

供电可靠性简化算法及其在线计算实现

杨金涛¹ 倪威中¹ 黄佳晨² 吴倩³

(1. 国网浙江省电力有限公司杭州市钱塘区供电公司 2. 天地电研(北京)科技有限公司杭州分公司 3. 天地电研(北京)科技有限公司)

摘要：目前，可靠性计算多集中于现状年份的计算，对规划年份的计算多采用模糊估算的方式进行，且计算方法复杂多样，不利于软件的模块化实现。本文基于潮流的拓扑简化模型深入分析可靠性计算的本质，将其经典计算公式中与网架结构有关的部分归总为网架系数，将与设备有关的部分集合为设备系数，并结合实际应用进行计算简化。然后基于电网资源业务中台和数据中台，采用中台化（微服务/微应用）+ 协同计算框架建设模式，融合可靠性设施台账、拓扑、图模等基础数据，并获得配电网设备元件故障率、平均恢复时间等重要参数，根据简化计算公式开发出供电可靠性在线计算微应用模块，计算结果可为配电网可靠性管理和决策提供便捷的数据支撑。本文还给出了软件架构设计具体实现和界面展示效果。

关键词：供电可靠性；拓扑潮流；网架系数；设备系数；业务架构；数据架构；技术架构

0 引言

实现配电网供电可靠性水平的评估和预测，对于支撑配电网网架优化、设备改造辅助决策等意义重大。目前，对于现状年的配电网可靠性计算多采用经典计算公式，对于规划年的可靠性计算大多根据规划年相关数据，收集各类影响因素数据，通过大数据分析技术在考虑多因素影响的基础上，通过各种模糊算法对可靠性指标进行合理预测。部分地市基于自身实际情况开发了不同的可靠性计算软件；但由于不同开发厂商使用数据模型和算法各异，难以实现算法和数据的互通互用，一定程度上造成了资源浪费。

本文遵从国网公司 CIM 2.0 数据模型、基于电网资源业务中台和数据中台强大的数据服务功能，以微服务的形式开发出供电可靠性在线计算模块，采用容器化

的方式实现“即插即用”，方便嵌入诸如“网上电网”之类的统一业务平台，有利于贯通“省-市-县”一体化计算，实现各地区算法和数据的便捷融合。

1 简化算法

1.1 简化思路

配电网规划涉及的计算量非常大，电网规模大、涉及的年份多方案多；导致规划对快速计算的要求较高，而对计算精度的要求远不如控制保护系统的要求高。为达到快速计算的目的，可靠性在线评估利用潮流计算模型，基于配网系统的拓扑结构，将实际配电网网络转化成基于设备串并联的可靠性计算网络。

首先根据设备之间的串并联关系生成面向可靠性计算的拓扑简化模型。然后采取可靠性潮流算法，

以关键元件（线路、配变、开关等设备）为对象，在一个前推后代过程中，一次性计算出潮流、可靠性指标，实现一体化计算的效果。具体地，前向计算中从后往前累加负荷、累加区段架空线路长度、累加区段电缆线路长度、累加可靠性计算参数、累加下游可转供负荷、计算下游转供时间。后向计算中从前往后计算潮流、每个区段的停电损失，累加形成可靠性计算指标。

基于自动生成的拓扑关系信息，可将经典可靠性计算公式简化为与网架结构有关的部分和与设备有关的部分两大类，便于评估和预测馈线分段、整条馈线、区域的可靠性指标。本文所提可靠性计算以馈线的分段为单位，经累加得到馈线的指标；县（区）电网、供电网格、供电单元的可靠性指标可通过所研

