

团 体 标 准

T/JSEE 00XX-20XX

智能配电网电能质量指标测量与时序预 测技术规范

Specification for Power Quality Indicator Measurement and Time-Series
Prediction in Intelligent Distribution Networks

（征求意见稿）

20xx-xx-xx 发布

20xx-xx-xx 实施

江苏省电机工程学会 发布

目 次

前 言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 缩略语 4

5 电能质量指标测量与数据质量要求 4

 5.1 测量对象与数据来源 4

 5.2 测量与采样要求 4

 5.3 预测数据集构建要求 5

 5.4 数据质量要求 6

6 电能质量时序预测特征构建与数据融合 6

 6.1 数据预处理与时序对齐 6

 6.2 电能质量时序特征构建 8

 6.3 多源数据特征构建与融合 9

 6.4 特征选择与处理 11

7 电能质量指标时序预测 11

 7.1 预测任务与时间尺度 11

 7.2 预测模型与建模要求 12

 7.3 预测过程与结果生成 13

8 电能质量指标时序预测精度评价 14

 8.1 预测精度评价指标 14

 8.2 预测精度考核要求 15

9 电能质量状态评估与风险预警 15

 9.1 电能质量状态评估 15

 9.2 电能质量风险预警 16

附录 A （资料性） 电能质量指标及预测特征对照 18

附录 B （规范性） 不同预测时间尺度的典型配置 19

附录 C （资料性） 电能质量状态评估与风险预警应用示例 20

参考文献 21

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。

本文件由江苏省电机工程学会提出并归口。

本文件起草单位：南京邮电大学、国网江苏省电力有限公司电力科学研究院、东南大学。

本文件主要起草人：陶锴、徐俊俊、周建华、蒋玮、嵇建飞。

智能配电网电能质量指标测量与时序预测技术规范

1 范围

本文件规定了智能配电网电能质量指标的分类与选取、电能质量数据采集与质量要求、预测特征构建与数据融合、不同时间尺度下的电能质量时序预测、预测精度评价以及预测结果综合评估与风险预警等技术要求。

本文件适用于35kV及以下、含高比例分布式电源、电动汽车充换电设施、储能系统及电力电子设备等新型电力主体接入的智能配电网，用于电能质量在线监测、数据分析、时序预测、综合评估及相关系统的设计、建设、验收和运行维护。

本文件适用于配电网节点、台区、供电分区及网格等不同层级的电能质量数据分析与预测。涉及电压偏差、频率偏差、电压波动与闪变、三相电压不平衡、电压暂升暂降及短时中断等基础电能质量指标的测量，应符合相关现行国家标准和行业标准的规定。

本文件重点针对高比例分布式电源、电力电子设备及柔性负荷接入条件下配电网电能质量呈现的波动性、随机性、时变性以及源荷互动特征，规定潮流反向、电压骤变、源荷耦合、电能质量承载能力及风险预警等特征的分析与预测要求。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 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 30137 电能质量 电压暂升、电压暂降与短时中断
- GB/T 42154 配电网电能质量监测技术导则
- GB/T 39853.1 供电系统中的电能质量测量 第1部分：电能质量监测设备（PQI）
- GB/T 39853.2 供电系统中的电能质量测量 第2部分：功能试验和不确定度要求

3 术语和定义

3.1

智能配电网 intelligent distribution network

利用先进的信息通信、传感测量、自动控制和数据分析等技术，实现配电网运行状态感知、信息交互、智能分析与协同控制的配电网。

注：本文件所称智能配电网主要包括含高比例分布式电源、电动汽车充换电设施、储能系统及电力电子设备等新型电力主体的配电网。

3.2

电能质量时间序列 power quality time series

按照规定的时间间隔，对配电网节点或区域电能质量指标连续测量并按时间顺序形成的数据序列。

注：电能质量时间序列可包括电压偏差、频率偏差、电压波动与闪变、三相电压不平衡以及本文件规定的智能配电网特征电能质量指标等。

3.3

智能配电网特征电能质量指标 characteristic power quality indicator for intelligent distribution network

用于表征高比例分布式电源、电动汽车、储能系统及电力电子设备接入条件下，配电网电能质量所呈现的运行特征、动态变化特征、源荷耦合特征及风险特征的指标。

注：智能配电网特征电能质量指标包括潮流反向持续率、电压骤变率、逆变器功率-谐波耦合系数、动态三相不平衡度演化率、电能质量承载力裕度及动态电压暂降预警概率。

3.4

电能质量时序预测 power quality time-series prediction

基于历史电能质量时间序列及分布式电源、负荷、气象和配电网运行状态等相关数据，建立时序预测模型，对未来规定时间范围内电能质量指标及其变化趋势进行预测的过程。

3.5

预测时间尺度 prediction time scale

从预测起始时刻至预测目标时刻所覆盖的时间范围，用于划分电能质量时序预测的不同预测类型。

3.6

超短期预测 ultra-short-term prediction

预测未来15min至1h时间范围内电能质量指标变化情况的时序预测。

3.7

短期预测 short-term prediction

预测未来1h至24h时间范围内电能质量指标变化情况的时序预测。

3.8

中长期预测 medium-and long-term prediction

预测未来1d至1年时间范围内电能质量指标变化情况的时序预测。

3.9

潮流反向持续率 reverse power flow duration ratio

在规定统计周期内，配电网节点或台区有功功率反向流动的累计持续时间与统计周期总时间的比值。以 R_{RPF} 表示，计算公式为：

$$R_{\text{RPF}} = \frac{\sum_{k=1}^N \Delta t_{k,\text{reverse}}}{T_{\text{total}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

$\Delta t_{k,\text{reverse}}$ ——第 k 段发生有功功率反向的时间间隔，分钟；

T_{total} ——评估总时间，分钟；

N ——评估周期内发生潮流反向的次数。

3.10

电压骤变率 voltage ramp rate

规定时间间隔内配电网节点电压有效值变化量的绝对值与该时间间隔的比值，用于表征分布式电源、柔性负荷及电力电子设备运行变化引起的电压快速变化程度。以 ν_{ramp} 表示，计算公式为：

$$\nu_{\text{ramp}} = \frac{|U(t_2) - U(t_1)|}{\Delta t} \quad (2)$$

式中：

$U(t_1), U(t_2)$ ——分别为 t_1 和 t_2 时刻的电压有效值，伏特；

Δt ——时间间隔（ $\Delta t = t_2 - t_1$ ），秒。

3.11

逆变器功率-谐波耦合系数 inverter power-harmonic coupling factor

在规定统计时间窗口内，用于表征分布式电源逆变器有功功率变化与并网点电流谐波畸变变化之间相关关系的指标。以 C_{PH} 表示，计算公式为：

$$C_{PH} = \frac{\sum_{i=1}^m (P_i - \bar{P})(THDI_i - \overline{THDI})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^m (THDI_i - \overline{THDI})^2}} \quad (3)$$

