

中华人民共和国国家标准

GB/T 36994—XXXX
代替 GB/T 36994-2018

风能发电系统 风力发电机组电网适应性测试规程

Wind energy generation systems — Test procedure of grid adaptability for wind turbines

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 符号和定义.....	2
5 基本要求.....	3
6 测试内容.....	3
6.1 电压偏差适应性.....	3
6.2 频率适应性.....	3
6.3 三相电压不平衡适应性.....	6
6.4 闪变适应性.....	6
6.5 谐波电压适应性.....	7
6.6 低短路比适应性.....	7
6.7 相角跳变适应性.....	8
6.8 阻抗特性.....	8
7 测试设备与平台.....	8
7.1 电网扰动模拟装置.....	8
7.2 可调阻抗装置.....	9
7.3 地面测试平台.....	10
7.4 测量设备.....	10
8 测试程序.....	10
8.1 基本条件.....	10
8.2 空载测试.....	10
8.3 负载测试.....	11
9 测试报告内容.....	15
9.1 测试记录数据.....	15
9.2 计算参数指标.....	15
9.3 不确定度.....	15
附录 A（资料性） 控制系统响应性能指标说明.....	16
附录 B（资料性） 风电机组阻抗计算方法.....	17
附录 C（资料性） 短路比计算方法.....	18
附录 D（资料性） 报告格式样本.....	19

前 言

本文件按照GB/T1.1—2020《标准化工作导则 第1部分:标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。
本文件代替GB/T 36994-2018《风力发电机组 电网适应性测试规程》，与GB/T 36994-2018相比，主要技术变化如下：

- a) 修改“空载测试”术语为“空载试验”（见3.3），修改“风电机组惯量响应”定义（见3.5），增加了“风电机组一次调频”（见3.6）、“调节时间”（见3.8）、“风电机组短路比”（见3.9）术语与定义；
- b) 修改了“5 基本要求”，增加测试点、测试条件要求等（见第5节）；
- c) 修改“频率偏差适应性”为“频率适应性”（见6.2），修改了本节内容组织结构；
- d) 增加频率变化率适应性测试内容（见6.2.2），修改了惯量响应与一次调频测试内容（见6.2.3、6.2.4）；
- e) 增加了间谐波适应性测试的范围（见6.5.2）；
- f) 增加了低短路比适应性、相角跳变适应性、阻抗特性测试内容（见6.6、6.7、6.8）；
- g) 修改了电网模拟装置的相关描述，删除了测试点要求（见2018年版的7.1.2），修改了电网扰动模拟装置的运行条件和主要技术指标（见7.1.2）；
- h) 测试设备与平台增加了可调阻抗测试装置（见7.2）、地面测试平台（见7.3）；
- i) 根据测试内容变化，增加了低短路比适应性、相角跳变适应性和阻抗特性空载试验（见8.2.6、8.2.7、8.2.8）；
- j) 根据测试内容变化，调整了频率适应性、谐波电压适应性负载测试（见8.3.2、8.3.5），增加了低短路比适应性、相角跳变适应性和阻抗特性空载测试（见8.3.6、8.3.7、8.3.8）；
- k) 增加了计算参数指标（见9.2.1）；
- l) 增加附录“风电机组阻抗计算方法”（见附录B），“风电机组短路比计算方法”（见附录C）修改了“附录D 报告格式样本”（2018年版的附录B）。

注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工业联合会提出。

本文件由全国风力发电标准化技术委员会（SAC/TC 50）归口。

本文件起草单位：中国电力科学研究院有限公司、运达能源科技集团股份有限公司、中船海装风电有限公司

本文件主要起草人：

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

——2018年首次发布为GB/T 36994-2018；

——本次为第一次修订。

风能发电系统 风力发电机组电网适应性测试规程

1 范围

本文件规定了风力发电机组（以下简称风电机组）电网适应性测试的测试内容、测试设备、测试程序和测试报告内容。

本文件适用于并网型风电机组。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 12325 电能质量 供电电压偏差

GB/T 12326 电能质量 电压波动和闪变

GB/T 14549 电能质量 公用电网谐波

GB/T 24337 电能质量 公用电网间谐波

GB/T 15543 电能质量 三相电压不平衡

GB/T 19963.1 风电场接入电力系统技术规定 第1部分：陆上风电

GB/T 40594 电力系统网源协调技术导则

GB/T 40082 风力发电机组 传动链地面测试技术规范

JJF 1059（所有部分） 测量不确定度评定与表示

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

风电机组电网适应性 grid adaptability of wind turbine

风电机组在电网电压偏差、频率偏差、三相电压不平衡、电压波动和闪变、谐波电压、低短路比等电网扰动情况下的响应特性。

3.2

并网点/测试点 point of connection of wind turbine / point of test of wind turbine

电压或频率变化的产生点，为测试装置与风电机组升压变压器高压侧的连接点。

3.3

空载试验 no-load testing

风电机组与电网断开的情况下，测试装置在测试点产生电压或频率变化的测试。

3.4

负载测试 on-load testing

风电机组并网运行的情况下，测试装置在测试点产生电压或频率变化的测试。

3.5

风电机组惯量响应 inertia response of wind turbine

当电力系统频率快速变化时，风电机组响应于系统频率变化率快速调整自身有功功率的功能。

注：用于缓解电力系统频率快速变化。

3.6

风电机组一次调频 primary frequency control of wind turbine

当电力系统频率偏离额定值时，风电机组响应于系统频率偏差快速调整自身有功功率的功能。

注：用于降低电力系统的频率偏差。

3.7

有功调频系数 K_f active power-frequency regulation coefficient

系统频率波动时，风电机组有功功率变化量标么值（以风电机组额定功率为基准值）与系统频率变化量标么值（以系统额定频率为基准值）的比值。计算方法如式（1）所示。

$$K_f = -\frac{\Delta P / P_n}{\Delta f / f_n} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

ΔP ——风电机组输出有功功率的变化量，单位：kW；

P_n ——风电机组额定功率，单位：kW；

Δf ——系统频率的变化量，单位：Hz；

f_n ——系统额定频率，单位：Hz。

3.8

调节时间 settling time

从系统频率升高或降低超过死区开始，风电机组实际输出有功功率与有功目标值之差的绝对值始终不超过允许偏差的最短时间（见附录A）。

3.9

风电机组短路比 wind turbine short-circuit ratio

风电机组升压变压器低压侧接入点短路容量对风电机组额定容量之比。

4 符号和定义

下列符号和定义适用于本文件。

K_f	有功调频系数
Δf	电力系统频率的变化量
f	风电机组并网点频率
f_n	电力系统额定频率
ΔP	风电机组有功功率变化量
P	风电机组实际有功出力
P_n	风电机组额定有功功率
P_{lt}	长时间闪变系数
P_{st}	短时间闪变系数

