

# 基于数值天气预报修正的配电网带电作业安全评估

陈凡<sup>1</sup>, 冯博<sup>2</sup>, 王文清<sup>1</sup>, 沈伟<sup>1</sup>, 颜雅琼<sup>1</sup>, 唐雪娇<sup>1</sup>

<sup>1</sup>宿迁市气象局, 江苏 宿迁

<sup>2</sup>绍兴市柯桥区气象局, 浙江 绍兴

收稿日期: 2024年7月19日; 录用日期: 2024年8月10日; 发布日期: 2024年8月21日

## 摘要

配电网带电作业是指线路配电设备带电进行检修, 在这种高风险环境下工作, 作业计划需要根据气象条件等不可控因素灵活调整, 建立科学可靠的配电网微气象带电作业安全评估方法对保证带电作业环节安全、提高人员调度效率和作业效率至关重要。本文依据配网带电作业特点, 确认配网微气象带电作业安全评价指标; 基于评价指标层次结构采用G1赋权法确定气温、相对湿度等指标的权重; 划分带电作业安全等级, 结合半梯形和三角形函数构建各气象指标隶属度函数, 并基于数值预报修正数据, 对带电作业安全进行评估, 确保带电作业安全, 为未来的作业计划和决策提供可靠的参考依据。

## 关键词

带电作业, 气象, G1赋权法

# Safety Assessment of Live Working in Distribution Networks Based on Meteorological Conditions

Fan Chen<sup>1</sup>, Bo Feng<sup>2</sup>, Wenqing Wang<sup>1</sup>, Wei Shen<sup>1</sup>, Yaqiong Yan<sup>1</sup>, Xuejiao Tang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Suqian Meteorological Bureau, Suqian Jiangsu

<sup>2</sup>Shaoxing Keqiao District Meteorological Bureau, Shaoxing Zhejiang

Received: Jul. 19<sup>th</sup>, 2024; accepted: Aug. 10<sup>th</sup>, 2024; published: Aug. 21<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

Live working in distribution networks refers to the maintenance of live distribution equipment on

文章引用: 陈凡, 冯博, 王文清, 沈伟, 颜雅琼, 唐雪娇. 基于数值天气预报修正的配电网带电作业安全评估[J]. 智能电网, 2024, 14(4): 41-47. DOI: 10.12677/sg.2024.144005

power lines. Working in such a high-risk environment requires flexible adjustments to the home-work plan based on uncontrollable factors such as meteorological conditions. Establishing a scientifically reliable safety assessment method for micro meteorological live working in distribution networks is crucial for ensuring the safety of live working processes, improving personnel scheduling efficiency, and operational efficiency. Based on the characteristics of live working in distribution networks, this article confirms the safety evaluation indicators for micro meteorological live working in distribution networks; Using the G1 weighting method based on the hierarchical structure of evaluation indicators to determine the weights of indicators such as temperature and relative humidity; Divide the safety level of live working, construct membership functions for various meteorological indicators based on semi trapezoidal and triangular functions, and evaluate the safety of live working based on numerical forecast correction data, ensuring the safety of live working and providing reliable reference for future work plans and decisions.

## Keywords

Live Working, Meteorology, G1 Weighting Method

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在全球气候正在发生变化的背景下，天气系统均在发生着变化，气候系统变得更加不稳定。而气象对电力的影响不容忽视，随着科技的不断进步，我们能够更加深入地认识到气象影响人民生产生活的实质。我国国土辽阔，季节性气候变化明显，气候对电力的影响越来越大，无论是发电还是输电，都会受到影响。例如，随着强风的到来，线路支撑脆弱，抑制电流的传输，减少输电效率，甚至可能出现停电现象。

