



IEC 61400-21-1

Edition 1.0 2019-05

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Wind energy generation systems –
Part 21-1: Measurement and assessment of electrical characteristics – Wind
turbines**

**Systèmes de génération d'énergie éolienne –
Partie 21-1: Mesurage et évaluation des caractéristiques électriques – Éoliennes**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 27.180

ISBN 978-2-8322-6761-5

**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.....	10
INTRODUCTION.....	12
1 Scope.....	13
2 Normative references	13
3 Terms and definitions	14
4 Symbols and units	25
5 Abbreviated terms	26
6 Wind turbine specification.....	27
7 Test conditions and test systems	27
7.1 General.....	27
7.2 Overview of required test levels	27
7.3 Test validity	28
7.4 Test conditions	29
7.5 Test equipment.....	30
8 Measurement and test of electrical characteristics.....	32
8.1 General.....	32
8.2 Power quality aspects	32
8.2.1 General	32
8.2.2 Flicker during continuous operation	32
8.2.3 Flicker and voltage change during switching operations.....	35
8.2.4 Harmonics, interharmonics and higher frequency components	38
8.3 Steady-state operation	40
8.3.1 General	40
8.3.2 Observation of active power against wind speed.....	40
8.3.3 Maximum power	42
8.3.4 Reactive power characteristic ($Q = 0$)	44
8.3.5 Reactive power capability	44
8.3.6 Voltage dependency of PQ diagram.....	45
8.3.7 Unbalance factor	46
8.4 Control performance	47
8.4.1 General	47
8.4.2 Active power control	47
8.4.3 Active power ramp rate limitation	50
8.4.4 Frequency control.....	52
8.4.5 Synthetic inertia.....	54
8.4.6 Reactive power control	55
8.5 Dynamic performance	58
8.5.1 General	58
8.5.2 Fault ride-through capability	58
8.6 Disconnection from grid	66
8.6.1 General	66
8.6.2 Grid protection.....	66
8.6.3 Test of rate of change of frequency RoCoF (df/dt) protection device	70
8.6.4 Reconnection test.....	71
Annex A (informative) Reporting	72
A.1 Overview.....	72

A.2	General.....	72
A.3	Power quality aspects	74
A.4	Steady-state operation	83
A.5	Dynamic performance (see 8.5)	101
A.6	Disconnection from grid (see 8.6)	106
Annex B (informative) Voltage fluctuations and flicker.....		110
B.1	Continuous operation.....	110
B.2	Switching operations.....	110
B.3	Verification test of the measurement procedure for flicker	111
B.3.1	General	111
B.3.2	Fictitious grid performance testing	112
B.3.3	Distorted $u_m(t)$ voltage with multiple zero crossings.....	113
B.3.4	Distorted $u_m(t)$ voltage with inter-harmonic modulation.....	113
B.3.5	Slow frequency changes	114
B.4	Deduction of definitions.....	114
B.4.1	Flicker coefficient	114
B.4.2	Flicker step factor	115
B.4.3	Voltage change factor.....	116
Annex C (normative) Measurement of active power, reactive power and voltage.....		117
C.1	General.....	117
C.2	Generator convention of the signs.....	117
C.3	Calculation of positive, negative and zero sequence quantities	118
C.3.1	Phasor calculations	118
C.3.2	Calculation of the positive sequence quantities using phasor components.....	121
C.3.3	Calculation of the negative sequence quantities using phasor components.....	122
C.3.4	Calculation of the zero sequence quantities using phasor components	123
Annex D (informative) Harmonic evaluation		125
D.1	General.....	125
D.2	General analysis methods.....	125
D.2.1	General	125
D.2.2	Harmonic voltages	125
D.2.3	Harmonic phase angles and magnitudes.....	125
D.2.4	Statistical analysis	129
D.2.5	Sample rate adjustment	129
D.2.6	Determination of background harmonic voltage distortion	129
D.2.7	Diurnal variations of the harmonic voltage and current.....	129
D.2.8	Shutting down neighbouring WT or loads.....	130
D.2.9	Harmonics of current and voltage over power	130
D.2.10	Filters switching.....	131
D.2.11	Measuring at a standard source.....	132
D.2.12	Harmonics power flow + voltage measurement, phase angle	132
D.2.13	Voltage harmonics with and without operation of the tested wind turbine	133
D.2.14	Measurements at different sites	134
D.2.15	Harmonic model.....	134
D.3	Determination of harmonic amplitude affected by space harmonics at DFAG systems	134

Annex E (informative) Assessment of power quality of wind turbines and wind power plants.....	136
E.1 General.....	136
E.2 Voltage fluctuations	136
E.2.1 General	136
E.2.2 Continuous operation.....	137
E.2.3 Switching operations	137
E.3 Current harmonics, interharmonics and higher frequency components	138
Annex F (informative) Guidelines for the transferability of test results to different turbine variants in the same product platform.....	140
Bibliography.....	144
Figure 1 – Example of step response	22
Figure 2 – Measurement system description including the most significant components.....	31
Figure 3 – Fictitious grid for simulation of fictitious voltage	33
Figure 4 – Active power as a function of the wind speed (example).....	41
Figure 5 – Number of measurements in power bins (example)	42
Figure 6 – Number of measurements in wind speed bins (example)	42
Figure 7 – Example of PQ capability diagram for a given voltage at WT level.....	45
Figure 8 – Adjustment of active power reference value	48
Figure 9 – Example of active power response step	48
Figure 10 – Example of available active power and active power in ramp rate limitation modefigure.....	51
Figure 11 – Example of an active power control function $P=f(f)$, with the different measurement points and related steps of frequency	52
Figure 12 – Synthetic inertia – definitions	55
Figure 13 – Test for static error.....	56
Figure 14 – Test of dynamic response (example)	57
Figure 15 – Example UVRT test equipment.....	59
Figure 16 – Tolerances of the positive sequence voltage for the undervoltage event with disconnected WT under test	60
Figure 17 – Tolerance of positive sequence overvoltage event.....	61
Figure 18 – Example OVRT capacitor test unit.....	62
Figure 19 – Example of an undervoltage test chart	63
Figure 20 – Example of an overvoltage capability curve	64
Figure 21 – Example of step ramp for overvoltage or frequency testing.....	68
Figure 22 – Example of pulse ramp for over voltage or frequency testing.....	69
Figure 23 – Example of the test levels to determine the release time	69
Figure A.1 – Voltage flicker P_{St} vs. active power	74
Figure A.2 – Flicker coefficient $c(30^\circ)$ vs. active power	74
Figure A.3 – Flicker coefficient $c(50^\circ)$ vs. active power	75
Figure A.4 – Flicker coefficient $c(70^\circ)$ vs. active power	75
Figure A.5 – Flicker coefficient $c(85^\circ)$ vs. active power	75
Figure A.6 – Time series of 3-phase voltages as RMS of start-up at the wind speed of ... m/s	76

Figure A.7 – Time series of 3-phase currents as RMS of start-up at the wind speed of ... m/s 76

