

# 藏中-川藏联网的气象风险辨识与西南电网降风险调度辅助决策系统

## 技术方案与测试方案

### 1 功能规划与技术方案

对电网风险可视化系统拟规划的模块包括：气象信息展示、灾害天气统计、线路故障率分析、线路运行状态监测、输电线路输送能力评估、系统信息维护六大功能模块，各模块又分为若干子模块。

#### 1.1 气象信息展示

(1) 根据重庆云辑公司提供的 1km\*1km 的逐小时气象实况数据，在地理信息系统（GIS）上展示温度、湿度、气压、风速、风向、降水六要素信息。

(2) 根据重庆云辑公司提供的未来 72h、1km\*1km 的逐小时预报数据产品，在地理信息系统（GIS）上展示温度、湿度、气压、风速、风向、降水六要素信息。

(3) 根据重庆云辑公司推送的特殊天气及次生灾害预警数据产品，在 GIS 界面上，按气象灾害预警的等级、颜色和图标显示预警信息。所述气象灾害包括：包含暴雨、大风、雷暴、大雾、冰雹、覆冰、台风、泥石流、滑坡。

以上信息同时具备历史信息的表格化查询功能。

#### 1.2 灾害天气统计

##### 1.2.1 按区域统计灾害性天气

某区域对应的网格内，在选定的时间区间内出现某种灾害性天气的次数。

所述灾害性天气包括：包含暴雨、大风、雷暴、大雾、冰雹、覆冰、台风、泥石流、滑坡。

##### 1.2.2 按线路段统计灾害性天气

某输电线路途经的网格内，在选定的时间区间内出现某种灾害性天气的次数。

## 1.3 线路故障率分析

### 1.3.1 故障数据导入

根据西南分部提供的输电线路故障统计 excel 表格，能够直接导入相关数据进入数据库。

### 1.3.2 故障率统计计算

#### 1) 历史同期各月故障率

历史同期月故障率计算公式为

$$f_{km} = \frac{\sum_y n_{kym}}{YT_m L_k} \times 100 \quad (1)$$

式中： $f_{km}$  表示线路  $k$  在历史同期的  $m$  月的故障率，次/(100km·月)； $n_{kym}$  为线路  $k$  在第  $y$  年的  $m$  月的故障次数； $T_m$  表示第  $m$  月的时间； $Y$  为统计的总年数； $L_k$  表示线路  $k$  的长度，km。

同一地区相同电压等级的多条线路的历史同期各月故障率，即：

$$f_m = \frac{\sum_k (f_{km} \times L_k)}{\sum_k L_k} \quad (2)$$

式中： $f_m$  表示该地区的同一电压等级线路在历史同期的  $m$  月的故障率，次/(100km·月)。

#### 2) 不同气象灾害作用下停运时间

此指标反映了恶劣气象环境因素对故障输电设备的修复能力的影响，计算公式为

$$TTR_{kix} = tr_{ki} - tf_{ki} \quad (3)$$

式中： $TTR_{kix}$  表示线路  $k$  第  $i$  次故障的停运时间； $x$  为第  $i$  次跳闸的气象条件类型； $tf_{ki}$  表示线路  $k$  第  $i$  次跳闸时间； $tr_{ki}$  表示线路  $k$  第  $i$  次跳闸后恢复时间。

同一电压等级下多条线路在某一气象因素作用下的平均停运时间：

$$MTTR_x = \frac{\sum_k \sum_i TTR_{kix}}{n_x} \quad (4)$$

式中： $MTTR_x$  为某一电压等级的输电设备在气象因素  $x$  下的平均停运时间； $n_x$  为某电压等级线路在气象条件  $x$  下的故障总次数。

#### 3) 故障时间间隔

改指标反映了气象环境因素下输电线路的故障集中程度和气象灾害对线路的冲击影响程度，计算公式为

$$\text{TBF}_{ki} = tf_{ki} - tf_{ki-1} \quad (5)$$

式中： $\text{TBF}_{ki}$  表示线路  $k$  第  $i$  次与第  $i-1$  次故障之间的时间间隔； $tf_{ki}$  表示线路  $k$  第  $i$  次跳闸时间， $tf_{ki-1}$  表示线路  $k$  第  $i-1$  次跳闸时间。

进一步可以计算线路的平均故障时间间隔：

$$\text{MTBF}_k = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \text{TBF}_{ki} \quad (6)$$