电力供应作为城市经济的一项关键支撑，我们对其可靠性的要求日益提升。因此，电网公司在内部对于配电网的稳定性的关注度不断提升，为了确保配电网供电稳定性和安全性，我们必须定期对配电网设备进行检修维护，这也使得带电作业次数增长迅速[1]-[3]。现阶段，所有带电作业均采用全绝缘化的方式，这种作业方式大大提高了操作人员的基本安全水平，但配电网带电作业仍面临着复杂地形和天气变化等挑战，为保障带电作业的顺利进行，作业前需要对作业点的地形、设备以及气象条件等进行勘察和确定，从而优化人员车辆分配和计划执行等问题。因此，对作业点气象条件进行安全评价分析，降低安全风险对提高带电作业安全具有重大意义[4]-[6]。

以往对于电力与气象相关关系的研究，多为基于实况数据的分析研讨，无法对各项电力工作开展提供精准预判。数值天气预报是根据大气实际情况，以天气演变过程相关的热力学、流体力学方程组为基础，对未来一定时间、空间的温度、湿度、风速风向等气象数据进行预报，目前已经发展为一种定量且客观的科学方法[7]，是如今天气预报、防灾减灾的核心技术。目前，水利施工、煤炭开采等各领域的安全评估通常使用神经网络分析、故障树分析、G1 赋权法等，其中，G1 赋权法是一种无需进行一致性检验的层次分析法的改进方法，较传统赋权法能更有效地降低线路发生故障的安全风险，提高带电作业安全评估精度[8]-[10]。但是 G1 赋权法是以定性计算为主，主要应用于定性评估，因此本文在 G1 赋权法的基础上结合隶属度函数，同时利用数值天气预报修正结果对带电作业进行评估，以期达到较好的结果评定，为配电网带电作业安全评估提供参考依据。

## 2. 带电作业安全评估函数建立

### 2.1. 带电作业气象因素选取

配电网带电作业时安全风险是其作业过程中最主要的问题，这除了需要操作人员具备相关的专业知识和技能外，还需要考虑气象条件、地形或其他不可控条件。而气象条件主要需要考虑风、温度、湿度、雨、雾、雷等。当风力超过一定级别，作业人员、工具设备等受风力影响较大；当气温过低或过高时，作业人员操作困难；相对湿度过大时，对绝缘工具影响较大，会使绝缘工具的绝缘强度下降；绝缘工具在雨、雾等天气下，绝缘性能降低，容易造成工具闪络；雷电可引起电网系统过电压，过电压将使带电设备和绝缘工具有可能发生闪络或击穿而受到破坏，威胁人身和设备安全。因此，带电作业通常在良好的天气下进行，文中选择气温、风速、相对湿度和气压作为带电作业气象条件判断的主要指标。

### 2.2. 指标权值确定

G1 赋权法是层次分析法(analysis of hierarchy process, AHP)的一种改进方法，它能有效地降低计算复杂度并提供方便直观的结果，无需构造判断矩阵，也无需进行一致性检验，同时具有保序性的特点[11]。其确定顺序关系的主要流程为[11]：首先建立需要评估的指标集合  $\{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ ，然后从中选择出最为次要或者重要的指标，标记为  $X_i$ ，接下来，对剩余未被评定的评价指标集中的每个元素重复执行以上步骤，可以得到各元素的唯一序关系  $X_i > X > \dots > X_k$  ( $i, j, k \in \{1, 2, \dots, m\}$ )。最后确定各相邻指标之间的相对重要程度。

G1 赋权法作为主观赋权法，依赖于专家们对体系中的各个指标进行评分，分数则反映了特定要素对于带电作业安全的相对重要性，用数学关系表示为  $r_k = w_{k-1}/w_k$ ，式中  $w_k$  为第  $k$  个指标的权重系数，且  $k = 2, 3, \dots, m$ 。为了尽可能减少因人为主导产生的偏差，每个指标的最终评分通过多位专家评判再取平均的方式进行计算，以此得到待评估指标集中各个元素的唯一序关系。通常，可以取最次要指标相对重要程度  $r_m = 1$ ，可参考表 1。

