a PV device. Plot $Y = -(V_a - V_b) / (I_a - I_b)$ versus $X = -\{ \ln(I_{SC} - I_a) - \ln(I_{SC} - I_b) \} / (I_a - I_b)$. Here, (V_a, I_a) and (V_b, I_b) are data points in an I - V curve as shown in Figure 9a), and scanned through the curve. When the plot forms a straight line as shown in Figure 9b), its y-intercept shows the R_S . It is essential that the experimental I - V curve forms a straight line in the plot of Figure 9a), which is equivalent to the curve following the single-diode model. If a straight line is not obtained, this method cannot be used for determining the R_S from the I - V curve.

- a) The coefficient of determination R^2 shall be larger than 0,995, in order to ensure that the plot forms a straight line. The minimum and maximum values of X ($X_{\min}$ and $X_{\max}$) of the plot shall satisfy $(X_{\max} - X_{\min}) > 2 \times X_{\min}$.
- b) The data points shall be chosen from the high voltage region of the I - V curve, since the plot tends to deviate from a straight line in low voltage region, being affected by shunt resistance and mismatch of cells short-circuit current, etc. A minimum of ten pairs of data points shall be used in the plot.
- c) Care should be taken that measured data points may be saturated at a certain current or voltage level (e. g. around the short circuit or open circuit condition), resulting in many data points at practically the same voltage and current. Those saturated data points should not be used for the plot.

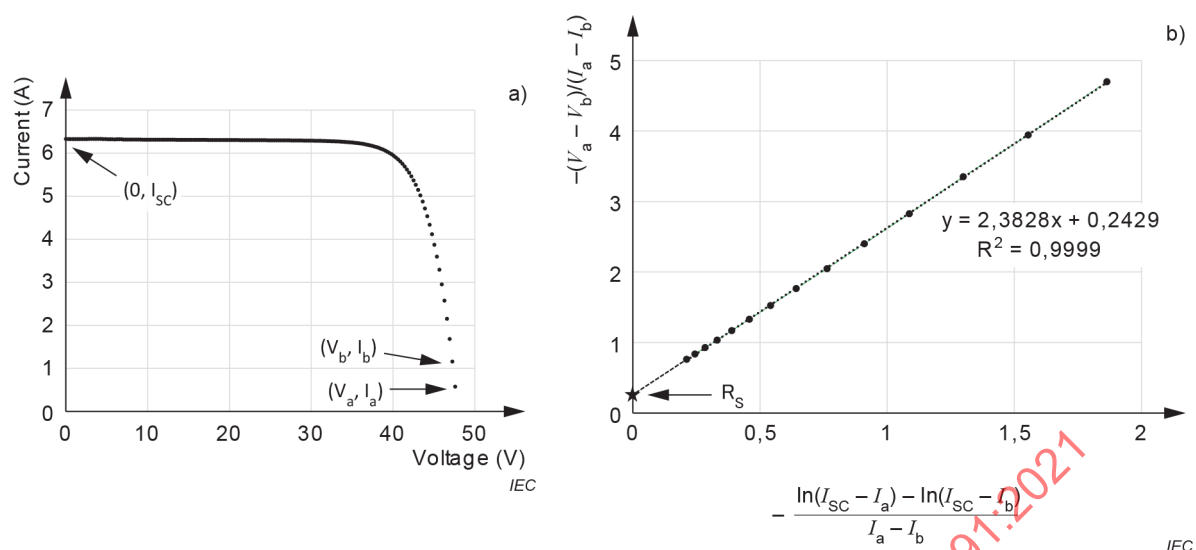


Figure 9 – Determination of internal series resistance of a PV module from a single I - V curve

The uncertainty in the estimated R_s mainly affects the V_2 of formula (15) for irradiance translation. For example, when the uncertainty of R_s is estimated to be 1 mΩ and $I_2 - I_1$ is 7 A, its impact on the uncertainty of V_2 is estimated to be 1 mΩ $\times$ 7 A = 7 mV.

The R_s determined by the method described in 6.2 may be also used in procedure 4.

7 Determination of the curve correction factor κ and κ'

7.1 General

The experimental method for determination of curve correction factors κ and κ' is identical for both correction procedures 1 and 2 but will normally yield different numerical values for both procedures. They may be determined in natural sunlight or simulated sunlight by the following procedure. For correction procedure 1 the series resistance R_s and the temperature coefficients α and β (Procedure 1) shall be known as they are used as inputs for the determination of κ . For correction procedure 2 the series resistance R'_s and the relative temperature coefficients α_{rel} and β_{rel} (Procedure 2) shall be known as they are used as inputs for determination of κ and κ' . Knowledge of the irradiance correction factors B_1 and B_2 , but also the relative temperature coefficient of open-circuit voltage, β_{rel} are also required for correction procedure 2, if irradiance corrections have to be applied.

7.2 Procedure

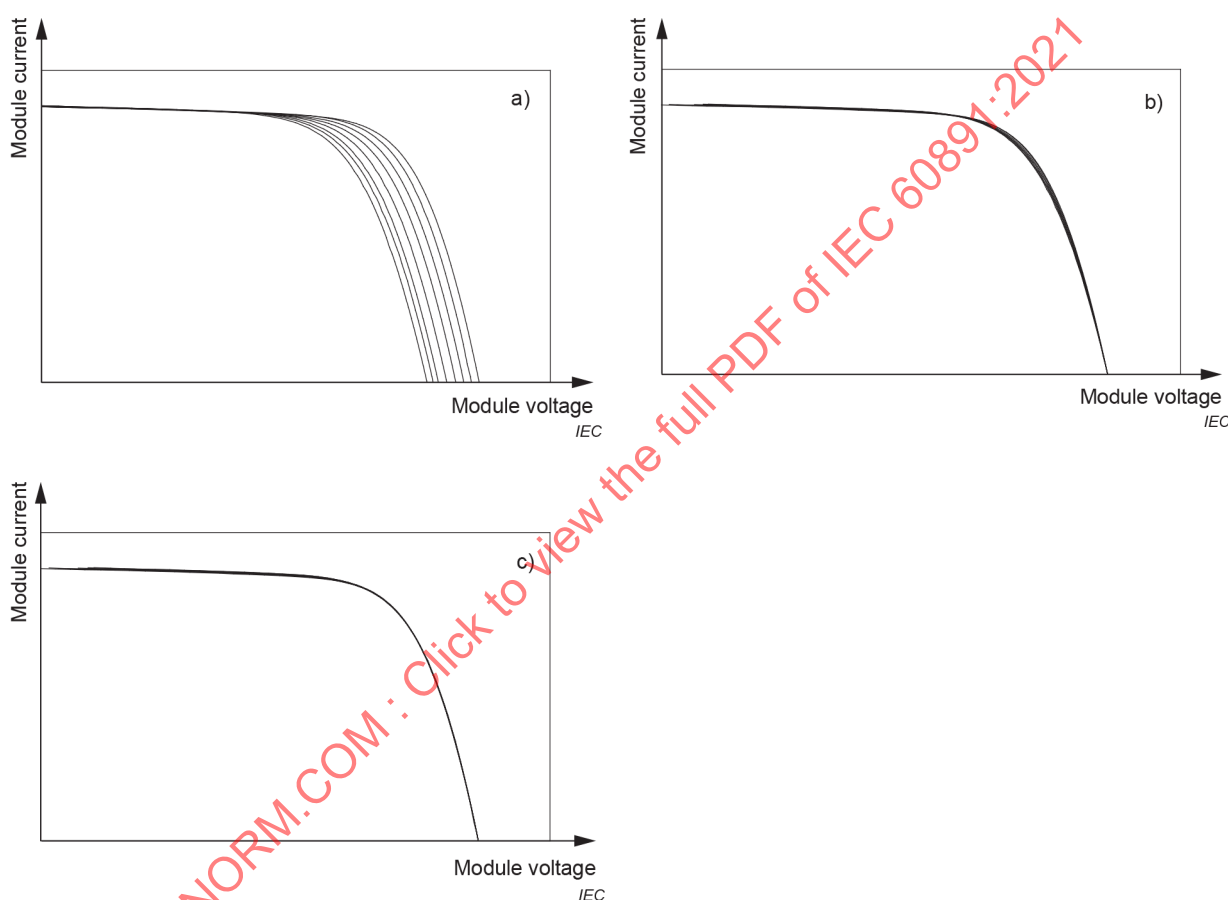
The procedure for the determination of the curve correction factors κ and κ' is as follows:

- Measure the I - V characteristics of the DUT at one irradiance and at different temperatures ($T_1 \dots T_N$). The latter shall be chosen to cover the range of interest within which curve translation shall be performed. The one irradiance value considered shall lie within the range which has been used for determination of the series resistance in Clause 6 (see Figure 10 a)). During the I - V measurements, the irradiance shall not vary by more than ± 1 %.

NOTE See 5.2 to 5.4 for information on equipment and measurement techniques for temperature control.

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

- b) 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 $\kappa = 0 \text{ } \Omega/\text{K}$ in formula (3) or $\kappa' = 0 \text{ } \Omega/\text{K}$ in formula (6).
- c) Plot the corrected I - V curves in a diagram (see Figure 10b)).
- d) Starting from $0 \text{ m}\Omega/\text{K}$, change κ or κ' in steps of $1 \text{ m}\Omega/\text{K}$ in the positive or negative direction, so that the curves overlap. The proper value of κ or κ' has been determined when the deviation of maximum output power values of the translated I-V characteristics coincide within $\pm 0,5 \%$ or better (see Figure 10c)). Alternatively, it is possible to determine κ or κ' by minimizing the difference in maximum power values.



