



团 体 标 准

T/CES XXX-XXXX

叶片覆冰工况下风电功率预测技术规范

Technical specifications for wind power forecasting under blade icing conditions

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国电工技术学会 发布

目 次

前 言I

1 范围2

2 规范性引用文件2

3 术语和定义2

4 数据要求3

 4.1 静态数据3

 4.2 风机运行数据3

 4.3 气象数据3

5 数据处理4

 5.1 气象监测数据异常识别与修正4

 5.2 覆冰样本集构建5

6 预测模型要求5

 6.1 通用要求5

 6.2 直接预测法6

 6.3 间接预测法6

7 结果评价7

 7.1 评价指标7

 7.2 覆冰事件评估7

 7.3 预测精度要求7

附 录 A（规范性） 数据扩充检验方法9

附 录 B（资料性） 间接预测法计算方法10

附 录 C（资料性） 预测模型损失函数计算方法11

附 录 D（规范性） 叶片覆冰工况下风电功率预测评估指标计算方法12

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》给出的规则起草。

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这些专利的责任。

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储能技术工作组归口。

本文件起草单位：国网河南省电力公司电力科学研究院、山东大学、中国电力科学研究院有限公司、浙江大学、河南省气象服务中心（河南省气象宣传与科普中心）、国网河南省电力公司、国能日新科技股份有限公司。

本文件主要起草人：谢博宇、刘阳、杨明、李梦林、车建峰、万灿、魏璐、于一潇、王景钢、王传琦、覃洪培、滕卫军、李朝晖、王勃、李伊吟、孙鑫、刘哲、杨宣、郭义娜、谷青发、宫婷、张亚飞、袁良、何志强、朱瑾、姚方玲。

本文件为首次发布。

叶片覆冰工况下风电功率预测技术规范

1 范围

本文件规定了叶片覆冰工况下风电功率预测相关的数据要求、数据处理、模型构建、预测评价等技术要求。

本文件适用于风电场站运营商、各级调度机构、第三方预测系统开发服务商等开展叶片覆冰工况下风电功率预测工作或服务。

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 18709-2002 风电场风能资源测量方法
- GB/T 18710-2002 风电场风能资源评估方法
- GB/T 19963.1-2021 风电场接入电力系统技术规定 第1部分：陆上风电
- GB/T 28592-2012 降水量等级
- GB/T 40603-2021 风电场受限电量评估导则
- GB/T 40604-2021 新能源场站调度运行信息交换技术要求
- GB/T 40607-2021 调度侧风电或光伏功率预测系统技术要求
- NB/T 10205-2019 风电功率预测技术规定

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

风电场 wind farm

由一批风力发电机组或风力发电机组群组成的发电站。

3.2

数值天气预报 numerical weather prediction

根据大气实际情况，在一定的初值和边值条件下，通过大型计算机做数值计算，求解描写天气演变过程的流体力学和热力学方程组，预测未来一定时段的大气运动状态和天气现象的方法。

3.3

风电有功功率 wind power active power

风电场通过其并网点输出到电网的有功功率。

3.4

风电功率预测 wind power forecasting

以风速、功率、数值天气预报等数据作为模型的输入，结合风电场或一定区域内的风电机组设备状态及运行工况，预测风电场或一定区域内风电未来一段时间的有功功率。

3.5

降水量 precipitation

某一时段内，从天空降落到地面上的液态(降雨)或固态(降雪)(经融化后)降水，未经蒸发、渗透、流失而在水平面上积聚的深度。

3.6

风电场场外受限电量 outside curtailment power of wind farm

非风电场自身原因造成的损失电量。

3.7

时间间隔 time interval

相邻两次观测或预测之间的持续时间大小。

3.8

超短期风电功率预测 ultra-short-term wind power forecasting

预测风电场或一定区域内风电未来0~4小时的有功功率，时间间隔不大于15分钟。

3.9

短期风电功率预测 short-term wind power forecasting

预测风电场或一定区域内风电次日零时起未来72小时的有功功率，时间间隔不大于15分钟。

3.10

直接预测法 direct forecasting method

利用人工智能模型，建立从覆冰相关的气象因子预报序列到未来规定时间尺度下风电场有功功率序列的端到端映射关系，直接输出叶片覆冰工况下的功率预测值。

3.11

间接预测法 indirect forecasting method

通过分别建立常规风电功率预测模型和风电场场外受限电量预测模型，建立从覆冰相关的气象因子预报序列到常规功率预测值、场外受限电量预测值的并行预测与修正路线，得到叶片覆冰工况下的功率预测值。

