

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**High-voltage switchgear and controlgear –
Part 207: Seismic qualification for gas-insulated switchgear assemblies, metal
enclosed and solid-insulation enclosed switchgear for rated voltages above 1 kV**

**Appareillage à haute tension –
Partie 207: Qualification sismique des ensembles d'appareillages à isolation
gazeuse et des appareillages sous enveloppe métallique et sous enveloppe
isolante solide pour des tensions assignées supérieures à 1 kV**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2023 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

IEC Secretariat
3, rue de Varembé
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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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 Products & Services Portal - products.iec.ch

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

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 Products & Services Portal - products.iec.ch

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

Electropedia - www.electropedia.org

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**High-voltage switchgear and controlgear –
Part 207: Seismic qualification for gas-insulated switchgear assemblies, metal
enclosed and solid-insulation enclosed switchgear for rated voltages above 1 kV**

**Appareillage à haute tension –
Partie 207: Qualification sismique des ensembles d'appareillages à isolation
gazeuse et des appareillages sous enveloppe métallique et sous enveloppe
isolante solide pour des tensions assignées supérieures à 1 kV**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.130.10

ISBN 978-2-8322-7776-8

**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	7
4 Seismic qualification requirements.....	11
4.1 Seismic qualification objective	11
4.2 Qualification levels.....	11
4.3 Selection of seismic qualification level	14
4.3.1 General	14
4.3.2 Estimation of site-specific seismic hazard level.....	14
4.3.3 Effect of building response and elevation.....	15
4.3.4 Soil-structure interaction.....	15
5 Qualification by test.....	15
5.1 General.....	15
5.2 Mounting.....	16
5.3 Test parameters.....	16
5.3.1 Measurements	16
5.3.2 Frequency range	16
5.3.3 Parameters for resonant frequency search	17
5.3.4 Parameters for time history test (seismic load test).....	17
5.4 Testing procedure.....	17
5.4.1 General	17
5.4.2 Inspection and functional checks	17
5.4.3 Resonant frequency search	18
5.4.4 Time history test (seismic load test).....	18
6 Qualification by combined test and numerical analysis	19
6.1 General.....	19
6.2 Dynamic and functional data	19
6.3 Numerical analysis.....	20
6.3.1 General	20
6.3.2 Analytical earthquake component combination techniques.....	20
6.3.3 Static analysis for rigid equipment	21
6.3.4 Static coefficient analysis	21
6.3.5 Dynamic response spectrum analysis	21
6.3.6 Time history analysis	22
6.4 Analysis by experience or similarity	22
7 Evaluation of the seismic qualification	23
7.1 Combination of loads and stresses.....	23
7.2 Validity criteria for the seismic waveform and the seismic test	24
7.3 Structural and functional evaluation of the test results	24
7.3.1 Common criteria for HV switchgear and MV switchgear	24
7.3.2 HV switchgear	24
7.3.3 MV switchgear.....	25
7.4 Allowable stresses	25
7.5 Criteria of model acceptance.....	25
7.6 Acceptance criteria of the analysis results by similarity	25

8	Documentation	26
8.1	Test report	26
8.2	Analysis report	26
8.3	Analysis report when analysis is performed by similarity	28
Annex A	(normative) Characterisation of the test-set	29
A.1	Low-level excitation	29
A.1.1	General	29
A.1.2	Test method	29
A.1.3	Analysis	29
A.2	Determination of the damping ratio by testing	29
A.2.1	General	29
A.2.2	Determination of the damping ratio by free oscillation test	29
A.2.3	Determination of the damping ratio by measuring the half-power bandwidth	31
A.2.4	Determination of the damping ratio by curve fitting to frequency response methods	31
A.2.5	Determination of the damping ratio by time domain curve fitting	31
Annex B	(informative) Criteria for seismic adequacy of enclosed switchgear and controlgear assemblies	32
B.1	General	32
B.2	Foundations	32
B.3	Methods for anchoring equipment to foundations	32
B.4	Interconnection to adjacent equipment	33
B.5	Use of bracings on switchgear structure	33
Annex C	(informative) Qualification process flowchart	34
Bibliography		35
Figure 1	– Required response spectrum (RRS) for qualification level AG2.5 (ZPA = 0,25 g)	13
Figure 2	– Required response spectrum (RRS) for qualification level AG5 (ZPA = 0,50 g)	13
Figure 3	– Required response spectrum (RRS) for qualification level AG10 (ZPA = 1,00 g)	14
Figure A.1	– Monogram for the determination of equivalent damping ratio	30
Figure C.1	– Qualification process flowchart	34
Table 1	– Seismic qualification levels for switchgear and controlgear assemblies – Horizontal severities	11
Table 2	– Comparison of qualification levels between various standards	12
Table 3	– Summary of maximum stresses, loads etc.	27
Table 4	– Example of summary of maximum stresses, loads etc.	28

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR AND CONTROLGEAR –

**Part 207: Seismic qualification for gas-insulated switchgear assemblies,
metal-enclosed and solid-insulation enclosed switchgear
for rated voltages above 1 kV**

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) IEC draws attention to the possibility that the implementation of this document may involve the use of (a) patent(s). IEC takes no position concerning the evidence, validity or applicability of any claimed patent rights in respect thereof. As of the date of publication of this document, IEC had not received notice of (a) patent(s), which may be required to implement this document. However, implementers are cautioned that this may not represent the latest information, which may be obtained from the patent database available at <https://patents.iec.ch>. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

IEC 62271-207 has been prepared by subcommittee 17C: Assemblies, of IEC technical committee 17: High-voltage switchgear and controlgear. It is an International Standard.

This third edition cancels and replaces the second edition published in 2012. This edition constitutes a technical revision. It also cancels and replaces, through merging, the first edition of IEC TS 62271-210 published in 2013.

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

- a) modification of the minimum voltage rating from 52 kV to above 1 kV in order to include medium voltage equipment previously being within IEC TS 62271-210 scope;

- b) further harmonisation of qualification procedures with the revised IEEE Std 693-2018 [1]¹, Annex A and Annex P, including
- 1) matching this document's required response spectra with IEEE Std 693-2018 performance level spectra and IEC TS 62271-210 spectra,
 - 2) addition of a step-by-step procedure assisting the user of this document to select an appropriate seismic qualification level combining seismic integrity with cost-effective design,
 - 3) addition of analytical earthquake component combination techniques, and
 - 4) reference to publicly available accelerograms specially developed to match the IEEE Std 693-2018 spectra for testing and analysis purposes, since this document and IEC TS 62271-210 spectra are identical in shape with IEEE Std 693 spectra.
- c) various enhancements of test procedures;
- d) addition of minimum contents for seismic qualification reports;
- e) scope extended to cover DC GIS including and above 100 kV.

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

Draft	Report on voting
17C/902/FDIS	17C/916/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/publications.

A list of all the parts in the IEC 62271 series, under the general title *High-voltage switchgear and controlgear*, 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 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.

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

¹ Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR AND CONTROLGEAR –

Part 207: Seismic qualification for gas-insulated switchgear assemblies, metal-enclosed and solid-insulation enclosed switchgear for rated voltages above 1 kV

1 Scope

This part of IEC 62271 applies to

- gas-insulated switchgear (GIS) assemblies
 - for alternating current of rated voltages above 52 kV complying with IEC 62271-203, and
 - for direct current of rated voltages including and above 100 kV,
 - for indoor and outdoor installations, including their supporting structures,
- AC metal-enclosed switchgear and controlgear assemblies for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV complying with IEC 62271-200, ground or floor mounted, intended to be used under seismic conditions, and
- AC solid-insulation enclosed switchgear and controlgear assemblies for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV complying with IEC 62271-201, ground or floor mounted, intended to be used under seismic conditions.

The seismic qualification of the switchgear and controlgear assemblies takes into account testing of typical switchgear and controlgear assemblies combined with methods of analysis. Mutual interaction between directly mounted auxiliary and control equipment and switchgear assemblies is considered.

Seismic qualification philosophy includes selection of seismic qualification level (Clause 4), methodologies for qualification by testing (Clause 5) and by combined testing and analysis (Clause 6), acceptance criteria (Clause 7) and seismic qualification documentation (Clause 8).

Recommendations on increasing the seismic adequacy of switchgear and controlgear assemblies are provided in Annex B. A flowchart of the seismic qualification process is included in Annex C.

The seismic qualification of switchgear and controlgear assemblies by the manufacturer is performed usually if needed.

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 60068-2-47, *Environmental testing – Part 2-47: Tests – Mounting of specimens for vibration, impact and similar dynamic tests*

IEC 60068-2-57:2013, *Environmental testing – Part 2-57: Tests – Test Ff: Vibration – Time-history and sine-beat method*

IEC 60068-3-3:2019, *Environmental testing – Part 3-3: Supporting documentation and guidance – Seismic test methods for equipment*

IEC 60099-4:2014, *Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems*

IEC 62271-1:2017, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications for alternating current switchgear and controlgear*

IEC 62271-200:2021, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV*

IEC 62271-201:2014, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 201: AC solid-insulation enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV*

IEC 62271-203:2022, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 203: AC gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV*

ISO 2041, *Mechanical vibration, shock and condition monitoring – Vocabulary*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60068-3-3, IEC 62271-1, IEC 62271-200, IEC 62271-201, IEC 62271-203, ISO 2041 and the following apply.

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

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

3.1

switchgear and controlgear

switching devices and their combination with associated control, measuring, protective and regulating equipment, including assemblies of such devices and equipment with associated interconnections, accessories, enclosures and supporting structures

[SOURCE: IEC 60050-441:1984, 441-11-01]

3.2

metal-enclosed switchgear and controlgear

switchgear and controlgear assemblies with an external metal enclosure intended to be earthed, and complete except for external connections

[SOURCE: IEC 60050-441:1984, 441-12-04, modified – Note deleted.]

3.3

gas-insulated metal-enclosed switchgear

GIS

metal-enclosed switchgear in which the insulation is obtained, at least partly, by an insulating gas or gas mixture other than air at atmospheric pressure

[SOURCE: IEC 60050-441:1984, 441-12-05, modified – Abbreviated term "GIS" added. Words "or gas mixture" added to the definition, and note deleted.]

3.4

solid-insulation enclosed switchgear and controlgear

switchgear and controlgear assemblies with an external solid insulating enclosure and completely assembled, except for external connections

[SOURCE: IEC 62271-201:2014, 3.103 – Note deleted.]

3.5

high voltage switchgear

HV switchgear

gas-insulated switchgear (GIS) assemblies for alternating current of rated voltages above 52 kV complying with IEC 62271-203 and for direct current of rated voltages including and above 100 kV, for indoor and outdoor installations, including their supporting structure

Note 1 to entry: The upcoming IEC TS 62271-318 [9] is expected to regulate DC GIS of rated voltages including and above 100 kV.

3.6

medium voltage switchgear

MV switchgear

AC metal-enclosed switchgear and controlgear assemblies for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV complying with IEC 62271-200 and AC solid-insulation enclosed switchgear and controlgear assemblies for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV complying with IEC 62271-201, ground or floor mounted

3.7

user

utility, customer, final owner of the qualified equipment

3.8

brittle material

material that experiences limited or no plastic deformation before fracture

Note 1 to entry: Limited deformation shall be taken as less than 10 % in 5 cm at failure in tension.

[SOURCE: IEEE Std 693-2018. Adapted and reprinted with permission from IEEE. Copyright IEEE 2018. All rights reserved.]

3.9

ductile material

material that experiences considerable plastic deformation before fracture

Note 1 to entry: Considerable plastic deformation is defined as 10 % or greater in 5 cm at failure in tension.

[SOURCE: IEEE Std 693-2018. Adapted and reprinted with permission from IEEE. Copyright IEEE 2018. All rights reserved.]

3.10

flexible equipment

equipment, structures, and components whose lowest resonant frequency is less than 33 Hz

3.11

rigid equipment

equipment, structures, and components whose lowest resonant frequency is greater than 33 Hz

[SOURCE: IEEE Std 693-2018. Adapted and reprinted with permission from IEEE. Copyright IEEE 2018. All rights reserved.]

3.12**acceleration of gravity**

g

acceleration due to gravity that is 9,81 m/s²

Note 1 to entry: For the purposes of this document, the value of g is rounded up to the nearest integer, that is 10 m/s².

3.13**ground acceleration**

acceleration of the ground resulting from the motion of a given earthquake

3.14**peak ground acceleration**

PGA

maximum ground acceleration of any component of the time history

3.15**zero period acceleration**

ZPA

zero period acceleration is the spectral acceleration for frequencies above 33 Hz

3.16**floor acceleration**

acceleration of a particular building floor (or an equipment mounting) resulting from its response to the ground motion of a given earthquake

3.17**response spectrum**

plot of the maximum response of an array of single-degree-of-freedom (SDOF) identically damped oscillators with different frequencies, all subjected to the same base excitation

[SOURCE: IEEE Std 693-2018. Adapted and reprinted with permission from IEEE. Copyright IEEE 2018. All rights reserved.]

3.18**required response spectrum**

RRS

response spectrum that defines the required level of input motion for a given level of qualification

[SOURCE: IEEE Std 693-2018. Adapted and reprinted with permission from IEEE. Copyright IEEE 2018. All rights reserved.]

3.19**floor response spectrum**

response spectrum of the floor acceleration history of a building floor (or an equipment mounting)

Note 1 to entry: Response acceleration spectra can be calculated for each one of the three components of excitation.

3.20**superelevation factor**

amplification factor accounting for the amplification of seismic loading with respect to ground level due to the response of buildings and structures

Note 1 to entry: A superelevation factor is used in lieu of a more accurate estimation of the contribution of the building (or other equipment mounting) response to the response of the qualified equipment.

3.21

resonant frequency

frequency coinciding with the natural frequency of a system (at which the response amplitude is a relative maximum)

Note 1 to entry: At a resonant frequency, even small periodic driving forces can produce large amplitude oscillations

[SOURCE: IEEE Std 693-2018. Adapted and reprinted with permission from IEEE. Copyright IEEE 2018. All rights reserved.]

3.22

complete quadratic combination method

CQC method

modal combination method, especially useful for systems with closely spaced frequencies

[SOURCE: IEEE Std 693-2018. Adapted and reprinted with permission from IEEE. Copyright IEEE 2018. All rights reserved.]

3.23

damping

energy dissipation mechanisms in a system

Note 1 to entry: In practice, damping depends on many parameters, such as the structural system, mode of vibration, strain, applied forces, velocity, materials, joint slippage.

[SOURCE: IEC 60068-3-3:2019, 3.8, modified – Second note to entry deleted.]

3.23.1

critical damping

minimum viscous damping that will allow a displaced system to return to its initial position without oscillation

[SOURCE: IEC 60068-3-3:2019, 3.8.1]

3.23.2

damping ratio

ratio of actual damping to critical damping in a system with viscous damping

[SOURCE: IEC 60068-3-3:2019, 3.8.2]

3.24

direction factor

factor taking account of the difference in magnitude at ground level that normally exists between the horizontal and vertical accelerations resulting from an earthquake

[SOURCE: IEC 60068-3-3:2019, 3.9]

3.25

normal operating load

force, stress, or load resulting from equipment operation that can reasonably be expected to occur during an earthquake

3.26**seismic qualification level**

level of seismic excitation to which equipment shall maintain the seismic qualification objective

Note 1 to entry: The seismic qualification level is dependent upon the seismicity of the region where the equipment will be in service.

Note 2 to entry: Information on comparison between seismic levels for different standards is given in Table 2.

3.27**time history**

recording, as a function of time, of acceleration or velocity or displacement

Note 1 to entry: This definition is not identical to that given in ISO 2041.

[SOURCE: IEC 60068-3-3:2019, 3.34]

3.28**strong part of time history**

part of time history from the time when the plot first reaches 25 % of the maximum value to the time when it falls for the last time to the 25 % level

[SOURCE: IEC 60068-3-3:2019, 3.27]

4 Seismic qualification requirements**4.1 Seismic qualification objective**

The seismic qualification shall demonstrate the ability of the switchgear and controlgear assemblies to withstand seismic stress without impairing the functionality of the equipment during and after seismic events. It may be proved by testing or by a combination of testing and analysis.

4.2 Qualification levels

A seismic qualification level is defined as the magnitude of seismic excitation to which equipment shall maintain the seismic qualification objective. The qualification shall be done on one of the four seismic qualification levels of Table 1: low, AG2.5, AG5 and AG10.

Qualification levels are associated with ZPA of the required response spectrum. For the low qualification level, the horizontal ZPA is 0,10 g or less. For the AG2.5 qualification level, the ZPA is 0,25 g. For the AG5 qualification level, the ZPA is 0,50 g. For the AG10 qualification level, the ZPA is 1,00 g.

NOTE Seismic qualification level AG10 is a very severe requirement which can need the consideration of special measures such as reinforcement of the gantry/enclosure and application of high-strength insulators, so caution is advised when applying.