究区域内馈线可靠性指标的综合平均值获得。限于篇幅，仅介绍馈线的可靠性指标计算。

1.2 可靠性参数说明

供电可靠性计算模型关键技术指标如下表所示。

1.3 现状年故障停电的计算

1.3.1 计算思路

根据故障复电方式的不同将配电网分为架空系统、电缆系统；由于柱上开关故障率非常低，故仅考虑线路、配变的故障。电缆系统中开关故障率与线路相当，还需考虑开关故障。

1.3.2 架空系统

(1) 计算模型

架空系统简化模型如图 1 所示，为简化计算，将架空系统简化为主干线与主干线之间通过开关联络的

表 供电可靠性计算模型关键技术参数统计表

符号	含义	单位
f_1	架空（电缆）线路故障停电率	次/（百千米·年）
f_2	开关故障停电率	次/（百台·年）
f_3	配变故障停电率	次/（百台·年）
f_{1p}	架空（电缆）线路预安排停电率	次/（百千米·年）
f_{2p}	开关预安排停电率	次/（百台·年）
f_{3p}	配变预安排停电率	次/（百台·年）
L_{a1}	单条架空（电缆）线路平均总长度	千米
L_{a2}	单条架空（电缆）线路分支线路平均长度	千米
L_{a3}	单条架空（电缆）线路主干线路平均长度	千米
n	单条架空（电缆）线路平均分段数（环网单元数）	个
N	单条架空（电缆）线路平均装接用户数	个
T_{av}	平均故障排查时间	小时
T_{re}	平均故障修复时间	小时
T_{rp}	平均预安排停运时间	小时
S	停电时户数	时·户
$K_1\%$	可转供率	—
$K_2\%$	双电源率	—
$K_3\%$	三遥占比率 a	—
K_4	故障排查时间 b 与检修时间的比值	—
K_5	开关故障次数与主干线路故障次数的比值	—
K_6	开关预安排停电率与架空（电缆）预安排停电率的比值	—
K_7	分支线长度与线路总长比值	—
R_{at}	网架系数 c	—
R_{dp}	设备系数 d	—
T_{R1}	架空线路故障停电导致的系统平均故障停电时间	小时/户
T_{R2}	电缆线路故障停电导致的系统平均故障停电时间	小时/户
T_{R3}	配变故障停电导致的系统平均故障停电时间	小时/户
T_{1p}	架空线路预安排停电导致的系统平均预安排停电时间	小时/户
T_{2p}	电缆线路预安排停电导致的系统平均预安排停电时间	小时/户
T_{3p}	配变预安排停电导致的系统平均预安排停电时间	小时/户

系统。等效后第 i 段线路长度等于包括分支线的 i 段内线段长度累加和；第 i 段用户个数等于包括分支线的 i 段内用户累加和。

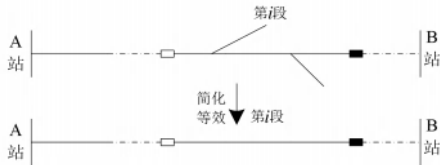


图1 架空系统典型接线及简化模型

架空系统的系统平均故障停电时间为：

$$T_{JG} = 1/100 f_1 L_{al} \left[k_z \% \left(T_{che} + \frac{T_{rep}}{n} \right) + (1 - k_z \%)(T_{che} + \frac{n+1}{2n} T_{rep}) \right] \quad (1)$$

考虑双电源、配电自动化的影响，架空系统的系统平均故障停电时间为：

$$T_{JG} = 1/100 f_1 L_{al} (1 - k_s \%)\left\{ k_z \% \left[(1 - k_p \%)(T_{che} + \frac{T_{rep}}{n}) + (1 - k_z \%)(1 - k_p \%)(T_{che} + \frac{n+1}{2n} T_{rep}) \right] \right\} \quad (2)$$

$$T_{JG} = T_{rep} R_{netJG} R_{reqJG} \quad (3)$$

其中，

$$R_{netJG} = (1 - k_s \%)\left\{ k_z \% \left[(1 - k_p \%)(k_h + \frac{1}{n}) + (1 - k_z \%)(1 - k_p \%)(k_h + \frac{n+1}{2n}) \right] \right\} \quad (4)$$

