IEC 60904-10

Edition 3.0 2020-09

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Photovoltaic devices –
Part 10: Methods of linear dependence and linearity measurements

Dispositifs photovoltaïques –
Partie 10: Méthodes de mesure de la dépendance linéaire et de la linéarité

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 27.160

ISBN 978-2-8322-8802-3

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.

® Registered trademark of the International Electrotechnical Commission
Marque déposée de la Commission Electrotechnique Internationale

CONTENTS

FOREWORD 3
INTRODUCTION 5
1 Scope 7
2 Normative references 8
3 Terms and definitions 8
4 Device selection 9
5 Apparatus 10
5.1 General requirements common to all procedures 10
5.2 Apparatus for measurement of all linear dependences under natural sunlight or with a solar simulator 11
5.3 Apparatus for measurement of all linear dependences of short-circuit current by differential spectral responsivity measurements 12
5.4 Apparatus for linearity measurement of short-circuit current by two-lamp method 12
5.5 Apparatus for linearity measurement of short-circuit current by N-lamp method 12
6 Procedures to measure linearity and other linear dependences under natural sunlight or with a solar simulator 12
6.1 Additional general requirements for natural sunlight 12
6.2 Mounting under natural sunlight 13
6.3 Mounting with a solar simulator 13
6.4 Linear dependence measurements versus irradiance 13
6.5 Linear dependence measurements versus temperature 16
7 Procedures to measure linearity and other linear dependence of short-circuit current from differential spectral responsivity 17
7.1 Linearity measurements 17
7.2 Linear dependence measurements of short-circuit current versus temperature 18
8 Procedure for short-circuit current linearity measurement by the two-lamp or the N-lamp methods 18
8.1 Background 18
8.2 Measurement procedure by the two-lamp method 19
8.3 Measurement procedure by the N-lamp method 20
9 Calculation of linear dependence and linearity 21
9.1 General considerations 21
9.2 Measurement uncertainty evaluation 21
9.3 Determination of deviations from a generic linear dependence 22
9.3.1 Generic case 22
9.4 Determination of the short-circuit current non-linearity versus irradiance 22
9.5 Determination of the short-circuit current non-linearity versus irradiance using the two-lamp method 23
9.6 Determination of the short-circuit current non-linearity versus irradiance using the N-lamp method 24
9.7 Requirements for maximum deviations from the ideal linear function 25
10 Report 26
Bibliography 27

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

_____

PHOTOVOLTAIC DEVICES –

Part 10: Methods of linear dependence and linearity measurements

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 60904-10 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:

a) Modification of title.
b) Inclusion of an Introduction explanatory of the changes and the reasoning behind them.
c) Inclusion of a new Clause Terms and Definitions (Clause 3), with distinction between generic linear dependence and linear dependence of short-circuit current versus irradiance (linearity).
d) Explicit definition of equivalent sample (Clause 4).

e) Technical revision of the apparatus (Clause 5), of the measurement procedures (Clause 6 to Clause 8) and of the data analysis (Clause 9), with separation of the data analysis for a generic linear dependence from the data analysis specific to linearity (i.e. short-circuit current dependence on irradiance) assessment. Additionally, inclusion of impact of spectral effects on both linearity and linear dependence assessment.

f) Introduction of specific data analysis for two-lamp method, making it fully quantitative. Addition of extended version called N-lamp method.

g) Modification of the linearity assessment criterion with inclusion of a formula that can be used to correct the irradiance reading of a PV reference device for non-linearity of its short-circuit current versus irradiance. A linearity factor is specifically newly defined for this purpose.

h) Revision of the requirements for the report (Clause 10) in order to improve clearness about what information is always necessary and what is dependent on the procedure actually followed to measure the linear dependence, including the type of dependence measured (generic or linearity).

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

FDIS	Report on voting
82/1759/FDIS	82/1784/RVD

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

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

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

The committee has decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under "http://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.