Table 1 – Seismic qualification levels for switchgear and controlgear assemblies – Horizontal severities

Qualification level	Required response spectrum (RRS)	Zero period acceleration (ZPA)
Low	---	$\leq 1,0 \text{ m/s}^2$ (0,10 g)
AG2.5	Figure 1	$2,5 \text{ m/s}^2$ (0,25 g)
AG5	Figure 2	$5,0 \text{ m/s}^2$ (0,50 g)
AG10	Figure 3	10 m/s^2 (1,00 g)

A comparison between the qualification levels of this document and the qualification levels of IEC 62271-207:2012, IEC TS 62271-210:2013 and IEEE Std 693-2018 is presented on Table 2. ZPA is used as basis for the comparison.

Table 2 – Comparison of qualification levels between various standards

ZPA	This document	IEC 62271-207:2012 [2]	IEC TS 62271-210:2013 [3]	IEEE Std 693-2018
$\leq 1,0 \text{ m/s}^2$ (0,10 g)	Low	Low	-	Low
$2,5 \text{ m/s}^2$ (0,25 g)	AG2.5	Moderate	-	-
$5,0 \text{ m/s}^2$ (0,50 g)	AG5	High	Severity level 1	Moderate performance level
$10,0 \text{ m/s}^2$ (1,00 g)	AG10	-	Severity level 2	High performance level

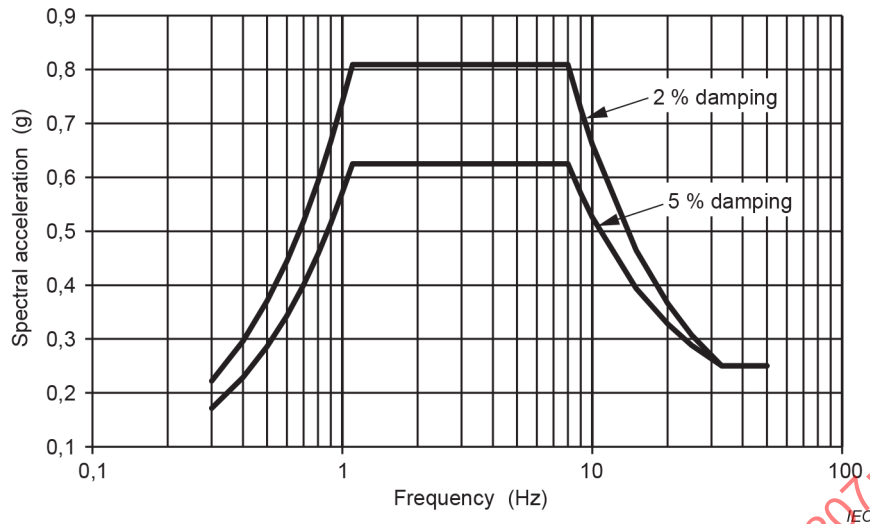
The fixed seismic qualification levels of Table 1 are practical for standardization purposes and testing. Typical examples are medium voltage metal-enclosed and solid-insulation enclosed switchgear and controlgear assemblies.

In the case of custom layout applications such as high voltage GIS substations comprising constellations of standardized GIS modules combined with gas-insulated busducts (GIB) that can span up to several hundred meters and are supported by custom-made steel structures, consideration of local seismic hazard level could enable a cost-effective and seismically safe design. In that sense, other qualification levels which consist in requirements from the user that can be based on specific investigation at site or regulations in national standards, taking into account for example the type of soil, soil structure interaction, building response, and elevation may be used as described in 4.3.

The selection of the seismic qualification level is the responsibility of the user and is normally based on an assessment of site geophysical parameters, seismic hazard, risk assessments, and economics.

No qualification is required for low seismic level as far as construction practice and seismic construction practice comply with the state of the art. The recommended required response spectra related to the horizontal components of the seismic excitation are given in Figure 1, Figure 2 and Figure 3 for the different seismic qualification levels. The curves relate to 2 % and 5 % damping ratio of the switchgear and controlgear assemblies. If damping ratio is unknown, 2 % damping is applied for high voltage switchgear or 5 % damping for medium voltage switchgear. The corresponding response spectra related to the vertical component of excitation are defined as 80 % of the horizontal ones.

Response spectra for different damping values may be calculated by applying the formulae provided in Figure 1 through Figure 3.



Spectral accelerations, S_a (g), for frequencies, f (Hz):

$$S_a = 0,572 \beta f \quad \text{for } 0,0 \leq f \leq 1,1$$

$$S_a = 0,625 \beta \quad \text{for } 1,1 \leq f \leq 8,0$$

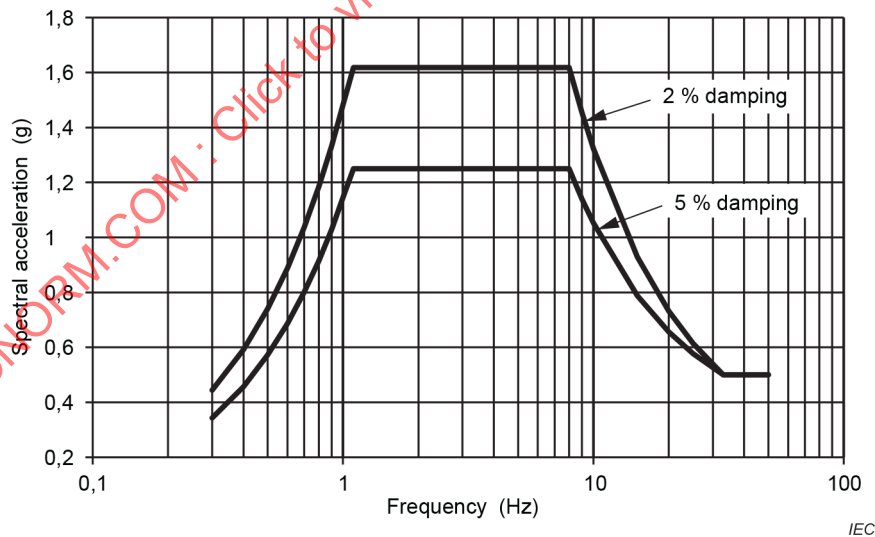
$$S_a = (6,6 \beta - 2,64) / f - 0,2 \beta + 0,33 \quad \text{for } 8,0 \leq f \leq 33$$

$$S_a = 0,25 \quad \text{for } f > 33$$

$$\beta = (3,21 - 0,68 \ln(d)) / 2,1156, \text{ where } d \text{ is the percent damping (2, 5, 10, etc.) and } d \leq 20 \%$$

[SOURCE: Adapted and reprinted with permission from IEEE. Copyright IEEE 2018. All rights reserved.]

Figure 1 – Required response spectrum (RRS) for qualification level AG2.5 (ZPA = 0,25 g)



Spectral accelerations, S_a (g), for frequencies, f (Hz):

$$S_a = 1,144 \beta f \quad \text{for } 0,0 \leq f \leq 1,1$$

$$S_a = 1,25 \beta \quad \text{for } 1,1 \leq f \leq 8,0$$

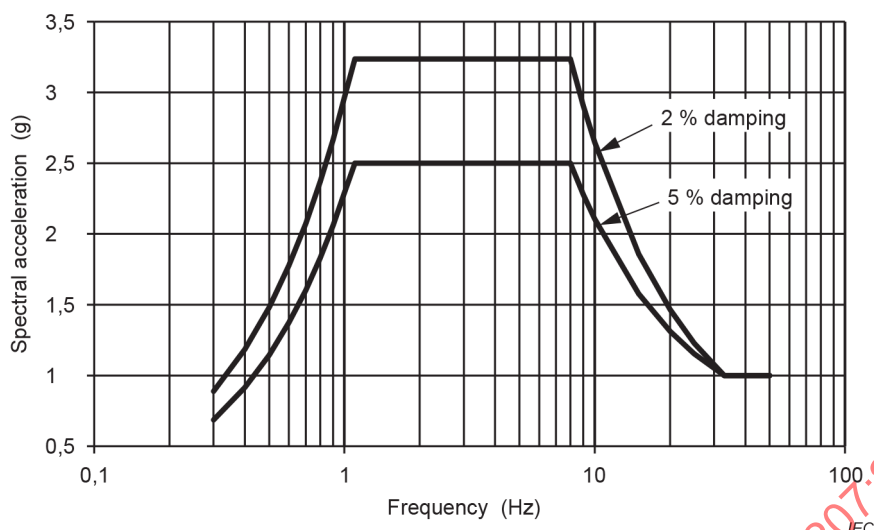
$$S_a = (13,2 \beta - 5,28) / f - 0,4 \beta + 0,66 \quad \text{for } 8,0 \leq f \leq 33$$

$$S_a = 0,50 \quad \text{for } f > 33$$

$$\beta = (3,21 - 0,68 \ln(d)) / 2,1156, \text{ where } d \text{ is the percent damping (2, 5, 10, etc.) and } d \leq 20 \%$$

[SOURCE: Adapted and reprinted with permission from IEEE. Copyright IEEE 2018. All rights reserved.]

Figure 2 – Required response spectrum (RRS) for qualification level AG5 (ZPA = 0,50 g)



Spectral accelerations, S_a (g), for frequencies, f (Hz):

$$S_a = 2,288 \beta f \quad \text{for } 0,0 \leq f \leq 1,1$$

$$S_a = 2,50 \beta \quad \text{for } 1,1 \leq f \leq 8,0$$

$$S_a = (26,4 \beta - 10,56) / f - 0,8 \beta + 1,32 \quad \text{for } 8,0 \leq f \leq 33$$

$$S_a = 1,00 \quad \text{for } f > 33$$

$$\beta = (3,21 - 0,68 \ln(d)) / 2,1156, \text{ where } d \text{ is the percent damping (2, 5, 10, etc.) and } d \leq 20 \%$$

[SOURCE: Adapted and reprinted with permission from IEEE. Copyright IEEE 2018. All rights reserved.]

Figure 3 – Required response spectrum (RRS) for qualification level AG10 (ZPA = 1,00 g)

4.3 Selection of seismic qualification level

4.3.1 General

The project-specific seismic qualification level is selected taking into account the site-specific seismic hazard level described in 4.3.2, the effect of building response and elevation described in 4.3.3 and additional factors such as soil-structure interaction described in 4.3.4 or additional customer requirements.

Low seismic qualification level is applicable if the site-specific seismic hazard level defined in 4.3.2 corresponds to a ZPA equal or lower than 0,10 g.

4.3.2 Estimation of site-specific seismic hazard level

The site-specific seismic hazard level is expressed by the ZPA provided from a site-specific seismic hazard analysis, from the local building code or from available literature. Unless the user differently defines, the site-specific seismic hazard level should consider a return period not lower than the one mandated by local regulations.

NOTE It is common for building codes to consider a return period of 475 years for structures of normal importance but increase it to between 1 000 years and 2 475 years for high importance infrastructure through the application of appropriate importance factors.

In the case of estimation of site-specific seismic hazard level according to the local building code, the following procedure may be applied.

- Read the mapped PGA corresponding to the location of the project.
- If required, apply an importance factor corresponding to the code-specific importance category related to substations. This raises the return period of the earthquake.

- c) If required, apply a soil factor corresponding to the soil class of the site, often available from the project-specific geotechnical investigation report.
- d) If required, consider near-fault effects.
- e) Building codes assume ductile behaviour of structures and apply a response reduction factor. Consider elastic response of the equipment. Do not apply any response reduction factor.

4.3.3 Effect of building response and elevation

The amplification of the ground acceleration resulting from the influence of the dynamic characteristics of the response of buildings and structures shall be regarded by one of the following alternatives.

- a) The user shall provide a floor response spectrum (FRS) that expresses the position-specific response within the building to the elastic design spectrum as determined according to the building code as presented in 4.3.2. Alternatively, this may be developed by the manufacturer, with the user's agreement.
- b) Where no information is available, the amplification may be accounted for by means of a superelevation factor. The recommended values are given in IEC 60068-3-3:2019, Table 5, but a relevant specification may prescribe other values for given site conditions. In any case, the amount of amplification of seismic loading due to the response of the building should be mutually agreed between the user and the manufacturer.

4.3.4 Soil-structure interaction

Soil-structure interaction occurs when the soil deforms due to the loading from the equipment-foundation system responding to an earthquake. The soil-foundation system may become a significant component in the dynamic properties of the equipment-foundations-soil system, which may increase or decrease the motion the equipment experiences during an earthquake. Soil-structure interaction occurs with certain combinations of equipment mass and size, foundation type and configuration, and soil properties. Structurally coupled systems such as GIS/GIB and their supporting structures spreading along large areas are especially susceptible to soil-structure interaction due to differential settlements/rocking of parts of the system sitting on structurally independent single pad foundations. Soil-structure interaction is generally not considered in the design of substation equipment, unless specifically requested by the user. It increases where there are high accelerations, heavy equipment, high centres of gravity, or soft sites.

5 Qualification by test

5.1 General

The test procedure shall be in accordance with IEC 60068-3-3 with the modification that the time history test method in accordance with IEC 60068-2-57 shall be applied. The time history test method more closely simulates actual conditions, because the behaviour of the test sample is always not linear.

The qualification shall be carried out on a representative test sample and under the rated pressure. It is allowed to use an alternative gas at the rated pressure for the qualification to minimize the chance of loss of greenhouse gas. However, alternative gas can have an impact on the mechanical characteristics of the switching devices. Therefore, it is allowed to adjust the drive settings (e.g. valves setting or pretension of springs) in order to stay within the original mechanical characteristics of the switching device. In addition, it shall be ensured that the use of alternative gas has no considerable impact on the dynamic characteristics of the test sample.

The rated pressure is required to test under realistic conditions. Nevertheless, test laboratories for seismic testing need adequate safety measures.

The seismic test should demonstrate the ability of the switchgear and controlgear assemblies to perform its required functions during and after seismic loads in form of test response spectrum (TRS) that envelopes the RRS. The demonstration shall be performed as it is settled in 5.4.

If the auxiliary and control equipment or other parts of the equipment are seismically and structurally independent, they may be qualified independently.

If a test sample cannot be tested with its supporting structure (e.g. due to its size), the dynamic contribution of the structure shall be determined by analysis and accounted for in the test.

NOTE In many cases for high-voltage GIS, it is not possible to test a complete switchgear and controlgear assembly on a shake table because of its size and weight. For such cases, it can be broken into sub-assemblies and tested separately, subject to the condition that the tested parts produce conservative results. The conservatism can be demonstrated by numerical analysis.

5.2 Mounting

The test sample shall be mounted as in service condition including, if possible, compensators, levelling supports, bushings, flanges, enclosures, support structures, accessibility structures (such as platforms, stairs, etc.) and/or dampers (if any).

The horizontal orientation of the test sample shall be in the direction of excitation acting along its two main orthogonal axes.

Any fixtures or connections required only for testing shall not affect the dynamic behaviour of the test sample (e.g. adapter plates to be used between the equipment and the shake table shall be rigid).

The method of mounting of the test sample shall be documented and shall include a description of any interposing fixtures and connections according to IEC 60068-2-47.

5.3 Test parameters

5.3.1 Measurements

Measurements should be performed in accordance with IEC 60068-3-3:2019, 5.3.

At least the following signals shall be recorded:

- a) accelerations at the shake-table;
- b) accelerations at significant places of the test object:
 - 1) at critical components:
 - i) components where maximum deflections and significant relative displacements are expected;
 - ii) components with heavy masses;
 - 2) near to the centre of gravity, if possible;
 - 3) in at least one measurement point, directly connected to the main structure (usually on the top of switchgear);
- c) for equipment above 52 kV: strains of critical elements (e.g. bushings, flanges, enclosures and support structures).

5.3.2 Frequency range

The frequency range shall be from 1 Hz to at least 35 Hz in accordance with IEC 60068-2-57:2013, 5.3, because in earthquakes the predominant frequencies are in between this range. The frequency range is applied to the resonant frequency search test and the generation of artificial earthquake wave.

Due to the limitation of some shake-tables, it is not required to envelop the RRS below frequencies of 70 % of the lowest resonant frequency of the equipment or 1 Hz, whichever greater.

NOTE In special cases of test specimens with natural frequencies below 1 Hz, such as composite SF6/air bushings, the test frequency range can be adjusted accordingly in order to allow for proper testing of the specimen.

5.3.3 Parameters for resonant frequency search

The resonant frequency search test shall be carried out according to IEC 60068-3-3:2019, 15.1.

The recommended acceleration during the resonant frequency search is 0,1 g. This value can be reduced to 0,05 g in the case of sharp resonances. The search shall be conducted successively by sine sweeps along the three main axes at a maximum rate of 1 octave/min.

5.3.4 Parameters for time history test (seismic load test)

The test directions shall be chosen according to IEC 60068-3-3:2019, Clause 10.

Although historically both biaxial and triaxial testing was performed, tri-axial testing is recommended by this document.

NOTE When triaxial testing is difficult to perform due to restrictions of the test facility, biaxial testing can be adopted as an alternative. Refer to IEC 60068-3-3:2019, 10.3, for additional information.

The qualification level shall be chosen according to Clause 4.

Response spectra for different damping values may be calculated by applying the formulae provided in Figure 1 through Figure 3.