$$R_{reqJG} = 1/100 f_1 L_{al} \quad (5)$$

式中， $k_n = T_{che}/T_{rep}$ ，表示在不考虑配电自动化情况下故障排查时间与检修时间的比值。

(2) 电缆系统

电缆系统可转供情况下的典型接线模式如图2所示， n 为环网单元总数。

电缆系统的系统平均故障停电时间为：

$$T_{CG} = 1/100 k_z \% \left(f_1 L_{al} T_{che} + f_1 L_{tz} \frac{1}{4n} T_{rep} + 6n f_k T_{che} + 6 f_k T_{rep} \right) + 1/100 (1 - k_z \%)\left[f_1 L_{al} T_{che} + f_1 L_{tz} \frac{n+1}{2n} T_{rep} + f_1 L_{tz} \frac{1}{4n} T_{rep} + 6 f_k n T_{che} + 3 f_k (n+1) T_{rep} \right] \quad (6)$$

考虑双电源、配电自动化的影响，电缆系统的系统平均故障停电时间为：

$$T_{CG} = 1/100 k_z \% (1 - k_s \%)\left[f_1 L_{al} T_{che} (1 - k_p \%)(1 - k_s \%)(1 - k_p \%)(T_{che} + \frac{T_{rep}}{n}) + 6n f_k T_{che} (1 - k_p \%)(1 - k_s \%)(1 - k_p \%)(T_{che} + \frac{T_{rep}}{n}) + 6 f_k T_{rep} (1 - k_s \%)(1 - k_p \%)(1 - k_s \%)(1 - k_p \%)(T_{che} + \frac{T_{rep}}{n}) \right] + 1/100 (1 - k_z \%)(1 - k_s \%)\left[f_1 L_{al} T_{che} (1 - k_p \%)(1 - k_s \%)(1 - k_p \%)(T_{che} + \frac{T_{rep}}{n}) + 6n f_k T_{che} (1 - k_p \%)(1 - k_s \%)(1 - k_p \%)(T_{che} + \frac{T_{rep}}{n}) + 6 f_k T_{rep} (1 - k_s \%)(1 - k_p \%)(1 - k_s \%)(1 - k_p \%)(T_{che} + \frac{T_{rep}}{n}) \right] \quad (7)$$

令 k_b 为分支线长度与线路总长度的比值，进一步简化得到：

$$T_{CG} = 1/100 k_z \% (1 - k_s \%)\left\{ f_1 L_{al} \left[(1 - k_p \%)(T_{che} + \frac{k_b}{4n} T_{rep}) + 6 f_k n \left[(1 - k_p \%)(T_{che} + \frac{T_{rep}}{n}) \right] \right] \right\} + 1/100 (1 - k_z \%)(1 - k_s \%)\left\{ f_1 L_{al} \left[(1 - k_p \%)(T_{che} + \frac{2(n+1)(1 - k_b) + k_b}{4n} T_{rep}) + 6 f_k n \left[(1 - k_p \%)(T_{che} + \frac{n+1}{2n} T_{rep}) \right] \right] \right\} \quad (8)$$

