

ICS 国际标准分类号
CCS 中国标准文献分类号



团 标 准

T/CES XXX-XXXX

构网型新能源频率响应要求

Frequency Response Requirements for Grid-forming Renewable Energy

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国电工技术学会 发布

目 次

目 次	I
前 言	II
引 言	III
1 范围	4
2 规范性引用文件	4
3 术语和定义	4
4 符号、代号和缩略语	5
5 新能源频率耐受范围	5
5.1 频率偏移耐受范围	5
5.2 频率变化率耐受范围	5
6 基于频率注入的测试方法	6
6.1 阶跃频率注入测试	6
6.2 斜坡频率注入测试	6
7 新能源频率控制性能要求	6
7.1 一次调频控制规范	6
7.2 快速频率响应控制规范	7
7.3 惯量响应控制规范	9
参 考 文 献	10

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。

本文件由中国电工技术学会提出。

本文件由中国电工技术学会标准工作委员会能源智慧化工作组归口。

本文件起草单位：中国电力科学研究院有限公司、华中科技大学、国网信通产业集团有限公司、华能清洁能源技术研究院、中国华能集团有限公司、浙江大学、新疆大学、武汉大学、清华大学、上海交通大学、西安交通大学、国电南瑞科技股份有限公司、南方电网科学研究院有限责任公司、中国南方电网电力调度控制中心、国网天津市电力有限公司城西供电公司、国网辽宁省电力有限公司大连供电公司、国网江苏省电力有限公司苏州供电公司、国网浙江省电力有限公司杭州供电公司。

本文件主要起草人：朱介北、邓兆顺、迟永宁、胡家兵、马士聪、李炳森、俞露杰、郭小江、郭力、牛晨晖、辛焕海、陈俊儒、查晓明、黄莹、吴文传、蔡旭、李宇骏、秦晓辉、王伟、欧开健、陈彬彬、刘泽群、王云逸、丁昊、朱学科、郭力源、张建锋。

本文件为首次发布。

引　　言

在电力系统在遭受大扰动时，系统依赖不同时间尺度下固有的和人为设计的调频机制来维持频率稳定。现代电力系统中，随着可再生能源发电比例的快速上升，具备电网频率调节能力的传统同步机组逐渐被新能源发电替代，导致系统整体调频能力显著下降，频率安全问题日益突出。近年来，国外发生了多起频率失稳引起的大规模停电事件，凸显了解决这一问题的紧迫性。

使新能源参与电力系统频率响应，已成为缓解上述频率稳定问题的关键手段。构网型新能源不仅能够模拟同步电机的惯量响应和一次调频特性，还能够提供快速频率响应等新型调频服务，从而有效改善系统受扰动后的频率动态特性。近年来，国内外发布了多个关于新能源频率响应的标准和规程，但在调频服务定义、性能指标及测试方法等方面仍存在较大差异，这在一定程度上阻碍了相关技术和装备的广泛应用与推广。为克服这一挑战，亟需制定一套统一且完备的标准，明确构网型新能源频率响应的技术要求，指导构网型新能源技术和装备的研发、部署、测试与评估。

该标准的适用场景包括但不限于：

- 1) 新能源并网调度与频率调节：电力系统调度机构需对并网新能源的频率响应性能进行准确评估，以制定合理的运行策略，确保系统整体调频能力满足运行要求。该标准可为构网型新能源发电的频率响应性能提供统一的评估方法；
- 2) 新能源调频辅助服务市场的规则制定：近年来，国内外多地的辅助服务市场已开始鼓励新能源参与不同类型的电力系统频率响应。该标准可为新能源调频辅助服务市场制定性能评价标准提供参考，推动构建相关补偿机制和交易规则；
- 3) 构网型新能源设备的研发与测试：对于构网型新能源设备的研发与测试，本标准提供了频率响应功能方面的性能指标和测试方法，确保设备在不同运行环境下调频功能的可靠性与有效性，支撑设备研制环节的技术开发工作和生产制造环节的性能测试工作；
- 4) 国际合作与技术标准化：随着全球电力系统的低碳化、智能化转型，构网型新能源的应用前景广阔。本标准有望推动构网型新能源调频技术的国际标准化进程，促进不同国家和地区的互通与合作，推动构网型新能源技术和装备在全球范围内的推广应用。