The total duration of the time-history shall be 30 s at least and the strong part shall not be less than 20 s.

5.4 Testing procedure

5.4.1 General

The test sequence shall be as follows:

- a) functional checks before testing as described in 5.4.2;
- b) resonant frequency search as described in 5.4.3 (required to determine critical frequencies and damping ratios for testing and/or for analysis);
- c) time-history test (seismic load test) as described in 5.4.4;
- d) resonant-frequency search as described in 5.4.3;
- e) functional checks after testing as described in 5.4.2.

5.4.2 Inspection and functional checks

Before and after the tests, the following operating characteristics or settings shall be recorded or evaluated (when applicable) at the rated supply voltage and operating pressure:

- a) visual inspection;
- b) closing time, opening time and mechanical travel characteristics of switching devices as specified by the manufacturer, where applicable;
- c) operation of any withdrawable or removable part;
- d) gas and/or liquid tightness where relevant;
- e) resistance measurement of the main circuit;

- f) power-frequency withstand voltage test as condition check of the main circuit (all switching devices in closed position) phase-to-earth and between phases, according to IEC 62271-1:2017, 7.2.12, and/or IEC 62271-203:2022, 7.2.12;
- g) power-frequency withstand voltage test as condition check of the switching devices across open switching device and/or isolating distance, according to IEC 62271-1:2017, 7.2.12, and/or IEC 62271-203:2022, 7.2.12;
- h) routine tests on auxiliary and control circuits according to IEC 62271-200:2021, 8.3, IEC 62271-201:2014, 7.2, IEC 62271-203:2022, 8.3.
- i) test on surge arresters according to IEC 60099-4:2014, Clause G.2, in case the (individual) seismic qualification of these components is requested.

Due to the laboratory limitations, some or all functional tests may be done at the manufacturer test facilities (used for routine testing) or at adequate testing laboratories. Special caution should be given about the effects on subsequent test results due to disassembly, transportation and reassembly of the tested equipment modules.

For DC-GIS of rated voltages including and above 100 kV, 5.4.2 is applicable with the following addition: instead of items f) and g), a DC dielectric condition check shall be performed by agreement between manufacturer and user.

5.4.3 Resonant frequency search

The resonant frequency search test shall be carried out according to 5.3.3.

5.4.4 Time history test (seismic load test)

The time history test shall be performed according to IEC 60068-2-57 with the parameters as defined in 5.3.4.

During the seismic test, the following parameters shall be recorded in addition to 5.3.1:

- electrical continuity of the main circuit (if applicable);
- electrical continuity of the auxiliary and control circuit (representative NO/NC contacts).

During the test, the control circuits shall be energized at the rated voltage.

One test run is required. At the beginning, all switching devices shall be in the in-service condition (e.g. circuit-breakers are closed, disconnectors are closed, earthing switches are open). The test condition depends on the switching devices and their ability to perform operations during the strong motion part of the time history:

- during this operational test, each circuit-breaker shall perform at least one operating sequence (open-close-open) within the middle of total test duration and therefore within the strong part of motion;
- for equipment up to and including 52 kV: other switching devices shall operate as specified (e.g. open operation for load break switches);
- all other switching devices do not need to be operated during time history test.

NOTE 1 Circuit-breakers ensure the switching capability even during seismic events. Other switching devices give evidence only for the functionality specified by the manufacturer.

NOTE 2 A further test run can be performed optionally, with all switching devices in in-service position without operation. Performing this test is in line with procedures defined in IEEE Std 693.

NOTE 3 If the test is intended to be used as a basis for numerical analysis, then further recordings can be performed in order to provide relevant data. Such recordings are:

- deflection of components where significant displacements are expected;
- strains on critical elements (e.g. bushings, flanges, enclosures and support structures);
- acceleration on further locations on the test sample.

NOTE 4 Typically for equipment up to and including 52 kV, the following operating sequence is applied: O-5 s-C-5 s-O.

Criteria for assessing the test validity and the test results are provided in 7.2 and 7.3, respectively.

6 Qualification by combined test and numerical analysis

6.1 General

The method may be used

- to qualify switchgear and controlgear assemblies already tested under different seismic conditions,
- to qualify switchgear and controlgear assemblies similar to assemblies already tested but which include modifications influencing the dynamic behaviour (e.g. change or extension of the arrangement or in the mass of components),
- to qualify switchgear and controlgear assemblies if their dynamic and functional data are known (see 6.2), and
- to qualify switchgear and controlgear assemblies which cannot be qualified by testing (e.g. because of their size, their weight or their complexity).

For MV switchgear, the structural part consists principally of the structure including braces, frames, struts and attachments that transmit all seismic loads between the equipment and the floor. The dynamic behaviour of the equipment or assembly depends on the structural part. Two or more assemblies can be considered structurally similar when they have the same structural scheme and the same connection types; they can be different by the mass distribution and/or the dimensions. The functional part consists of components which are considered as logical sub-grouping of equipment functions typically organized and arranged as physical devices, modules or subassemblies that can be detached from the equipment and can be mounted on a test fixture using the same mechanical and electrical interfaces and tested as standalone units.

6.2 Dynamic and functional data

Dynamic data (damping ratios, natural frequencies, stresses of critical elements as a function of input acceleration) for analysis shall be obtained by one of the following:

- a) a dynamic test of a similar test-set (Clause 5);
- b) a dynamic test at reduced test levels;
- c) determination of natural frequencies and damping ratios by other tests such as free oscillation or low level excitation tests (see Annex A).

Functional data may be obtained from a previous test performed on a similar test-set.

For MV switchgear, if during the test a nonlinear behaviour of the structure is detected, the analysis shall be reassessed taking into account the test results by using equivalent elastic stiffness and damping. The nonlinearity is mainly on the damping, which can be quite different and higher than that measured at low levels, and on the stiffness, which can change with increasing loads, and consequently can change the resonant frequencies.

6.3 Numerical analysis

6.3.1 General

The general procedure is as follows.

a) Mathematical model

On the basis of technical information concerning the design characteristics of the substation, a three-dimensional model of the test-set shall be created. Such a model shall take into consideration the presence of actual compartments and of their supporting structures and shall have sufficient sensitivity to describe the mass and stiffness distribution to simulate the dynamic behaviour of the test-set in the frequency range being studied.

b) Calibration of the model

Using experimental data stated in 6.2, the mathematical model shall be calibrated in order to assess its dynamic characteristics. Considering the modularity of switchgear and controlgear assemblies, the mathematical model implemented and calibrated for the test-set may be extended to a complete substation, provided that the right adaptations, related to the structural differences existing for the different modules, are considered.

c) Response of the analysis

The response, in the frequency range stated in 5.3.2, using either of the methods described in 6.3.3 through 6.3.6, has to be determined. Other methods may be used if they are properly justified.

d) Conclusion on the seismic mechanical behaviour

The acceptance criteria given in Clause 7 shall be applied for the validity of the model and for the structural integrity of the analysed assembly to be evaluated.

6.3.2 Analytical earthquake component combination techniques

In order for orthogonal acceleration effects to be accounted for, an analytical orthogonal combination technique shall be applied: The SRSS² method, combines seismic stresses at a particular location or combines local seismic forces acting on a particular element of a structural system. With this method, the stresses or local forces associated with each maximum required orthogonal seismic response are determined separately and then combined by squaring each value, adding them algebraically, and then taking the square root of that sum. The result of this calculation is the maximum seismic stress or force at the location or element in question, which shall then be applied in the direction that produces the most severe equipment stresses.

As an option to the SRSS combination of three orthogonal earthquake components, a 100/40/40 combination rule may be used (see IEEE Std 693-2018, A.1.4.4). The 100/40/40 combination rule is applied by developing three sets of responses (forces or displacements) in which 100 % of the effects of each earthquake component are taken in turn and combined absolutely with 40 % of the effects of the remaining two earthquake components. The equipment and each structural element are designed for the most critical response resulting from one of the three sets of forces. The 100/40/40 combination rule is intended to account for the low likelihood that all three earthquake components will cause the maximum response of a given structural element at the same instant.

² Square root of the sum of squares.

6.3.3 Static analysis for rigid equipment

For rigid equipment, with all modal frequencies above 33 Hz, the static analysis method can be applied.

The forces on each component of the equipment shall be obtained by multiplying the values of the mass of the component by the horizontal and vertical ZPAs corresponding to the applicable seismic qualification level in the corresponding orthogonal axes directions. The resulting force shall be applied at the centre-of-gravity of the component. A part may be subdivided into smaller components, to better represent the part's mass distribution.

The vertical seismic forces shall act simultaneously with both horizontal seismic forces. The horizontal forces are applied in the direction of the orthogonal axes. The three forces at each component's centre-of-gravity shall be applied using one of the analytical earthquake component combination techniques given in 6.3.2 and then combined with dead load and any other loads from 7.1.

6.3.4 Static coefficient analysis

The static coefficient analysis usually applies to equipment having a few important modes in the seismic range. It is a rather simple technique in return for added conservatism. No determination of natural frequencies is made.

The acceleration response of the equipment shall be determined using the maximum peak of the RRS spectra at a damping value of 2 % for HV switchgear or 5 % for MV switchgear, unless a higher value for damping is justified by a test specified in Clause A.2. The seismic forces on each component of the equipment are obtained by multiplying the values of the mass times the maximum peak of the RRS spectra times the static coefficient. A static coefficient of 1,5 shall be used, with 80 % of the horizontal value being applied in the vertical axis. The 1,5 factor accounts for multi-mode effects. The resulting force shall be distributed over the components proportionally to their mass distribution.

The stress at any point in the equipment shall be determined by combining the three orthogonal directional stresses (at that particular point) by one of the analytical earthquake component combination techniques defined in 6.3.2 at that point and combining all dead and other loads defined in 7.1 in such a manner to obtain the greatest stress at the point. The points of maximum stress shall be found.

6.3.5 Dynamic response spectrum analysis

When the dynamic analysis is carried out by the response spectrum method, the following shall apply.

The total response of all modes in any direction shall be determined by combining all modal response components acting in that direction using the SRSS technique, except if the mode frequencies differ by less than 10 % of the lower mode. Then these closely spaced modes are added directly, and these added modes and the remaining modes are added using the SRSS method. Alternatively, the total modal response in any direction may be determined by applying the CQC³ technique to all modal response components acting in that direction. Sufficient modes shall be included to ensure an adequate representation of the equipment's dynamic response. The acceptance criteria for establishing sufficiency in a particular direction shall be that the cumulative participating mass of the modes considered shall be at least 90 % of the sum of effective masses of all modes. Should the mathematical model have several resonant frequencies above 33 Hz such that the attainment of the acceptance criteria in an orthogonal excitation direction is impractical (as may be the case with vertical ground acceleration of vertically stiff equipment), then the effects of the orthogonal inputs can be simulated as follows:

³ Complete quadratic combination.

- a) determine the remaining effective mass in a given direction;
- b) for each component, apply a static force equal to the mass of the component multiplied by the percentage of mass missing, times the ZPA;
- c) calculate stresses, reactions, and so on using these forces;
- d) for each direction, combine stresses, reactions, and so on from the dynamic analysis with those from the analysis above using the SRSS.

Any of the earthquake component combination methods provided in 6.3.2 may be used.

For a specific point, the dynamic results computed above shall be combined with all dead and other loads defined in 7.1 in such a manner to obtain the greatest stress at the point. The points of maximum stress shall be found.

For HV switchgear, a damping value of 2 % or less, while for MV switchgear a damping value of 5 % or less shall be used for dynamic analysis, unless a higher damping value is justified by one of the tests specified in Clause A.2.

6.3.6 Time history analysis

This method is a powerful tool when evaluating multiple, interconnected equipment or when studying equipment too large to test. A time history representing a seismic event can be applied to a linear or nonlinear finite element model to calculate the instantaneous stresses, deformations, and loads.

Although, for qualification by analysis, no post-elastic response of the equipment, i.e. plastifications, is allowed by this document (see 7.4), nonlinear finite element modelling is accepted in order for other types of nonlinearities to be considered, such as modelling of contacts, dampers or compensators functioning as springs that are activated after the acting force exceeds a certain threshold.

When the seismic analysis is carried out by the time-history method, the ground motion acceleration time-histories shall comply with the RRS (see Table 1). Instructions on spectral matching and enveloping of the RRS can be found in IEC 60068-3-3. It is recommended to use either

- a) 3 sets of different compatible base time histories and consider the envelope of the responses due to each single set for qualification purposes, or
- b) 7 sets or more of different compatible base time histories and consider the average of the responses due to each single set for qualification purposes.

Alternatively, the time history analysis may be conducted with one of the three-component acceleration time histories developed for the IEEE Std 693-2018 performance level required response spectra which, as shown in Table 2, are identical with this document's RRS spectra of the same ZPA. Both empirically-based and numerically-synthesized time histories are publicly available at the IEEE website [4].

NOTE The publicly available time histories also include detailed documentation and instructions for use.

The instantaneous maximum (triaxial combination) loads, stresses, and displacements from the time history analysis shall be used to qualify the equipment according to the acceptance criteria of Clause 7.

6.4 Analysis by experience or similarity

In addition to the numerical analysis, analysis by experience may be another way to achieve the seismic qualification. It requires data from equipment of similar design that has successfully operated under previous qualification tests.

Each structural modification, which proves that the stiffness is not deteriorated, is acceptable. In these conditions, analysis by experience shall demonstrate that modifications do not generate stresses higher than obtained during the qualification test on the similar equipment.

EXAMPLE A mass moved from the top to the bottom produces a decrease of the bending moment on the anchorage points of the base.

When determining whether an equipment item is suitable for qualification by similarity and is less vulnerable than the already qualified equipment, the assessment should include, but not be limited to, the following considerations:

- mass and stiffness of the equipment;
- geometry (e.g. general configuration, height, location of centre of mass);
- use of identical or very similar components;
- dynamic response of the equipment;
- magnitude of conductor load effects;
- strength of load-carrying elements;
- differences that may influence functionality;
- support structure;
- anchorage details.

If there is equivalence between the components to be qualified and the components previously tested, the functionality shall be demonstrated. This means there is a high degree of similarity of the components and the local severity on the component shall be equal or less severe than this encountered during the qualification tests.

If there is no equivalence or in case of new components, the functionality shall be demonstrated with dynamic tests representative of the local environmental conditions and severity on the component.

7 Evaluation of the seismic qualification

7.1 Combination of loads and stresses

The seismic stresses determined by test or analysis shall be combined algebraically with other service loads to determine the total withstand capability of the switchgear and controlgear assemblies.

The probability of an earthquake of the recommended seismic qualification level occurring during the lifetime of the switchgear and controlgear assemblies is low, whilst the maximum seismic load in a natural earthquake would only occur if the switchgear and controlgear assemblies were excited at their natural frequencies with maximum acceleration. Since any excitation at natural frequencies will last for a few seconds at most, a combination of the utmost electrical and environmental service loads leads to unrealistic conservatism.

The following loads may be considered to occur additionally, if not otherwise specified:

- rated pressure for operation p_{rm} ;
- permanent loads (dead loads);
- thermal effects;
- loads accounting for the effects of conductor interaction (e.g. terminal loads on SF6/air bushings).

The combination of loads shall be effected by static analysis, applying the forces in the direction they occur.

NOTE Although SF6/air bushings are integral part of a GIS system and usually are seismically qualified by this document, alternatively they can also be qualified as standalone equipment according to IEC TS 61463 [5] provisions.

7.2 Validity criteria for the seismic waveform and the seismic test

The seismic simulation waveform shall produce a test response spectrum which envelopes the required response spectrum (calculated at the same damping ratio). The peak acceleration shall be equal to or greater than the zero period acceleration (ZPA). Also, the limitations of the test facility shall be considered to the extent permitted by 5.3.2. Further acceptance criteria for the seismic waveform and for the tests are given in IEC 60068-2-57.

7.3 Structural and functional evaluation of the test results

7.3.1 Common criteria for HV switchgear and MV switchgear

No rupture on the enclosure and the main circuits as well as on the control and auxiliary circuit, including the relevant supporting structures, shall occur.

For ductile material, minor permanent deformations are acceptable provided that they do not impair the functionality of the equipment. The equipment shall properly operate after the seismic event as defined in 7.3.2 and 7.3.3.

The resonant-frequency search mentioned in the test sequence of 5.4.1 d) performed after the time history test should be evaluated to look for unexpected changes of the natural frequencies of the test object indicating the presence of equipment damage. A shift in frequency of more than 20 % from the initial resonant-frequency search of 5.4.1 b) indicates the need for careful inspection for damage, but it does not disqualify the tested equipment.

The dielectric strength, switching capability and current carrying capability of the switchgear shall not be impaired, evidence being given by comparison of the functional check recordings before and after the test (according to 5.4.2). No significant change shall occur; all measured values shall be within the relevant tolerances given by the manufacturer.

Additional specific criteria for HV switchgear and MV switchgear are considered in 7.3.2 and 7.3.3, respectively.

