



IEC 61400-24

Edition 2.0 2019-07

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Wind energy generation systems –
Part 24: Lightning protection**

**Systèmes de génération d'énergie éolienne –
Partie 24: Protection contre la foudre**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 27.180

ISBN 978-2-8322-8688-3

**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

CONTENTS

FOREWORD.....	11
1 Scope.....	13
2 Normative references	13
3 Terms and definitions	15
4 Symbols and units	21
5 Abbreviated terms	24
6 Lightning environment for wind turbine	25
6.1 General.....	25
6.2 Lightning current parameters and lightning protection levels (LPL).....	25
7 Lightning exposure assessment.....	26
7.1 General.....	26
7.2 Assessing the frequency of lightning affecting a single wind turbine or a group of wind turbines.....	28
7.2.1 Categorization of lightning events	28
7.2.2 Estimation of average number of lightning flashes to a single or a group of wind turbines	28
7.2.3 Estimation of average annual number of lightning flashes near the wind turbine (N_M)	31
7.2.4 Estimation of average annual number of lightning flashes to the service lines connecting the wind turbines (N_L)	31
7.2.5 Estimation of average annual number of lightning flashes near the service lines connecting the wind turbine (N_I)	32
7.3 Assessing the risk of damage	33
7.3.1 Basic equation	33
7.3.2 Assessment of risk components due to flashes to the wind turbine (S1).....	34
7.3.3 Assessment of the risk component due to flashes near the wind turbine (S2)	34
7.3.4 Assessment of risk components due to flashes to a service line connected to the wind turbine (S3)	35
7.3.5 Assessment of risk component due to flashes near a service line connected to the wind turbine (S4)	35
8 Lightning protection of subcomponents.....	36
8.1 General.....	36
8.1.1 Lightning protection level (LPL)	36
8.1.2 Lightning protection zones (LPZ)	37
8.2 Blades	37
8.2.1 General	37
8.2.2 Requirements	37
8.2.3 Verification	38
8.2.4 Protection design considerations	38
8.2.5 Test methods.....	41
8.3 Nacelle and other structural components	42
8.3.1 General	42
8.3.2 Hub	42
8.3.3 Spinner.....	42
8.3.4 Nacelle	43
8.3.5 Tower	43
8.3.6 Verification methods	44

8.4	Mechanical drive train and yaw system	44
8.4.1	General	44
8.4.2	Bearings	44
8.4.3	Hydraulic systems	45
8.4.4	Spark gaps and sliding contacts	46
8.4.5	Verification	46
8.5	Electrical low-voltage systems and electronic systems and installations	47
8.5.1	General	47
8.5.2	Equipotential bonding within the wind turbine	51
8.5.3	LEMP protection and immunity levels	52
8.5.4	Shielding and line routing	53
8.5.5	SPD protection	54
8.5.6	Testing methods for system immunity tests	58
8.6	Electrical high-voltage (HV) power systems	58
9	Earthing of wind turbines	60
9.1	General	60
9.1.1	Purpose and scope	60
9.1.2	Basic requirements	60
9.1.3	Earth electrode arrangements	60
9.1.4	Earthing system impedance	61
9.2	Equipotential bonding	61
9.2.1	General	61
9.2.2	Lightning equipotential bonding for metal installations	61
9.3	Structural components	62
9.3.1	General	62
9.3.2	Metal tubular type tower	62
9.3.3	Metal reinforced concrete towers	62
9.3.4	Lattice tower	62
9.3.5	Systems inside the tower	63
9.3.6	Concrete foundation	63
9.3.7	Rocky area foundation	63
9.3.8	Metal mono-pile foundation	64
9.3.9	Offshore foundation	64
9.4	Electrode shape dimensions	64
9.5	Execution and maintenance of the earthing system	65
10	Personal safety	65
11	Documentation of lightning protection system	67
11.1	General	67
11.2	Documentation necessary during assessment for design evaluation	67
11.2.1	General	67
11.2.2	General documentation	67
11.2.3	Documentation for rotor blades	68
11.2.4	Documentation of mechanical systems	68
11.2.5	Documentation of electrical and electronic systems	68
11.2.6	Documentation of earthing and bonding systems	68
11.2.7	Documentation of nacelle cover, hub and tower lightning protection systems	68
11.3	Site-specific information	69
11.4	Documentation to be provided in the manuals for LPS inspections	69

11.5	Manuals	69
12	Inspection of lightning protection system	69
12.1	Scope of inspection	69
12.2	Order of inspections.....	70
12.2.1	General	70
12.2.2	Inspection during production of the wind turbine	70
12.2.3	Inspection during installation of the wind turbine.....	70
12.2.4	Inspection during commissioning of the wind turbine and periodic inspection.....	70
12.2.5	Inspection after dismantling or repair of main parts.....	71
12.3	Maintenance	72
Annex A	(informative) The lightning phenomenon in relation to wind turbines	73
A.1	Lightning environment for wind turbines	73
A.1.1	General	73
A.1.2	The properties of lightning	73
A.1.3	Lightning discharge formation and electrical parameters.....	73
A.1.4	Cloud-to-ground flashes	74
A.1.5	Upward initiated flashes.....	80
A.2	Lightning current parameters relevant to the point of strike	83
A.3	Leader current without return stroke.....	84
A.4	Lightning electromagnetic impulse, LEMP, effects.....	84
Annex B	(informative) Lightning exposure assessment	85
B.1	General.....	85
B.2	Methodology to estimate the average annual flashes or strokes to the wind turbines of a wind farm and upward lightning activity in wind turbines	85
B.2.1	General	85
B.2.2	Methodology to determine average annual flashes to turbines of a wind farm estimation by increase of the location factor to consider upward lightning from wind turbines	85
B.2.3	Upward lightning percentage in wind farms.....	89
B.3	Explanation of terms	89
B.3.1	Damage and loss.....	89
B.3.2	Composition of risk	91
B.3.3	Assessment of risk components.....	91
B.3.4	Frequency of damage	92
B.3.5	Assessment of probability, P_X , of damage	93
B.4	Assessing the probability of damage to the wind turbine	94
B.4.1	Probability, P_{AT} , that a lightning flash to a wind turbine will cause dangerous touch and step voltage	94
B.4.2	Probability, P_{AD} , that a lightning flash to the wind turbine will cause injury to an exposed person on the structure	95
B.4.3	Probability, P_B , that a lightning flash to the wind turbine will cause physical damage.....	96
B.4.4	Probability, P_C , that a lightning flash to the wind turbine will cause failure of internal systems.....	97
B.4.5	Probability, P_M , that a lightning flash near the wind turbine will cause failure of internal systems.....	97
B.4.6	Probability, P_U , that a lightning flash to a service line will cause injury to human beings owing to touch voltage	97
B.4.7	Probability, P_V , that a lightning flash to a service line will cause physical damage.....	98