Key

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

Figure 10 – Determination of curve correction factor

8 Reporting

The following information shall be given if temperature and irradiance corrections are applied to measured I - V characteristics or reports for temperature coefficients or series resistance are to be delivered:

- a) description and identification of the DUT when appropriate;

- b) measurement conditions of irradiance and device temperature. If the linear interpolation/extrapolation method is applied all sets of (G_i, T_i) shall be reported;
- c) identification of the correction procedure used (from Clause 4);
- d) values of all the parameters used for I - V correction together with their uncertainty;
- e) irradiance level to which temperature coefficients or parameters κ and κ' are referred, when applicable;
- f) a statement of the estimated translation accuracy;
- g) temperature at which the series resistance R_S or R'_S is determined, when applicable;

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

- identification of the method used to measure the correction parameters;
- ranges of irradiance and device temperature that were used as basis for determination of I - V correction parameters;
- measurement 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 or not for the conditions applied to measure the parameters. If the linearity of the device in accordance with IEC 60904-10 is not known, then a statement shall be made to this effect;
- electrical condition of the DUT regarding history of temperature and light conditioning prior to the measurements, if applicable;
- any deviations from, additions to, or exclusions from the measurement procedures for determination of I - V correction parameters (Clauses 5 to 7).

Annex A (informative)

Alternative procedures for series resistance determination

A.1 General

Annex A aims to provide information for alternative procedures that may be employed to determine series resistance of the DUT experimentally. The procedures described in Annex A should not be used to replace the methods described in 6.2 and 6.3 for I - V corrections.

These methods can be used to provide supplementary information to the user for purposes of cross-checking the value of the series resistance extracted by applying methods of 6.2 or 6.3.

A.2 Differential resistance at V_{OC} against inverse irradiance method

Calculate the differential resistance at V_{OC} from the I - V characteristics at a fixed temperature and at different irradiance levels corresponding to the approximate irradiance range of interest (typically within ± 40 % of the target irradiance). In practice, the differential resistance dV/dI at V_{OC} may be approximated as the slope of V against I in the range of ± 3 % of the measured V_{OC} .

Plot the resistance at V_{OC} versus the inverse of irradiance. For linear devices with respect to irradiance, the inverse of the measured short-circuit current may be also used (see Figure A.1).

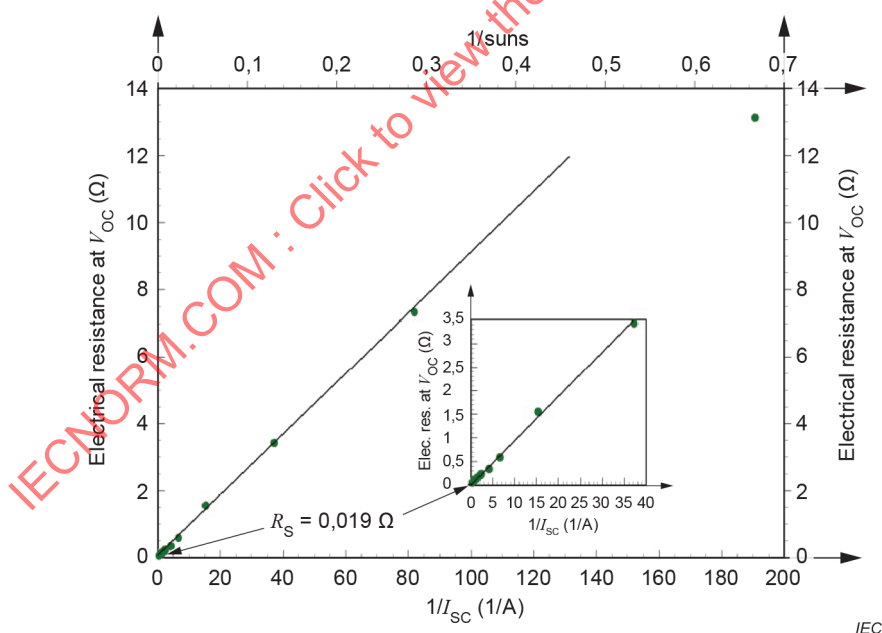


Figure A.1 – Determination of internal series resistance

Determine the most linear region from 0 to increasing $1 / G$ (or $1 / I_{SC}$) to perform a linear least squares fit to the resistance at V_{OC} versus $1 / I_{SC}$ data. The internal series resistance R_S is the intercept of resistance at zero $1 / G$ (or $1 / I_{SC}$).

Bibliography

- [1] J. Sandstrom, "A method for predicting solar cell current-voltage curve characteristics as a function of incident solar intensity and cell temperature", *National Aeronautics and Space Administration, Technical Report*, pp. 32-1142, 1967
- [2] C. Monokroussos, H. Müllejans, Q. Gao, W. Herrmann, "I-V Translation Procedure for Higher Accuracy and Compliance with PERC Cell Technology Requirements", *Proceedings 37th EUPVSEC*, online, September 2020, pp. 1120-1125, doi: 10.4229/EUPVSEC20202020-4AV.2.19
- [3] Y. Hishikawa, Y. Tsuno, "Calculation Formula for Irradiance and Temperature Correction of the I-V Curves of Solar Cells and Modules by Linear Interpolation/Extrapolation", *24th EUPVSEC*, September 2009, doi: 10.4229/24thEUPVSEC2009-4AV.3.71
- [4] Y. Hishikawa, T. Doi, M. Higa, K. Yamagoe, H. Ohshima, T. Takenouchi, M. Yoshita, "Voltage-Dependent Temperature Coefficient of the I-V Curves of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules", *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 8, No. 1, January 2018
- [5] P. Seif, G. Krishnamani, B. Demarex, C. Ballif and S. D. Wolf, "Amorphous/Crystalline Silicon Interface Passivation: Ambient-Temperature Dependence and Implications for Solar Cell Performance", *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 5, No. 3, pp. 718-724, May 2015, doi: 10.1109/JPHOTOV.2015.2397602
- [6] G. Trentadue, D. Pavanello, E. Salis, M. Field and H. Müllejans, "Determination of internal series resistance of PV devices: repeatability and uncertainty", *Measurement Science and Technology*, Volume 27, 2016, Number 5, 055005

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60891:2021

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	38
1 Domaine d'application	40
2 Références normatives	40
3 Termes et définitions, symboles et termes abrégés	41
4 Procédures de correction	42
4.1 Généralités	42
4.2 Procédure de correction 1	45
4.3 Procédure de correction 2	47
4.4 Procédure de correction 3	49
4.4.1 Généralités	49
4.4.2 Correction en fonction de l'éclairement et de la température à partir de deux courbes $I-V$ mesurées	50
4.4.3 Correction en fonction d'éclairements et de températures variables à partir de trois courbes $I-V$	52
4.4.4 Correction en fonction d'éclairements et de températures variables à partir de quatre courbes $I-V$ mesurées	52
4.5 Procédure de correction 4	53
5 Détermination des coefficients de température	55
5.1 Généralités	55
5.2 Appareillage	56
5.3 Procédure sous éclairement solaire naturel ou simulé continu	57
5.4 Procédure qui utilise un simulateur solaire à impulsions	58
5.5 Calcul des coefficients de température	59
6 Détermination des résistances-série internes R_S et R'_S	59
6.1 Généralités	59
6.2 Détermination de R_S dans les procédures de correction 1 et 4	60
6.3 Détermination de B_1 et B_2 dans la procédure de correction 2	62
6.4 Détermination de R'_S dans la procédure de correction 2	63
6.5 Détermination de R_S dans la procédure de correction 4	65
7 Détermination des facteurs de correction de la courbe κ et κ'	66
7.1 Généralités	66
7.2 Procédure	67
8 Rapports	68
Annexe A (informative) Procédures alternatives de détermination de la résistance-série	70
A.1 Généralités	70
A.2 Méthode de la résistance différentielle à V_{OC} par rapport à l'éclairement inverse	70
Bibliographie	71
Figure 1 – Exemple de correction des caractéristiques $I-V$ par les formules (10) et (11)	51
Figure 2 – Diagramme schématique de la relation entre 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 formules (12) et (13)	51

Figure 3 – Diagramme schématique des procédés de correction des caractéristiques I - V en fonction de plages variables d'éclairements et de températures fondés sur trois caractéristiques mesurées	52
Figure 4 – Diagramme schématique des procédés de correction des caractéristiques I - V en fonction de plages variables d'éclairements et de températures fondés sur quatre caractéristiques mesurées	53
Figure 5 – Exemples de positions pour mesurer la température du module en essai derrière les cellules	56
Figure 6 – Détermination de la résistance-série interne	61
Figure 7 – Détermination de la résistance-série interne lorsque les caractéristiques I - V corrigées se croisent.....	62
Figure 8 – Détermination des facteurs de correction de l'éclairement B_1 et B_2 et de la résistance-série interne, R'_S	64
Figure 9 – Détermination de la résistance-série interne d'un module PV à partir d'une courbe I - V unique	66
Figure 10 – Détermination du facteur de correction de la courbe.....	68
Figure A.1 – Détermination de la résistance-série interne	70
Tableau 1 – Vue d'ensemble des procédures de correction en fonction de l'éclairement ($T_1 = T_2$).....	44
Tableau 2 – Vue d'ensemble des procédures de correction en fonction de la température ($G_1 = G_2$).....	45

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 (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 et de ne pas avoir signalé leur existence.

