

极端高温天气下配电网的风险评估方法

梁振锋¹, 张嘉豪¹, 闫俊杰^{1,2}, 张健康³, 王晓卫¹

(1. 西安理工大学电气工程学院, 西安 710054; 2. 国网陕西省电力有限公司西安供电公司, 西安 710032;
3. 国家电网有限公司西北分部, 西安 710048)

摘要: 持续的极端高温天气威胁着配电网的安全可靠运行。提出了一种极端高温天气下的配电网风险评估方法。首先分析了配电区域环境温度的时空分布特征, 将配电区域划分为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的网格, 计算确定配电网区域气温与各网格环境温度的关系式。其次分析了极端高温天气对配电网的影响机理, 结合配电变压器绕组热点温度、开关柜环境温度和配电线路载流量建立了配电设备故障模型, 进而计算了配电设备的故障概率。最后通过蒙特卡洛抽样法获得配电设备的故障状态, 考虑故障修复及配电网重构计算配电网的运行状态, 实现配电网运行风险的评估。将 IEEE-33 节点系统配置于西安市某地区作为算例, 结果表明所提方法和指标能合理评估极端高温天气下配电网的风险。

关键词: 极端高温天气; 配电网; 风险评估; 故障概率模型; 蒙特卡洛抽样

Risk Assessment Methods for Distribution Networks in Extremely Hot Weather

LIANG Zhenfeng¹, ZHANG Jiahao¹, YAN Junjie^{1,2}, ZHANG Jiankang³, WANG Xiaowei¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China;

2. Xi'an Electric Power Supply Company, State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710032, China;

3. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China)

Abstract: Continuous extremely hot weather threatens the safe and reliable operation of distribution networks. Therefore, we propose a risk assessment method for distribution networks under extreme hot weather. Firstly, the spatial and temporal distribution characteristics of the ambient temperature in the distribution area are analyzed, the distribution area is divided into $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ grids, and the relationship equation between the regional air temperature of the distribution network and the ambient temperature of each grid is calculated and determined. Secondly, the influence mechanism of extreme hot weather on distribution network is analyzed, and the distribution equipment failure model is established by combining the distribution transformer winding temperature, switchgear ambient temperature and distribution line current carrying capacity, and then the failure probability of power distribution equipment is calculated. Finally, the fault states of distribution equipment are obtained by the Monte Carlo sampling method, and the operational states of distribution network are calculated by considering fault repair and distribution network reconfiguration to realize the assessment of distribution network operation risk. The IEEE-33 node system is configured in an area of Xi'an City as an example, and the results show that the proposed method and indexes can be adopted to reasonably assess the risk of distribution networks under extreme hot weather.

Key words: extremely hot weather; power distribution network; risk assessment; failure probability model; Monte Carlo sampling

0 引言

全球变暖引发气候变化, 2011—2020 年全球平均温度比工业革命前平均值高 $1.10\pm 0.12\text{ }^{\circ}\text{C}$, 全球平均温度的上升导致全球各地极端高温天气趋多趋强^[1]。2024 年 6 月 8 日至 14 日, 河北、河南、山

东等地共 169 个国家气象站达到极端高温阈值, 228 个国家气象站最高气温超过 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 影响面积约 85 万平方公里, 影响人口约 3.8 亿人^[2]。2021 年 7 月 20 日至 8 月 9 日, 我国多地出现高温天气过程, 极端最高气温普遍达到 $35\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[3]。2020 年 8 月, 美国西部经历了大范围的极端高温, 其中加州地区气温比正常水平高 $5\sim 11\text{ }^{\circ}\text{C}$, 高温导致停电事故, 共约 81 万人次受到停电影响^[4]。与其他极端天气不

同, 极端高温天气具有范围广、持续时间长等特点。因此, 评估极端高温天气下配电网的风险水平, 确定配电网薄弱环节, 是亟需解决的问题。

目前, 学者们已开展台风^[5-8]、冰雪^[9]、暴雨^[10]、地震^[11]等极端灾害对配电网的影响及韧性提升方法的研究。文献[5-6]建立了台风灾害下风荷载与电杆故障率和线路故障率之间的关系。文献[7]进一步考虑了开关柜、断路器等配电设备的故障情况, 建立了台风天气下电力系统的保底电网骨干网架。文献[8]在配电线路故障概率计算和新能源出力预测的基础上, 基于态势利导对电网风险水平进行了评估与预警; 文献[9-10]分别建立了冰雪和暴雨灾害场景, 并利用指数拟合法建立了配电设备故障概率模型。文献[11]将综合需求响应模型融入了地震灾害下的负荷恢复优化模型。极端灾害中配电网的风险评估多结合各类风险指标, 通过模拟法完成评估过程。文献[6, 9]通过蒙特卡洛抽样法对配电网状态进行抽样; 文献[9]基于信息熵理论模拟故障场景, 利用灾害严重性和系统整体恢复力等指标评估配电网弹性恢复力。

极端高温天气会导致电力负荷增加。文献[12]指出即使在限电措施下, 高温干旱天气仍会导致用电需求急剧攀升, 其中降温负荷增加明显。文献[13]表明在持续高温情况下, 气温累积效应会对用电负荷产生显著影响。负荷增加、极端高温本身均会使电力设备故障增多, 尤其是配电网。文献[14-15]指出开关、变压器、导线及电力电子设备在长时间高温、超负荷运行下故障风险明显增大, 甚至损坏。文献[16]指出高温天气下导线温度过高或弧垂超限会引起电网故障。在极端高温灾害对配电网的影响和韧性提升方面, 文献[17]提出了高温天气片段配电网节点负荷率估计方法, 基于累计对数正态分布函数建立配网元件故障率模型, 并给出了高温天气下配电网韧性评价指标。文献[18]通过机器学习分析历史故障数据, 运用气象信息预测了城市埋地电缆的故障率; 文献[19]通过分析电缆及电缆头故障率模型建立了极端高温灾害下城市电缆的综合故障率模型, 以及电缆型配电网韧性提升优化模型, 制定了配电网韧性提升组合策略。文献[20]建立了极端高温灾害下系统负荷与线路故障率之间的关联模型, 提出了考虑负荷分级的韧性评估方法。文献[17]未考虑不同节点环境温度差异及高温持续时间; 文献[18-20]未考虑高温天气对配电变压器、开关柜等

设备的影响。

本文提出了极端高温条件下配电网的风险评估方法。首先, 从时间和空间角度讨论了配电网所在区域极端高温的特点, 建立了环境温度时空分布模型。其次分析了高温及其引发的过负荷导致配电设备故障的机理, 结合配电变压器绕组温度、开关柜额定环境温度和配电线路载流量建立了配电设备故障模型, 进而计算了配电设备的故障概率。再次, 采用了蒙特卡洛抽样法获得配电设备的故障状态, 并确定了配电网的运行状态。最后, 从元件和系统角度提出了持续高温灾害下配电网的风险指标, 包括配电设备失效概率、配电网失负荷风险、电压越限等风险评价指标。改进 IEEE-33 节点系统验证了所提方法的有效性。

1 配电区域地表温度分布模型

配电网供电区域半径一般不大于 15 km^[21], 城市或某区域取自气象观测站的气温数据, 是从距地面 1.5 m 且具有代表性的百叶箱采集得到, 其空间分辨率一般为 10~25 km, 即气象预报将配电网供电区域作为一个整体给出其气温、湿度等数据。地表温度虽与气温密切相关, 但同时也受风速、太阳辐射、阴影等因素的影响, 同一时刻配电网供电区域内不同节点的地表温度存在差异。所以由气象平台获取的气温数据难以刻画配电网所在区域的地表温度的空间与时间分布特征。需要指出的是, 极端高温天气下, 风速和湿度均大幅减小, 因此本文未考虑风速、湿度对地表温度的影响^[22]。

地表温度可通过遥感卫星或无人机等采集的热红外遥感数据反演得到^[23-24]。如: 利用美国地质调查局 MODIS 卫星 MOD11A1 的 L3 级获取研究区域地表热红外数据, 应用 ENVI 和 ArcGIS 软件分析可反演得到地表温度, 其空间分辨率为 1 km。可将配电区域划分为 1 km×1 km 的网格, 设每个网格内的地表温度为同一温度, 以反应不同配电设备所处位置的地表温度, 即配电设备周围的环境温度。采用遥感卫星反演地表温度, 由于 MODIS 卫星一天内过境两次, 即每天仅可获取到两个时间段内的地表温度, 而高温对配电设备的影响往往是连续作用的结果。因此, 需要建立配电区域的气温与每个网格地表温度之间的关系。