Figure A.8 – Time series of active and reactive power of start-up at the wind speed of ... m/s 76

Figure A.9 – Time series of 3-phase voltages as RMS of start-up at the wind speed of ... m/s 77

Figure A.10 – Time series of 3-phase currents as RMS of start-up at the wind speed of ... m/s 77

Figure A.11 – Time series of active and reactive power of start-up at the wind speed of ... m/s 77

Figure A.12 – Time series of 3-phase voltages as RMS of change from generator stage 1 to stage 2..... 78

Figure A.13 – Time series of 3-phase currents as RMS of change from generator stage 1 to stage 2..... 78

Figure A.14 – Time series of active and reactive power of change from generator stage 1 to stage 2..... 78

Figure A.15 – Time series of 3-phase voltages as RMS of change from generator stage 2 to stage 1..... 78

Figure A.16 – Time series of 3-phase currents as RMS of change from generator stage 2 to stage 1..... 78

Figure A.17 – Time series of active and reactive power of change from generator stage 2 to stage 1..... 79

Figure A.18 – Max. of the 95th percentiles of integer harmonic currents vs. harmonic order..... 83

Figure A.19 – Max. of the 95th percentiles of interharmonic currents vs. frequency..... 83

Figure A.20 – Max. of the 95th percentiles of higher frequency current components vs. frequency..... 83

Figure A.21 – Active power as a function of the wind speed 84

Figure A.22 – Reactive power vs. active power 85

Figure A.23 – PQ-Diagram..... 86

Figure A.24 – PQ-Diagram..... 87

Figure A.25 – PQ-Diagram..... 88

Figure A.26 – Mean 1-min current unbalance factor over active power..... 89

Figure A.27 – Time-series of active power reference values, available power and measured active power output during active power control for the evaluation of the static error 89

Figure A.28 – Time-series of measured wind speed during active power control during the test of the static error..... 89

Figure A.29 – Time-series of active power reference values, available power and measured active power output during active power control for the evaluation of the settling time 90

Figure A.30 – Time-series of available and measured active power output during ramp rate limitation..... 90

Figure A.31 – Time-series of measured wind speed during ramp rate limitation 91

Figure A.32 – Time-series of available and measured active power output during ramp rate limitation..... 91

Figure A.33 – Time-series of measured wind speed during ramp rate limitation 91

Figure A.34 – Time-series of available and measured active power output during ramp rate limitation..... 92

Figure A.35 – Time-series of measured wind speed during ramp rate limitation	92
Figure A.36 – Time-series of available and measured active power output during ramp rate limitation	93
Figure A.37 – Time-series of measured wind speed during ramp rate limitation	93
Figure A.38 – Time-series of available power, measured active power and reference value of the grid frequency change	94
Figure A.39 – Time-series of measured wind speed	94
Figure A.40 – Measured active power over frequency change	94
Figure A.41 – Time-series of available power, measured active power and reference value of the grid frequency change	95
Figure A.42 – Time-series of measured wind speed	95
Figure A.43 – Measured active power over frequency change	95
Figure A.44 – Test 1, time-series of available power, measured active power and reference value of the grid frequency for $0,25 \times P_n < P < 0,5 \times P_n$	96
Figure A.45 – Test 1, time-series of wind speed for $0,25 \times P_n < P < 0,5 \times P_n$	96
Figure A.46 – Test 2, time-series of available power, measured active power and reference value of the grid frequency for $0,25 \times P_n < P < 0,5 \times P_n$	97
Figure A.47 – Test 2, time-series of wind speed for $0,25 \times P_n < P < 0,5 \times P_n$	97
Figure A.48 – Test 3, time-series of available power, measured active power and reference values of the grid frequency for $P > 0,8 \times P_n$	97
Figure A.49 – Test 3, time-series of wind speed for $P > 0,8 \times P_n$	97
Figure A.50 – Test 4, time-series of available power, measured active power and reference value of the grid frequency for $P > 0,8 \times P_n$	97
Figure A.51 – Test 4, time-series of wind speed for $P > 0,8 \times P_n$	98
Figure A.52 – Test 5, time-series of available power, measured active power and reference value of the grid frequency for $v > v_n$	98
Figure A.53 – Test 5, time-series of wind speed for $v > v_n$	98
Figure A.54 – Test 6, time-series of available power, measured active power and reference value of the grid frequency for $v > v_n$	98
Figure A.55 – Test 6, time-series of wind speed for $v > v_n$	98
Figure A.56 – Time-series of reactive power reference values and measured reactive power during the test of reactive power control	99
Figure A.57 – Time-series of active power during the test of reactive power control	99
Figure A.58 – Time-series of reactive power reference values and measured reactive power during the test of reactive power dynamic response	100
Figure A.59 – Time-series of active power during the test of reactive power dynamic response	100
Figure A.60 – Wave shape of 3-phase voltages during entrance of voltage dip/swell when the WT under test is not connected	101
Figure A.61 – Wave shape of 3-phase voltages during clearance of voltage dip/swell when the WT under test is not connected	102
Figure A.62 – 3-phase voltages as RMS (1 line period) during the test when the WT under test is not connected	102
Figure A.63 – Positive sequence voltage during the test when the WT under test is not connected	102
Figure A.64 – Wave shape of 3-phase voltages during entrance of the voltage dip/swell when the WT under test is connected	104
Figure A.65 – Wave shape of 3-phase voltages during clearance of the voltage dip/swell when the WT under test is connected	104

Figure A.66 – 3-phase voltages as RMS (1 line period) during the test when the WT under test is connected	104
Figure A.67 – Positive and negative sequence fundamental voltage during the test when the WT under test is connected	104
Figure A.68 – 3-phase currents as RMS (1 line period) during the test when the WT under test is connected	104
Figure A.69 – Pos. and neg. sequence fundamental current during the test when the WT under test is connected	105
Figure A.70 – Pos. sequence fundamental active power during the test when the WT under test is connected	105
Figure A.71 – Pos. sequence fundamental reactive power during the test when the WT under test is connected	105
Figure A.72 – Pos. sequence fundamental active current during the test when the WT under test is connected	105
Figure A.73 – Pos. sequence fundamental reactive current during the test when the WT under test is connected	105
Figure A.74 – Wind speed or available power during the test when the WT under test is connected	106
Figure A.75 – Voltage during the reconnection test of 10 s	107
Figure A.76 – Active power during the reconnection test of 10 s, including the recovery	107
Figure A.77 – Time-series of measured wind speed during the reconnection test of 10 s	108
Figure A.78 – Voltage during the reconnection test of 60 s	108
Figure A.79 – Active power during the reconnection test of 60 s, including the recovery	108
Figure A.80 – Time-series of measured wind speed during the reconnection test of 60 s	108
Figure A.81 – Voltage during the reconnection test of 600 s	108
Figure A.82 – Active power during the reconnection test of 600 s including the recovery	109
Figure A.83 – Time-series of measured wind speed during the reconnection test of 600 s	109
Figure B.1 – Measurement procedure for flicker during continuous operation of the wind turbine	110
Figure B.2 – Measurement procedure for voltage changes and flicker during switching operations of the wind turbine	111
Figure C.1 – Positive directions of active power, reactive power, instantaneous phase voltages and instantaneous phase currents with generator convention	117
Figure C.2 – Examples of the power phasor diagrams of the generator convention in each quadrant with respective instantaneous phase voltage and current	118
Figure D.1 – Definition of the phase angles of the spectral line in generator convention – (5th harmonic with $\alpha_{I5} = + 120^\circ$ and $\alpha_{U5} = + 170^\circ$ shown as an example, thus 5th harmonic phase angle is $\varphi_5 = + 170^\circ - 120^\circ = + 50^\circ$)	126
Figure D.2 – Comparison of harmonic amplitude aggregation (dotted) no aggregated amplitude directly from DFT with 10-cycle window, (dashed) 10-second aggregation	127
Figure D.3 – Comparison of the prevailing angle ratio (PAR)	128
Figure F.1 – Block diagram for generic wind turbine (source IEC 61400-27-1)	141
Table 1 – Overview of required test levels	28
Table 2 – Specification of requirements for measurement equipment	31
Table 3 – Number of 10-min time-series per wind speed bin	41
Table 4 – Number of measurements per power bin (10 min average)	41