式中：

C_{PH} ——逆变器功率-谐波耦合系数，取值范围为 $[-1,1]$ ；

P_i —— i 时刻逆变器输出有功功率，千瓦；

$\bar{P}$ ——统计时间窗口内逆变器输出有功功率的平均值，千瓦；

$THDI_i$ —— i 时刻并网点电流总谐波畸变率；

$\overline{THDI}$ ——统计时间窗口内并网点电流总谐波畸变率的平均值；

m ——统计时间窗口内的有效采样点总数。

注： C_{PH} 用于评估功率变化对谐波畸变的线性影响程度。当逆变器在轻载与重载工况下呈现明显非线性谐波特性时，宜按不同功率区间分段计算。

3.12

动态三相不平衡度演化率 dynamic three-phase unbalance evolution rate

在规定时间窗口内，三相电压不平衡度或三相电流不平衡度的最大值与最小值之差与规定时间跨度的比值，用于表征单相分布式电源、单相负荷及其他不对称运行因素引起的三相不平衡动态变化程度。以 k_{PVU} 表示，单位为百分点每小时，计算公式为：

$$k_{PVU} = \frac{\max[\varepsilon_u(t)] - \min[\varepsilon_u(t)]}{\Delta T} \quad (4)$$

式中：

$\varepsilon_u(t)$ —— t 时刻的三相电压不平衡度；

ΔT ——预测时间跨度，小时。

3.13

电能质量承载力裕度 power quality hosting capacity margin

在满足规定电能质量约束条件下，配电网节点、台区或区域在规定运行条件和预测时间范围内可进一步接入分布式电源、储能或负荷的最大功率余量。

3.14

动态电压暂降预警概率 dynamic voltage sag warning probability

基于历史电能质量数据、配电网运行状态及相关外部影响因素，对规定未来时间范围内发生满足规定阈值条件的电压暂降事件的概率进行预测所得的指标。

3.15

电能质量综合健康度指数 power quality health index, PQHI

综合多个电能质量指标及其预测结果，对配电网节点、台区或区域未来规定时间范围内的电能质量状态进行量化评价的综合指标。以 $PQHI(t)$ 表示，取值范围为 $[0,100]$ ，计算公式为：

$$PQHI(t) = \max \left(0, 100 - \sum_{j=1}^K w_j(t) \cdot f_j(I_j(t)) \right) \quad (5)$$

式中：

$PQHI(t)$ —— t 时刻的电能质量综合健康度指数；

$I_j(t)$ ——第 j 项电能质量指标在 t 时刻的预测值；

$f_j(I_j(t))$ ——第 j 项电能质量指标的惩罚扣分函数，取值范围为 $[0,100]$ ，指标处于合格范围内时为0，偏离或超标程度越大取值越高；

$w_j(t)$ ——第 j 项指标在 t 时刻的动态权重系数，满足 $w_j(t) \geq 0$ 且 $\sum_{j=1}^K w_j(t) = 1$ ；

K ——参与综合评价的电能质量指标总数。

注：PQHI 指数越接近100，表示预测时段内电能质量综合状态越优良；指数越低，表示电能质量劣化越严重或越限风险越高。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

SCADA：数据采集与监视控制系统(Supervisory Control and Data Acquisition)

PQHI：电能质量综合健康度指数(Power Quality Health Index)

MAE：平均绝对误差(Mean Absolute Error)

RMSE：均方根误差(Root Mean Square Error)

MAPE：平均绝对百分比误差(Mean Absolute Percentage Error)

5 电能质量指标测量与数据质量要求

5.1 测量对象与数据来源

5.1.1 测量对象

质量测量对象应包括本文件规定的基础电能质量指标，以及用于智能配电网特征电能质量指标计算和时序预测的相关测量数据。

电能质量指标测量点应根据配电网运行方式、电能质量问题分布以及分布式电源、电动汽车、储能和电力电子设备的接入情况进行配置，宜覆盖典型电能质量敏感节点、分布式电源接入节点、重要负荷节点及配电变压器相关节点。测量点配置和电能质量监测要求应参考 GB/T 42154 的相关规定。

5.1.2 数据来源

电能质量测量数据宜来源于电能质量在线监测装置、智能配电终端、分布式电源并网设备及其他具备电能质量测量功能的设备。

用于时序预测的协同数据宜来源于配电自动化系统、SCADA 系统、分布式新能源运行系统、储能系统、电动汽车充电管理系统以及气象数据系统等。

不同来源的数据应具有明确的数据类型、测量位置、时间戳及数据质量标识。

5.1.3 测量数据

电能质量测量数据应满足本文件规定的电能质量指标计算和时序预测要求。用于基础电能质量指标计算的数据，应按照相应指标的测量方法进行采集和记录，其中电压偏差、频率偏差、电压波动与闪变、三相电压不平衡以及电压暂升、电压暂降和短时中断等指标的测量，应分别符合 GB/T 12325、GB/T 15945、GB/T 12326、GB/T 15543 和 GB/T 30137 的要求。

用于智能配电网特征电能质量指标计算和时序预测的数据，应根据相应指标的计算和预测要求进行采集和关联，并应包括电能质量测量数据以及相关的配电网运行、分布式电源、储能、电动汽车和气象等数据。用于事件型电能质量指标分析的数据，应保留事件发生时间及事件过程相关数据。测量数据应记录测量时间、测量位置、数据类型及数据质量状态等信息。

5.2 测量与采样要求

5.2.1 采样率要求

电能质量测量装置的采样率应满足相应电能质量指标测量及事件识别的要求。电能质量测量装置的配置、功能要求和测量性能应符合 GB/T 39853.1 和 GB/T 39853.2 的规定。用于基础电能质量指标测量的原始电压、电流信号采样率不应低于 10.24 kHz；用于电压骤变及相关快速变化过程分析的原始电压、电流信号采样率不应低于 10.24 kHz。

当同一测量装置同时承担不同电能质量指标的测量任务时，其采样率应满足所测指标中最高采样要求。

5.2.2 数据采集间隔要求

电能质量指标数据的采集间隔应根据指标特性和时序预测需求确定。用于时序预测的电能质量指标数据宜形成连续、等时间间隔的数据序列。不同电能质量指标的数据采集间隔宜根据其变化特性确定，可采用 1 min、5 min、15 min 或 1 h 等时间间隔。

同一预测任务涉及多个电能质量指标时，应根据预测模型要求将不同时间尺度的数据转换为统一的数据采集间隔。对于电压暂降频次等事件型指标，应保留事件发生时间、持续时间及相应统计周期内的事件统计结果。

对于中长期预测，可根据预测目标和电能质量指标特性对指标时间序列进行日尺度统计归集，统计量可采用日最大值、日最小值、日均值和 95%分位值等。

5.2.3 时间同步要求

电能质量测量数据和多源协同数据应采用统一时间基准。不同测量装置、数据采集终端及数据平台之间应建立时间同步机制，并应保证不同来源数据的时间戳具有一致性。用于稳态指标时序预测的多源协同数据同步误差不应大于 1 s；用于暂态事件分析与波形比对的数据，时间同步误差宜小于 1 ms。发生时间同步异常时，应对受影响数据进行标识，并在数据处理前进行校正或删除。