图 1 为通过检索 MODIS 遥感图像得到的西安市某区 2022 年 8 月 7 日下午 14 时平均地表温度分

布图, 对应时刻的气温为 40 °C。

将图 1 所示区域以 1 km×1 km 为单位对配电区域进行网格化处理, 同一网格内地表温度相同。根据地表温度的差异, 将该配电区域划分为城市和郊区两部分。由于市区建筑密度与人口密度均较高, 阻碍了通风, 导致城市区域出现热岛效应^[25], 图 1 中城市区域地表温度大多在 37.3 °C 及以上。将 IEEE33 节点系统设于图 1 所示区域, 可见配电网节点 12、13、14、28、29、30、31 处于城区热岛, 地表温度超过 42 °C。

气温与地表温度之间的关系可用二次多项式表示^[26], 如式(1)所示。

$$T_u(t) = a_0 + a_1 T_{en} + a_2 T_{en}^2 \quad (1)$$

式中: T_u 为地表温度数据; T_{en} 为气温数据; a_0 — a_2 为待定的回归系数, 可利用历史气温和地表温度数据通过最小二乘法求解得到。

为了得到待评估配电网所在区域的环境温度, 先通过气象平台可获取待评估配电区域未来数日逐小时气温预测值, 再通过式(1)可计算得到各网格对应的地表温度(即环境温度)。由于高温天气往往持续数日, 因此本文方法考虑了持续高温天气对配电网的影响。

需要指出的是, 实验表明, 通过式(1)得到的地表温度计算值与实际地表温度值存在 5 °C 以内的误差, 且服从正态分布^[26]。因此本文在评估过程中在式(1)的计算结果上添加 5 °C 以内的随机波动, 以体现地表温度的随机性, 如式(2)所示。

$$T_u(t) = a_0 + a_1 T_{en} + a_2 T_{en}^2 + Z \quad (2)$$

式中: Z 为[-5, 5]内的随机数。

2 极端高温天气对配电网的影响机理

2.1 高温对配电设备的影响

电气设备的发热和温度受其所在区域环境温度和负荷电流等因素的影响。当其他条件相同时, 环境温度和配电设备运行温度正相关。极端高温下, 配电设备发生故障概率将升高。

2.1.1 对配电变压器影响机理

极端高温对配电变压器的影响主要体现在绝缘材料、油温和运行损耗 3 个方面^[27-28]。

(1)绝缘材料老化。配电变压器长期运行在高温环境下会加速内部绝缘材料的老化过程, 使其失去弹性甚至破损, 从而降低了绝缘性能, 增加了故障风险。

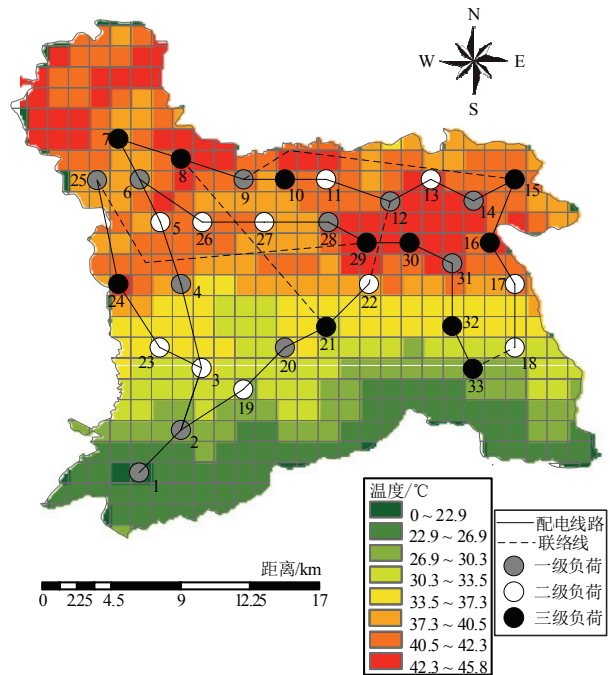


图 1 西安市某区地表温度分布图

Fig.1 Surface temperature distribution in a district of Xi'an

(2)变压器油温与环境温度的变化趋势大致相同^[29]。当油温过高时, 会导致变压器油发生氧化反应, 变压器油质量下降, 绝缘与冷却效果降低, 增加了绝缘击穿的风险; 此外极端高温会加速变压器油中易挥发成分的蒸发, 导致油量减少。

(3)运行损耗增加。极端高温时, 变压器内部导体电阻率增加, 使得变压器铁损和铜损随之增加, 降低了工作可靠性。另一方面, 变压器中部分元件发生膨胀, 甚至变形, 绝缘性能下降, 影响配电变压器的电气性能。

2.1.2 对配电开关柜影响机理

极端高温会对配电开关柜造成不利影响。

(1)开关柜长期工作在高温下会使内部绝缘老化速度加快, 绝缘性能大幅下降, 增加了设备漏电、短路故障的概率。

(2)开关柜多采用封闭结构, 散热条件较差。极端高温会导致开关柜散热能力下降, 增加了设备过载及发生火灾的风险^[30]。

需要指出的是, 若配电室配置有温度调节装置, 其中的配电变压器、开关柜及无功补偿装置等将不受高温天气的直接影响。

2.1.3 对配电线路影响机理

配电线路包括架空线路和电缆两类, 二者在结构、使用环境上存在差异, 但运行中产生的热量都

可能造成其故障。

对于配电架空线路, 高温天气会导致耐张线夹、并沟线夹等金具严重发热, 增加故障风险。同时在热胀冷缩作用下, 温度升高导致架空线的弧垂增加, 净距随之下落, 增加了对树放电等风险^[16]。

对于配电电缆, 高温天气主要影响其散热, 导致电缆线路绝缘受热膨胀, 进而电缆接头压力增大并出现“竹节”现象, 加剧了故障风险^[19]。

2.2 负荷的增加及其影响

高温天气会导致降温负荷的增加。文献[31]通过分析武汉市电网实测数据得出: 当日平均气温在24~29℃时, 气温升高1℃, 日最大负荷增加率接近10%。当日平均气温在29~33℃时, 气温升高后电力负荷增加速率将递减。因此, 极端高温天气下, 配电网中的负荷会增加至正常负荷的1.4~1.8倍。

对于配电变压器, 过载会导致绕组、线夹及绝缘部件等温度升高, 同时可能导致变压器油中出现大量气泡^[32]。油纸绝缘材料的老化速率随负荷的增加而加快, 并分解出导致变压器油介电强度降低、导电性增强的糠醛^[33], 降低了变压器的有效寿命。

对于配电开关柜, 过负荷可能导致开关柜内部出现发热故障, 尤其是柜内开关设备的接头部分, 在重负荷时易出现过热或损坏。

对于配电架空线路, 负荷的增加会导致其电阻及介质损耗上升而产生额外热量, 进而导致架空线温度升高。若架空线温度超过最高允许工作温度时, 故障风险迅速增大^[34]。对于配电电缆, 过负荷也将产生额外热量, 电缆温度会升高, 绝缘材料老化加快、绝缘强度下降, 严重时电缆接头可能被击穿^[19]。同时电缆接头在制作时难免存在杂质、突起等缺陷, 在持续高温影响下电缆老化速率将进一步加快, 绝缘击穿概率也将上升^[35]。此外配电电缆大多处于地下、不易通风, 长期过负荷运行也易引发火灾事故。

3 极端高温下配电设备风险指标

本文以配电设备的时变故障率和故障概率作为极端高温下配电设备的风险指标。

3.1 配电变压器风险指标

变压器故障中63%为过热性故障^[28], 其中油浸式变压器的绕组温度最高^[14]。因此本文通过绕组热点温度计算极端高温天气下配电变压器的故障率。

变压器绕组在设计时由于所选绝缘材料的耐热等级不同, 允许的耐热温度也不同。当绕组热点

温度超过耐热温度时, 绕组绝缘便可能被击穿。可通过建立热传导模型计算绕组热点温度, 其等于环境温度、油箱内顶层油温与环境温度之差、热点温度与油箱内顶层油温之差3者的加和^[36]。油箱内顶层油温与环境温度之差利用式(3)计算。

$$\Delta\theta_0 = \left(\frac{1 + K_T^2 R}{1 + R} \right)^x \cdot \Delta\theta_{or} - k_{11} \tau_0 \frac{d\theta_0}{dt} = \theta_0 - \theta_a \quad (3)$$

式中: $\Delta\theta_0$ 为顶层油温与环境温度之差; K_T 为变压器负载率; R 为额定负载下铜损和铁损之比; x 为顶层油指数; $\Delta\theta_{or}$ 为额定损耗下顶层油温对环境温度的温升; k_{11} 为变压器类型参数; τ_0 为油时间常数, min; θ_0 为油箱内顶层油温; θ_a 为变压器所处位置的环境温度。