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

Cette troisième édition annule et remplace la deuxième édition parue en 2009. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- ajout de recommandations concernant la procédure de correction à utiliser selon l'application;
- introduction de la procédure de transposition 4 applicable aux technologies c-Si avec des coefficients de température inconnus;

- introduction de différentes classifications dans les procédures existantes afin d'améliorer la précision de mesure et de réduire l'incertitude de mesure;
- ajout d'une annexe informative qui présente des méthodes supplémentaires qui peuvent être utilisées pour déterminer la résistance-série.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
82/1936/FDIS	82/1957/RVD

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

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2, il a été développé selon les Directives ISO/IEC, Partie 1 et les Directives ISO/IEC, Supplément-IEC, disponibles sous www.iec.ch/members_experts/refdocs. Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous www.iec.ch/standardsdev/publications.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous webstore.iec.ch dans les données relatives au document recherché. A cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

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

Le présent document définit des procédures à suivre pour les corrections en fonction de la température et de l'éclairement appliquées aux caractéristiques I - V (courant-tension) mesurées (également appelées courbes I - V) des dispositifs photovoltaïques (PV). Il définit également les procédures utilisées pour déterminer les facteurs appropriés pour ces corrections. Les exigences pour le mesurage I - V des dispositifs PV sont données dans l'IEC 60904-1 et ses sous-parties applicables.

Les dispositifs PV 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 pour la correction de la courbe I - V s'applique à chaque type de dispositif. La détermination des coefficients de température pour un module (ou un sous-ensemble de cellules) peut être effectuée à partir de mesures sur une seule cellule, contrairement à la résistance-série interne et au facteur de correction de la courbe, qu'il convient de mesurer séparément pour un module ou un sous-ensemble de cellules. Voir Annexe A pour connaître les procédures alternatives de détermination de la résistance-série.

L'utilisation des paramètres de correction I - V est valable 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 suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences 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 60904-1, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 1: Mesurage des caractéristiques courant-tension des dispositifs photovoltaïques*

IEC TS 60904-1-2, *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 applicables aux dispositifs photovoltaïques 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 60904-8, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 8: Mesure de la sensibilité spectrale d'un dispositif photovoltaïque (PV)*

IEC 60904-9, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 9: Classification des caractéristiques des simulateurs solaires*

IEC 60904-10:2020, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 10: Méthodes de mesure de la dépendance linéaire et de la linéarité*

IEC 61215-2, *Modules photovoltaïques (PV) pour applications terrestres – Qualification de la conception et homologation – Partie 2: Procédures d'essai*

IEC TS 61836, *Solar photovoltaic energy systems – Terms, definitions, and symbols* (disponible en anglais seulement)

3 Termes et définitions, symboles et termes abrégés

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC TS 61836 ainsi que les suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

3.1

B_1

facteur de correction de l'éclairement pour la tension en circuit ouvert qui est liée à la tension thermique de la diode, V_t , de la jonction p-n et à n_s

Note 1 à l'article: Il est utilisé dans la procédure de correction 2.

3.2

B_2

facteur de correction de l'éclairement pour la tension en circuit ouvert qui tient compte de la non-linéarité de V_{OC} par rapport à l'éclairement

Note 1 à l'article: Il est utilisé dans la procédure de correction 2.

3.3

DUT

dispositif en essai

Note 1 à l'article: L'abréviation "DUT" est dérivée du terme anglais développé correspondant, "device under test".

3.4

R_s

résistance-série interne du DUT utilisée pour les procédures de correction 1 et 4

3.5

R'_s

résistance-série interne du DUT utilisée pour la procédure de correction 2

Note 1 à l'article: Même si elle est déterminée par une méthode différente de celle utilisée pour R_s , les deux grandeurs partagent la même signification physique et leurs valeurs pour un même DUT sont donc similaires.

3.6

n_s

nombre de cellules connectées en série dans le DUT

3.7

a

constante d'interpolation utilisée dans la procédure de correction 3, qui est liée à l'éclairement et à la température

3.8

ϵ

produit du facteur d'idéalité du DUT par la bande interdite du matériau photovoltaïque, divisé par la charge élémentaire de l'électron

Note 1 à l'article: Il est utilisé dans la procédure de correction 4.

4 Procédures de correction

4.1 Généralités

Le présent document fournit quatre procédures pour la correction des caractéristiques courant-tension mesurées peuvent être appliquées à d'autres conditions de température et d'éclairement, telles que les conditions normales d'essai (STC, *Standard Test Conditions*). La première procédure décrit un système d'équations linéaires pour le courant et la tension, qui s'applique de façon optimale aux corrections en fonction de l'éclairement à $\pm 40\%$ de l'éclairement cible. La seconde procédure est une méthode de correction algébrique alternative qui donne de meilleurs résultats pour des corrections importantes en fonction de l'éclairement (supérieures à $\pm 40\%$). Ces deux procédures exigent 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 n'exige pas la connaissance des paramètres de correction en entrée. Elle peut être appliquée quand au moins deux courbes courant-tension ont été mesurées pour le DUT. Ces deux courbes courant-tension couvrent la plage de températures et d'éclairements pour laquelle la méthode de correction est applicable. La quatrième procédure repose sur le modèle à une diode et fournit une méthodologie pour déterminer un paramètre de correction R_S à partir d'une courbe $I-V$ unique, lorsque ce paramètre est inconnu. Cette méthode s'applique de façon optimale aux corrections en fonction de l'éclairement lorsque l'éclairement mesuré et l'éclairement cible se situent tous deux dans la plage comprise entre 300 W/m^2 et $1\,200 \text{ W/m}^2$ et que la résistance-série R_S est inconnue. Elle est adaptée aux transpositions lorsque les caractéristiques aux STC doivent être estimées à partir d'une courbe $I-V$ expérimentale unique.

Le Tableau 1 et le Tableau 2 fournissent une vue d'ensemble des quatre procédures de correction différentes, et décrivent de façon qualitative les avantages, les inconvénients ainsi que les paramètres de correction exigés pour chaque procédure. L'objet de ces tableaux est de fournir des recommandations à l'utilisateur du présent document concernant la procédure de correction à utiliser pour différentes applications.

Pour les corrections simultanées de l'éclairement et de la température, les avantages et limitations répertoriés dans le Tableau 1 et le Tableau 2 s'appliquent conjointement.

L'élément commun à toutes les procédures est que les caractéristiques $I-V$ du dispositif PV doivent être mesurées conformément à l'IEC 60904-1 et ses sous-parties applicables.

Il convient que tous les dispositifs PV soient linéaires au moins dans la plage d'éclairements et de températures du dispositif sur laquelle les corrections sont effectuées. Davantage d'informations concernant la manière d'évaluer la déviation de la dépendance linéaire idéale sont données dans l'IEC 60904-10.

Une estimation de la précision de la transposition est exigée (voir Article 8).

En général, l'éclairement total G doit être calculé à partir du courant de court-circuit mesuré (I_{RC}) du dispositif PV de référence, défini dans l'IEC 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 réelle du dispositif de référence T_{RC} en utilisant le coefficient de température relative spécifié du courant de court-circuit du dispositif de référence ($\alpha_{RC,rel}$), lequel est donné à 25 °C et 1 000 W/m².

$$G = \frac{1000 \text{ Wm}^{-2} \times I_{RC}}{I_{RC,STC} \times [1 + \alpha_{RC,rel} \times (T_{RC} - 25^{\circ}\text{C})]} \quad (1)$$

Dans l'idéal, le dispositif de référence doit être linéaire en courant de court-circuit sur l'ensemble de la plage d'éclairements prise en considération, comme cela est défini dans l'IEC 60904-10. En pratique, il est recommandé d'appliquer une correction en fonction de la linéarité du dispositif de référence même pour les dispositifs linéaires, conformément à l'IEC 60904-10. Si le dispositif n'est pas linéaire, conformément à l'IEC 60904-10, sur l'ensemble de la plage d'éclairements prise en considération, des corrections doivent être appliquées afin d'éviter des erreurs dans les corrections de ses caractéristiques I - V . Le spectre du dispositif PV de référence doit être adapté au DUT, ou une correction de désadaptation des réponses spectrales (SMM, *Spectral Mismatch*) doit être appliquée conformément à l'IEC 60904-7. Etant donné que les réponses spectrales du dispositif peuvent varier en fonction de la température, il convient de tenir compte d'une variation apparente du coefficient de température avec les spectres dans la correction. Une méthode d'interpolation de la température en fonction de la correction SMM peut permettre de réduire le plus possible les sources d'erreur.