7.3.2 HV switchgear

Functional results are normally obtained only by dynamic tests. These results may be extrapolated to obtain qualification by combination of tests and analysis. In particular,

- a) the main contacts shall remain in open or closed position during the seismic test,
- b) chatter of relays shall not cause the switching devices to operate,
- c) chatter of relays shall not provide wrong information of the status of the switchgear and controlgear assemblies (position, alarm signals),

NOTE Normally, chatter of relays lasting less than 5 ms is considered to be acceptable.

- d) resetting of monitoring equipment is considered to be acceptable if the overall performance of the switchgear and controlgear assemblies is not affected,
- e) no significant change shall occur in functional check recordings at the end of the test sequence compared with the initial ones (see 5.4.2), and
- f) no cracking or buckling shall be found on the equipment and equipment supports.

7.3.3 MV switchgear

For MV switchgear, the following shall be checked:

- a) during a seismic test run without mechanical operation of switching devices, the main contacts shall remain in open or closed position,
- b) during a seismic test run with mechanical operation of switching devices, the main contacts shall reach the intended positions,
- c) during the seismic test, chatter of relays shall not cause the switching devices to operate,
- d) cracks on main parts are not acceptable (e.g. primary structural elements and insulating parts). The relevant inspections should be limited to the visible parts of the switchgear assembly,
- e) deformations are allowed as long as the long term functionality is not affected,
- f) the condition of fixing devices of the equipment shall be maintained,
- g) any withdrawable or removable part shall operate correctly,
- h) auxiliary and control circuits shall not provide wrong information of the status of the switchgear and controlgear assemblies (position, alarm signals).

NOTE 1 Normally, chatter less than 2 ms is considered to be acceptable.

NOTE 2 Resetting of monitoring equipment is considered to be acceptable if the overall performance of the switchgear and controlgear assemblies is not affected.

7.4 Allowable stresses

The allowable stress of enclosures shall not exceed 100 % of the materials nominal yield stress. For supporting structures made from ductile material, stresses greater than 100 % yield stress and plastic deformation are acceptable if it does not impact the functionality of the equipment. For other material, the allowable stress shall remain within the limits for the exceptional load case given by established standards.

For instance, components made of cast epoxy resins, ceramic material or glass may be stressed up to 100 % of their type test withstand bending moment, see IEC 62155 [6]; components made of composite material may be stressed up to their specified cantilever load (SCL) or specified mechanical load (SML), see IEC 62231 [7] and IEC 61462 [8], respectively. Depending on structural conditions, ultimate tensile or compressive strength of the insulators may also be considered in the design checks.

7.5 Criteria of model acceptance

The mathematical model described in 6.3.1 is considered consistent if the calculated response quantities (accelerations, displacements, loads, stresses) of the devices which are part of the assembly are equal to or greater than the measured values during the test.

Natural frequencies and vibration modes shall be compared in order to verify the consistency of the model.

7.6 Acceptance criteria of the analysis results by similarity

The expected mechanical stresses on the equipment to be qualified by similarity, as described in 6.4, shall be equal to or smaller than the stresses, in the same points, previously measured on a similar successfully tested equipment.

8 Documentation

8.1 Test report

The test report shall contain at least the following items:

- a) qualification level (see 4.2);
- b) details of structure and mounting (see 5.1 and 5.2);
- c) number and relative position of testing axes (see 5.2);
- d) switchgear and controlgear assemblies identification file including structure and mounting details:
 - one drawing of the complete test objects including weights, centre of gravity and measuring points;
- e) test dates, recordings and videos (as separate digital files);
- f) applicable standards;
- g) wave form of the time history;
- h) test facility:
 - location,
 - test equipment description and calibration,
 - accreditation of the test laboratory;
- i) test method and procedures: number and conditions of test runs;
- j) placement of strain gauges, displacement (if any) and acceleration sensors;
- k) pressure gauges;
- l) test data including functional data (see 5.4 and 6.2):
 - resonant frequencies and damping, including records of the resonant frequency search;
 - response spectra including comparison of RRS and TRS for each axis;
 - time histories of the test for each axis;
 - list of any anomalies, documentation of any marks for distress respectively damage;
 - data of the functional checks, measured before and after the test including comparison;
 - some diagrams of the contact supervision during the time-history test;
 - photos of test set-up and measuring points;
- m) results and conclusions;
- n) approved signature and date.

The cover sheet of the test report shall contain at least the following information:

- type and designation of test object;
- qualification level;
- number and conditions of test runs.

8.2 Analysis report

Analysis, which is included as a proof of performance, shall have a step-by-step presentation.

The analysis report shall contain at least the following items:

- a) qualification level (see 4.2);
- b) details of structure and mounting (see 5.1 and 5.2);
- c) number and relative position of excitation axes (see 5.2);

- d) general and global assumptions;
- e) software package used including version number;
- f) employed method of analysis (see Clause 6);
- g) switchgear and controlgear assemblies identification file including structure and mounting details;
- h) information about required response spectra and seismic loading;
- i) damping ratio;
- j) load combinations;
- k) applicable standards;
- l) identification and description of equipment to be qualified;
- m) switchgear seismic test references and relevant test data;
- n) model description (type of elements, size of meshing, assumptions, etc.);
- o) list of natural frequency modes considered in the analysis (except for static coefficient or static methods);
- p) model validity and justification statement (see 7.5);
- q) equipment response for the required response spectra (RRS) specified;
- r) support reactions (forces, moments);
- s) calculated deflections of connections, attachments and clearances;
- t) performance of each device, component, and accessory in terms of mechanical behaviour and operability under seismic conditions;
- u) results, conclusions, and qualification statement;
- v) signatures (as required) and date.

A table summarizing maximum stresses, loads, etc. is suggested, for design check results to be easily assessed (Table 3 and Table 4).

Table 3 – Summary of maximum stresses, loads etc.

Component	Pg. no.	Location of component in equipment, location of stress in component, or both	Moment, shear, torsion, tension, combination, etc.	Calculated value (f)	Allowable value (F)	Safety factor (F/f)

Source: Adapted and reprinted with permission from IEEE. Copyright IEEE 2018. All rights reserved.

Table 4 – Example of summary of maximum stresses, loads etc.

Component	Pg. no.	Location of component in equipment, location of stress in component, or both	Moment, shear, torsion, tension, combination, etc.	Calculated value (<i>f</i>)	Allowable value (<i>F</i>)	Safety factor (<i>F/f</i>)
Flange connection	43	Member 1978	Moment	10,5 kNm	80,0 kNm	7,62
Circuit-breaker	51	Member 1982	Moment	9,5 kNm	55 kNm	5,79
Current transformer	65	Member 2022	Moment	12,8 kNm	21,0 kNm	1,64
Expansion joint	39	Nodes 6008, 6009	Displacement	2,3 mm	7,0 mm	3,04

8.3 Analysis report when analysis is performed by similarity

The report shall include at least the following items:

- qualification level (see 4.2);
- details of structure and mounting (see 5.1 and 5.2);
- number and relative position of excitation axes (see 5.2);
- identification and description of equipment to be qualified;
- identification and description of reference equipment;
- justification of the similarity (see 6.4), i.e., comparison of the equipment to be qualified versus reference equipment: stiffness, dimensions, arrangement, mass distribution, seismic qualification level etc.;
- performance of each device, component, and accessory in terms of mechanical behaviour and operability under seismic conditions;
- results, conclusions, and qualification statement;
- signatures (as required) and date.

Annex A (normative)

Characterisation of the test-set

A.1 Low-level excitation

A.1.1 General

The method exploits the application of a low-level excitation of the test-set for the determination of its natural response.

A.1.2 Test method

When portable exciter is used, experimenters shall pay attention to the influence of the weight of portable exciters. With the test-set mounted to simulate the recommended service mounting conditions, a number of portable exciters are attached at the points on the test-set which will best excite its various modes of vibration.

The data obtained from the monitoring instruments placed on the test-set may be used to analyse its dynamic performance.

A.1.3 Analysis

The frequency responses obtained from the test are used to determine the modal frequencies and damping ratios which shall be used in the dynamic analysis of the test-set stated in Clause 6. This method provides a greater degree of certainty in analysis since the model is refined to reflect the measured natural frequencies and experimental damping ratios.

A.2 Determination of the damping ratio by testing

A.2.1 General

Damping can either be assumed conservatively as defined in 4.2 or determined by any of the following methods.

A.2.2 Determination of the damping ratio by free oscillation test

A.2.2.1 Determination of the damping ratio by the logarithmic decrement method

To determine the damping ratio of the test-set, the same test may be used. A number of oscillations shall be recorded with suitable sensitivity and accuracy. Those oscillations are then used to determine the logarithmic decrement of the oscillations as a function of time. The equivalent damping ratio is determined using the monogram of Figure A.1, taken from the sequence of peaks in the recorded wave in that range of the record in which the logarithmic decrement appears most clear.

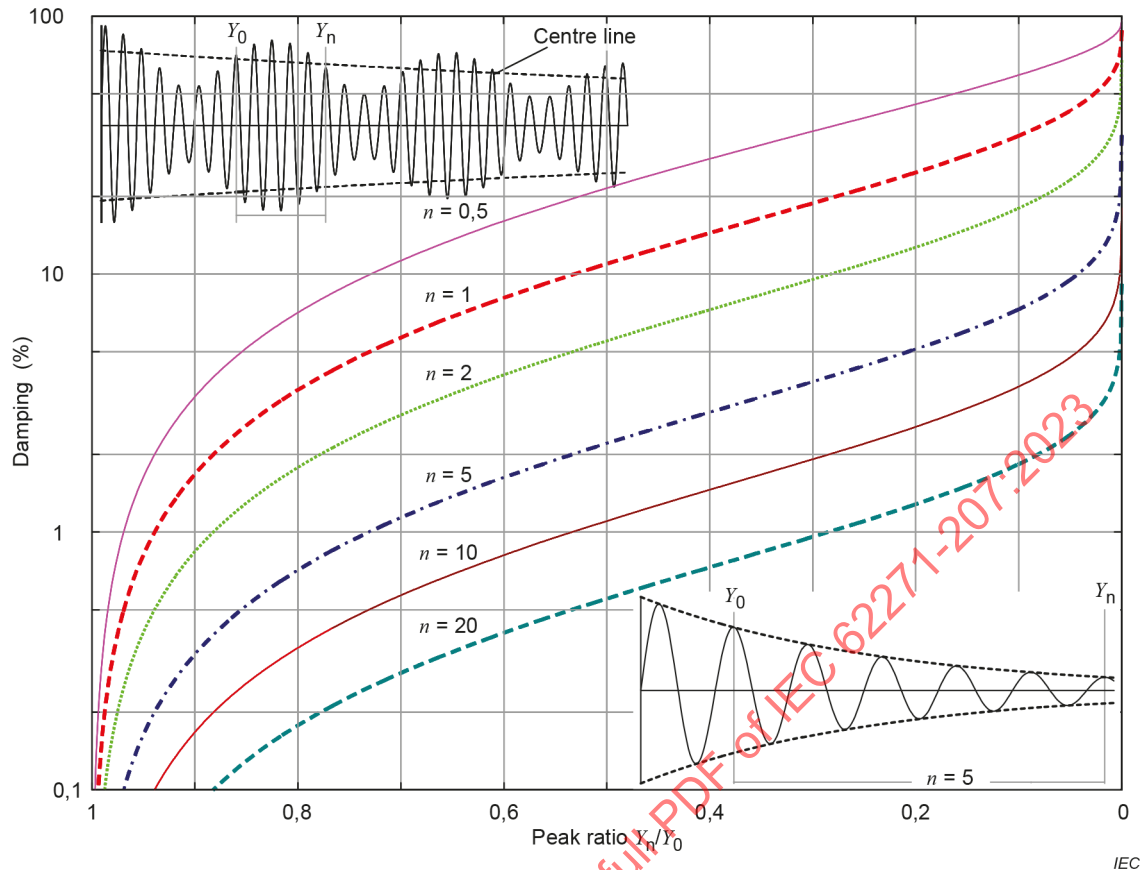


Figure A.1 – Monogram for the determination of equivalent damping ratio

Alternatively, the following formula can be used to determine the damping ratio ζ :

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi \cdot n}{\ln\left(\frac{Y_0}{Y_n}\right)} \right)^2}}$$

where

n is the number of oscillations;

Y_n/Y_0 is the peak ratio.

A.2.2.2 Special cases regarding the determination of natural frequencies and damping ratios

The test-set may consist of different elements and each of these elements may be susceptible to vibration. In this case, the test described in A.2.2.1 shall be carried out by applying tensile forces to each centre of gravity. The vibrations of each of these centres of gravity shall then be recorded together with the oscillation modes of the entire arrangement. Especially when elements of the arrangement show similar natural frequencies, resonances and beats in the oscillogram may further complicate the determination of damping ratios. When that happens, a centre line may be used in order to determine the damping ratio. The use of a centre line has been indicated in the sketch shown at the top of Figure A.1.

A.2.3 Determination of the damping ratio by measuring the half-power bandwidth

The equipment should be excited with a slowly swept sinusoidal vibration. The response of any desired location in the equipment is measured and plotted as a function of frequency. From these response plots, the damping associated with each mode can be calculated by measurements of the width of the respective resonance peak at the half-power point.

A.2.4 Determination of the damping ratio by curve fitting to frequency response methods

The equipment is excited by swept sine, random, or transient excitation, and a response transfer function is developed. The modal damping is obtained by fitting a mathematical model to the actual frequency response data (transfer function). This curve fitting will smooth out noise or small experimental errors.

A.2.5 Determination of the damping ratio by time domain curve fitting

An impulse response of decayed response of the equipment is used to fit an exponentially damped sine wave. This method can identify nonlinearities in the response and identify the frequency and equivalent viscous damping.

$$h(t) = A e^{-2\pi\zeta(t + \tau)} \sin(2\pi f(t + \tau))$$

where

$h(t)$ is the impulse response of a linear, viscously damped, oscillator;

A is the amplitude to fit the curve;

ζ is the fraction of critical damping;

τ is the time shift to fit the time history;

f is the damped natural frequency of the system

NOTE The source for half power width, curve fitting to frequency response and time domain curve fitting methods is IEEE Std 693-2018, A.1.1.6.

Annex B (informative)

Criteria for seismic adequacy of enclosed switchgear and controlgear assemblies

B.1 General

By the regulations of this document, the seismic qualification of switchgear and controlgear assemblies can be proved. Generally, those assemblies are an integrated part of an environment to which they have effect and, in reverse, from which they are affected. Clause B.2 to Clause B.5 therefore are indicating how influences from, foundations and buildings should be regarded. Recommendations are made how to treat anchorage and bracings on switchgear structures and how to deal with the interconnection of adjacent equipment.

B.2 Foundations

It is recommended that, as far as possible, all interconnected equipment be placed on a monolithic foundation or floor to reduce differential movements due to the design earthquake and possible rotations induced by soil structure interaction. When interconnected equipment is not located on the same foundation or floor, then the expected differential motions between equipment due to foundation motion should be provided.

Consideration may be given to soil interaction on underground conduits entering and leaving through the foundations or floors. If equipment is rigidly coupled to structural elements, such as walls or adjacent floors, the element response and relative motion may be taken into account.

B.3 Methods for anchoring equipment to foundations

It is strongly recommended that large equipment and equipment with large dimensions between anchor locations be anchored to steel members imbedded in and firmly attached to structural elements in the concrete. Location and type of fixings may be shown on the manufacturer's drawing. All fixings shall be adequate for forces coming from a design earthquake. Exposed fixings may have a protective coating.

If bolts are used to anchor equipment, they shall be either cast in fresh concrete or fixed by means of well-tested chemical anchors for drilled holes in hardened concrete. The use of bolts or anchors that are placed in holes drilled in hardened concrete is not recommended. Bolts of mild, ductile steel are preferred.

Consideration may be given to any unequal distribution of dynamic earthquake loading on the anchor bolts (due to bolt hole tolerance, torque load or non-contact of nut). The torque value to which the anchor bolts are tightened, their size and location, shall be shown on the construction drawings. In addition, the strength and material specifications shall be provided.

All anchor systems shall be designed to accommodate torsion, shear and bending and axial loads and any combination thereof that is experienced during the design earthquake. Shear and tensile strength of that portion of the anchor system within the foundation may be greater than the strength of the bolt attaching to the equipment.

B.4 Interconnection to adjacent equipment

All interconnections between equipment shall be adequate to accommodate all large relative motions.

Structurally and dynamically dissimilar equipment may experience large relative displacements. Interconnections shall be long and flexible enough to allow these displacements to occur without causing damage. Particular attention shall be paid to brittle non-ductile parts such as ceramic bushings and insulators. In no circumstances shall electrical or structural interconnections abruptly stiffen leading to increased motion and strain. Such nonlinearities develop large impact forces. The changing dynamic characteristic between sections or equipment shall be considered.