绕组热点温度与油箱内顶层油温之差通过式(4)~式(6)计算获得。

$$\Delta\theta_{h1} = k_{21} \cdot K_T^y \cdot \Delta\theta_{hr} - k_{22} \cdot \tau_w \cdot \frac{d\Delta\theta_{h1}}{dt} \quad (4)$$

$$\Delta\theta_{h2} = (k_{21} - 1) \cdot K_T^y \cdot \Delta\theta_{hr} - \frac{\tau_0}{k_{22}} \cdot \frac{d\Delta\theta_{h2}}{dt} \quad (5)$$

$$\Delta\theta_h = \Delta\theta_{h1} - \Delta\theta_{h2} \quad (6)$$

式中: $\Delta\theta_{h1}$ 、 $\Delta\theta_{h2}$ 为绕组热点温升分量; k_{21} 、 k_{22} 为变压器类型参数; y 为绕组指数; $\Delta\theta_{hr}$ 为额定电流下热点温度对油箱顶层油温的温升; τ_w 为绕组时间常数, min; $\Delta\theta_h$ 为绕组热点温度与顶层油温之差。

进而计算变压器绕组热点温度, 如式(7)所示。

$$\theta_h = \theta_a + \Delta\theta_0 + \Delta\theta_h \quad (7)$$

式中: θ_h 为变压器绕组热点温度。

变压器故障率如式(8)所示。

$$\lambda_T(t) = \frac{\beta}{K_2 e^{K_1/(q_b+273)}} \left(\frac{t}{K_2 e^{K_1/(q_b+273)}} \right)^{\beta-1} \quad (8)$$

式中: $\lambda_T(t)$ 为变压器故障率; θ_B 为变压器参考温度, 10 kV 配电变压器绕组耐热等级多为B级, 取130℃^[37]; K_1 为经验参数, 取15000; 参数 K_2 和 β 通过最小二乘法或极大似然法估计得到^[38]。

绕组热点温度及负载率的升高将导致配电变压器故障概率增大, 其故障概率可通过 Arrhenius-Weibull 模型^[38]计算获得, 如式(9)所示。

$$F_T(t) = 1 - e^{-\left(\frac{T_e}{K_2 e^{K_1/(q_b+273)}} \right)^\beta - \left(\frac{T_e + \Delta\theta_e}{K_2 e^{K_1/(q_b+273)}} \right)^\beta} \quad (9)$$

式中: $F_T(t)$ 为变压器故障概率; T_e 为变压器在参考温度 θ_0 下的等效运行时间, 如式(10)所示。

$$T_c = \sum_{t=1}^T \Delta t \cdot e^{\left(\frac{15000}{\theta_0 + 273} - \frac{15000}{\theta_h(t) + 273} \right)} \quad (10)$$

式中: Δt 为实际运行时间间隔; T 为评估时长;
 $\theta_h(t)$ 为变压器热点温度。

Δt_c 为后续运行时间折算到参考温度下的等效运行时间, 同样按式(10)计算。

3.2 配电开关柜风险指标

配电开关柜的故障位置主要处于断路器、隔离开关和互感器, 其故障是电应力、机械应力和热应力共同作用的结果^[39], 因此通过计算开关柜内断路器、隔离开关和互感器的故障率计算开关柜故障率, 进而计算开关柜故障概率。

各种应力将导致电气元件老化, 通过 Arrhenius 公式^[39]计算元件老化速率, 如式(11)所示。

$$L = L_0 (E/E_0)^{-(s-bH)} \cdot (M/M_0)^{-m} \cdot e^{-BH} \quad (11)$$

式中: E 、 M 、 H 、 L 分别为电应力、机械应力、热应力和器件寿命; E_0 和 M_0 分别为电应力和机械应力下限标度; L_0 为相应的寿命; s 、 m 、 B 分别为耐电压系数、耐机械应力系数和热降解反应活化能; b 为考虑材料在复合应力作用下反应的纠正系数。其中, 热应力需要考虑环境温度, 如式(12)所示。

$$H = \frac{1}{\delta_0} - \frac{1}{\delta} \quad (12)$$

式中: δ_0 为绝对温度; δ 为环境温度, 单位均为 K。

通过 Weibull 分布计算电气元件的故障率, 如式(13)所示。

$$\lambda_w(t) = \frac{\gamma}{\eta} \cdot (t/\eta)^{\gamma-1} \quad (13)$$

式中: γ 为形状参数; η 为特征寿命参数, 令 $\eta=L$, 即可量化各类应力对故障率的影响^[38]。

单一类型的电气元件故障概率通过 $[t, t + \Delta t]$ 内的故障率计算得到, 如式(14)所示。

$$F_p(\Delta t) = 1 - e^{-\int_t^{t+\Delta t} \lambda_w(\zeta) d\zeta} \quad (14)$$

式中: $F_p(\Delta t)$ 为电气元件的故障概率; $\lambda_w(\zeta)$ 为电气元件的故障率。当 Δt 足够小时, 式(15)可化简为:

$$F_p(\Delta t) = 1 - e^{-\lambda_w(\Delta t) \cdot \Delta t} \quad (15)$$

由若干个时长为 Δt 的时段组合成 $[0, T]$ 时间段, 利用串联模型可计算 $[0, T]$ 内的故障概率, 如式(16)所示。

$$F_p(T) = 1 - \prod_{t=0}^T e^{-\lambda_w(t) \cdot \Delta t} = 1 - e^{-\sum_{t=0}^T \lambda_w(t) \cdot \Delta t} \quad (16)$$

进而结合不同电气元件故障的比例和自身故障概率, 计算配电开关柜的故障概率, 如式(17)所示^[39]。

$$F_k(T) = \sum_{g=1}^N \alpha_g F_{p,g}(T) \quad (17)$$

式中: $F_k(T)$ 为开关柜故障概率; N 为发生故障的电气元件总数; α_g 为第 g 个电气元件故障的比例; $F_{p,g}(T)$ 为第 g 个电气元件的故障概率。

配电变压器与开关柜位于配电网节点上, 当配电变压器故障时, 仅影响该台区负荷, 配电网拓扑结构不变; 当开关柜中进线柜、联络柜故障时, 配电网拓扑结构将发生改变。

3.3 配电线路风险指标

配电线路运行受环境温度的影响, 其运行温度由式(18)计算得到^[40]。

$$T_X = T_h + (T_M - T_N) (I_X / KI_N)^2 \quad (18)$$

式中: T_X 为运行温度; T_M 为最高允许工作温度; T_h 为配电线路所处区域环境温度; T_N 为基准环境温度, 其中架空线路和电缆的 T_N 分别为 40 °C 和 25 °C; I_X 为配电线路电流; I_N 为基准环境温度下的额定载流量。当配电线路所处环境温度与基准环境温度不同时, 应对额定载流量进行修正, 修正系数 K 通过式(19)计算。

$$K = \sqrt{\frac{T_M - T_h}{T_M - T_N}} \quad (19)$$

本文基于核函数拟合配电线路运行温度的概率密度分布图。设极端高温满负荷运行时, 导线温度有 5%(大于 0.2%的保守值)的概率超过正常运行温度限值, 配电线路故障率如式(20)所示^[34]。

$$P(T_X) = \begin{cases} C, & T_X < T_a \\ C + \left(\frac{T_X - T_a}{T_X - T_M} \right)^k, & T_a < T_X < T_M \\ 1, & T_X > T_M \end{cases} \quad (20)$$

式中: k 为风险趋势指数; $P(T_X)$ 为配电线路故障率; T_a 为配电线路的允许运行温度限值; C 为配电线路运行温度低于允许运行温度限值时的故障率。

将配电线路故障率代入式(15), 即可计算其故障概率。

4 配电网持续高温天气下的风险评估

4.1 蒙特卡洛抽样

由于配电设备故障概率具有时变性, 基于 3.2 节配电设备故障概率, 本文采用蒙特卡洛模拟法中

的状态抽样法抽取处于不同时刻的配电设备故障状态, 结合故障修复时间实现对整个配电网运行状态的模拟。对于一个具有 v 个配电设备的配电网, 其任意时刻 t 的运行状态可通过该时刻配电变压器、开关柜及配电线路的故障状态表征, 判定方法如式(21)所示。

$$D_v^t = \begin{cases} 1, & F_p(t) > \xi \\ 0, & F_p(t) < \xi \end{cases} \quad (21)$$

式中: D_v^t 为配电设备 v 处于 t 时刻的故障状态; ξ 为处于 $[0,1]$ 的随机数。当 $F_p(t)$ 大于随机数 ξ 时, 该配电设备处于故障状态, 反之处于正常状态。

4.2 配电网风险评估指标

本文选用基于负荷权重系数的节点电压超限程度和失负荷风险期望作为配电网风险指标。在持续高温环境下, 部分设备故障会导致配电网出现负荷节点失效等问题, 在进行配电网潮流计算时考虑失效节点及其与其他节点的连接情况。

