

ICS 29.240

CCS F 21



T

团体标准

T/CI 451—2024

构网型光伏变换器并网技术规范

Technical specification for grid-forming photovoltaic converters

2024 - 08 - 01 发布

2024 - 08 - 01 实施

中国国际科技促进会

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 构网型光伏变换器分类	2
5 环境条件	2
6 电能质量要求	2
7 功能技术要求	3
8 故障穿越及考核电压	5
9 安装与安全	6
10 电磁性能	7
11 仿真模型和参数	7
12 检验方法	8
参考文献	11

前 言

本文件按照GB/T 1.1—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。

请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。

本文件由山东大学提出。

本文件由中国国际科技促进会归口。

本文件起草单位：山东大学、北京低碳清洁能源研究院、中国电力科学研究院有限公司、三峡智控科技有限公司、四川大学。

本文件主要起草人：方旌扬、牟树君、田莫帆、刘俊杰、刘俭、王浩然、罗战、江琴。

构网型光伏变换器并网技术规范

1 范围

本文件给出了构网型光伏(PV)变换器分类,规定了构网型光伏变换器并网的环境条件、电能质量、功能技术、故障穿越及考核电压、安装与安全、电磁性能、仿真模型和参数要求,描述了对应的检验方法。

本文件适用于连接到PV源电路电压不超过直流1500 V,交流输出电压不超过1000 V的构网型光伏并网变换器。

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 2894 安全标志及其使用导则
- 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 15543 电能质量 三相电压不平衡
- GB/T 15945 电能质量 电力系统频率偏差
- GB/T 17626.2 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验
- GB/T 17626.4 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验
- GB 17799.4 电磁兼容 通用标准 第4部分:工业环境中的发射
- GB/T 24337 电能质量 公用电网间谐波
- GB/T 31464 电网运行准则
- GB 38755 电力系统安全稳定导则
- GB/T 40594 电力系统网源协调技术导则
- GB/T 40595 并网电源一次调频技术规定及试验导则
- DL/T 5003 电力系统调度自动化设计规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

光伏变换器 photovoltaic converters

可以将光伏太阳能板产生的直流电转换为交流电的设备。

3.2

构网型光伏变换器 grid-forming photovoltaic converters; GFM-PVCs

构建并维持输出电压和频率,以电压源特性运行,主动提供电网支撑的光伏变换器。

3.3

光伏电站低电压穿越 low voltage ride through of PV power station

当电力系统事故或扰动引起光伏电站并网点电压跌落时,在一定的电压跌落范围和时间间隔内,光伏电站能够不脱网连续运行的能力。

3.4

孤岛 islanding

包含负荷和电源的部分电网,从主网脱离后继续孤立运行的状态。

3.5

总谐波失真 total harmonic distortion; THD

衡量信号波形中谐波成分多少的量。表示信号波形中除了基波之外，所有谐波分量对原始波形造成的失真程度。

3.6

公共连接点 point of common coupling; PCC

用户系统（发电或用电）接入公用电网的连接处。

3.7

频率变化率 rate of change of frequency; RoCoF

单位时间内频率的变化速度。

4 构网型光伏变换器分类

以下是几种常见的构网型光伏变换器分类：

- a) **两电平变换器**：两电平变换器是一种常见的中小规模光伏系统使用的变换器，其结构简单，成本较低，适用于中小规模的光伏系统；
- b) **多电平变换器**：多电平变换器能够产生多个电平的输出电压，提供更高质量的交流电。它通过组合多个电压水平的开关电路来生成多电平输出，从而减少输出谐波和提高输出电压的质量，通常应用于大型光伏系统或对电能质量要求更高的场合，如需满足谐波限制、提高功率因数等。

5 环境条件

5.1 温湿度要求

光伏发电与并网系统应在以下环境温度范围内正常工作：

- a) 环境温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 光环境湿度最大相对湿度不超过 100%，有凝露。

5.2 污染耐受能力

并网工作环境应满足以下情况时的正常使用要求：有导电性污染的环境，或由于凝露使干燥的非导电性污染变为导电性污染的环境。

5.3 电气条件

构网型光伏变换器并网运行应在以下电网条件正常工作：

- a) 谐波电压不超过 GB/T 14549 规定的限值；
- b) 间谐波电压不超过 GB/T 24337 规定的限值；
- c) 电压波动和闪变值不超过 GB/T 12326 规定的限值；
- d) 三相电压不平衡度不超过 GB/T 15543 规定的限值。