B.4.8	Probability, P_W , that a lightning flash to a service line will cause failure of internal systems	99
B.4.9	Probability, P_Z , that a lightning flash near an incoming service line will cause failure of internal systems.....	99
B.4.10	Probability P_P that a person will be in a dangerous place	100
B.4.11	Probability P_e that equipment will be exposed to damaging event.....	100
B.5	Assessing the amount of loss L_X in a wind turbine	100
B.5.1	General	100
B.5.2	Mean relative loss per dangerous event.....	100
Annex C (informative)	Protection methods for blades.....	102
C.1	General.....	102
C.1.1	Types of blades and types of protection methods for blades	102
C.1.2	Blade damage mechanism	103
C.2	Protection methods	104
C.2.1	General	104
C.2.2	Lightning air-termination systems on the blade surface or embedded in the surface	105
C.2.3	Adhesive metallic tapes and segmented diverter strips	105
C.2.4	Internal down conductor systems.....	106
C.2.5	Conducting surface materials.....	106
C.3	CFRP structural components	107
C.4	Particular concerns with conducting components	108
C.5	Interception efficiency	109
C.6	Dimensioning of lightning protection systems	110
C.7	Blade-to-hub connection	112
C.8	WTG blade field exposure.....	113
C.8.1	General	113
C.8.2	Application.....	113
C.8.3	Field exposure.....	113
Annex D (normative)	Test specifications	114
D.1	General.....	114
D.2	High-voltage strike attachment tests	114
D.2.1	Verification of air termination system effectiveness.....	114
D.2.2	Initial leader attachment test.....	114
D.2.3	Subsequent stroke attachment test.....	124
D.3	High-current physical damage tests	128
D.3.1	General	128
D.3.2	Arc entry test.....	128
D.3.3	Conducted current test	133
Annex E (informative)	Application of lightning environment and lightning protection zones (LPZ).....	138
E.1	Lightning environment for blades	138
E.1.1	Application.....	138
E.1.2	Examples of simplified lightning environment areas	138
E.1.3	Area transitions	140
E.2	Definition of lightning protection zones for turbines (not blades).....	140
E.2.1	General	140
E.2.2	LPZ 0	141
E.2.3	Other zones.....	142

E.2.4	Zone boundaries.....	143
E.2.5	Zone protection requirements	144
Annex F (informative)	Selection and installation of a coordinated SPD protection in wind turbines	147
F.1	Location of SPDs	147
F.2	Selection of SPDs.....	147
F.3	Installation of SPDs	147
F.4	Environmental stresses of SPDs	148
F.5	SPD status indication and SPD monitoring in case of an SPD failure	149
F.6	Selection of SPDs with regard to protection level (U_p) and system level immunity	149
F.7	Selection of SPDs with regard to overvoltages created within wind turbines.....	149
F.8	Selection of SPDs with regard to discharge current (I_n) and impulse current (I_{imp}).....	149
Annex G (informative)	Information on bonding and shielding and installation technique	151
G.1	Additional information on bonding	151
G.2	Additional information on shielding and installation technique	152
Annex H (informative)	Testing methods for system level immunity tests	155
Annex I (informative)	Earth termination system	160
I.1	General.....	160
I.1.1	Types of earthing systems	160
I.1.2	Construction	160
I.2	Electrode shape dimensions	162
I.2.1	Type of arrangement	162
I.2.2	Frequency dependence on earthing impedance	164
I.3	Earthing resistance expressions for different electrode configurations	165
Annex J (informative)	Example of defined measuring points.....	168
Annex K (informative)	Classification of lightning damage based on risk management	170
K.1	General.....	170
K.2	Lightning damage in blade	170
K.2.1	Classification of blade damage due to lightning	170
K.2.2	Possible cause of blade damage due to lightning.....	171
K.2.3	Countermeasures against blade damage due to lightning	172
K.3	Lightning damage to other components.....	174
K.3.1	Classification of damage in other components due to lightning	174
K.3.2	Countermeasures against lightning damage to other components	174
K.4	Typical lightning damage questionnaire	174
K.4.1	General	174
K.4.2	Sample of questionnaire	174
Annex L (informative)	Monitoring systems.....	178
Annex M (informative)	Guidelines for small wind turbines	180
Annex N (informative)	Guidelines for verification of blade similarity	181
N.1	General.....	181
N.2	Similarity constraints.....	181
Annex O (informative)	Guidelines for validation of numerical analysis methods.....	184
O.1	General.....	184
O.2	Blade voltage and current distribution	184
O.3	Indirect effects analysis	185

Annex P (informative) Testing of rotating components	186
P.1 General.....	186
P.2 Test specimen	186
P.2.1 Test specimen representing a stationary / quasi stationary bearing	186
P.2.2 Test specimen representing a rotating bearing	186
P.3 Test setup.....	186
P.3.1 Test set-up representing a stationary/quasi-stationary bearing	186
P.3.2 Test set-up representing a rotating bearing.....	187
P.4 Test procedure.....	188
P.5 Pass/fail criteria	189
Annex Q (informative) Earthing systems for wind farms	190
Bibliography.....	191
Figure 1 – Collection area of the wind turbine	30
Figure 2 – Example of collection area for a complete wind farm (A_{DWF}) with 10 wind turbines (black points) considering overlapping.....	30
Figure 3 – Collection area of wind turbine of height H_a and another structure of height H_b connected by underground cable of length L_C	33
Figure 4 – Examples of possible SPM (surge protection measures)	50
Figure 5 – Interconnecting two LPZ 1 using SPDs.....	51
Figure 6 – Interconnecting two LPZ 1 using shielded cables or shielded cable ducts.....	51
Figure 7 –Magnetic field inside an enclosure due to a long connection cable from enclosure entrance to the SPD	54
Figure 8 –Additional protective measures	55
Figure 9 – Examples of placement of HV arresters in two typical main electrical circuits of wind turbines	59
Figure A.1 – Processes involved in the formation of a downward initiated cloud-to-ground flash.....	75
Figure A.2 – Typical profile of a negative cloud-to-ground flash	76
Figure A.3 – Definitions of short stroke parameters (typically $T_2 < 2$ ms)	76
Figure A.4 – Definitions of long stroke parameters (typically 2 ms $< T_{long} < 1$ s).....	77
Figure A.5 – Possible components of downward flashes (typical in flat territory and to lower structures).....	79
Figure A.6 – Typical profile of a positive cloud-to-ground flash.....	80
Figure A.7 – Processes involved in the formation of an upward initiated cloud-to-ground flash during summer and winter conditions.....	80
Figure A.8 – Typical profile of a negative upward initiated flash	81
Figure A.9 – Possible components of upward flashes (typical to exposed and/or higher structures)	82
Figure B.1 – Winter lightning world map based on LLS data and weather conditions.....	87
Figure B.2 – Detailed winter lightning maps based on LLS data and weather conditions	88
Figure B.3 – Ratio h/d description	88
Figure C.1 – Types of wind turbine blades	102
Figure C.2 – Lightning protection concepts for large modern wind turbine blades.....	105
Figure C.3 – Voltages between lightning current path and sensor wiring due to the mutual coupling and the impedance of the current path	108
Figure D.1 – Example of initial leader attachment test setup A.....	116