INTRODUCTION

IEC 60904-10 is the reference document for several IEC standards when the linear dependence of one or more electrical parameters of a photovoltaic (PV) device has to be assessed in relation to a test parameter. Test parameters are usually either the device temperature or the irradiance. In order to better reflect the different cases to be handled and the peculiarities of the linear dependence of the short-circuit current of a PV device on the irradiance, IEC 60904-10 has been extensively revised.

To avoid confusion, in this document the word “linearity” will be used only for the dependence of the short-circuit current (I_{SC}) on the irradiance (G), while all the other dependences will be referred to as generic linear dependence (when not explicitly described).

Three major technical changes have been included in this third edition compared to the second edition.

The first main change is the split of the data analysis for the linearity from the one to be used for a generic linear dependence (like for example $V_{OC}(T)$, which gives the open-circuit voltage as function of temperature). The latter keeps the same approach already included in the previous edition, i.e. the least squares fit method, with addition of the recommended use of the measurement uncertainties within the data analysis. The former applies the proportionality function that describes the dependence between I_{SC} and G for an ideal linear PV device. It also makes use of the calibration value of the I_{SC} to establish a reference point towards which the non-linearity is explicitly referred. Also, the impact of test spectra and spectral mismatch on both linearity and generic linear dependence is now considered.

Following this new approach for the linearity assessment, the second major change involves a modification of the definition of non-linearity (referred now explicitly to the calibration value) and the inclusion of a formula to correct the measured irradiance for the non-linearity of the PV device used to measure it. Such a PV device is usually a reference device. However, IEC 61853-1 explicitly considers the case of using the short-circuit current of the PV device itself to measure the irradiance when its linearity has been proved (Note in IEC 61853-1:2011: 8.1). A correction of the actual irradiance measurement to account for deviations of I_{SC} from linearity is therefore relevant when the irradiance is measured by a reference device as well as by the device under test itself. In principle, this can be extended to non-linear devices as well, provided that the non-linearity information is stated in addition to the calibration value of the PV device itself. The irradiance correction for non-linearity is made in this document by means of a multiplication factor, resembling the same approach used in the IEC 60904-7 for the spectral mismatch correction. This formula has been introduced in order to address the explicit reference of the other standards to IEC 60904-10 in terms of handling non-linear devices. However, this formula can be useful to correct deviations from linearity within the acceptance limits even in the case of reference devices classified as linear according to the previous edition of this standard.

The third main change is the revision of the two-lamp method approach. This is achieved first by the introduction of a specific data analysis for the two-lamp method, which was a simple pass/fail test in the second edition and gains now the status of a quantitative method. This change is crucial in order to have results, obtained by any procedure for linearity measurements allowed by this standard, to be fully comparable to each other within their stated measurement uncertainties. Thereby, the irradiance correction formula is also applicable to the results from the two-lamp method. With these additions, the two-lamp method becomes the simplest quantitative method to assess the linearity (i.e. dependence of short-circuit current I_{SC} on irradiance) of PV devices, not even requiring a reference device when devices under test are single PV cells. An extended version called N-lamp method has been included, which overcomes some limitations of the two-lamp method.

A secondary change, which was introduced to improve locating the necessary procedure within the document, is the distinction between the cases of irradiance and of temperature as test parameter, i.e. the parameter being varied and on which the dependence is checked.

Furthermore, when the linear dependence of a device parameter (e.g. I_{SC}) has to be assessed towards more than a single test parameter, intermediate steps applying the procedures described by this standard can be followed if the device under test is stable according to the criterion given in IEC 61215-1 and its relevant part. For example, the measurement of a power matrix as defined by IEC 61853-1 requires the measurement of the maximum power as a function of both irradiance and temperature. In this case, the most convenient way of performing the power matrix measurement is usually to vary one parameter (e.g. the temperature) while keeping the other (e.g. the irradiance) steady, and then to repeat this procedure at different levels of the second parameter until the full matrix is completed. In this view, the second parameter would be considered as the fixed one, and the first one would be the test parameter towards which the linear dependence is evaluated according to this standard. However, once the full power matrix has been measured, the subsequent data analysis of the maximum power (as well as of any other relevant electrical parameter) of the device under test can be done by considering either parameter as the test parameter as long as the other one is kept constant. Therefore, a linear dependence can be assessed with respect to one or the other parameter, independent of the measurement procedure used to obtain the data.

