

基于电网全景模型的终端用户供电可靠性信息系统^①

王程斯

(深圳供电局有限公司, 深圳 518000)

摘要: 提出了一种改进的电网全景信息模型, 用于全面描述停电事件, 解决了传统电网拓扑模型对低压停电等事件描述不精确的问题. 基于此模型实现了一套终端用户供电可靠性信息系统并应用实践, 实现了各类数据的集成、建模和可视化展示. 该系统在不依赖自动化装置的前提下, 实现了终端用户供电可靠性指标自动统计, 具有一定的实用性.

关键词: 供电可靠性系统; 电网全景模型; 数据集成; 数据可视化

Power Supply Reliability Information System of End Customer Service Based on Improved Power Grid Panoramic Model

WANG Cheng-Si

(Shenzhen Power Supply Bureau Co. Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: This paper proposes an improved power grid panoramic information model for a comprehensive description of end customer interruption events, which solves the problem that traditional model can not describe low voltage interruption precisely. We implement a power supply reliability of end customer service system based on this model. The system implements integration and modeling of different source data, and indices calculation and visualization with no dependency on automatic devices.

Key words: power supply reliability information system; power grid panoramic model; data integration; data visualization

供电可靠性是指供电系统持续供电的能力, 是考核供电系统电能质量的重要指标, 反映了电力工业对国民经济电能需求的满足程度, 已经成为衡量一个国家经济发达程度的标准之一. 终端用户供电可靠性, 是指既包括了高压和中压用户, 也包括了低压用户的供电可靠性管理^[1], 这一概念是为了与我国现行可靠性管理只包含中高压用户作出区分.

通常, 电力信息化管理系统对电网结构的计算机建模采用“变电站-馈线-变压器-用户”模型(以下简称“站线变户”模型), 这一模型具有结构简单、易于实现, 且对模型数据质量的鲁棒性较强等优点; 但这一模型对电力网络拓扑的描述不够精确, 缺少低压380V/220V拓扑的描述. 基于“站线变户”模型构建的传统的供电可靠性管理指标, 也同样存在对供电可靠性水平描述不准确的问题, 不能实际反映用户的真实用电水平.

1 国内外研究和应用现状

发达国家对于供电可靠性的统计评价既包含了输电网, 也包含了配电网的供电可靠性, 在配电网层面其可靠性管理水平大部分已到达终端用户级别, 采用的统计指标主要包含两种: 北美可靠性协会的指标和IEEE颁布的指标, 见文献[2,3].

美国采用的配电系统用户供电可靠性指标体系是IEEE 1366标准, 该标准规定了配电系统用户供电可靠性统计分析的概念定义和指标计算方法等, 包括反映持续停电的指标、基于负荷量的指标及反映瞬时停电的3大类共12个指标, 并引入“重大事件”概念^[4]. 日本的供电可靠性管理则提出了评估停电故障时供电转移能力的“联络率指标”, 定义为“发生故障时可以切换的负荷侧完好区段数”与“发生故障时被分段开关切除后的电源侧完好区段数”之商^[5]. 加拿大引入了与损失负荷及电量有关的指标, 定义“平均负荷停电指标”

^① 收稿时间:2015-05-18;收到修改稿时间:2015-06-23

为“停电总负荷/连接的总负荷”^[5]。此外，各国在停电事件定义、停电区域划分原则上也存在差异。

目前，由于受到智能计量设备未普及、电力企业低压管理颗粒度不够细等客观原因限制，我国的供电可靠性管理系统主要集中在高压和中压^[4]，对涵盖低压 380V/220V 用户的供电可靠性管理还主要停留在理论研究和人工统计层面^[1,6]。此外，在实际生产运行过程中，部分电力企业已经实现了分批次的低压计划停电，并建立了配电网生产管理系统和配网自动化系统^[7]，基本实现低压配电网停电信息的收集和维护，已经初步具备了终端用户供电可靠性管理所需的原始数据^[8]。