构网型新能源频率响应要求

1 范围

本文件规定了新能源参与电力系统一次调频、快速频率响应和惯量响应等频率响应服务的频率耐受范围、测试方法及性能要求。

本文件适用于指导新能源频率控制技术及装置的研发、部署、测试与评估。

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 38983.1 虚拟同步机 第1部分：总则

IEEE Std 2800 IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Inverter-Based Resources (IBRs) Interconnecting with Associated Transmission Electric Power Systems

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

构网型新能源 **grid-forming renewable energy**

采用构网型控制技术的新能源发电系统（如风电、光伏）或储能系统，其核心特征是通过电力电子设备模拟传统同步发电机的物理特性，主动构建并维持电网的频率和电压稳定，从而增强电力系统的抗扰动能力和自主运行能力。

3.2

启动时间 **activation time**

从系统频率升高或降低超过有功调频死区开始，新能源实际有功功率变化量达到有功目标值和初始值之差的 10% 所需的时间。

3.3

响应时间 **response time**

从系统频率升高或降低超过有功调频死区开始，新能源实际有功功率变化量达到有功目标值和初始值之差的 90% 所需的时间。

3.4

误差带 **settling band**

新能源实际有功功率与有功目标值的偏差范围。

3.5

调节时间 **settling time**

从系统频率升高或降低超过有功调频死区开始，新能源实际有功实测值与有功目标值之差到达并保持在某一规定的误差带内所需的最短时间。

3.6

最短持续时间 **minimum duration**

某一频率响应服务持续的最短时间。

3.7

功率容差 **power tolerance**

新能源实际有功功率到达稳态后与有功目标值之间容许的最大偏差。

3.8

最大响应功率 maximum response power

新能源在进行频率响应时，有功功率变化量绝对值的最大值。

4 符号、代号和缩略语

下列符号、代号和缩略语适用于本文件。

t_a : 启动时间 (activation time)

t_r : 响应时间 (response time)

$\pm sb\%$: 误差带 (settling band)

t_s : 调节时间 (settling time)

t_{dur} : 最短持续时间 (minimum duration)

P_{tol} : 功率容差 (power tolerance)

ΔP_{max} : 最大响应功率 (maximum response power)

图 1 进一步阐释了上述部分符号的含义。

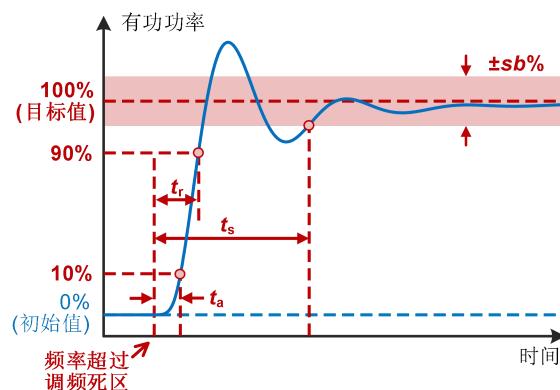


图1 频率响应动态性能指标示意图

5 新能源频率耐受范围

5.1 频率偏移耐受范围

新能源应在表 1 规定的频率范围和运行时长内保持不脱网运行。

表 1 新能源在不同电网频率区间下的运行要求

频率范围	运行要求
$f < 47.5 \text{ Hz}$	由新能源机组允许运行的最低频率而定
$47.5 \text{ Hz} \leq f < 49 \text{ Hz}$	每次频率低于 49Hz 高于 47.5Hz 时要求运行时间为 $5\text{min} \leq t \leq 30\text{min}$
$49 \text{ Hz} \leq f \leq 51 \text{ Hz}$	连续运行
$51 \text{ Hz} < f \leq 51.5 \text{ Hz}$	每次频率低于 51.5Hz 高于 51Hz 时要求运行时间为 $5\text{min} \leq t \leq 30\text{min}$ ，并执行电力系统调度机构下达的降低功率或高周切机策略，不允许停机状态的机组并网
$f > 51.5 \text{ Hz}$	由新能源机组允许运行的最高频率而定