Table 5 – Measured maximum active power values.....	43
Table 6 – Accuracy of the active power control values	49
Table 7 – Results from the active power reference test	49
Table 8 – Active power ramp rate calculation	51
Table 9 – Example of Settings for the frequency dependent active power function	53
Table 10 – Test for static error.....	58
Table 11 – Test for dynamic response	58
Table 12 – Example of undervoltage events.....	63
Table 13 – Example of overvoltage tests.....	65
Table 14 – Grid protection tests	67
Table A.1 – General report information	72
Table A.2 – General data	73
Table A.3 – Nominal data.....	73
Table A.4 – Test conditions.....	73
Table A.5 – Flicker coefficient per power bin (95 th percentile)	74
Table A.6 – Start-up at cut in wind speed.....	75
Table A.7 – Start-up at nominal active power	76
Table A.8 – Worst-case switching between generators	77
Table A.9 – General test information.....	79
Table A.10 – 95 th percentile of 10-min harmonic magnitudes per power bin	79
Table A.11 – 95 th percentile of 10-min harmonic magnitudes per power bin	81
Table A.12 – 95 th percentile of 10-min harmonic magnitudes per power bin	82
Table A.13 – Active power against wind speed (see 8.3.2).....	83
Table A.14 – Measurement data set.....	84
Table A.15 – Maximum active power.....	84
Table A.16 – Reactive power characteristic.....	85
Table A.17 – PQ-diagram.....	86
Table A.18 – PQ-diagram at maximum voltage.....	87
Table A.19 – PQ-diagram at minimum voltage	88
Table A.20 – P-IUF _i diagram.....	88
Table A.21 – General test information.....	89
Table A.22 – Static error	89
Table A.23 – Dynamic response	90
Table A.24 – General test information.....	90
Table A.25 – Active power ramp rate calculation at start-up	90
Table A.26 – General test information.....	91
Table A.27 – Active power ramp rate limitation at start-up.....	91
Table A.28 – General test information.....	92
Table A.29 – Active power ramp rate limitation at normal stop	92
Table A.30 – General test information.....	92
Table A.31 – Active power ramp rate limitation in normal operation	93
Table A.32 – General test information.....	93
Table A.33 – Test at $0,25 \times P_n < P < 0,5 \times P_n$	94

Table A.34 – Test at $P > 0,8 \times P_n$	95
Table A.35 – Synthetic inertia results.....	96
Table A.36 – General test information.....	99
Table A.37 – Static error.....	99
Table A.38 – Dynamic response.....	100
Table A.39 – Results for tests where the WT is not connected.....	101
Table A.40 – Results for tests where the WT is connected.....	103
Table A.41 – Voltage protection.....	106
Table A.42 – Frequency protection.....	106
Table A.43 – Complete trip circuit test.....	106
Table A.44 – RoCoF test results.....	107
Table A.45 – RoCoF test information.....	107
Table A.46 – Reconnection test results.....	107
Table B.1 – Nominal values of the wind turbine used in the verification tests.....	111
Table B.2 – Input relative current fluctuation, $\Delta I/I$, for flicker coefficient $c(\psi_k) = 2,00 \pm 5\%$ when $S_{k, \text{fic}} = 20 \cdot S_n$	112
Table B.3 – Input relative current fluctuation, $\Delta I/I$, for flicker coefficient $c(\psi_k) = 2,00 \pm 5\%$ when $S_{k, \text{fic}} = 50 \cdot S_n$	112
Table B.4 – Test specification for distorted voltage with multiple zero crossings.....	113
Table D.1 – Example of measurements results presentation.....	133
Table E.1– Specification of exponents in accordance with IEC TR 61000-3-6.....	139
Table F.1– Main components influencing the electrical characteristics of the WT.....	142

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

WIND ENERGY GENERATION SYSTEMS –**Part 21-1: Measurement and assessment of electrical characteristics –
Wind turbines****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 61400-21-1 has been prepared by IEC technical committee 88: Wind energy generation systems.

This first edition cancels and replaces the second edition of 61400-21 published in 2008. This edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following new items with respect to 61400-21:

- a) frequency control measurement;
- b) updated reactive power control and capability measurement, including voltage and $\cos \varphi$ control;
- c) inertia control response measurement;
- d) overvoltage ride through test procedure;
- e) updated undervoltage ride through test procedure based on Wind Turbine capability;

f) new methods for the harmonic assessment.

Parts of the assessments related to the wind power plant evaluation are moved to Annex E, as they will be replaced by IEC 61400-21-2, *Measurement and assessment of electrical characteristics – Wind power plants*.

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

FDIS	Report on voting
88/711/FDIS	88/716/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.

INTRODUCTION

This part of IEC 61400 provides a uniform methodology that will ensure consistency and accuracy in reporting, testing and assessment of electrical characteristics of grid connected wind turbines (WTs). The electrical characteristics include wind turbine specifications and capabilities, voltage quality (emissions of flicker and harmonics), under- and overvoltage ride-through response, active power control, frequency control, voltage control, and reactive power control, grid protection and reconnection time.

This part of IEC 61400 has been prepared with the anticipation that it would be applied by:

- the WT manufacturer, striving to meet well-defined electrical characteristics;
- the WT purchaser, in specifying such electrical characteristics;
- the WT operator, who may be required to verify that stated, or required electrical characteristics are met;
- the WT planner or regulator, who has to be able to accurately and fairly determine the impact of a WT on the voltage quality to ensure that the installation is designed so that voltage quality requirements are respected;
- the WT certification authority or testing organization, in evaluating the electrical characteristics of the wind turbine type;
- the planner or regulator of the electric network, who has to be able to determine the grid connection required for a WT.