PHOTOVOLTAIC DEVICES –

Part 10: Methods of linear dependence and linearity measurements

1 Scope

This part of IEC 60904 describes the procedures used to measure the dependence of any electrical parameter (Y) of a photovoltaic (PV) device with respect to a test parameter (X) and to determine the degree at which this dependence is close to an ideal linear (straight-line) function. It also gives guidance on how to consider deviations from the ideal linear dependence and in general on how to deal with non-linearities of PV device electrical parameters. Typical device parameters are the short-circuit current I_{SC}, the open-circuit voltage V_{OC} and the maximum power P_{max}. Typical test parameters are the temperature T and the irradiance G. However, the same principles described in this document can be applied to any other test parameter with proper adjustment of the procedure used to vary the parameter itself.

Performance evaluations of PV modules and systems, as well as performance translations from one set of temperature and irradiance to another, frequently rely on the use of linear equations (see for example IEC 60891, IEC 61853-1, IEC 61829 and IEC 61724-1). This document lays down the requirements for linear dependence test methods, data analysis and acceptance limits of results to ensure that these linear equations will give satisfactory results. Such requirements prescribe also the range of the temperature and irradiance over which the linear equations may be used. This document gives also a procedure on how to correct for deviations of the short-circuit current I_{SC} from the ideal linear dependence on irradiance (linearity) for PV devices, regardless of whether they are classified linear or non-linear according to the limits set in 9.7. The impact of spectral irradiance distribution and spectral mismatch is considered for measurements using solar simulators as well as under natural sunlight.

The measurement methods described herein apply to all PV devices, with some caution to be used for multi-junction PV devices, and are intended to be carried out on a device, or in some cases on an equivalent device of identical technology, that is stable according to the criteria set in the relevant part of IEC 61215. These measurements are meant to be performed prior to all measurements and correction procedures that require a linear device or that prescribe restrictions for non-linear devices.

The main methodology used in this document is based on a fitting procedure in which a linear (straight-line) function is fitted to a set of measured data points $\{X_i, Y_i\}$. The linear function uses a least-squares fit calculation routine, which in the most advanced analysis also accounts for the expanded combined uncertainty (k=2) of the measurements. The linear function crosses the origin in the case of short-circuit current data versus irradiance. The deviation of the measured data from the ideal linear function is also calculated and limits are prescribed for the permissible percentage deviation.

Procedures to determine the deviation of the $Y(X)$ dependence from the linear (straight-line) function are described in Clause 6 (measurements under natural sunlight and with solar simulator), Clause 7 (differential spectral responsivity measurements) and Clause 8 (measurements via two-lamp and N-lamp method). Data analyses to determine the deviations from the linear function are given in Clause 9.

A device is considered linear for the specific measured dependence $Y(X)$, when it meets the requirements of 9.7.

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

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

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

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 photovoltaic reference devices*

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

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

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

IEC 60904-8-1, *Photovoltaic devices – Part 8-1: Measurement of spectral responsivity of multijunction photovoltaic (PV) devices*

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

IEC 61215 (all parts), *Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval*