5.2 频率变化率耐受范围

新能源应能在系统频率变化率绝对值低于 1Hz/s - 5Hz/s 时保持不脱网运行。频率变化率的测量窗长应在 0.1s - 0.5s 范围内。

6 基于频率注入的测试方法

6.1 阶跃频率注入测试

如图 2 所示, 阶跃频率注入测试向新能源控制器注入不同变化幅值 M_1 和 M_2 的频率阶跃信号, 测量并记录这一过程中新能源有功功率随时间变化的情况, 以此评估新能源频率响应相关性能指标是否满足要求。注入的频率阶跃应保持足够长的时间 T_{hold} 不变化, 以确保有功功率到达稳态, 并能够评估调频响应服务的最短持续时间。此测试应在新能源低出力 P_{initL} 和高出力 P_{initH} 情况下分别进行。

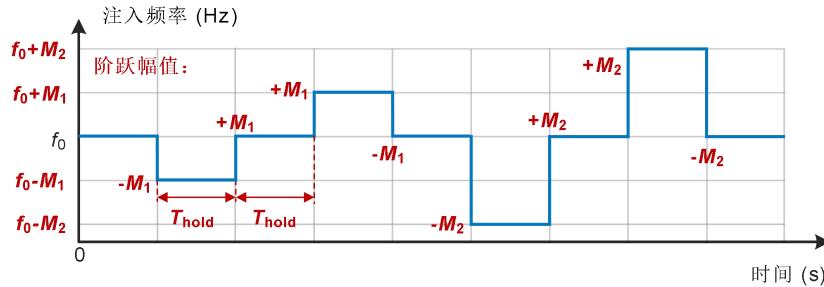


图2 注入的阶跃频率测试曲线

6.2 斜坡频率注入测试

如图 3 所示, 斜坡频率注入测试向新能源控制器注入不同变化率 R_1 和 R_2 的频率斜坡信号, 测量并记录这一过程中新能源有功功率随时间变化的情况, 以此评估新能源频率响应相关性能指标是否满足要求。注入频率斜坡变化结束后应保持足够长的时间 T_{hold} 不变化, 以确保有功功率到达稳态, 并能够评估调频响应服务的最短持续时间。此测试应在新能源低出力 P_{initL} 和高出力 P_{initH} 情况下分别进行。

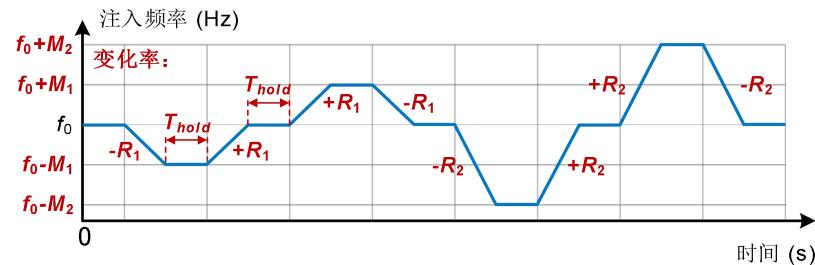


图3 注入的斜坡频率测试曲线

7 新能源频率控制性能要求

7.1 一次调频控制规范

如图 4 所示, 当系统频率升高或降低超过死区 $\pm db$ 后, 具备一次调频功能的新能源应依据设定的下垂系数, 从扰动前初始功率调节其有功输出随系统频率偏移量成比例变化。频率跌落时的有功响应不应超过新能源最大功率输出限值, 频率升高时的功率响应不应低于新能源最小功率输出限值。新能源一次调频响应的有功功率目标值可表达为

$$P_{PFR} = \begin{cases} \min(P_{init} + \frac{f_n - db - f}{f_n' k}, P_{max}), & f < f_n - db \\ P_{init}, & f_n - db \leq f \leq f_n + db \\ \max(P_{init} + \frac{f + db - f}{f_n' k}, P_{min}), & f > f_n + db \end{cases} \quad (1)$$

式中:

P_{PFR} ——新能源一次调频响应的有功功率目标值;

P_{init} ——扰动前初始功率;
 P_{max} ——新能源最大功率输出限值;
 P_{min} ——新能源最小功率输出限值;
 f_n ——系统额定频率 50Hz;
 f ——系统频率;
 k ——下垂系数。

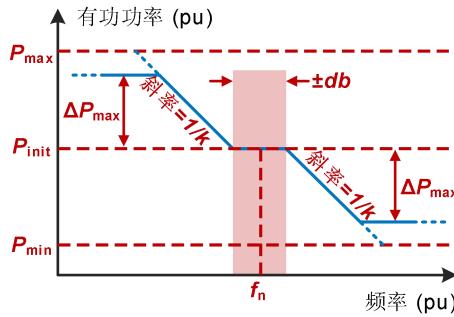


图4 一次调频稳态性能指标示意图

关闭新能源的其他调频功能,采用 6.1 节所述的阶跃频率注入测试及表 2 参数评估一次调频的性能。表 2 中 P_n 指新能源额定功率。

表 2 评估一次调频性能的阶跃频率测试参数

变量	范围
P_{initL}	$20\%P_n - 50\%P_n$
P_{initH}	$65\%P_n - 100\%P_n$
M_1	$0.05 \text{ Hz} - 0.5 \text{ Hz}$
M_2	$1 \text{ Hz} - 1.5 \text{ Hz}$
T_{hold}	$30 \text{ s} - 30 \text{ min}$

一次调频各性能指标的数值均可由注入频率和记录的新能源有功输出求得,它们应满足表 3 规定的范围。

表 3 一次调频性能指标及范围

变量	范围
db	$\leq 0.15 \text{ Hz}$
k	$\leq 12\%$
t_a	$0.2 \text{ s} - 2 \text{ s}$
t_r	$2 \text{ s} - 20 \text{ s}$
t_s	$10 \text{ s} - 30 \text{ s}$
t_{dur}	$30 \text{ s} - 30 \text{ min}$
sb	$1\% - 5\%$
P_{tol}	$1\%P_n - 5\%P_n$
ΔP_{max}	$\geq 10\%P_n$

7.2 快速频率响应控制规范

快速频率响应指在一次调频完全启动前有功功率快速响应系统频率偏移。频率跌落时的有功响应不应超过新能源最大功率输出限值 P_{\max} ，频率升高时的功率响应不应低于新能源最小功率输出限值 P_{\min} 。快速频率响应可分为两类，分别记为 FFR1 和 FFR2：

FFR1：与一次调频有着相似的如图 4 所示的有功-频率下垂特性，主要区别在于响应速度更快。FFR1 可有效维持系统发电和负荷的动态平衡，抑制系统频率波动。新能源 FFR1 的有功功率目标值可表达为

$$P_{\text{FFR1}} = \begin{cases} \min(P_{\text{init}} + \frac{f_n - db - f}{f_n' k}, P_{\max}), & f < f_n - db \\ P_{\text{init}}, & f_n - db \leq f \leq f_n + db \\ \max(P_{\text{init}} + \frac{f_n + db - f}{f_n' k}, P_{\min}), & f > f_n + db \end{cases} \quad (2)$$

式中：

P_{FFR1} ——新能源 FFR1 的有功功率目标值。

FFR2：当系统频率升高或降低超过死区 $\pm db$ 后，新能源应按照一固定的变化幅度快速调节其有功输出，并保持规定的时间。同 FFR1 相比，FFR2 更加适用于大型发电机跳闸、直流闭锁、大负荷突然投切等故障引起系统频率骤降或骤升的场景，为电力系统提供紧急功率支援。新能源 FFR2 的有功功率目标值可表达为

$$P_{\text{FFR2}} = \begin{cases} \min(P_{\text{init}} + D P_{\max}, P_{\max}), & f < f_n - db \\ P_{\text{init}}, & f_n - db \leq f \leq f_n + db \\ \max(P_{\text{init}} - D P_{\min}, P_{\min}), & f > f_n + db \end{cases} \quad (3)$$