4 数据要求

4.1 静态数据

4.1.1 风力发电机组的数量、机型种类。

4.1.2 风电场的总装机容量、各型号风力发电机组的单机额定容量。

4.1.3 扩容记录：历次扩容的时间及扩充容量。

4.1.4 机组参数：各型号风力发电机组的功率曲线（数据采样间隔应不大于1m/s）、切入与切出风速。

4.1.5 各风力发电机组的首次并网时间与机位坐标。

4.1.6 气象测风设备：安装数量、布设位置、测量条件及其精度等级。

4.1.7 地形资料：以风电场为中心半径10km内3km×3km网格的海拔高度、经纬度坐标，网格范围应参考风电场内最远两台机组间的距离。

4.2 风机运行数据

4.2.1 历史运行数据

历史运行数据应满足以下要求：

- a) 包含风电场及风电机组的历史有功功率数据，数据时间间隔应不大于15分钟；
- b) 包含风电场及机组状态的历史记录，应至少包括机组的故障停运、计划停运、因覆冰导致的被动停机或主动降功率运行等状态的起止时间记录；
- c) 投运时间超过1年的风电场，需提供不少于1年且连续的数据；
- d) 投运时间不足1年的风电场，需提供自投运起的所有历史数据。

4.2.2 实时运行数据

实时运行数据应包括风电场实时功率数据、机组实时运行数据及状态信息，具体应满足以下要求：

- a) 风电机组实时运行数据的采集应符合GB/T 40604-2021中5.2.2的要求；
- b) 风电场实时有功功率数据应取自风电场升压站监控系统，数据采集与转发至预测系统的延迟不超过5分钟；
- c) 风电机组实时运行数据应至少包括实时有功功率、运行状态信号，建议包括除冰装置动作信号。

4.3 气象数据

4.3.1 数值天气预报数据

数值天气预报数据应满足以下要求：

- a) 数据类型：在线滚动预报数据指系统投运后每日定时提供的数值天气预报结果，应每日至少提供两次数值天气预报数据，历史预报数据指系统投运之前的在线滚动预报数据的历史记录；
- b) 基本气象数据：数值天气预报内容应至少包含 10 m、30 m、50 m、70 m、100 m 以及轮毂高度处的风速、风向，当叶片运行最高点高于 100 m 时，还应提供叶片运行最高点附近高度的风速、风向数据，或提供上下相邻高度层的数据，以通过插值获得叶片运行最高点高度的气象信息，数值天气预报内容还应包括 2 m 高度的气温、相对湿度，地面气压，以及降水量、降水类型（液态降水、固态降水、混合型降水），其中天气预报服务商应对气温、风速、相对湿度进行精度优化；
- c) 特殊天气过程数据：应提供寒潮天气、冻雨天气的过程预报，数据时长应至少覆盖未来 72 小时，数据时间间隔应不大于 1 小时；
- d) 数据时间要求：应满足 GB/T 40607-2021 中 4.2.3 的要求，风电机组覆冰过程中数据的时间间隔应不大于 15 分钟；
- e) 数据空间要求：应完整覆盖目标场站，预测网格水平分辨率应不低于 $3\text{km} \times 3\text{km}$ 。对于地形复杂区域，宜采用不低于 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 的高精度微尺度预报；
- f) 历史数据长度要求：应根据其投运时间确定，若投运超过 1 年则数据应不少于 1 年，若不足 1 年则应包含自投运日起的所有数据。