6 电能质量要求

6.1 并网电流调节

构网型光伏变换器并网时应具有并网电流调节能力，以确保系统与电网之间的稳定性和安全性，同时最大限度地提高光伏发电系统的发电效率，具体要求如下：

- a) 并网电流 THD $<5\%$ ；
- b) 三相电流不平衡度不应超过 2%，短时不应超过 4%。

6.2 并网电压调节

并网电压调节是构网型光伏变换器的重要功能之一，以确保光伏系统与电网之间的电压匹配，维持电网的稳定性和安全性，具体要求如下：

- a) PCC 处电压 THD < 5%;
- b) PCC 处电压偏差 < ±10%;
- c) 三相系统电压不平衡 < 2%。

6.3 高次谐波和波形畸变

谐波电压和电流的允许水平取决于配电系统的特性、供电类型、所连接的负载/设备，以及电网的现行规定。光伏系统的输出应有较低的电流畸变，以确保对连接到电网的其他设备不造成不利影响。

具体要求为高于 50 次的电流谐波幅值小于等于 0.3% 的额定基波幅值。

6.4 无功调压

6.4.1 构网型光伏变换器应具备电网电压调节功能。在电网发生扰动全过程中，当电网电压偏差值大于系统电压偏差设定值时，构网型光伏变换器应主动吸收或发出无功功率，参与电网电压调节。

6.4.2 具备电网无功支撑的构网型光伏变换器应满足额定有功出力下功率因数在超前 0.95~滞后 0.95 的范围内动态可调，并满足在图 1 所示的矩形框内动态可调。

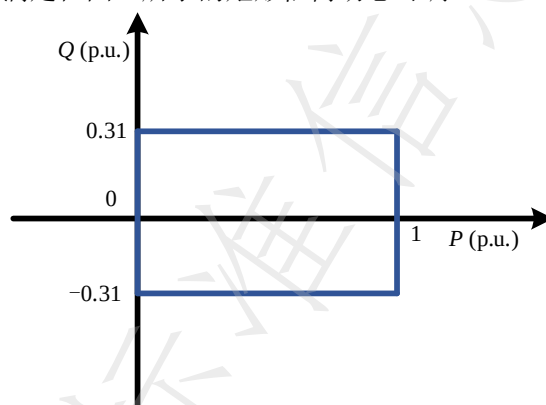


图1 变换器无功出力范围

6.5 电压不平衡度

在并网运行时，交流端口的电压不平衡度应满足 GB/T 15543 的要求。

在阻性平衡负载下，构网型光伏变换器输出电压不平衡度应小于 2%，短时不超过 4%。

6.6 功率因数

实际电路中，功率因数通常被用来衡量电路的电能利用效率，当功率因数接近于 1 时，电路的能量利用效率较高。

功率因数 $\cos\varphi$ 的计算公式为：

$$\cos\varphi = \frac{P_{\text{out}}}{S_{\text{out}}} = \frac{P_{\text{out}}}{\sqrt{P_{\text{out}}^2 + Q_{\text{out}}^2}} \quad \text{..... (1)}$$

式中：

P_{out} ——变换器总的输出有功功率；

Q_{out} ——变换器总的输出无功功率。

7 功能技术要求

7.1 电网强度适应性要求

构网型光伏变换器为电压源运行模式，具备更强的弱电网稳定运行能力。当构网型光伏变换器并网时满足以下要求，构网型光伏变换器可以稳定运行：

- a) SCR 在 1~10 范围内稳定运行，满足本文件对故障穿越能力、谐波、有功控制性能要求；
- b) 电网阻抗比 R/X 从 0.1~7 范围内稳定运行。

7.2 有功调频

7.2.1 光伏电站应具备参与电力系统调频、调峰的能力，并符合 GB 38755、GB/T 31464、GB/T 40594 和 GB/T 40595 的相关规定。

7.2.2 构网型光伏变换器并网时应与电网同步运行，并网后的频率允许偏差应符合 GB/T 15945 的规定，即偏差值允许范围为 ± 0.5 Hz。

7.2.3 构网型光伏变换器应具备一次调频能力，且一次调频应与自动发电控制协调配合。一次调频典型曲线见图 2 所示。参与一次调频的有功功率调节量最大值应不小于额定有功功率的 20%，不得因有功调频导致光伏发电系统脱网或者停机。