要实现真正的终端用户供电可靠性管理，必须首先解决信息系统的建模问题，需要设计一种符合国内电力管理实际情况、能精确描述各电压等级的停电信息模型。

2 改进的电网全景模型

如图 1 所示，在“站线变户”模型中，末端的“电力用户”是可以模糊化处理的，在中国供电系统用户供电可靠性评价规程中，公用变压器下的多个低压用户通常被抽象为一个“公用变压器用户”进行统计，在遭遇停电时，会导致实际受影响的用户数量统计不准确。

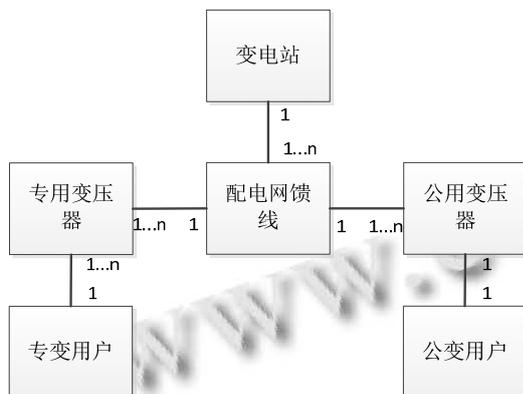


图 1 “站线变户”模型

如图 2 所示，“电网全景模型”则是对电力网络拓扑从高压 500kV 至低压 380V/220V 进行全面的建模，每个低压用户都被精确定义，保证在每次停电事件中受影响用户数量准确^[9]。其中，“输电线”用于连接多个变电站，在本文的应用场景中不产生作用，可忽略。但“电网全景模型”仍然存在两个缺点：一是不够精细化，

特别是在低压计划停电时无法准确描述“一个变压器的部分用户停电”的情况；二是其“公用变压器-低压用户”的关系为“一对多”，而实际上存在多个公变组合成一个台区，共同作为供电可靠性考核的基本单元，因此无法描述“一个公变台区的部分变压器停电”的情况。以上两个缺点对于终端用户供电可靠性管理来说，会对最终统计指标造成较大的干扰和阻碍。因此，本文提出了一种“改进的电网全景模型”，强化对低压停电、部分停电的描述。

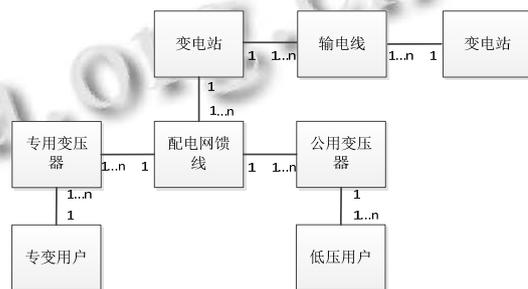


图 2 常规的电网全景模型

如图 3 所示，“改进的电网全景模型”有以下特点：(1)增加了“低压分支”和“表箱”对象，细化低压拓扑的描述，对于单个低压分支的停电，或低压分支下某段低压线路故障导致的若干“表箱”中的用户计量设备停电，都能进行精确的描述，解决“一个变压器的部分用户停电”的表述问题；(2)引入“安装点”的概念，将“变压器”和“用户”打包，间接实现了“变压器 - 用户”关系的“多对多”描述，解决“一个台区的部分变压器停电”的表述问题；(3)将“停电时间区间”属性从“变压器”对象转移至“用户(含低压和专变用户)”对象，统计停电时长时不再需要按“变压器”折算，可以直接计算；将“部分停电”属性转移至“专变用户”和“安装点”对象，在终端用户供电可靠性特定口径的指标计算时，可不纳入停电时间统计，提高了灵活性。

3 系统架构

在实际的生产应用中，还必须考虑到工作效率问题。终端可靠性由于将低压停电也纳入指标统计，其计算量远远大于传统的中压可靠性，因此系统必须能够实现自动数据采集。数据采集包括两方面：基础数据和运行数据。