This part of IEC 61400 provides recommendations for preparing the measurements and assessment of electrical characteristics of grid connected WTs. This document will benefit those parties involved in the manufacture, installation planning, obtaining of permission, operation, usage, testing and regulation of WTs. The measurement and analysis techniques, recommended in this document, should be applied by all parties to ensure that the continuing development and operation of WTs are carried out in an atmosphere of consistent and accurate communication.

This part of IEC 61400 presents measurement and analysis procedures expected to provide consistent results that can be replicated by others. Any selection of tests can be done and reported separately.

WIND ENERGY GENERATION SYSTEMS –

Part 21-1: Measurement and assessment of electrical characteristics – Wind turbines

1 Scope

This part of IEC 61400 includes:

- definition and specification of the quantities to be determined for characterizing the electrical characteristics of a grid-connected wind turbine;
- measurement procedures for quantifying the electrical characteristics;
- procedures for assessing compliance with electrical connection requirements, including estimation of the power quality expected from the wind turbine type when deployed at a specific site.

The measurement procedures are valid for single wind turbines with a three-phase grid connection. The measurement procedures are valid for any size of wind turbine, though this part of IEC 61400 only requires wind turbine types intended for connection to an electricity supply network to be tested and characterized as specified in this part of IEC 61400.

The measured characteristics are valid for the specific configuration and operational mode of the assessed wind turbine product platform. If a measured property is based on control parameters and the behavior of the wind turbine can be changed for this property, it is stated in the test report. Example: Grid protection, where the disconnect level is based on a parameter and the test only verifies the proper functioning of the protection, not the specific level.

The measurement procedures are designed to be as non-site-specific as possible, so that electrical characteristics measured at for example a test site can be considered representative for other sites.

This document is for the testing of wind turbines; all procedures, measurements and tests related to wind power plants are covered by IEC 61400-21-2.

The procedures for assessing electrical characteristics are valid for wind turbines with the connection to the PCC in power systems with stable grid frequency.

NOTE

For the purposes of this document, the following terms for system voltage apply:

- Low voltage (LV) refers to $U_n \leq 1$ kV;
- Medium voltage (MV) refers to 1 kV $< U_n \leq 35$ kV;
- High voltage (HV) refers to 35 kV $< U_n \leq 220$ kV;
- Extra high voltage (EHV) refers to $U_n > 220$ kV.

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 61000-3-2:2014, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)*

IEC 61000-3-3, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-3: Limits – Limits of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current < 16 A per phase and not subject to conditional connection*

IEC TR 61000-3-6, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems*

IEC TR 61000-3-7, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-7: Limits – Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems*

IEC TR 61000-3-14, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-14: Assessment of emission limits for harmonics, interharmonics, voltage fluctuations and unbalance for the connection of disturbing installations to LV power systems*

IEC 61000-4-7:2002, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto*
IEC 61000-4-7:2002/AMD1:2008

IEC 61000-4-15:2010, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-15: Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and design specifications*

IEC 61000-4-30, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*

IEC TR 61869-103:2012, *Instrument transformers – The use of instrument transformers for power quality measurement*

IEC 62008, *Performance characteristics and calibration methods for digital data acquisition systems and relevant software*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	155
INTRODUCTION.....	157
1 Domaine d'application	158
2 Références normatives	159
3 Termes et définitions	159
4 Symboles et unités	171
5 Termes abrégés	172
6 Spécifications relatives aux éoliennes	173
7 Conditions d'essai et systèmes d'essai	173
7.1 Généralités	173
7.2 Vue d'ensemble des niveaux d'essai exigés	173
7.3 Validité de l'essai.....	174
7.4 Conditions d'essai.....	175
7.5 Matériel d'essai.....	176
8 Mesurage et essai des caractéristiques électriques	178
8.1 Généralités	178
8.2 Aspects liés à la qualité de puissance	178
8.2.1 Généralités	178
8.2.2 Papillotement en fonctionnement continu.....	178
8.2.3 Variation de papillotement et de tension pendant les opérations de commutation	182
8.2.4 Harmoniques, interharmoniques et composantes à fréquence plus élevée	184
8.3 Fonctionnement en régime établi	187
8.3.1 Généralités	187
8.3.2 Observation de la puissance active en fonction de la vitesse du vent.....	187
8.3.3 Puissance maximale	190
8.3.4 Caractéristiques puissance réactive ($Q = 0$).....	191
8.3.5 Capacité de puissance réactive	192
8.3.6 Dépendance de la tension du diagramme QP	193
8.3.7 Taux de déséquilibre	194
8.4 Contrôle de performance	195
8.4.1 Généralités	195
8.4.2 Contrôle de puissance active	195
8.4.3 Limitation du taux de variation de la puissance active.....	198
8.4.4 Contrôle de fréquence	201
8.4.5 Inertie synthétique	204
8.4.6 Contrôle de puissance réactive	205
8.5 Performances dynamiques	208
8.5.1 Généralités	208
8.5.2 Capacité d'alimentation continue en cas de défaillance	208
8.6 Déconnexion du réseau	216
8.6.1 Généralités	216
8.6.2 Protection du réseau	216
8.6.3 Essai du taux de variation de fréquence RoCoF (df/dt) du dispositif de protection	222
8.6.4 Essai de reconnexion	223

Annexe A (informative) Rapport	224
A.1 Vue d'ensemble	224
A.2 Généralités	224
A.3 Aspects liés à la qualité de puissance	226
A.4 Fonctionnement en régime établi	236
A.5 Performance dynamique (voir 8.5)	254
A.6 Déconnexion du réseau (voir 8.6)	259
Annexe B (informative) Fluctuations de tension et papillotement.....	263
B.1 Fonctionnement continu	263
B.2 Opérations de commutation	263
B.3 Essai de vérification de la procédure de mesure de papillotement.....	264
B.3.1 Généralités	264
B.3.2 Essai des performances de réseau fictif.....	266
B.3.3 Tension déformée $u_m(t)$ avec de multiples passages par zéro	266
B.3.4 Tension déformée $u_m(t)$ avec modulation interharmonique	267
B.3.5 Variations de faible fréquence	267
B.4 Déduction des définitions	268
B.4.1 Coefficient de papillotement	268
B.4.2 Facteur de papillotement sur un échelon	268
B.4.3 Facteur de variation de tension.....	269
Annexe C (normative) Mesure de la puissance active, de la puissance réactive et de la tension.....	270
C.1 Généralités	270
C.2 Convention des signes du générateur	270
C.3 Calcul des grandeurs de séquences positives, négatives et égales à zéro	271
C.3.1 Calculs du phaseur	271
C.3.2 Calcul des grandeurs de séquence positive au moyen de composantes de phaseur	274
C.3.3 Calcul des grandeurs de séquence négative au moyen de composantes de phaseur	275
C.3.4 Calcul des grandeurs de séquence égale à zéro au moyen de composantes de phaseur	276
Annexe D (informative) Évaluation harmonique.....	278
D.1 Généralités	278
D.2 Méthodes d'analyse générale.....	278
D.2.1 Généralités	278
D.2.2 Tensions harmoniques.....	278
D.2.3 Angles de phase harmoniques et amplitudes	278
D.2.4 Analyse statistique	282
D.2.5 Ajustement du taux d'échantillonnage	282
D.2.6 Détermination de la distorsion de fond de la tension harmonique.....	283
D.2.7 Variations diurnes de la tension et du courant harmoniques	283
D.2.8 Mise à l'arrêt des éoliennes environnantes ou des charges.....	284
D.2.9 Harmoniques de courant et de tension sur la puissance	284
D.2.10 Commutation des filtres	285
D.2.11 Mesures de source normalisée	285
D.2.12 Flux de puissance d'harmoniques + mesures de tension, angle de phase	286
D.2.13 Harmoniques de tension avec et sans fonctionnement de l'éolienne soumise à l'essai	287