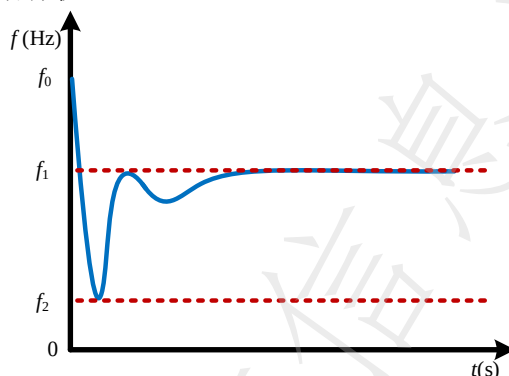


图2 构网型光伏变换器一次调频曲线

7.3 额定光照构网功能要求

7.3.1 惯量响应

构网型光伏变换器应具备惯量响应功能。电网发生扰动全过程中，当系统频率变化率大于系统频率变化率设定值时，构网型光伏变换器应自动调节有功功率，抑制电网频率快速变化。额定光照惯量系数 $H \geq 3$ s。

7.3.2 阻尼控制

构网型光伏变换器应具备阻尼控制功能。电网发生扰动全过程中，电网频率振荡幅度大于系统频率振荡幅度设定值时，构网型光伏变换器应通过阻尼控制自动调节有功功率，抑制电网频率振荡幅度。最大阻尼系数 $D \geq 1$ 。

7.4 并/离网切换

构网型光伏变换器应具备并/离网切换功能，并/离网切换过程中交流侧电压保持连续，能够按照设定条件由并网运行模式自动转入离网运行模式，并建立频率和幅值稳定的交流电压，能够按照上级指令由离网运行模式转入并网运行模式，满足相应的功率要求。

- a) 并离网切换时，交流电压幅值变化应 $< \pm 10\%$ ；
- b) 并离网切换时，应在交流端口电压、频率和相位角满足同期条件后，切换时间宜不超过 200 ms。

7.5 多机并联性能

低压构网型光伏变换器应具备多机并联运行能力，支持至少2台设备并联稳定运行。当构网型光伏变换器以相同的设定工况运行时，其交流侧环流不超过额定电流的5%。高压构网型光伏变换器宜具备多机并联运行能力。

7.6 无光照构网功能要求

无光照构网功能是指构网型光伏变换器在没有光照条件下仍能够保持对电网的接入和运行功能，以确保光伏发电系统在各种天气条件下的稳定运行。需要满足以下条件：

- a) 无光照时能够实现所有功能，储能容量与光伏额定容量配比不超过 1:1；
- b) 无光照条件下能实现构网和无功功率补偿功能；

- c) 无光照条件下具备特定的启动控制策略，当检测到电网已经正常运行时，能够通过内部逻辑自动启动并接入电网。

7.7 黑启动

构网型光伏变换器应具备多机并联协同黑启动功能，在无外界电源支持的情况下，构网型光伏变换器应具有自主建立电压和频率的能力。

7.8 即插即用要求

构网型光伏变换器应具备快速响应能力，能够在接入电网时快速启动并达到稳定发电状态，以满足电网对电力的需求，提高光伏发电系统的响应速度和灵活性。

7.9 相角突变耐受

构网型光伏变换器并网时应可以通过吸收或注入功率来抵抗相位角的变化，具备相角突变耐受能力，能够响应相位角的阶跃变化。因电网扰动导致电压相角突变，并且相位角突变不大于 30° 时，能够稳定运行。

8 故障穿越及考核电压

8.1 低电压穿越

光伏并网系统的低电压故障穿越能力是指系统在PCC处出现电压跌落情况时，构网型光伏变换器能够快速、有效地检测到低电压故障，并采取相应的保护措施，以保护系统和设备不受损坏，并确保电网的安全稳定运行。具体包括以下要求：

- 光伏并网系统应具备快速检测低电压情况的能力，能够在最短的时间内准确地检测到低电压故障；
- 光伏电站 PCC 处电压跌至 0 时，光伏电站内的构网型光伏变换器和无功补偿装置应能够不脱网连续运行 150 ms；
- 光伏电站 PCC 处电压跌至标称电压的 20%时，光伏电站内的构网型光伏变换器和无功补偿装置应能够不脱网连续运行 625 ms；
- 光伏电站 PCC 处电压跌至标称电压的 20%~90%时，光伏并网系统应能在图 3 所示的阴影区域内不脱网连续运行，能够稳定穿越；
- 光伏并网系统应具备自检和报警功能，能够在电压故障发生时发出警报，并记录故障信息，以便后续的维护和排除故障。