T_J	风电机组等效惯性时间常数
t	时间

5 基本要求

- 5.1 风电机组电网适应性应满足GB/T 19963、GB/T 40594对风电场运行适应性的相关规定。
- 5.2 风电机组电网适应性测试可采用现场测试或地面试验平台测试。
- 5.3 风电机组电网适应性测试的测试点位于风电机组升压变压器高压侧。
- 5.4 风电机组电网适应性测试设备引起的风电场并网点频率、电压偏差应在电网允许的偏差范围内。
- 5.5 测试结果仅对特定配置的被测风电机组有效。其它机组配置，包括改变控制参数会导致测试结果发生变化，需要另行评估。

6 测试内容

6.1 电压偏差适应性

利用测试装置在测试点产生要求的电压偏差，当测试点的供电电压偏差在GB/T 12325规定的限值范围内时，风电机组应能正常运行。风电机组电压偏差适应性测试内容如表1所示。

表1 风电机组电压偏差适应性测试内容

电压设定值 (p.u.)	持续时间 (min)
0.90	30
1.10	30

6.2 频率适应性

6.2.1 频率偏差适应性

风电机组正常运行且不参与系统调频时，利用测试装置在测试点产生要求的频率偏差，风电机组频率耐受能力测试内容如表2所示。

表2 风电机组频率耐受能力测试内容

序号	频率范围	频率设定值	持续时间
1	低于 46.5 Hz	允许运行的最低频率	1min
2	46.5 Hz ~ 47 Hz	46.5 Hz	1min
3	47 Hz~47.5 Hz	47 Hz	1min
4	47.5 Hz~48 Hz	47.5 Hz	1min
5	48 Hz~50 Hz	48 Hz	30 min
6	50 Hz~51.5 Hz	51.5 Hz	10 min
7	高于 51.5 Hz	允许运行的最高频率	1min

6.2.2 频率变化率适应性

风电机组正常运行且不参与系统调频，利用电网扰动模拟装置在测试点产生电网频率扰动，风电机组频率变化率适应性测试内容如表3所示。

表3 风电机组频率变化率适应性测试内容

频率设定值 (Hz)	频率变化率 (Hz/s)	频率变化波形
50→49	-1	
50→49	-2	
50→51	1	
50→51	2	

6.2.3 惯量响应

6.2.2.1 风电机组惯量响应的死区可根据电力系统实际情况确定，宜设定为±(0.03~0.1) Hz。当测试点频率偏差超过死区范围，且风电机组有功出力大于20% P_n 时，风电机组应在满足公式(1)条件下提供惯量响应，并且风电机组有功功率变化量 ΔP 应满足公式(2)。

$$\Delta f \times \frac{df}{dt} > 0 \tag{1}$$

$$\Delta P = -\frac{T_J}{f_n} \times \frac{df}{dt} \times P_n \tag{2}$$

式中：

Δf ——电力系统频率偏差，单位为 Hz；

f ——风电机组并网点频率，单位为 Hz；

t ——时间，单位为 s；

ΔP ——风电机组有功功率变化量，单位为 kW；

T_J ——风电机组等效惯性时间常数，单位为 s；

f_n ——电力系统额定频率，单位 Hz；

P_n ——风电机组额定有功功率，单位为 kW。

6.2.2.2 风电机组等效惯性时间常数 T_J 一般设置为8s~12s（该值可根据电力系统实际情况确定）。

6.2.2.3 风电机组惯量响应功能应能远程与就地的使能、关闭。

6.2.2.4 风电机组有功出力分别在 $0.2P_n \leq P \leq 0.5P_n$ 和 $P > 0.8P_n$ 范围内时，测试风电机组惯量响应能力，测试内容见表4，惯量响应示意图如图1所示。测试中，风电机组应满足以下要求：

- a) 有功功率调节时间不大于500ms，允许偏差不大于±2% P_n ，最大可用有功调节量宜不小于10% P_n 。
- b) 功率恢复过程中，有功功率最小值（或最大值）与频率变化前有功功率之差不宜大于5% P_n 。

表4 风电机组惯量响应测试内容

序号	频率设定值	频率变化率 (Hz/s)
1	48Hz	-0.1

2		-0.5
3	51.5Hz	0.1
4		0.5

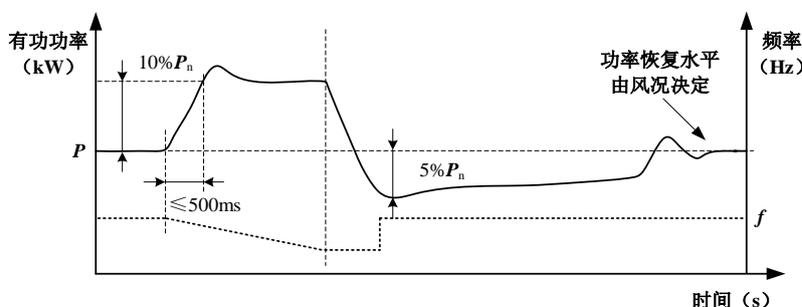


图1 惯量响应示意图

6.2.4 一次调频

6.2.3.1 风电机组一次调频的死区可根据电力系统实际情况确定，宜设定为 $\pm(0.03\sim 0.1)$ Hz。当测试点的频率偏差超过死区范围，风电机组应提供一次调频能力，并且风电机组有功功率变化量 ΔP 应满足公式(3)，风电机组一次调频示例曲线如图2所示。