Tableau 1 – Vue d'ensemble des procédures de correction en fonction de l'éclairement
($T_1 = T_2$)

Procédure 1 Paramètre de correction exigé: R_S	
Avantages	Inconvénients
- Adaptée lorsque R_S est déterminée (généralement à ± 40 % de l'éclairement auquel R_S a été déterminée). - Fonctionne relativement bien sur une plage étendue d'éclairements (en général ± 80 % de l'éclairement auquel R_S a été déterminée), pour les dispositifs linéaires en ce qui concerne l'éclairement selon l'IEC 60904-10. Cela est généralement le cas pour les dispositifs c-Si.	- Prend pour hypothèse une superposition du courant à toutes les tensions. - Ne peut pas produire des courbes $I-V$ complètes pour les corrections plus importantes en fonction de l'éclairement (la partie de la courbe $I-V$ comprise entre P_{max} et V_{OC} est absente), lorsque la courbe $I-V$ n'est pas mesurée à un avancement suffisant du régime de courant négatif. Dans ce cas, l'extrapolation de V_{OC} est nécessaire.
Procédure 2 Paramètres de correction exigés: B_1 , B_2 , R'_S , κ et β_{rel}	
Avantages	Inconvénients
- Adaptée à la plage d'éclairement où R'_S est déterminée (en général ± 40 % de l'éclairement auquel R'_S a été déterminée). - Fonctionne relativement bien sur une plage étendue d'éclairements (en général ± 80 % de l'éclairement auquel R'_S a été déterminée), pour les dispositifs linéaires en ce qui concerne l'éclairement selon l'IEC 60904-10. Cela est généralement le cas pour les dispositifs c-Si. - Peut produire des courbes $I-V$ pour les corrections plus importantes en fonction de l'éclairement. - Fournit des informations pour la comparaison relative des paramètres de modélisation du DUT à l'aide d'un modèle à une diode (facteur d'idéalité et R'_S).	- Exige la connaissance de davantage de paramètres que pour les procédures 1 et 4. - Non recommandée pour la transposition $I-V$ sur un éclairement qui dépasse ± 40 % de l'éclairement cible, lorsque le DUT présente un courant de fuite important (faible shunt d'essai).
Procédure 3 Paramètre de correction exigé: aucun	
Avantages	Inconvénients
- Meilleure précision pour les corrections $I-V$ en cas d'interpolation. - Paramètres d'ajustement non exigés. - Méthode la moins spécifique à la technologie.	- Exige la connaissance des courbes $I-V$ aux niveaux d'éclairement supérieur et inférieur par rapport à l'éclairement cible. - Impossible d'effectuer des comparaisons entre différentes technologies, car les paramètres d'ajustement ne peuvent pas être extraits. - L'interpolation donne de meilleurs résultats que l'extrapolation. Il convient de procéder à l'extrapolation avec précaution.
Procédure 4 Paramètre de correction exigé: aucun	
Avantages	Inconvénients
- Adaptée lorsque le paramètre de correction R_S est inconnu. - N'exige pas plusieurs courbes $I-V$ mesurées à différents niveaux d'éclairement pour déterminer R_S.	- L'approximation de R_S est déterminée à partir d'une courbe $I-V$ unique. - Non adaptée aux technologies qui ne suivent pas le modèle à une diode.

Tableau 2 – Vue d'ensemble des procédures de correction en fonction de la température ($G_1 = G_2$)

Procédure 1	
Paramètres de correction exigés: R_S , κ , α et β	
Avantages	Inconvénients
Adaptée tant que l'éclairement mesuré se situe à $\pm 30\%$ de l'éclairement auquel les coefficients de température ont été déterminés	Non recommandée lorsque l'éclairement mesuré diffère de plus de $\pm 30\%$ de l'éclairement auquel les coefficients de température ont été déterminés.
Procédure 2	
Paramètres de correction exigés: B_1 , B_2 , R'_S , κ' , α_{rel} et β_{rel}	
Avantages	Inconvénients
Adaptée tant que l'éclairement mesuré se situe à $\pm 30\%$ de l'éclairement auquel les coefficients de température ont été déterminés	Exige la connaissance de davantage de paramètres que pour les procédures 1 et 4.
Applicable sur l'ensemble de la plage d'éclairements pour laquelle la linéarité du dispositif est démontrée en ce qui concerne l'éclairement, conformément à l'IEC 60904-10. Cela est généralement le cas pour les dispositifs c-Si.	Non recommandée pour les dispositifs non linéaires en ce qui concerne l'éclairement, lorsque l'éclairement mesuré diffère de plus de $\pm 30\%$ de l'éclairement auquel les coefficients de température ont été déterminés.
Procédure 3	
Paramètre de correction exigé: aucun	
Avantages	Inconvénients
Meilleure précision pour les corrections $I-V$ en cas d'interpolation.	Exige la connaissance des courbes $I-V$ aux températures inférieure et supérieure.
Paramètres d'ajustement non exigés.	Les paramètres d'ajustement ne peuvent pas être extraits.
Méthode la moins spécifique à la technologie.	L'interpolation donne de meilleurs résultats que l'extrapolation. Il convient de procéder à l'extrapolation avec précaution.
Procédure 4	
Paramètres de correction exigés: ε , α_{rel} et n_S	
Avantages	Inconvénients
La même valeur de constante dépendante du dispositif, ε, peut être utilisée pour tous les dispositifs PV c-Si.	Non adaptée aux technologies qui ne suivent pas le modèle à une diode.
ε est indépendante de la température et de l'éclairement	

4.2 Procédure de correction 1

La première procédure repose sur le principe de superposition des courants à toutes les tensions, qui prend pour hypothèse que le courant de la diode ne dépend pas du photocourant [1]¹. Ce n'est généralement pas le cas lorsque l'éclairement cible est significativement différent de l'éclairement mesuré.

La caractéristique courant-tension mesurée dans les conditions 1 doit être corrigée par rapport aux STC ou par rapport à d'autres valeurs de température et d'éclairement choisies (conditions 2), en appliquant les formules suivantes:

¹ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

$$I_2 = I_1 + I_{SC1} \times \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right) + \alpha \times (T_2 - T_1) \quad (2)$$

$$V_2 = V_1 - R_S \times (I_2 - I_1) - \kappa \times I_2 \times (T_2 - T_1) + \beta \times (T_2 - T_1) \quad (3)$$

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, corrigé en fonction de la température et de la linéarité du dispositif de référence et de la SMM;
G_2	est l'éclairement cible pour le DUT;
T_1	est la température mesurée du DUT;
T_2	est la température cible du DUT;
I_{SC1}	est le courant de court-circuit mesuré du DUT à G_1 et T_1 ;
α et β	sont les coefficients de température pour le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert, respectivement, du DUT à l'éclairement cible pour la correction et dans la plage de températures prise en considération (par exemple $\beta = -2,3 \text{ mV/}^\circ\text{C}$);
R_S	est la résistance-série interne du DUT;
κ	est un facteur de correction de la courbe.

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

Comme le point de donnée V_{OC1} est décalé sur l'axe d'origine lors de la transposition d'un éclairement plus faible vers un éclairement plus fort, V_{OC2} transposé doit être déterminé par extrapolation linéaire près de et au-dessus de V_{OC2} (pour des courants négatifs), ou par extrapolation linéaire près de V_{OC2} s'il n'y a pas de points de tension au-dessus de V_{OC2} . Afin de réduire le plus possible les erreurs causées par l'extrapolation, la recommandation est que les courbes I - V doivent être mesurées aussi largement que possible au-delà de V_{OC} en polarisation directe.

V_{OC2} peut également être extrapolé par ajustement polynomial de la courbe I - V . Cela est recommandé en particulier si V_{OC1} mesuré est transposé vers un point de donnée I - V avec décalage de courant. Pour l'ajustement polynomial de la courbe, tous les points de données dans la plage de tensions au-dessus de V_{Pmax} doivent être pris en compte. La courbe résultante doit être plausible dans l'ensemble de la plage de tensions de V_{Pmax} à V_{OC} . Des méthodes alternatives à l'extrapolation linéaire (comme l'ajustement de la diode) sont également admises.

La méthode d'extrapolation utilisée doit être indiquée dans le rapport, accompagnée d'une indication de l'incertitude estimée de V_{OC2} transposé.

Les procédures utilisées pour déterminer les paramètres de correction I - V du DUT sont décrites aux Articles 5 à 7.

La formule (2) 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 variation de l'éclairement pendant le mesurage I - V , la formule (2) 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_{SC1} . Pour des raisons pratiques, ce facteur d'échelle est lié à l'éclairement qui correspond à I_{SC1} mesuré. Pour un éclairement non constant, la formule (2) devient la formule de transposition suivante.

$$I_2 = I_1 + \frac{G'_1}{G_{SC1}} \times I_{SC1} \times \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right) + \alpha \times (T_2 - T_1) \quad (4)$$

où G_{SC1} est la valeur de l'éclairement au moment du mesurage de I_{SC1} et G'_1 est l'éclairement mesuré au moment de l'acquisition des données des points de données I - V individuels.

La procédure de correction 1 prend pour hypothèse que les spectres normalisés qui correspondent à G_1 et G_2 sont identiques. S'ils ne le sont pas, une composante d'incertitude supplémentaire est exigée pour tenir compte de la variation de α avec le spectre en calculant les effets à partir des réponses spectrales mesurées du DUT en fonction de la température ou de l'éclairement, et de l'éclairement spectral mesuré. Les corrections de désadaptation des réponses spectrales doivent être appliquées conformément à l'IEC 60904-7.

