

电压暂降监测与防治工作实践

史明明/国网江苏省电力有限公司电力科学研究院新能源及配网技术室副主任



史明明 高级工程师

国网江苏省电力有限公司电力科学研究院
新能源及配网技术室副主任

电压暂降的治理问题本质上是供电电压暂降水平与用电设备电压暂降耐受能力的兼容性问题，需要电网、用户和设备制造商三方面共同构筑电压暂降治理防线。

摘要：结合江苏电网电压暂降监测网建设实践，从电压暂降监测系统建设、监测数据分析评价、暂降源聚类识别和电压暂降防治措施四个方面对电压暂降监测与防治工作进行了全面阐述。提出了一种基于改进的层次分析法和熵权法相结合的电压暂降综合评价体系，并结合电力系统多源信息融合优势，研究了基于多源数据融合的电压暂降源识别聚类分析方法。最后，从电网、电力用户和用电设备三个层面，为降低电压暂降对供用电双方的影响提出了实用化的暂降防治措施。

关键词：电压暂降；监测系统；分析与评估；治理方法

0 引言

随着工业装备、建筑电气自动化及智能化水平越来越高，电压暂降问题对于工商业大用户的生产经营影响也越来越显著。大量使用的机器人、变频调速器、焊机、LED灯具和电梯等电力电子设备，因电能质量扰动触发的生产中断和延缓呈明显的上升趋势，由此带来的直接及间接经济损失日趋严重。

开展电压暂降监测对供用电双方都有积极意义。对于电力部门，电压暂降指标是体现电网优质供电的直接反映，也是电网安全质量水平提升的重要基础；对于用户，电压暂降易造成用户精密负载设备异常、导致电力用户设备停机以及公用场所用电中断等事故，直接造成经济损失，电压暂降指标是保障用户安全生产，提高用户经济效益的重要指标。电网电压暂降的监测将有助于掌握电网电压暂降的整体分布情况，为电网运行方式的合理调整、用户供电方案的优化设计及暂降问题治理提供可靠数据源。

1 电压暂降监测系统

1.1 系统架构

江苏电网为真实准确掌握电网暂降率水平,于2015年开始启动电压暂降监测系统建设计划,遵循通用性、经济性和兼容性原则。在江苏电网现有电能质量监测网基础上,借鉴国外先进的配电网和用户侧电压暂降监测理念,采用电压暂降记录仪和电能质量在线监测终端两种装置相结合的方式构建覆盖所有变电站的电压暂降监测网,电压等级涵盖10 V~500 kV。同时,考虑到江苏电网变电站和输电线路众多,为降低投资费用,将220 kV和500 kV的监测点均设置在500 kV变电站,35 kV和110 kV监测点设置在220 kV变电站,采用四通道电能质量监测终端,降低采购成本。对于数量巨大的10 kV监测点,成本更低的电压暂降记录仪。

电压暂降监测系统按照分层、分布式的结构组建而成,由监测设备层、服务层和客户层,系统组成如图1所示。

1) 监测设备层。由具有电压暂降监测功能的各类终端构成,每台监测终端具有固定的合法网络地址,暂降数据记录格式采用通用的comtrade文件。

2) 服务层。具有监测数据采集、管理与分析、系统维护和权限管理等功能,是监测设备层、客户层之间数据交互的纽带。通常包括数据库服务器、应用服务器、Web服务器、通信服务器、管理工作站以及通信所必需的网络设备等。