$$\Delta P = -K_f \times \frac{\Delta f}{f_n} \times P_n \quad (3)$$

式中：

Δf ——电力系统频率偏差（终值-初值），单位为 Hz；

K_f ——有功调频系数；

ΔP ——风电机组有功变化量（终值-初值），单位为 kW；

f_n ——电力系统额定频率，单位 Hz；

P_n ——风电机组额定有功功率，单位为 kW。

6.2.3.2 有功调频系数 K_f 一般设置为10~50（该值可根据电力系统实际情况确定）。

6.2.3.3 风电机组一次调频功能应能远程与就地的使能、关闭。

6.2.3.4 风电机组有功出力 $P \geq 0.2P_n$ 时，测试风电机组一次调频能力，测试内容见表5。测试中，风电机组应满足以下要求：

a) 当电力系统频率大于50Hz时，风电机组应根据一次调频曲线减小有功输出，减少功率的限幅可根据实际电力系统要求确定，宜为 $10\%P_n$ 。

b) 当电力系统频率小于50Hz时，风电机组应根据一次调频曲线增加有功输出，增加功率的限幅可根据实际电力系统要求确定，宜为 $6\%P_n$ 。

c) 系统频率恢复后，风电机组有功输出不应低于故障前的出力水平。

d) 风电机组一次调频调节时间应不大于5s，有功功率控制偏差不超过 $\pm 2\%P_n$ 。

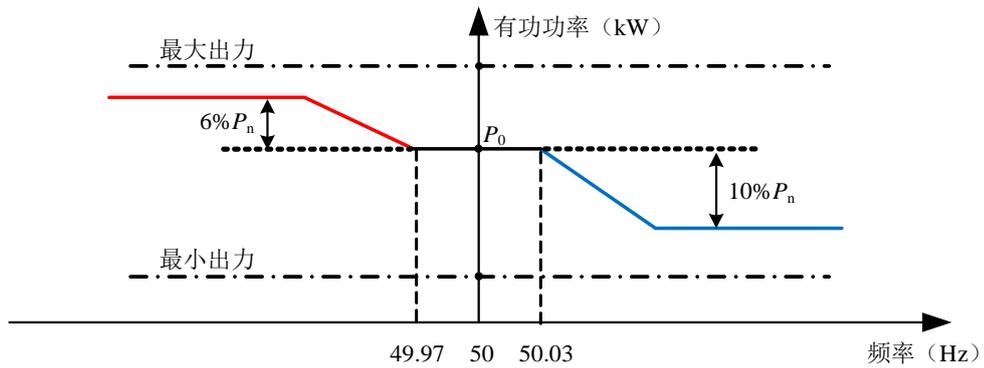


图2 风电机组一次调频示例曲线

表5 风电机组一次调频特性测试内容

序号	频率设定值(Hz)	持续时间(s)	频率变化波形
1	48.0	30	
2	49.8	30	
3	49.9	30	
4	49.95	30	
5	49.98	30	
6	50.02	30	
7	50.05	30	
8	50.15	30	
9	50.3	30	
10	51.5	30	

注：风电场一次调频指令优先级高于风电机组级一次频率调节指令。

6.3 三相电压不平衡适应性

6.3.1 本规程规定的三相电压不平衡为负序电压不平衡。

6.3.2 利用测试装置在测试点产生要求的三相电压不平衡，当测试点的三相电压不平衡度在GB/T 15543规定的限值范围内时，风电机组应能正常运行。风电机组三相电压不平衡适应性测试内容如表6所示。

6.3.3 风电机组出力大于50% P_n 时，测试过程中电流不平衡度应小于5%。

表6 风电机组三相电压不平衡适应性测试内容

三相电压不平衡度设定值 (%)	持续时间 (min)
2.0	30
4.0	1

6.4 闪变适应性

6.4.1 利用测试装置在测试点产生要求的电压波动和闪变,当测试点的闪变值在 GB/T 12326 规定的限值范围内时,风电机组应能正常运行。

6.4.2 风电机组闪变适应性测试内容参照GB/T 12326的规定,当测试点标称电压小于等于110 kV时,确保测试点长时间闪变值 P_{lt} 不小于1;当测试点标称电压大于110 kV时,确保测试点长时间闪变值 P_{lt} 不小于0.8。风电机组闪变适应性测试内容如表7所示。

表7 风电机组闪变适应性测试内容

电压等级 (kV)	长时间闪变值 P_{lt}	持续时间 (min)
≤110	1.0	10
>110	0.8	10

6.5 谐波电压适应性

6.5.1 利用测试装置在测试点产生要求的间谐波、谐波,当测试点的间谐波、谐波电压分别在 GB/T 24337 和 GB/T 14549 规定的限值范围内时,风电机组应能正常运行。

6.5.1 风电机组谐波电压适应性测试内容可参照 GB/T 14549 的规定,以各谐波电压含有率进行考核。利用电网扰动模拟装置分别设置奇次谐波与耦合谐波含有率,各次谐波下测试时间不少于 2min。风电机组谐波电压适应性测试内容如表 8 所示。

6.5.2 风电机组间谐波电压适应性测试内容可参照 GB/T 24337 的规定,以各间谐波电压含有率进行考核。利用电网扰动模拟装置设置间谐波电压含有率,各间谐波电压下测试时间不少于 2min。风电机组谐波电压适应性测试内容如表 8 所示。

表8 风电机组谐波电压适应性测试内容

测试项目	谐波类型	谐波含有率设定值 (%)	每个电压点持续时间 (min)
谐波电压适应性	奇次谐波 (3~25 次)	2.4	2
	耦合谐波 (2~24 次)	1.2	2
间谐波电压适应性	间谐波 (5~95Hz, 步长 10Hz; 125~1225Hz, 步长 50Hz)	0.16 (100Hz 以下); 0.4 (100Hz 以上)	2

6.6 低短路比适应性

6.6.1 风电机组低短路比适应性测试包括低短路比下的持续运行测试和启动并网测试。

6.6.2 风电机组低短路比下的持续运行测试工况应涵盖小功率区间 (0.2~0.5p.u.) 和大功率区间 (大于 0.8p.u.)。风电机组低短路比下启动并网测试工况应在额定风速以上。

6.6.3 可利用电网模拟装置或可调阻抗装置改变风电机组并网点短路比,可调阻抗装置测试结果宜作为最终参考。风电机组低短路比适应性测试内容如表 9 所示。

表9 风电机组低短路比适应性测试内容

测试点短路比	持续时间 (min)	能否启动并网至额定功率运行
--------	------------	---------------

3	10	是/否
1.5	10	是/否

6.7 相角跳变适应性

6.7.1 在风电机组输出在小功率区间（0.2~0.5p.u.）和大功率区间（大于0.8p.u.）时，利用测试装置在测试点产生对称电压相角跳变，测试风电机组相角跳变适应性，测试内容如表10所示。

表 10 风电机组相角跳变适应性测试内容

初始相角设定值			相角目标值		
A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
0	-120°	120°	30°	-90°	150°
			-30°	-150°	-90°
			60°	-60°	180°
			-60°	-180°	180°

6.8 阻抗特性

6.8.1 风电机组应以单位功率因数运行并限功率，测试工况涵盖有功功率输出 0.1p.u.、0.5p.u.和 1.0p.u.。

6.8.2 宜利用电网扰动模拟装置注入扰动电压，测试风电机组在 1Hz-1250Hz 范围内的正序阻抗和负序阻抗，测试内容如表 11 所示。

表 11 风电机组阻抗特性测试内容

频率 f_1 范围 (Hz)	电压扰动幅值 (p.u.)	频率步长 (Hz)	每个频率点持续时间 (s)
1~10	0.002~0.004	1	3~11
11~100	0.005~0.01	1	3~11
110~1250	0.01~0.02	10	3~11