IEC 61724-1, *Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring*

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

ISO TS 28037, *Determination and use of straight-line calibration functions*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS 30
INTRODUCTION 32
1 Domaine d'application 34
2 Références normatives 35
3 Termes et définitions 35
4 Sélection du dispositif 36
5 Équipement 37
5.1 Exigences générales communes à toutes les procédures 37
5.2 Équipement de mesure de toutes les dépendances linéaires sous éclairage solaire naturel ou avec un simulateur solaire 38
5.3 Équipement de mesure de toutes les dépendances linéaires du courant de court-circuit au moyen des mesurages de la sensibilité spectrale différentielle 39
5.4 Équipement de mesure de la linéarité du courant de court-circuit à l'aide de la méthode à deux lampes 39
5.5 Équipement de mesure de la linéarité du courant de court-circuit à l'aide de la méthode à N lampes 39
6 Procédures destinées à mesurer la linéarité et d'autres dépendances linéaires sous éclairage solaire naturel ou avec un simulateur solaire 40
6.1 Exigences générales supplémentaires relatives à l'éclairage solaire naturel 40
6.2 Montage sous éclairage solaire naturel 40
6.3 Montage avec un simulateur solaire 40
6.4 Mesurages de la dépendance linéaire en fonction de l'éclairement 41
6.5 Mesurages de la dépendance linéaire en fonction de la température 44
7 Procédures de mesure de la linéarité et autre dépendance linéaire du courant de court-circuit par rapport à la sensibilité spectrale différentielle 45
7.1 Mesurages de linéarité 45
7.2 Mesurages de la dépendance linéaire du courant de court-circuit en fonction de la température 46
8 Procédure de mesure de la linéarité du courant de court-circuit à partir des méthodes à deux lampes ou à N lampes 47
8.1 Contexte 47
8.2 Procédure de mesure à partir de la méthode à deux lampes 47
8.3 Procédure de mesure à partir de la méthode à N lampes 48
9 Calcul de la dépendance linéaire et de la linéarité 49
9.1 Considérations générales 49
9.2 Évaluation de l'incertitude de mesure 50
9.3 Détermination des écarts par rapport à une dépendance linéaire générique 50
9.3.1 Cas générique 50
9.4 Détermination de la non-linéarité du courant de court-circuit en fonction de l'éclairement 50
9.5 Détermination de la non-linéarité du courant de court-circuit en fonction de l'éclairement avec la méthode à deux lampes 51
9.6 Détermination de la non-linéarité du courant de court-circuit en fonction de l'éclairement avec la méthode à N lampes 53
9.7 Exigences relatives aux écarts maximaux par rapport à la fonction linéaire idéale 54

10 Rapport 54
Bibliographie 56

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

_____

DISPOSITIFS PHOTOVOLTAÏQUES –

Partie 10: Méthodes de mesure de la dépendance linéaire et de la linéarité

AVANT-PROPOS

1) La Commission Électrotechnique 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. À 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 60904-10 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:

a) Modification du titre.
b) Ajout d'une Introduction qui explique les modifications apportées et les raisons de ces modifications.

c) Ajout d'un nouvel Article Termes et définitions (Article 3) qui fait la distinction entre la dépendance linéaire générique et la dépendance linéaire de courant de court-circuit en fonction de l'éclairement (linéarité).

d) Définition explicite de l'échantillon équivalent (Article 4).

e) Révision technique de l'équipement (Article 5), des procédures de mesure (Article 6 à Article 8) et de l'analyse des données (Article 9), avec distinction entre analyse des données relative à une dépendance linéaire générique et analyse des données spécifique à l'évaluation de la linéarité (c'est-à-dire la dépendance du courant de court-circuit sur l'éclairement). De plus, ajout de l'impact des effets spectraux sur l'évaluation de la linéarité et de la dépendance linéaire.

f) Introduction d'une analyse de données spécifique à la méthode à deux lampes, rendant celle-ci entièrement quantitative. Ajout d'une version étendue appelée méthode à N lampes.

g) Modification du critère d'évaluation de la linéarité avec ajout d'une formule qui peut être appliquée pour corriger le relevé d'éclairement d'un dispositif PV de référence pour la non-linéarité de son courant de court-circuit en fonction de l'éclairement. Un facteur de linéarité spécifique est nouvellement défini dans ce but.

h) Révision des exigences relatives au rapport (Article 10) afin de préciser les informations qui sont toujours nécessaires et ce qui dépend de la procédure réellement suivie pour mesurer la dépendance linéaire, y compris le type de dépendance mesuré (générique ou linéarité).