3) 客户层。具有Web浏览、查询等功能,通过网络访问服务层。

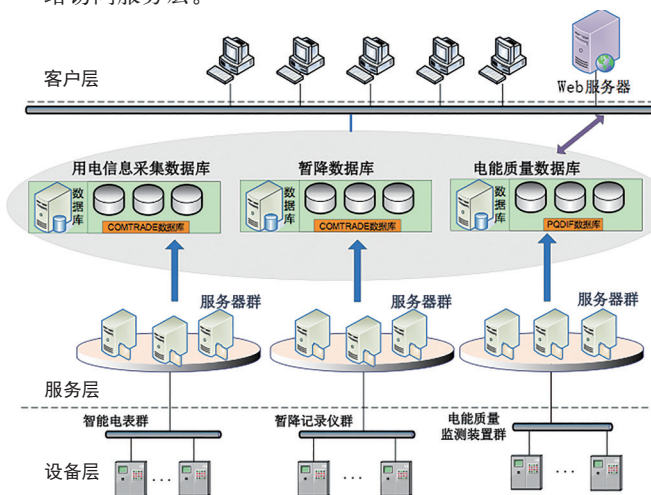


图1 典型电压暂降监测系统架构

在数据传输机制方面,考虑到暂降记录仪监测的同时性容易引发网络堵塞,不同类型的数据包上送到主站的方式也各不相同,分为定时周期上送采集、数据召测上送和事件实时上送三种。统计数据包是周期性上送给主站的;文件服务则是由主站召测电压暂降监测终端的文件列表,监测终端发送文件列表,主站根据文件列表索要文件,监测终端发送相应的文件。事件数据包是立刻上送的,只要有发生暂降事件就上送给主站。另外,终端参数信息的读取和修改则是主站请求,监测终端发送参数信息和修改响应信息给主站。

1.2 系统功能

结合电网生产实际需要,江苏电网电压暂降系统开发了暂降事件统计和波形查看、电网暂降率报表生成、暂降源识别、设备管理等功能,满足运检人员日常生产管理和专项分析工作需要:

1) 监测数据统计,通过该功能可对各地区暂降情况及具体的事件信息进行多维度统计,包括时间、区域、电压等级、残余电压和持续时间等特征。

2) 可视化分析,在该模块实现电压暂降监测点地理视图展示、暂降特征量时间分布直方图和量值分布直方图,并结合ITIC、SEMIF47等标准统计暂降分布概率。

3) 设备管理模块可实现监测终端的远程参数设置,如监测点变电站名称、监测对象、监测点名称、授权访问信息、设备的电压互感器电压比、IP地址、子网掩码和网关等通信参数等。

4) 高级应用功能可实现暂降事件关联性分析、暂降原因识别及定位、辅助决策和经济性评估等功能。

2 监测数据分析与评价

2.1 SARFI

SARFI指数包括两种形式:一种是 $SARFI_x$,它是一种针对某一阈值电压的统计性指数,另一种是 $SARFI_{curve}$,它是一种针对某设备敏感曲线的统计指数。 $SARFI_x$ 是从电压变化的方均根值来反映电力公司供电服务质量,由下式可知

$$SARFI_x = \frac{\sum N_i}{N_T} \quad (1)$$

式中, x 为电压暂降阈值的方均根值; N_i 为第 i 个电压暂降电压幅值小于 $x\%$ 的用户数量; N_T 为用户总数。

SARFIcurve描述了国际技术工业委员会(ITIC) 容忍度曲线电压包络线外的电压暂降事件发生频数。由此可见, SARFI值与电压暂降的严重程度成正比。然而, 它不包含电压暂降持续时间和暂降幅值的影响。因此, 用SARFI评价电压暂降的严重程度是片面的。

2.2 严重度技术指标

暂降幅值严重度指数 (MSI)、暂降持续时间严重度指数 (DSI)以及暂降幅值和持续时间严重度综合指数 (MDSI)分别从幅值和持续时间两个方面描述了由电压暂降事件引起的设备影响程度。由下式可得

DSI = \begin{cases} 0 & d < t_{min} \\ (d - t_{min}) \cdot (\frac{100}{t_{max} - t_{min}}) & t_{min} \leq d \leq t_{max} \\ 100 & d > t_{max} \end{cases} \quad (2)

MSI = \begin{cases} 0 & M > U_{max} \\ (U_{max} - M) \cdot (\frac{100}{U_{max} - U_{min}}) & U_{min} \leq M \leq U_{max} \\ 100 & M < U_{min} \end{cases} \quad (3)

MDSI = \frac{MSI \cdot DSI}{100} \quad (4)

式中, t_{min} 、 t_{max} 、 U_{min} 和 U_{max} 分别为电压暂降容忍度曲线上的特征值, 如图2所示。 d 和 m 分别为该次电压暂降的持续时间和暂降幅值。但这三个指标仅反映了一次电压暂降持续时间和暂降幅值的严重性, 并不能反映电网中典型监测站所有暂降事件的严重程度。