5.3 预测数据集构建要求

5.3.1 历史数据长度

用于电能质量指标时序预测的电能质量时间序列历史数据应覆盖预测目标所涉及的主要周期性变化和典型运行场景。不同预测时间尺度对应的历史数据长度宜满足表 1 的要求。

表 1 同预测时间尺度对应的历史数据

预测时间尺度	历史数据长度
超短期预测	不少于 30 d
短期预测	不少于 90 d
中长期预测	不少于 365 d

当实际历史数据长度不能满足表 1 要求时，应说明数据缺失情况及其对预测结果的影响。

5.3.2 数据场景覆盖

预测数据集应覆盖预测目标相关的典型运行场景，并应具有代表性和多样性。

a) 季节覆盖。预测数据集宜覆盖不同季节的运行数据。对于含小水电的配电网区域，宜覆盖丰水期和枯水期；对于高比例光伏接入的配电网区域，宜覆盖高辐照和低辐照等典型季节或天气条件。

b) 天气条件覆盖。预测数据集宜包含不同天气条件下的电能质量测量数据。对于台风、暴雨、大范围云遮蔽、极寒、极热等可能对配电网运行或分布式电源出力产生显著影响的典型极端天气，应尽可能保留相应时段的连续测量数据。

c) 运行模式覆盖。预测数据集应覆盖工作日、节假日以及配电网典型运行方式切换等运行场景。针对分布式电源、储能和电动汽车等设备的典型运行状态，宜保留相应的连续测量数据。

d) 电能质量事件覆盖。对于潮流反向、电压骤变和电压暂降等电能质量事件，应尽可能保留事件发生前、发生过程中及事件恢复后的连续数据。对于电压暂降、短时中断等扰动事件的识别和数据记录，宜参考 IEC 61000-4-11 的相关要求。

极端天气或典型运行场景实际样本数量较少时，不应强制按照固定比例增加该类样本。确需采用其他数据进行补充时，应对补充数据进行标识，并说明数据来源及处理方法。对于中长期预测，可根据预

测目标和指标特性对数据进行日尺度统计归集，统计量可采用日最大值、日最小值、日均值和 95%分位值等。

5.3.3 数据集划分

用于建立电能质量时序预测模型的数据集应划分为训练集、验证集和测试集。训练集用于预测模型训练，验证集用于模型参数和预测方案选择，测试集用于预测模型性能评价。训练集、验证集和测试集应按照时间顺序进行划分，不应采用可能造成未来信息泄漏的数据划分方式。测试集数据不应参与预测模型训练及模型参数调整。

5.4 数据质量要求

5.4.1 数据完整性

电能质量测量数据和多源协同数据应保持连续和完整。数据采集系统应对数据缺失、通信中断及测量设备异常等情况进行记录和标识。用于时序预测的数据完整率应不低于 95%。

对于关键电能质量指标，对于超短期预测任务，连续缺失时间不宜超过 5min；对于短期预测任务，连续缺失时间不宜超过 15min；对于中长期预测任务，连续缺失时间不宜超过 3h。

5.4.2 数据有效性

电能质量测量数据应处于测量装置规定的有效测量范围内。存在测量装置故障、通信异常、数据格式错误或明显超出合理物理范围等情况的数据，应进行有效性判定和标识。经判定为无效的数据不应直接用于预测模型训练和预测精度评价。对于由真实电能质量事件引起的异常数据，不应按照一般异常值直接剔除，应根据事件性质予以保留和标识。

5.4.3 数据一致性

电能质量测量数据和多源协同数据应在时间、空间、单位和数据类型等方面保持一致。不同来源的同类数据应统一数据单位和数据格式。对于同一测量节点或同一统计区域的数据，应保证测量位置、数据时间和统计周期相互对应。

电能质量测量数据与分布式新能源、储能、电动汽车及气象等多源协同数据进行融合时，应进行时间一致性和空间一致性检查。多源协同数据进行融合时，应保证电能质量测量数据与配电网运行、分布式电源、储能、电动汽车等数据在时间和空间上的对应关系。

5.4.4 缺失数据处理

缺失数据应根据缺失时间长度、数据类型及数据应用场景进行处理。对于短时间连续缺失的数据，可采用线性插值、样条插值或其他经验证的方法进行补全。对于连续缺失时间较长、无法可靠恢复的数据，应进行缺失标识，不宜直接进行插值补全。经补全的数据应保留数据补全标识，并在预测模型训练和预测结果评价过程中进行区分。

5.4.5 异常数据处理

异常数据应通过数据范围检查、时间连续性检查及多源数据一致性检查等方法进行识别。对于由电磁扰动引起的数据异常，应结合设备抗扰性能进行分析，相关要求宜参考 IEC 61000-4-4。对于经确认的测量错误、通信错误或数据传输错误，应进行剔除或修正。

对于由电能质量扰动、分布式电源出力变化、储能充放电或电动汽车集中充电等实际运行过程产生的数据异常，应予以保留，并进行相应事件或运行状态标识。异常数据经处理后，应保证数据时间序列的连续性和可追溯性。

6 电能质量时序预测特征构建与数据融合

6.1 数据预处理与时序对齐

6.1.1 数据清洗与质量处理

由真实指标时序预测的数据在构建预测数据集前，应进行数据清洗和质量检查。数据清洗应根据第5章规定的完整性、有效性和一致性要求，对缺失数据、重复数据、格式错误数据、通信异常数据及经确认的测量异常数据进行处理。

数据清洗过程中，不应将电能质量扰动、分布式电源出力变化、储能充放电、电动汽车集中充电或配电网运行方式变化引起的异常数据直接判定为无效数据。此类数据应予以保留，并进行相应的数据质量或运行事件标识。数据质量状态宜按照表2进行标识。

表2 数据质量状态及处理方式

数据状态	判定条件	处理方式
正常数据	满足测量范围及数据质量要求	保留
缺失数据	在规定时间内无有效测量值	按 6.1.2 进行处理
测量异常	超出设备有效测量范围或经确认存在测量故障	修正或删除
通信异常	存在通信中断、数据传输错误等情况	标识并根据数据连续性进行处理
真实运行异常	由电能质量扰动或实际运行状态变化引起	保留并进行事件标识
补全数据	采用数据处理方法恢复的数据	保留补全标识