Figure D.2 – Possible orientations for the initial leader attachment test setup A.....	117
Figure D.3 – Definition of the blade length axis during strike attachment tests	118
Figure D.4 – Example of the application of angles during the HV test.....	118
Figure D.5 – Example of leader connection point away from test specimen.....	119
Figure D.6 – Initial leader attachment test setup B	120
Figure D.7 – Typical switching impulse voltage rise to flashover (100 μ s per division).....	122
Figure D.8 – Subsequent stroke attachment test arrangement	125
Figure D.9 – Lightning impulse voltage waveform	126
Figure D.10 – Lightning impulse voltage chopped on the front	126
Figure D.11 – HV electrode positions for the subsequent stroke attachment test.....	128
Figure D.12 – High-current test arrangement for the arc entry test.....	130
Figure D.13 – Typical jet diverting test electrodes	131
Figure D.14 – Example of an arrangement for conducted current tests.....	135
Figure E.1 – Examples of generic blade lightning environment definition.....	139
Figure E.2 – Rolling sphere method applied on wind turbine	142
Figure E.3 – Mesh with large mesh dimension for nacelle with GFRP cover	143
Figure E.4 – Mesh with small mesh dimension for nacelle with GFRP cover.....	143
Figure E.5 – Two cabinets both defined as LPZ 2 connected via the shield of a shielded cable.....	144
Figure E.6 – Example: division of wind turbine into different lightning protection zones.....	145
Figure E.7 – Example of how to document a surge protection measures (SPM) system by division of the electrical system into protection zones with indication of where circuits cross LPZ boundaries and showing the long cables running between tower base and nacelle.....	146
Figure F.1 – Point-to-point installation scheme	148
Figure F.2 – Earthing connection installation scheme.....	148
Figure G.1 – Two control cabinets located on different metallic planes inside a nacelle	151
Figure G.2 – Magnetic coupling mechanism.....	152
Figure G.3 – Measuring of transfer impedance.....	154
Figure H.1 – Example circuit of a SPD discharge current test under service conditions.....	156
Figure H.2 – Typical test set-up for injection of test current.....	158
Figure H.3 – Example circuit of an induction test for lightning currents.....	159
Figure I.1 – Minimum length (l_1) of each earth electrode according to the class of LPS	163
Figure I.2 – Frequency dependence on the impedance to earth	164
Figure J.1 – Example of measuring points.....	168
Figure K.1 – Recommended countermeasures schemes according to the incident classification	172
Figure K.2 – Blade outlines for marking locations of damage	177
Figure N.1 – Definitions of blade aerofoil nomenclature	183
Figure O.1 – Example geometry for blade voltage and current distribution simulations.....	184
Figure O.2 – Example geometry for nacelle indirect effects simulations	185
Figure P.1 – Possible test setup for a pitch bearing	186
Figure P.2 – Possible injection of test current into a pitch bearing.....	187
Figure P.3 – Possible test setup for a main bearing	188
Figure P.4 – Example measurement of the series resistance of the test sample	189

Table 1 – Maximum values of lightning parameters according to LPL (adapted from IEC 62305-1)	25
Table 2 – Minimum values of lightning parameters and related rolling sphere radius corresponding to LPL (adapted from IEC 62305-1).....	26
Table 3 – Collection areas A_L and A_I of service line depending on whether aerial or buried	33
Table 4 – Parameters relevant to the assessment of risk components for wind turbine (corresponds to IEC 62305-2)	36
Table 5 – Verification of bearing and bearing protection design concepts.....	45
Table 6 – LPS General inspection intervals.....	71
Table A.1 – Cloud-to-ground lightning current parameters	78
Table A.2 – Upward initiated lightning current parameters	82
Table A.3 – Summary of the lightning threat parameters to be considered in the calculation of the test values for the different LPS components and for the different LPL.....	83
Table B.1 – Recommended values of individual location factors.....	86
Table B.2 – Range of upward lightning activity as a function of winter lightning activity for wind farm located in flat terrain.....	89
Table B.3 – Values of probability, P_A , that a lightning flash to a wind turbine will cause shock to human beings owing to dangerous touch and step voltages (corresponds to IEC 62305-2)	94
Table B.4 – Values of reduction factor r_t as a function of the type of surface of soil or floor (corresponds to IEC 62305-2)	94
Table B.5 – Values of factor P_O according to the position of a person in the exposed area (corresponds to IEC 62305-2)	95
Table B.6 – Values of probability, P_{LPS} , depending on the protection measures to protect the exposed areas of the wind turbine against direct lightning flash and to reduce physical damage (corresponds to IEC 62305-2)	95
Table B.7 – Values of probability P_S that a flash to a wind turbine will cause dangerous sparking (corresponds to IEC 62305-2).....	96
Table B.8 – Values of reduction factor r_D as a function of provisions taken to reduce the consequences of fire (corresponds to IEC 62305-2).....	96
Table B.9 – Values of reduction factor r_f as a function of risk of fire of the wind turbine (corresponds to IEC 62305-2).....	96
Table B.10 – Values of probability P_{LI} depending on the line type and the impulse withstand voltage U_W of the equipment (corresponds to IEC 62305-2)	100
Table B.11 – Loss values for each zone (corresponds to IEC 62305-2).....	101
Table B.12 – Typical mean values of L_T , L_D , L_F and L_O (corresponds to IEC 62305-2).....	101
Table C.1 – Material, configuration and minimum nominal cross-sectional area of air-termination conductors, air-termination rods, earth lead-in rods and down conductors ^a (corresponds to IEC 62305-3).....	110
Table C.2 – Physical characteristics of typical materials used in lightning protection systems (corresponds to IEC 62305-1)	111
Table C.3 – Temperature rise [K] for different conductors as a function of W/R (corresponds to IEC 62305-1).....	112
Table C.4 – Range of distribution of direct strikes from field campaigns collecting data on attachment distribution vs. the distance from the tip of wind turbine blades, 39 m to 45 m blades with and without CFRP.....	113
Table D.1 – Test current parameters corresponding to LPL I.....	132
Table D.2 – Test current parameters for winter lightning exposure testing (duration maximum 1 s)	132

Table D.3 – Test current parameters corresponding to LPL I.....	136
Table D.4 – Test current parameters corresponding to LPL I (for flexible paths).....	136
Table D.5 – Test current parameters for winter lightning exposure testing (duration maximum 1 s)	137
Table E.1 – Blade area definition for the example in concept A.....	140
Table E.2 – Blade area definition for the example in concept B	140
Table E.3 – Definition of lightning protection zones according to IEC 62305-1	141
Table F.1 – Discharge and impulse current levels for TN systems given in IEC 60364-5-53	150
Table F.2 – Example of increased discharge and impulse current levels for TN systems.....	150
Table I.1 – Impulse efficiency of several ground rod arrangements relative to a 12 m vertical ground rod (100 %).....	165
Table I.2 – Symbols used in Tables I.3 to I.6.....	165
Table I.3 – Formulae for different earthing electrode configurations	166
Table I.4 – Formulae for buried ring electrode combined with vertical rods	166
Table I.5 – Formulae for buried ring electrode combined with radial electrodes.....	167
Table I.6 – Formulae for buried straight horizontal electrode combined with vertical rods....	167
Table J.1 – Measuring points and resistances to be recorded	169
Table K.1 – Classification of blade damage due to lightning.....	171
Table K.2 – Matrix of blade damages due to lightning, taking account of risk management.....	173
Table K.3 – Classification of damage to other components due to lightning.....	174
Table L.1 – Considerations relevant for wide area lightning detection systems.....	178
Table L.2 – Considerations relevant for local active lightning detection systems	179
Table L.3 – Considerations relevant for local passive lightning detection systems.....	179
Table N.1 – Items to be checked and verified when evaluating similarity.....	182
Table P.1 – Test sequence for high current testing of rotating components	189

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

WIND ENERGY GENERATION SYSTEMS –**Part 24: Lightning protection****FOREWORD**

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

International Standard IEC 61400-24 has been prepared by IEC technical committee 88: Wind energy generation systems.