式中：

P_{FFR2} ——新能源 FFR2 的有功功率目标值；

关闭新能源的其他调频功能，采用 6.1 节所述的阶跃频率注入测试及表 4 参数评估快速频率响应的性能。

表 4 评估快速频率响应性能的阶跃频率测试参数

变量	范围
P_{initL}	20% P_n - 50% P_n
P_{initH}	65% P_n - 100% P_n
M_1	0.05 Hz - 0.5 Hz
M_2	1 Hz - 1.5 Hz
T_{hold}	5 s - 30 min

快速频率响应各性能指标的数值均可由注入频率和记录的新能源有功输出求得，它们应满足表 5 规定的范围。

表 5 快速频率响应性能指标及范围

变量	范围	
	FFR1	FFR2
db	0.015 Hz - 1 Hz	0.05 Hz - 1 Hz
k	1% - 5%	N/A
t_r	0.5 s - 2 s	
t_{dur}	5 s - 30 min	
sb	1% - 5%	
P_{tol}	1% P_n - 5% P_n	
ΔP_{\max}		$\geq 6\%P_n$

7.3 惯量响应控制规范

如图 5 所示, 当系统频率波动时, 具备惯量响应功能的新能源应依据设定的惯性时间常数 H , 从扰动前初始功率调节其有功输出随系统频率变化率成比例变化。频率跌落时的有功响应不应超过新能源最大功率输出限值, 频率升高时的功率响应不应低于新能源最小功率输出限值。新能源惯量响应的有功功率目标值可表达为

$$P_{\text{INEC}} = \begin{cases} \min(P_{\text{init}} - \frac{2H}{f_n} \frac{df}{dt}, P_{\text{max}}), & \frac{df}{dt} < 0 \\ P_{\text{init}}, & \frac{df}{dt} = 0 \\ \max(P_{\text{init}} - \frac{2H}{f_n} \frac{df}{dt}, P_{\text{min}}), & \frac{df}{dt} > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:

P_{INEC} —新能源惯量响应的有功功率目标值;

df/dt —系统频率变化率。

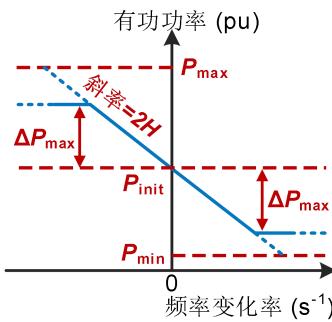


图5 惯量响应稳态性能指标示意图

关闭新能源的其他调频功能, 采用 6.2 节所述的斜坡频率注入测试及表 6 参数评估惯量响应的性能。

表 6 评估惯量响应性能的斜坡频率测试参数

变量	范围
P_{initL}	$20\%P_n - 50\%P_n$
P_{initH}	$65\%P_n - 100\%P_n$
R_1	$0.05 \text{ Hz/s} - 0.1 \text{ Hz/s}$
R_2	$0.2 \text{ Hz/s} - 0.5 \text{ Hz/s}$
M_1	$0.2 \text{ Hz} - 0.5 \text{ Hz}$
M_2	$1 \text{ Hz} - 1.5 \text{ Hz}$
T_{hold}	$5 \text{ s} - 1 \text{ min}$

惯量响应各性能指标数值均可由注入频率和记录的新能源有功输出求得, 且应满足表 7 规定的范围。

表 7 惯量响应性能指标及范围

变量	范围
H	$1.5 \text{ s} - 10 \text{ s}$
t_r	$0.25 \text{ s} - 0.5 \text{ s}$
sb	$1\% - 5\%$
P_{tol}	$2\%P_n - 5\%P_n$
ΔP_{max}	$\geq 10\%P_n$

参 考 文 献

- [1] GB/T 40595 并网电源一次调频技术规定及试验导则
 - [2] DL/T 2246.7 电化学储能电站并网运行与控制技术规范第 7 部分：惯量支撑与阻尼控制
 - [3] Q/GDW 11825 单元式光伏虚拟同步发电机技术要求和试验方法
 - [4] Q/GDW 11826 风电机组虚拟同步发电机技术要求和试验方法
-