经缺失补全、异常修正或其他数据处理后的数据，应保留数据处理标识，并保证处理过程可追溯。

6.1.2 数据标准化与归一化

不同类型、不同来源的预测输入数据在进入预测模型前，应根据预测模型要求进行标准化或归一化处理。采用 Z-score 方法进行标准化时，计算公式为：

$$x' = \frac{x - \mu}{\sigma} \tag{6}$$

式中：
 x' ——标准化后的特征值；
 x ——原始特征值；
 μ ——训练集对应特征的均值；
 σ ——训练集对应特征的标准差。

采用 Min-Max 方法进行归一化时，计算公式为：

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{7}$$

式中：
 $x_{\min}$ ——训练集对应特征的最小值；
 $x_{\max}$ ——训练集对应特征的最大值。

数据标准化或归一化所使用的统计参数应仅根据训练集确定，并应用于验证集和测试集，不应利用验证集或测试集数据重新确定处理参数。

6.1.3 多源数据时间对齐

用于电能质量指标时序预测的电能质量时间序列数据与多源协同数据应采用统一时间基准进行时间对齐。不同来源的数据应根据预测任务的时间尺度转换为统一时间间隔。典型数据类型及时间对齐方式宜符合表3的要求。对于连续数值型数据，可采用平均值、最大值、最小值或其他适用方法进行时间尺度转换；对于运行状态和事件型数据，应按照状态持续时间或事件发生时间进行时间映射。

表3 多源数据时间对齐要求

数据类型	典型数据形式	时间对齐方式
电能质量测量数据	指标时间序列、事件数据	作为预测基准时间序列

分布式电源数据	出力、运行状态	按预测时间间隔重采样或统计
储能数据	充放电功率、运行状态	按预测时间间隔重采样或统计
电动汽车数据	充电功率、充电负荷	按预测时间间隔聚合
负荷数据	负荷功率、负荷变化	按预测时间间隔重采样或统计
气象数据	辐照度、温度、天气状态等	插值、重采样或时间映射
配电网运行数据	运行方式、设备状态等	按时间戳映射至预测时间序列

6.1.4 数据序列构建

经数据清洗、质量处理和时间对齐后的数据，应按照预测目标构建连续、等时间间隔的预测数据序列。预测数据序列宜采用滑动时间窗口构建。设预测目标时间序列为 y_t ，输入特征向量为 F_t ，历史窗口长度为 L ，预测步长为 H ，则预测样本的计算公式为：

$$F_{(t-L+1:t)} = [F_{(t-L+1)}, F_{(t-L+2)}, \dots, F_t] \quad (8)$$

对应预测目标的计算公式为：

$$Y_{(t+1:t+H)} = [y_{t+1}, y_{t+2}, \dots, y_{t+H}] \quad (9)$$

式中：

L ——历史输入时间窗口长度；

H ——预测步长；

t ——当前预测时刻。

构建预测样本时，不应使用预测时刻之后的数据作为输入特征。

6.2 电能质量时序特征构建

6.2.1 历史时序特征

电能质量指标时序预测应利用预测目标及相关电能质量指标的历史变化信息构建历史时序特征。历史时序特征可包括历史值、滞后值、滑动统计值 and 变化特征等。对于时间序列 x_t ，滞后特征的计算公式为：

$$X_t^k = X_{t-k} \quad (10)$$

在长度为 w 的滑动窗口内，滑动均值的计算公式为：

$$X_t^w = \left(\frac{1}{w} \right) \sum_{i=0}^{w-1} X_{t-i} \quad (11)$$

滑动最大值和最小值的计算公式分别为：

$$X_{t,max}^w = \max(X_t, X_{t-1}, \dots, X_{t-w+1}) \quad (12)$$

$$X_{t,min}^w = \min(X_t, X_{t-1}, \dots, X_{t-w+1}) \quad (13)$$

相邻时刻变化量的计算公式为：

$$\Delta X_t = X_t - X_{t-1} \quad (14)$$

相对变化率的计算公式为：

$$R_t = \frac{X_t - X_{t-1}}{\min(|X_{t-1}|, \varepsilon)} \quad (15)$$

式中：

X_t^k ——时刻 t 的 k 阶滞后特征；

X_{t-k} ——时刻 $t-k$ 的指标值；

k ——滞后步数；

w ——滑动窗口长度；

ΔX_t ——相邻时刻变化量；

— 16 —

R_t ——相邻时刻相对变化率；

ε ——防止分母为零的正数，其取值应根据数据量纲和计算精度确定。

历史时序特征的窗口长度和滞后阶数应根据预测时间尺度、指标变化特性和实际数据采集间隔确定。

6.2.2 周期与趋势特征

对于存在明显周期性变化的电能质量指标，应构建周期特征。周期特征可采用正弦、余弦时间编码方式表示。对于周期长度为 P 的周期特征，其编码的计算公式为：

$$C_t^P = \sin\left(\frac{2\pi t}{P}\right) \quad (16)$$

$$S_t^P = \cos\left(\frac{2\pi t}{P}\right) \quad (17)$$

式中：

P ——周期长度；

C_t^P 、 S_t^P ——对应周期的时间编码特征。

周期特征的周期长度应根据预测对象的历史数据特征和预测时间尺度确定，可考虑日周期、周周期和季节性周期。对于时间序列 X_t ，可采用滑动线性趋势斜率表征一定时间窗口内的变化趋势，计算公式为：

$$K_t = \frac{\sum_{i=1}^w (i - \bar{i})(X_{t-w+i} - \bar{X})}{\sum_{i=1}^w (i - \bar{i})^2} \quad (18)$$

式中：

K_t ——时间窗口内的趋势斜率；

w ——趋势计算窗口长度；

$\bar{i}$ ——时间序列索引的均值；

$\bar{X}$ ——窗口内指标值的均值。

6.2.3 事件与波动特征

对于具有明显事件特征的电能质量指标，应结合事件发生情况构建预测特征。不同电能质量指标的典型时序特征可按附录 A 进行构建。

对于潮流反向、电压骤变和电压暂降等事件，应根据第 5 章规定保留事件发生前、发生过程中及事件恢复后的连续数据。事件特征可采用事件发生频次、持续时间、事件间隔以及事件前后指标变化量进行构建。在一定统计窗口 w 内，事件发生频次的计算公式为：

$$N_t^w = \sum_{i=t-w+1}^t I_i \quad (19)$$

式中：

N_t^w ——截至时刻 t 的窗口内事件发生频次；

I_i ——时刻 i 是否发生目标事件，发生时取 1，否则取 0。

6.3 多源数据特征构建与融合

6.3.1 分布式电源、储能及电动汽车特征

针对分布式电源、储能和电动汽车等设备运行对配电网电能质量产生影响的场景，宜将相关运行数据构建为预测输入特征。多源运行特征可按表 5 进行选取。

表 5 分布式电源、储能及电动汽车预测特征

数据类别	典型特征	特征形式
分布式电源	有功功率、出力变化	当前值、历史值、变化量、变化率
分布式电源	出力预测数据	当前预测值、预测变化量
储能	充放电功率	当前值、历史值、变化量
储能	运行状态	状态编码、状态变化
电动汽车	充电功率	当前值、历史值、变化量
电动汽车	充电负荷	聚合值、变化率
电动汽车	集中充电状态	状态编码、持续时间