This second edition cancels and replaces the first edition, published in 2010. This edition constitutes a technical revision.

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

- a) it is restructured with a main normative part, while informative information is placed in annexes.

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

FDIS	Report on voting
88/709/FDIS	88/713/RVD

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

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

A list of all parts in the IEC 61400 series, published under the general title *Wind energy generation systems*, can be found on the IEC website.

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

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

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

WIND ENERGY GENERATION SYSTEMS –

Part 24: Lightning protection

1 Scope

This part of IEC 61400 applies to lightning protection of wind turbine generators and wind power systems. Refer to Annex M guidelines for small wind turbines.

This document defines the lightning environment for wind turbines and risk assessment for wind turbines in that environment. It defines requirements for protection of blades, other structural components and electrical and control systems against both direct and indirect effects of lightning. Test methods to validate compliance are included.

Guidance on the use of applicable lightning protection, industrial electrical and EMC standards including earthing is provided.

Guidance regarding personal safety is provided.

Guidelines for damage statistics and reporting are provided.

Normative references are made to generic standards for lightning protection, low-voltage systems and high-voltage systems for machinery and installations and electromagnetic compatibility (EMC).

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 60364-4-44, *Low-voltage electrical installations – Part 4-44: Protection for safety – Protection against voltage disturbances and electromagnetic disturbances*

IEC 60364-5-53, *Electrical installations of buildings – Part 5-53: Selection and erection of electrical equipment – Isolation, switching and control*

IEC 60364-5-54, *Low-voltage electrical installations – Part 5-54: Selection and erection of electrical equipment – Earthing arrangements and protective conductors*

IEC 60364-6, *Low-voltage electrical installations – Part 6: Verification*

IEC TS 60479-1, *Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects*

IEC TR 60479-4, *Effects of current on human beings and livestock – Part 4: Effects of lightning strokes*

IEC 60664-1, *Insulation coordination for equipment within low-voltage systems – Part 1: Principles, requirements and tests*

IEC 61000 (all parts), *Electromagnetic compatibility (EMC)*

IEC 61000-4-5, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test*

IEC 61000-4-9, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-9: Testing and measurement techniques – Impulse magnetic field immunity test*

IEC 61000-4-10, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-10: Testing and measurement techniques – Damped oscillatory magnetic field immunity test*

IEC TR 61000-5-2, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 2: Earthing and cabling*

IEC 61400-23, *Wind turbine generator systems – Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades*

IEC 61587-3, *Mechanical structures for electronic equipment – Tests for IEC 60917 and IEC 60297 – Part 3: Electromagnetic shielding performance tests for cabinets and subracks*

IEC 61643-11, *Low-voltage surge protective devices – Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems – Requirements and test methods*

IEC 61643-12, *Low-voltage surge protective devices – Part 12: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems – Selection and application principles*

IEC 61643-21, *Low voltage surge protective devices – Part 21: Surge protective devices connected to telecommunications and signalling networks – Performance requirements and testing methods*

IEC 61643-22, *Low-voltage surge protective devices – Part 22: Surge protective devices connected to telecommunications and signalling networks – Selection and application principles*

IEC 61936-1, *Power installations exceeding 1 kV a.c. – Part 1: Common rules*

IEC TS 61936-2, *Power installations exceeding 1 kV a.c. and 1,5 kV d.c. – Part 2: d.c.*

IEC 62305-1:2010, *Protection against lightning – Part 1: General principles*

IEC 62305-2:2010, *Protection against lightning – Part 2: Risk management*

IEC 62305-3:2010, *Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard*

IEC 62305-4:2010, *Protection against lightning – Part 4: Electrical and electronic systems within structures*

ITU-T K.20, *Resistibility of telecommunication equipment installed in a telecommunications centre to overvoltages and overcurrents*

ITU-T K.21, *Resistibility of telecommunications equipment installed in customer premises to overvoltages and overcurrents*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	204
1 Domaine d'application	206
2 Références normatives	206
3 Termes et définitions	208
4 Symboles et unités	214
5 Termes abrégés	218
6 Environnement de foudre applicable aux éoliennes	218
6.1 Généralités	218
6.2 Paramètres de courant de foudre et niveaux de protection contre la foudre (NPF).....	218
7 Évaluation de l'exposition à la foudre	220
7.1 Généralités	220
7.2 Évaluation de la fréquence de la foudre affectant une seule éolienne ou un groupe d'éoliennes.....	221
7.2.1 Catégorisation des événements de foudre	221
7.2.2 Estimation du nombre moyen d'éclairs frappant une seule éolienne ou un groupe d'éoliennes	222
7.2.3 Estimation du nombre annuel moyen d'éclairs frappant à proximité de l'éolienne (N_M)	225
7.2.4 Estimation du nombre annuel moyen d'éclairs frappant les lignes de service connectées aux éoliennes (N_L).....	225
7.2.5 Estimation du nombre annuel moyen d'éclairs frappant à proximité des lignes de service connectées à l'éolienne (N_I)	226
7.3 Appréciation du risque de dommage	227
7.3.1 Équation de base.....	227
7.3.2 Appréciation des composantes de risque dues aux éclairs frappant l'éolienne (S1)	228
7.3.3 Appréciation des composantes de risque dues aux éclairs frappant à proximité de l'éolienne (S2)	228
7.3.4 Appréciation des composantes de risque dues aux éclairs frappant une ligne de service connectée à l'éolienne (S3)	229
7.3.5 Appréciation des composantes de risque dues aux éclairs frappant à proximité d'une ligne de service connectée à l'éolienne (S4)	229
8 Protection des sous-composants contre la foudre	230
8.1 Généralités	230
8.1.1 Niveau de protection contre la foudre (NPF)	230
8.1.2 Zones de protection contre la foudre (ZPF).....	231
8.2 Pales	231
8.2.1 Généralités	231
8.2.2 Exigences.....	231
8.2.3 Vérification	232
8.2.4 Considérations relatives à la conception de la protection.....	233
8.2.5 Méthodes d'essai.....	235
8.3 Nacelle et autres composants structurels	236
8.3.1 Généralités	236
8.3.2 Moyeu	237
8.3.3 Disque de moyeu.....	237
8.3.4 Nacelle	237