D.2.14	Mesures sur différents sites	288
D.2.15	Modèle harmonique	288
D.3	Détermination de l'amplitude harmonique influencée par les harmoniques spatiaux dans les systèmes DFAG	288
Annexe E (informative)	Évaluation de la qualité de puissance des éoliennes et des centrales éoliennes	290
E.1	Généralités	290
E.2	Fluctuations de tension	290
E.2.1	Généralités	290
E.2.2	Fonctionnement continu.....	291
E.2.3	Opérations de commutation	291
E.3	Harmoniques de courant, interharmoniques et composantes à fréquence plus élevée	293
Annexe F (informative)	Lignes directrices pour le transfert des résultats d'essais à différentes variantes de turbines dans la même plateforme de produits.....	294
Bibliographie.....		298
Figure 1	– Exemple de réponse d'échelon.....	168
Figure 2	– Description du système de mesure, y compris les composants les plus importants.....	177
Figure 3	– Réseau fictif pour la simulation d'une tension fictive.....	179
Figure 4	– Puissance active en fonction de la vitesse du vent (exemple).....	188
Figure 5	– Nombre de mesures dans les tranches de puissance (exemple).....	189
Figure 6	– Nombre de mesures dans les tranches de vitesse du vent (exemple).....	190
Figure 7	– Exemple de diagramme de capacité QP pour une tension donnée au niveau de l'éolienne	193
Figure 8	– Ajustement de la valeur de référence de la puissance active.....	196
Figure 9	– Exemple d'échelon de réponse de puissance active	197
Figure 10	– Exemple de puissance active disponible et de puissance active en mode de limitation du taux de variation	200
Figure 11	– Exemple d'une fonction de contrôle de puissance active $P = f(f)$, avec les différents points de mesure et les échelons de fréquence associés.....	202
Figure 12	– Inertie synthétique – définitions.....	205
Figure 13	– Essai pour l'erreur statique.....	206
Figure 14	– Essai de la réponse dynamique de l'éolienne (exemple).....	207
Figure 15	– Exemple de matériel d'essai UVRT	209
Figure 16	– Tolérances de la tension de séquence positive pour l'événement de sous-tension avec l'éolienne déconnectée à l'essai	210
Figure 17	– Tolérance de l'événement de surtension de séquence positive.....	211
Figure 18	– Exemple d'unité d'essai d'un condensateur OVRT	212
Figure 19	– Exemple d'un diagramme d'essai de sous-tension.....	213
Figure 20	– Exemple d'une courbe de capacité de surtension	214
Figure 21	– Exemple d'échelon de variation pour l'essai de surtension ou de surfréquence.....	219
Figure 22	– Exemple d'impulsion de variation pour l'essai de surtension ou de surfréquence.....	220
Figure 23	– Exemple des niveaux d'essai pour déterminer le temps de relâchement.....	221
Figure A.1	– Papillotement de tension P_{st} vs. puissance active.....	227

Figure A.2 – Coefficient de papillotement $c(30^\circ)$ vs. puissance active	227
Figure A.3 – Coefficient de papillotement $c(50^\circ)$ vs. puissance active	227
Figure A.4 – Coefficient de papillotement $c(70^\circ)$ vs. puissance active	227
Figure A.5 – Coefficient de papillotement $c(85^\circ)$ vs. puissance active	228
Figure A.6 – Séries temporelles de tensions triphasées en tant que valeur efficace de démarrage à la vitesse du vent de ... m/s.....	228
Figure A.7 – Séries temporelles de courants triphasés en tant que valeur efficace de démarrage à la vitesse du vent de ... m/s.....	228
Figure A.8 – Séries temporelles de puissance active et réactive de démarrage à la vitesse du vent de ... m/s	229
Figure A.9 – Séries temporelles de tensions triphasées en tant que valeur efficace de démarrage à la vitesse du vent de ... m/s.....	229
Figure A.10 – Séries temporelles de courants triphasés en tant que valeur efficace de démarrage à la vitesse du vent de ... m/s.....	229
Figure A.11 – Séries temporelles de puissance active et réactive de démarrage à la vitesse du vent de ... m/s	230
Figure A.12 – Séries temporelles de tensions triphasées en tant que valeur efficace de commutation de l'étape 1 du générateur vers l'étape 2.....	230
Figure A.13 – Séries temporelles de courants triphasés en tant que valeur efficace de commutation de l'étape 1 du générateur vers l'étape 2.....	230
Figure A.14 – Séries temporelles de puissance active et réactive de commutation de l'étape 1 du générateur vers l'étape 2	231
Figure A.15 – Séries temporelles de tensions triphasées en tant que valeur efficace de commutation de l'étape 2 du générateur vers l'étape 1.....	231
Figure A.16 – Séries temporelles de courants triphasés en tant que valeur efficace de commutation de l'étape 2 du générateur vers l'étape 1.....	231
Figure A.17 – Séries temporelles de puissance active et réactive de commutation de l'étape 2 du générateur vers l'étape 1	231
Figure A.18 – Max. des 95 ^{es} centiles de courants harmoniques entiers vs. le rang d'harmonique	236
Figure A.19 – Max. des 95 ^{es} centiles de courants interharmoniques vs. la fréquence.....	236
Figure A.20 – Max. des 95 ^{es} centiles des composantes de courant à fréquence plus élevée vs. la fréquence.....	236
Figure A.21 – Puissance active en fonction de la vitesse du vent.....	237
Figure A.22 – Puissance réactive vs. puissance active	238
Figure A.23 – Diagramme QP	239
Figure A.24 – Diagramme QP	240
Figure A.25 – Diagramme QP	241
Figure A.26 – Taux de déséquilibre de courant moyen sur 1 min en puissance active.....	242
Figure A.27 – Séries temporelles des valeurs de référence de la puissance active, de la puissance disponible et de la puissance de sortie active mesurée pendant le contrôle de la puissance active pour l'évaluation de l'erreur statique.....	242
Figure A.28 – Séries temporelles de la vitesse du vent mesurée pendant le contrôle de la puissance active au cours de l'essai de l'erreur statique	242
Figure A.29 – Séries temporelles des valeurs de référence de la puissance active, de la puissance disponible et de la puissance de sortie active mesurée pendant le contrôle de la puissance active pour l'évaluation du temps de stabilisation	243
Figure A.30 – Séries temporelles de la puissance de sortie active disponible et mesurée pendant la limitation du taux de variation.....	243