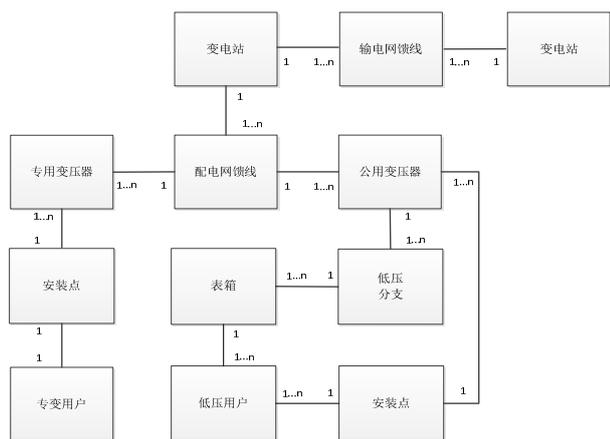


图3 改进的电网全景模型

对于基础数据，通过单线图系统维护配电网中低压拓扑，通过营销系统维护用户数据，集成在主数据平台中，然后按照改进的电网全景模型拼接这两类数据形成电网拓扑，终端用户供电可靠性系统通过主数据平台获取从变电站至低压回路、表箱的电气拓扑以及其下关联的所有终端用户。

对于运行数据，在自动化计量装置未广泛推广的前提下，可通过电网企业现有的调度日志系统和配网生产系统，分别获取中压和低压、故障和计划停电，也是通过 SOA 架构集成至主数据平台，形成“停电信息池”，供终端用户供电可靠性系统调用。之所以采用 SOA 架构，是考虑到我国电力行业的信息化水平程度不一，信息系统的基础架构差异较大，采用标准的 SOA 架构易于集成各类异构系统，具有较好的扩展性和兼容性。此外，通过图模交互中心，本系统与 GIS 地图平台实现了 SVG 矢量地图数据的共享，将可靠性指标的展示与可视化地理图形有机结合在一起^[10,11]。可视化的工作界面可以更加灵活地定制供电可靠性考核指标，满足不同地区和不同时期对供电可靠性考核的定制化需求，符合供电可靠性精细化管理、动态管理的需要^[12]。系统架构如图4所示。

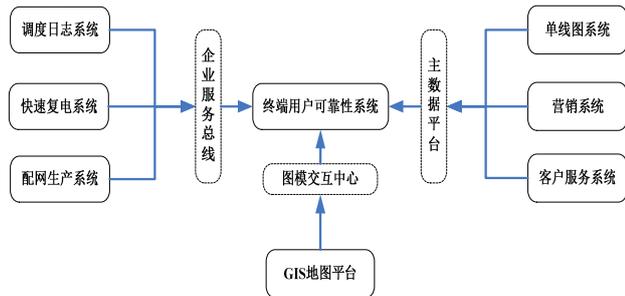


图4 系统架构

4 系统设计

4.1 基础数据集成设计

基础数据的数据集成设计如图5所示。从源系统通过数据泵等工具，定期将所需数据同步至准备库中。准备库的数据结构与源系统基本一致，其作用是避免在后续的数据转换过程中，对源系统的压力过大，影响用户的正常使用。

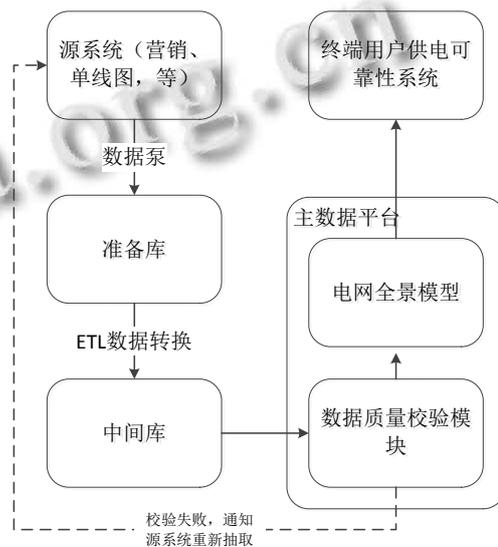


图5 基础数据的集成设计方案

数据到达准备库后，根据改进的电网全景模型的定义，通过数据转换工具(通常为 ETL)对原始数据进行清洗和转换，放入中间库中。由中间库把转换后的数据推送给主数据平台。