基于负荷权重系数的节点电压超限指标反映节点电压偏离正常运行水平的严重程度, 如式(22)所示。

$$R_{VL} = \frac{\sum_{r=1}^{N_c} \sum_{i=1}^n (1 - J_i) \sigma_i A_{r,i}^{VL}}{N_c} \quad (22)$$

式中: σ_i 为节点 i 的权重系数, 一级负荷权重系数为 100, 二级负荷为 10, 三级负荷为 1^[41]; N_c 为混合蒙特卡洛抽样总次数; J_i 为节点 i 的运行状态; $A_{r,i}^{VL}$ 为第 r 次抽样时节点 i 的电压超限程度, 如式(23)所示。

$$A_{r,i}^{VL} = \begin{cases} \frac{U_i - U_i^{\max}}{U_N}, & U_i^{\max} < U_i \\ 0, & U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \\ \frac{U_i^{\min} - U_i}{U_N}, & U_i < U_i^{\min} \end{cases} \quad (23)$$

式中: U_N 为额定电压; U_i^{\min} 和 U_i^{\max} 分别取额定电压 U_N 的 93% 和 107%。

失负荷风险期望是指极端高温时配电网设备故障而造成的负荷削减期望值, 如式(24)所示。

$$R_{LL} = \frac{\sum_{r=1}^{N_c} \sum_{i=1}^n J_i P_{r,i}}{N_c} \quad (24)$$

式中: $P_{r,i}$ 为第 r 次抽样时节点 i 的失负荷量。

4.3 极端高温天气下配电网风险评估流程

极端高温下配电网风险评估流程如图 2 所示。

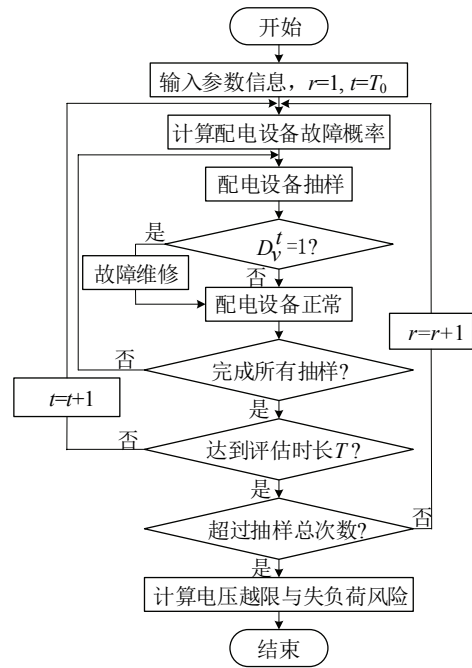


图 2 极端高温天气下配电网风险评估流程图

Fig.2 Flowchart for risk assessment of distribution networks in extreme hot weather

风险评估具体步骤包括:

(1) 输入配电网参数和气温数据信息。配电网参数, 包括配电设备参数及其地理位置、线路参数; 气温数据为配电设备所处区域每小时气温, 利用式(2)计算每个网格的地表温度。设置极端高温起始时刻 T_0 、评估时长 T 、抽样总次数 N_c 等, 初始化混合蒙特卡洛抽样数 $r=1$ 。

(2) 根据配电设备故障概率模型计算极端高温持续时间内设备每小时的故障概率, 进而获得配电网节点及线路的运行状态。

(3) 根据混合蒙特卡洛法模拟配电网不同时刻的运行状态, 通过式(21)对 t 时刻配电设备进行状态抽样, 生成在 $[0,1]$ 上的均匀分布的随机数 ξ , 当配电设备故障概率 $F_p(t) > \xi$, 则为故障状态, 并持续到设备修复、恢复正常; 反之为正常状态。

需要说明的是, 高温天气持续时间长, 在配电设备故障后, 供电公司会组织进行设备检修, 评估时需要考虑设备检修。

(4) 根据设备故障情况确定配电网节点失效情况, 找出配电网故障节点, 考虑配电网重构, 计算孤立节点的负荷量, 并通过潮流计算判断其余节点电压是否超限。

(5) 将混合蒙特卡洛抽样次数设置为 1 000 次,

每次抽样达到评估时长后, 再进行下一次抽样, 同时计算该次抽样的失负荷量及电压越限风险。

(6)达到抽样总次数后, 根据式(22)一式(24)计算配电网的失负荷风险期望及电压越限风险指标, 完成风险评估。

5 算例分析

图3为西安市某区2022年8月1日至8月15日天气预报预测气温数据。由图3可见, 地区气温随时间变化而变化, 其中出现了14 d的持续高温(日最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$)天气。

将改进IEEE-33节点系统配置于图1所示的地理区域内。结合该区地表温度分布情况对该节点系统进行仿真, 原始总负荷为3715 kW。

当气温低于 30°C 时, 配电网总负荷为原始总负荷; 根据文献[31]的夏季负荷变化规律, 配电网总负荷将会随气温的升高而变化, 通过乘以负荷系数来模拟360 h的总负荷变化, 负荷系数曲线如图4所示。

5.1 配网环境温度计算

根据2022年6~7月图1所示地区的部分气温数据及其对应的环境温度数据(见附表A1), 通过式(1)计算不同网格内环境温度与气温之间的关系表达式, 如节点6处环境温度与气温之间的关系为:

$T_{u6} = 0.00849T_{en}^2 + 0.56516T_{en} + 7.87289$, 其余节点处的计算结果如附表A2所示。

考虑一年内极端高温天气的持续时长多在8~18 d不等^[13], 本文将评估时长设置为15 d, 即360 h。基于该地区360 h的气温变化, 评估配电设备故障概率, 评估间隔为1 h。

根据图3所示360 h的气温数据, 通过式(2)计算不同配电设备所处网格区域360 h的环境温度, 绘制各节点360 h的环境温度变化曲线, 如附图B1所示。该区域配电设备和线路的环境温度最低为 19.1°C , 最高为 55.6°C 。

5.2 配电设备故障概率计算

配电变压器参数如附表A3所示^[36]。通过式(3)一式(7), 结合负荷及节点环境温度变化计算配电变压器绕组热点温度, 各节点处的配电变压器容量见附表A4, 绕组热点温度变化如图5所示。

对比附图B1和图5可见, 变压器绕组热点温度与所处环境温度变化趋势基本相同。同时, 配电变压器绕组热点温度与负载率相关, 如节点30处的

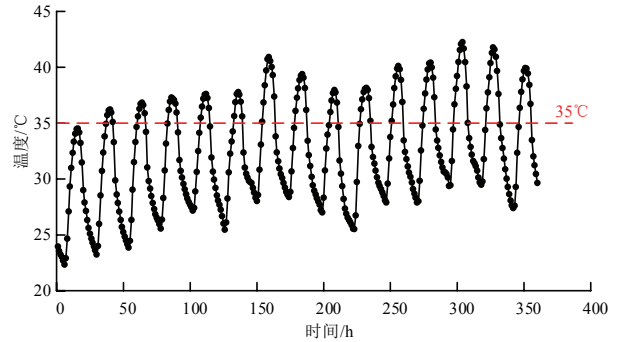


图3 西安市某区连续15 d气温变化图

Fig.3 Graph of temperature changes in a district of Xi'an for 15 consecutive days

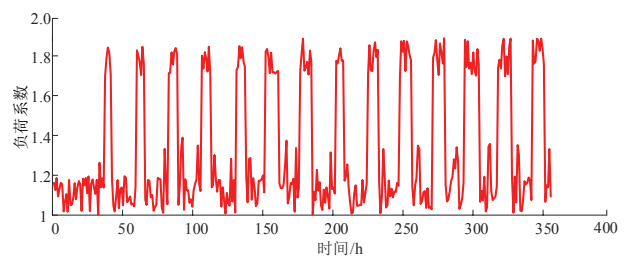


图4 负荷系数曲线

Fig.4 Load factor curve

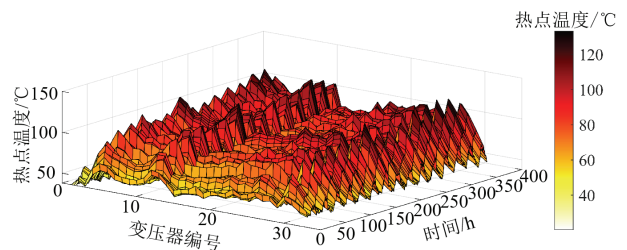


图5 变压器绕组热点温度变化图

Fig.5 Graph of transformer hot-spot temperature variation

配电变压器位于城区, 负载率和环境温度均较高, 评估时长内, 其绕组热点温度最高达到 133.4°C , 而节点33处的变压器绕组热点温度最高仅为 88.5°C 。