4.3 Procédure de correction 2

Cette procédure repose sur le modèle simplifié à une diode des dispositifs PV [2]. Les formules de transposition semi-empirique contiennent six paramètres de correction de la courbe I - V , qui peuvent être déterminés par la mesure des courbes I - V dans différentes conditions de température et d'éclairement (voir Articles 5 à 7). Outre les coefficients de température relative pour le courant de court-circuit (α_{rel}) et la tension en circuit ouvert (β_{rel}), 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. De plus, la procédure de correction 2 introduit un facteur d'éclairement quadratique $f(G)$ avec les coefficients B_1 et B_2 , qui tient compte de la non-linéarité de la variation du facteur d'idéalité de la diode par rapport à l'éclairement. La procédure de correction est définie par les formules suivantes pour le courant et la tension:

$$I_2 = \frac{G_2}{G_1} I_1 \frac{(1 + \alpha_{rel} \times (T_2 - 25^\circ C))}{(1 + \alpha_{rel} \times (T_1 - 25^\circ C))} \quad (5)$$

$$V_2 = V_1 - R'_{S1} \times (I_2 - I_1) - \kappa' \times I_2 \times (T_2 - T_1) + V_{OC,STC} \times \left\{ \beta_{rel} \times [f(G_2) \times (T_2 - 25^\circ C) - f(G_1) \times (T_1 - 25^\circ C)] + \frac{1}{f(G_2)} - \frac{1}{f(G_1)} \right\} \quad (6)$$

$$f(G) = \frac{V_{OC,STC}}{V_{OC}(G)} = B_2 \times \ln^2 \left(\frac{1\,000\, Wm^{-2}}{G} \right) + B_1 \times \ln \left(\frac{1\,000\, Wm^{-2}}{G} \right) + 1 \quad (7)$$

$$R'_{S1} = R'_S + \kappa' \times (T_1 - 25^\circ C) \quad (8)$$

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, corrigé en fonction de la température et de la linéarité du dispositif de référence et de la SMM;
G_2	est l'éclairement cible pour la caractéristique I - V corrigée;
T_1	est la température mesurée du DUT;
T_2	est la température cible du DUT;
V_{OC1}	est la tension en circuit ouvert aux conditions d'essai G_1 et T_1 ;
$V_{OC,STC}$	est la tension en circuit ouvert aux conditions normales d'essai;
α_{rel} et β_{rel}	sont respectivement les coefficients de température relative pour le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert du DUT, mesurés à 1 000 W/m ² . Ils expriment la variation relative du courant de court-circuit et de la tension en circuit ouvert par rapport à leurs valeurs aux STC; les deux coefficients sont exprimés en pourcentage par unité de température et il convient de les mettre à l'échelle d'une fraction de 100 lorsqu'ils sont utilisés dans les formules (par exemple $\alpha_{rel} = 0,045 \% K^{-1} = 0,00045 K^{-1}$);
B_1	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 p-n et au nombre de cellules n_S connectées en série dans le DUT;
B_2	est le facteur de correction de l'éclairement pour la tension en circuit ouvert qui tient compte de la non-linéarité de V_{OC} par rapport à l'éclairement;
R'_S	est la résistance-série interne du DUT déterminée à 25 °C;
R'_{S1}	est la résistance-série interne du DUT à la température mesurée T_1 ;
κ'	est interprété comme le coefficient de température de la résistance-série interne R'_S .

Il convient de prêter une attention particulière au fait que les valeurs numériques de κ' et R'_S pour la procédure 2 peuvent être différentes de celles de κ et R_S pour la procédure de correction 1, la procédure de correction 2 exigeant la détermination explicite de la résistance-série à 25 °C.

Lorsqu'elle n'est pas connue, $V_{OC,STC}$ peut être déduite des mesures réelles à l'aide de l'expression suivante:

$$V_{OC,STC} = \frac{V_{OC1} \times f(G_1)}{1 + \beta_{rel} \times (T_1 - 25^\circ C) \times f^2(G_1)} \quad (9)$$

NOTE 1 Pour les modules c-Si, lorsque V_{OC} varie de façon linéaire en fonction du terme d'éclairement $\ln(1\,000/G)$, une plage type pour le facteur de correction de l'éclairement B_1 est $0,05 \pm 0,01$, tandis que B_2 vaut 0. Lorsque V_{OC} varie de façon non linéaire en fonction du terme d'éclairement $\ln(1\,000/G)$, B_1 varie généralement dans la plage de $0,04 \pm 0,01$ et B_2 dans la plage de $0,004 \pm 0,001$.

NOTE 2 Une plage type pour le coefficient de température α_{rel} des modules c-Si est de 0,03 %/°C à 0,06 %/°C par rapport à I_{SC} aux STC. Une plage type pour le coefficient de température β_{rel} des modules c-Si est de -0,35 %/°C à -0,2 %/°C par rapport à V_{OC} aux STC.

4.4 Procédure de correction 3

4.4.1 Généralités

Cette procédure ne peut être appliquée qu'aux dispositifs dont la linéarité est démontrée conformément à l'IEC 60904-10. Elle repose sur l'interpolation ou l'extrapolation linéaire de deux caractéristiques I - V mesurées [3]. Cette méthode utilise au minimum deux caractéristiques I - V et n'exige pas de paramètres de correction ou de paramètres d'ajustement. Les caractéristiques courant-tension mesurées doivent être corrigées aux STC ou à d'autres valeurs de température et d'éclairement choisies en appliquant les formules suivantes:

$$V_3 = V_1 + a \times (V_2 - V_1) \quad (10)$$

$$I_3 = I_1 + a \times (I_2 - I_1) \quad (11)$$

Il convient de choisir les couples (I_1, V_1) et (I_2, V_2) de sorte que $I_2 - I_1 = I_{\text{SC}2} - I_{\text{SC}1}$

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 ;

$I_{\text{SC}1}, I_{\text{SC}2}$ sont les courants de court-circuit mesurés du DUT aux éclairements G_1 et G_2 ;

a est une constante pour l'interpolation, qui dépend de l'éclairement et de la température comme suit:

$$G_3 = G_1 + a \times (G_2 - G_1) \quad (12)$$

$$T_3 = T_1 + a \times (T_2 - T_1) \quad (13)$$

Il convient d'appliquer cette méthode à la plupart des technologies PV. Les formules (10) à (13) 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. Cette procédure prend pour hypothèse que les spectres normalisés qui correspondent à G_1 , G_2 et G_3 sont identiques. S'ils ne le sont pas, il y aura une source d'incertitude supplémentaire dans G_3 . Mesurer G_1 et G_2 avec des corrections SMM fondées sur les réponses spectrales mesurées à T_1 et T_2 conformément à l'IEC 60904-8 permet de réduire le plus possible ces erreurs. Si les réponses spectrales sont non linéaires par rapport à l'éclairement, il convient de les mesurer aux intensités de lumière de polarisation égales à G_1 et G_2 .

4.4.2 Correction en fonction de l'éclairement et de la température à partir de deux courbes 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 (Figure 1a) et 1b)):

- 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 1a)). Déterminer les valeurs de I_{SC1} et I_{SC2} ;
- calculer α à partir de la formule (12) ou (13) en choisissant un éclairement ou une température cible. 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 que l'éclairement cible est $G_3 = 800\text{ W/m}^2$:
 alors en appliquant la formule (12) $\alpha = 0,4$
 et en appliquant la formule (13) $T_3 = 46\text{ °C}$;
- choisir un point (V_1 , I_1) de la courbe I - V 1. Déterminer un point (V_2 , I_2) de la courbe I - V 2, tel que la relation $I_2 - I_1 = I_{SC2} - I_{SC1}$ soit respectée (Figure 1b));
- calculer V_3 et I_3 en appliquant les formules (10) et (11);
- choisir plusieurs ensembles de points de données (V_1 , I_1) de la courbe 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 l'ensemble de points de données (V_3 , I_3) (ligne pointillée de la Figure 1 b)).