在正式拼接为电网全景模型之前，需要对数据质量进行验证。验证内容与最终的数据模型相关，在本系统中验证点分类和内容如下：

① 完整性。即验证电网全景模型中各实体的数据完整性。例如变电站名称、变压器额定容量、表计编码、用户名称等关键属性是否缺少。

② 规范性。验证模型中各实体的数据规范性，包括字段长度、枚举值、数据范围(阈值)、格式和唯一性五个子类。例如变压器额定容量是否为标准值、用户手机号码是否符合规范，等。

③ 正确性。验证模型中各实体之间的关联关系，以及拓扑的完整性。例如馈线与变压器之间、低压分支与表箱之间是否为一对多的关系；验证模型中是否有实体处于“孤岛”状态，即未与任何其他节点关联；

是否有实体缺少上级或下级节点(“用户”实体为叶子节点, 可以没有下级节点). 在实现方式上, 采用检查父子节点关联字段的一致性的方法. 例如, 以变压器 ID 为关键字, 查询“馈线-变压器”关系表, 若存在多个不同的馈线 ID, 即可判断“馈线-变压器”有“多对一”的错误; 若不存在, 则说明该变压器缺少上游拓扑.

④ 一致性. 由于数据来自于多个源系统, 能否拼接成功在于关联字段的一致性. 例如, 营销系统的“用户”与单线图系统的“表箱”对象之间通过表箱编号进行关联, 则需要比对两个系统的“表箱 ID”字段集合是否一致.

验证采用可配置的 SQL 脚本来实现, 每个验证点为一条 SQL 脚本, 通过数据质量校验模块定时调度执行. 由于系统每天对全量数据进行更新, 数据量接近 300 万条(用户和安装点 260 万, 表箱和低压分支 30 万, 变压器等其余数据近 10 万), 为保证脚本执行效率, 一方面, 数据质量校验模块使用了双节点的 Oracle RAC 用于提升性能. 另一方面, 为提高配置效率, 对于占多数的简单规则(例如, 完整性和规范性验证), 系统开发了一个自动化程序, 根据表 1 中定义的字段验证类型和验证内容, 自动生成 SQL 验证脚本, 减轻人工配置工作量. 例如, 字段 6 的验证脚本会自动生成为:

```
select * from 表 1 where 表 1.字段 6 not in (枚举值 1, 枚举值 2,...)
```

表 1 字段验证类型

表名	字段名	验证类型	验证内容
表 1	字段 1	非空	非空
	字段 2	长度	长度值
	字段 3	范围	(最小值,最大值)
	字段 4	格式	正则表达式
	字段 5	唯一性	唯一性
	字段 6	枚举值	{枚举值 1, 枚举值 2, ...}
...

通过数据质量校验的数据将最终进入主数据平台, 按照电网全景模型的规范组合在一起, 供终端用户供电可靠性系统等第三方系统消费. 可靠性系统通过前后两次数据的变化情况, 识别出用户的迁入和迁出.

在数据更新机制方面, 目前主数据平台采用每天全量更新的机制, 这种方式具有易于实现、数据一致性好的优点; 但也有耗时长、对源系统和消费者系统的计算负载压力大等缺点. 这也是下一步系统需要改

进的主要方向之一.

4.2 运行数据集成设计

运行数据记录了每个用户的停电起止时间、停电原因等, 是供电可靠性指标计算的核心要素. 电力信息化系统由于建设年份不一, 采用的技术架构不同, 因此本文采用 SOA 架构集成源系统的各类运行数据, 包括中低压停电事件、班组现场工作记录等. 终端用户供电可靠性系统获取这些运行数据后, 再从其中提取出受影响用户、停电时长、转供电时间等信息.