8.3.5	Pylône	238
8.3.6	Méthodes de vérification	239
8.4	Transmission mécanique et système d'orientation	239
8.4.1	Généralités	239
8.4.2	Paliers	239
8.4.3	Systèmes hydrauliques	240
8.4.4	Éclateurs et contacts glissants	240
8.4.5	Vérification	241
8.5	Réseaux de puissance à basse tension et réseaux et installations de communication	241
8.5.1	Généralités	241
8.5.2	Liaison équipotentielle au sein de l'éolienne	246
8.5.3	Protection contre l'IEMF et niveaux d'immunité	247
8.5.4	Blindage et cheminement des lignes	248
8.5.5	Protection par parafoudres	249
8.5.6	Méthodes d'essai pour les essais d'immunité du réseau	254
8.6	Réseaux d'alimentation électrique à haute tension (HT)	254
9	Mise à la terre des éoliennes	256
9.1	Généralités	256
9.1.1	Objet et domaine d'application	256
9.1.2	Exigences fondamentales	257
9.1.3	Dispositions d'électrodes de terre	257
9.1.4	Impédance d'une installation de mise à la terre	257
9.2	Liaison équipotentielle	258
9.2.1	Généralités	258
9.2.2	Liaison équipotentielle de foudre pour les installations métalliques	258
9.3	Composants structurels	258
9.3.1	Généralités	258
9.3.2	Pylône tubulaire métallique	258
9.3.3	Pylônes en béton armé	259
9.3.4	Pylône en treillis	259
9.3.5	Réseaux internes au pylône	259
9.3.6	Fondation en béton	260
9.3.7	Fondation en zone rocheuse	260
9.3.8	Fondation monopieu métallique	261
9.3.9	Fondation en mer	261
9.4	Dimensions des profils d'électrodes	261
9.5	Réalisation et maintenance de l'installation de mise à la terre	262
10	Sécurité individuelle	262
11	Documentation du système de protection contre la foudre	264
11.1	Généralités	264
11.2	Documentation nécessaire pour l'évaluation de la conception	264
11.2.1	Généralités	264
11.2.2	Documentation générale	264
11.2.3	Documentation pour les pales de rotor	265
11.2.4	Documentation des systèmes mécaniques	265
11.2.5	Documentation des réseaux de puissance et de communication	265
11.2.6	Documentation des installations de mise à la terre et des réseaux de liaison équipotentielle	266

11.2.7	Documentation des systèmes de protection du capot de nacelle, du moyeu et du pylône contre la foudre	266
11.3	Informations spécifiques au site	266
11.4	Documentation à fournir dans les manuels pour les inspections du SPF	266
11.5	Manuels	267
12	Inspection du système de protection contre la foudre	267
12.1	Domaine d'application de l'inspection	267
12.2	Séquences des inspections	267
12.2.1	Généralités	267
12.2.2	Inspection au cours de la production de l'éolienne	267
12.2.3	Inspection au cours de l'installation de l'éolienne	268
12.2.4	Inspection au cours de la mise en service de l'éolienne et inspection périodique	268
12.2.5	Inspection après démontage ou réparation des parties principales	269
12.3	Maintenance	269
Annexe A (informative) Phénomène de la foudre par rapport aux éoliennes		270
A.1	Environnement de foudre applicable aux éoliennes	270
A.1.1	Généralités	270
A.1.2	Propriétés de la foudre	270
A.1.3	Formation de décharges de foudre et paramètres électriques	270
A.1.4	Éclairs nuage-sol	271
A.1.5	Éclairs ascendants	277
A.2	Paramètres de courant de foudre applicables au point d'impact	280
A.3	Courant traceur sans décharge en retour	282
A.4	Effets de l'impulsion électromagnétique de foudre ou IEMF	282
Annexe B (informative) Évaluation de l'exposition à la foudre		283
B.1	Généralités	283
B.2	Méthodologie permettant d'estimer le nombre annuel moyen d'éclairs ou de coups de foudre frappant les éoliennes d'un parc éolien, ainsi que l'activité de la foudre ascendante sur les éoliennes	283
B.2.1	Généralités	283
B.2.2	Méthodologie permettant d'estimer le nombre annuel moyen d'éclairs frappant les éoliennes d'un parc éolien par une augmentation du facteur de localisation afin de tenir compte de la foudre ascendante provenant des éoliennes	283
B.2.3	Pourcentage de foudre ascendante dans les parcs éoliens	287
B.3	Explication des termes	287
B.3.1	Domages et pertes	287
B.3.2	Composition du risque	289
B.3.3	Appréciation des composantes de risque	289
B.3.4	Fréquence de dommage	291
B.3.5	Évaluation de la probabilité de dommage P_{χ}	292
B.4	Évaluation de la probabilité de dommage occasionné à l'éolienne	292
B.4.1	Probabilité P_{AT} qu'un éclair frappant une éolienne génère une tension de contact et de pas dangereuse	292
B.4.2	Probabilité P_{AD} , qu'un éclair frappant l'éolienne provoque une blessure ou lésion à une personne exposée présente sur la structure	293
B.4.3	Probabilité, P_B , qu'un éclair frappant l'éolienne provoque un dommage physique	294
B.4.4	Probabilité, P_C , qu'un éclair frappant l'éolienne provoque la défaillance des réseaux internes	295

B.4.5	Probabilité, P_M , qu'un éclair frappant à proximité de l'éolienne provoque la défaillance des réseaux internes	296
B.4.6	Probabilité, P_U , qu'un éclair frappant une ligne de service provoque une blessure ou lésion occasionnée aux humains en raison d'une tension de contact	296
B.4.7	Probabilité, P_V , qu'un éclair frappant une ligne de service provoque un dommage physique.....	297
B.4.8	Probabilité, P_W , qu'un éclair frappant une ligne de service provoque la défaillance des réseaux internes.....	297
B.4.9	Probabilité, P_Z , qu'un éclair frappant à proximité d'une ligne de service entrante provoque la défaillance des réseaux internes.....	298
B.4.10	Probabilité P_P qu'une personne soit présente dans un endroit dangereux	299
B.4.11	Probabilité P_e d'exposition des équipements à un événement dommageable	299
B.5	Évaluation du niveau de perte L_X dans une éolienne	299
B.5.1	Généralités	299
B.5.2	Perte relative moyenne par événement dangereux	299
Annexe C (informative) Méthodes de protection des pales		301
C.1	Généralités	301
C.1.1	Types de pales et types de méthodes de protection des pales	301
C.1.2	Mécanisme d'endommagement des pales	303
C.2	Méthodes de protection.....	304
C.2.1	Généralités	304
C.2.2	Dispositifs de capture de la foudre installés sur la surface de la pale ou intégrés à cette surface	304
C.2.3	Rubans métalliques adhésifs et bandes de déflexion segmentées	305
C.2.4	Conducteurs de descente internes.....	305
C.2.5	Matériaux de surface conductrice	306
C.3	Composants structurels en CFRP	306
C.4	Problèmes particuliers posés par les composants conducteurs	307
C.5	Efficacité d'interception	309
C.6	Dimensionnement des systèmes de protection contre la foudre	310
C.7	Connexion pale-moyeu	312
C.8	Exposition sur le terrain des pales d'aérogénérateur (WTG).....	313
C.8.1	Généralités	313
C.8.2	Application.....	313
C.8.3	Exposition sur le terrain	313
Annexe D (normative) Spécifications d'essai.....		314
D.1	Généralités	314
D.2	Essais de jointure des coups de foudre à haute tension	314
D.2.1	Vérification de l'efficacité du dispositif de capture.....	314
D.2.2	Essai de jointure du traceur initial	315
D.2.3	Essai de jointure des coups de foudre suivants	326
D.3	Essais de dommage physique à haute intensité	331
D.3.1	Généralités	331
D.3.2	Essai d'entrée d'arc	331
D.3.3	Essai de courant conduit	336
Annexe E (informative) Application de l'environnement de foudre et des zones de protection contre la foudre (ZPF)		342
E.1	Environnement de foudre pour les pales	342