B.5 Use of bracings on switchgear structure

Stiffening the equipment may increase some of its natural frequencies, raising them out of the critical range of earthquake energy. Diagonal cross-bracing and axial load-carrying members can be used to stiffen or strengthen equipment. Where bracing is employed, particular attention should be paid to the following aspects:

- bolted joints are recommended throughout the structure so as to increase the effective damping at high force levels;
- information concerning the correct torque for all bolts shall be supplied, thus ensuring the assemblies will behave dynamically as intended;
- if part of the structure is to be supplied by the user, then the manufacturer or user, or both, shall supply the necessary information so that the static and dynamic characteristics and foundation requirements can be easily determined.

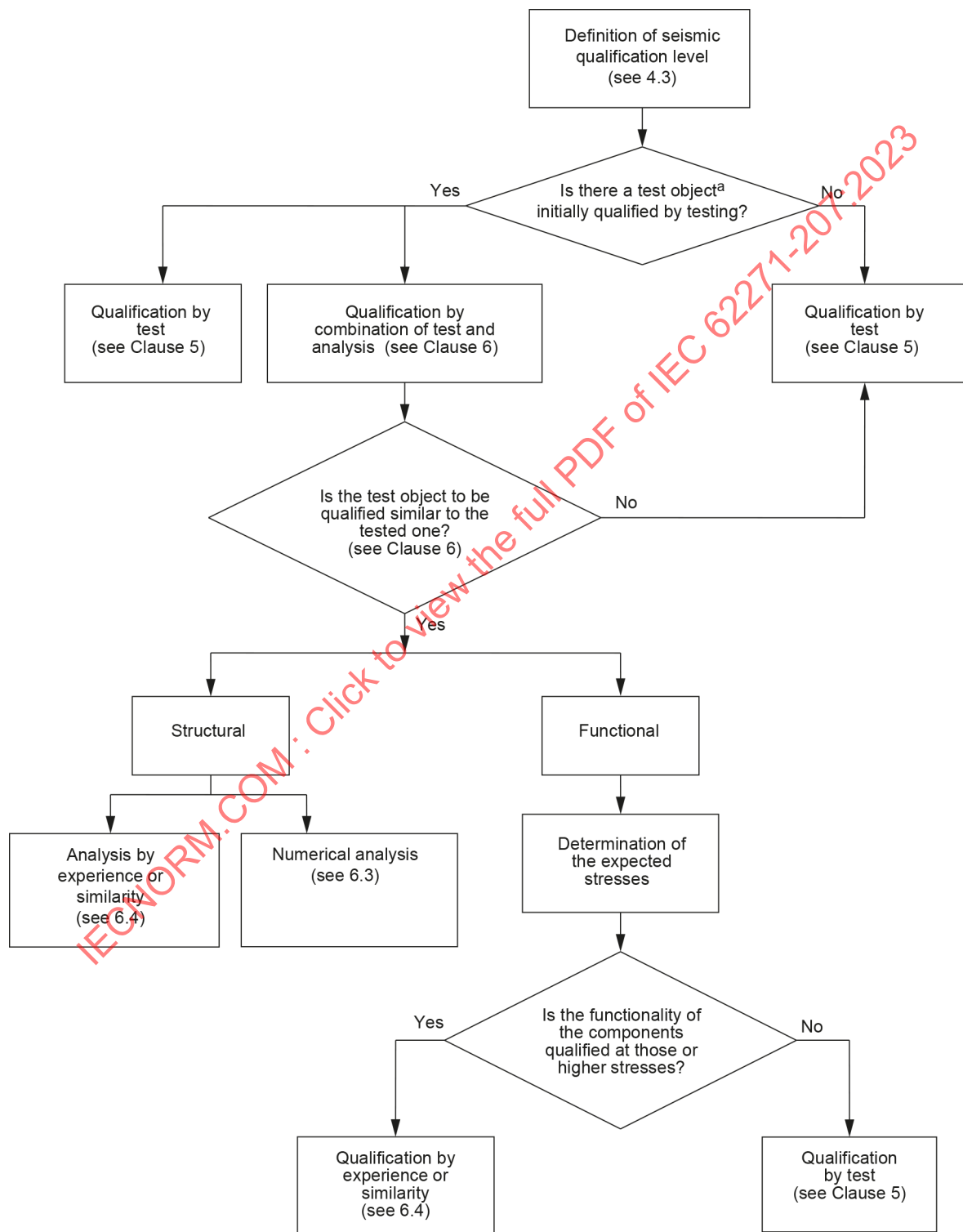
The following basic requirements on the bracing should be taken into account:

- the bracing shall be substantially stiffer than the structure it reinforces so as to be effective;
- the bracing shall not buckle or exhibit a sharply nonlinear behaviour. In particular, any abrupt stiffening under any circumstance is to be avoided;
- permanent deformation in the bracing after a design earthquake is acceptable provided that it does not impair normal functioning of the switchgear and controlgear assembly.

Annex C (informative)

Qualification process flowchart

Figure C.1 shows a qualification process flowchart.



NOTE In any case, the qualification by testing is a possible solution.

^a The reference is the test object initially tested under the seismic loads.

IEC

Figure C.1 – Qualification process flowchart

Bibliography

- [1] IEEE Std 693-2018, *IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations*
- [2] IEC 62271-207:2012, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 207: Seismic qualification for gas-insulated switchgear assemblies for rated voltages above 52 kV*
- [3] IEC TS 62271-210:2013, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 210: Seismic qualification for metal enclosed and solid-insulation enclosed switchgear and controlgear assemblies for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV*
- [4] Sets of acceleration time history records compatible with IEEE Std 693-2018 response spectra, available at:
https://standards.ieee.org/content/dam/ieee-standards/standards/web/download/693-2018_downloads.zip
- [5] IEC TS 61463, *Bushings – Seismic qualification*
- [6] IEC 62155, *Hollow pressurized and unpressurized ceramic and glass insulators for use in electrical equipment with rated voltages greater than 1 000 V*
- [7] IEC 62231, *Composite station post insulators for substations with a.c voltages greater than 1 000 V up to 245 kV – Definitions, test methods and acceptance criteria*
- [8] IEC 61462, *Composite hollow insulators – Pressurized and unpressurized insulators for use in electrical equipment with rated voltage greater than 1 000 V – Definitions, test methods, acceptance criteria and design recommendations*
- [9] IEC TS 62271-318, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 318: DC gas-insulated metal enclosed switchgear for rated voltages including and above 100 kV⁴*

⁴ Under preparation. Stage at the time of publication: IEC ADTS 62271-318:2023.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	38
1 Domaine d'application	41
2 Références normatives	41
3 Termes et définitions	42
4 Exigences pour la qualification sismique	47
4.1 Objectif de qualification sismique	47
4.2 Niveaux de qualification	47
4.3 Choix du niveau de qualification sismique	50
4.3.1 Généralités	50
4.3.2 Estimation du niveau de danger sismique spécifique au site	50
4.3.3 Effet de la réponse et de l'élévation du bâtiment	50
4.3.4 Interaction sol-structure	51
5 Qualification par essai	51
5.1 Généralités	51
5.2 Fixation	52
5.3 Paramètres d'essai	52
5.3.1 Mesurages	52
5.3.2 Plage de fréquences	52
5.3.3 Paramètres pour la recherche des fréquences de résonance	53
5.3.4 Paramètres de l'essai par accélérogramme (essai de charge sismique)	53
5.4 Procédure d'essai	53
5.4.1 Généralités	53
5.4.2 Examen et vérifications fonctionnelles	53
5.4.3 Recherche des fréquences de résonance	54
5.4.4 Essai par accélérogramme (essai de charge sismique)	54
6 Qualification par combinaison d'essais et d'analyses numériques	55
6.1 Généralités	55
6.2 Données dynamiques et fonctionnelles	55
6.3 Analyse numérique	56
6.3.1 Généralités	56
6.3.2 Techniques analytiques de combinaison des composantes sismiques	56
6.3.3 Analyse statique des équipements rigides	57
6.3.4 Analyse des coefficients statiques	57
6.3.5 Analyse dynamique des spectres de réponse	57
6.3.6 Analyse par accélérogramme	58
6.4 Analyse par expérience ou similitude	59
7 Évaluation de la qualification sismique	59
7.1 Combinaison des charges et des contraintes	59
7.2 Critères de validité pour la forme d'onde sismique et l'essai sismique	60
7.3 Évaluation structurelle et fonctionnelle des résultats d'essai	60
7.3.1 Critères communs aux appareillages HT et aux appareillages MT	60
7.3.2 Appareillages HT	61
7.3.3 Appareillages MT	61
7.4 Contraintes admissibles	61
7.5 Critères d'acceptation du modèle	62
7.6 Critères d'acceptation des résultats d'analyse par similitude	62

8	Documentation	62
8.1	Rapport d'essai	62
8.2	Rapport d'analyse	63
8.3	Rapport d'analyse – Analyse par similitude	64
Annexe A (normative)	Caractérisation du spécimen d'essai	65
A.1	Excitation à bas niveau	65
A.1.1	Généralités	65
A.1.2	Méthode d'essai	65
A.1.3	Analyse	65
A.2	Détermination du taux d'amortissement par des essais	65
A.2.1	Généralités	65
A.2.2	Détermination du taux d'amortissement par l'essai d'oscillation libre	65
A.2.3	Détermination du taux d'amortissement par mesurage de la largeur de bande à mi-puissance	67
A.2.4	Détermination du taux d'amortissement par les méthodes d'ajustement de la courbe à la réponse en fréquence	67
A.2.5	Détermination du taux d'amortissement par ajustement de la courbe dans le domaine temporel	67
Annexe B (informative)	Critères pour la tenue sismique des ensembles d'appareillages sous enveloppe	68
B.1	Généralités	68
B.2	Fondations	68
B.3	Méthodes d'ancrage des équipements sur les fondations	68
B.4	Interconnexion des équipements adjacents	69
B.5	Utilisation de renforts sur les structures de l'appareillage	69
Annexe C (informative)	Logigramme du processus de qualification	70
Bibliographie		71
Figure 1 – Spectre de réponse spécifié (SRS) pour le niveau de qualification AG2.5 (ZPA = 0,25 g)		48
Figure 2 – Spectre de réponse spécifié (SRS) pour le niveau de qualification AG5 (ZPA = 0,50 g)		49
Figure 3 – Spectre de réponse spécifié (SRS) pour le niveau de qualification AG10 (ZPA = 1,00 g)		49
Figure A.1 – Abaque pour la détermination du taux d'amortissement équivalent		66
Figure C.1 – Logigramme du processus de qualification		70
Tableau 1 – Niveaux de qualification sismique pour les ensembles d'appareillages – Niveaux de sévérité horizontale		47
Tableau 2 – Comparaison des niveaux de qualification entre les différentes normes		47
Tableau 3 – Récapitulatif des contraintes maximales, des charges, etc.		64
Tableau 4 – Exemple de récapitulatif des contraintes maximales, des charges, etc.		64

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

APPAREILLAGE À HAUTE TENSION –

Partie 207: Qualification sismique des ensembles d'appareillages à isolation gazeuse et des appareillages sous enveloppe métallique et sous enveloppe isolante solide pour des tensions assignées supérieures à 1 kV

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'IEC attire l'attention sur le fait que la mise en application du présent document peut entraîner l'utilisation d'un ou de plusieurs brevets. L'IEC ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à l'applicabilité de tout droit de brevet revendiqué à cet égard. À la date de publication du présent document, l'IEC n'avait pas reçu notification qu'un ou plusieurs brevets pouvaient être nécessaires à sa mise en application. Toutefois, il y a lieu d'avertir les responsables de la mise en application du présent document que des informations plus récentes sont susceptibles de figurer dans la base de données de brevets, disponible à l'adresse <https://patents.iec.ch>. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets.

L'IEC 62271-207 a été établie par le sous-comité 17C: Ensembles, du comité d'études 17 de l'IEC: Appareillage haute tension. Il s'agit d'une Norme internationale.

Cette troisième édition annule et remplace la deuxième édition parue en 2012. Cette édition constitue une révision technique. Elle annule et remplace également la première édition de l'IEC TS 62271-210 parue en 2013, avec laquelle elle a été fusionnée.

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

- a) la tension assignée minimale a été modifiée; elle est passée de 52 kV à une valeur supérieure à 1 kV afin d'inclure les équipements à moyenne tension qui relevaient précédemment du domaine d'application de l'IEC TS 62271-210;
- b) les procédures de qualification ont été harmonisées davantage par rapport aux Annexes A et P révisées de l'IEEE 693-2018 [1]¹, notamment:
 - 1) les spectres de réponse spécifiés du présent document ont été alignés sur les spectres de niveau de performance de l'IEEE 693-2018 et sur les spectres de l'IEC TS 62271-210;
 - 2) une procédure pas à pas a été ajoutée pour aider l'utilisateur du présent document à choisir un niveau de qualification sismique adéquat qui combine l'intégrité sismique à une conception rentable;
 - 3) des techniques analytiques de combinaison des composantes sismiques ont été ajoutées; et
 - 4) le présent document fait référence aux accélérogrammes accessibles au public qui ont été spécialement élaborés pour correspondre aux spectres de l'IEEE 693-2018 aux fins des essais et des analyses, car les spectres du présent document et de l'IEC TS 62271-210 ont une forme identique à celles des spectres de l'IEEE 693;
- c) les procédures d'essai ont fait l'objet de plusieurs améliorations;
- d) un contenu minimal a été ajouté pour les rapports de qualification sismique;
- e) le domaine d'application a été étendu pour couvrir les appareillages à isolation gazeuse à courant continu de tensions supérieures ou égales à 100 kV.

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

Projet	Rapport de vote
17C/902/FDIS	17C/916/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/publications.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 62271, publiées sous le titre général *Appareillage à haute tension*, se trouve sur le site web de l'IEC.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la Bibliographie.

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. À cette date, le document sera

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 62271-207:2023

APPAREILLAGE À HAUTE TENSION –

Partie 207: Qualification sismique des ensembles d'appareillages à isolation gazeuse et des appareillages sous enveloppe métallique et sous enveloppe isolante solide pour des tensions assignées supérieures à 1 kV

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62271 s'applique:

- aux ensembles d'appareillages à isolation gazeuse (GIS)
 - à courant alternatif de tensions assignées supérieures à 52 kV conformes à l'IEC 62271-203; et
 - à courant continu de tensions assignées supérieures ou égales à 100 kV;
 - pour les installations à l'intérieur et à l'extérieur, y compris les charpentes;
- aux ensembles d'appareillages sous enveloppe métallique pour courant alternatif de tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures ou égales à 52 kV conformes à l'IEC 62271-200, montés au sol ou sur le plancher, destinés à être utilisés dans des conditions sismiques; et
- aux ensembles d'appareillages sous enveloppe isolante solide pour courant alternatif de tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures ou égales à 52 kV conformes à l'IEC 62271-201, montés au sol ou sur le plancher, destinés à être utilisés dans des conditions sismiques.

La qualification sismique des ensembles d'appareillages prend en compte les essais des ensembles d'appareillages types, combinés à des méthodes d'analyse. L'interaction mutuelle entre les équipements auxiliaires et de commande directement montés et les ensembles d'appareillages est prise en compte.

La méthodologie de qualification sismique comprend le choix du niveau de qualification sismique (Article 4), les méthodes de qualification par essai (Article 5), la combinaison d'essais et d'analyses (Article 6), les critères d'acceptation (Article 7) et la documentation de qualification sismique (Article 8).

L'Annexe B fournit des recommandations relatives à l'augmentation de la tenue sismique des ensembles d'appareillages. L'Annexe C comporte un logigramme du processus de qualification sismique.

Habituellement, la qualification sismique des ensembles d'appareillages par le fabricant est effectuée si nécessaire.

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 60068-2-47, *Essais d'environnement – Partie 2-47: Essais – Fixation de spécimens pour essais de vibrations, d'impacts et autres essais dynamiques*

IEC 60068-2-57:2013, *Essais d'environnement – Partie 2-57: Essais – Essai Ff: Vibrations – Méthode par accélérogrammes et sinusoïdes modulées*

IEC 60068-3-3:2019, *Essais d'environnement – Partie 3-3: Documentation d'accompagnement et recommandations – Méthodes d'essais sismiques applicables aux matériels*

IEC 60099-4:2014, *Parafoudres – Partie 4: Parafoudres à oxyde métallique sans éclateurs pour réseaux à courant alternatif*

IEC 62271-1:2017, *Appareillage à haute tension – Partie 1: Spécifications communes pour appareillage à courant alternatif*

IEC 62271-200:2021, *Appareillage à haute tension – Partie 200: Appareillage sous enveloppe métallique pour courant alternatif de tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures ou égales à 52 kV*

IEC 62271-201:2014, *Appareillage à haute tension – Partie 201: Appareillage sous enveloppe isolante solide pour courant alternatif de tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures ou égales à 52 kV*

IEC 62271-203:2022, *Appareillage à haute tension – Partie 203: Appareillage sous enveloppe métallique à isolation gazeuse et à courant alternatif de tensions assignées supérieures à 52 kV*

ISO 2041, *Vibrations et chocs mécaniques, et leur surveillance – Vocabulaire*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC 60068-3-3, l'IEC 62271-1, l'IEC 62271-200, l'IEC 62271-201, l'IEC 62271-203 et l'ISO 2041 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 <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>

3.1

appareillage

terme général applicable aux appareils de connexion et à leur combinaison avec des appareils de commande, de mesure, de protection et de réglage qui leur sont associés, ainsi qu'aux ensembles de tels appareils avec les connexions, les accessoires, les enveloppes et les charpentes correspondantes

[SOURCE: IEC 60050-441:1984, 441-11-01]

3.2

appareillage sous enveloppe métallique

ensemble d'appareillage avec une enveloppe métallique externe destinée à être mise à la terre, entièrement terminé, à l'exception des connexions extérieures

[SOURCE: IEC 60050-441:1984, 441-12-04, modifié – La Note a été supprimée.]