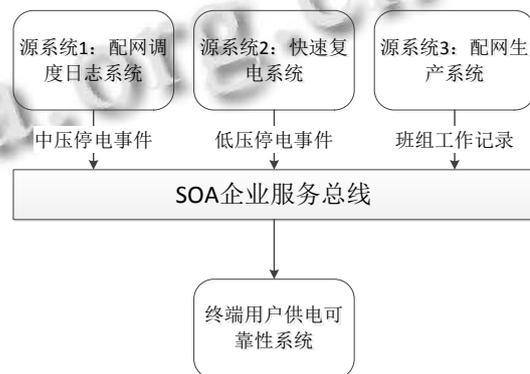


图 6 运行数据的集成设计方案

4.3 核心指标算法

量化终端用户供电可靠性管理水平, 可以用如下一系列指标加以衡量: 供电可靠率、用户平均停电时间、用户平均停电次数、用户平均故障停电次数. 其中, 核心指标供电可靠率 RS 可用以下公式表述^[13]:

$$RS = \left(1 - \frac{AIHC}{T}\right) \quad (1)$$

其中, T 为给定时间段; $AIHC$ 为用户平均停电时间, 定义为:

$$AIHC = \frac{\sum_{i=1}^n t_i \times n_i}{N} \quad (2)$$

对于终端可靠性, 其 t_i 和 n_i 分别为每次分段停电的持续时间和受影响终端用户数. 由公式(1)和(2)可知, 在给定时间区间 T 内, 给定供电范围的总客户数 N 可以认为是固定的, 因此 RS 主要受到 t_i 和 n_i 影响.

对于 n_i 的计算, 如前所述, 按照国家现行标准的定义^[14], 国内的供电可靠性信息系统通常是以变压器为单位, 把公变下的低压用户合并为一个虚拟的中压用户. 而终端可靠性则在国标基础上提出了更严格的要求, 指标计算以中低压的终端用户为颗粒度^[15,16].

由于采用了改进的电网全景模型,对于城市电网中常见的低压停电、低压负荷调整等电网日常操作,系统可以完全反映受停电影响的每位用户.以拓扑变化较为复杂的低压负荷调整为例,需要将一个变压器下的部分低压用户供电关系转移至另外一个变压器下.在使用“站线变户”模型时,此类情况无任何表述方法,通常忽略;在使用常规的全景电网模型时,无法描述单个变压器下的部分用户,只能采取按经验值折算的方法;而使用改进的电网模型时,可直接描述准确的 n_i 值.

对于 t_i 的计算,存在分批复电、单个用户部分停电等特殊情况,在现行的国标中通常是采取折算,精确度受到人为因素影响很大.以分批复电为例,对于中压分批复电,三类模型都能正确描述;对于低压分批复电,模型1和2的 t_i 都以变压器为单位,因此与 n_i 的计算类似只能折算;而基于改进的电网全景模型,可以为每位停电用户计算单独的停电时间和停电类型,从而解决这类问题.

如图7所示,综合基础数据和运行数据,系统可进行供电可靠性指标的自动统计.具体步骤如下:

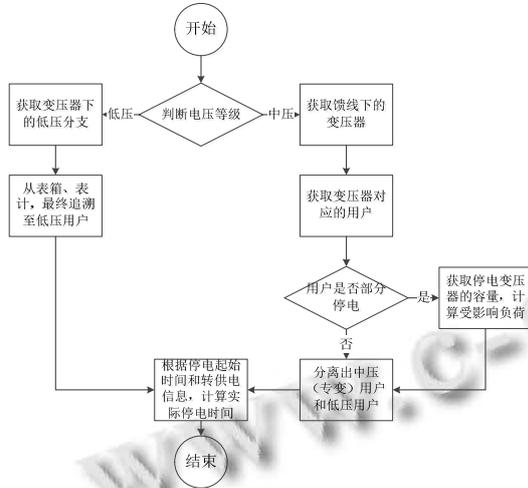


图7 核心指标算法逻辑

① 对于低压停电,根据停电范围在电网全景模型中追溯,直至找出末端用户

② 对于中压停电,首先需计算出停电馈线下的变压器

③ 根据变压器、安装点,计算出受影响的中压用户

④ 若中压用户是专变用户,则判断是否该用户

的所有变压器都停电.若是,则不做特殊处理;若否,则将该用户专门标识“部分停电”,并计算该用户的停电变压器容量之和.