进而通过式(8)一式(10)计算变压器故障概率, 式(8)中 K_2 和 β 分别取为 1.903×10^{-12} 和 5.9 ^[38], 设配电变压器在参考运行温度下的等效运行时间为10年, 本文设节点14、28、29处配电室加装温度调节装置, 不受高温天气的直接影响。配电变压器的故障概率变化如图6所示。

由图6可见, t_{100} 时刻之前, 变压器随时间累积的故障概率较小, t_{100} 时刻之后, 由于负载率和环境温度较高, 位于节点5、12、13、30、31处的变压

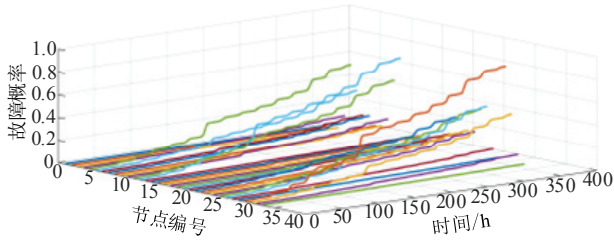


图6 配电变压器故障概率变化图

Fig.6 Distribution transformer failure probability variation chart

器随时间累积的故障概率显著升高。 t_{360} 时其故障概率分别达到了0.57、0.83、0.75、0.84和0.62;节点6、26、27处的变压器负载率较高,但环境温度温度相对较低, t_{360} 时故障概率最高为0.36、0.41和0.46。此外,由于节点14、28、29处的变压器配有温度调节装置,其故障概率始终较低。因此高负载率和环境温度可严重影响配电变压器的正常运行。

通过式(11)一式(13)计算配电开关柜中断路器、隔离开关和互感器的故障率,所需参数如附表A5所示。设配电开关柜的已运行时长为10年,针对不同电气元件,根据附表A6所示参数对式(11)进行修正,式(13)中 γ 取2.59^[39,42]。

进而通过式(14)一式(17)计算开关柜的故障概率变化,如图7所示。 t_{150} 时刻之前,配电柜随时间累积的故障概率较小,基本不变。 t_{150} 时刻后,由于气温累积效应,节点9、10、11、12、31处环境温度始终较高,因此处于上述节点的开关柜随时间累积的故障概率迅速增大, t_{360} 时其故障概率分别为0.47、0.56、0.48、0.59和0.53。节点1、2、3、4、18、19、20、21、23、32、33处环境温度相对较低,开关柜的故障概率基本不变。节点14、28、29处的开关柜不受环境温度的影响,故障概率始终较低。

设置32条配电线路的规格^[43-44],如附表A7所示。其中线路1—21为架空线路,线路22—32为电缆。

根据附录表A7中配电线路的载流量及流过的电流,通过式(18)一式(19)计算配电线路的运行温度变化,得到了架空线路与电缆运行温度的概率密度分布图,如图8所示。

通过式(20)计算配电线路各时刻的故障率,其中 k 取4;进而通过式(15)得到各时刻配电线路的故障概率,如图9所示。

由图9可见, t_{160} 时刻之前,配电线路随时间累积的故障概率较小, t_{160} 时刻之后架空线9、10和电

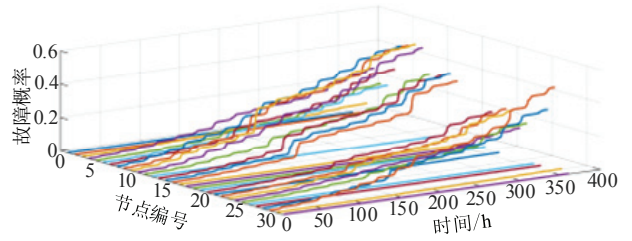


图7 配变开关柜故障概率变化图

Fig.7 Variation of the probability of failure of the distribution switchgear

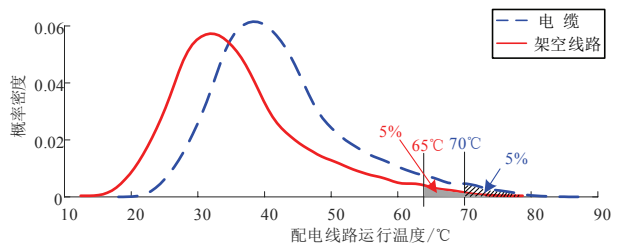


图8 配电线路运行温度概率密度分布

Fig.8 Probability density distribution of line operating temperature

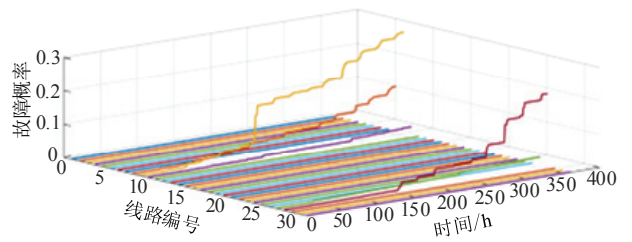


图9 配电线路故障概率变化

Fig.9 Change in distribution line failure probability

缆29的故障概率随时间变化明显升高,因为这些配电线路位于环境温度较高的区域,且其载流量较小。 t_{360} 时架空线9、10和电缆29的故障概率最高分别达到了0.30、0.13和0.22。由此可见,极端高温对配电线路的影响较小,但仍存在故障风险。

5.3 配电网风险评估

利用本文方法对极端高温下配电网进行风险评估。图10为各节点在不同负荷下的电压越限情况。当负荷为原始值时,所有节点均不会出现电压越限;当负荷为原始负荷的1.5倍时,节点15—18、节点31—33出现了电压越限;当负荷达到原始负荷的1.8倍时,节点10—18、节点28—33出现了电压越限,均位于配电线路的末端。

配电网故障停电后,供电公司会组织检修以恢复供电。如国家电网公司发布的供电服务“十项承

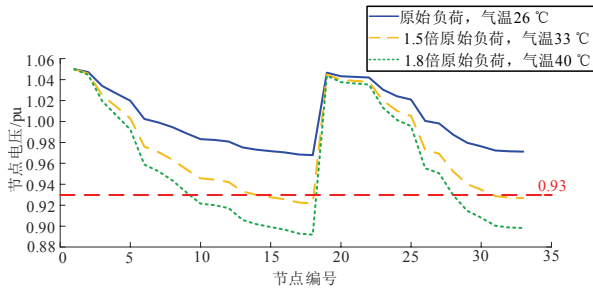


图 10 不同负荷下的节点电压越限情况

Fig.10 Nodal voltage exceeding at different loads

诺”指出：故障停电后，城区平均应在 3 h 45 min、农村地区平均 5 h 30 min 内恢复供电。本文考虑到不同配电设备修复时长存在差异，将配电变压器、配电开关柜、配电线路的修复时间分别设置为 3 h、2.5 h、2 h^[45]。故障修复后配电设备恢复正常运行，对配电网进行连续 360 h 的风险评估，图 11 为评估过程中失负荷期望与电压越限指标的变化情况。

由图 11 可见，节点电压越限风险随负荷变化而持续波动。负荷激增时，配电网末端节点电压下降明显，部分节点电压出现了越限。失负荷集中在 $t_{100}\sim t_{150}$ 和 $t_{160}\sim t_{190}$ 两个时段； $t_{100}\sim t_{120}$ 时段变压器故障概率显著增大并导致失负荷， t_{160} 时刻之后，配电开关柜故障概率将显著增大，因此失负荷风险期望也将升高。当配电设备故障时退出运行，同时出现负荷损失时，节点电压升高，电压越下限的程度相对减轻。在评估过程中，1 000 次蒙特卡洛抽样结果显示最大失负荷量约为 120 kW。配电设备故障后，可通过网络重构、电力抢修恢复供电，因此评估得到的失负荷风险期望较小，最大约为 2.96 kW。考虑到失负荷集中在 $t_{100}\sim t_{150}$ 和 $t_{160}\sim t_{190}$ 两个时段，联络开关和联络线受高温影响的时间将较短，因此本文未考虑高温对联络开关和联络线的影响。

6 结论

本文提出了一种极端高温天气下的配电网风险评估方法，并将 IEEE-33 节点配网配置于西安市某区、连续 15 天高温作为算例，验证了方法的有效性。

1) 极端高温天气下配电网所在区域环境温度存在时空分布特征，不同配电设备所处位置不同，对应的环境温度将不同，故障概率随之不同。

2) 将配电网与其所在区域的环境温度相结合，进而计算配电设备及线路的故障概率。极端高温结束时，配电变压器、配电开关柜和配电线路的故障

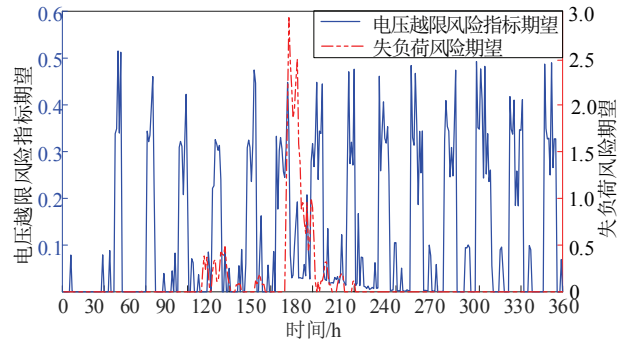


图 11 失负荷期望与电压越限指标变化全过程曲线

Fig.11 Loss of load expectation and voltage overrun indicator changes over the course of the curve