4.3.2 气象监测数据

- a) 风电场安装气象信息采集设备的技术指标符合 GB/T 18709-2002 的规定；
- b) 数据内容：风电场采集的实测气象数据应至少包括 10 m、30 m、50 m、70 m、100 m 及轮毂高度处的风速、风向，测风高度最大值宜不低于叶片运行最高点，当固定测风设备不能覆盖叶片运行最高点时，可采用测风激光雷达进行测量，或利用相邻高度层数据插值获得，实测气象数据还应包括 10 m 高度及轮毂高度处的气温、气压、相对湿度，降水量、降水类型（液态降水、固态降水、混合型降水），以及风电机组机舱测风仪器采集的数据；
- c) 数据时间要求：气象监测数据采集的时间间隔不大于 5 分钟；
- d) 建议装配覆冰监测设备的场站提供以下数据：积冰厚度（mm）、覆冰速率（mm/h）、覆冰状态（结冰、融冰、无冰），覆冰监测数据的采样频率应与气象监测数据保持一致。

5 数据处理

5.1 气象监测数据异常识别与修正

5.1.1 数据连续性检验

数据连续性检验应满足以下要求：

- a) 应核查时间序列数据的完整性，确保实际数据记录的数量与预设数据记录的数量一致；
- b) 数据的时间标签应保持严格连续，不应出现采样点缺失或时间逻辑倒置的情况；
- c) 对于在预定时间点未能成功采集的缺失数据，应统一进行标记。

5.1.2 数据逻辑性检验

数据逻辑性检验应满足以下要求：

- a) 应对气象监测数据进行越限检验，应满足 GB/T 18710-2002 中的要求，校验阈值在叶片覆冰工况下应适当放宽 10%；
- b) 应对气象监测数据进行内部一致性检验，应满足 GB/T 18710-2002 中的要求；
- c) 应对气象监测数据进行时间一致性检验，应满足 GB/T 18710-2002 中的要求，校验阈值在叶片覆冰工况下应适当放宽 10%；
- d) 应对测风塔不同层高数据进行相关性检验。

5.1.3 覆冰特异性干扰样本清洗

覆冰特异性干扰样本清洗应满足以下要求：

- a) 应结合环境温度与湿度条件，识别并标记因传感器冻结而产生的跳变异常数据；
- b) 应利用一阶差分波动量低阈值识别并清洗长时间恒定不变的传感器冻结失效数据；
- c) 应结合机组实时运行状态码进行标记，剔除状态码显示的受限或维护时段数据；
- d) 应结合机组运行状态、故障告警、检修记录和调度受限信息，区分叶片覆冰与故障停运、计划停运、场外受限及主动限功率等异常工况，叶片覆冰造成的功率异常数据应保留并设置覆冰状态标识，其他异常工况数据应剔除或单独标记。

5.1.4 数据修正

数据修正应满足以下要求：

- a) 未通过连续性检验和逻辑性检验的数据应以其余层高数据根据相关性原理进行修正，不具备修正条件的应以前一预测点数据替代；
- b) 所有经修正或补全的数据均应记录专用状态标识。

5.2 覆冰样本集构建

5.2.1 气象条件初筛

具体判据如下：轮毂高度处气温 $\leq 4^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $\geq 85\%$ 、风速处于 $0.5\sim 12\text{m/s}$ 且伴随微量降水或无降水，降水量应满足GB/T 28592-2012的要求。

5.2.2 剔除风险区间

根据降水量、降水类型数据，当气温 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 时，将液态降水标记为高风险，混合型降水标记为中风险，固态降水标记为低风险。剔除降水量 $>1.0\text{mm/h}$ 的强降水时段，以及气温 $>4^{\circ}\text{C}$ 或相对湿度 $<85\%$ 的干燥高温时段。

5.2.3 覆冰起始判定

在经气象条件初筛后的时段，当满足以下任一条件时，确定机组进入覆冰工况：

- a) 结冰传感器发出告警信号，且状态持续 ≥ 15 分钟；
- b) 机组实际功率曲线显著偏离正常风速-功率曲线，总绝对偏差百分比 $\geq 20\%$ 。

5.2.4 覆冰结束判定

机组恢复正常工况需同时满足以下条件，且状态持续稳定 ≥ 1 小时：

- a) 轮毂高度处气温 $>4^{\circ}\text{C}$ ，风速处于 $2\sim 4\text{m/s}$ ，相对湿度 $<90\%$ ；
- b) 机组功率恢复至标准出力范围，即机组功率曲线的总绝对偏差百分比小于 20% ，且机组振动频率恢复正常值、结冰传感器显示无冰状态；
- c) 若机组在执行除冰操作后满足b)项要求，可不受a)项气象条件的限制，判定覆冰工况结束。