$$r_{k-1} \geq r_k \quad (1)$$

$$w_m = \left[ 1 + \sum_{k=2}^m \prod_{i=k}^m r_i \right]^{-1} \quad (2)$$

$$w_{k-1} = r_k \cdot w_k \quad (3)$$

**Table 1.** The definition of each scale

**表 1.** 各标度的定义

重要程度 $r_k$	规则
1.0	指标 $X_{k-1}$ 与 $X_k$ 同样重要
1.2	指标 $X_{k-1}$ 与 $X_k$ 稍微重要
1.4	指标 $X_{k-1}$ 与 $X_k$ 明显重要
1.6	指标 $X_{k-1}$ 与 $X_k$ 强烈重要
1.8	指标 $X_{k-1}$ 与 $X_k$ 极端重要
1.1、1.3、1.5、1.7	介于两者之间

### 2.3. 隶属度函数建立

常用的隶属度函数有三角形函数、梯形函数等，而各研究表明，利用半梯形及三角形描述评判等级间的模糊性比较科学[12]-[14]。因此，本文中采用两种隶属度函数相结合的方法对气象指标进行处理。其中，三角形隶属度函数形状通常由三个参数共同决定，分别代表着三角形从左到右三个顶点代表的 x 轴坐标；梯形隶属度函数与三角形隶属度函数类似，其四个参数分别对应四个顶点的 x 轴坐标值。

本文进行带电作业评估的气象指标的量纲和数量级不尽相同，因此，在进行隶属度函数建立前，需将各定量指标进行归一化处理。归一化方法如下。

$$x = \frac{d_{\max} - d_i}{d_{\max} - d_{\min}} \text{ 或 } x = \frac{d_i - d_{\max}}{d_{\max} - d_{\min}} \tag{4}$$

以指标气温和风速为例，建立隶属度函数，见表 2。

**Table 2.** Membership function of meteorological condition index  
**表 2.** 气象条件指标隶属函数

	气温	风速
安全	$u(x) = \begin{cases} 10x - 4 & 0.4 \leq x < 0.5 \\ 6 - 10x & 0.5 \leq x < 0.6 \\ 0 & x < 0.4 \parallel x \geq 0.6 \end{cases}$	$u(x) = \begin{cases} 4x - 2.4 & 0.6 \leq x < 0.85 \\ 1 & x \geq 0.85 \\ 0 & x < 0.6 \end{cases}$
较安全	$u(x) = \begin{cases} 10x - 3 & 0.3 \leq x < 0.4 \\ 5 - 10x & 0.4 \leq x < 0.5 \\ 10x - 5 & 0.5 \leq x < 0.6 \\ 7 - 10x & 0.6 \leq x < 0.7 \\ 0 & x < 0.3 \parallel x \geq 0.7 \end{cases}$	$u(x) = \begin{cases} 5x - 2 & 0.4 \leq x < 0.6 \\ 3.4 - 4x & 0.6 \leq x < 0.85 \\ 0 & x < 0.4 \parallel x \geq 0.85 \end{cases}$
危险	$u(x) = \begin{cases} 5x - 0.5 & 0.1 \leq x < 0.3 \\ 4 - 10x & 0.3 \leq x < 0.4 \\ 10x - 6 & 0.6 \leq x < 0.7 \\ 4.5 - 5x & 0.7 \leq x < 0.9 \\ 0 & x < 0.1 \parallel 0.4 \leq x < 0.6 \parallel x \geq 0.9 \end{cases}$	$u(x) = \begin{cases} 5x - 1 & 0.2 \leq x < 0.4 \\ 3 - 5x & 0.4 \leq x < 0.6 \\ 0 & x < 0.2 \parallel x \geq 0.6 \end{cases}$
极危险	$u(x) = \begin{cases} 1.5 - 5x & 0.1 \leq x < 0.3 \\ 0 & 0.3 \leq x < 0.7 \\ 0.5x - 3.5 & 0.7 \leq x < 0.9 \\ 1 & x < 0.1 \parallel x \geq 0.9 \end{cases}$	$u(x) = \begin{cases} 1 & x < 0.2 \\ 2 - 5x & 0.2 \leq x < 0.4 \\ 0 & x \geq 0.4 \end{cases}$