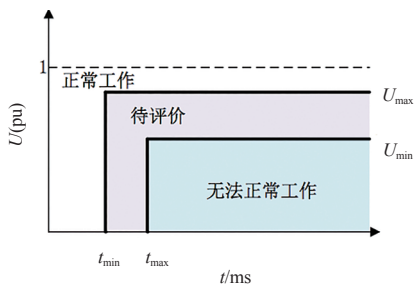


图2 电压暂降容忍度曲线

2.3 电压暂降综合评价体系

在单次电压暂降事件中, 有两个主要的基本特征值: 持续时间和暂降幅值, IEC 61000-2-8-2002将其分为几个区间来评估电压暂降的严重程度。层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 可以在不同的区间内加入不同的权重系数, 而改进的层次分析法 (IAHP) 无须进行一致性检验, 利用最优传递矩阵构

造判断矩阵, 计算复杂度较低。此外, 可以采用熵权法 (Entropy Weight Method, EWM) 求出持续时间和暂降幅值两者的权重。EWM是一种客观的权重确定方法, 用来度量评价系统中指标的有效信息。因此, 整个评价体系如图3所示。

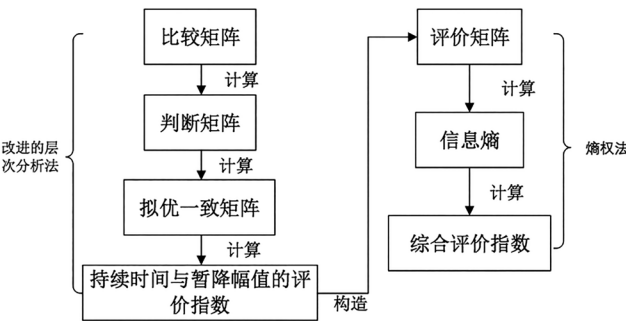


图3 评价体系示意图

AHP的原理是将复杂问题分解成几个因素, 用九标度法比较两个指标之间的相对重要程度。由于传统AHP的规模复杂、一致性验证困难, 本文采用了一种IAHP。优点:①用五标度法代替九标度法, 降低了标度的复杂性和计算量; ②利用最优传递矩阵, 判断矩阵无须进行一致性检验。

由于不同持续时间和暂降幅值对电压暂降严重程度的影响明显, 因此可以建立一个准确的相对重要性判断矩阵。以持续时间为例, 下表为其比较矩阵的相对重要性标度。

表 持续时间比较矩阵的相对重要性标度

标度	相对关系	强烈程度
1	$t_i = t_j$	t_i 等于 t_j
3	$4t_j > t_i > t_j$	t_i 略大于 t_j
5	$7t_j > t_i \geq 4t_j$	t_i 等于 t_j
7	$10t_j > t_i \geq 7t_j$	t_i 等于 t_j
9	$t_i \geq 10t_j$	t_i 等于 t_j

上表中, t_i 和 t_j 分别为两次暂降事件的持续时间。

IAHP的具体步骤如下所述。

1) 比较矩阵可由上表得到, 如下式所示

CM_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1m} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{m1} & C_{m2} & \cdots & C_{mm} \end{bmatrix} \quad (5)

式中, c_{ij} 为上表中的值, 基于两次持续时间相比较获得; m 为电压暂降事件总数。

2) 计算比较矩阵重要性的排序指数

$$r_i = \sum_{j=1}^m c_{ij} \quad (6)$$

3) 构建持续时间判断矩阵

$$JM_{ij} = \begin{cases} \frac{r_i - r_j}{RSUB} \frac{r_{\max}}{r_{\min}} - 1 + 1 & r_i \geq r_j \\ [\frac{r_i - r_j}{RSUB} \frac{r_{\max}}{r_{\min}} - 1 + 1]^{-1} & r_i \leq r_j \end{cases} \quad (7)$$

式中, $RSUB = r_{\max} - r_{\min}$; $r_{\max} = \max\{r_1, r_2, \dots, r_n\}$; $r_{\min} = \min\{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 。

4) 求出持续时间判断矩阵的拟优一致矩阵

$$qo'_{ij} = 10^{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (a_{ik} - a_{jk})} \quad (8)$$

5) 得到矩阵 $T_{ij} = (t_{ij})_{m \times m}$

$$t_{ij} = \frac{qo'_{ij}}{\sum_{k=1}^m qo'_{ik}} \quad (9)$$

6) 计算权重向量

$$\bar{W} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m t_{ij} \quad (10)$$