3.3

appareillage sous enveloppe métallique à isolation gazeuse

GIS

appareillage de connexion sous enveloppe métallique dans laquelle l'isolation est obtenue, au moins partiellement, par un gaz isolant ou un mélange de gaz autre que l'air à pression atmosphérique

Note 1 à l'article: L'abréviation "GIS" est dérivée du terme anglais développé correspondant "gas-insulated switchgear".

[SOURCE: IEC 60050-441:1984, 441-12-05, modifié – L'abréviation "GIS" a été ajoutée. Les mots "ou un mélange de gaz" ont été ajoutés à la définition, et la note a été supprimée.]

3.4

appareillage sous enveloppe isolante solide

ensemble d'appareillage, avec une enveloppe isolante solide externe, entièrement terminé à l'exception des connexions extérieures

[SOURCE: IEC 62271-201:2014, 3.103 – La Note a été supprimée.]

3.5

appareillage à haute tension

appareillage HT

ensembles d'appareillages à isolation gazeuse (GIS) à courant alternatif de tensions assignées supérieures à 52 kV conformes à l'IEC 62271-203 et à courant continu de tensions assignées supérieures ou égales à 100 kV, pour les installations à l'intérieur et à l'extérieur, y compris les charpentes

Note 1 à l'article: Il est prévu que la future IEC TS 62271-318 [9] régit les appareillages à isolation gazeuse à courant continu de tensions assignées supérieures ou égales à 100 kV.

3.6

appareillage à moyenne tension

appareillage MT

ensembles d'appareillages sous enveloppe métallique pour courant alternatif de tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures ou égales à 52 kV conformes à l'IEC 62271-200 et ensembles d'appareillages sous enveloppe isolante solide pour courant alternatif de tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures ou égales à 52 kV conformes à l'IEC 62271-201, montés au sol ou sur le plancher

3.7

utilisateur

fournisseur, client ou propriétaire final de l'équipement qualifié

3.8

matériau fragile

matériau qui présente une déformation plastique limitée, voire inexistante, avant la rupture

Note 1 à l'article: Une "déformation limitée" doit être considérée comme inférieure à 10 % sur 5 cm au moment de la rupture en tension.

[SOURCE: IEEE 693-2018. Adapté et reproduit avec l'autorisation de l'IEEE. Copyright IEEE 2018. Tous droits réservés.]

3.9

matériau ductile

matériau qui présente une déformation plastique importante avant la rupture

Note 1 à l'article: Une "déformation plastique importante" est définie comme supérieure ou égale à 10 % sur 5 cm au moment de la rupture en tension.

[SOURCE: IEEE 693-2018. Adapté et reproduit avec l'autorisation de l'IEEE. Copyright IEEE 2018. Tous droits réservés.]

3.10

équipement flexible

équipements, structures et composants dont la fréquence de résonance la plus faible est inférieure à 33 Hz

3.11

équipement rigide

équipements, structures et composants dont la fréquence de résonance la plus faible est supérieure à 33 Hz

[SOURCE: IEEE 693-2018. Adapté et reproduit avec l'autorisation de l'IEEE. Copyright IEEE 2018. Tous droits réservés.]

3.12

accélération de la pesanteur

g

accélération due à la pesanteur, qui est égale à $9,81 \text{ m/s}^2$

Note 1 à l'article: Pour les besoins du présent document, la valeur de g est arrondie au nombre entier le plus proche, soit 10 m/s^2 .

3.13

accélération du sol

accélération qui résulte du mouvement d'un séisme donné

3.14

accélération crête du sol

PGA

accélération maximale du sol d'un composant de l'accélérogramme

Note 1 à l'article: L'abréviation "PGA" est dérivée du terme anglais développé correspondant "peak ground acceleration".

3.15

accélération à période nulle

ZPA

accélération spectrale pour les fréquences supérieures à 33 Hz

Note 1 à l'article: L'abréviation "ZPA" est dérivée du terme anglais développé correspondant "zero period acceleration".

3.16

accélération du plancher

accélération d'un plancher de bâtiment particulier (ou d'une fixation de matériel) qui résulte de sa réponse au mouvement du sol dû à un séisme donné

3.17**spectre de réponse**

tracé de la réponse maximale d'une gamme d'oscillateurs à un seul degré de liberté (SFOF, *Single-Degree-Of-Freedom*) amortis de manière identique avec des fréquences différentes, tous les oscillateurs étant soumis à la même excitation initiale

[SOURCE: IEEE 693-2018. Adapté et reproduit avec l'autorisation de l'IEEE. Copyright IEEE 2018. Tous droits réservés.]

3.18**spectre de réponse spécifié**

SRS

spectre de réponse qui définit le niveau exigé des mouvements d'entrée pour un niveau de qualification donné

[SOURCE: IEEE 693-2018. Adapté et reproduit avec l'autorisation de l'IEEE. Copyright IEEE 2018. Tous droits réservés.]

3.19**spectre de réponse du plancher**

spectre de réponse de l'accélérogramme du plancher d'un bâtiment (ou d'une fixation de matériel)

Note 1 à l'article: Les spectres d'accélération de réponse peuvent être calculés pour chacune des trois composantes d'excitation.

3.20**facteur de surélévation**

facteur d'amplification qui tient compte de l'amplification de la charge sismique par rapport au niveau du sol, due à la réponse des bâtiments et des structures

Note 1 à l'article: Un facteur de surélévation est utilisé en lieu et place d'une estimation plus précise de la contribution de la réponse du bâtiment (ou d'une fixation d'un autre matériel) à la réponse de l'équipement qualifié.

3.21**fréquence de résonance**

fréquence qui coïncide avec la fréquence propre d'un système (à laquelle l'amplitude de réponse est une valeur maximale relative)

Note 1 à l'article: À une fréquence de résonance, même de faibles forces d'excitation périodiques peuvent produire d'importantes oscillations de l'amplitude.

[SOURCE: IEEE 693-2018. Adapté et reproduit avec l'autorisation de l'IEEE. Copyright IEEE 2018. Tous droits réservés.]

3.22**méthode de combinaison quadratique complète**

méthode CQC

méthode de combinaison modale, particulièrement utile pour les systèmes dont les fréquences sont rapprochées

[SOURCE: IEEE 693-2018. Adapté et reproduit avec l'autorisation de l'IEEE. Copyright IEEE 2018. Tous droits réservés.]

3.23

amortissement

mécanismes de dissipation de l'énergie dans un système

Note 1 à l'article: En pratique, l'amortissement dépend de nombreux paramètres, tels que le type de structure, le mode de vibration, la déformation, les forces appliquées, la vitesse, les matériaux, le glissement des joints.

[SOURCE: IEC 60068-3-3:2019, 3.8, modifié – La deuxième note à l'article a été supprimée.]

3.23.1

amortissement critique

valeur minimale de l'amortissement visqueux pour lequel un système avec déplacement initial revient à sa position de repos sans oscillation

[SOURCE: IEC 60068-3-3:2019, 3.8.1]

3.23.2

taux d'amortissement

rapport entre la valeur de l'amortissement réel et la valeur de l'amortissement critique d'un système à amortissement visqueux

[SOURCE: IEC 60068-3-3:2019, 3.8.2]

3.24

facteur de directivité

facteur tenant compte de la différence d'amplitude au niveau du sol qui existe normalement entre les accélérations horizontale et verticale résultant d'un tremblement de terre

[SOURCE: IEC 60068-3-3:2019, 3.9]

3.25

charge de fonctionnement normale

force, contrainte ou charge qui résulte du fonctionnement de l'équipement et qu'il est présumé pouvoir raisonnablement se produire en cas de séisme

3.26

niveau de qualification sismique

niveau de l'excitation sismique à laquelle l'équipement doit maintenir l'objectif de qualification sismique

Note 1 à l'article: Le niveau de qualification; dépend de la sismicité de la région dans laquelle l'équipement sera en service.

Note 2 à l'article: Le Tableau 2 fournit des informations pour la comparaison des niveaux sismiques entre les différentes normes.

3.27

accélérogramme

enregistrement de l'accélération, de la vitesse ou du déplacement en fonction du temps

Note 1 à l'article: Cette définition n'est pas identique à celle de l'ISO 2041.

[SOURCE: IEC 60068-3-3:2019, 3.34]

3.28

partie forte d'un accélérogramme

partie d'un accélérogramme comprise entre l'instant où il dépasse pour la première fois 25 % de sa valeur maximale et celui où il descend définitivement sous 25 % d'elle

[SOURCE: IEC 60068-3-3:2019, 3.27]

4 Exigences pour la qualification sismique

4.1 Objectif de qualification sismique

La qualification sismique doit démontrer l'aptitude des ensembles d'appareillages à supporter des contraintes sismiques sans compromettre la fonctionnalité de l'équipement pendant et après les événements sismiques. Elle peut être démontrée par des essais ou par une combinaison d'essais et d'analyses.

4.2 Niveaux de qualification

Le niveau de qualification sismique est défini comme l'amplitude de l'excitation sismique à laquelle l'équipement doit maintenir l'objectif de qualification sismique. La qualification doit être effectuée selon l'un des quatre niveaux de qualification sismique du Tableau 1: faible, AG2.5, AG5 et AG10.

Les niveaux de qualification sont associés à la ZPA du spectre de réponse spécifié. Pour le niveau de qualification faible, la ZPA horizontale est inférieure ou égale à 0,10 g. Pour le niveau de qualification AG2.5, la ZPA est de 0,25 g. Pour le niveau de qualification AG5, la ZPA est de 0,50 g. Pour le niveau de qualification AG10, la ZPA est de 1,00 g.

NOTE Le niveau de qualification sismique AG10 est une exigence très sévère qui peut nécessiter l'adoption de mesures spéciales, comme le renforcement du support ou de l'enveloppe et l'utilisation d'isolateurs renforcés. Il est donc conseillé de faire preuve de prudence lors de l'application de ce niveau de qualification sismique.

Tableau 1 – Niveaux de qualification sismique pour les ensembles d'appareillages – Niveaux de sévérité horizontale

Niveau de qualification	Spectre de réponse spécifié (SRS)	Accélération à période nulle (ZPA)
Faible	---	$\leq 1,0 \text{ m/s}^2$ (0,10 g)
AG2.5	Figure 1	$2,5 \text{ m/s}^2$ (0,25 g)
AG5	Figure 2	$5,0 \text{ m/s}^2$ (0,50 g)
AG10	Figure 3	10 m/s^2 (1,00 g)

Le Tableau 2 compare les niveaux de qualification du présent document et les niveaux de qualification de l'IEC 62271-207:2012, de l'IEC TS 62271-210:2013 et de l'IEEE 693-2018. La ZPA est utilisée comme base pour la comparaison.

Tableau 2 – Comparaison des niveaux de qualification entre les différentes normes

ZPA	Le présent document	IEC 62271-207:2012 [2]	IEC TS 62271-210:2013 [3]	IEEE 693-2018
$\leq 1,0 \text{ m/s}^2$ (0,10 g)	Faible	Faible	-	Faible
$2,5 \text{ m/s}^2$ (0,25 g)	AG2.5	Modéré	-	-
$5,0 \text{ m/s}^2$ (0,50 g)	AG5	Elevé	Niveau de sévérité 1	Niveau de performance modéré
$10,0 \text{ m/s}^2$ (1,00 g)	AG10	-	Niveau de sévérité 2	Niveau de performance élevé

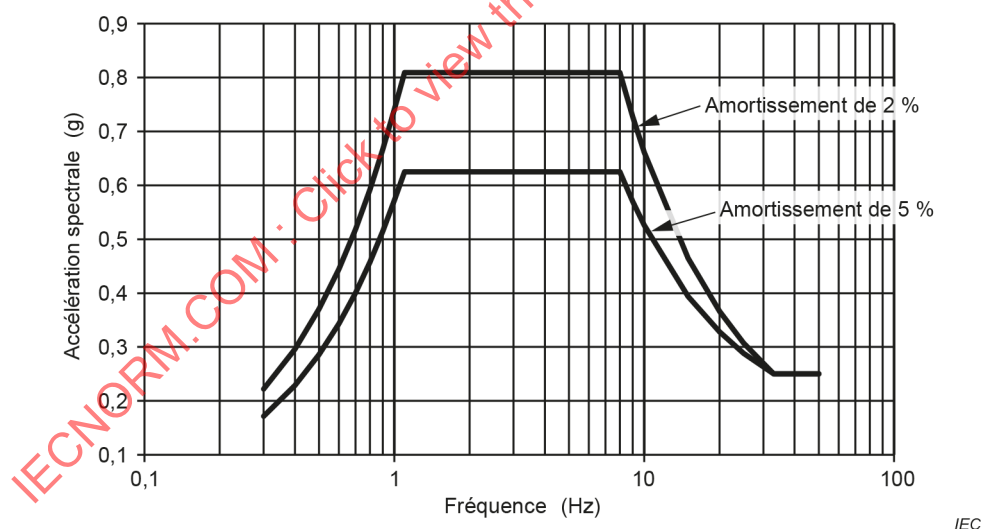
Les niveaux de qualification sismique fixes du Tableau 1 s'appliquent aux fins de normalisation et d'essai. Les ensembles d'appareillages sous enveloppe métallique et sous enveloppe isolante solide sont des exemples types d'appareillages à moyenne tension.

Dans le cas d'applications personnalisées comme les postes GIS à haute tension qui incluent des constellations de modules GIS normalisés combinés à des barres omnibus à isolation gazeuse (GIB, *Gas-Insulated Busduct*) qui peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres et qui sont soutenus par des structures en acier sur mesure, la prise en compte du niveau de danger sismique local peut permettre une conception sûre sur le plan économique et sismique. À cet égard, d'autres niveaux de qualification peuvent être utilisés, comme cela est décrit en 4.3; ces niveaux de qualification sont issus d'exigences utilisateur qui peuvent être fondées sur une étude spécifique sur site ou sur les règlements de normes nationales, en prenant par exemple en compte le type de sol, l'interaction sol-structure, la réponse et l'élévation du bâtiment.

Le choix du niveau de qualification sismique relève de la responsabilité de l'utilisateur et repose normalement sur une évaluation des paramètres géophysiques, du danger sismique, des appréciations du risque et des aspects économiques du site.

Aucune qualification n'est exigée pour un niveau sismique faible tant que les pratiques de construction et de construction antisismique reflètent l'état de la technique. Les spectres de réponse spécifiés recommandés pour les composantes horizontales de l'excitation sismique sont donnés à la Figure 1, à la Figure 2 et à la Figure 3 pour les différents niveaux de qualification sismique. Les courbes se rapportent aux taux d'amortissement de 2 % et de 5 % des ensembles d'appareillages. Si le taux d'amortissement n'est pas connu, un amortissement de 2 % est appliqué pour les appareillages à haute tension ou un amortissement de 5 % est appliqué pour les appareillages à moyenne tension. Les spectres de réponse correspondants relatifs à la composante verticale de l'excitation sont définis sur 80 % de la composante horizontale.

Les spectres de réponse pour différentes valeurs d'amortissement peuvent être calculés à l'aide des formules données de la Figure 1 à la Figure 3.