概率最大分别升高至 0.84、0.59 和 0.3，极端高温对配电变压器、开关柜的影响较大。

3) 基于蒙特卡洛抽样法实现了极端高温下配电网运行状态、设备故障和修复及配电网重构的模拟，有助于识别配电网薄弱点、灾害预防及制定配电网维修策略。

附录见本刊网络版(<http://hve.epri.sgcc.com.cn>)。

参考文献 References

- [1] World Meteorological Organization. The global climate 2011-2020: a decade of accelerating climate change[R]. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2023.
- [2] 中国气象局. 专家解读 | 多站点最高气温超 40℃ 近期为何北方高温频发? [EB/OL]. (2024-06-14)[2024-06-21]. https://www.cma.gov.cn/wmhd/2011wzbf/2011wftzb/202406/t20240614_6352046.html. China Meteorological Administration. Expert interpretation| why have multiple sites exceeded 40℃? what's behind the frequent heatwaves in Northern China lately?[EB/OL]. (2024-06-14)[2024-06-21]. https://www.cma.gov.cn/wmhd/2011wzbf/2011wftzb/202406/t2024-0614_6352046.html.
- [3] 中国气象局国家气候中心. 2021 年中国气候公报[R]. 北京: 中国气象局, 2022. https://www.cma.gov.cn/zfxgk/gknr/qxbg/202203/t20220308_4568477.html. China Meteorological Administration. China climate bulletin (2021)[R]. Beijing, China: China Meteorological Administration, 2022. https://www.cma.gov.cn/zfxgk/gknr/qxbg/202203/t20220308_4568477.html.
- [4] 赵静波, 张思聪, 廖诗武. 美国加州 2020 年 8 月中旬停电事故分析及思考[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 52-57. ZHAO Jingbo, ZHANG Sicong, LIAO Shiwu. Analysis and reflection for the rotating outages in mid-August 2020 in California[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 52-57.
- [5] PANTELI M, PICKERING C, WILKINSON S, et al. Power system resilience to extreme weather: fragility modeling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3747-3757.
- [6] 杨祺铭, 李更丰, 别朝红, 等. 台风灾害下基于 V2G 的城市配电网弹性提升策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 130-139. YANG Qiming, LI Gengfeng, BIE Zhaohong, et al. Vehicle-to-grid

- based resilience promotion strategy for urban distribution network under typhoon disaster[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(12): 130-139.
- [7] 林佳, 陈浩, 寇伟宏, 等. 极端天气下保底电网骨干网架优化及弹性提升方法[J]. *高电压技术*, 2023, 49(4): 1591-1599.
LIN Jia, CHEN Hao, KOU Weihong, et al. Optimization and resilience enhancement method of core backbone network framework under extreme weather[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(4): 1591-1599.
- [8] 何俊, 于华, 邓长虹, 等. 极端天气下基于态势感知的重点区域电网负荷供电保障策略[J]. *高电压技术*, 2022, 48(4): 1277-1285.
HE Jun, YU Hua, DENG Changhong, et al. Power supply guarantee strategy for key regional power grid load based on situation awareness in extreme weather[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(4): 1277-1285.
- [9] 王守相, 黄仁山, 潘志新, 等. 极端冰雪天气下配电网弹性恢复力指标的构建及评估方法[J]. *高电压技术*, 2020, 46(1): 123-132.
WANG Shouxian, HUANG Renshan, PAN Zhixin, et al. Construction and evaluation of resilience restoration capability indices for distribution network under extreme ice and snow weather[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(1): 123-132.
- [10] 梁振锋, 闫俊杰, 李江锋, 等. 极端暴雨灾害下城市配电网风险评估方法[J]. *电网技术*, 2023, 47(10): 4180-4190.
LIANG Zhenfeng, YAN Junjie, LI Jiangfeng, et al. Risk assessment of urban distribution network under extreme rainstorm disasters[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(10): 4180-4190.
- [11] 李春燕, 唐瞻文, 汤佑元, 等. 极端灾害下基于综合需求响应的电-水-气综合能源系统负荷恢复策略[J]. *高电压技术*, 2024, 50(4): 1403-1415.
LI Chunyan, TANG Zhanwen, TANG Jiyuan, et al. Load recovery strategy for integrated electricity-water-gas energy system based on integrated demand response under extreme disasters[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(4): 1403-1415.
- [12] 高红均, 郭明浩, 刘俊勇, 等. 从四川高温干旱限电事件看新型电力系统保供挑战与应对展望[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(12): 4517-4537.
GAO Hongjun, GUO Minghao, LIU Junyong, et al. Power supply challenges and prospects in new power system from Sichuan electricity curtailment events caused by high-temperature drought weather[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(12): 4517-4537.
- [13] 张凯, 姚建刚, 李伟, 等. 负荷预测中的温度热累积效应分析模型及处理方法[J]. *电网技术*, 2008, 32(4): 67-71.
ZHANG Kai, YAO Jian'gang, LI Wei, et al. Analysis model and processing approach for thermal cumulative effect of temperature in load forecasting[J]. *Power System Technology*, 2008, 32(4): 67-71.
- [14] 朱柳慧. 变压器过载能力优化及运行风险评估方法[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
ZHU Liuhui. Overload capability optimization and risk assessment method for transformer[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [15] 欧阳金鑫, 余建峰, 龙晓轩. 考虑输电线路动态热特性的自适应过负荷保护方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(7): 40-48.
OUYANG Jinxin, YU Jianfeng, LONG Xiaoxuan. Adaptive overload protection method considering the dynamic thermal characteristics of a transmission line[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(7): 40-48.
- [16] 李明明, 王建, 熊小伏, 等. 高温天气下架空线路运行温度与弧垂超限预警方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(2): 25-33.
LI Mingming, WANG Jian, XIONG Xiaofu, et al. Operating temperature and sag off-limit warning method for overhead transmission lines in the conditions of high-temperature weather[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(2): 25-33.
- [17] 顾靖达, 李伟, 赵宇鑫, 等. 高温天气下配电网综合韧性评估方法[J]. *电力建设*, 2024, 45(9): 123-132.
GU Jingda, LI Wei, ZHAO Yuxin, et al. Research on comprehensive resilience assessment method of distribution network under high temperature weather[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(9): 123-132.
- [18] ATRIGNA M, BUONANNO A, CARLI R, et al. A machine learning approach to fault prediction of power distribution grids under heat-waves[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2023, 59(4): 4835-4845.
- [19] 田书欣, 肖文渊, 符杨, 等. 极端高温灾害下电缆型配电网韧性提升策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(9): 3408-3419.
TIAN Shuxin, XIAO Wenyuan, FU Yang, et al. Boosting resilience of cable distribution networks under extreme high-temperature disaster[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(9): 3408-3419.
- [20] 罗佳怡, 邢海军, 全文斌, 等. 极端高温下新型电力系统韧性评估及差异化规划[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(3): 135-144.
LUO Jiayi, XING Haijun, QUAN Wenbin, et al. Resilience assessment and differentiated planning of new power systems under extreme high temperatures[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(3): 135-144.
- [21] 国家电网公司. 配电网技术导则: Q/GDW 10370—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
State Grid Corporation of China. Technical guidelines for distribution network: Q/GDW 10370—2016[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2017.
- [22] 阮前途, 叶荣. 保障极端天气下供需安全的新型电力系统电源规划[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(4): 103-115.
RUAN Qiantu, YE Rong. Power source planning of new power system for guaranteeing supply-demand security under extreme weather[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(4): 103-115.
- [23] 朱金顺, 任华忠, 叶昕, 等. 热红外遥感地表温度与发射率地面验证进展[J]. *遥感学报*, 2021, 25(8): 1538-1566.
ZHU Jinsun, REN Huazhong, YE Xin, et al. Ground validation of land surface temperature and surface emissivity from thermal infrared remote sensing data[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(8): 1538-1566.
- [24] 吉蒙, 徐永明, 莫亚萍, 等. 基于无人机热红外遥感和大气同步廓线的地表温度反演方法[J]. *地球信息科学学报*, 2023, 25(12): 2456-2467.
JI Meng, XU Yongming, MO Yaping, et al. Land surface temperature retrieval method based on UAV thermal infrared remote sensing and synchronized atmospheric profiles[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2023, 25(12): 2456-2467.
- [25] 刘慧民, 马笋悦, 李淼, 等. 基于卫星遥感的城市热岛效应体检评估——以武汉市为例[J]. *西部人居环境学刊*, 2023, 38(6): 38-45.
LIU Huimin, MA Zhengyue, LI Miao, et al. Examination and evaluation of urban heat island effect based on satellite remote sensing: taking Wuhan as an example[J]. *Journal of Human Settlements in West China*, 2023, 38(6): 38-45.
- [26] 庄传仪, 王林, 申爱琴, 等. 沥青路面路表温度预估模型研究[J]. *公路交通科技*, 2010, 27(3): 39-43, 48.
ZHUANG Chuanyi, WANG Lin, SHEN Aiqin, et al. Prediction model of surface temperature of asphalt pavement[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2010, 27(3): 39-43, 48.
- [27] 廖瑞金, 杨丽君, 郑含博, 等. 电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J]. *电工技术学报*, 2012, 27(5): 1-12.