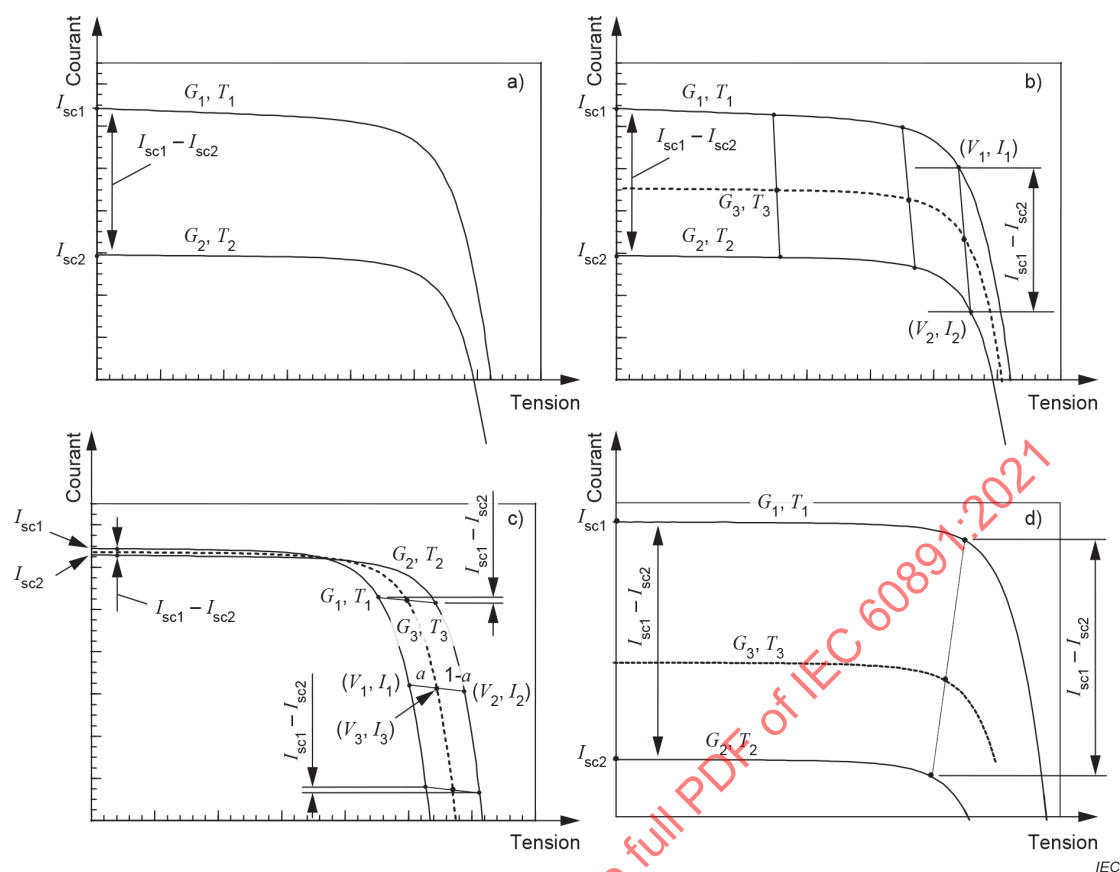
La Figure 1a) et la Figure 1b) fournissent un exemple de correction de l'éclairement ($T_1 = T_2$). La Figure 1c) fournit un exemple de correction de la température ($G_1 = G_2$). La Figure 1d) indique une correction simultanée de l'éclairement et de la température. Lorsque $0 \leq \alpha \leq 1$, la 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 peuvent ne pas être choisis indépendamment, parce qu'ils sont liés par les relations données par les formules (12) et (13) (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'objectif est d'obtenir une nouvelle courbe à $G_3 = 750\text{ W/m}^2$, α vaut 0,25 d'après la formule (12). Par conséquent, T_3 vaut 30 °C d'après la formule (13).

Lorsque $I_{SC1} \neq I_{SC2}$ et que les caractéristiques I - V corrigées autour de la tension en circuit ouvert sont exigées, il convient d'étendre les caractéristiques mesurées au-delà de V_{OC} .

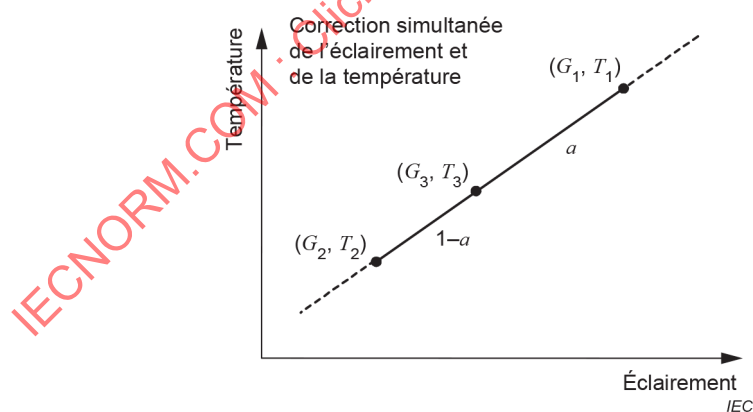
Lorsqu'il n'y a pas de points de données mesurés qui satisfont exactement à la relation $I_2 = I_1 + (I_{SC2} - I_{SC1})$, V_2 et I_2 peuvent être calculés par interpolation des points de données de la courbe I - V 2.

Cette méthode est applicable à la fois à l'interpolation ($0 \leq \alpha \leq 1$) et à l'extrapolation ($\alpha < 0$ ou $\alpha > 1$). L'interpolation donne de meilleurs résultats que l'extrapolation. Il convient de procéder à l'extrapolation avec précaution; il convient que l'utilisateur évite de procéder à une extrapolation dans les régions de la courbe I - V situées au-delà la plage connue, en particulier dans les régions de la courbe I - V où des paliers ou des déviations peuvent interférer.



Les sous-figures a) et b) représentent des corrections de l'éclairement ($T_1 = T_2$), c) représente une correction de température ($G_1 = G_2$) et d) représente une correction simultanée de l'éclairement et de la température.

Figure 1 – Exemple de correction des caractéristiques I - V par les formules (10) et (11)



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

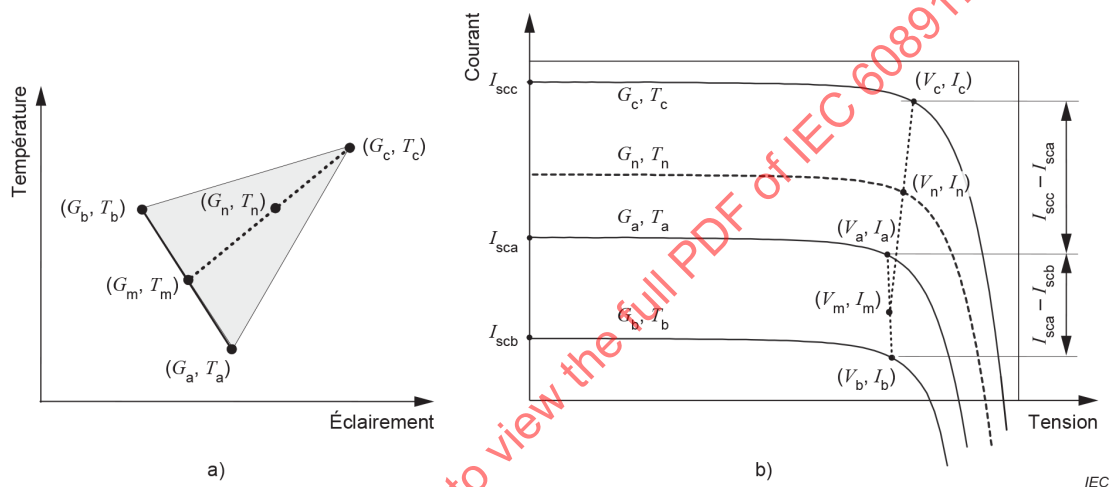
Figure 2 – Diagramme schématique de la relation entre G_3 et T_3 qui peuvent être choisis dans la correction simultanée de l'éclairement et de la température, pour un ensemble donné T_1 , G_1 , T_2 , et G_2 obtenu en appliquant les formules (12) et (13)

4.4.3 Correction en fonction d'éclairements et de températures variables à partir de trois courbes $I-V$

La correction des caractéristiques $I-V$ en fonction de plages variables d'éclairements et de températures est possible en combinant les procédures décrites en 4.4.2. Par exemple, lorsque trois caractéristiques $I-V$ mesurées aux éclairements et températures (G_a, T_a) , (G_b, T_b) et (G_c, T_c) sont disponibles comme cela est représenté à la Figure 3 a), les caractéristiques $I-V$ à n'importe quels éclairement et température (G_n, T_n) peuvent être calculées comme suit, en prenant pour hypothèse un dispositif PV linéaire.

- 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) .

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 $(1\,000 \text{ W/m}^2, 25^\circ\text{C})$, (G_m, T_m) valent $(900 \text{ W/m}^2, 20^\circ\text{C})$.



La zone ombrée de la sous-figure a) représente la plage qui peut être calculée uniquement par interpolation. La sous-figure b) fournit un exemple des caractéristiques $I-V$ qui correspondent à la sous-figure a).

Figure 3 – Diagramme schématique des procédés de correction des caractéristiques $I-V$ en fonction de plages variables d'éclairements et de températures fondés sur trois caractéristiques mesurées

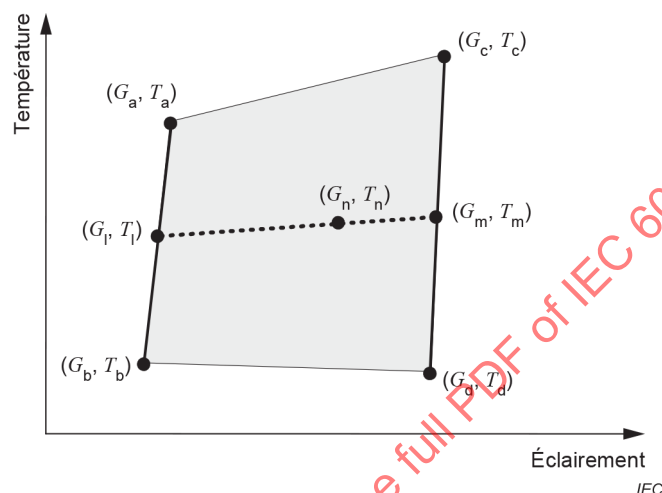
4.4.4 Correction en fonction d'éclairements et de températures variables à partir de quatre courbes $I-V$ mesurées

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 cela est représenté à la Figure 4, les caractéristiques $I-V$ à n'importe quels éclairement et température (G_n, T_n) peuvent être calculées comme suit. Ce procédé est utile pour la correction des caractéristiques sur une plage étendue d'éclairements et de températures. Même si les couples (G_l, T_l) et (G_m, T_m) utilisés pour calculer les caractéristiques à (G_n, T_n) ne sont 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 respectée.

- 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) .