Figure A.31 – Séries temporelles de la vitesse du vent mesurée pendant la limitation du taux de variation	244
Figure A.32 – Séries temporelles de la puissance de sortie active disponible et mesurée pendant la limitation du taux de variation.....	244
Figure A.33 – Séries temporelles de la vitesse du vent mesurée pendant la limitation du taux de variation	244
Figure A.34 – Séries temporelles de la puissance de sortie active disponible et mesurée pendant la limitation du taux de variation.....	245
Figure A.35 – Séries temporelles de la vitesse du vent mesurée pendant la limitation du taux de variation	245
Figure A.36 – Séries temporelles de la puissance de sortie active disponible et mesurée pendant la limitation du taux de variation.....	246
Figure A.37 – Séries temporelles de la vitesse du vent mesurée pendant la limitation du taux de variation	246
Figure A.38 – Séries temporelles de la puissance disponible, de la puissance active mesurée et de la valeur de référence de la variation de fréquence du réseau	247
Figure A.39 – Séries temporelles de la vitesse du vent mesurée.....	247
Figure A.40 – Puissance active mesurée sur la variation de fréquence	247
Figure A.41 – Séries temporelles de la puissance disponible, de la puissance active mesurée et de la valeur de référence de la variation de fréquence du réseau	248
Figure A.42 – Séries temporelles de la vitesse du vent mesurée.....	248
Figure A.43 – Puissance active mesurée sur la variation de fréquence	248
Figure A.44 – Essai 1, séries temporelles de la puissance disponible, de la puissance active mesurée et de la valeur de référence de la variation de fréquence du réseau pour $0,25 \times P_n < P < 0,5 \times P_n$	249
Figure A.45 – Essai 1, séries temporelles de la vitesse du vent pour $0,25 \times P_n < P < 0,5 \times P_n$	250
Figure A.46 – Essai 2, séries temporelles de la puissance disponible, de la puissance active mesurée et de la valeur de référence de la variation de fréquence du réseau pour $0,25 \times P_n < P < 0,5 \times P_n$	250
Figure A.47 – Essai 2, séries temporelles de la vitesse du vent pour $0,25 \times P_n < P < 0,5 \times P_n$	250
Figure A.48 – Essai 3, séries temporelles de la puissance disponible, de la puissance active mesurée et des valeurs de référence de la variation de fréquence du réseau pour $P > 0,8 \times P_n$	250
Figure A.49 – Essai 3, séries temporelles de la vitesse du vent pour $P > 0,8 \times P_n$	250
Figure A.50 – Essai 4, séries temporelles de la puissance disponible, de la puissance active mesurée et de la valeur de référence de la variation de fréquence du réseau pour $P > 0,8 \times P_n$	251
Figure A.51 – Essai 4, séries temporelles de la vitesse du vent pour $P > 0,8 \times P_n$	251
Figure A.52 – Essai 5, séries temporelles de la puissance disponible, de la puissance active mesurée et de la valeur de référence de la variation de fréquence du réseau pour $v > v_n$	251
Figure A.53 – Essai 5, séries temporelles de la vitesse du vent pour $v > v_n$	251
Figure A.54 – Essai 6, séries temporelles de la puissance disponible, de la puissance active mesurée et de la valeur de référence de la variation de fréquence du réseau pour $v > v_n$	251
Figure A.55 – Essai 6, séries temporelles de la vitesse du vent pour $v > v_n$	252
Figure A.56 – Séries temporelles des valeurs de référence de la puissance réactive et de la puissance réactive mesurée au cours de l'essai de contrôle de puissance réactive.....	252

Figure A.57 – Séries temporelles de la puissance active au cours de l'essai de contrôle de puissance réactive	253
Figure A.58 – Séries temporelles des valeurs de référence de la puissance réactive et de la puissance réactive mesurée au cours de l'essai de réponse dynamique de puissance réactive	253
Figure A.59 – Séries temporelles de la puissance active au cours de l'essai de réponse dynamique de puissance réactive	253
Figure A.60 – Forme d'onde des tensions triphasées pendant l'entrée en creux/hausse de tension lorsque l'éolienne soumise à l'essai n'est pas connectée	254
Figure A.61 – Forme d'onde des tensions triphasées pendant l'élimination du creux/de la hausse de tension lorsque l'éolienne soumise à l'essai n'est pas connectée	255
Figure A.62 – Tensions triphasées en tant que valeur efficace (1 période de phase) au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai n'est pas connectée	255
Figure A.63 – Tension de séquence positive au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai n'est pas connectée	255
Figure A.64 – Forme d'onde des tensions triphasées pendant l'entrée en creux/hausse de tension lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée	257
Figure A.65 – Forme d'onde des tensions triphasées pendant l'élimination du creux/de la hausse de tension lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée.....	257
Figure A.66 – Tensions triphasées en tant que valeur efficace (1 période de phase) au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée	257
Figure A.67 – Tension fondamentale de séquence positive et négative au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée.....	257
Figure A.68 – Courants triphasés en tant que valeur efficace (1 période de phase) au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée	257
Figure A.69 – Courant fondamental de séquence positive et négative au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée.....	258
Figure A.70 – Puissance active fondamentale de séquence positive au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée.....	258
Figure A.71 – Puissance réactive fondamentale de séquence positive au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée.....	258
Figure A.72 – Courant actif fondamental de séquence positive au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée.....	258
Figure A.73 – Courant réactif fondamental de séquence positive au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée.....	258
Figure A.74 – Vitesse du vent ou puissance disponible au cours de l'essai lorsque l'éolienne soumise à l'essai est connectée	259
Figure A.75 – Tension au cours de l'essai de reconnexion de 10 s.....	260
Figure A.76 – Puissance active au cours de l'essai de reconnexion de 10 s, rétablissement compris	260
Figure A.77 – Séries temporelles de la vitesse du vent mesurée au cours de l'essai de reconnexion de 10 s.....	261
Figure A.78 – Tension au cours de l'essai de reconnexion de 60 s.....	261
Figure A.79 – Puissance active au cours de l'essai de reconnexion de 60 s, rétablissement compris	261
Figure A.80 – Séries temporelles de la vitesse du vent mesurée au cours de l'essai de reconnexion de 60 s.....	261
Figure A.81 – Tension au cours de l'essai de reconnexion de 600 s.....	261
Figure A.82 – Puissance active au cours de l'essai de reconnexion de 600 s, rétablissement compris	262