- LIAO Ruijin, YANG Lijun, ZHENG Hanbo, et al. Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 1-12.
- [28] 郑含博. 电力变压器状态评估及故障诊断方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
ZHENG Hanbo. Study on condition assessment and fault diagnosis approaches for power transformers[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2012.
- [29] NI R Z, CHEN J, YANG C, et al. A temperature calculation method of oil immersed transformer considering delay effects and multiple environmental factors[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 213: 108260.
- [30] 许高俊, 马宏忠, 李超群, 等. 高压开关柜有源无线温度在线监测系统的设计[J]. 电测与仪表, 2014, 51(22): 82-86.
XU Gaojun, MA Hongzhong, LI Chaoqun, et al. Design of on-line temperature monitoring system for high voltage switchgear with active wireless sensing[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(22): 82-86.
- [31] 刘静, 成丹, 代娟, 等. 武汉地区电力负荷特征及其对气温变化的响应[J]. 气象科技进展, 2021, 11(4): 186-188.
LIU Jing, CHENG Dan, DAI Juan, et al. Characteristics of power load in Wuhan and its response to temperature changes[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2021, 11(4): 186-188.
- [32] 刘刚, 兰和潼, 姜雄伟, 等. 基于温升特性的强迫导向油循环风冷结构变压器负荷能力评估[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 232-241.
LIU Gang, LAN Hetong, JIANG Xiongwei, et al. Load capacity evaluation of forced guided oil circulation air-cooled transformer based on temperature rise characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 232-241.
- [33] 廖瑞金, 林元棣, 杨丽君, 等. 温度、水分、老化对变压器油中糠醛及绝缘纸老化评估的影响和修正[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 3037-3044.
LIAO Ruijin, LIN Yuandi, YANG Lijun, et al. Effects and correction of temperature, moisture and aging on furfural content in insulating oil and aging assessment of insulation paper[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 3037-3044.
- [34] 秦嘉南. 基于动态增容的输电线路高效运行关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
QIN Jia'nan. Research on the key technologies of high-efficiency operation of transmission lines based on dynamic line rating[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [35] 侯帅, 傅明利, 贾磊, 等. 220 kV XLPE 绝缘材料长期老化性能及寿命评价[J]. 高电压技术, 2023, 49(12): 4900-4910.
HOU Shuai, FU Mingli, JIA Lei, et al. Long-term aging performances and life evaluation of 220 kV XLPE insulation materials[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 4900-4910.
- [36] IEC. Power transformers—part 7: loading guide for oil-immersed power transformers: IEC 60076—7: 2005[S]. Geneva: IEC, 2005.
- [37] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电力变压器 第12部分: 干式电力变压器负载导则: GB/T 1094.12—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Power transformers—part 12: loading guide for dry-type power transformers: GB/T 1094.12—2013[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2014.
- [38] 何剑, 程林, 孙元章, 等. 条件相依的输变电设备短期可靠性模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 39-46.
HE Jian, CHENG Lin, SUN Yuanzhang, et al. Condition dependent short-term reliability models of transmission equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 39-46.
- [39] ZHANG X, GOCKENBACH E. Component reliability modeling of distribution systems based on the evaluation of failure statistics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(5): 1183-1191.
- [40] IEEE. IEEE recommendation practice for protection and coordination of industrial and commercial power systems: IEEE Std 242—2001[S]. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2001.
- [41] 温春雪, 贺哲, 周京华, 等. 基于鲁棒优化的韧性配电网重构研究[J]. 电工电能新技术, 2024, 43(12): 1-10.
WEN Chunxue, HE Zhe, ZHOU Jinghua, et al. Research on resilient distribution network reconstruction based on robust optimization[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2024, 43(12): 1-10.
- [42] ZHOU N, XU Y, SUNGIN C, et al. A health index based remaining useful life estimation method for distribution switchgear in power grids[C]//Proceedings of the 19th International Conference on AC and DC Power Transmission. Glasgow, UK: IET, 2023: 220-223.
- [43] 国家标准局. 铝绞线及钢芯铝绞线: GB 1179-83[S]. 北京: 中国电力出版社, 1983.
National Bureau of Standards. Aluminum stranded wire and aluminum conductors steel-reinforced: GB/T 1179-83[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 1983.
- [44] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 电力工程电缆设计标准: GB 50217—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for design of cables of electric power engineering: GB 50217—2018[S]. Beijing, China: China Planning Press, 2018.
- [45] 梁朔, 秦丽文, 李春华, 等. 基于风险评估的配电设备状态检修决策方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(1): 47-52.
LIANG Shuo, QIN Liwen, LI Chunhua, et al. Condition-based maintenance decision-making method for distribution equipment based on risk assessment[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(1): 47-52.



LIANG Zhenfeng

Ph.D.

Associate professor
Corresponding author

ZHANG Jiahao

梁振锋(通信作者)

1974—, 男, 博士, 副教授, 硕导

主要从事电力系统继电保护与控制、配电网规划及运行控制等方面的研究工作

E-mail: lzf@xaut.edu.cn

张嘉豪

2001—, 男, 硕士生

主要从事配电网规划及运行控制的研究工作

E-mail: 604766730@qq.com

收稿日期 2025-01-13 修回日期 2025-05-07 编辑 陈蔓

附录 A

表 A1 地表温度数据一览表

Table A1 List of surface temperature data

°C

节点	6.27		7.5		7.21		7.29		8.6		8.14	
	14:00	02:00	14:00	02:00	14:00	02:00	14:00	02:00	14:00	02:00	14:00	02:00
1	30.0	22.2	28.3	25.0	29.3	19.9	30.5	21.8	36.7	26.7	36.8	27.4
2	25.3	16.9	26.2	18.3	23.7	16.5	22.6	18.4	19.6	17.9	23.4	16.2
3	27.2	23.3	30.4	25.1	27.6	20.9	26.6	23.5	25.8	24.4	33.4	21.9
4	36.4	28.6	37.8	29.8	30.9	23.2	34.8	24.8	37.1	27.5	36.3	30.4
5	39.0	26.1	39.2	27.7	30.9	23.2	34.8	26.0	43.6	27.5	36.3	28.3
6	33.4	26.1	31.4	27.7	30.9	23.2	34.8	26.0	43.6	27.5	38.6	30.4
7	39.0	28.6	39.2	27.7	30.9	23.2	34.8	26.0	43.6	27.5	38.6	30.4
8	43.6	28.6	43.5	29.8	35.4	24.9	39.2	28.3	57.1	29.6	43.2	28.3
9	39.0	26.1	39.2	27.7	33.6	23.2	36.3	28.3	43.6	27.5	43.2	28.3
10	39.0	28.6	39.2	27.7	33.6	24.9	36.3	28.3	43.6	27.5	43.2	28.3
11	39.0	26.1	39.2	27.7	33.6	23.2	36.3	26.0	43.6	27.5	43.2	26.7
12	43.6	24.6	43.5	26.4	33.6	22.2	36.3	26.0	43.6	26.0	43.2	26.7
13	43.6	24.6	43.5	26.4	33.6	22.2	39.2	23.5	43.6	26.0	38.6	26.7
14	43.6	24.6	43.5	26.4	33.6	22.2	36.3	24.8	43.6	26.0	38.6	26.7
15	43.6	24.6	43.2	26.4	31.8	23.2	36.3	26.0	43.6	26.0	38.6	28.3
16	39.0	24.6	43.5	26.4	31.8	22.2	36.3	23.5	43.6	24.4	38.6	28.3
17	36.4	24.6	37.8	26.4	30.9	22.2	34.8	26.0	43.6	26.0	38.6	28.3
18	25.3	21.5	26.2	23.3	24.3	19.5	22.6	20.3	25.8	22.5	26.7	21.9
19	25.3	21.5	26.2	23.3	23.7	18.1	24.0	20.3	25.8	22.5	26.7	21.9
20	29.8	23.3	30.4	25.1	27.6	20.9	30.4	23.5	25.8	24.4	29.9	24.7
21	29.8	24.6	34.9	26.4	27.6	20.9	30.4	24.8	25.8	26.0	33.4	26.7
22	36.4	26.1	37.8	27.7	30.9	22.2	34.8	24.8	43.6	26.0	36.3	28.3
23	27.2	23.3	30.4	26.4	24.3	20.9	26.6	23.5	37.1	26.0	26.7	26.7
24	43.6	28.6	39.2	29.8	31.8	24.9	34.8	28.3	43.6	29.6	38.6	28.3
25	39.0	24.6	39.2	27.7	31.8	23.2	34.8	28.3	43.6	27.5	38.6	26.7
26	36.4	26.1	39.2	27.7	30.9	23.2	34.8	28.3	43.6	27.5	36.3	26.7
27	36.4	24.6	39.2	26.4	31.8	23.2	34.8	26.0	43.6	26.0	36.3	26.7
28	43.6	24.6	43.5	26.4	31.8	23.2	34.8	26.0	37.1	26.0	38.6	28.3
29	43.6	24.6	43.5	26.4	31.8	23.2	34.8	26.0	43.6	26.0	38.6	28.3
30	43.6	24.6	43.5	26.4	35.4	23.2	36.3	24.8	43.6	26.0	38.6	28.3
31	39.0	24.6	43.5	26.4	31.8	22.2	36.3	24.8	43.6	24.4	43.2	26.7
32	27.2	24.6	30.4	26.4	27.6	20.9	30.4	24.8	25.8	24.4	33.4	24.7
33	25.3	21.5	26.2	21.2	24.3	18.1	26.6	20.3	19.6	23.0	26.4	21.9