EXEMPLE 2: 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 $(800 \text{ W/m}^2, 45 \text{ °C})$, (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'éclairements et de températures représentée par la zone ombrée de la Figure 4 peuvent être calculées par interpolation linéaire. Les caractéristiques dans la plage en dehors de la zone ombrée peuvent être calculées par extrapolation linéaire. Cependant, il convient de veiller à ce que l'extrapolation n'entraîne pas une précision de correction médiocre.



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

Figure 4 – Diagramme schématisant des procédés de correction des caractéristiques $I-V$ en fonction de plages variables d'éclairements et de températures fondés sur quatre caractéristiques mesurées

4.5 Procédure de correction 4

Lorsque les paramètres de performance de correction ne sont pas connus, la procédure de correction 4 fournit une méthode de correction de la courbe $I-V$ [4]. La procédure repose essentiellement sur le modèle à une diode et exige uniquement la connaissance de la bande interdite du matériau et du nombre de cellules connectées en série. La méthode a été validée sous une large plage de températures pour les technologies c-Si. Elle s'applique de façon optimale aux corrections en fonction de l'éclairement lorsque l'éclairement mesuré et l'éclairement cible se situent tous deux dans la plage comprise entre 300 W/m^2 et $1\,200 \text{ W/m}^2$. Cette procédure peut ne pas être applicable aux dispositifs qui ne suivent pas le modèle à une diode, tels que les dispositifs dégradés et les dispositifs partiellement ombragés.

R_s , utilisée pour la correction en fonction de l'éclairement dans la formule (15), peut être déterminée à partir d'une courbe $I-V$ unique, comme cela est décrit en 6.5. La valeur de ε , utilisée pour la correction en fonction de la température dans la formule (17), est fondamentalement indépendante de la température et de l'éclairement. Une valeur type de $1,232 \text{ V}$ est applicable aux dispositifs PV c-Si.

La courbe courant-tension mesurée doit être transposée aux valeurs de température et d'éclairement choisies en appliquant les formules suivantes:

$$I'_1 = I_1 + I_{SC1} \times \left(\frac{G_2}{G_1} - 1 \right) \quad (14)$$

$$V'_1 = V_1 - R_S \times (I'_1 - I_1) \quad (15)$$

$$I_2 = I'_1 + \alpha_{rel} \times I_{SC,STC} \times (T_2 - T_1) \quad (16)$$

$$V_2 = V'_1 + (T_2 - T_1) \times \frac{1}{T_1} \times (V'_1 - n_S \times \varepsilon) \quad (17)$$

où:

- I_1, V_1 sont les coordonnées des points des caractéristiques mesurées;
- I'_1, V'_1 sont les coordonnées des points des caractéristiques corrigées en fonction de l'éclairement;
- I_2, V_2 sont les coordonnées des points correspondants de la caractéristique corrigée en fonction de l'éclairement et de la température;
- G_1 est l'éclairement mesuré avec le dispositif de référence, corrigé en fonction de la température et de la linéarité du dispositif de référence et de la SMM;
- G_2 est l'éclairement cible pour le DUT;
- T_1 est la température mesurée du DUT;
- T_2 est la température cible;
- I_{SC1} est le courant de court-circuit mesuré du DUT à G_1 et T_1 ;
- $I_{SC,STC}$ est le courant de court-circuit du DUT aux STC;
- α_{rel} est le coefficient de température relative du courant du DUT mesuré à 1 000 W/m². Il exprime la variation relative du courant de court-circuit par rapport à sa valeur aux STC; ce coefficient est exprimé en pourcentage par unité de température et il convient de le mettre à l'échelle d'une fraction de 100 lorsqu'il est utilisé dans les formules (par exemple $\alpha_{rel} = 0,045 \text{ \% K}^{-1} = 0,00045 \text{ K}^{-1}$). Pour les dispositifs c-Si commerciaux, une valeur type de 0,045 % K⁻¹ peut être utilisée lorsque la valeur spécifique n'est pas disponible;
- R_S est la résistance-série interne du DUT;
- n_S est le nombre de cellules connectées en série;
- ε est une constante dépendante du dispositif exprimée en unités de volt. La constante représente le produit du facteur d'idéalité du DUT par la bande interdite du matériau photovoltaïque et divisé par la charge élémentaire de l'électron; pour les dispositifs c-Si, elle est généralement de 1,232 V. Pour les dispositifs autres que c-Si, il convient d'optimiser la valeur pour obtenir les meilleurs résultats de transposition.

Lorsqu'il n'est pas connu, $I_{SC,STC}$ peut être déduit des mesures réelles à l'aide de l'expression suivante:

$$I_{SC,STC} = \frac{1\,000 \text{ W m}^{-2}}{G_1} \times \frac{I_{SC}}{(1 + \alpha_{rel} \times (T_1 - 25 \text{ °C}))} \quad (18)$$

NOTE Une plage type pour le coefficient de température α_{rel} des modules c-Si est de 0,03 %/K à 0,06 %/K par rapport à I_{SC} aux STC.

5 Détermination des coefficients de température

5.1 Généralités

Les coefficients de température (TC, *Temperature Coefficients*) des dispositifs PV sont généralement utilisés pour les paramètres électriques suivants: courant de court-circuit (TC = α), tension en circuit ouvert (TC = β) et puissance maximale (TC = δ).

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir de mesures sous éclairement solaire naturel ou simulé. Une distinction doit être établie entre les coefficients de température (en unité respective/K ou en unité/°C) et les coefficients de température relative exprimés en pourcentage par unité de température (%/K ou %/°C).

- Les coefficients de température (α , β et δ) exprimés en unités de courant, de tension ou de puissance par unité de température (A/K, V/K et W/K ou A/°C, V/°C et W/°C, respectivement) sont valables uniquement pour le niveau d'éclairement et le spectre auxquels ils ont été mesurés. Pour les dispositifs PV linéaires en ce qui concerne l'éclairement (généralement le cas des dispositifs c-Si), les coefficients α , δ varient de façon approximativement linéaire en fonction de l'éclairement, tandis que β reste approximativement constant. Cette approximation peut être utilisée sur la plage d'éclairements de ± 30 % de ce niveau.
- Les coefficients de température relative (α_{rel} , β_{rel} et δ_{rel}) exprimés en pourcentage par unité de température (%/K ou %/°C) peuvent être déterminés en divisant la valeur calculée des coefficients de température α , β et δ par les valeurs du courant de court-circuit, de la tension en circuit ouvert et de la puissance maximale, respectivement, déterminées à partir des moindres carrés à 25 °C, correspondant à un éclairement de 1 000 W/m². Les coefficients relatifs ainsi déterminés sont valables pour l'éclairement et le spectre auxquels les mesures ont été effectuées. Pour les dispositifs PV linéaires en ce qui concerne l'éclairement (généralement le cas des dispositifs c-Si), les coefficients de température relative α_{rel} et β_{rel} sont valables sur l'ensemble de la plage d'éclairements pour laquelle le dispositif est linéaire, conformément à l'IEC 60904-10.

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

La formule (1) peut être utilisée pour déterminer l'éclairement à partir du courant de court-circuit mesuré de la cellule de référence, afin de mesurer les coefficients de température du DUT à des niveaux d'éclairement autres que 1 000 W/m². La formule (1) concerne uniquement les cellules linéaires de référence qui sont linéaires en ce qui concerne I_{SC} par rapport à l'éclairement; il convient sinon de procéder à une correction conformément à l'IEC 60904-10. Il convient de procéder à une vérification de la linéarité conformément à l'IEC 60904-10 sur le DUT si l'interpolation des coefficients de température entre les éclairements est nécessaire.

Certaines technologies, comme la technologie hétérojonction de silicium (HJT) [5] ou à couche mince, peuvent présenter un coefficient de température non linéaire en fonction de la température. Pour ces dispositifs, il est recommandé de mesurer la dépendance à la température sur une large plage de températures (par exemple de 15 °C à 75 °C) et de spécifier la plage de températures pour laquelle le coefficient de température déterminé est applicable.

5.2 Appareillage

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

- a) l'appareillage et l'instrumentation doivent être conformes aux exigences de l'IEC 60904-1 et ses sous-parties applicables;
- b) si un simulateur solaire est utilisé comme source de rayonnement, il doit être conforme au moins à la classe BBB, conformément à l'IEC 60904-9. Le simulateur solaire doit produire un éclairement spectral continu (c'est-à-dire de longueur d'onde ininterrompue) près de la bande interdite du DUT afin d'éviter les artefacts de mesure dus à une possible dérive de la limite de réponse spectrale avec la température et donc une variation de la désadaptation des réponses spectrales du DUT au cours de la séquence de mesure. L'IEC 60904-10 fournit des recommandations sur la manière de gérer les possibles variations de la désadaptation des réponses spectrales dues à la température pour les mesurages effectués avec des simulateurs solaires et sous éclairement solaire naturel;
- c) l'appareillage comprend l'équipement nécessaire pour modifier et/ou commander la température du DUT sur la plage prise en considération. Chaque équipement utilisé pour faire varier la température peut produire une non-uniformité de température différente sur le DUT et un calcul d'incertitude spécifique est donc nécessaire pour en tenir compte.

NOTE L'équipement suivant a été utilisé avec succès:

- ventilateurs qui permettent le refroidissement et le réchauffement du DUT 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 lorsqu'un éclairement solaire naturel ou simulé continu est utilisé.