表示为网架系数与设备系数的乘积如下：

$$T_{CG} = T_{rep} R_{netCG} R_{reqCG} \quad (9)$$

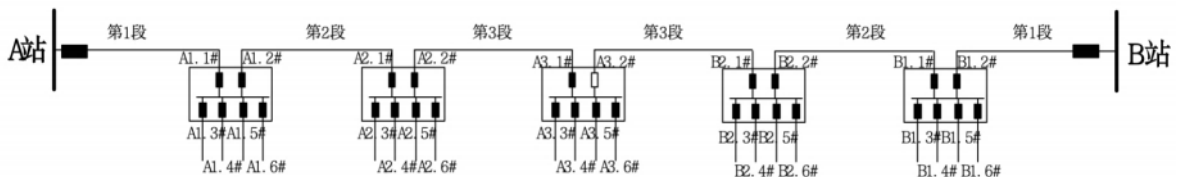


图2 电缆系统(可转供情况)典型接线模式

其中，网架系数为：

$$R_{\text{netCG}} = k_z\%(1-k_s\%) \left\{ \left[(1-k_p\%)k_h + \frac{k_b}{4n} \right] + k_f \left[(1-k_p\%)k_h + \frac{1}{n} \right] \right\} + (1-k_z\%)(1-k_s\%) \left\{ \left[(1-k_p\%)k_h + \frac{2(n+1)(1-k_b)+k_b}{4n} \right] + k_f \left[(1-k_p\%)k_h + \frac{n+1}{2n} \right] \right\} \quad (10)$$

设备系数为：

$$R_{\text{reqCG}} = 1/100 f_1 L_{\text{al}} \quad (11)$$

式中， $k_f=6nf_k/f_1L_{\text{al}}$ ，表示开关故障次数与主干线路故障次数的比值。

(3) 配变

假设配变高压侧均配置熔丝保护，配变故障不会引起支线及主干线故障，系统平均故障停电时间为：

$$T_{\text{TG}} = 1/100 f_1 T_{\text{rep}} \quad (12)$$

1.4 规划年故障停电的计算

规划项目实施后，项目关联电网的负荷、网架结构、设备水平会发生相应的改变。这表现在，上述现状年故障停电时间的计算公式中，网架系数、设备系数会有所提升，在发生同样故障情况下的可靠性水平会有所提高。

1.4.1 线路故障可靠性提升值

(1) 架空系统

在现有技术、管理水平不变（即认为故障基准停电时间 T_{rep} 不变）的情况下，架空系统规划方案可靠性提升值为：

$$\Delta T_{\text{JG}} = T_{\text{JG}} \times \left(1 - \frac{R_{\text{netJG,A}} \times R_{\text{reqJG,A}}}{R_{\text{netJG,B}} \times R_{\text{reqJG,B}}} \right) \quad (13)$$

式中， $R_{\text{netJG,B}}$ 、 $R_{\text{netJG,A}}$ 为投运前后架空系统网架系数； $R_{\text{reqJG,B}}$ 、 $R_{\text{reqJG,A}}$ 投运前后架空系统设备系数。

计算设备系数时应重点考虑设备水平提升对设备故障概率下降的作用。本文假定设备故障概率与残旧

设备比例成正比，可得：投运后开关故障概率 = 投运前开关故障概率 × 投运后残旧开关比例 / 投运前残旧开关比例，投运后线路故障概率 = 投运前线路故障概率 × 投运后残旧线路比例 / 投运前残旧线路比例。

(2) 电缆系统

电缆系统中，规划方案可靠性提升值为：

$$\Delta T_{\text{CG}} = T_{\text{CG}} \times \left(1 - \frac{R_{\text{netCG,A}} \times R_{\text{reqCG,A}}}{R_{\text{netCG,B}} \times R_{\text{reqCG,B}}} \right) \quad (14)$$

式中， $R_{\text{netCG,B}}$ 、 $R_{\text{netCG,A}}$ 为投运前后架空系统网架系数； $R_{\text{reqCG,B}}$ 、 $R_{\text{reqCG,A}}$ 投运前后架空系统设备系数。

1.4.2 配变故障可靠性提升值

方案实施后，配变故障的可靠性提升值为：

$$\Delta T_{\text{TG}} = T_{\text{TG}} \times \left(1 - \frac{R_{\text{reqTG,A}}}{R_{\text{reqTG,B}}} \right) \quad (15)$$

式中， T_{TG} 为现状电网配变故障停电小时数； $R_{\text{reqTG,B}}$ 、 $R_{\text{reqTG,A}}$ 为项目投运前后的设备系数。

配变的设备系数与配变的故障概率相关，本文假定配变故障概率与残旧配变比例成正比，可得：投运后配变故障概率 = 投运前配变故障概率 × 投运后残旧配变比例 / 投运前残旧配变比例。