E.1.1	Application.....	342
E.1.2	Exemples de zones d’environnement de foudre simplifié	342
E.1.3	Transitions de zones	344
E.2	Définition des zones de protection contre la foudre pour les éoliennes (et non les pales)	344
E.2.1	Généralités	344
E.2.2	LPZ 0	345
E.2.3	Autres zones	346
E.2.4	Frontières	348
E.2.5	Exigences concernant la protection des zones.....	348
Annexe F (informative) Choix et installation d’une protection coordonnée par parafoudres dans les éoliennes		352
F.1	Position des parafoudres	352
F.2	Choix des parafoudres	352
F.3	Installation des parafoudres	352
F.4	Contraintes d’environnement liées aux parafoudres	353
F.5	Indication d’état des parafoudres et surveillance des parafoudres en cas de défaillance	354
F.6	Choix des parafoudres par rapport au niveau de protection (U_p) et au niveau d’immunité du réseau.....	354
F.7	Choix des parafoudres par rapport aux surtensions engendrées dans les éoliennes	354
F.8	Choix des parafoudres par rapport au courant de décharge (I_n) et au courant de choc (I_{imp})	355
Annexe G (informative) Informations concernant la liaison et le blindage, ainsi que la méthode d’installation		356
G.1	Informations complémentaires concernant la liaison	356
G.2	Informations complémentaires concernant le blindage et la méthode d’installation	357
Annexe H (informative) Méthodes d’essai pour les essais de niveau d’immunité du réseau		361
Annexe I (informative) Prises de terre		367
I.1	Généralités	367
I.1.1	Types d’installations de mise à la terre	367
I.1.2	Construction	368
I.2	Dimensions des profils d’électrodes	369
I.2.1	Type de disposition.....	369
I.2.2	Dépendance de la fréquence par rapport à l’impédance de terre	371
I.3	Expressions de la résistance de terre pour différentes configurations d’électrodes	373
Annexe J (informative) Exemple de points de mesure définis		376
Annexe K (informative) Classification du dommage occasionné par la foudre fondée sur la gestion des risques		378
K.1	Généralités	378
K.2	Dommage occasionné aux pales par la foudre	378
K.2.1	Classification du dommage occasionné aux pales par la foudre.....	378
K.2.2	Cause possible de dommage occasionné aux pales par la foudre.....	380
K.2.3	Contremesures par rapport au dommage occasionné aux pales par la foudre	380
K.3	Dommage occasionné par la foudre aux autres composants	383

K.3.1	Classification du dommage occasionné par la foudre aux autres composants	383
K.3.2	Contremesures par rapport au dommage occasionné par la foudre aux autres composants	384
K.4	Questionnaire type relatif au dommage occasionné par la foudre	384
K.4.1	Généralités	384
K.4.2	Exemple de questionnaire	384
Annexe L (informative)	Systèmes de surveillance	388
Annexe M (informative)	Lignes directrices applicables aux petites éoliennes	391
Annexe N (informative)	Lignes directrices applicables à la vérification de la similitude des pales	392
N.1	Généralités	392
N.2	Contraintes de similitude	392
Annexe O (informative)	Lignes directrices applicables à la validation des méthodes d'analyses numériques	395
O.1	Généralités	395
O.2	Répartition de la tension et du courant dans les pales	395
O.3	Analyse des effets indirects	396
Annexe P (informative)	Essai des composants tournants	397
P.1	Généralités	397
P.2	Éprouvette	397
P.2.1	Éprouvette représentant un palier fixe / quasi fixe	397
P.2.2	Éprouvette représentant un palier tournant	397
P.3	Montage d'essai	397
P.3.1	Montage d'essai représentant un palier fixe / quasi fixe	397
P.3.2	Montage d'essai représentant un palier tournant	399
P.4	Procédure	400
P.5	Critères de réussite/échec	401
Annexe Q (informative)	Installations de mise à la terre pour parcs éoliens	403
Bibliographie	404
Figure 1	– Zone de collecte de l'éolienne	224
Figure 2	– Exemple de zone de collecte d'un parc éolien complet (A_{DWF}) avec 10 éoliennes (points noirs) compte tenu du chevauchement	224
Figure 3	– Zone de collecte de l'éolienne de hauteur H_a et d'une autre structure de hauteur H_b connectées par un câble souterrain de longueur L_c	227
Figure 4	– Exemples de SPM (mesures de protection contre les surtensions) possibles	245
Figure 5	– Interconnexion de deux ZPF 1 utilisant des parafoudres	246
Figure 6	– Interconnexion de deux ZPF 1 utilisant des câbles ou des conduits blindés	246
Figure 7	– Champ magnétique à l'intérieur d'une enveloppe dû à un câble de connexion de grande longueur entre l'entrée de l'enveloppe et le parafoudre	250
Figure 8	– Mesures de protection complémentaires	251
Figure 9	– Exemples d'installation de parafoudres à haute tension dans deux circuits électriques principaux d'éoliennes	255
Figure A.1	– Processus impliqués dans la formation d'un éclair nuage-sol descendant	272
Figure A.2	– Profil type d'un éclair nuage-sol négatif	273
Figure A.3	– Définitions des paramètres des coups de foudre de courte durée (généralement $T_2 < 2ms$)	274

Figure A.4 – Définitions des paramètres des coups de foudre de longue durée (généralement $2 \text{ ms} < T_{\text{long}} < 1 \text{ s}$)	274
Figure A.5 – Composantes potentielles des éclairs descendants (éclairs typiques sur un sol plat et frappant des structures moins élevées)	276
Figure A.6 – Profil type d'un éclair nuage-sol positif	277
Figure A.7 – Processus impliqués dans la formation d'un éclairnuage-sol ascendant en été et en hiver	277
Figure A.8 – Profil type d'un éclair ascendant négatif	278
Figure A.9 – Composantes potentielles des éclairs ascendants (éclairs typiques frappant des structures exposées et/ou plus élevées)	280
Figure B.1 – Carte mondiale de l'activité de la foudre en période hivernale sur la base des données LLS et des conditions météorologiques	285
Figure B.2 – Cartes détaillées de l'activité de la foudre en période hivernale sur la base des données LLS et des conditions météorologiques	286
Figure B.3 – Description du rapport h/d	287
Figure C.1 – Types de pales des éoliennes	302
Figure C.2 – Concepts de protection contre la foudre des pales d'éolienne modernes de grande taille	304
Figure C.3 – Tensions entre le trajet du courant de foudre et le câblage des capteurs dues au couplage mutuel et à l'impédance du trajet de courant	308
Figure D.1 – Exemple de montage d'essai A pour l'essai de jointure du traceur initial	317
Figure D.2 – Orientations possibles pour le montage d'essai A pour l'essai de jointure du traceur initial	318
Figure D.3 – Définition de l'axe de la longueur de la pale au cours des essais de jointure de la foudre	319
Figure D.4 – Exemple d'application d'angles au cours de l'essai à haute tension (HT)	320
Figure D.5 – Exemple de point de connexion du traceur à distance de l'éprouvette	321
Figure D.6 – Montage d'essai B pour l'essai de jointure du traceur initial	322
Figure D.7 – Augmentation de tension de choc de manœuvre typique par rapport au contournement ($100 \mu\text{s}$ par division)	324
Figure D.8 – Dispositif d'essai de jointure des coups de foudre suivants	328
Figure D.9 – Forme de tension de choc de foudre	328
Figure D.10 – Tension de choc de foudre coupée sur le front	329
Figure D.11 – Positions d'électrode à haute tension pour l'essai de jointure des coups de foudre suivants	330
Figure D.12 – Dispositif d'essai à haute intensité pour l'essai d'entrée d'arc	333
Figure D.13 – Électrodes d'essai typiques de déviation de jet	334
Figure D.14 – Exemple de dispositif pour les essais de courant conduit	338
Figure E.1 – Exemples de définition générique de l'environnement de foudre pour les pales	343
Figure E.2 – Méthode de la sphère fictive appliquée à une éolienne	346
Figure E.3 – Maille de grande dimension pour une nacelle avec capot en GFRP	347
Figure E.4 – Maille de petite dimension pour une nacelle avec capot en GFRP	347
Figure E.5 – Connexion de deux armoires définies comme ZPF 2 par le blindage d'un câble blindé	348
Figure E.6 – Exemple: division de l'éolienne en différentes zones de protection contre la foudre	350