最后, 得到了每次电压暂降事件持续时间的权值, 即权重向量。而每次电压暂降事件暂降幅值的权值可以用同样的方法计算。

由于电压暂降的严重程度与持续时间和暂降幅值都相关, 因此应综合考虑两者对电压暂降严重程度的影响。以上IAHP避免了专家打分的随机性, 但仍缺乏对特征数据的深入分析。EWM通过各特征数据的值来确定电压暂降的严重程度, 是一种客观赋权法。计算方法步骤如下所述。

1) 采用基于持续时间和暂降幅值的权重向量构造评价矩阵

$$X = \begin{bmatrix} W_t & d_{11} & d_{11} & \cdots & d_{1m} \\ W_v & d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2m} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, W_t 和 W_v 为IAHP得到的权重向量。

2) 根据评价矩阵计算各指标的信息熵

$$H_p = \frac{\sum_{q=1}^m d_{pq} \ln d_{pq}}{\ln m} \quad p=1,2 \quad (12)$$

式中, d_{pq} 为评价矩阵中的矩阵元素。特别是当 $d_{pq}=0$, $d_{pq} \ln d_{pq}=0$ 时。

3) 持续时间和暂降幅值两者的权重计算方法可定义为

$$\omega_p = \frac{1 - H_p}{\sum_{q=1}^m (1 - H_q)} \quad p=1,2 \quad (13)$$

式中, ω_1 和 ω_2 分别为电压暂降时持续时间和暂降幅值的权重指数。

2.4 综合评价指标

本文提出了一种综合评价指标 (Comprehensive Evaluation Index, CEI), 将IAHP与EWM相结合, 给出了某监测站电压暂降严重程度的最终评价指标。CEI可以表示为

$$CEI_{i,j} = \sum_{j=1}^m CEI_{i,j} \quad (14)$$

式中, m 为某监测站的电压暂降事件总数; $CEI_{i,j}$ 为第 i 个监测站的第 j 次电压暂降严重指数, 由下式计算

$$CEI_{i,j} = \omega_1 TEI_{i,j} + \omega_2 VEI_{i,j} \quad (15)$$

式中, ω_1 和 ω_2 为电压暂降持续时间和暂降幅值的权重指数; $TEI_{i,j}$ 和 $VEI_{i,j}$ 为第 i 个监测站第 j 个电压暂降严重指数持续时间和暂降幅值的权重。

该CEI指数不仅反映了持续时间和暂降幅值对电压暂降严重程度的影响, 而且考虑了电压暂降事件的总数。与传统的统计指标相比, 用该CEI评价电压暂降的严重程度更为合理。

3 电压暂降源识别聚类分析

3.1 聚类分析算法

电力系统中各种原因引起的电压暂降的特征是不同的, 可通过幅值大小、突变点检测、谐波含量、相角跳变和有功功率变化等特征的不同辨别不同的暂降源。不

同暂降源所导致的电压暂降波形特征差异明显,同类暂降源暂降波形特征相似。为了达到暂降源的辨识目标,暂降分类特征的选取需尽量突出异类特征的差异性和同类特征的聚集性(统称可比性),本文分别从图形特征、时域-频域、数学特征的角度突出电压暂降波形的差异性,经大量的验证试验,本文最终选择暂降时间、暂降最低幅值、暂降非矩形系数、暂降平均斜率和恢复点处小波变换系数等变量作为暂降特征指标,用于实现暂降源智能辨识。电压暂降源识别聚类分析流程如图4所示。

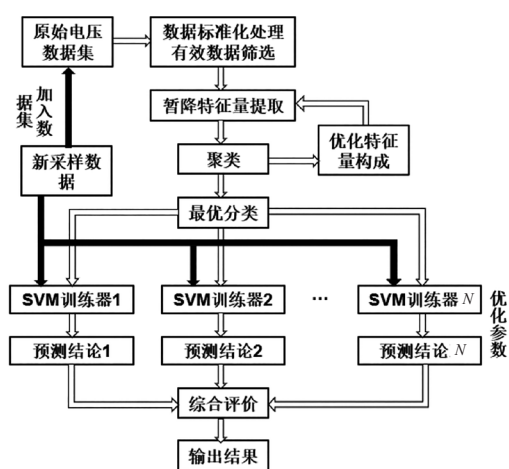


图4 电压暂降源识别聚类分析流程

电压暂降源辨识模型步骤可归纳为以下几个步骤。

1) 对暂降数据库中的暂降事件进行数据预处理。对电压瞬时值进行方均根计算,与电压暂降国家标准相对应,筛选出符合要求的合格暂降事件。

2) 特征值计算。对应前文所述特征值定义,计算每个暂降事件对应的特征值。并将计算结果以特征向量的形式表达 $D(d_1, d_2, d_3, \dots, d_n)$ 。