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

FDIS	Rapport de vote
82/1759/FDIS	82/1784/RVD

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

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

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

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 "http://webstore.iec.ch" dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

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

INTRODUCTION

L'IEC 60904-10 constitue le document de référence pour plusieurs normes de l'IEC lorsque la dépendance linéaire d'un ou plusieurs paramètres électriques d'un dispositif photovoltaïque (PV – *photovoltaic*) doit être évaluée par rapport à un paramètre d'essai. Les paramètres d'essai sont généralement la température du dispositif ou l'éclairement. L'IEC 60904-10 a été largement révisée afin de mieux refléter les différents cas à traiter et les spécificités de la dépendance linéaire du courant de court-circuit d'un dispositif PV sur l'éclairement.

Pour éviter toute confusion, dans le présent document, le mot "linéarité" est utilisé uniquement pour la dépendance du courant de court-circuit (I_{SC}) sur l'éclairement (G), tandis que toutes les autres dépendances sont appelées "dépendance linéaire générique", quand elles ne sont pas décrites de manière explicite.

Trois modifications techniques de premier ordre ont été incluses dans cette troisième édition par rapport à l'édition précédente.

La première modification majeure est la distinction entre l'analyse des données relative à la linéarité et l'analyse des données relative à une dépendance linéaire générique (par exemple, $V_{OC}(T)$, qui donne la tension en circuit ouvert en fonction de la température). Cette dernière conserve une approche identique à celle incluse dans l'édition précédente, à savoir la méthode des moindres carrés et recommande en plus d'appliquer les incertitudes de mesure dans l'analyse des données. L'ancienne version applique la fonction de proportionnalité qui décrit la dépendance entre I_{SC} et G pour un dispositif PV linéaire idéal. Elle applique également la valeur d'étalonnage de I_{SC} pour établir un point de référence vers lequel la non-linéarité se réfère explicitement. En outre, l'impact des spectres d'essai et de la désadaptation spectrale (SMM – *spectral mismatch*) à la fois sur la linéarité et sur la dépendance linéaire générique est désormais pris en considération.

Suivant cette nouvelle approche relative à l'évaluation de la linéarité, la deuxième modification majeure implique une modification de la définition du terme "non-linéarité" (qui se réfère désormais de façon explicite à la valeur d'étalonnage) et l'ajout d'une formule afin de corriger l'éclairement mesuré pour la non-linéarité du dispositif PV utilisé pour mesurer l'éclairement. Ce dispositif PV est généralement un dispositif de référence. Néanmoins, l'IEC 61853-1 envisage explicitement l'utilisation d'un courant de court-circuit du dispositif PV lui-même pour mesurer l'éclairement quand sa linéarité a été prouvée (voir la Note en 8.1 de l'IEC 61853-1:2011). Une correction du mesurage de l'éclairement réel pour expliquer les écarts de I_{SC} de la linéarité est ainsi pertinente quand l'éclairement est mesuré par un dispositif de référence ainsi que par le dispositif en essai lui-même. En principe, ceci peut être étendu à des dispositifs non linéaires, à condition que les informations relatives à la non-linéarité soient indiquées en complément de la valeur d'étalonnage du dispositif PV lui-même. La correction de l'éclairement relative à la non-linéarité est effectuée dans le présent document au moyen d'un facteur de multiplication, selon une approche similaire à l'IEC 60904-7 relative à la correction de la désadaptation spectrale. Cette formule est présentée afin de traiter la référence explicite des autres normes à l'IEC 60904-10 en matière de traitement des dispositifs non linéaires. Toutefois, cette formule peut être utile pour corriger des écarts de linéarité dans les limites d'acceptation, y compris dans le cas de dispositifs de référence classés comme linéaires conformément à l'édition précédente de la présente norme.