Figure E.7 – Exemple de mode de documentation d'un système de mesures de protection contre les surtensions (SPM) par la division du réseau de puissance en zones de protection avec indication du point de croisement des circuits et des limites de ZPF, ainsi que du cheminement des câbles de grande longueur entre la base du pylône et la nacelle	351
Figure F.1 – Système d'installation point à point	353
Figure F.2 – Système d'installation des connexions de terre	353
Figure G.1 – Deux armoires de commande situées sur des plans métalliques différents à l'intérieur d'une nacelle	356
Figure G.2 – Mécanisme de couplage magnétique	357
Figure G.3 – Mesurage de l'impédance de transfert	359
Figure H.1 – Exemple de circuit pour un essai de courant de décharge des parafoudres dans les conditions de service	362
Figure H.2 – Montage d'essai type pour l'injection du courant d'essai	365
Figure H.3 – Exemple d'un circuit d'essai d'induction pour courants de foudre	366
Figure I.1 – Longueur minimale (l_1) de chaque électrode de terre selon la classe de SPF ..	370
Figure I.2 – Dépendance de la fréquence par rapport à l'impédance de terre	372
Figure J.1 – Exemple de points de mesure	376
Figure K.1 – Systèmes de contremesures recommandés selon la classification des incidents	382
Figure K.2 – Schémas de pales pour le marquage des emplacements de dommage	387
Figure N.1 – Définitions de la nomenclature de profil aérodynamique d'une pale	394
Figure O.1 – Exemple de géométrie pour des simulations de répartition de la tension et du courant dans les pales	395
Figure O.2 – Exemple de géométrie pour des simulations des effets indirects sur la nacelle	396
Figure P.1 – Montage d'essai possible pour un palier de pas	398
Figure P.2 – Injection possible du courant d'essai dans un palier de pas	399
Figure P.3 – Montage d'essai possible pour un palier principal	400
Figure P.4 – Exemple de mesurage de la résistance série de l'échantillon d'essai	402
Tableau 1 – Valeurs maximales des paramètres de courant de foudre selon le NPF (adapté de l'IEC 62305-1)	219
Tableau 2 – Valeurs minimales des paramètres de courant de foudre et rayon de la sphère fictive associé correspondant au NPF (adapté de l'IEC 62305-1)	220
Tableau 3 – Zones de collecte A_L et A_1 d'une ligne de service selon qu'elle est aérienne ou enfouie	227
Tableau 4 – Paramètres appropriés à l'appréciation des composantes de risque pour l'éolienne (correspondance avec l'IEC 62305-2)	230
Tableau 5 – Vérification des concepts de conception des paliers et de protection des paliers	240
Tableau 6 – Intervalles d'inspection générale du SPF	269
Tableau A.1 – Paramètres de courant de foudre nuage-sol	275
Tableau A.2 – Paramètres de courant de foudre ascendant	279
Tableau A.3 – Synthèse des paramètres de menace de la foudre à prendre en compte dans le calcul des valeurs d'essai pour les différents composants du SPF et pour les différents NPF	281
Tableau B.1 – Valeurs recommandées des facteurs de localisation individuels	284

Tableau B.2 – Plage d'activité de la foudre ascendante en fonction de l'activité de la foudre en période hivernale pour un parc éolien situé sur terrain plat	287
Tableau B.3 – Valeurs de la probabilité, P_A , qu'un éclair frappant une éolienne provoque un choc frappant les humains en raison de tensions de contact et de pas dangereuses (correspond à l'IEC 62305-2)	293
Tableau B.4 – Valeurs du facteur de réduction r_t en fonction du type de surface de sol ou de plancher (correspond à l'IEC 62305-2)	293
Tableau B.5 – Valeurs du facteur P_O selon la position d'une personne dans la zone exposée (correspond à l'IEC 62305-2)	294
Tableau B.6 – Valeurs de la probabilité, P_{SPF} , dépendant des mesures de protection, que les zones exposées de l'éolienne soient protégées contre les éclairs directs et que les dommages physiques soient réduits (correspond à l'IEC 62305-2)	294
Tableau B.7 – Valeurs de la probabilité, P_S , qu'un éclair frappant une éolienne provoque une étincelle dangereuse (correspond à l'IEC 62305-2)	295
Tableau B.8 – Valeurs du facteur de réduction r_p en fonction des dispositions prises pour réduire les conséquences d'un incendie (correspond à l'IEC 62305-2)	295
Tableau B.9 – Valeurs du facteur de réduction r_f en fonction du risque d'incendie de l'éolienne (correspond à l'IEC 62305-2)	295
Tableau B.10 – Valeurs de probabilité P_{LI} dépendant du type de ligne et de la tension de tenue aux chocs U_W des équipements (correspond à l'IEC 62305-2)	299
Tableau B.11 – Valeurs de perte pour chaque zone (correspond à l'IEC 62305-2)	300
Tableau B.12 – Valeurs moyennes typiques de L_T , L_D , L_F et L_O (correspond à l'IEC 62305-2)	300
Tableau C.1 – Matériau, configuration et section nominale minimale des conducteurs et piquets de dispositifs de capture, piquets de départ et conducteurs de descente ^a (correspond à l'IEC 62305-3)	310
Tableau C.2 – Caractéristiques physiques des matériaux typiques utilisés dans les systèmes de protection contre la foudre (correspond à l'IEC 62305-1)	311
Tableau C.3 – Échauffement [K] pour différents conducteurs en fonction du rapport W/R (correspond à l'IEC 62305-1)	312
Tableau C.4 – Plage de répartition des coups de foudre directs sur la base de campagnes de terrain qui collectent des données sur la répartition des jointures par rapport à l'éloignement de l'extrémité des pales d'éoliennes (pales de longueur comprise entre 39 m et 45 m avec et sans CFRP)	313
Tableau D.1 – Paramètres de courant d'essai correspondant au NPF I	335
Tableau D.2 – Paramètres de courant d'essai pour l'essai d'exposition à la foudre en période hivernale (durée maximale 1 s)	336
Tableau D.3 – Paramètres de courant d'essai correspondant au NPF I	339
Tableau D.4 – Paramètres de courant d'essai correspondant au NPF I (pour les trajets souples)	340
Tableau D.5 – Paramètres de courant d'essai pour l'essai d'exposition à la foudre en période hivernale (durée maximale 1 s)	340
Tableau E.1 – Définition de la zone de pale pour l'exemple de concept A	344
Tableau E.2 – Définition de la zone de pale pour l'exemple de concept B	344
Tableau E.3 – Définition des zones de protection contre la foudre conformément à l'IEC 62305-1	345
Tableau F.1 – Niveaux de courant de décharge et de choc pour les réseaux TN indiqués dans l'IEC 60364-5-53	355
Tableau F.2 – Exemple de niveaux de courant de décharge et de choc plus élevés pour les réseaux TN	355