1.5 现状年预安排停电的计算

预安排停电原则上要求事先做好最优转供电方案，故预安排的停电影响与故障相比缺少排查时间，即 $T_{\text{che}}=0$ 。

(1) 架空系统

预安排停电可通过预先计划转供方案，尽量缩小停电范围。

架空系统的系统平均预安排停电时间为：

$$T = \frac{S}{N} = 1/100 f_{\text{ly}} L_{\text{al}} (1-k_s\%) \left[k_z\% \frac{1}{n} + (1-k_z\%) \left(\frac{n+1}{2n} \right) \right] T_{\text{yp}} \quad (16)$$

表示为网架系数与设备系数的乘积：

$$T_{\text{Y}} = T_{\text{yp}} R_{\text{netJY}} R_{\text{reqJY}} \quad (17)$$

其中：

$$R_{\text{netJY}} = (1 - k_s\%) \left[k_z\% \frac{1}{n} + (1 - k_z\%) \left(\frac{n+1}{2n} \right) \right] \quad (18)$$

$$R_{\text{reqJY}} = 1/100 f_{\text{ly}} L_{\text{al}} \quad (19)$$

(2) 电缆系统

类似可得电缆系统预安排停电情况下系统平均预安排停电时间为：

$$T_{\text{CY}} = 1/100 f_{\text{ly}} L_{\text{al}} (1 - k_s\%) \left[k_z\% \left(\frac{k_b}{4n} + 6k_g \right) + (1 - k_z\%) \left(\frac{n+1}{2n} + 3k_g (n+3) \right) \right] T_{\text{yp}} \quad (20)$$

表示为网架系数与设备系数的乘积：

$$T_{\text{CY}} = T_{\text{yp}} R_{\text{netCY}} R_{\text{reqCY}} \quad (21)$$

$$R_{\text{netCY}} = (1 - k_s\%) \left[k_z\% \left(\frac{k_b}{4n} + 6k_g \right) + (1 - k_z\%) \left(\frac{n+1}{2n} + 3k_g (n+3) \right) \right] \quad (22)$$

$$R_{\text{reqCY}} = 1/100 f_{\text{ly}} L_{\text{al}} \quad (23)$$

(3) 配变

配变预安排停电不会引起其他用户停电，系统平均预安排停电时间为：

$$T_{\text{TY}} = 1/100 f_{\text{ly}} T_{\text{ty}} \quad (24)$$

1.6 规划年预安排停电的计算

规划项目实施后，中压网架结构将得到改善，可转供率、双电源率、分段数等指标提升，使得在计划停电的情况下停电用户数减少，预安排可靠性提升。

(1) 线路预安排可靠性提升值

1) 架空系统在现有技术、管理水平不变的情况下，架空系统中，规划方案可靠性提升值为：

$$\Delta T_{\text{JY}} = T_{\text{JY}} \times \left(1 - \frac{R_{\text{netJY,A}} \times R_{\text{reqJY,A}}}{R_{\text{netJY,B}} \times R_{\text{reqJY,B}}} \right) \quad (25)$$

式中， $R_{\text{netJY,B}}$ 、 $R_{\text{netJY,A}}$ 为投运前后架空系统网架系数； $R_{\text{reqJY,B}}$ 、 $R_{\text{reqJY,A}}$ 投运前后架空系统设备系数。

在计算设备系数时，设备预安排停电概率是重点指标。预安排停电主要是受电网建设工程影响，年度

投资费用与预安排停电概率基本成正比关系，有：

投运后线路预安排停电概率 = 投运前线路预安排停电概率 × 规划年度配网投资 / 投运前年度配网投资

2) 电缆系统中，规划方案可靠性提升值为：

$$\Delta T_{\text{CY}} = T_{\text{CY}} \times \left(1 - \frac{R_{\text{netCY,A}} \times R_{\text{reqCY,A}}}{R_{\text{netCY,B}} \times R_{\text{reqCY,B}}} \right) \quad (26)$$