Figure A.83 – Séries temporelles de la vitesse du vent mesurée au cours de l'essai de reconnexion de 600 s.....	262
Figure B.1 – Procédures de mesure du papillotement pendant le fonctionnement continu de l'éolienne	263
Figure B.2 – Procédures de mesure des variations de tension et de papillotement pendant les opérations de commutation de l'éolienne	264
Figure C.1 – Directions positives de la puissance active, de la puissance réactive, des tensions de phase instantanées et des courants de phase instantanés avec convention du générateur	270
Figure C.2 – Exemple de diagrammes de phaseur de puissance de la convention du générateur dans chaque quadrant avec tension de phase instantanée et courant respectifs	271
Figure D.1 – Définition des angles de phase de la ligne spectrale dans la convention de générateur – (5 ^e harmonique avec $\alpha_{15} = + 120^\circ$ et $\alpha_{U5} = + 170^\circ$ montré à titre d'exemple, ainsi le 5 ^e angle de phase harmonique est $\varphi_5 = + 170^\circ - 120^\circ = + 50^\circ$)	279
Figure D.2 – Comparaison de l'agrégation d'amplitude harmonique (pointillés) pas d'amplitude agrégée directement à partir de la transformée de Fourier discrète avec une fenêtre de 10 cycles, (tirets) agrégation de 10 secondes	280
Figure D.3 – Comparaison du rapport d'angle dominant (PAR)	282
Figure F.1 – Diagramme général d'une éolienne générique (source: IEC 61400-27-1)	295
Tableau 1 – Vue d'ensemble des niveaux d'essai exigés	174
Tableau 2 – Spécification des exigences pour les appareils de mesure.....	177
Tableau 3 – Nombre de séries temporelles de 10 min par tranche de vitesse du vent	187
Tableau 4 – Nombre de mesures par tranche de puissance (10 min en moyenne)	188
Tableau 5 – Valeurs de puissance active maximale mesurée	191
Tableau 6 – Précision des valeurs de contrôle de la puissance active.....	198
Tableau 7 – Résultats de l'essai de référence de puissance active	198
Tableau 8 – Calcul du taux de variation de la puissance active	200
Tableau 9 – Exemple de réglages pour la fonction de puissance active dépendante de la fréquence.....	203
Tableau 10 – Essai pour l'erreur statique	208
Tableau 11 – Essai pour la réponse dynamique	208
Tableau 12 – Exemple d'événements de sous-tension	213
Tableau 13 – Exemple d'essais de surtension.....	215
Tableau 14 – Essais de protection du réseau.....	218
Tableau A.1 – Rapport général d'informations.....	224
Tableau A.2 – Données générales	225
Tableau A.3 – Données nominales.....	225
Tableau A.4 – Conditions d'essai	226
Tableau A.5 – Coefficient de papillotement par tranche de puissance (95 ^e centile).....	226
Tableau A.6 – Mise en marche à la vitesse de démarrage	228
Tableau A.7 – Démarrage en puissance nominale active	229
Tableau A.8 – Cas le plus défavorable de commutation entre générateurs.....	230
Tableau A.9 – Informations générales relatives aux essais	232
Tableau A.10 – 95 ^e centile d'amplitudes harmoniques de 10 min par tranche de puissance	232

Tableau A.11 – 95 ^e centile d'amplitudes harmoniques de 10 min par tranche de puissance	234
Tableau A.12 – 95 ^e centile d'amplitudes harmoniques de 10 min par tranche de puissance	235
Tableau A.13 – Puissance active en fonction de la vitesse du vent (voir 8.3.2)	236
Tableau A.14 – Ensemble de données de mesure	237
Tableau A.15 – Puissance active maximale	237
Tableau A.16 – Caractéristique de la puissance réactive	238
Tableau A.17 – Diagramme QP	239
Tableau A.18 – Diagramme QP à la tension maximale	240
Tableau A.19 – Diagramme QP à la tension minimale	241
Tableau A.20 – Diagramme P-IUF _j	241
Tableau A.21 – Informations générales relatives aux essais	242
Tableau A.22 – Erreur statique	242
Tableau A.23 – Réponse dynamique	243
Tableau A.24 – Informations générales relatives aux essais	243
Tableau A.25 – Calcul du taux de variation de la puissance active au démarrage	243
Tableau A.26 – Informations générales relatives aux essais	244
Tableau A.27 – Limitation du taux de variation de la puissance active au démarrage	244
Tableau A.28 – Informations générales relatives aux essais	245
Tableau A.29 – Limitation du taux de variation de la puissance active pendant l'arrêt normal	245
Tableau A.30 – Informations générales relatives aux essais	245
Tableau A.31 – Limitation du taux de variation de la puissance active en fonctionnement normal	246
Tableau A.32 – Informations générales relatives aux essais	246
Tableau A.33 – Essai à $0,25 \times P_n < P < 0,5 \times P_n$	247
Tableau A.34 – Essai à $P > 0,8 \times P_n$	248
Tableau A.35 – Résultats inertie synthétique	249
Tableau A.36 – Informations générales relatives aux essais	252
Tableau A.37 – Erreur statique	252
Tableau A.38 – Réponse dynamique	253
Tableau A.39 – Résultats pour les essais effectués lorsque l'éolienne n'est pas connectée	254
Tableau A.40 – Résultats pour les essais effectués lorsque l'éolienne est connectée	256
Tableau A.41 – Protection de tension	259
Tableau A.42 – Protection de fréquence	259
Tableau A.43 – Essai du circuit de déclenchement complet	259
Tableau A.44 – Résultats de l'essai RoCoF	260
Tableau A.45 – Informations générales relatives à l'essai RoCoF	260
Tableau A.46 – Résultats de l'essai de reconnexion	260
Tableau B.1 – Valeurs nominales de la vitesse du vent utilisées pour les essais de vérification	265
Tableau B.2 – Fluctuation du courant d'entrée relatif, $\Delta I/I$, pour le coefficient de papillotement $c(\psi_k) = 2,00 \pm 5 \%$ lorsque $S_{k, fic} = 20 \cdot S_n$	265

Tableau B.3 – Fluctuation du courant d'entrée relatif, $\Delta I/I$, pour le coefficient de papillotement $c(\psi_k) = 2,00 \pm 5 \%$ lorsque $S_{k, \text{fic}} = 50 \cdot S_n$ 266

Tableau B.4 – Caractéristiques d'essai pour la tension déformée avec de multiples passages par zéro 267

Tableau D.1 – Exemple de présentation des résultats de mesures 287

Tableau E.1 – Spécifications des exposants conformément à l'IEC TR 61000-3-6 293

Tableau F.1 – Principales composantes influençant les caractéristiques électriques de l'éolienne 296

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SYSTÈMES DE GÉNÉRATION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE –

**Partie 21-1: Mesurage et évaluation des caractéristiques électriques –
Éoliennes**

AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale IEC 61400-21-1 a été établie par le comité d'études 88 de l'IEC: Systèmes de génération d'énergie éolienne.

Cette première édition annule et remplace la deuxième édition de l'IEC 61400-21 parue en 2008. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les nouveaux éléments suivants par rapport à l'IEC 61400-21:

- a) mesure de contrôle de fréquence;
- b) contrôle actualisé de la puissance réactive et de la mesure de la capacité, y compris le contrôle de la tension et contrôle du $\cos \varphi$;

- c) mesure de la réponse du contrôle d'inertie;
- d) procédure d'essai du passage de surtension;
- e) procédure d'essai du maintien de l'alimentation en sous-tension en fonction de la capacité des éoliennes actualisée;
- f) nouvelles méthodes pour l'évaluation de l'harmonique.