⑤ 若中压用户是公变,则参考低压停电的逻辑,追溯出公变下的所有低压用户.

⑥ 最后,对于所有停电受影响的用户,根据停电起始时间、转供电步骤,识别出实际停电的时间段,进行最后的指标统计

4.4 可视化指标展示

通常,信息系统的报表对于地区数据的展现均采用柱状图、饼图等传统的统计报表,存在着缺乏地理位置认知感的问题.而如果直接将GIS平台等“重量级应用”集成至应用系统中,则需要安装C/S架构的客户端软件,且运行过程中占用机器资源非常高.另一方面,本文系统仅需绘制区域轮廓用于指标展示,不需要绘制复杂的街道、山川河流和电网设备.因此,本文未采用切片地图等主流web地图展示技术,而是采用了SVG+JavaScript的Web化的轻量级解决方案.SVG是W3C所推荐的Web矢量图标准技术,大部分浏览器均支持.

可视化指标展示计算过程如图8所示.具体步骤如下:

① 图模交互中心对GIS地图文件进行解析,提取全市和各区域(城区、街道办等)的轮廓坐标点.为简化描述,压缩数据传输量,系统采用了近似多边形来描述一个区域的轮廓.

② 对全市和各区域坐标点进行坐标转换,将(经度,纬度)坐标转换为计算机视窗(x,y)坐标.

③ 将一个区域的所有多边形轮廓坐标点包装为一个JSON(JavaScript Object Notation)对象,发送至浏览器.JSON相比XML具有语法简单、数据量小的优点,被广泛用于JavaScript程序中,作为与服务器交互的格式.本文系统的JSON格式举例如下:

```

{
  "pinyin": "futian",
  "name": "福田区",
  "x": 382.5502,
  "y": 497.9866,
  "path": "M 430 422 ,C 430 422 430.79 423.16 430.79 423.16 ,C 430.79 423.16 440 432.19 440 432.19 ,C 440 432.19 444.69 436.38 444.69 436.38 ,C 444.69 436.38

```

442 448 442 448 ,C 442 448 446 450 446 450 ,C 446 450
456 448 456 448 ,C 456 448 466 454 466 454 ,C 466 454
470 458 470 458 ,C 470 458 474 456 474 456 ",

"id": "FT0002"

}

④ 浏览器对 JSON 对象进行解析, 并调用内置的 SVG 引擎在浏览器窗口中绘制地图多边形轮廓. 结合从终端用户供电可靠性系统获取的指标数值, 对 SVG 多边形进行颜色和文字的渲染. 渲染效果图原型如图 9 所示.

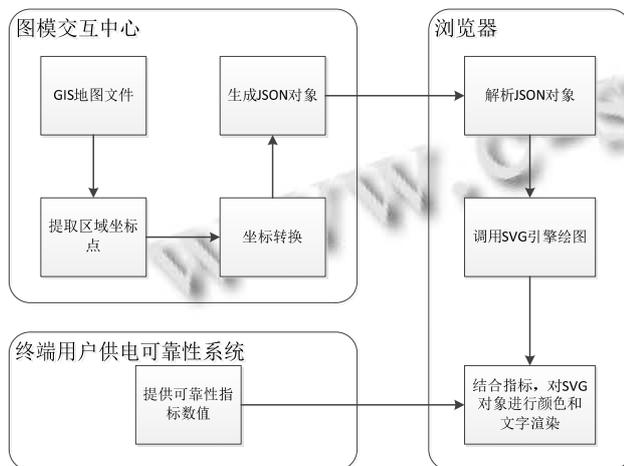


图8 可视化指标展示逻辑



图9 指标渲染效果图原型

5 系统应用成效

本文所设计和实现的系统已应用于国家能源局在深圳电网的终端用户供电可靠性管理试点项目中. 以2014年为例, 已自动采集中低压事件约1.4万条, 采集基础数据包括六千多条中压线路、七万六千多台变压器、20余万条中压用户变化记录、80余万条低压用户变化记录.