表 A2 节点环境温度与气温的关系

Table A2 Relationship between surface temperature and air temperature at selected nodes

节点编号	拟合关系
节点 2	$T_{u2} = 0.003 22T_{en}^2 + 0.286 7T_{en} + 13.972 06$
节点 3	$T_{u3} = 0.015 2T_{en}^2 - 0.262 09T_{en} + 21.2$
节点 4	$T_{u4} = 0.001 82T_{en}^2 + 0.587 36T_{en} + 13.696 2$
节点 5	$T_{u4} = -0.007 5T_{en}^2 + 1.591 17T_{en} - 6.683$
节点 6	$T_{u6} = 0.008 49T_{en}^2 + 0.565 16T_{en} + 7.872 89$
节点 7	$T_{u7} = 0.021 46T_{en}^2 - 0.278 17T_{en} + 21.467 39$
节点 8	$T_{u8} = 0.024 99T_{en}^2 + 0.109 09T_{en} + 12.824 97$
节点 9	$T_{u9} = 0.003 47T_{en}^2 + 1.009 27T_{en} - 1.060 3$

续表 A2

节点编号	拟合关系
节点 10	$T_{u10} = 0.01559T_{en}^2 + 0.22623T_{en} + 12.5067$
节点 11	$T_{u11} = 0.00285T_{en}^2 + 1.09187T_{en} - 0.07173$
节点 12	$T_{u12} = 0.00865T_{en}^2 + 0.81331T_{en} + 2.3374$
节点 13	$T_{u13} = 0.0072T_{en}^2 + 0.80454T_{en} + 2.48367$
节点 14	$T_{u14} = 0.01973T_{en}^2 + 0.03194T_{en} + 13.71873$
节点 15	$T_{u15} = 0.02864T_{en}^2 - 0.53971T_{en} + 22.63511$
节点 16	$T_{u16} = 0.02359T_{en}^2 - 0.17231T_{en} + 15.98369$
节点 17	$T_{u17} = 0.01813T_{en}^2 + 0.09988T_{en} + 13.34193$
节点 18	$T_{u18} = 0.0014T_{en}^2 + 0.28887T_{en} + 13.64548$
节点 19	$T_{u19} = 0.00203T_{en}^2 + 0.38525T_{en} + 10.71464$
节点 20	$T_{u20} = 0.00485T_{en}^2 + 0.16407T_{en} + 17.40878$
节点 21	$T_{u21} = 0.00731T_{en}^2 + 0.17508T_{en} + 17.24759$
节点 22	$T_{u22} = 0.01975T_{en}^2 - 0.10496T_{en} + 17.27537$
节点 23	$T_{u23} = 0.00754T_{en}^2 + 0.12881T_{en} + 16.59886$
节点 24	$T_{u24} = 0.00944T_{en}^2 + 0.36898T_{en} + 14.76908$
节点 25	$T_{u25} = 0.00849T_{en}^2 + 0.56425T_{en} + 9.07537$
节点 26	$T_{u26} = -0.00286T_{en}^2 + 1.1364T_{en} + 2.3307$
节点 27	$T_{u27} = 0.01606T_{en}^2 + 0.13401T_{en} + 13.87489$
节点 28	$T_{u28} = 0.01014T_{en}^2 + 0.31696T_{en} + 12.78332$
节点 29	$T_{u29} = 0.03381T_{en}^2 - 0.85108T_{en} + 26.98277$
节点 30	$T_{u30} = 0.01274T_{en}^2 + 0.41748T_{en} + 9.05764$
节点 31	$T_{u31} = 0.00678T_{en}^2 + 0.9325T_{en} + 0.36845$
节点 32	$T_{u32} = 0.00464T_{en}^2 + 0.38969T_{en} + 12.74348$
节点 33	$T_{u33} = 0.00182T_{en}^2 + 0.36639T_{en} + 11.66464$

表 A3 变压器参数一览表

Table A3 List of line parameters

参数	$\Delta\theta_{or}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta\theta_{hr}/^{\circ}\text{C}$	τ_0/min	τ_w/min	x	y
取值	45	35	150	7	0.8	1.3
参数	R	K_{11}	K_{21}	K_{22}	D_t/min	
取值	86	2	2	2	3	

表 A4 变压器规格一览表

Table A4 List of transformer specifications

变压器所处位置	容量大小/kVA
节点 2	315
节点 3	315
节点 4	315
节点 5	125
节点 6	125
节点 7	500

续表 A4

变压器所处位置	容量大小/kVA
节点 8	500
节点 9	160
节点 10	160
节点 11	125
节点 12	125
节点 13	125
节点 14	315
节点 15	160
节点 16	160
节点 17	160
节点 18	200
节点 19	200
节点 20	200
节点 21	200
节点 22	200
节点 23	200
节点 24	1000
节点 25	1000
节点 26	125
节点 27	125
节点 28	125
节点 29	315
节点 30	1000
节点 31	315
节点 32	500
节点 33	160

表 A5 元件老化速率计算参数一览表

Table A5 Component aging rate calculation parameter list

参数	n	m	b/K	B/K
取值	7.0	2.3	6000	17000
参数	L_0/a	δ_0 /K	$E_0/(kV \cdot mm^{-1})$	$M_0/(N \cdot mm^{-2})$
取值	4.5×10^4	298	5.0	2.4×10^{-4}

表 A6 不同元件修正参数一览表

Table A6 List of correction parameters for different components

元件	E	M	δ_0
断路器	$2.0 E_0$	$7.2 M_0$	25℃
隔离开关	$2.2 E_0$	$6.8 M_0$	40℃
互感器	$1.1 E_0$	$24.2 M_0$	40℃

表 A7 线路参数一览表

Table A7 List of line parameters

配电线路	型号与类型	载流量/A
架空线 1、2	LGJ—500/45	967
架空线 3~5	LGJ—400/50	857
架空线 6~8	LGJ—120/25	365
架空线 9~21	LGJ—10/2	87
电缆 22~24	交联聚乙烯	282
电缆 25、26	交联聚乙烯	376
电缆 27、28	交联聚乙烯	240
电缆 29~32	交联聚乙烯	135

附录 B

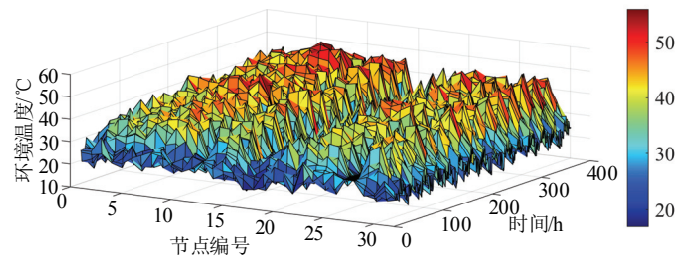


图 B1 不同节点处的环境温度变化图

Fig.B1 Ground temperature variation at different nodes