Tableau I.1 – Efficacité au choc de plusieurs dispositions de piquets de terre par rapport à un piquet de terre vertical de 12 m (100 %)	372
Tableau I.2 – Symboles utilisés dans les Tableaux I.3 à I.6	373
Tableau I.3 – Formules applicables à différentes configurations d'électrodes de terre	374
Tableau I.4 – Formules applicables à une électrode annulaire enfouie combinée à des piquets verticaux	374
Tableau I.5 – Formules applicables à une électrode annulaire enfouie combinée à des électrodes radiales	375
Tableau I.6 – Formules applicables à une électrode horizontale droite enfouie combinée à des piquets verticaux	375
Tableau J.1 – Points de mesure et résistances à enregistrer	377
Tableau K.1 – Classification du dommage occasionné aux pales par la foudre	379
Tableau K.2 – Matrice des dommages occasionnés aux pales par la foudre, compte tenu des la gestion des risques	383
Tableau K.3 – Classification du dommage occasionné par la foudre aux autres composants	384
Tableau L.1 – Éléments à prendre en considération concernant les systèmes de détection de foudre étendue	388
Tableau L.2 – Éléments à prendre en considération concernant les systèmes de détection de foudre active locale	389
Tableau L.3 – Éléments à prendre en considération concernant les systèmes de détection de foudre passive locale	390
Tableau N.1 – Éléments à vérifier pour l'évaluation de la similitude	393
Tableau P.1 – Séquence d'essai pour essai à haute intensité des composants tournants	401

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SYSTÈMES DE GÉNÉRATION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE –

Partie 24: Protection contre la foudre

AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale IEC 61400-24 a été établie par le comité d'études 88 de l'IEC: Systèmes de génération d'énergie éolienne.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 2010. Cette édition constitue une révision technique.

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

- a) sa restructuration comprend une partie normative principale, les informations informatives étant intégrées dans des annexes.

La présente version bilingue (2020-07) correspond à la version anglaise monolingue publiée en 2019-07.

La version française de cette norme n'a pas été soumise au vote.

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

Une liste de toutes les parties de la série IEC 61400, publiées sous le titre général *Systèmes de génération d'énergie éolienne*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

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

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

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

SYSTÈMES DE GÉNÉRATION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE –

Partie 24: Protection contre la foudre

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61400 s'applique à la protection des aérogénérateurs et des parcs éoliens contre la foudre. Se reporter à l'Annexe M pour les lignes directrices applicables aux éoliennes de petite taille.

Le présent document définit l'environnement de foudre applicable aux éoliennes et l'appréciation du risque pour ces mêmes éoliennes dans cet environnement. Il définit les exigences concernant la protection des pales, des autres composants structurels, ainsi que des réseaux de puissance et de commande contre les effets directs et indirects de la foudre. Les méthodes d'essai pour validation de la conformité sont incluses dans le présent document.

Des recommandations relatives à l'utilisation des normes applicables en matière de protection contre la foudre, ainsi que des normes électriques industrielles et de CEM, y compris la mise à la terre sont fournies.

Des recommandations concernant la sécurité individuelle sont fournies.

Des lignes directrices relatives aux statistiques et à la consignation des dommages sont fournies.

Le présent document inclut des références normatives aux normes génériques pour la protection contre la foudre, les réseaux à haute et basse tension pour les machines et installations, et la compatibilité électromagnétique (CEM).

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 60364-4-44, *Installations électriques à basse tension – Partie 4-44: Protection pour assurer la sécurité – Protection contre les perturbations de tension et les perturbations électromagnétiques*

IEC 60364-5-53, *Installations électriques des bâtiments– Partie 5-53: Choix et mise en œuvre des matériels électriques – Sectionnement, coupure et commande*

IEC 60364-5-54, *Installations électriques à basse tension – Partie 5-54: Choix et mise en œuvre des matériels électriques – Installations de mise à la terre et conducteurs de protection*

IEC 60364-6, *Installations électriques à basse tension – Partie 6: Vérification*

IEC TS 60479-1, *Effets du courant sur l'homme et les animaux domestiques – Partie 1: Aspects généraux*

IEC TR 60479-4, *Effets du courant sur l'homme et les animaux domestiques – Partie 4: Effets de la foudre*

IEC 60664-1, *Coordination de l'isolement des matériels dans les systèmes (réseaux) à basse tension – Partie 1: Principes, exigences et essais*

IEC 61000 (toutes les parties), *Compatibilité électromagnétique (CEM)*

IEC 61000-4-5, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-5: Techniques d'essai et de mesure – Essai d'immunité aux ondes de choc*

IEC 61000-4-9, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-9: Techniques d'essai et de mesure – Essai d'immunité au champ magnétique impulsionnel*

IEC 61000-4-10, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-10: Techniques d'essai et de mesure – Essai d'immunité du champ magnétique oscillatoire amorti*

IEC TR 61000-5-2, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 5: Guides d'installation et d'atténuation – Section 2: Mise à la terre et câblage*

IEC 61400-23, *Éoliennes – Partie 23: Essais en vraie grandeur des structures des pales de rotor*

IEC 61587-3, *Structures mécaniques pour équipement électronique – Essais pour la CEI 60917 et la CEI 60297 – Partie 3: Essais de performance du blindage électromagnétique pour les baies et les bacs à cartes*

IEC 61643-11, *Parafoudres basse tension – Partie 11: Parafoudres connectés aux systèmes basse tension – Exigences et méthodes d'essai*

IEC 61643-12, *Parafoudres basse tension – Partie 12: Parafoudres connectés aux réseaux de distribution basse tension – Principes de choix et d'application*

IEC 61643-21, *Parafoudres basse tension – Partie 21: Parafoudres connectés aux réseaux de signaux et de télécommunications – Prescriptions de fonctionnement et méthodes d'essai*

IEC 61643-22, *Parafoudres basse tension – Partie 22: Parafoudres connectés aux réseaux de signaux et de télécommunications – Principes de choix et d'application*

IEC 61936-1, *Installations électriques en courant alternatif de puissance supérieure à 1 kV – Partie 1: Règles communes*

IEC TS 61936-2, *Power installations exceeding 1 kV a.c. and 1,5 kV d.c. – Part 2: d.c. (disponible en anglais seulement)*

IEC 62305-1:2010, *Protection contre la foudre – Partie 1: Principes généraux*

IEC 62305-2:2010, *Protection contre la foudre – Partie 2: Évaluation des risques*

IEC 62305-3:2010, *Protection contre la foudre – Partie 3: Dommages physiques sur les structures et risques humains*

IEC 62305-4:2010, *Protection contre la foudre – Partie 4: Réseaux de puissance et de communication dans les structures*

UIT-T K.20, *Immunité des équipements de télécommunication des centres de télécommunication aux surtensions et aux surintensités*

UIT-T K.21, *Immunité des équipements de télécommunication installés dans les locaux d'abonné aux surtensions et aux surintensités*