3) K-means聚类计算。以 $D(d_1, d_2, d_3, \dots, d_n)$ 特征向量的结果对应每个暂降事件,作为K-means聚类算法的输入样本,聚类结束后产生 k 个簇,并将样本结果输出。

4) 以聚类后的样本结果分别作为SVM模型搭建的训练样本和测试样本。在本项目数据处理过程中,选取125个样本数据,95个训练数据以及30个测试数据。

5) 利用POS寻优算法对基于径向基核函数的SVM智能分类模型参数进行优化。直到满足适应函数最大以及到达设定迭代次数为止。

6) 建立SVM暂降分类模型。设定模型参数,利用训练样本训练SVM分类器。

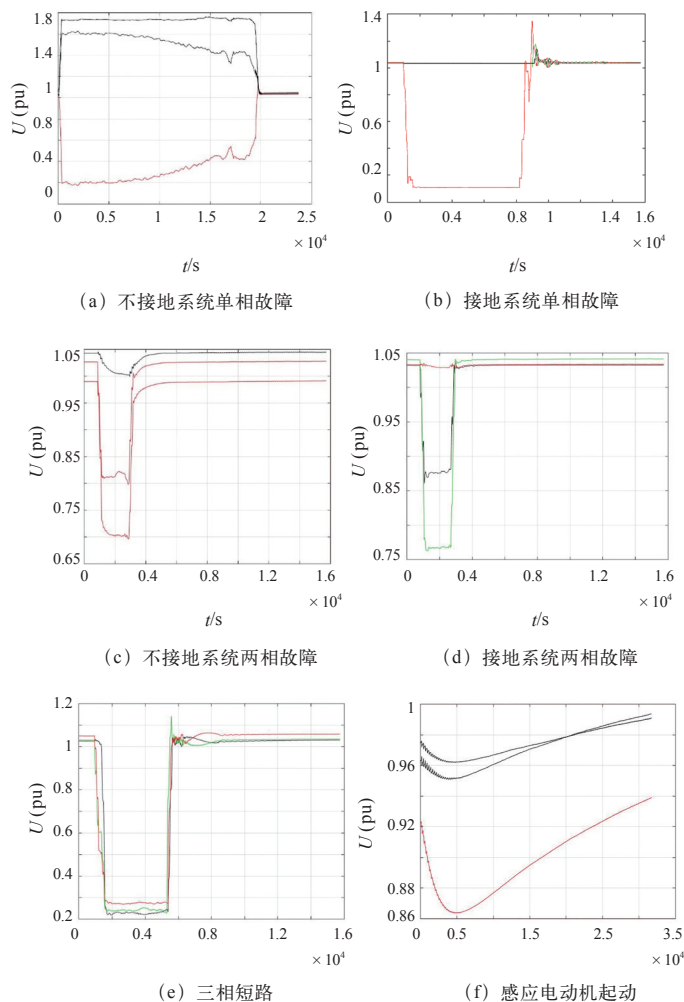
7) 检验分类器效果。利用测试样本对分类效果进行测试,优化参数。

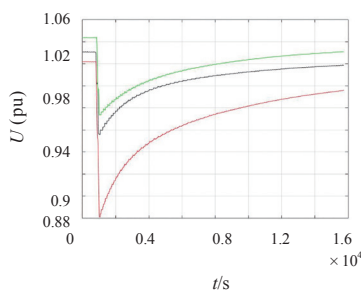
8) 对所有的暂降情况进行识别。

3.2 暂降源分析案例

电网电压暂降的来源主要有短路故障、大型电动机启动以及雷击等。引起暂降的不同来源,其电气特征上也存在区别。利用电压暂降波形之间的差异可区分出电压暂降源的类型。典型的暂降波形如图5所示。