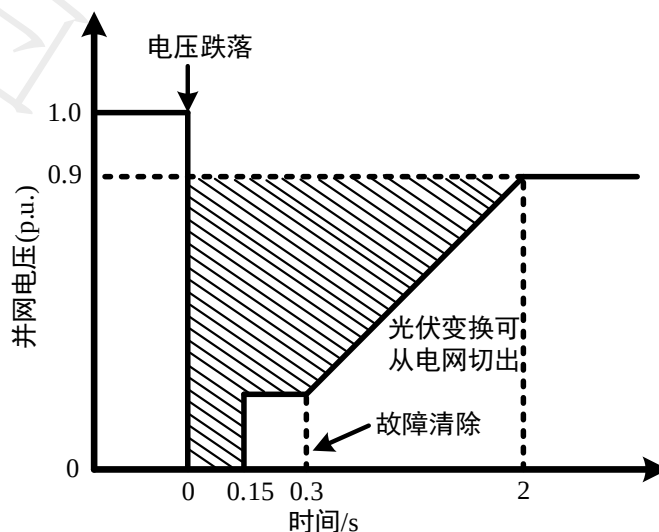


图3 光伏并网系统故障穿越要求

8.2 故障类型及考核电压

电力系统发生不同类型故障时,光伏电站PCC处考核电压全部在图3中电压轮廓线及以上的阴影区域时,构网型光伏变换器和无功补偿装置能够保证不脱网连续运行。针对不同故障类型的考核电压见表1。

表1 光伏电站低电压穿越考核电压

故障类型	考核电压
三相短路故障	PCC处线电压
两相短路故障	PCC处线电压
单相接地短路故障	PCC处线电压

9 安装与安全

9.1 电气连接方式

构网型光伏变换器并网时的电气接线方式应采用与电网相同的方式。

9.2 安全性能

9.2.1 电击防护要求

构网型光伏变换器中各电路最低防护水平应根据变换器中各电路的决定性电压等级确定,电击防护要求包含直接接触防护和间接接触防护。

9.2.2 电气间隙和爬电距离试验

构网型光伏变换器各带电电路之间以及带电部件、导电部件、接地部件之间的电气间隙和爬电距离应分别符合 $\geq 370\text{ mm}$, $\geq 840\text{ mm}$ 的规定。

9.2.3 介质强度

在正常试验大气条件下,构网型光伏变换器不同电路之间、电路与可接触外壳之间,能承受频率满足50 Hz、历时1 min的工频交流电压或等效直流电压,试验过程中要保证不击穿,不飞弧,漏电流 $< 20\text{ mA}$ 。

9.2.4 安全标识

安全标识应包括以下内容:

- 标识内容:应标明“警告”“双电源”等提示性文字,以警示人员注意安全和该设备具有双电源功能;
- 标识形状和颜色:形状应符合 GB 2894 的要求,通常采用正方形或长方形;应选择明显的颜色,如红色、黄色等,以便于在设备周围显眼地区域识别;
- 标识尺寸和高度:应符合 GB 2894 的规定,确保标识清晰可见,以便人员易于识别。

9.3 预警和信息采集

当光伏系统工作在应急电源模式时,开关柜上应设置警告标识。并且能够通过信息采集、传输及信号处理装置采集构网型光伏变换器并网运行时的音频、温度等数据。

9.4 污染等级

根据目前市场上光伏变换器的设计 and 应用情况,一般污染等级为IP65,即对固体物体的直径为1 mm的粒子具有完全防护,以应对复杂恶劣的户外环境。

10 电磁性能

电磁性能指构网型光伏变换器在工作时所表现出的电磁兼容性以及抗电磁干扰能力。良好的电磁性能对于构网型光伏变换器的稳定运行和与其他设备的兼容性至关重要，需要具有以下能力：

- 电磁兼容性：构网型变换器应符合国际或地区相关的电磁兼容性标准，确保在工作时不会产生对其他电子设备或系统造成干扰，同时也不受外部电磁干扰的影响；
- 抗干扰能力：并网过程应具备良好的抗电磁干扰能力，能够抵御来自电网、其他设备以及外部环境的各种电磁干扰，保证其在各种工作环境下的稳定运行；
- 屏蔽措施：在构网型光伏变换器的设计中应考虑采用屏蔽材料和屏蔽结构，阻隔内部电路的电磁辐射，减少对周围设备和环境的干扰；
- 静电放电抗扰度试验等级满足 GB/T 17626.2 所规定的严酷度等级；
- 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验等级满足 GB/T 17626.4 所规定的严酷度等级；
- 并网过程中的构网型光伏变换器的电磁发射应不超过 GB/T 17799.4 的发射限值。