Accélérations spectrales, S_a (g), pour des fréquences, f (Hz):

$$S_a = 0,572 \beta f \quad \text{pour } 0,0 \leq f \leq 1,1$$

$$S_a = 0,625 \beta \quad \text{pour } 1,1 \leq f \leq 8,0$$

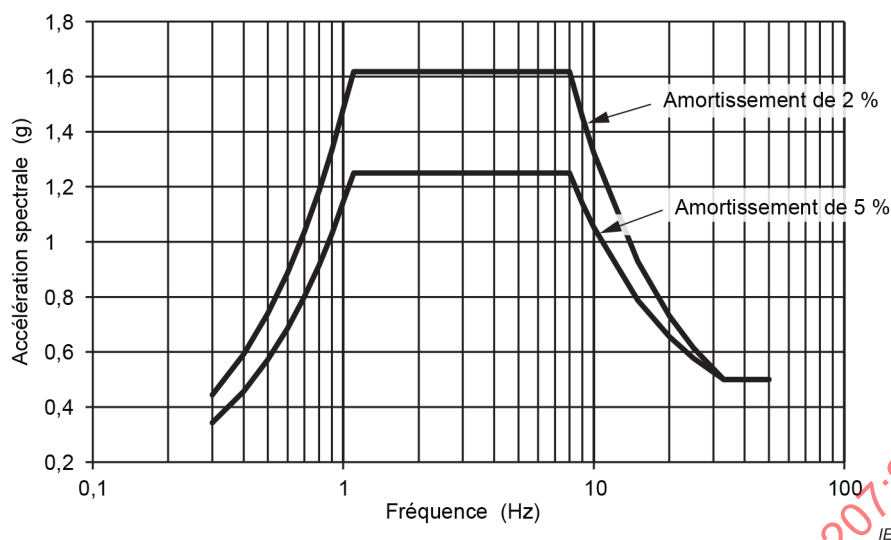
$$S_a = (6,6 \beta - 2,64) / f - 0,2 \beta + 0,33 \quad \text{pour } 8,0 \leq f \leq 33$$

$$S_a = 0,25 \quad \text{pour } f > 33$$

$\beta = (3,21 - 0,68 \ln(d)) / 2,1156$, où d est le pourcentage d'amortissement (2, 5, 10, etc.) et $d \leq 20$ %

[SOURCE: Adapté et reproduit avec l'autorisation de l'IEEE. Copyright IEEE 2018. Tous droits réservés.]

Figure 1 – Spectre de réponse spécifié (SRS) pour le niveau de qualification AG2.5 (ZPA = 0,25 g)



Accélérations spectrales, S_a (g), pour des fréquences, f (Hz):

$$S_a = 1,144 \beta f \quad \text{pour } 0,0 \leq f \leq 1,1$$

$$S_a = 1,25 \beta \quad \text{pour } 1,1 \leq f \leq 8,0$$

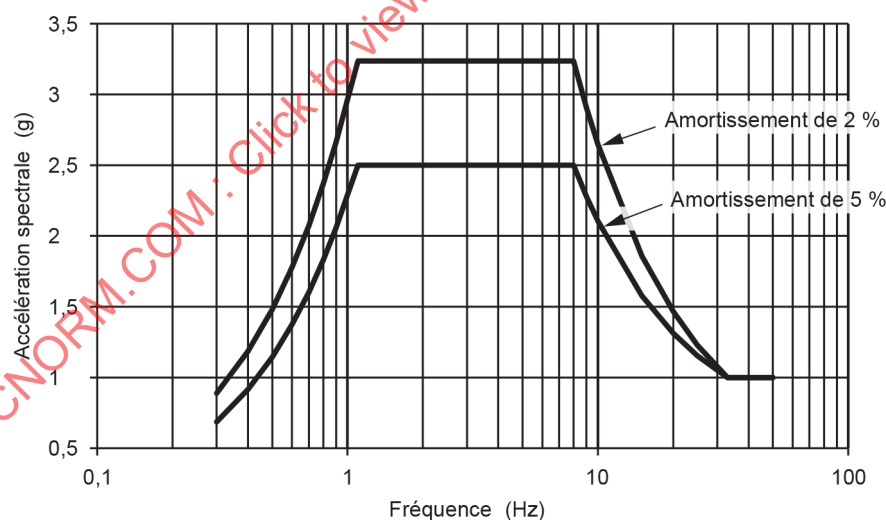
$$S_a = (13,2 \beta - 5,28) / f - 0,4 \beta + 0,66 \quad \text{pour } 8,0 \leq f \leq 33$$

$$S_a = 0,50 \quad \text{pour } f > 33$$

$\beta = (3,21 - 0,68 \ln(d)) / 2,1156$, où d est le pourcentage d'amortissement (2, 5, 10, etc.) et $d \leq 20$ %

[SOURCE: Adapté et reproduit avec l'autorisation de l'IEEE. Copyright IEEE 2018. Tous droits réservés.]

Figure 2 – Spectre de réponse spécifié (SRS) pour le niveau de qualification AG5 (ZPA = 0,50 g)



Accélérations spectrales, S_a (g), pour des fréquences, f (Hz):

$$S_a = 2,288 \beta f \quad \text{pour } 0,0 \leq f \leq 1,1$$

$$S_a = 2,50 \beta \quad \text{pour } 1,1 \leq f \leq 8,0$$

$$S_a = (26,4 \beta - 10,56) / f - 0,8 \beta + 1,32 \quad \text{pour } 8,0 \leq f \leq 33$$

$$S_a = 1,00 \quad \text{pour } f > 33$$

$\beta = (3,21 - 0,68 \ln(d)) / 2,1156$, où d est le pourcentage d'amortissement (2, 5, 10, etc.) et $d \leq 20$ %

[SOURCE: Adapté et reproduit avec l'autorisation de l'IEEE. Copyright IEEE 2018. Tous droits réservés.]

Figure 3 – Spectre de réponse spécifié (SRS) pour le niveau de qualification AG10 (ZPA = 1,00 g)

4.3 Choix du niveau de qualification sismique

4.3.1 Généralités

Le niveau de qualification sismique spécifique au projet est choisi en fonction du niveau de danger sismique spécifique au site décrit en 4.3.2, de l'effet de la réponse et de l'élévation du bâtiment décrit en 4.3.3, ainsi que d'autres facteurs tels que l'interaction sol-structure décrite en 4.3.4 ou des exigences supplémentaires du client.

Le niveau de qualification sismique faible s'applique si le niveau de danger sismique spécifique au site défini en 4.3.2 correspond à une ZPA inférieure ou égale à 0,10 g.

4.3.2 Estimation du niveau de danger sismique spécifique au site

Le niveau de danger sismique spécifique au site est exprimé par la ZPA déterminée par une analyse du danger sismique spécifique au site, le code du bâtiment local ou les ouvrages de référence disponibles. Sauf définition différente de l'utilisateur, il convient que le niveau de danger sismique spécifique au site prenne en compte une période de retour inférieure ou égale à celle prescrite par les réglementations locales.

NOTE Il est courant que les codes du bâtiment définissent une période de retour de 475 ans pour les structures d'importance normale, et qu'ils portent cette période de 1 000 ans à 2 475 ans pour les infrastructures d'importance élevée en appliquant les facteurs d'importance appropriés.

En cas d'estimation du niveau de danger sismique spécifique au site conformément au code du bâtiment local, la procédure suivante peut s'appliquer.

- a) Lire la PGA cartographiée qui correspond à la situation du projet.
- b) Si cela est exigé, appliquer un facteur d'importance qui reflète la catégorie d'importance spécifique au code pour les postes. Cela augmente la période de retour du séisme.
- c) Si cela est exigé, appliquer un facteur de sol qui correspond à la classe de sol du site; cette information est souvent disponible dans le rapport d'étude géotechnique spécifique au projet.
- d) Si cela est exigé, prendre en compte les effets des activités à proximité des failles.
- e) Les codes du bâtiment présument que les structures ont par hypothèse un comportement ductile et appliquent un facteur de réduction de la réponse. Prendre en compte la réponse élastique de l'équipement. Ne pas appliquer de facteur de réduction de la réponse.

4.3.3 Effet de la réponse et de l'élévation du bâtiment

L'amplification de l'accélération du sol qui résulte de l'influence des caractéristiques dynamiques de la réponse des bâtiments et des structures doit être prise en compte selon l'une des méthodes suivantes.

- a) L'utilisateur doit fournir un spectre de réponse du plancher (FRS) qui exprime la réponse spécifique à la position dans le bâtiment au spectre de conception élastique déterminé conformément au code du bâtiment, comme cela est décrit en 4.3.2. À défaut, le spectre peut être développé par le fabricant, avec l'accord de l'utilisateur.
- b) Lorsqu'aucune information n'est disponible, l'amplification peut être prise en appliquant un facteur de surélévation. Les valeurs recommandées sont indiquées dans le Tableau 5 de l'IEC 60068-3-3:2019, mais une spécification applicable peut indiquer d'autres valeurs pour des conditions de site données. Dans tous les cas, il convient que le degré d'amplification de la charge sismique dû à la réponse du bâtiment fasse l'objet d'un accord entre l'utilisateur et le fabricant.

4.3.4 Interaction sol-structure

L'interaction sol-structure se produit lorsque le sol subit une déformation sous les efforts exercés par le système équipement-fondations, en réponse à un séisme. Le système équipement-fondations peut devenir une composante significative des propriétés dynamiques du système équipement-fondations-sol, ce qui peut augmenter ou diminuer le mouvement auquel l'équipement est soumis au cours d'un séisme. L'interaction sol-structure se produit avec certaines combinaisons de masses et de tailles d'équipements, de types et configurations de fondations, ainsi que des propriétés du sol. Les systèmes structurellement couplés tels que les GIS/GIB et leurs charpentes qui s'étendent sur de grandes surfaces sont particulièrement sensibles à l'interaction sol-structure en raison des tassements différentiels et/ou du basculement de certaines parties du système qui repose sur des fondations à simple plateforme structurellement indépendantes. L'interaction sol-structure n'est généralement pas prise en considération dans la conception des équipements des postes, sauf en cas de demande spécifique de l'utilisateur. Elle augmente en présence de fortes accélérations, d'équipements lourds, de centres de gravité élevés, ou de sites meubles.

5 Qualification par essai

5.1 Généralités

La procédure d'essai doit être conforme à l'IEC 60068-3-3, avec la modification suivante: la méthode d'essai par accélérogramme spécifiée dans l'IEC 60068-2-57 doit être suivie. La méthode d'essai par accélérogramme simule avec une plus grande précision les conditions réelles, car le comportement de l'échantillon d'essai n'est pas toujours linéaire.

La qualification doit être réalisée sur un échantillon d'essai représentatif et à la pression assignée. Pour la qualification, un autre gaz peut être utilisé à la pression assignée afin de réduire le plus possible le risque d'émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, l'utilisation d'un autre gaz peut avoir une incidence sur les caractéristiques mécaniques des appareils de connexion. Par conséquent, les réglages d'entraînement (réglage des vannes ou prétension des ressorts, par exemple) peuvent être ajustés afin de respecter les caractéristiques mécaniques d'origine de l'appareil de connexion. En outre, on doit s'assurer que l'utilisation d'un autre gaz n'a pas une incidence considérable sur les caractéristiques dynamiques de l'échantillon d'essai.

La pression assignée est exigée pour réaliser l'essai dans des conditions réalistes. Cependant, il est nécessaire que les laboratoires d'essai en charge des essais sismiques adoptent des mesures de sécurité adéquates.

Il convient que l'essai sismique démontre l'aptitude des ensembles d'appareillages à assurer leurs fonctions exigées pendant et après les charges sismiques sous la forme du spectre de réponse d'essai (SRE) qui enveloppe le SRS. La démonstration doit s'effectuer comme cela est défini en 5.4.

S'ils sont sismiquement et structurellement indépendants, les équipements auxiliaires et de commande ou d'autres parties des équipements peuvent être qualifiés séparément.

Si un échantillon d'essai ne peut pas être soumis à l'essai avec sa charpente (en raison de sa taille, par exemple), la contribution dynamique de la charpente doit être déterminée par analyse et prise en compte lors de l'essai.

NOTE En raison de la taille et du poids des GIS à haute tension, il n'est souvent pas possible de soumettre à l'essai un ensemble d'appareillage complet sur une table vibrante. Le cas échéant, il peut être divisé en sous-ensembles qui seront soumis à l'essai séparément, sous réserve que les parties soumises à l'essai produisent des résultats conservateurs. Ce conservatisme peut être démontré par analyse numérique.

5.2 Fixation

L'échantillon d'essai doit être fixé en condition de service, notamment et dans la mesure du possible, les compensateurs, les supports de nivellement, les traversées, les brides, les enveloppes, les charpentes, les structures d'accès (plateformes, escaliers, etc.) et/ou les amortisseurs (le cas échéant).

L'orientation horizontale de l'échantillon d'essai doit être telle que l'axe d'excitation agisse selon ses deux axes orthogonaux principaux.

Les fixations ou connexions exigées uniquement pour les besoins des essais ne doivent avoir aucune incidence sur le comportement dynamique de l'échantillon d'essai (les plaques d'adaptation à utiliser entre l'équipement et la table vibrante doivent être rigides, par exemple).

La méthode de fixation de l'échantillon d'essai doit être documentée et doit comprendre une description de toutes les fixations et de toutes les connexions d'interface conformément à l'IEC 60068-2-47.

5.3 Paramètres d'essai

5.3.1 Mesurages

Il convient d'effectuer les mesurages conformément au 5.3 de l'IEC 60068-3-3:2019.

Au moins les signaux suivants doivent être enregistrés:

- a) accélérations au niveau de la table vibrante;
- b) accélérations aux emplacements représentatifs de l'objet d'essai:
 - 1) au niveau des composants critiques:
 - i) composants où les flèches maximales et les déplacements relatifs significatifs sont attendus;
 - ii) composants de masses lourdes;
 - 2) à proximité du centre de gravité, si possible;
 - 3) sur au moins un point de mesurage, directement connecté à la structure principale (habituellement sur le dessus de l'appareillage);
- c) pour les équipements de tension supérieure à 52 kV: déformations sur les éléments critiques (traversées, brides, enveloppes et charpentes, par exemple).

5.3.2 Plage de fréquences

Conformément au 5.3 de l'IEC 60068-2-57:2013, la plage de fréquences doit être comprise entre 1 Hz et au moins 35 Hz, car les fréquences prédominantes lors des séismes se situent dans cette plage. La plage de fréquences est appliquée lors de l'essai de recherche des fréquences de résonance et de la génération d'ondes sismiques artificielles.

En raison de la limitation de certaines tables vibrantes, il n'est pas nécessaire d'envelopper le SRS aux fréquences inférieures à 70 % de la fréquence de résonance la plus faible de l'équipement ou à 1 Hz si cette fréquence est plus élevée.

NOTE Dans le cas particulier des spécimens d'essai de fréquences propres inférieures à 1 Hz, comme les traversées composites SF6-air, la plage de fréquences peut être adaptée en conséquence pour permettre un essai approprié du spécimen.

5.3.3 Paramètres pour la recherche des fréquences de résonance

L'essai de recherche des fréquences de résonance doit être effectué conformément au 15.1 de l'IEC 60068-3-3:2019.

L'accélération recommandée pendant la recherche des fréquences de résonance est de 0,1 g. Cette valeur peut être abaissée à 0,05 g en cas de résonances aiguës. La recherche doit être effectuée en procédant à des balayages sinusoïdaux successifs le long des trois axes principaux, à une vitesse maximale de 1 octave/min.

5.3.4 Paramètres de l'essai par accélérogramme (essai de charge sismique)

Les axes d'essai doivent être choisis conformément à l'Article 10 de l'IEC 60068-3-3:2019.

Même si des essais biaxiaux et triaxiaux étaient réalisés par le passé, le présent document recommande de procéder à des essais triaxiaux.

NOTE Lorsque les essais triaxiaux sont difficiles à réaliser en raison des restrictions imposées par l'installation d'essai, des essais biaxiaux peuvent être adoptés en lieu et place des essais triaxiaux. Pour plus d'informations, se reporter au 10.3 de l'IEC 60068-3-3:2019.

Le niveau de qualification doit être choisi conformément à l'Article 4.

Les spectres de réponse pour différentes valeurs d'amortissement peuvent être calculés à l'aide des formules données de la Figure 1 à la Figure 3.

La durée totale de l'accélérogramme doit être d'au moins 30 s, et la partie forte ne doit pas être inférieure à 20 s.

5.4 Procédure d'essai

5.4.1 Généralités

La séquence d'essai doit être la suivante:

- a) vérifications fonctionnelles avant les essais, comme cela est décrit en 5.4.2;
- b) recherche des fréquences de résonance, comme cela est décrit en 5.4.3 (exigée pour déterminer les fréquences et les taux d'amortissement critiques aux fins des essais et/ou analyses);
- c) essai par accélérogramme (essai de charge sismique), comme cela est décrit en 5.4.4;
- d) recherche des fréquences de résonance, comme cela est décrit en 5.4.3;
- e) vérifications fonctionnelles après les essais, comme cela est décrit en 5.4.2.

5.4.2 Examen et vérifications fonctionnelles

Les caractéristiques fonctionnelles ou les réglages suivants doivent être enregistrés ou évalués (le cas échéant) avant et après les essais à la tension d'alimentation et à la pression de fonctionnement assignées:

- a) examen visuel;
- b) durée de fermeture, durée d'ouverture et caractéristiques de déplacement mécanique des appareils de connexion, comme cela est spécifié par le fabricant, le cas échéant;
- c) fonctionnement de toute partie débrochable ou amovible;
- d) étanchéité aux gaz et/ou aux liquides, le cas échéant;
- e) mesurage de résistance du circuit principal;

- f) essai de tension de tenue à la fréquence industrielle pour vérifier l'état du circuit principal (tous les appareils de connexion étant en position fermée) entre la phase et la terre et entre les phases, conformément au 7.2.12 de l'IEC 62271-1:2017 et/ou au 7.2.12 de l'IEC 62271-203:2022;
- g) essai de tension de tenue à la fréquence industrielle pour vérifier l'état des appareils de connexion entre les contacts ouverts de l'appareil de connexion et/ou la distance de sectionnement, conformément au 7.2.12 de l'IEC 62271-1:2017 et/ou au 7.2.12 de l'IEC 62271-203:2022;
- h) essais individuels de série des circuits auxiliaires et de commande, conformément au 8.3 de l'IEC 62271-200:2021, au 7.2 de l'IEC 62271-201:2014, au 8.3 de l'IEC 62271-203:2022;
- i) essais des parafoudres, conformément à l'Article G.2 de l'IEC 60099-4:2014, si la qualification sismique (individuelle) de ces composants est demandée.