7 测试设备与平台

7.1 电网扰动模拟装置

7.1.1 利用电网扰动模拟装置产生电压偏差、频率偏差、频率变化率、三相电压不平衡、电压波动和闪变、谐波电压、相角变化、模拟阻抗（可选），为电网适应性测试提供条件。图3为利用电网扰动模拟装置测试示意图。

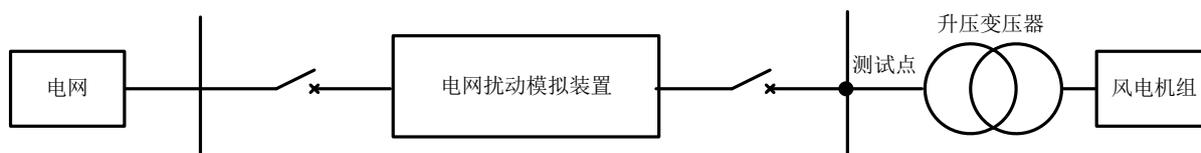


图 3 利用电网扰动模拟装置示测试意图

7.1.2 电网扰动模拟装置的运行条件和主要技术指标应满足以下条件：

- a) 电网扰动模拟装置的额定容量不小于被测风电机组的额定容量；
- b) 电网扰动模拟装置接入电网产生的影响应在国家标准允许的范围內；
- c) 电网扰动模拟装置进行空载测试时输出的电压偏差、频率偏差、频率变化率、三相电压不平衡、电压波动和闪变、谐波电压等性能指标与负载测试时的最大允许偏差见表 12；
- d) 电压输出步长不大于 $1\% U_n$ ；
- e) 频率输出步长不大于 0.01 Hz ；
- f) 频率变化率步长不大于 0.1 Hz/s ；
- g) 三相电压不平衡度输出步长不大于 0.1% ；
- h) 阻抗特性测试时，空载间谐波/谐波电压输出偏差不大于 $0.1\% U_n$ 。

表12 风电机组电网适应性测试装置性能指标与负载测试输出性能指标最大允许偏差

序号	测试内容	性能指标	最大允许偏差
1	电压偏差适应性	线电压有效值	$\pm 1\% U_n$
2	频率偏差适应性	频率偏差	$\pm 0.1 \text{ Hz}$
3	频率变化率适应性	频率变化率	$\pm 0.1 \text{ Hz/s}$
4	惯量响应	频率变化率	$\pm 0.1 \text{ Hz/s}$
5	一次调频特性	频率	$\pm 0.01 \text{ Hz}$
6	三相电压不平衡适应性	三相电压不平衡度	$\pm 0.5\%$
7	闪变适应性	短时间闪变值 P_{st}	± 0.5
8	谐波电压适应性	电压谐波畸变率	$\pm 0.5\%$
9	低短路比适应性	模拟阻抗	$\pm 5\%$ (幅值) $\pm 5^\circ$ (相位)
10	相角跳变适应性	相位角度	$\pm 5^\circ$

7.2 可调阻抗装置

7.2.1 可调阻抗装置应具备动态调节阻抗值的能力，阻抗变化范围应覆盖测试点短路比区间。测试点位于风电机组升压变压器的高压侧，图4为阻抗装置连接示意图。

7.2.2 阻抗变化时间小于 100 ms ，阻抗幅值偏差应在目标值的 $\pm 5\%$ 范围内，相位角度偏差应在目标值的 $\pm 5^\circ$ 范围内。

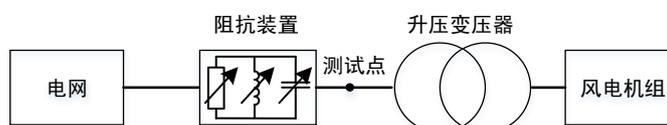


图 4 阻抗装置示意图

7.3 地面测试平台

7.3.1 地面测试平台应满足GB/T 40082 5.3节要求。

7.3.2 图5为地面测试平台示意图，基于地面测试平台开展电网适应性测试，测试方法可参照现场测试。

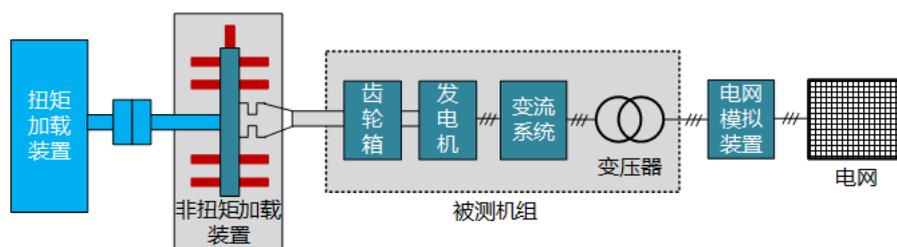


图 5 地面测试平台示意图

7.4 测量设备

7.4.1 测量设备包括电压互感器，电流互感器，数据采集系统等设备。

7.4.2 数据采集系统用于测试数据的记录、计算及保存。测量设备每个通道采样率最小为 10kHz，分辨率至少为 16bit。表 13 为测量设备精度的最低要求。

7.4.3 风速信号可从风电机组实时获取，刷新频率不小于 1Hz。

表13 风电机组电网适应性测试中测量设备精度要求

测量设备	准确度等级
电压互感器	0.2级
电流互感器	0.5级
数据采集系统	0.2级

8 测试程序

8.1 基本条件

风电机组电网适应性测试开始前，需对测试设备进行空载试验，若测试设备满足性能指标要求，则可开展负载测试。

8.2 空载试验

8.2.1 电压偏差适应性

在风电机组与电网断开的情况下，调节测试装置输出电压从 0.9 p.u.至 1.1 p.u.，电压调整的步长为额定电压的 1%，每个步长应至少持续 5s，记录每次调整时电压实测值和对应的调整参数。