式中， $R_{\text{netCY,B}}$ 、 $R_{\text{netCY,A}}$ 为投运前后架空系统网架系数； $R_{\text{reqCY,B}}$ 、 $R_{\text{reqCY,A}}$ 投运前后架空系统设备系数。

(2) 配变故障可靠性提升值

方案实施后，配变故障的可靠性提升值为：

$$\Delta T_{\text{TY}} = T_{\text{TY}} \times \left(1 - \frac{R_{\text{reqTY,A}}}{R_{\text{reqTY,B}}} \right) \quad (27)$$

式中， T_{TY} 为现状电网配变预安排停电小时数； $R_{\text{reqTY,B}}$ 、 $R_{\text{reqTY,A}}$ 为项目投运前后的设备系数。

系统平均停电时间降低值的计算为累计线路、配变故障及预安排停电情况，求得规划项目实施后系统平均停电时间降低值：

$$\Delta T = \Delta T_{\text{JG}} + \Delta T_{\text{CG}} + \Delta T_{\text{TG}} + \Delta T_{\text{JY}} + \Delta T_{\text{CY}} + \Delta T_{\text{TY}} \quad (28)$$

2 架构设计

供电可靠性评估功能的实现采用微服务架构 (Microservice Architect)。数据库采用 PostgreSQL，界面开发采用 Vscode，界面编程语言采用 Java，算法编程语言采用 C#，应用 C/S 架构，客户端操作系统支持 Win10/win7。

2.1 业务架构

供电可靠性在线计算模块的实现基础为配电网架拓扑分析模块，其业务架构如图 3 所示。

供电可靠性在线计算是以中压拓扑图及电网负荷数据、停运数据为基础，根据供电可靠性简化算法公式，计算出可靠性指标，进而输出现状年和规划年的可靠性计算结果。

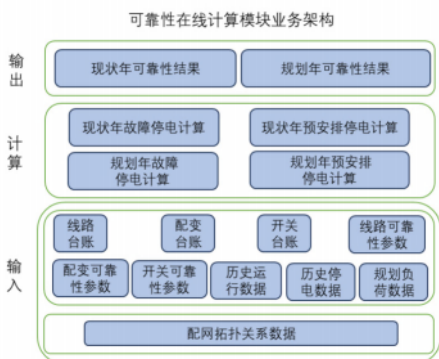


图3 业务架构

2.2 技术架构

技术架构由展现层、业务层、存储层和数据层组成，如图4所示。

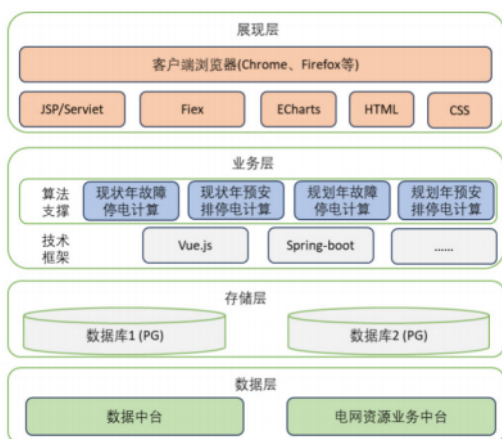


图4 技术架构

数据层基于电网业务中台、数据中台，收集所需输入数据资源。存储层采用两个互为备用的 PostgreSQL 数据库。业务层使用 Spring-boot、Vue.js 设计业务实现技术框架，实现基于潮流拓扑简化公式计算的供电可靠性评估计算。展现层的实现技术可采用 JSP/Serviet、HTML、Fiex、ECharts、CSS，支持用户浏览器 Chrome、Firefox，实现包含现状电网可靠性指标计算、规划电网可靠性指标计算结果的展示。