6.3.2 气象与负荷特征

气象和负荷数据宜根据预测目标、电网区域特性及数据可获得性进行选择。

表 6 气象与负荷预测特征

数据类别	典型特征	主要用途
气象	辐照度	表征光伏出力变化
气象	温度	表征新能源出力及负荷变化
气象	天气状态	表征典型天气场景
气象	气象预测数据	表征预测时段天气变化
负荷	负荷功率	表征负荷水平
负荷	负荷变化量	表征负荷变化
负荷	典型负荷运行状态	表征典型运行场景

对于高比例分布式光伏接入区域，宜重点考虑辐照度、温度及其预测数据。对于台风、暴雨、极端高温、极端低温及大范围云遮蔽等典型天气场景，宜根据数据可获得性保留相应气象特征及场景标识。

6.3.3 配电网运行状态特征

宜根据预测目标选取能够反映配电网运行状态变化的数据作为预测输入特征。配电网运行状态特征可包括运行方式、潮流变化、设备运行状态及其他能够反映配电网运行状态的数据。对于配电网运行方式切换、分布式电源出力显著变化、储能充放电及电动汽车集中充电等典型运行场景，宜保留相应的运行状态特征。运行状态特征可采用数值型特征、状态编码或事件标识等方式表示。

6.3.4 多源特征融合

电能质量时序预测输入特征应根据预测目标由电能质量历史时序特征、周期与趋势特征、事件与波动特征以及分布式电源、储能、电动汽车、气象、负荷和配电网运行状态等特征组成。在时刻 t ，多源预测特征向量的计算公式为：

$$F_t = [F_t^{PQ}, F_t^{time}, F_t^{event}, F_t^{DG}, F_t^{ES}, F_t^{EV}, F_t^{wheater}, F_t^{load}, F_t^{grid}] \quad (20)$$

式中：

F_t^{PQ} ——电能质量指标历史时序特征；

F_t^{time} ——周期与趋势特征；

F_t^{event} ——事件与波动特征；

F_t^{DG} ——分布式电源特征；

F_t^{ES} ——储能特征；

F_t^{EV} ——电动汽车特征；

$F_t^{wheater}$ ——气象特征；

F_t^{load} ——负荷特征；

F_t^{grid} ——配电网运行状态特征。

多源特征融合应保证不同特征在时间、空间和数据尺度上的一致性。对于存在明显时间滞后的多源数

据，应结合实际数据传输及物理响应特性确定时间映射关系。

6.4 特征选择与处理

6.4.1 特征相关性分析

预测模型建立前，宜对候选特征与预测目标之间的相关性进行分析。对于两个变量，可采用皮尔逊相关系数评价其线性相关程度，皮尔逊相关系数 r 的计算公式为：

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \tag{21}$$

式中：
 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ ——特征向量 $\mathbf{x}$ 和 $\mathbf{y}$ 的均值。

6.4.2 特征筛选

特征筛选应综合考虑候选特征与预测目标的相关性、特征稳定性、数据质量和实际物理意义。特征筛选宜符合表 7 的要求。

表 7 特征筛选原则

特征类型	筛选原则
电能质量历史特征	优先保留具有稳定时序相关性的特征
周期与趋势特征	保留与预测时间尺度相匹配的特征
事件特征	保留能够反映电能质量事件变化规律的特征
分布式电源、储能及电动汽车特征	优先保留具有明确运行意义且数据质量可靠的特征
气象与负荷特征	优先保留与预测目标具有明显关联的特征
配电网运行状态特征	优先保留能够反映运行方式变化的特征
高相关或冗余特征	根据预测效果进行筛减
缺失严重特征	根据数据质量要求进行处理或剔除

特征筛选过程应仅使用训练集数据确定筛选结果，不应利用测试集数据确定特征筛选规则或参数。

6.4.3 特征降维与标准化

当预测输入特征数量较多或不同特征之间存在较强相关性时，可根据预测模型要求采用适当方法进行特征降维。特征降维可采用主成分分析等方法，应根据累计解释方差或预测模型性能确定保留的特征维数。

特征降维后的特征应保持对预测目标具有足够的解释能力，不应因过度降维造成有效预测信息明显损失。不同量纲和数量级的特征在输入预测模型前，应按照 6.1.2 进行标准化或归一化处理。经特征选择、特征降维及标准化处理后，应形成最终预测输入特征集。最终预测输入特征集应记录特征名称、数据来源、处理方法、处理参数及对应预测目标，并应保证特征处理过程可追溯。

7 电能质量指标时序预测

电能质量指标时序预测应以第 5 章形成的合格测量数据和第 6 章形成的最终预测输入特征集为基础，根据预测任务和预测时间尺度选择适宜的预测模型，形成目标电能质量指标的预测结果。预测过程中应保证输入数据、预测时间和预测结果的一致性，并避免使用预测时刻之后的实际数据。

7.1 预测任务与时间尺度

7.1.1 预测任务

电能质量指标时序预测对象应为本文件规定的电能质量指标，包括基础电能质量指标和智能配电网

特征电能质量指标。预测任务应根据预测对象的数据特性、历史数据可获得性和应用需求确定。

预测可采用单指标预测或多指标联合预测方式。单指标预测以单一电能质量指标为预测目标；多指标联合预测可同时预测多个具有相关性或关联运行特征的电能质量指标。

预测目标可为未来一个或多个时刻的电能质量指标值，也可根据应用需求对预测时间范围内指标的变化趋势进行分析。对于具有明显动态变化或事件特征的指标，宜结合历史变化特征和相关运行状态开展预测。预测任务确定时，应明确预测对象、测量点或统计区域、预测时间尺度、预测时间间隔、历史输入窗口长度和预测步长等基本参数。

7.1.2 预测时间尺度

电能质量指标时序预测宜按照预测时间跨度划分为超短期预测、短期预测和中长期预测。各类预测时间尺度的具体范围宜结合配电网运行需求和预测数据时间分辨率确定，并应在预测任务中明确，如表 8 所示。不同预测时间尺度所采用的数据采集间隔、历史输入窗口长度和预测步长应与预测目标相匹配。

表 8 不同预测时间尺度的主要要求

预测时间尺度	预测时间范围	主要预测特征	预测要求	典型应用
超短期预测	分钟级~小时级	电能质量指标近期历史特征、变化特征、事件与波动特征、配电网运行状态特征	采用较高时间分辨率数据，重点反映指标短时动态变化	电能质量状态预测、快速预警
短期预测	小时级~日级	历史时序特征、周期与趋势特征，以及分布式电源、储能、电动汽车、气象、负荷和运行状态特征	综合考虑日周期、周周期及典型运行场景	日内预测、日前运行分析
中长期预测	日级及以上	长期历史特征、周期与趋势特征，以及气象、负荷和配电网运行状态特征	重点反映电能质量指标长期变化趋势及季节性变化	趋势分析、运行规划