5.2.5 针对覆冰样本集，计算风电场场外受限电量，应满足GB/T 40603-2021的要求，计算公式见附录B。

6 预测模型要求

6.1 通用要求

6.1.1 时间要求

预测对象应是覆盖覆冰全过程的有功功率预测。其中：

- a) 超短期预测：涵盖未来0小时至4小时；
- b) 短期预测：涵盖次日零时起至未来72小时；
- c) 时间间隔：应不大于15分钟；
- d) 单次计算时间：应不大于5分钟。

6.1.2 更新要求

模型应支持自动运行模式和手动运行模式，且具备在线建模与滚动能力：

- a) 超短期预测：至少每15分钟滚动执行一次；

- b) 短期预测：每日至少随数值天气预报更新 2 次；
- c) 风电场应每 15min 向电力调度机构滚动上报未来 15min~4h 的超短期风电功率预测结果；
- d) 风电场应每天按照电力调度机构规定的时间自动上报次日零时至未来 72h 的短期风电功率预测结果。

6.1.3 模型应具备良好的可扩展性，能够适应风电场装机扩容、增设监测设备等变化。

6.1.4 预测模型的输出应至少提供叶片覆冰工况下的风电功率点预测结果，即预测时间尺度内各时刻风电场有功功率的确定性预测值。

6.1.5 预测模型应考虑叶片覆冰对机组气动性能和运行状态的影响，并结合相关气象、覆冰监测及机组运行信息，表征覆冰工况及其对风电功率的影响。

6.2 直接预测法

6.2.1 适用场景

直接预测法适用于历史样本数据不具备典型覆冰特征的风电场。

6.2.2 数据准备

数据准备应满足以下要求：

- a) 建模所需的自变量数据可为气象监测数据、数值天气预报数据及机组实时运行状态，因变量数据应为对应时刻风电场的有功功率数据；
- b) 应采用统计采样、深度学习或物理模拟等技术，扩充叶片覆冰工况下的有功功率数据和气象数据；
- c) 应通过分布一致性检验，验证扩充数据与原始样本在均值、方差及概率分布特征上的一致性，具体计算方法应符合附录 A。

6.2.3 模型建立

模型建立应满足以下要求：

- a) 应建立覆冰相关气象因子、风机运行状态及历史功率序列与未来风电功率之间的端到端映射关系，宜采用长短期记忆网络、时序卷积网络、Transformer 或其他适用的人工智能模型；
- b) 根据预测时间尺度的不同，其训练数据与模型输入输出构成如下：
 - 1) 超短期预测：训练数据采用历史气象监测数据、风机运行状态数据，对应时刻的风电场有功功率数据为标签；模型输入为实时气象监测数据、风机运行状态、数值天气预报数据；模型输出为风电场有功功率序列；
 - 2) 短期预测：训练数据采用历史数值天气预报数据为主，对应预报时段内的风电场有功功率数据为标签；模型输入为数值天气预报数据、预测起始时刻的气象监测数据；模型输出为风电场有功功率序列；
- c) 模型应重点提取气温、相对湿度、风速、降水量、降水类型等气象要素及其持续时间、变化速率和组合关系，表征叶片覆冰形成、发展和消退过程对风电功率的影响；
- d) 模型宜采用注意力机制、门控机制或其他适用的特征融合方法，对覆冰相关气象特征、风机运行状态特征和历史功率特征进行融合，提高覆冰工况下的风电功率预测能力；
- e) 宜采用由基础误差项和覆冰条件敏感项构成的损失函数，通过调整损失函数参数并重新训练模型，获得叶片覆冰工况下风电功率预测结果，具体计算方法参见附录 C.1。