式中： $\text{MTBF}_k$  表示第  $k$  条线路的平均故障时间间隔； $n$  表示线路  $k$  的总故障次数。

#### 4) 短时故障聚集度

线路短时故障聚集度指标  $\text{ST}$ ，反映了雷电、大风、冰雪等灾害天气在短时间内造成多条线路跳闸，呈现出来的故障“聚集效应”：

$$\text{ST} = \text{Count}(i), \quad tf_i - tf_{i-1} \leq \Delta t \quad (7)$$

式中： $\text{Count}(i)$  为计数函数，满足条件时计数加 1； $i$  表示第  $i$  次跳闸事件； $tf_i$  表示第  $i$  次跳闸时间； $tf_{i-1}$  表示第  $i-1$  次跳闸时间； $\Delta t$  表示限定的短期失效间隔，可根据统计的不同气象灾害作用下停运时间，结合调度运行实际需求设定，如关注雷电天气时，可以设定  $\Delta t=10\sim 30\text{min}$ ；关注冰雪天气时，可以设定  $\Delta t=6\sim 12\text{h}$ 。同时，对  $\text{ST} > \text{STH}$  ( $\text{STH}$  为设定的提示阈值，如多重故障的  $\text{STH}=2$ ) 情况进行提示，以便进一步分析其对电网运行风险的影响。

#### 5) 线路高风险区段

线路高风险区段体现对整条输电线路故障风险影响较大的线路段，使风险薄弱环节的挖掘深入到线路段。

对于一条线路，存在故障点集合  $\{N_1, N_2, N_i, \dots, N_j, \dots, N_m\}$ ，那么该线路故障高风险区段是指由设定的距离长度  $L$  所界定的，发生故障的次数占线路总故障次数的比例大于某一百分数  $H$  (如 40%) 的区间  $[N_i, N_j]$ 。由于一条线路可能存在多个故障高风险区段，因此可用多个区间  $[N_i, N_j]$  构成的集合表示，即线路故障高风险区段  $\text{HRS} = \{[N_i, N_j]\}$ ，具体表达式为

$$\text{HRS} = \{[N_i, N_j] \mid \frac{j-i+1}{m} > H, |N_j - N_i| \leq L\} \quad (8)$$

式中： $N_i$  为线路的第  $i$  个故障点； $N_j$  为线路的第  $j$  个故障点； $m$  为故障点总数； $H$

为设定的故障比例百分数； $L$  为设定的距离范围。

## 1.4 线路运行状态监测

对于装设有输电线路在线监测的线路，将监测数据展示到软件界面上。

监测的状态量主要有：导线运行温度，导线电流，导线的倾角，导线所处的环境温度、湿度，导线的图像/视频状态。

## 1.5 线路输送能力评估

### 1.5.1 线路实时运行温度

架空线路的温度决定于其载流值和导线周围气象条件（风、日照、环境温度等），其中，促使导线温度升高的主要因素为导线电流产生的焦耳热以及太阳光对导线的照射。而促使导线温度降低的主要因素为风对导线的对流散热和导线温度与周围环境存在温差而导致的辐射散热。

当导线的吸热与散热平衡时，导线的热平衡方程为

$$P_j + P_{sol} = P_{rad} + P_{conv} \quad (9)$$

式中， $P_j$  为耳效应产生的热，W； $P_{sol}$  为导线表面日照吸热，W； $P_{rad}$  为导线辐射散热，W； $P_{conv}$  为线对流散热，W。分别介绍如下。

#### 1) 焦耳效应

功率损耗  $P_j$  (W/m) 可由下式计算

$$P_j = R_T I^2 \quad (10)$$

式中， $R_T$  为度为  $T$  时的导线电阻， $\Omega/m$ ； $I$  为线电流，A。

#### 2) 日照吸热

日照吸热  $P_{sol}$  (W/m) 可由下式计算

$$P_{sol} = \gamma D S_i \quad (11)$$

式中， $\gamma$  为日照辐射吸热系数； $D$  为导线直径，m； $S_i$  为日照强度， $W/m^2$ 。

#### 3) 辐射散热

辐射散热  $P_{rad}$  (W/m) 可由下式计算

$$P_{rad} = S \pi D K_e (T_2^4 - T_1^4) \quad (12)$$

式中， $S$  为史蒂芬波兹曼常数， $5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ ； $D$  为导线直径，m； $K_e$  为相对黑体的发射系数； $T_2$  为线最终平衡温度，K； $T_1$  为境温度，K。

#### 4) 对流散热

此处仅考虑强迫对流散热  $P_{conv}$ ，可由下式计算

$$P_{conv} = \lambda Nu (T_2 - T_1) \pi \quad (13)$$

式中， $\lambda$  与导线接触的空气膜的热导率， $0.02585 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ； $N_u$  为努塞尔特数，可由式(14)得出

$$N_u = 0.65 \text{Re}^{0.2} + 0.23 \text{Re}^{0.61} \quad (14)$$

式中， $R_e$  是雷诺数，可由式(15)得出

$$\text{Re} = 1.644 \times 10^9 \nu D \left\{ \left[ T_1 + 0.5(T_2 - T_1) \right] \right\}^{-1.78} \quad (15)$$