Les parties des évaluations liées à l'évaluation de la centrale éolienne sont déplacées à l'Annexe E, car elles seront remplacées par l'IEC 61400-21-2, *Mesurage et évaluation des caractéristiques électriques – Centrales éoliennes*.

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

FDIS	Rapport de vote
88/711/FDIS	88/716/RVD

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

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

Une liste de toutes les parties de la série IEC 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. A 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.

INTRODUCTION

La présente partie de l'IEC 61400 fournit une méthodologie uniforme qui assurera la cohérence et la précision dans le compte-rendu, les essais et l'évaluation des caractéristiques électriques des éoliennes connectées au réseau. Les caractéristiques électriques comprennent les spécifications et les capacités relatives aux éoliennes, la qualité de la tension (émissions de papillotement et d'harmoniques), la réponse à la sous-tension et à la surtension, le contrôle de la puissance active, le contrôle de la fréquence, le contrôle de la tension et le contrôle de la puissance réactive, la protection du réseau et le temps de reconnexion.

La présente partie de l'IEC 61400 a été préparée avec la perspective de son application par:

- le fabricant d'éoliennes, s'efforçant de satisfaire à des caractéristiques électriques bien définies;
- l'acheteur d'éoliennes, en spécifiant de telles caractéristiques électriques;
- l'opérateur d'éoliennes, à qui il peut être exigé de vérifier ce qui est stipulé ou si les caractéristiques électriques exigées sont respectées;
- le planificateur ou le régulateur de l'éolienne, qui doit pouvoir déterminer, précisément et honnêtement, l'impact d'une éolienne sur la qualité de la tension, pour s'assurer que l'installation est conçue de telle sorte que les exigences de qualité de tension soient respectées;
- l'autorité de certification de l'éolienne ou l'organisme d'essai, en évaluant les caractéristiques électriques du type d'éolienne;
- le planificateur ou le régulateur du réseau électrique, qui doit pouvoir déterminer le raccordement au réseau exigé pour une éolienne.

La présente partie de l'IEC 61400 fournit des recommandations pour préparer les mesures et l'évaluation des caractéristiques électriques des éoliennes connectées au réseau. Le présent document sera utile pour les acteurs concernés par la fabrication, la planification des installations, l'obtention des autorisations, l'exploitation, l'utilisation, les essais et la réglementation des éoliennes. Il convient que les techniques de mesure et d'analyse, recommandées dans le présent document, soient appliquées par tous les acteurs, pour s'assurer que le développement et l'exploitation continus des éoliennes s'effectuent dans un climat de communication cohérent et précis.

La présente partie de l'IEC 61400 présente des procédures de mesure et d'analyse prévues pour fournir des résultats cohérents qui pourront être reproduits par d'autres. Tout choix d'essais peut être fait et consigné séparément.

SYSTÈMES DE GÉNÉRATION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE –

Partie 21-1: Mesurage et évaluation des caractéristiques électriques – Éoliennes

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61400 comprend:

- la définition et la spécification des grandeurs à déterminer pour caractériser les caractéristiques électriques d'une éolienne connectée à un réseau;
- les procédures de mesure pour quantifier les caractéristiques électriques;
- les procédures pour évaluer la conformité aux exigences de raccordement électrique, y compris l'estimation de la qualité de puissance attendue d'un type d'éolienne, une fois déployée sur un site spécifique.

Les procédures de mesure sont valables pour les éoliennes individuelles avec un raccordement triphasé au réseau. Les procédures de mesure sont valables pour n'importe quelle taille d'éolienne; toutefois, la présente partie de l'IEC 61400 exige uniquement des types d'éoliennes prévues pour le raccordement à un réseau d'alimentation électrique, qui sont donc à soumettre aux essais et à caractériser comme spécifié dans la présente partie de l'IEC 61400.

Les caractéristiques mesurées sont valables pour la configuration spécifique et le mode de fonctionnement de la plateforme de produits éoliens évaluée. Il est spécifié dans le rapport d'essai si une propriété mesurée repose sur des paramètres de commande et que le comportement de l'éolienne peut être modifié pour cette propriété. Exemple: Protection du réseau, où le niveau de déconnexion repose sur un paramètre et l'essai ne vérifie que le bon fonctionnement de la protection, et non le niveau spécifique.

Les procédures de mesure sont conçues pour être aussi indépendantes du site que possible, de sorte que des caractéristiques électriques, mesurées par exemple sur un site d'essai, puissent être vues comme représentatives pour d'autres sites.

Le présent document concerne les essais des éoliennes; toutes les procédures, mesures et essais relatifs aux centrales éoliennes sont couverts par l'IEC 61400-21-2.

Les procédures d'évaluation des caractéristiques électriques sont valables pour les éoliennes connectées au PCC dans les réseaux d'alimentation à fréquence de réseau stable.

NOTE

Pour les besoins du présent document, les termes suivants s'appliquent pour la tension du système:

- basse tension (BT) s'applique à $U_n \leq 1$ kV;
- moyenne tension (MT) s'applique à 1 kV $< U_n \leq 35$ kV;
- haute tension (HT) s'applique à 35 kV $< U_n \leq 220$ kV;
- très haute tension (THT) s'applique à $U_n > 220$ kV.

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 61000-3-2:2014, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 3-2: Limites – Limites pour les émissions de courant harmonique (courant appelé par les appareils ≤ 16 A par phase)*

IEC 61000-3-3, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 3-3: Limitation – Limitations des variations de tension, des fluctuations de tension et du papillotement dans les réseaux publics d'alimentation basse tension pour les matériels ayant un courant assigné < 16 A par phase et non soumis à un raccordement conditionnel*

IEC TR 61000-3-6, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems* (disponible en anglais seulement)

IEC TR 61000-3-7, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-7: Limits – Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems* (disponible en anglais seulement)

IEC TR 61000-3-14, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-14: Assessment of emission limits for harmonics, interharmonics, voltage fluctuations and unbalance for the connection of disturbing installations to LV power systems* (disponible en anglais seulement)

IEC 61000-4-7:2002, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-7: Techniques d'essai et de mesure – Guide général relatif aux mesures d'harmoniques et d'interharmoniques, ainsi qu'à l'appareillage de mesure, applicable aux réseaux d'alimentation et aux appareils qui y sont raccordés*

IEC 61000-4-7:2002/AMD1:2008

IEC 61000-4-15:2010, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-15: Techniques d'essai et de mesure – Flickermètre – Spécifications fonctionnelles et de conception*

IEC 61000-4-30, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-30: Techniques d'essai et de mesure – Méthodes de mesure de la qualité de l'alimentation*

IEC TR 61869-103:2012, *Instrument transformers – The use of instrument transformers for power quality measurement* (disponible en anglais seulement)

IEC 62008, *Caractéristiques de performance et méthodes d'étalonnage pour les systèmes d'acquisition de données numériques et logiciels appropriés*