7.2 预测模型与建模要求

7.2.1 预测模型选择

预测模型应能够利用历史电能质量指标及第 6 章形成的预测输入特征，建立输入特征与预测目标之间的时序关系，并输出规定预测时间范围内的目标指标预测结果。预测模型可采用统计预测模型、机器学习模型或深度学习时序模型。模型类型不作限定，可根据预测任务、数据规模、指标变化特性、预测时间尺度和计算资源等因素选择。

采用不同预测模型开展同一预测任务时，应采用一致的预测数据集、预测时间范围和评价方法，以保证预测结果具有可比性。预测模型所采用的主要输入特征、模型类型、主要参数及模型版本宜进行记录。

7.2.2 模型输入与输出

预测模型输入应根据预测目标从第 6 章形成的最终预测输入特征集中选取。输入特征可包括电能质量历史时序特征、周期与趋势特征、事件与波动特征，以及分布式电源、储能、电动汽车、气象、负荷和配电网运行状态特征。预测模型输入应按照第 6 章规定完成时间对齐、特征处理和标准化或归一化。不同来源特征应具有一致的预测时刻和预测时间间隔，预测模型输入与输出要如表 9 所示。

表 9 预测模型输入与输出要求

项目	要求
输入数据	第 6 章形成的最终预测输入特征集
输入时间窗口	根据预测任务和指标变化特性确定
输入时间间隔	与预测数据集时间分辨率一致
预测对象	本文件规定的电能质量指标
预测步长	根据预测时间尺度和预测任务确定
输出结果	未来一个或多个时刻的目标电能质量指标预测值

多指标预测

应明确各预测结果对应的指标和测量点或统计区域

设历史输入窗口长度为 L ，预测步长为 H ，时刻 t 的预测输入特征序列为 F ，目标电能质量指标的预测结果的计算公式为：

$$\hat{Y}(t+1:t+H) = f_{\theta}(F(t-L+1:t)) \quad (22)$$

式中：

$\hat{Y}(t+1:t+H)$ ——未来 H 个时刻的目标电能质量指标预测值；

f_{θ} ——参数为 θ 的预测模型； $F(t-L+1:t)$ ——由时刻 $t-L+1$ 至 t 构成的历史输入特征序列；

L ——历史输入窗口长度；

H ——预测步长。预测输出应与预测目标一一对应。

对于多指标联合预测，应明确各输出量对应的电能质量指标和测量点或统计区域。

7.2.3 单步与多步预测

预测模型可采用单步预测或多步预测方式。单步预测每次输出一个预测时刻的目标指标值；多步预测一次输出连续多个未来时刻的目标指标值。

采用单步滚动方式开展多步预测时，后续预测步可根据模型设计使用前序预测结果，但不应使用预测时刻之后的实际数据。采用直接多步预测方式时，模型应根据同一历史输入窗口直接输出规定预测步长内的多个预测结果。预测步长应与预测任务确定的预测时间范围和数据采集间隔相匹配。

对于预测时间跨度较长的任务，宜根据预测误差随预测步长的变化情况选择适宜的多步预测方法，并在模型评价时分别统计不同预测步长下的预测性能。

7.2.4 模型训练与更新

预测模型训练、参数调整 and 性能评价应按照第 5 章规定的数据集划分执行。训练集用于模型训练，验证集用于模型参数或预测方案选择，测试集用于模型最终性能评价。测试集数据不应参与模型训练和参数调整。

模型训练过程中应避免未来信息泄漏。用于模型训练的特征处理参数、特征筛选规则和模型参数不应利用测试集数据确定。当配电网运行方式、分布式电源接入规模、储能运行状态、负荷特性或其他主要运行条件发生明显变化，并导致预测误差持续增大时，宜对预测模型进行重新训练或更新。

模型更新可采用定期更新或事件触发更新方式。采用模型更新机制时，应记录模型更新时间、使用的的数据范围、主要参数变化及模型版本。更新后的模型宜重新进行性能评价。

7.3 预测过程与结果生成

7.3.1 预测流程

电能质量指标时序预测宜按照“数据质量检查—时间对齐—特征构建与处理—预测模型输入—模型预测—预测结果处理—预测结果输出”的流程开展。预测前应检查预测输入数据的完整性、有效性和时间连续性。存在影响预测结果的缺失、异常或时间同步问题时，应按照第 5 章和第 6 章的规定进行处理，并保留相应数据质量标识。

预测过程中应按照已确定的预测任务、历史输入窗口长度和预测步长生成模型输入。预测模型运行时，不应引入预测时刻之后的实际数据。预测完成后，应对预测结果进行完整性、时间连续性和数值合理性检查，并形成可用于第 8 章预测性能评价的预测结果数据集。

7.3.2 预测结果生成

预测结果应能够明确对应预测对象和预测时刻。预测结果宜至少包括测量点或统计区域、预测指标、预测时间、预测时间尺度、预测值和预测状态标识等信息。采用多步预测时，应按照预测时间顺序形成连续预测序列，并明确每个预测值对应的预测步长。预测结果存在异常、缺失或模型运行异常时，应进行状态标识，不应在未说明处理方式的情况下直接修改预测值。

预测结果应保留与模型和数据处理过程相关的必要信息，包括模型版本、预测任务参数以及必要的

数据处理标识，以保证预测结果可追溯。预测结果宜按照统一的数据格式进行存储和交换，具体数据格

式可根据应用系统要求确定。

8 电能质量指标时序预测精度评价

8.1 预测精度评价指标

预测精度评价指标应根据预测对象的数据特性和预测任务进行选择。对于连续型电能质量指标，宜采用平均绝对误差、均方根误差和平均绝对百分比误差等指标；对于需要进行达标判定的预测任务，可采用预测合格率进行评价。

8.1.1 平均绝对误差

平均绝对误差（MAE）用于反映预测值与实际测量值之间的平均绝对偏差，计算公式为：

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (23)$$

式中：

n ——参与评价的有效预测样本数；

y_i ——第 i 个样本的实际测量值；

$\hat{y}_i$ ——第 i 个样本的预测值。MAE 越小，表示预测误差越小。

8.1.2 均方根误差

均方根误差（RMSE）用于反映预测误差的整体水平，并对较大预测误差具有较高敏感性，计算公式为：

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (24)$$

式中符号含义同式（23）。RMSE 越小，表示预测结果整体偏差越小。

8.1.3 平均绝对百分比误差

平均绝对百分比误差（MAPE）用于反映预测误差相对于实际测量值的相对水平。对于实际测量值可能接近零的电能质量指标，宜采用带最小分母阈值的计算方式，计算公式为：

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{\max(|y_i|, \varepsilon)} \times 100\% \quad (25)$$

式中：

ε ——为避免实际测量值接近零时造成相对误差异常放大的最小分母阈值，其取值应根据预测指标的量纲、测量精度和数据分布确定。MAPE 越小，表示预测结果相对误差越小。