6.2.4 在线预测

对已经建立的直接预测模型，输入未来时刻的数值天气预报数据、实时气象监测数据及历史功率序列，通过模型推理计算，直接得到叶片覆冰工况下风电功率预测结果。

6.3 间接预测法

6.3.1 适用场景

间接预测法适用于具备风电场场外受限电量与典型覆冰特征历史数据的风电场，或具有预测风电场场外受限电量需求的风电场。

6.3.2 数据准备

建模所需的自变量数据可为气象监测数据、数值天气预报数据及机组实时运行状态，因变量数据应为对应时刻风电场的有功功率数据和风电场场外受限电量。

6.3.3 模型建立

模型的建立应满足以下要求：

- a) 宜构建两个独立的预测模型，具体如下：
 - 1) 常规风电功率预测模型：应满足 NB/T 10205-2019 中 5.3 的要求，利用非覆冰时段的常规数据集进行训练，采用合理的物理、统计以及组合预测模型，输出为无覆冰影响下的常规风电功率预测值 $\hat{y}$ ；
 - 2) 风电场场外受限电量预测模型：利用覆冰样本集进行训练，采用合理的物理、统计以及组合预测模型，输出为风电场场外受限电量预测值 $\hat{c}$ ；
- b) 功率修正：基于风电场场外受限电量预测值 $\hat{c}$ 对常规风电功率预测值 $\hat{y}$ 进行修正，得到叶片覆冰工况下的风电功率预测值 y ，具体计算方法参见附录 B.2；
- c) 宜采用复合损失函数，同时优化常规风电功率预测模型和风电场场外受限电量预测模型，具体计算方法参见附录 C.2。

6.3.4 在线预测

对已经建立的间接预测模型，首先输入未来时刻的数值天气预报数据，识别覆冰时段并预测未来规定时段的常规风电功率和风电场场外受限电量；其次利用修正算式对常规预测功率进行修正，得到叶片覆冰工况下风电功率预测结果。

7 结果评价

7.1 评价指标

- a) 应采用附录 D 的方法利用均方根误差、平均绝对误差、相关性系数、准确率、合格率对叶片覆冰工况下风电功率预测值进行评价；
- b) 参与统计的数据范围应能任意选定；
- c) 故障停运、计划停运、场外受限、通信异常及测量设备故障等非覆冰因素影响的时段，应从覆冰工况预测评价样本中剔除或单独统计，覆冰与其他异常工况重叠且影响无法区分的时段，不宜纳入覆冰预测精度评价。

7.2 覆冰事件评估

针对叶片覆冰工况下风电功率预测，宜对完整的覆冰事件进行专项评估。评估应针对单个或多个独立的覆冰事件进行，包括但不限于以下内容：

- a) 覆冰事件命中率：评估预测模型正确识别出的真实覆冰事件的比例，具体计算方法应符合附录 D.6；
- b) 覆冰事件漏报率：评估预测模型未能识别出的真实覆冰事件的比例，具体计算方法应符合附录 D.7；
- c) 关键时间节点预测偏差：评估预测模型对覆冰事件关键时间节点的预测时间误差。关键时间节点包括功率开始下降时刻与功率恢复至正常水平的时刻，具体计算方法应符合附录 D.8。

7.3 预测精度要求

- a) 参与预测准确性指标统计的时段包含出力受控时段时，应按照 GB/T 19963.1-2021 中 6.3.5 的要求进行统计；
- b) 针对未来覆冰时段的预测结果，超短期风电功率预测月平均准确率应不低于 82%，月平均合格率应不低于 82%，短期风电功率预测月平均准确率应不低于 78%，月平均合格率应不低于 78%；

- c) 针对未来覆冰事件的预测结果，其覆冰事件命中率不宜低于 80%，漏报率不宜高于 20%，对于历史覆冰事件发展迅速的场站，其覆冰事件命中率不宜低于 75%，漏报率不宜高于 25%；
- d) 针对未来覆冰事件的预测结果，超短期预测的关键时间节点预测时间偏差宜不大于 1 小时，短期预测的关键时间节点预测时间偏差宜不大于 1 天。