En raison des limites des laboratoires, une partie ou la totalité des essais fonctionnels peut être réalisée dans les installations d'essais du fabricant (utilisées pour les essais individuels de série) ou dans des laboratoires d'essai appropriés. Il convient d'accorder une attention particulière aux effets du désassemblage, du transport et du réassemblage des modules d'équipement soumis à l'essai sur les résultats d'essai ultérieurs.

Pour les appareillages à isolation gazeuse à courant continu de tensions assignées supérieures ou égales à 100 kV, le 5.4.2 s'applique, avec l'ajout suivant: à la place des éléments f) et g), un essai de vérification des conditions diélectriques en courant continu doit être effectué par accord entre le fabricant et l'utilisateur.

5.4.3 Recherche des fréquences de résonance

L'essai de recherche des fréquences de résonance doit être effectué conformément au 5.3.3.

5.4.4 Essai par accélérogramme (essai de charge sismique)

L'essai par accélérogramme doit être effectué conformément à l'IEC 60068-2-57, avec les paramètres définis en 5.3.4.

Pendant l'essai sismique, les paramètres suivants doivent être enregistrés en plus de ceux du 5.3.1:

- continuité électrique du circuit principal (si cela s'applique);
- continuité électrique du circuit auxiliaire et de commande (contacts NO/NC représentatif).

Pendant l'essai, les circuits de commande doivent être mis sous tension à la tension assignée.

Une session d'essai est exigée. Au début, tous les appareils de connexion doivent être en condition de service (disjoncteurs fermés, sectionneurs fermés, sectionneurs de terre ouverts, par exemple). Les conditions d'essai dépendent des appareils de connexion et de leur aptitude à effectuer des manœuvres pendant la partie forte des mouvements sur l'accélérogramme:

- lors de l'essai de fonctionnement, chaque disjoncteur doit réaliser au moins une séquence de manœuvres (ouverture-fermeture-ouverture) au milieu de la durée d'essai totale et, par conséquent, dans la partie forte des mouvements;
- pour les équipements de tension inférieure ou égale à 52 kV: les autres appareils de connexion doivent fonctionner comme cela est spécifié (ouverture pour les interrupteurs à coupure en charge, par exemple);
- il n'est pas nécessaire que tous les autres appareils de connexion fonctionnent pendant l'essai par accélérogramme.

NOTE 1 Les disjoncteurs assurent le pouvoir de coupure, y compris lors des événements sismiques. Les autres appareils de connexion apportent une démonstration uniquement pour la fonctionnalité spécifiée par le fabricant.

NOTE 2 Une nouvelle session d'essai peut éventuellement être réalisée, l'ensemble des appareils de connexion étant en position de service, sans manœuvre. La réalisation de cet essai est conforme aux procédures définies dans l'IEEE 693.

NOTE 3 Si l'essai est destiné à servir de base à une analyse numérique, d'autres enregistrements peuvent être réalisés afin de fournir des données pertinentes. Ces enregistrements sont les suivants:

- flèche des composants là où des déplacements significatifs sont attendus;
- déformations sur les éléments critiques (traversées, brides, enveloppes et charpentes, par exemple);
- accélération à d'autres positions de l'échantillon d'essai.

NOTE 4 En règle générale, pour les équipements de tensions inférieures ou égales à 52 kV, la séquence de manœuvres suivante est appliquée: O-5 s-F-5 s-O.

Les critères d'évaluation de la validité de l'essai et des résultats d'essai sont respectivement fournis en 7.2 et en 7.3.

6 Qualification par combinaison d'essais et d'analyses numériques

6.1 Généralités

Cette méthode peut être utilisée:

- pour qualifier des ensembles d'appareillages déjà soumis à des essais dans différentes conditions sismiques;
- pour qualifier des ensembles d'appareillages similaires à d'autres ensembles déjà soumis à l'essai, mais qui ont subi des modifications qui influencent leur comportement dynamique (modification ou extension du montage ou de la masse des composants, par exemple);
- pour qualifier les ensembles d'appareillages dont les données dynamiques et fonctionnelles sont connues (voir 6.2); et
- pour qualifier des ensembles d'appareillages qui ne peuvent pas être qualifiés par des essais (en raison de leur taille, de leur poids ou de leur complexité, par exemple).

Pour les appareillages MT, la partie structurelle est essentiellement constituée de la structure incluant les renforts, les cadres, les traverses et les fixations qui transmettent l'ensemble des charges sismiques entre l'équipement et le plancher. Le comportement dynamique de l'équipement ou de l'ensemble dépend de la partie structurelle. Deux ou plusieurs ensembles peuvent être considérés comme structurellement similaires lorsqu'ils présentent le même schéma structurel et les mêmes types de connexions; ils peuvent être différents sur le plan de la répartition de la masse et/ou des dimensions. La partie fonctionnelle est constituée de composants qui sont considérés comme des sous-groupes logiques des fonctions d'équipement généralement organisés et agencés comme des dispositifs physiques, des modules ou des sous-ensembles qui peuvent être séparés de l'équipement et qui peuvent être fixés sur un dispositif d'essai en utilisant les mêmes interfaces mécaniques et électriques, puis soumis à l'essai en tant qu'unités autonomes.

6.2 Données dynamiques et fonctionnelles

Les données dynamiques (taux d'amortissement, fréquences propres, contraintes des éléments critiques en fonction de l'accélération d'entrée) utilisées pour les analyses doivent être obtenues par l'une des méthodes suivantes:

- a) essai dynamique d'un spécimen d'essai similaire (Article 5);
- b) essai dynamique à des niveaux d'essai inférieurs;
- c) détermination des fréquences propres et des taux d'amortissement par d'autres essais, tels que les essais d'oscillation libre ou les essais d'excitation à bas niveau (voir Annexe A).

Les données fonctionnelles peuvent être fournies par un essai effectué précédemment sur un spécimen d'essai similaire.

Pour les appareillages MV, si un comportement non linéaire de la structure est détecté au cours de l'essai, l'analyse doit être réévaluée par rapport aux résultats de l'essai en appliquant une rigidité et un amortissement élastiques équivalents. La non-linéarité est essentiellement due à l'amortissement, qui peut être relativement différent et supérieur à celui mesuré à bas niveau, ainsi qu'à la rigidité, qui peut varier sous l'augmentation des charges, ce qui peut donc modifier les fréquences de résonance.

6.3 Analyse numérique

6.3.1 Généralités

La procédure générale est la suivante.

a) Modèle mathématique

À partir des informations techniques relatives aux caractéristiques de conception du poste, un modèle tridimensionnel du spécimen d'essai doit être réalisé. Un tel modèle doit prendre en compte la présence de compartiments réels et de leurs charpentes. Il doit avoir une sensibilité suffisante pour décrire la répartition de la masse et de la rigidité afin de simuler le comportement dynamique du spécimen d'essai dans la plage de fréquences étudiée.

b) Étalonnage du modèle

À l'aide des données expérimentales indiquées en 6.2, le modèle mathématique doit être étalonné en vue d'évaluer ses caractéristiques dynamiques. Du fait de la modularité des ensembles d'appareillages, le modèle mathématique réalisé et étalonné du spécimen d'essai peut être étendu au poste complet sous réserve que les bonnes adaptations, relatives aux différences structurelles existantes des différents modules, soient prises en compte.

c) Réponse de l'analyse

La réponse, dans la plage de fréquences indiquée en 5.3.2, doit être déterminée selon l'une des méthodes décrites du 6.3.3 au 6.3.6 D'autres méthodes peuvent être utilisées si celles-ci sont dûment justifiées.

d) Conclusion sur le comportement mécanique sismique

Les critères d'acceptation indiqués à l'Article 7 doivent être appliqués afin d'évaluer la validité du modèle et l'intégrité structurelle de l'ensemble analysé.

6.3.2 Techniques analytiques de combinaison des composantes sismiques

Pour tenir compte des effets de l'accélération orthogonale, une technique analytique de combinaison orthogonale doit être utilisée. La méthode SRSS² combine les contraintes sismiques à un emplacement particulier ou combine les forces sismiques locales qui agissent sur un élément particulier d'un système structurel. Avec cette méthode, les contraintes ou les forces locales associées à chaque réponse sismique orthogonale maximale exigée sont déterminées séparément, puis combinées en calculant chaque valeur au carré, en les additionnant de façon algébrique, puis en déterminant la racine carrée de cette somme. Le résultat de ce calcul est la contrainte ou la force sismique maximale au niveau de l'emplacement ou de l'élément considéré, laquelle doit ensuite être appliquée selon l'axe qui génère les contraintes d'équipement les plus sévères.

Au lieu de la combinaison SRSS de trois composantes sismiques orthogonales, une règle de combinaison 100/40/40 peut être utilisée (voir l'IEEE 693-2018, A.1.4.4). La règle de combinaison 100/40/40 s'applique en développant trois ensembles de réponses (forces ou déplacements) dans lesquels 100 % des effets de chaque composante sismique sont examinés successivement et combinés de façon absolue avec 40 % des effets des deux autres composantes sismiques. L'équipement et chaque élément structurel sont conçus pour la réponse la plus critique qui résulte de l'un de ces trois ensembles de forces. La règle de combinaison 100/40/40 a pour objet de prendre en compte la faible probabilité que les trois composantes sismiques entraînent la réponse maximale d'un élément structurel donné au même instant.

² Square Root of the Sum of Squares, racine carrée de la somme des carrés.

6.3.3 Analyse statique des équipements rigides

Pour les équipements rigides, avec toutes les fréquences modales supérieures à 33 Hz, la méthode d'analyse statique peut s'appliquer.

Les forces appliquées sur chaque composant de l'équipement doivent être obtenues en multipliant les valeurs de la masse du composant par les valeurs ZPA horizontales et verticales qui correspondent au niveau de qualification sismique applicable dans le sens des axes orthogonaux correspondants. La force résultante doit être appliquée au centre de gravité du composant. Une partie peut être décomposée en composants de plus petite taille afin de mieux représenter la répartition de la masse de la pièce.

Les forces sismiques verticales doivent agir simultanément avec les deux forces sismiques horizontales. Les forces horizontales sont appliquées dans le sens des axes orthogonaux. Les trois forces au centre de gravité de chaque composant doivent être appliquées à l'aide de l'une des techniques analytiques de combinaison des composantes sismiques définies en 6.3.2, puis combinées à la charge permanente et aux autres charges définies en 7.1.

6.3.4 Analyse des coefficients statiques

L'analyse des coefficients statiques s'applique généralement aux équipements qui présentent quelques modes importants dans la plage sismique. Il s'agit d'une technique relativement simple qui procure un niveau de conservatisme supplémentaire. Aucune détermination des fréquences propres n'est effectuée.

La réponse d'accélération de l'équipement doit être déterminée à l'aide de la valeur de crête maximale des spectres SRS à une valeur d'amortissement de 2 % pour l'appareillage HV ou de 5 % pour l'appareillage MV, sauf si une valeur d'amortissement supérieure est justifiée par l'un des essais spécifiés à l'Article A.2. Les forces sismiques sur chaque composant de l'équipement sont déterminées en multipliant les valeurs de la masse par la valeur de crête maximale des spectres SRS, multipliée par le coefficient statique. Un coefficient statique de 1,5 doit être utilisé, 80 % de la valeur horizontale étant appliquée sur l'axe vertical. Le facteur de 1,5 représente les effets multimodes. La force résultante doit être répartie sur les composants proportionnellement à la répartition de leurs masses.

La contrainte en tout point de l'équipement doit être déterminée en combinant les trois contraintes directionnelles orthogonales (au point concerné) à l'aide de l'une des techniques analytiques de combinaison des composantes sismiques définies en 6.3.2 au niveau de ce point, puis en combinant l'ensemble des charges permanentes et autres charges définies en 7.1, de manière à obtenir la contrainte maximale au niveau de ce point. Les points de contrainte maximale doivent être identifiés.

6.3.5 Analyse dynamique des spectres de réponse

Lorsque l'analyse dynamique est effectuée selon la méthode des spectres de réponse, les éléments ci-dessous doivent s'appliquer.

La réponse totale de l'ensemble des modes dans tous les axes doit être déterminée en combinant toutes les composantes de la réponse modale agissant dans cet axe au moyen de la technique SRSS, sauf si les fréquences de modes diffèrent de moins de 10 % du mode inférieur. Ces modes rapprochés sont ensuite ajoutés directement, puis les modes résultants ainsi que les modes restants sont ajoutés à l'aide de la méthode SRSS. À défaut, la réponse modale totale dans tous les axes peut être déterminée en appliquant la technique CQC³ à toutes les composantes des réponses modales qui agissent dans cet axe. Un nombre suffisant de modes doit être inclus pour fournir une représentation adéquate de la réponse dynamique de l'équipement. Les critères d'acceptation pour établir une suffisance dans un axe particulier doivent résider dans le fait que la masse participante cumulative des modes étudiés doit

³ Combinaison quadratique complète

représenter au moins 90 % de la somme des masses effectives de tous les modes. Si le modèle mathématique comporte plusieurs fréquences de résonance au-dessus de 33 Hz et que cela empêche d'atteindre les critères d'acceptation dans un axe d'excitation orthogonal (comme cela peut être le cas avec l'accélération verticale du sol pour l'équipement rigide vertical), alors les effets des données d'entrée orthogonales peuvent être simulés comme suit:

- a) déterminer la masse effective restante dans un axe donné;
- b) pour chaque composante, appliquer une force statique égale à la masse du composant multiplié par le pourcentage de masse manquante, multiplié par la ZPA;
- c) calculer les contraintes, les réactions, etc. à partir de ces forces;
- d) pour chaque axe, combiner les contraintes, les réactions, etc. de l'analyse dynamique à celles obtenues lors de l'analyse ci-dessus à l'aide de la méthode SRSS.

Les techniques de combinaison des composantes sismiques définies en 6.3.2 peuvent être utilisées.

Pour un point spécifique, les résultats dynamiques calculés ci-dessus doivent être combinés à l'ensemble des charges permanentes et autres charges définies en 7.1, de manière à obtenir la contrainte maximale sur ce point. Les points de contrainte maximale doivent être identifiés.

Une valeur d'amortissement inférieure ou égale à 2 % pour l'appareillage HT ou inférieure ou égale à 5 % pour l'appareillage MT doit être utilisée pour l'analyse dynamique, sauf si une valeur d'amortissement supérieure est justifiée par l'un des essais spécifiés à l'Article A.2.

6.3.6 Analyse par accélérogramme

Cette méthode est un outil puissant qui permet d'évaluer plusieurs équipements interconnectés ou d'étudier un équipement trop volumineux pour être soumis à l'essai. Un accélérogramme qui représente un événement sismique peut être appliqué à un modèle d'éléments finis linéaires ou non linéaires afin de calculer les contraintes, les déformations et les charges instantanées.

Même si le présent document ne tolère aucune réponse postélastique de l'équipement (à savoir des plastifications) pour la qualification par analyse (voir 7.4), une modélisation par éléments finis non linéaires est admise afin d'étudier les autres types de non-linéarités comme la modélisation des contacts, des amortisseurs ou des compensateurs qui agissent comme des ressorts et s'activent lorsque la force exercée dépasse un certain seuil.

Lorsque l'analyse sismique est réalisée selon la méthode par accélérogramme, les accélérogrammes qui représentent l'accélération des mouvements du sol doivent être conformes aux SRS (voir Tableau 1). Les instructions relatives à la mise en correspondance et à l'enveloppe spectrales des SRS peuvent être consultées dans l'IEC 60068-3-3. Il est recommandé d'utiliser:

- a) 3 ensembles différents d'accélérogrammes de base compatibles et de prendre en compte l'enveloppe des réponses dues à chaque ensemble unique pour la qualification; ou
- b) 7 ensembles différents (ou plus) d'accélérogrammes de base compatibles et de prendre en compte la moyenne des réponses dues à chaque ensemble unique pour la qualification.

À défaut, l'analyse par accélérogramme peut être réalisée en utilisant l'un des accélérogrammes à trois composantes développés pour les spectres de réponse spécifiés exigés par niveau de performance de l'IEEE 693-2018 qui, comme cela est indiqué dans le Tableau 2, sont identiques aux spectres SRS de même ZPA du présent document. Les accélérogrammes de base empirique et à synthèse numérique sont accessibles au public sur le site web de l'IEEE [4].

NOTE Les accélérogrammes accessibles au public sont également accompagnés d'une documentation et d'instructions d'utilisation complètes.