11 仿真模型和参数

11.1 试验与仿真

光伏电站应提供构网型光伏变换器、无功补偿装置、集电系统及场站控制系统的机电暂态和电磁暂态仿真计算模型和参数，且模型应通过验证和准确性评价。

对于构网型光伏变换器并网的实际效果，总体的试验和仿真框图如图4所示。

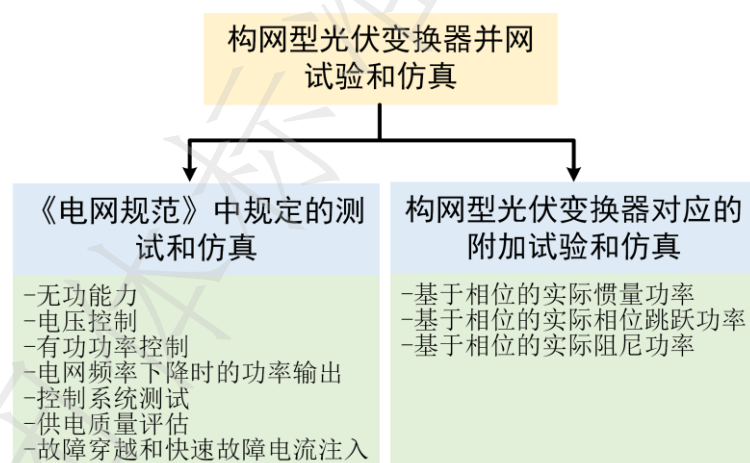


图4 构网型光伏变换器并网试验和仿真项目

经过验证测试得到的测试波形包括：

- 一组不同值的 RoCoF 测试；
- 一组在不同值下的相位跳跃测试；
- 一组在不同值下的电网振荡测试；
- 电网电压不平衡测试；
- 在实际和无功功率的额定电压下产生峰值额定电流的条件；
- 电网故障运行通过测试的条件；
- 产生峰值电流额定值测试的条件；
- 光伏系统孤岛测试；
- 光伏系统跳闸测试。

11.2 参数变化

光伏电站应跟踪构网型光伏变换器模型和参数的变化情况，并随时将最新情况反馈给电网调度机构。

11.3 仿真内容

11.3.1 基于相位的惯量功率仿真

具体仿真内容包括以下方面：

- a) 构网型光伏变换器在 50 Hz 稳态运行；
- b) 电网频率以 0.1 Hz/s 的速度从 50 Hz 提高到 52 Hz；
- c) 记录 10 s 时的有功功率和频率；
- d) 确定频率变化为 0.1 Hz/s 时的电网有功功率注入量；

11.3.2 相位跳转有功功率仿真

具体仿真内容包括以下方面：

- a) 并网发电站在满负荷、0 MVar 和稳定状态下运行；
- b) 并网发电站在频率为 50 Hz，无附加控制的情况下运行；
- c) 第 10 s 时在电网接入点处跳相 10 度；
- d) 在 5 s 内记录有功功率、无功功率、电压、电流和频率轨迹；
- e) 确认并网发电设备运行正常；
- f) 以最小输出功率运行时，相位跳变 50 度，在此工况下重复步骤 11.3.2 a)～步骤 11.3.2 e)，确认运行正确；
- g) 重复步骤步骤 11.3.2 a)～步骤 11.3.2 e)，在 PCC 处设置三相短路故障 140 ms；
- h) 排除故障并观察结果。

12 检验方法

12.1 检验分类

12.1.1 型式检验

用以验证被试本系统设备是否符合本文件要求。

型式检验应在一台本系统设备样品或在按相同（或类似）设计而制造的多台本系统设备或部件上进行。检验可以在同一形式的不同样品上进行。进行型式检验时，若发现任一项不合格，则应进行返修复检。复检仍不合格，则判为该本系统设备的型式检验不合格。

12.1.2 出厂检验

检验器件、材料、工艺上的缺陷和产品是否达到技术标准的规定进行出厂检验。每台本系统设备都要进行出厂检验。在出厂检验的过程中，若任意一项经返修后检验仍不合格，均判为该本系统设备不合格。