8.2.2 频率适应性

在风电机组与电网断开的情况下：

- 参照表 2，调节电网扰动模拟装置输出频率从机组允许运行的最低频率至最高频率，频率调整的步长为 0.1 Hz，每个步长应至少持续 5 s，记录每次调整时频率实测值和对应的调整参数。
- 参照表 3，调节测试装置输出频率从 50Hz 开始，分别以 1Hz/s、2Hz/s 的变化率变化至 51Hz，频率稳定后保持时间不小于 10s，然后以相同的变化率恢复至 50Hz；重复上述过程，将频率从 50Hz 调整至 49Hz，然后恢复至 50Hz，记录每次调整时频率实测值和对应的调整参数；
- 参照表 4，调节测试装置输出频率从 50Hz 开始，分别以 0.1Hz/s、0.5Hz/s 的变化率变化至 51.5Hz，

频率稳定后保持时间不小于 10s，然后以相同的变化率恢复至 50Hz；重复上述过程，将频率从 50Hz 调整至 48Hz，然后恢复至 50Hz，记录每次调整时频率实测值和对应的调整参数；

- d) 参照表 5，调节测试装置输出频率从 50Hz 开始阶跃至频率设定值，每个频率设定值应至少持续 5s，记录每次调整时频率实测值和对应的调整参数。

8.2.3 三相电压不平衡适应性

在风电机组与电网断开的情况下，通过调整电压幅值或相位使三相电压不平衡度至指定值，符合 6.3 三相电压不平衡适应性测试内容要求，记录每次调整时三相电压不平衡度实测值和对应的调整参数。

8.2.4 闪变适应性

在风电机组与电网断开的情况下，调节测试装置输出闪变值至指定值，符合 6.4 闪变适应性测试内容要求，记录每次调整时短时间闪变值 P_{st} 的实测值和对应的调整参数。

8.2.5 谐波电压适应性

在风电机组与电网断开的情况下，调节测试装置输出各间谐波电压含有率、各次谐波电压含有率至指定值，符合 6.5 谐波电压适应性测试内容要求，分别记录每次调整时各间谐波电压含有率、各次谐波电压含有率实测值和对应的调整参数。

8.2.6 低短路比适应性

在风电机组与电网断开的情况下，调节阻抗装置或电网扰动模拟装置模拟阻抗使得测试点短路比至指定值，符合 6.6 节低短路比适应性测试内容要求，记录阻抗、短路比实测值和对应的调整参数。

8.2.7 相角跳变适应性

在风电机组与电网断开的情况下，调节电网扰动模拟装置输出电压相角至指定值，符合 6.7 节相角跳变适应性测试内容要求，记录每次调整时相角变化量实测值和对应的调整参数。

8.2.8 阻抗特性

在风电机组与电网断开的情况下，调节电网扰动模拟装置注入扰动电压至指定值，符合 6.8 节阻抗特性测试内容要求，分别记录每次调整时对应频率的电压值，以及对应的调整参数。

8.3 负载测试

8.3.1 电压偏差适应性

测试时各电压设定值对应的调整参数应与空载测试时保持一致。风电机组设定为单位功率因数控制，测试过程中风电机组有功功率输出应在额定功率的 10% 以上。测试时采用以下步骤：

- 在额定频率条件下保持风电机组正常运行，调节测试装置从额定电压开始以额定电压的 1% 为步长逐步升高电压，每个步长应至少持续 20 s，当电压升至 1.10 p.u. 时，该点测试持续时间不小于 30 min。测试过程中，若风电机组脱网，记录测试持续时间和风电机组脱网时间；
- 在额定频率条件下保持风电机组正常运行，调节测试装置从额定电压开始以额定电压的 1% 为步长逐步降低电压，每个步长应至少持续 20 s，当电压降至 0.90 p.u. 时，该点测试持续时间不小于 30 min。测试过程中，若风电机组脱网，记录测试持续时间和风电机组脱网时间；

- c) 参照表 D.5 记录测试结果。

8.3.2 频率适应性

测试时各频率设定值对应的调整参数应与空载测试时保持一致,风电机组应设定为单位功率因数控制。测试分以下 4 部分进行:

(1) 风电机组正常运行且不参与系统调频,有功功率输出应在额定功率的 10% 以上,测试风电机组频率耐受能力,测试采用以下步骤:

- a) 在额定电压条件下保持风电机组正常运行,调节电网扰动模拟装置从额定频率开始以 0.1 Hz 为步长逐步升高频率,每个步长应至少持续 20 s,当频率升至 51.5 Hz 时,该点测试持续时间不小于 30min;然后,继续以 0.1 Hz 为步长逐步降低频率,每个步长应至少持续 20 s,当频率升至机组允许运行的最高频率,该点测试持续时间不小于 1min。测试过程中,若风电机组脱网,记录测试持续时间和风电机组脱网时间。
- b) 在额定电压条件下保持风电机组正常运行,调节电网扰动模拟装置从额定频率开始以 0.1 Hz 为步长逐步降低频率,每个步长应至少持续 20 s,当频率降至 48Hz 时,该点测试持续时间不小于 30min;继续以 0.1 Hz 为步长逐步降低频率,每个步长应至少持续 20 s,当频率降至 47.5 Hz 时,该点测试持续时间不小于 1min;继续以 0.1 Hz 为步长逐步降低频率,每个步长应至少持续 20 s,当频率降至 47Hz,该点测试持续时间不小于 1min;继续以 0.1 Hz 为步长逐步降低频率,每个步长应至少持续 20 s,当频率降至 46.5Hz,该点测试持续时间不小于 1min;继续以 0.1 Hz 为步长逐步降低频率,每个步长至少持续 20 s,当频率降至机组允许运行的最低频率,该点测试持续时间不小于 1min。测试过程中,若风电机组脱网,记录测试持续时间和风电机组脱网时间。
- c) 参照附录表 D.6 记录测试结果。

(2) 风电机组正常运行且不参与系统调频,有功功率输出应在额定功率的 10% 以上,测试风电机组频率变化率适应性,测试采用以下步骤:

- a) 在额定电压和频率条件下保持风电机组正常运行,调节电网扰动模拟装置输出频率为 49Hz,频率变化率为-1Hz/s,频率稳定后,保持测试不少于 20s,然后以 0.1Hz/s 恢复至额定频率。测试过程中,若风电机组脱网,记录测试持续时间和风电机组脱网时间;
- b) 频率变化率适应性测试方法与 a) 相同;
- c) 参照附录表 D.7 记录测试结果。

(3) 风电机组正常运行,有功出力分别在 $0.2P_n \leq P \leq 0.5P_n$ 和 $P > 0.8P_n$ 范围内时,测试风电机组惯量响应特性,测试采用以下步骤:

- a) 在额定电压条件下保持风电机组正常运行,调节测试装置输出频率从 50Hz 开始,按表 4 中的内容,分别以 0.1Hz/s、0.5Hz/s 的变化率变化至 51.5Hz,频率稳定后保持测试时间不小于 20s,以相同频率变化率恢复至额定值后,保持测试时间不小于 20s。测试过程中,记录风电机组是否脱网;
- b) 在额定电压条件下保持风电机组正常运行,调节测试装置输出频率从 50Hz 开始,按表 3 中的内容,分别以 0.1Hz/s、0.5Hz/s 的变化率变化至 48Hz,频率稳定后保持测试时间不小于 20s,以相同频率变化率恢复至额定值后,保持测试时间不小于 20s。测试过程中,记录风电机组是否脱网;

c) 参照表 D.8 记录测试结果；

(4) 风电机组运行在限功率调频工况，有功功率输出应在额定功率的 20% 以上，测试风电机组一次调频特性，测试采用以下步骤：

- a) 在额定电压条件下，调节测试装置输出频率由额定值阶跃至表 5 中频率值，频率保持时间不应小于 30s，频率恢复至额定值后，保持测试时间不小于 20s。测试过程中，记录风电机组是否脱网；
- b) 在额定电压条件下，按照表 5 中频率点，逐个设置测试装置输出频率，重复过程 a)；
- c) 参照表 D.9 记录测试结果。

8.3.3 三相电压不平衡适应性

测试时三相电压不平衡度设定值对应的调整参数应与空载测试时保持一致。风电机组设定为单位功率因数控制，测试过程中风电机组有功功率输出应在额定功率的 50% 以上。测试时采用以下步骤：

- a) 在额定电压和额定频率条件下保持风电机组正常运行，调节测试装置使其输出负序电压不平衡度为 2.0%，该点测试持续时间不小于 30min；继续调节测试装置使其输出负序电压不平衡度为 4.0%，该点测试持续时间不小于 1min。测试过程中，若风电机组脱网，记录测试持续时间和风电机组脱网时间；
- b) 参照表 D.10 记录测试结果。

8.3.4 闪变适应性

测试时闪变设定值对应的调整参数应与空载测试时保持一致。风电机组设定为单位功率因数控制，测试过程中风电机组有功功率输出应在额定功率的 20% 以上。测试时采用以下步骤：

- a) 在额定电压和额定频率条件下保持机组正常运行，设定与空载测试时相同的调整参数，持续 10min 后若风电机组未脱网则停止测试；若风电机组脱网，记录测试持续时间和风电机组脱网时间；
- b) 参照表 D.11 记录测试结果。

8.3.5 谐波电压适应性

测试时各间谐波电压含有率、各次谐波电压含有率对应的调整参数应与空载测试时保持一致。风电机组设定为单位功率因数控制，测试过程中风电机组有功功率输出应在额定功率的 20% 以上。测试时采用以下步骤：

- a) 在额定电压和额定频率条件下保持机组正常运行；
- b) 设定调整参数为空载测试时 5Hz 间谐波电压含有率设定值所对应的调整参数，持续 2min 后若风电机组未脱网则停止测试；若风电机组脱网，记录测试持续时间和风电机组脱网时间；
- c) 间谐波电压适应性测试方法与 b) 相同；
- d) 恢复电压和频率为额定条件并保持机组正常运行，设置调整参数为空载测试时第 3 次谐波含有率设定值所对应的调整参数，持续 2min 后若风电机组未脱网则停止测试；若风电机组脱网，记录测试持续时间和风电机组脱网时间；
- e) 奇次谐波电压适应性测试方法与 e) 相同；
- f) 恢复电压和频率为额定条件并保持机组正常运行，设置调整参数为空载测试时第 2 次谐波含有

率设定值所对应的调整参数，持续 2min 后若风电机组未脱网则停止测试；若风电机组脱网，记录测试持续时间和风电机组脱网时间；

- g) 偶次谐波电压适应性测试方法与 g) 相同；
- h) 参照表 D.12、D.13、D.14 记录测试结果。

8.3.6 低短路比适应性

测试时短路比设定值对应的调整参数应与空载测试时保持一致。风电机组设定为单位功率因数控制，测试风电机组低短路比适应性。

- a) 分别在平均有功功率输出为 0.2~0.5p.u.和大于 0.8p.u.区间开展如下测试：在额定电压和额定频率条件下保持风电机组正常运行，调节电网扰动模拟装置或阻抗装置使得测试点短路比为 3，该点测试持续时间不小于 10 min；继续调节电网扰动模拟装置或阻抗装置使得测试点短路比为 1.5，该点测试持续时间不小于 10 min；测试过程中，若风电机组脱网，记录测试持续时间和风电机组脱网时间。
- b) 在额定风速以上开展如下测试：分别调节电网扰动模拟装置或阻抗装置使得测试点短路比为 3、1.5，风电机组从停机状态启动并网，至额定功率运行。测试过程中，若风电机组脱网，记录测试持续时间和风电机组脱网时间。
- c) 参照附录表 D.15 记录测试结果。

8.3.7 相角跳变适应性

测试时各相角设定值对应的调整参数应与空载测试时保持一致。风电机组设定为单位功率因数控制，平均有功功率输出分别在 0.2~0.5p.u.和大于 0.8p.u.范围内时，测试风电机组相角跳变适应性。测试时采用以下步骤：

- a) 在额定电压和频率条件下，利用电网扰动模拟装置设定 A、B、C 三相电压输出相角分别为 0、-120°、120°，启动风电机组并保持正常运行。
- b) 利用电网扰动模拟装置调节 A、B、C 三相电压输出相角分别为 30°、-90°、150°，测试持续时间不小于 2 min，然后恢复至初始值。测试过程中，若风电机组脱网，记录测试持续时间和风电机组脱网时间。
- c) 相角跳变适应性测试方法与 b) 相同。
- d) 参照附录表 D.16 记录测试结果。

8.3.8 阻抗特性

- a) 测试时各扰动电压设定值对应的调整参数应与空载测试时保持一致。风电机组设定为单位功率因数控制，分别限功率为 0.1 p.u.、0.5p.u.和 1.0p.u.时，测试风电机组阻抗特性。测试采用以下步骤：
- b) 在额定电压和额定频率条件下保持风电机组正常运行。
- c) 参照表 11，调节电网扰动模拟装置注入频率为 f_1 的正序电压扰动，利用 DFT 算法提取对应电压、电流扰动分量，依据附录 B 计算正序阻抗值。
- d) 参照表 11，调节电网扰动模拟装置注入频率为 f_1-100 的负序扰动电压（负频率的负序电压与对应正频率的正序电压等同），利用傅里叶变换算法提取对应电压、电流扰动分量，依据附录 B 计算负序阻抗值。
- e) 参照附录表 D.17 记录测试。