基于上述算法,对江苏某地区2017年5月份的463条暂降记录样本进行暂降特征辨识。本文所提出的暂降辨识算法分析得出结论如下:单相故障287个,两相故障78个,三相故障84个,电动机启动7个,变压器投切7个,辨识准确度达到88%。





(g) 变压器投切

图5 暂降源典型波形特征

4 暂降防治技术路线

电压暂降的治理问题本质上是供电电压暂降水平与用电设备电压暂降耐受能力的兼容性问题，需要电网、用户和设备制造商三方面共同构筑电压暂降治理防线。

4.1 电网层面暂降防治措施

对于敏感负荷集中地区，或者电压暂降的频度较大，持续时间较长，从电网层面开展电压暂降防范措施较为经济。

在电网侧，电压暂降主要通过采取减少短路故障、缩短故障时间和改变供电方式等措施缓解电压暂降问题。其中，减少短路故障的措施包括架空线入地、架空线加外绝缘、架设附加屏蔽导线和防止外力破坏等措施；缩短故障时间的措施包括缩短保护动作时间、安装快速切除故障的保护装置；改变供电方式的措施包括高电压等级接入、增加备用电源以及采用固态切换开关代替常规机械开关等方式。

4.2 用户层面暂降防治措施

对于电力用户层面，电压暂降的治理措施需要结合具体的工艺流程、敏感设备的特性进行综合考虑。可以对整条流水线采取电压暂降保护措施，也可以对某个重要的设备加强电压暂降的防护。目前应用有以下几种装置：动态电压恢复器（DVR）、不间断电源（UPS）、飞轮储能。

1) DVR用于对供电可靠性和电能质量要求较高的用户，应用电压范围可高达35 kV，电压稳定响应时间在5 ms左右。DVR由转换器和储能系统组成，当系统发生故障发生电压暂降时，在系统和负荷间同步串联注入暂降部分的电压，并控制电压的幅值和相位，使得负荷处的电压保持原来的数值和波形。

2) UPS常用于中小容量重要敏感设备上，是在市电发生故障时，保证负载能够正常运行的电力电子设备。UPS由整流器、蓄电池和逆变器组成，通过蓄电池储存能量。当电网电压暂降时，蓄电池输出能量维持电压不变。但其造价较高，维护量大。

3) 飞轮储能适用于中小容量的敏感设备。通过高速旋转的飞轮来储存能量(电能转化为机械能)。当系统发生电压暂降时，与敏感负荷相连的发电机的飞轮释放能量(机械能转化为电能)，维持电压稳定。具有使用寿命长、运行温度范围广、充放电次数无限制等优点。

4.3 设备层面暂降防治措施

在设备侧，精密加工仪器的设备制造商应根据电网运行环境、用户需求设计产品的技术参数，提升设备自身的“暂降免疫力”，满足敏感用户的暂降耐受能力需求。设备制造商可以采取改善产品设计等技术措施来降低设备对电压暂降的敏感度。比如，对于变频器开展直流母线储能支撑技术，避免外界电压波动对变频器直流母线的影响。

同一种设备对电压暂降的敏感度还与用户的工艺流程特点密切相关。因此设备制造商还应该根据用户的需求调整设备的控制参数或整定值，使设备运行在满足用户需求的前提下，尽可能降低对电压暂降的敏感度。

5 技术展望

未来，基于多源数据融合的电压暂降数据分析可在暂降风险评估、暂降可视化和敏感治理等方面进一步深化应用。通过对来自不同系统的同源异构、异源异构等数据进行有效融合、匹配与提取，全面描述电压暂降事件特征，实现对暂降源的识别和定位。

在电网暂降风险评估方面，可结合变电站供电半径、历史暂降深度和暂降发生频度等信息，对地区性的暂降风险作出预测评估，为敏感性工业用户接入供电路径规划提供依据。

在暂降监测网数据的可视化方面，可进一步结合电网敏感负荷的接入信息，绘制出反映真实电网敏感负荷、电网暂降劣化程度演变趋势的地理信息视图，为电网层面的暂降防治提供参考。

此外，还可收集针对不同因素产生的暂降事件的影响程度和暂降事件特征，为暂降治理方案的设计提供第一手的数据。**EA**