式中， $D$  为导线直径，m； $\nu$  为风速，m/s； $T_2$  为导线最终平衡温度，K； $T_1$  为环境温度，K。

导线运行温度采用数值迭代的方法计算，具体程序单独提供。每一段线路计算后，展示沿线路各段的导线运行温度估计值。

### 1.5.2 输电线路热容量

因此，根据稳态热平衡方程(9)，可计算导线最高允许的载流量，即

$$I_{L\max} = \left[ (P_{rad} + P_{conv} - P_{sol}) / R_T \right]^{1/2} \quad (16)$$

式中， $R_T$  为温度为  $T$  时的导线电阻， $\Omega/\text{m}$ 。

此次计算线路的线路均为 JL/G1A-500/45 型钢芯铝绞线，其具体参数见表 1.1

表 1.1 JL/G1A-500/45 型钢芯铝绞线线路参数

型号	20℃时直流电阻 / $(\Omega/\text{km})$	电抗 / $(\Omega/\text{km})$	电纳 / $(\mu\text{S}/\text{km})$	直径 /mm	最高允许运行温度 /℃
JL/G1A-500/45	0.0578	0.2985	5.804	30	70

由于线路各区段是串联的关系，每一段线路计算后，以沿线最小的导热热容量作为整条线路的热容量。

### 1.5.3 N-1 准则下的极限传输能力

N-1 准则可以保证电网的稳定以及保证用户得到负荷质量要求的连续供电，因此

对电网进行  $N-1$  安全分析是十分必要的，尤其是分析输电断面  $N-1$  情况下的输送能力。藏中—川藏输电断面卡口电流由开关电流  $I_{QF}$ 、刀闸电流  $I_{QS}$ 、电流互感器电流  $I_{CT}$  以及输电线路载流量  $I_{Lmax}$  共同确定。

$$I_{bn} = \min \{I_{Lmax}, I_{QF}, I_{QS}, I_{CT}\} \quad (17)$$

因此， $N-1$  准则下输电线路的控制功率计算方式为

$$P = \sqrt{3}UI_{bn} \cos \varphi \quad (18)$$

式中， $U$  为线路额定电压 500kV； $I_{bn}$  为卡口电流，A； $\cos \varphi$  为功率因数，取 0.95。

#### 1.5.4 输电线路载流裕度

输电线路载流裕度表示导线当前的卡口电流与导线实际负载的电流的之差，即

$$I_{margin} = I_{bn} - I \quad (19)$$

换算成输送功率的计算公式同(18)（需注意电流改成  $I_{margin}$ ）

### 1.6 系统信息维护

本软件应具有系统信息维护模块，包含电压等级、变电站、气象分区、GIS 地区维护、单位部门、角色管理、用户管理、系统配置、系统帮助和系统日志等功能。以上功能除信息的展示外，还应提供对信息的添加、修改和删除等功能，以便于使用人员进行维护。

## 2 软件系统测试方案

开发完成后，本软件系统按照如下功能模块进行测试验收：

### 2.1 气象信息展示

功能描述	测试结果	备注
实况气象展示	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
气象预报展示	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
气象灾害预警展示	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
历史气象数据查询	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	

## 2.2 灾害天气统计

功能描述	测试结果	备注
按区域统计灾害天气	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
按线路段统计灾害天气	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	

## 2.3 线路故障率分析

功能描述	测试结果	备注
历史同期各月故障率	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
不同气象灾害作用下停运时间	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
故障时间间隔	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
短时故障聚集度	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
线路高风险区段	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	

## 2.4 线路运行状态监测

功能描述	测试结果	备注
导线运行温度监测	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
导线电流监测	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
导线倾角监测	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
导线所处环境温度、湿度监测	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
导线视频和图像监测	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	

## 2.5 线路输送能力评估

功能描述	测试结果	备注
输电线路分区段实时运行温度	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
输电线路热容量	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
N-1 准则下的极限传输能力	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
输电线路载流裕度	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	

## 2.6 系统信息维护

功能描述	测试结果	备注
电压等级	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
变电站	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
气象分区	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
GIS 地图维护	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
单位部门	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
角色管理	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
用户管理	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
系统配置	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
系统帮助	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	
系统日志	<input type="checkbox"/> 具备 <input type="checkbox"/> 不具备	

验收时，需要一同提供软件功能说明书。