9 测试报告内容

9.1 测试记录数据

在开展各项测试前，应确保风电机组处于正常运行状态。测试过程中应采集并记录风电机组连续运行状态下的数据，至少包括以下基本测试数据（其中f为参考信息）：

- a) 风电机组升压变压器高压侧三相电压、电流、频率；
- b) 风电机组升压变压器低压侧三相电压、电流、频率；
- c) 测试时间及风电机组的运行状态；
- d) 发电机转速；
- e) 桨距角；
- f) 风速。

9.2 计算参数指标

9.2.1 对应不同的测试内容，根据基础测试数据至少计算得到以下参数指标：

- a) 电压偏差适应性测试，计算线电压有效值；
- b) 频率偏差适应性测试，计算频率、频率变化率、有功功率及有功调节的调节时间；
- c) 三相电压不平衡适应性测试，计算三相电压不平衡度、电流不平衡度；
- d) 闪变适应性测试，计算相电压短时间闪变值 P_{st} ；
- e) 谐波电压适应性测试，计算各次谐波电压含有率与间谐波电压含有率；
- f) 低短路比适应性测试，计算短路比、有功和无功功率；
- g) 相角跳变适应性测试，计算相角变化量；
- h) 阻抗特性测试，计算风电机组正序阻抗和负序阻抗。

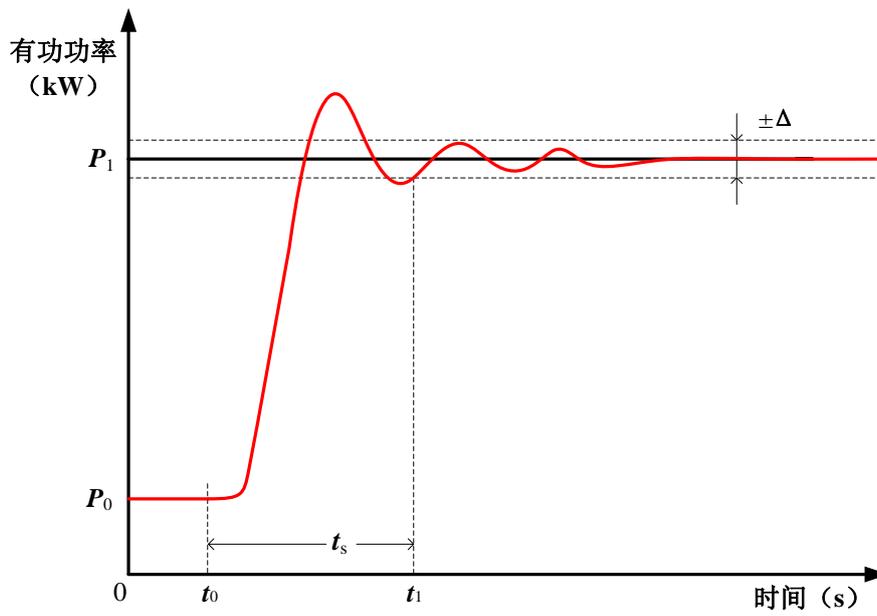
9.2.2 以上计算参数指标内容应由图表方式给出，测试报告中应给出测试结果汇总信息，测试报告格式参见附录B。

9.3 不确定度

按照JJF 1059分别对测试点和风电机组升压变压器低压侧的测试数据进行不确定度评估，得到综合标准不确定度。

附录 A
(资料性)
控制系统响应性能指标说明

控制系统响应性能指标见图 A.1:



符号:

P_0 ——有功初始值;

P_1 ——有功目标值;

t_0 ——频率变化起始时刻;

t_1 ——实测有功功率不再超出误差带的时刻;

t_s ——调节时间;

Δ ——误差带, $\pm 2\%P_n$ 。

图 A.1 响应时间判定曲线

附 录 B
(资料性)
风电机组阻抗计算方法

B.1 正序阻抗

基于正序扰动电压注入的电压、电流采集数据，开展正序阻抗计算，步骤如下：

- 1) 利用傅里叶变换算法提取正序电压扰动分量 $\Delta u_p(f_p)$ ；
- 2) 提取正序电流响应分量 $\Delta i_p(f_p)$ ，利用公式 (1) 计算正序阻抗 $Z_{pp}(f_p)$ ；

$$Z_{pp}(f_p) = \frac{\Delta u_p(f_p)}{\Delta i_p(f_p)} \dots\dots\dots (B.1)$$

B.2 负序阻抗

基于负序扰动电压注入的电压、电流采集数据，开展负序阻抗计算，步骤如下：

- 1) 当 $f_p < 2f_1$ 时，提取正序电压扰动分量 $\Delta u_p(2f_1 - f_p)$ 和正序电流扰动分量 $\Delta i_p(2f_1 - f_p)$ ，利用公式 (2) 计算负序阻抗：

$$Z_{mm}(f_p) = \frac{\Delta u_p^*(2f_1 - f_p)}{\Delta i_p^*(2f_1 - f_p)} \dots\dots\dots (B.2)$$

其中，“*”表示复数共轭。

- 2) 当 $f_p \geq 2f_1$ 时，提取负序电压扰动分量 $\Delta u_n(f_p - 2f_1)$ 和负序电流扰动分量 $\Delta i_n(f_p - 2f_1)$ ，利用公式 (3) 计算负序阻抗：

$$Z_{mm}(f_p) = \frac{\Delta u_n(f_p - 2f_1)}{\Delta i_n(f_p - 2f_1)} \dots\dots\dots (B.3)$$

附 录 C
(资料性)
短路比计算方法

本文件采用近似计算方法，风电机组高压侧的短路容量近似为：

$$S_k = \frac{U_n^2}{Z_k} \dots\dots\dots (C.1)$$

U_n ——风电机组高压侧额定线电压，单位为V；

Z_k ——从风电机组高压侧看向电网的等效阻抗，近似为模拟阻抗值，单位为 Ω ；

短路比计算方法为：

$$SCR = \frac{S_k}{S_n} \dots\dots\dots (C.2)$$

式中：

S_n ——风电机组额定容量，单位为VA。

注：本文件近似计算方法偏保守，实际SCR小于设定值。

附 录 D
(资料性)
报告格式样本

D.1 测试项目基本信息

测试项目基本信息见表D.1。

表D.1 测试项目基本信息

风电机组制造商名称	
风电机组型号	
风电机组序列号	
风电场名称	
测试机构名称	
测试地点	
测试周期	
测试标准	
报告编号	

D.2 风电机组基本信息

风电机组基本信息见表D.2。

表D.2 风电机组基本信息

风电机组类型	
叶片数目	
风轮直径 (m)	
轮毂高度 (m)	
叶片控制 (变桨/失速)	
速度控制 (定速/变速)	
额定功率 (kW)	
额定风速 (m/s)	
额定视在功率 (kVA)	
额定电流 (A)	
额定电压 (V)	
额定频率 (Hz)	