通过与当前电力系统广泛使用的中电联供电可靠性系统(简称“中电联系统”)进行比较, 根据抽样测试,

中电联系统平均每条停电事件的手工录入需20分钟, 平均每个基础数据的变化需要2分钟的维护时间, 则以2014年数据变化量计, 共需要近4750个人天(1人天以8人时折算), 约18人年(1人年以260人天折算). 本文所述系统上线后, 上述工作都由计算机自动完成, 保守假设至少节约50%的手工录入工作量, 按每人年10万元的单个成本计算, 折合人力成本约: $10 \text{万} * 18 * 0.5 = 90 \text{万元}$.

通过采用本文设计的系统, 可靠性统计所需的绝大部分数据都能够实现数据集成自动采集, 避免了人工录入造成的数据失真, 减轻了工作量, 节约了人力成本.

6 结论

本文探索了一种依托改进的全景电网模型, 实现终端用户供电可靠性系统数据建模、数据自动采集的方法, 将其用于指导信息系统开发. 通过实际使用检验证明, 本文提出的系统设计思路能较好地满足终端用户供电可靠性管理的要求, 模型能够基本覆盖供电企业在日常管理中遇到的各类情况, 适应城市电网低压计划停电和低压负荷调整的情况, 系统界面人机交互友好, 能够满足供电可靠性管理的实际需要. 在当前电力体制改革的背景下, 有利于促进城市电网企业向客户导向型企业转变, 提升电力服务水平.

参考文献

- 1 卫茹,张焰,李力. 低压系统用户供电可靠性统计评价方法. 现代电力,2012,29(4):12-16.
- 2 IEEE Std 1366-2001. IEEE Trial-Use Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices, 1998.
- 3 North American Electric Reliability Corporation. Reliability Standards for the Bulk Electric Systems of North America, 2010.
- 4 许明,廖志伟,张沛. 中美配电系统用户供电可靠性指标对比分析. 广东电力, 2012,25(9):67-71.
- 5 宋云亭,张东霞,吴俊玲,彭冬,梁才浩,邱野,陈志刚,吴琼,曹静. 国内外城市配电网供电可靠性对比分析. 电网技术, 2008,32(23):13-18.
- 6 林旭中. 城区供电局供电可靠性管理实践与研究[硕士学位论文]. 杭州:浙江工业大学,2009.
- 7 赵水英. 基于图形化的配电网用户供电可靠性信息系统[硕

- 士学位论文].西安:西安理工大学,2009.
- 8 袁德富,张勇军,李邦峰.供电可靠性管理创新模式探讨.电力系统保护与控制,2010,38(11):99-103.
- 9 李颖杰.基于电网全景模型的服务调度系统设计与实现.电力信息与通信技术,2013,11(9):74-79.
- 10 赖晓文,陈启鑫,夏清,赵翔宇,杨明辉,张健.基于 SVG 技术的电力系统可视化平台集成与方法库开发.电力系统自动化,2012,36(16):76-81.
- 11 张洁.基于 SVG 的可视化技术在电力系统中的应用[硕士学位论文].杭州:浙江大学,2006.
- 12 华斌.供电企业可靠性管理的系统性评价与改进.华东电力,2009,37(9):1588-1590.
- 13 瞿海妮,刘建清.国内外配电网供电可靠性指标比较分析.华东电力,2012,40(9):1566-1570.
- 14 中国电力企业联合会电力可靠性管理中心.供电系统用户供电可靠性评价规程. DL/T 836-2012, 2012.
- 15 卢黎晖,俞志峰,宗琳.供电企业的可靠性管理及其提高策略.电力系统及其自动化学报,2010,22(2):152-156.
- 16 熊志全.数字化电网模型.电力信息化,2005,3(5):77-79.