8.1.4 预测合格率

当第 i 个预测样本满足 $|y_i - \hat{y}_i| \leq \delta_{th}$ （绝对误差阈值）时，判定为合格预测样本。预测合格率用于反映满足规定预测误差要求的预测样本占全部有效预测样本的比例，计算公式为：

$$R_{qual} = \left(\frac{N_{pass}}{N} \right) \times 100\% \quad (26)$$

式中：

R_{qual} ——预测合格率；

N_{pass} ——满足规定预测误差要求的有效预测样本数；

N ——参与评价的有效预测样本总数。

预测合格率越高，表示满足规定预测精度要求的预测结果比例越高。采用预测合格率进行考核时，应在评价任务中明确对应的误差判定阈值、预测时间尺度和预测步长。

8.2 预测精度考核要求

预测精度考核应根据预测对象、预测时间尺度和应用需求确定评价指标及考核要求。不同类型电能质量指标不宜采用完全相同的评价指标和误差阈值。

连续型电能质量指标宜采用 MAE、RMSE 或 MAPE 进行评价；对需要形成明确达标判定的预测任务，可进一步采用预测合格率进行考核。对于概率型预测结果，应采用与概率输出特性相适应的评价方法，不宜直接采用针对连续测量值的百分比误差指标。不同电能质量指标的预测精度评价建议如表 11 所示。

表 11 不同电能质量指标的预测精度评价建议

指标类别	电能质量指标	宜采用的评价指标	典型预测时间尺度
基础电能质量指标	电压偏差	MAE、RMSE、MAPE、预测合格率	超短期、短期
基础电能质量指标	频率偏差	MAE、RMSE、MAPE、预测合格率	超短期、短期
基础电能质量指标	三相电压不平衡度	MAE、RMSE、MAPE、预测合格率	超短期、短期
基础电能质量指标	电压闪变	MAE、RMSE、MAPE、预测合格率	超短期、短期
基础电能质量指标	电压暂降频次	MAE、RMSE、预测合格率	短期、中长期
智能配电网特征指标	潮流反向持续率	MAE、RMSE、预测合格率	超短期、短期
智能配电网特征指标	电压骤变率	MAE、RMSE、预测合格率	超短期、短期
智能配电网特征指标	逆变器功率-谐波耦合系数	MAE、RMSE	超短期、短期
智能配电网特征指标	动态三相不平衡度演化率	MAE、RMSE	超短期、短期
智能配电网特征指标	电能质量承载力裕度	MAE、RMSE、预测合格率	短期、中长期
智能配电网特征指标	动态电压暂降预警概率	概率预测评价指标、预测合格率	超短期、短期
智能配电网特征指标	电能质量综合健康度指数（PQHI）	MAE、RMSE、预测合格率	短期、中长期

9 电能质量状态评估与风险预警

电能质量状态评估与风险预警应以本文件规定的电能质量指标时序预测结果为基础，对预测时段内电能质量状态进行判断，并根据状态评估结果对可能出现的电能质量风险进行提前预警。

9.1 电能质量状态评估

电能质量状态评估应以第 3 章规定的电能质量指标为对象，根据第 7 章生成的预测结果，对预测时段内电能质量指标的状态进行判断。状态评估可针对单一电能质量指标进行，也可针对同一测量点或统计区域内多个电能质量指标进行综合判断。

电能质量状态评估应综合考虑预测值、变化趋势、预计持续时间以及相应评价阈值或运行要求。对于分布式电源出力变化、储能充放电、电动汽车集中充电及配电网运行方式变化等典型运行场景，宜结合相关运行状态特征对评估结果进行分析。电能质量状态宜划分为正常、关注和异常三级。状态等级的基本含义宜符合表 12 的规定。

表 12 电能质量状态等级及基本含义

状态等级	基本含义	判定原则
正常	预测时段内电能质量处于正常状态	预测指标处于相应评价阈值或运行要求范围内，且未出现明显不利变化趋势
关注	预测时段内电能质量存在潜在风险	预测指标接近相应评价阈值，或出现持续不利变化趋势，但尚未达到异常状态
异常	预测时段内预计出现电能质量异常	预测指标达到或超过相应评价阈值，或预计形成持续性异常状态

单一电能质量指标的状态评估应根据该指标的预测结果及其评价阈值或运行要求确定。对于具有事件特征的电能质量指标，应结合预测时段内事件发生频次、持续时间、事件间隔或其他适用的事件特征进行状态判断。

同一测量点或统计区域涉及多个电能质量指标时，据各指标的状态等级进行综合判断。综合状态评估不应掩盖单一指标的异常状态，应同时保留各电能质量指标的独立状态评估结果。当多个电能质量指标同时处于关注或异常状态时，应结合指标数量、状态持续时间、影响范围及相关运行场景，对整体电能质量状态进行综合判断。综合状态等级宜按照表 13 确定。

表 13 多指标电能质量状态综合判断原则

指标状态组合	综合状态建议	说明
全部指标为正常	正常	未发现明显电能质量风险
少一个指标为关注，且无指标异常	关注	存在潜在风险，应持续关注
至少一个指标为异常	异常	存在预计电能质量异常
多个指标同时异常	异常	宜重点关注异常指标的关联变化及持续时间

电能质量状态评估结果至少应包括测量点或统计区域、电能质量指标、预测时间、预测步长、预测值、状态等级及状态判定依据。对于多指标综合评估结果，应同时记录参与综合评估的指标及各指标状态。

表 14 电能质量状态评估结果输出内容

输出项目	内容要求
测量点或统计区域	明确状态评估对应的测量点或统计区域
电能质量指标	明确参与状态评估的本文件规定电能质量指标
预测时间	明确状态预计发生或持续的时间
预测步长	明确预测结果对应的预测步长
预测值	给出对应电能质量指标的预测结果
状态等级	给出正常、关注或异常状态
判定依据	说明状态等级对应的主要判定依据
运行场景	关联分布式电源、储能、电动汽车、负荷及配电网运行方式等相关信息

9.2 电能质量风险预警

电能质量风险预警应根据 9.1 的状态评估结果，对预测时段内可能出现的电能质量风险进行提前提示。风险预警应与电能质量状态评估结果相对应，并可结合预测结果的变化趋势、预计持续时间及预测可靠程度确定预警等级。

当电能质量状态评估结果为正常时，宜不触发风险预警；当状态评估结果为关注时，可触发关注提示；当状态评估结果为异常时，应触发风险预警。风险预警等级宜划分为关注、预警和严重预警三级。预警等级的基本含义宜符合表 15 的规定。

表 15 电能质量风险预警等级及基本含义

预警等级	基本含义	典型触发情形
关注	在潜在电能质量风险，需要	能质量状态进入关注状态，或预测指标呈持续

	持续关注	不利变化趋势
预警	计出现电能质量异常，需要提前采取措施	能质量状态预计进入异常状态，或异常状态预计持续一定时间
严重预警	计出现较严重或持续性的电能质量风险，需要及时处置	个指标同时进入异常状态，或单一指标异常程度、持续时间达到较高风险水平