附 录 A (规范性) 数据扩充检验方法

A.1 均值检验

采用 t 检验判断两组独立样本的均值是否存在显著差异。

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

$\bar{X}_1$ ----原始样本均值；

$\bar{X}_2$ ----扩充样本均值；

s_1^2 ----原始样本方差；

s_2^2 ----扩充样本方差；

n_1 ----原始样本容量；

n_2 ----扩充样本容量。

A.2 方差检验

采用 F 检验两组独立样本的方差是否存在显著差异。

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

s_1^2 ----原始样本方差；

s_2^2 ----扩充样本方差。

A.3 概率分布检验

采用 Jensen-Shannon 散度检验两组独立样本概率分布的相似性。

$$JS(P \parallel Q) = \frac{1}{2}D_{KL}(P \parallel M) + \frac{1}{2}D_{KL}(Q \parallel M) \dots\dots\dots (A.3)$$

$$M = \frac{1}{2}(P + Q) \dots\dots\dots (A.4)$$

$$D_{KL}(P \parallel Q) = \int_{-\infty}^{\infty} P \log\left(\frac{P}{Q}\right) dx \dots\dots\dots (A.5)$$

式中：

P ----原始样本的概率分布；

Q ----扩充样本的概率分布；

M ----平均分布；

D_{KL} ----Kullback-Leibler 散度。

附录 B (资料性) 间接预测法计算方法

B.1 风电场场外受限电量

风电场场外受限电量按公式 (B.1) 计算, 由风电场可用发电电量与风电场实际发电电量之差确定。

$$C = C_{\text{available}} - C_{\text{real}} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

C ---- 风电场场外受限电量;

$C_{\text{available}}$ ---- 风电场可用发电电量;

C_{real} ---- 风电场实际发电电量。

B.2 功率修正

叶片覆冰工况下风电功率预测值是通过常规风电功率预测值结合场外受限电量与可用发电电量的比例修正得到, 按照公式 (B.2) 的方法计算获得。

$$P_c = P_i \times \left(1 - \frac{C_o}{C_{\text{available}}} \right) \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

P_c ---- 叶片覆冰工况下风电功率预测值;

P_i ---- 常规风电功率预测值;

C_o ---- 风电场场外受限电量预测值;

$C_{\text{available}}$ ---- 风电场可用发电电量。

附 录 C
(资料性)
预测模型损失函数计算方法

C.1 直接预测法的损失函数

一种同时考虑常规功率预测与覆冰条件的复合损失函数计算方法参见公式 (C.1) ~ (C.3)。

$$L_{direct}(y, \hat{y}, x) = \alpha \cdot L_{base}(y, \hat{y}) + (1 - \alpha) \cdot L_{ice}(y, \hat{y}, x) \dots\dots\dots (C.1)$$

$$L_{ice}(y, \hat{y}, x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega(x_i) \cdot |y_i - \hat{y}_i| \dots\dots\dots (C.2)$$

$$\omega(x) = \exp\left(-\frac{(T-2)^2}{2 \times 1.5^2}\right) \cdot \frac{\min(RH, 100)}{100} \cdot f(v) \cdot g(P_{type}) \dots\dots\dots (C.3)$$

式中：

L_{direct} ----直接预测法的总损失；

L_{base} ----基础误差项，可采用平均绝对误差、Huber 损失等；

L_{ice} ----覆冰条件敏感项；

α ----权重系数，取值范围为(0, 1)，用于平衡两项损失的贡献；

y ----归一化的实际功率值，无量纲；

$\hat{y}$ ----归一化的功率预测值，无量纲；

x ----覆冰相关气象特征向量；

$\omega(x)$ ----损失函数；

T ----轮毂高度处气温，℃，在 2℃附近权重最大；

RH ----相对湿度，%；

$f(v)$ ----风速项， $\frac{v}{8}$ ，m/s；

$g(P_{type})$ ----降水类型项，液态降水：1.2，混合型降水：1.0，固态降水：0.8，无降水：0.6。

C.2 间接预测法的损失函数

一种同时优化常规功率预测与场外受限电量预测的复合损失函数计算方法参见公式 (C.4) ~ (C.5)。

$$L_{indirect} = \gamma \cdot L_{base}(y, \hat{y}) + (1 - \gamma) \cdot L_C(c, \hat{c}) \dots\dots\dots (C.4)$$