La troisième modification majeure est la révision de l'approche avec la méthode à deux lampes, tout d'abord par l'introduction d'une analyse des données spécifique à cette méthode. Celle-ci consistait en un simple essai succès/échec dans la deuxième édition et acquiert désormais le statut de méthode quantitative. Cette modification est cruciale afin que les résultats obtenus avec n'importe quelle procédure de mesure de linéarité admise par la présente norme soient totalement comparables les uns aux autres dans les incertitudes de mesure indiquées. Ainsi, la formule de correction d'éclairement est également applicable aux résultats obtenus avec la méthode à deux lampes. Avec ces ajouts, la méthode à deux lampes devient la méthode quantitative la plus simple pour évaluer la linéarité (c'est-à-dire la dépendance du courant de

court-circuit I_{SC} sur l'éclairement) des dispositifs PV. Cette méthode n'exige pas de dispositif de référence lorsque les dispositifs en essai sont des cellules photovoltaïques uniques. Une version étendue appelée méthode à N lampe, qui contourne certaines limites de la méthode à deux lampes, a été incluse.

Une modification d'ordre secondaire apportée afin de mieux localiser la procédure nécessaire dans le document consiste en la distinction entre les cas d'éclairement et de température en tant que paramètres d'essai, c'est-à-dire les paramètres soumis à modification et à partir desquels la dépendance est vérifiée.

En outre, lorsque la dépendance linéaire d'un paramètre du dispositif (par exemple, I_{SC}) doit être évaluée vers davantage qu'un paramètre d'essai unique, des étapes intermédiaires qui appliquent les procédures décrites par la présente norme peuvent être suivies si le dispositif en essai est stable, conformément au critère présenté dans l'IEC 61215-1 et sa partie applicable. Par exemple, le mesurage de la matrice de puissance tel que cela est défini par l'IEC 61853-1 exige le mesurage de la puissance maximale en fonction de l'éclairement et de la température. Dans ce cas, la façon la plus pratique d'effectuer le mesurage de la matrice de puissance est généralement de modifier un paramètre (par exemple, la température) tout en conservant l'autre stable (par exemple, l'éclairement), puis de répéter cette procédure à différents niveaux du second paramètre jusqu'à ce que la matrice complète soit achevée. Dans ce but, le second paramètre est considéré comme le paramètre fixe et le premier est le paramètre d'essai vers lequel la dépendance linéaire est évaluée conformément à la présente norme. Néanmoins, dès lors que la matrice de puissance a été complètement mesurée, l'analyse ultérieure des données de puissance maximale (ainsi que de tout autre paramètre électrique pertinent) du dispositif en essai peut être effectuée en considérant l'un ou l'autre des paramètres comme paramètre de l'essai tant que l'autre reste constant. C'est pourquoi une dépendance linéaire peut être évaluée par rapport à l'un ou l'autre paramètre, indépendamment de la procédure de mesure utilisée pour obtenir les données.

DISPOSITIFS PHOTOVOLTAÏQUES –

Partie 10: Méthodes de mesure de la dépendance linéaire et de la linéarité

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60904 décrit les procédures utilisées pour mesurer la dépendance de tout paramètre électrique (Y) d'un dispositif photovoltaïque (PV) par rapport à un paramètre d'essai (X) et pour déterminer le degré de proximité de la dépendance par rapport à une fonction linéaire idéale (ligne droite). Elle fournit également des recommandations relatives à la prise en considération des écarts par rapport à la dépendance linéaire idéale et, de façon générale, sur le traitement des non-linéarités des paramètres électriques d'un dispositif PV. Les paramètres types d'un dispositif sont le courant de court-circuit I_{SC}, la tension en circuit ouvert V_{OC} et la puissance maximale P_{max}. Les paramètres d'essai types sont la température T et l'éclairement G. Néanmoins, les mêmes principes décrits dans le présent document peuvent être appliqués à tout autre paramètre d'essai avec un ajustement approprié de la procédure utilisée pour modifier le paramètre lui-même.