风险预警触发条件应根据电能质量指标特性、相应评价阈值或运行要求以及预测误差水平确定。不同电能质量指标不宜采用统一的预警阈值。

预警阈值宜综合考虑电能质量指标评价阈值、历史统计特征、预测误差、运行方式及典型运行场景等因素确定。采用预测值作为预警触发依据时，宜根据第 8 章预测精度评价结果设置合理的预警裕度，降低预测误差造成的误报和漏报。

对于多步预测，当不同预测步长对应的风险预警等级不一致时，应按照预测时间先后分别给出预警结果，并宜优先提示较早出现的风险状态。当多个电能质量指标在同一测量点或统计区域、同一预测时段内同时满足预警条件时，宜进行联合预警，并明确涉及的电能质量指标、预测结果及对应预警等级。

风险预警结果至少应包括预警时间、测量点或统计区域、电能质量指标、预测值、预测时间、预测步长、预警等级及预警触发依据。对于涉及典型运行场景的预警结果，宜同时关联分布式电源、储能、电动汽车、气象、负荷及配电网运行状态等相关信息。风险预警结果应保留与状态评估结果及预测结果之间的对应关系，并应能够追溯至相应的测量数据、预测数据及数据质量标识。

表 16 风险预警结果输出内容

输出项目	内容要求
预警时间	明确风险预警生成时间
测量点或统计区域	明确预警对应的测量点或统计区域
电能质量指标	明确触发预警的本文件规定电能质量指标
预测值	给出对应指标的预测结果
预测时间和预测步长	明确风险预计发生时间及预测步长
预警等级	给出关注、预警或严重预警等级
触发依据	说明预警等级对应的主要触发依据
关联运行信息	给出与风险相关的分布式电源、储能、电动汽车、气象、负荷及配电网运行状态等信息
数据质量标识	宜标识影响状态评估和风险预警结果的数据质量状态

附录 A
(资料性)

电能质量指标及预测特征对照

本附录用于说明本文件规定的电能质量指标、主要测量或计算数据以及时序预测阶段可采用的主要特征之间的对应关系。本附录所列特征为典型示例，不作为预测模型输入特征的强制性要求。

表 A 电能质量指标及预测特征对照表

指标类别	电能质量指标	主要测量或计算数据	主要预测特征
基础电能质量指标	电压偏差	电压测量数据	史值、滑动统计值、变化量、变化率、趋势
基础电能质量指标	频率偏差	频率测量数据	史值、滑动统计值、变化量、变化率、趋势
基础电能质量指标	三相电压不平衡度	三相电压测量数据	史值、滑动统计值、变化量、变化率、趋势
基础电能质量指标	电压闪变	电压测量及闪变计算数据	史值、滑动统计值、变化量、波动特征
基础电能质量指标	电压暂降频次	电压暂降事件数据	史频次、事件间隔、持续时间、近期事件特征
智能配电网特征指标	潮流反向持续率	潮流方向及持续时间数据	史值、滑动统计值、连续反向时间、变化率
智能配电网特征指标	电压骤变率	电压连续测量数据	史值、滑动统计值、变化幅度、变化频次
智能配电网特征指标	逆变器功率-谐波耦合系数	逆变器功率及谐波数据	史值、滑动统计值、变化量、变化率、趋势
智能配电网特征指标	动态三相不平衡度演化率	相电压不平衡度连续测量数据	史值、滑动统计值、变化量、趋势
智能配电网特征指标	电能质量承载力裕度	关电能质量及运行状态数据	史值、滑动统计值、变化量、变化率、趋势
智能配电网特征指标	动态电压暂降预警概率	压暂降相关测量及预测数据	史值、滑动统计值、变化量、变化趋势
智能配电网特征指标	电能质量综合健康度指数(PQHI)	指标电能质量及预测结果	史值、滑动统计值、变化量、变化率、趋势

附录 B
(规范性)

不同预测时间尺度的典型配置

本附录给出不同预测时间尺度下的典型任务配置，用于指导实际应用中的预测数据、历史窗口和输入特征选取。所列参数为典型配置示例，不作为本文件的强制性要求。实际应用时可根据预测对象、数据分辨率及应用需求进行调整。

表 B 不同预测时间尺度的典型配置

预测类型	典型预测范围	数据时间间隔	典型历史窗口	主要输入特征	典型应用
超短期预测	分钟级~小时级	1 min~15 min	数小时~30 d	历史时序、变化特征、事件特征、运行状态	快速状态预测与预警
短期预测	小时级~日级	5 min~1 h	30 d~90 d	历史时序、周期趋势、多源运行数据	日内及日前分析
中长期预测	日级及以上	1 d 及以上	90 d~365 d 及以上	长期趋势、周期特征、气象、负荷及运行状态	趋势分析与运行决策

预测模型的输入特征应按照第 6 章要求进行数据清洗、时间对齐、特征构建和特征筛选。不同预测时间尺度对应的历史窗口长度宜覆盖预测目标的主要周期性变化和典型运行场景。

附录 C
(资料性)

电能质量状态评估与风险预警应用示例

本附录给出基于预测结果开展电能质量状态评估与风险预警的应用示例,用于说明第 9 章规定的状态评估和风险预警过程。示例数据仅用于说明方法,不作为本文件规定的评价阈值或预警阈值。

以某配电网测量点为例,在未来 1 h 预测周期内,对电压偏差、三相电压不平衡度和潮流反向持续率进行预测。根据各指标对应的评价要求,形成状态评估结果。

表 C.1 电能质量状态评估示例

电能质量指标	预测结果	状态	主要判定依据
电压偏差	示例值	关注	测结果接近相应评价阈值,且呈不利变化趋势
三相电压不平衡度	示例值	正常	测结果处于相应评价要求范围内
潮流反向持续率	示例值	异常	测结果达到相应异常判定条件

根据表 C.1,至少一个指标处于异常状态,因此该测量点的综合状态可判定为异常。同时,应保留各单项指标的状态评估结果,不应以综合状态替代单项指标状态。在此基础上,根据状态评估结果及预测时段、持续时间和预测可靠程度确定风险预警等级。

表 C.2 电能质量风险预警示例

预警对象	状态评估结果	预警等级	触发依据	关联运行信息
某测量点	异常	预警	潮流反向持续率预计进入异常状态	分布式电源出力较高、负荷较低
某测量点	异常	严重预警(示例)	多个指标同时进入异常状态或异常持续时间较长	合配电网运行方式及相关设备状态综合判断

实际应用中,预警结果宜关联分布式电源、储能、电动汽车、气象、负荷及配电网运行状态等信息,以辅助运行人员判断风险可能的运行背景。

参 考 文 献

- [1] IEC61000-4-4 试验和测量技术-电快速瞬变/脉冲群抗扰度试验
 - [2] IEC61000-4-11 电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验
-