Si le DUT est un module, il convient de mesurer la température du module sur au moins quatre positions. Chaque capteur doit être placé de manière à être situé directement derrière une cellule. La position des quatre capteurs doit être optimisée, de sorte que la température moyenne de tous les capteurs coïncide avec la température de jonction effective moyenne du module à l'équilibre thermique. Les déviations entre la température moyenne des capteurs et la température de jonction effective moyenne du module doivent être prises en compte dans l'analyse de l'incertitude de mesure. Il n'existe pas de position optimale générale pour les capteurs de température; celle-ci dépend plutôt du montage de mesure. Un exemple de configuration est représenté à la Figure 5, qui correspond à un montage où la non-uniformité de température est répartie verticalement, sans effets considérables autour des limites.

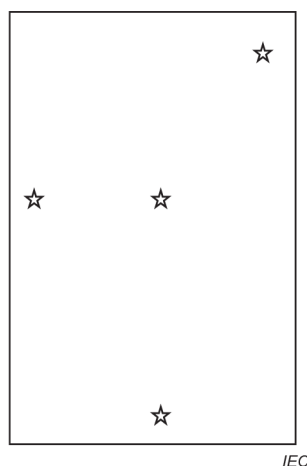


Figure 5 – Exemples de positions pour mesurer la température du module en essai derrière les cellules

- d) Pour les modules bifaces, les mesurages des coefficients de température peuvent être effectués en utilisant une méthode d'éclairement sur une face ou sur deux faces. Lorsque la méthode d'éclairement sur une face est utilisée, déterminer les coefficients de température selon la même procédure que pour les modules monofaces, mais en assurant l'absence d'éclairement sur la face arrière. La face arrière doit être couverte de telle sorte que la contribution de la face non exposée du module soit limitée ou inférieure aux niveaux spécifiés pour un "fond non éclairé" dans l'IEC TS 60904-1-2. Lorsque la méthode d'éclairement sur deux faces est utilisée, des précautions doivent être prises afin de réduire le plus possible l'obturation par les capteurs de température. Lorsque des capteurs de contact sont utilisés, il convient de placer les capteurs de préférence le long des barres omnibus des cellules solaires et de les fixer à l'aide de ruban adhésif thermique transparent.
- e) Si des capteurs de température de contact sont utilisés, une pâte thermoconductrice peut également être utilisée pour renforcer le couplage thermique entre le module et le capteur. Du ruban adhésif thermique doit également être utilisé pour isoler localement les capteurs de l'environnement.
- f) Si des capteurs de température infrarouges sont utilisés, des précautions doivent être prises afin de tenir compte de l'émissivité du verre, ou de la face arrière polymère. Les valeurs d'émissivité types sont de 0,85 à 0,90 pour le verre et de 0,90 à 0,95 pour la face arrière blanche en polymère.
- g) Si le DUT est soumis à un échauffement ou à un refroidissement, l'équilibre thermique n'est pas atteint. Dans ce cas, des précautions doivent être prises dans la mesure où les températures de la surface arrière peuvent fortement différer de la température de jonction effective. Il convient de réduire le plus possible la différence de température entre la jonction des cellules et la surface arrière en maintenant la température du DUT stable au niveau pris en considération pendant une durée suffisante. Le module V_{OC} peut servir d'indicateur pour confirmer la stabilisation de la température de jonction des cellules.

5.3 Procédure sous éclairage solaire naturel ou simulé continu

La mesure des TC sous éclairage solaire naturel doit être effectuée uniquement lorsque:

- 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 dans le plan mesuré par le dispositif de référence;
- la vitesse du vent est inférieure à 2 m s^{-1} .

Les mesurages sous éclairage solaire naturel doivent être réalisés aussi rapidement que possible afin de réduire le plus possible les effets des variations des conditions d'éclairement spectral. Si cela n'est pas possible, le calcul de la SMM conformément à l'IEC 60904-7 est exigé si le dispositif de référence n'est pas spectralement adapté au DUT. Le calcul de la SMM peut ensuite être appliqué comme correction SMM pour chacune des mesures à toutes les températures ou, si la variation SMM ne dépasse pas 1% sur l'ensemble de la plage de températures, il peut être inclus en tant que composante de l'incertitude SMM dans le calcul de l'incertitude de mesure.

- a) Si le DUT et le dispositif de référence (IEC 60904-2) sont équipés de dispositifs de réglage de la température, régler ces dispositifs au niveau souhaité.
- b) En l'absence de dispositifs de réglage de la température, exposer le DUT et le dispositif de référence à l'éclairement solaire naturel ou simulé continu et au vent, puis les masquer, jusqu'à ce que leur température soit uniforme à $\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ de la température cible. Sinon, laisser le DUT atteindre sa température d'équilibre, ou refroidir le DUT jusqu'à une température inférieure à la température d'essai exigée, puis le laisser se réchauffer naturellement. Il convient aussi de laisser le dispositif de référence se stabiliser à $\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ de sa température d'équilibre avant de procéder au mesurage.
- c) Enregistrer la caractéristique $I-V$ (ou seulement le courant de court-circuit, le cas échéant) et la température du DUT simultanément à l'enregistrement de la puissance et de la température du dispositif de référence aux températures souhaitées. Si nécessaire, effectuer les mesurages immédiatement après le retrait de l'écran. Déterminer les valeurs I_{SC} , V_{OC} et P_{max} .

- d) Ajuster la température du dispositif au moyen des dispositifs de réglage de la température ou en exposant et en masquant alternativement le DUT comme cela est exigé pour atteindre et maintenir la température souhaitée. Sinon, le DUT peut être laissé se réchauffer naturellement en utilisant périodiquement la procédure d'enregistrement des données du point c) pendant le réchauffement.
- e) S'assurer que, pendant la période d'enregistrement de chaque ensemble de données, les températures du DUT et du dispositif de référence sont stabilisées et restent constantes à $\pm 2\text{ °C}$ et que l'éclairement mesuré par le dispositif de référence reste constant à $\pm 1\%$.
- f) Si nécessaire, et seulement pour les dispositifs dont la linéarité en ce qui concerne l'éclairement est démontrée, conformément à l'IEC 60904-10, transposer les données au niveau d'éclairement pour lequel les coefficients de température doivent être consignés en utilisant l'une des procédures du présent document (voir Article 4).

Répéter les étapes c) à f). Les températures du DUT doivent être telles que l'étendue de la plage prise en considération soit supérieure ou égale à 30 °C et couvre au moins six incréments à peu près égaux. Dans la pratique de laboratoire, la plage prise en considération est souvent inférieure à 30 °C (par exemple de 20 °C à 40 °C). Dans de tels cas, les TC peuvent être déduits par interpolation d'au moins six incréments à peu près égaux dans la même plage restreinte prise en considération. L'extrapolation des TC en dehors de cette plage ne doit pas être effectuée. Si la plage de températures utilisée pour déterminer les coefficients de température est inférieure à 30 °C , celle-ci doit être consignée avec le coefficient de température; dans ce cas, les résultats peuvent ne pas être fiables en dehors de cette plage et ne doivent pas être utilisés pour satisfaire aux exigences MQT 04 de l'IEC 61215-2, ni indiqués sur la plaque signalétique ou dans les informations de la fiche technique.

Pour les technologies qui peuvent présenter un coefficient de température non linéaire en fonction de la température, envisager d'étendre la plage de température (par exemple de 15 °C à 75 °C) pour déterminer leur valeur.

5.4 Procédure qui utilise un simulateur solaire à impulsions

La procédure qui utilise un simulateur solaire à impulsions est la suivante:

- a) chauffer ou refroidir le DUT jusqu'à la température prise en considération et jusqu'à ce que sa température soit uniforme à $\pm 2\text{ °C}$. Si le dispositif est un module, il convient de vérifier l'uniformité de la température par des mesures en quatre positions (un exemple de positionnement des capteurs de température est représenté sur la Figure 5) ou qu'elle soit admise par hypothèse par les conditions de montage (par exemple, régulateur thermique en boîte fermée et mesures de répétabilité). Lorsque la température du dispositif est stabilisée, régler l'éclairement au niveau souhaité en utilisant le dispositif de référence (IEC 60904-2);
- b) enregistrer la caractéristique courant-tension et la température du DUT et déterminer les valeurs I_{SC} , V_{OC} et P_{max} ;
- c) faire varier la température du module par pas d'environ 5 °C sur la plage prise en considération d'une étendue supérieure ou égale à 30 °C et répéter les étapes a) et b).

Dans la pratique de laboratoire, la plage prise en considération est souvent inférieure à 30 °C (par exemple de 20 °C à 40 °C). Dans de tels cas, les TC peuvent être déduits par interpolation d'au moins six incréments à peu près égaux dans la même plage restreinte prise en considération. L'extrapolation des TC en dehors de cette plage ne doit pas être effectuée. Si la plage de températures utilisée pour déterminer les coefficients de température est inférieure à 30 °C , celle-ci doit être consignée avec le coefficient de température; dans ce cas, les résultats peuvent ne pas être fiables en dehors de cette plage et ne doivent pas être utilisés pour satisfaire aux exigences MQT 04 de l'IEC 61215-2, ni indiqués sur la plaque signalétique ou dans les informations de la fiche technique.

Pour les technologies qui peuvent présenter un coefficient de température non linéaire en fonction de la température, envisager d'étendre la plage de température (par exemple de 15 °C à 75 °C) pour déterminer leur valeur.