D.3 风电机组主要零部件信息

风电机组主要零部件信息见表D.3。

表D.3 风电机组主要零部件信息

部件名称	制造商	类型	型号	序列号	软件版本号
发电机					
变流器					
主控系统					
变桨系统					
叶片					
与电网适应性相关的其它部件					

D.4 风电机组升压变压器信息

风电机组升压变压器信息见表D.4。

表D.4 风电机组升压变压器信息

制造商	
型号	
额定视在功率 (MVA)	
额定电压 (高压侧) (kV)	
额定电压 (低压侧) (kV)	
短路阻抗 (%)	
负载损耗 (kW)	
实际变比	
联结组别	

D.5 测试结果

D.5.1 电压偏差适应性

电压偏差适应性考核见表D.5。

表D.5 电压偏差适应性测试结果汇总表

电压幅值设定值 (p.u)	电压幅值测量值 (p.u)	实际运行时间 (min)	要求运行时间 (min)	风电机组是否 连续并网运行
0.90				
1.10				

D.5.2 频率偏差适应性

D. 5. 2. 1 频率耐受考核见表D.6。

表D.6 频率耐受性测试结果汇总表

频率范围	频率设定值 (Hz)	频率测量值 (Hz)	实际运行时间 (s)	要求运行时间 (s)	风电机组是否 连续并网运行
低于 46.5Hz	机组允许运行的 最低频率				
46.5 Hz ~ 47 Hz	46.5				
47 Hz~47.5 Hz	47				
47.5 Hz~48 Hz	47.5				
48 Hz~50 Hz	48				
50 Hz~51.5 Hz	51.5				
高于 51.5Hz	机组允许运行的 最高频率				

D. 5. 2. 2 频率变化率适应性考核见表D.7。

表D.7 频率变化率适应性测试结果汇总表

频率设定值(Hz)	频率变化率设定值 (Hz/s)		频率变化率实测值 (Hz/s)		风电机组是否连 续并网运行
	下降段	上升段	下降段	上升段	
50→49					
50→49					
50→51					
50→51					

D. 5. 2. 3 惯量响应特性考核见表D.8。

表D.8 惯量响应特性测试结果汇总表

频率变化过程	频率变化 率设定值 (Hz/s)	频率变化 率实测值 (Hz/s)	扰动前有 功值(kW)	有功调节 量实测值 (kW)	恢复过程与 扰动前最大 有功差值 (kW)	响应时 间(s)	风电机组 是否连续 并网运行
50Hz→48Hz							
50Hz→51.5Hz							

D. 5. 2. 4 一次调频特性考核见表D.9。

表D.9 一次调频特性测试结果汇总表

频率设定值(Hz)	频率测量值(Hz)	扰动前有功值(kW)	扰动后有功理论值(kW)	扰动后有功实测值(kW)	恢复后有功实测值(kW)	响应时间(s)	风电机组是否连续并网运行

D.5.3 三相电压不平衡适应性

三相电压不平衡适应性考核见表D.10。

表D.10 三相电压不平衡适应性测试结果汇总表

三相负序电压不平衡度设定值(%)	三相负序电压不平衡度测量值(%)	实际运行时间(min)	要求运行时间(min)	三相负序电流不平衡度测量(%)	风电机组是否连续并网运行
2.0					
4.0					

D.5.4 闪变适应性

闪变适应性考核见表D.11。

表D.11 闪变适应性测试结果汇总表

长时间闪变值 P_{st} 设定值	短时间闪变值 P_{st} 测量值	实际运行时间(min)	要求运行时间(min)	风电机组是否连续并网运行

D.5.5 谐波适应性

D.5.5.1 以各间谐波电压含有率考核见表D.12。

表D.12 间谐波适应性测试结果汇总表

间谐波频率(Hz)	间谐波电压含有率设定值(%)	间谐波电压含有率测量值(%)	实际运行时间(min)	要求运行时间(min)	风电机组是否正常并网运行
5					
15					
...					
95					
125					

175					
...					
1225					
注：测试时，分别设置各间谐波电压含有率，其它各间谐波电压含有率均设置为零。					

D.5.5.2 以奇次谐波电压含有率考核见表D.13。

表D.13 奇次谐波适应性测试结果汇总表

谐波次数	谐波含有率 设定值(%)	谐波含有率 测量值(%)	实际运行时间 (min)	要求运行时间 (min)	风电机组是否正 常并网运行
3					
5					
7					
9					
11					
13					
15					
17					
19					
21					
23					
25					
注：测试时，分别设置各次谐波电压含有率，其它各次谐波电压含有率均设置为零。					

D.5.5.3 以偶次谐波电压含有率考核见表D.14。

表D.14 偶次谐波适应性测试结果汇总表

谐波次数	谐波含有率 设定值(%)	谐波含有率 测量值(%)	实际运行时间 (min)	要求运行时间 (min)	风电机组是否正 常并网运行
2					
4					
6					
8					
10					
12					
14					
16					
18					
20					
22					
24					

注：测试时，分别设置各次谐波电压含有率，其它各次谐波电压含有率均设置为零。

D.5.6 低短路比适应性

低短路比适应性考核见表D.15。

表D.15 低短路比适应性测试结果汇总表

有功功率 (kW)	短路比设定值	短路比计算值	实际运行时间 (min)	要求运行时间 (min)	风电机组是否连续并网运行
0.2~0.5p.u.	3				
	1.5				
大于 0.8p.u.	3				
	1.5				
启动至额定功率运行	3				
	1.5				

D.5.7 相角跳变适应性

相角跳变适应性考核见表D.16。

表D.16 相角跳变适应性测试结果汇总表

有功功率 (kW)	相角设定值			相角实际值			风电机组是否连续并网运行
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	
0.2~0.5p.u.							
大于 0.8p.u.							

D.5.8 阻抗特性

阻抗特性测试见表D.17。

表D.17 阻抗特性测试结果汇总表

频率 (Hz)	正序阻抗		负序阻抗	
	电阻 R (Ω)	感抗 X (Ω)	电阻 R (Ω)	感抗 X (Ω)
5				

10				
20				
...				
80				
90				
120				
170				
220				
270				
...				
1120				
1170				
1220				