$$L_C(c, \hat{c}) = (c - \hat{c})^2 \dots\dots\dots (C.5)$$

式中：

$L_{indirect}$ ----间接预测法的总损失；

L_{base} ----基础误差项，可采用平均绝对误差、Huber 损失等；

L_C ----风电场场外受限电量预测损失；

γ ----权重系数，取值范围为(0, 1)，用于平衡两项损失的贡献；

y ----归一化的实际功率值，无量纲；

$\hat{y}$ ----归一化的预测功率值，无量纲；

c ----归一化的风电场场外受限电量实际值，无量纲；

$\hat{c}$ ----归一化的风电场场外受限电量预测值，无量纲。

附 录 D (规范性) 叶片覆冰工况下风电功率预测评估指标计算方法

D.1 均方根误差

均方根误差可用来评价叶片覆冰工况下风电功率预测值误差的分散程度,从整体上评价叶片覆冰工况下风电功率预测的性能、预测效果。

$$E_{\text{mse}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_{M,i} - P_{P,i}}{C_i} \right)^2} \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

$P_{M,i}$ ---- i 时刻的实际功率;

$P_{P,i}$ ---- i 时刻的预测功率;

C_i ---- i 时刻的开机总容量;

n ----误差统计时间区间内的总采样点数。

D.2 平均绝对误差

平均绝对误差可以用来评价叶片覆冰工况下风电功率预测系统的长期运行状态。

$$E_{\text{mac}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_{M,i} - P_{P,i}}{C_i} \right| \dots\dots\dots (D.2)$$

D.3 相关性系数

相关系数能够反映叶片覆冰工况下风电功率预测值与实际功率波动的相关程度。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(P_{M,i} - \bar{P}_M) \cdot (P_{P,i} - \bar{P}_P)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{M,i} - \bar{P}_M)^2 \cdot \sum_{k=1}^n (P_{P,i} - \bar{P}_P)^2}} \dots\dots\dots (D.3)$$

式中:

$\bar{P}_M$ ----统计时间区间内实际功率的平均值;

$\bar{P}_P$ ----统计时间区间内预测功率的平均值。

D.4 准确率

准确率计算公式如下:

$$C = (1 - E_{\text{mse}}) \times 100\% \dots\dots\dots (D.4)$$

D.5 合格率

合格率主要体现叶片覆冰工况下风电功率预测值与实际功率的大预测误差情况。

$$Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1 \left(\left| \frac{P_{M,i} - P_{P,i}}{C_i} \right| < T \right) \times 100\% \dots\dots\dots (D.5)$$

式中：

T ----合格与否判定阈值。

D.6 覆冰事件命中率

覆冰事件命中率主要体现对实际发生覆冰事件的正确检测能力。

$$E_{\text{recall}} = \frac{TP}{TP + FN} \dots\dots\dots (D.6)$$

式中：

E_{recall} ----该覆冰事件的命中率；

TP ----该覆冰事件的预测命中时段数；

FN ----该覆冰事件的预测漏报时段数。

D.7 覆冰事件漏报率

覆冰事件漏报率主要体现对实际发生覆冰事件的未检测比例。

$$E_{\text{miss}} = \frac{FN}{FN + TP} \dots\dots\dots (D.7)$$

式中：

E_{miss} ----该覆冰事件的漏报率；

TP ----该覆冰事件的预测命中时段数；

FN ----该覆冰事件的预测漏报时段数。

D.8 关键时间节点预测偏差

关键时间节点预测偏差主要体现叶片覆冰工况下风电功率预测事件关键时间节点与实际情况的时间差大小。

$$\Delta T_{\text{start}} = |T_{\text{forecast-start}} - T_{\text{actual-start}}| \dots\dots\dots (D.8)$$

$$\Delta T_{\text{recover}} = |T_{\text{forecast-recover}} - T_{\text{actual-recover}}| \dots\dots\dots (D.9)$$

式中：

ΔT_{start} ----功率开始下降时刻的预测偏差；

$T_{\text{forecast-start}}$ ----预测的功率开始下降时刻；

$T_{\text{actual-start}}$ ----实际的功率开始下降时刻；

$\Delta T_{\text{recover}}$ ----功率恢复至正常水平时刻的预测偏差；

$T_{\text{forecast-recover}}$ ----预测的功率恢复时刻；

$T_{\text{actual-recover}}$ ----实际的功率恢复时刻。

T/CES XXX—XXXX