L'évaluation de la performance des modules et des systèmes photovoltaïques ainsi que la transposition des performances d'un ensemble de conditions de température et d'éclairement à un autre, reposent souvent sur l'application d'équations linéaires (voir par exemple l'IEC 60891, l'IEC 61853-1, l'IEC 61829 et l'IEC 61724-1). Le présent document établit les exigences relatives aux méthodes d'essai de la dépendance linéaire, à l'analyse des données et aux limites d'acceptation afin d'assurer que ces équations linéaires produisent des résultats concluants. Ces exigences indiquent également la plage de températures et d'éclairement sur laquelle les équations linéaires peuvent être appliquées. Le présent document présente également une procédure qui indique comment corriger les écarts de courant de court-circuit I_{SC} par rapport à la dépendance linéaire idéale de l'éclairement (linéarité) pour les dispositifs PV, sans se soucier qu'ils soient classés comme linéaires ou non linéaires conformément aux limites énoncées en 9.7. L'impact de la distribution spectrale de l'éclairement et de la désadaptation spectrale est pris en considération pour les mesurages qui utilisent aussi bien les simulateurs solaires que l'éclairage solaire naturel.

Les méthodes de mesure décrites ici s'appliquent à tous les dispositifs PV, à utiliser avec prudence pour des dispositifs PV multijonctions et sont destinées à être appliquées à un dispositif ou, dans certains cas, à un dispositif équivalent de technologie identique, qui est stable conformément aux critères énoncés dans la partie applicable de l'IEC 61215. Ces mesurages sont destinés à être effectués avant tout mesurage et toute procédure de correction qui exige un dispositif linéaire ou qui prescrit des restrictions pour les dispositifs non linéaires.

La principale méthodologie utilisée dans le présent document repose sur une procédure d'ajustement dans laquelle une fonction linéaire (ligne droite) est adaptée à un ensemble de points de données mesurés $\{X_i, Y_i\}$. La fonction linéaire utilise un sous-programme de calcul des moindres carrés qui, dans l'analyse la plus avancée, est également comptabilisé dans l'incertitude combinée étendue (k=2) des mesurages. La fonction linéaire croise l'origine dans le cas de données de courant de court-circuit en fonction de l'éclairement. L'écart des données mesurées par rapport à la fonction linéaire idéale est également calculé et des limites relatives à l'écart de pourcentage admissible sont prescrites.

Des procédures pour déterminer l'écart de la dépendance $Y(X)$ par rapport à la fonction linéaire (ligne droite) sont décrites dans l'Article 6 (mesurages sous éclairage solaire naturel et avec simulateur solaire), l'Article 7 (mesurages de la sensibilité spectrale différentielle) et l'Article 8 (mesurages au moyen des méthodes à deux lampes et à N lampes). Des analyses des données destinées à déterminer les écarts par rapport à la fonction linéaire sont données dans l'Article 9.

Un dispositif est considéré comme linéaire pour la dépendance mesurée spécifique $Y(X)$ lorsqu'il satisfait aux exigences de 9.7.

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte 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 60891, *Dispositifs photovoltaïques – Procédures pour les corrections en fonction de la température et de l'éclairement à appliquer aux caractéristiques I-V mesurées*

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

IEC 60904-1-1, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 1-1: Mesurage des caractéristiques courant-tension des dispositifs photovoltaïques (PV) multijonctions*

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

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

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

IEC 60904-8-1, *Dispositifs photovoltaïques – Partie 8-1: Mesurage de la sensibilité spectrale des dispositifs photovoltaïques (PV) multijonctions*

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

IEC 61215 (toutes les parties), *Modules photovoltaïques (PV) pour applications terrestres – Qualification de la conception et homologation*

IEC 61724-1, *Performances des systèmes photovoltaïques – Partie 1: Surveillance*

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

ISO TS 28037, *Détermination et utilisation des fonctions d'étalonnage linéaire*