12.2 基本要求

光伏电站并网检验应满足以下基本要求：

- a) 光伏电站在接入电力系统前应完成测试和评价，并且当光伏电站改（扩）建后，应重新进行测试与评价；
- b) 光伏电站在申请接入电力系统检测前需向电网调度机构提供光伏部件、构网型光伏变换器及光伏电站的模型、参数、特性和控制系统特性等资料；
- c) 光伏电站在接入电力系统测试前 30 日，应完成光伏变换器、无功补偿装置以及光伏电站的模型验证和准确性评价，并提交测试方案至电力系统调度机构备案；
- d) 光伏电站应在全部发电单元并网调试运行后 6 个月内，提交光伏电站运行特性测试和评价报告至电力系统调度机构。

12.3 检验项目

12.3.1 外观与结构检验

试验要求：对试品外观与结构、防腐蚀层、主回路连接线进行检查，具体要求见表2。

表2 外观和结构检查检验结果

序号	检验项目	技术要求
1	外观与结构	塑料材料和聚合物材料在正常使用情况下，不应出现明显的退化迹象，包括裂纹或破裂，其防护性能不应降低；构件应有良好抗腐蚀性能；元件的安装布置应经济合理、安全可靠、维修方便，需手动操作的器件应操作灵活、无卡住或操作力过大现象；铭牌参数标志清晰、数据准确。
2	防腐蚀层	金属件外露表面应有可靠防腐蚀层。
3	主回路连接线	主回路连接线长期允许电流不小于1.5倍额定电流，接线牢固，额定电压不低于电路额定电压。

12.3.2 环境适应性检验

环境适应性检验具体要求见表3。

表3 环境适应性检验项目及要求

序号	检验项目	技术要求
1	低温工作测试	5.1
2	高温工作测试	5.1
3	污染耐受测试	5.2
4	电气条件测试	5.3

12.3.3 绝缘性能检验

绝缘性能检验具体要求见表4。

表4 绝缘性能检验项目及要求

序号	检验项目	技术要求
1	工频耐压试验	换流链对地施加114 kV工频电压1 min，试验期间应无绝缘击穿和元器件损坏。
2	换流链端间耐压试验	换流链端间施加 $1.15 \times 1.2 U$ 工频电压1 min，试验期间应无绝缘击穿和元器件损坏。

12.3.4 运行性能检验

运行性能检验项目及技术要求见表5，技术要求见本文件第6章～第11章。

表5 构网型光伏变换器并网检验项目

序号	检验项目	技术要求
1	构网型光伏变换器并网电流测试	6.1
2	构网型光伏变换器并网电压测试	6.2
3	有功功率控制能力测试	7.2
4	频率响应能力测试	7.2
5	无功功率控制能力测试	6.4
6	电压控制能力测试	6.4
7	并离网切换性能测试	7.4
8	惯量响应	7.3.1
9	阻尼控制	7.3.2
10	光伏电站故障穿越能力	8
11	构网型光伏变换器电气仿真模型及参数验证	11.3

12.4 在线监测

12.4.1 光伏电站应配置计算机监测系统、有功功率控制系统、无功电压控制系统、电能量采集系统、二次系统安全防护设备、调度数据网络接入设备等，并应满足 DL/T 5003 要求及电力二次系统调度管理规范的要求。

12.4.2 在电网发出最终运行通知之后，除了模拟和测试之外，还应进行在线监控，包括以下内容：

- 以 10 ms 的速率计算电网频率，以具有较高的跳相抗扰度；
- 以 100 ms 的速率计算电网 RoCoF，以具有较高的跳相抗扰度；

- c) 以 10 ms 的速率计算电网跳相数据。

全国团体标准信息平台

参 考 文 献

- [1] GB/T 19964 光伏电站接入电力系统技术规定
 - [2] GB/T 29319 光伏发电系统接入配电网技术规定
 - [3] GB/T 33593 分布式电源并网技术要求
 - [4] GB/T 33599 光伏电站并网运行控制规范
 - [5] GB/T 37408 光伏发电并网变换器技术要求
 - [6] GB/T 37409 光伏发电并网变换器检测技术规范
 - [7] GB/T 50697 1000kV变电站设计规范
 - [8] NB/T 10997 光伏电站并网安全条件及评价规范
 - [9] NB/T 32004 光伏并网变换器技术规范
 - [10] IEC 62934: 2021 可再生能源发电的电网整合. 术语和定义
-