2.3 数据架构

供电可靠性在线计算模块的数据架构如图5所示。

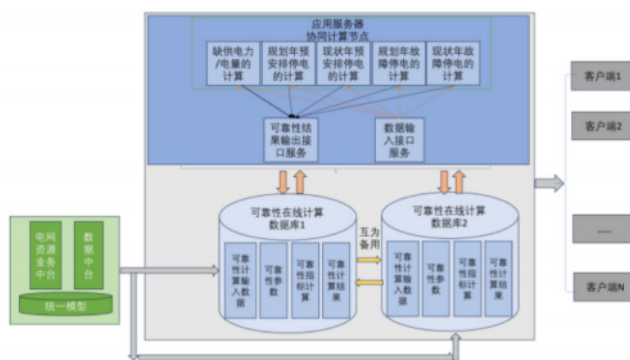


图5 可靠性在线计算的数据流图

通过访问电网资源业务中台的资源管理中心，获取配电网设备基础数据，包括配网拓扑关系数据、配电线路基础参数、配电变压器基础参数等。配电网运行类数据通过访问电网资源业务中台的测点管理中心提供的服务获取，例如，3~5年来配电网停电相关历史运行数据，主要是停电数据。现有区域性负荷现状数据基于电网资源业务中台获取，规划负荷信息需要维护至数据中台后获取。

获取到可靠性计算的输入数据后，将其存储在互为热备用的数据库1和数据库2中，以供应用服务器调取。应用服务器通过数据输入接口服务获取数据至多个协同计算节点，同时实现现状年故障停电计算、规划年故障停电计算、现状年预安排停电计算和规划年预安排停电计算的功能。最后将计算结果通过数据输出接口服务推送至数据库1和数据库2，以便各用户查询和使用。

3 结束语

本文所提供电可靠性在线计算是基于 CIM 2.0 模型，以中压地理拓扑图及电网负荷数据、停电数据为基础，根据拓扑图计算出馈线联络点、分段用户数、分段配变数、分段负荷等数据，满足供电可靠性评估

(下转第 82 页)

(上接第 51 页)

的数据输入要求。可靠性计算以现状年可靠性故障计算、预安排计算为基础,结合规划年线路和设备的可靠性提升值以及规划年网架拓扑,计算出规划年的故障和预安排计算结果。在梳理好业务架构后,即可选择相应的技术架构、搭建配套的数据架构,从而实现模块化的软件开发。

参考文献

- [1] 纪莹, 输变电设施可靠性在线管理系统的开发与应用[J]. 黑龙江科技信息, 2013(30): 39.
- [2] 郭宇刚, 梁定康, 韩肖清. 含分布式电源的配电网可靠性评估[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(2): 139-145.
- [3] 韩俊, 袁栋, 谢珍建, 等. 基于CESS软件的配电网可靠性分析研究[J]. 电子设计工程, 2021, 29(7): 100-104.
- [4] 陈启, 许鹏程, 石道柱, 等. 多电压等级电网可靠性-经济性协调评估[J]. 电器与能效管理技术, 2020(6): 82-88.
- [5] 刘苑红, 王卓, 苏剑. 基于支持向量机的配电网设施可靠性参数预测方法[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(6): 36-42.
- [6] 丁健, 马春雷, 陈宣林, 等. 计及“源-网-荷”影响的主动配电网可靠性评估[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(3): 18-26.
- [7] 韩俊, 谢珍建, 黄河, 等. 基于停电损失计算与成本分析的配电网单元制供电网格可靠性规划[J]. 智慧电力, 2020, 48(1): 63-68, 117.
- [8] 伍梓超, 岑耀扬, 袁秋实, 等. 考虑元件故障率曲线的配电网可靠性评估方法[J]. 计算机与数字工程, 2019, 47(8): 2061-2065.
- [9] 杨刚, 管霖, 林凌雪, 等. 分布式电源并网对配电网馈线供电能力的影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(1): 13-20.
- [10] 许悦, 余涛. 网络拓扑结构与供电可靠性的数学关系分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 168-175.

(收稿日期: 2023-11-03)