## 3. 宿迁市带电作业安全评估

### 3.1. 带电作业安全等级计算

在上述基础上计算作业安全系数，其计算公式为：

$$f(x) = \sum_{k=1}^n w_k \cdot q_k \tag{5}$$

式中： $f(x)$ 表示配电网作业系数； $q_k$ 表示第  $n$  各指标量化数值。根据带电作业经验，将带电作业安全等级划分为安全、较安全、危险和极危险 4 个等级，其评分见表 3。

**Table 3.** Classification and rating of safety levels for live-line working  
**表 3.** 带电作业安全等级划分及评分

安全等级	加权值	评分值
安全	90	80~100
较安全	70	60~80
危险	50	40~60
极危险	30	小于 40

### 3.2. 宿迁市气象要素数值预报线性订正

选取江苏省宿迁市 4 个国家站 2021 年 6 月 1 日~2022 年 5 月 31 日的 36 h 内逐小时预报结果和实况的平均气温、相对湿度等气象因素，因数值预报的间隔时间为 3 小时，所以，选取最近一个时次的数值预报结果为  $t_1$ ，其次相近的预报时次结果为  $t_2$ ， $\dots$ ，选取临近 3~36 h 时效内的预报结果(即  $t_2, t_3, \dots, t_{12}$ )，分别对春、夏、秋、冬四季的气象因子进行 Lasso 筛选和线性拟合，拟合结果见表 4。

**Table 4.** Linear fitting equation of numerical forecast for each meteorological factor  
**表 4.** 各气象因子的数值预报线性拟合方程

气象要素	拟合方程	$r^2$	
春	气温	$1.940 + 0.246 * t_2 + 0.502 * t_3 + 0.059 * t_8 + 0.007 * t_9 + 0.064 * t_{10}$	0.9
	相对湿度	$15.198 + 0.203 * t_3 + 0.191 * t_4 + 0.156 * t_5 + 0.0913 * t_6 + 0.171 * t_8$	0.71
	风速	$0.241 + 0.159 * t_2 + 0.188 * t_3 + 0.127 * t_4 + 0.169 * t_7 + 0.007 * t_8$	0.53
	气压	$0.093 + 0.212 * t_2 + 0.214 * t_3 + 0.085 * t_4 + 0.262 * t_5 + 0.198 * t_6$	0.97
夏	气温	$6.030 + 0.396 * t_2 + 0.299 * t_3 + 0.105 * t_4 + 0.075 * t_5 - 0.161 * t_{11}$	0.8
	相对湿度	$22.750 + 0.339 * t_2 + 0.224 * t_3 + 0.099 * t_6 + 0.039 * t_8 + 0.084 * t_9$	0.73
	风速	$0.251 + 0.118 * t_2 + 0.095 * t_6 + 0.145 * t_7 + 0.184 * t_8 + 0.042 * t_9$	0.46
	气压	$0.540 + 0.208 * t_4 + 0.318 * t_5 + 0.181 * t_6 + 0.132 * t_7 + 0.069 * t_8$	0.91
秋	气温	$0.426 + 0.595 * t_2 + 0.104 * t_3 + 0.199 * t_4 + 0.061 * t_7 + 0.008 * t_8$	0.94
	相对湿度	$10.825 + 0.435 * t_2 + 0.047 * t_5 + 0.085 * t_7 + 0.216 * t_8 + 0.048 * t_9$	0.73
	风速	$0.270 + 0.125 * t_2 + 0.168 * t_3 + 0.155 * t_5 + 0.071 * t_8 + 0.148 * t_9$	0.55
	气压	$-0.032 + 0.346 * t_3 + 0.635 * t_5 + 0.148 * t_9 + 0.117 * t_{10} - 0.263 * t_{12}$	0.98
冬	气温	$0.416 + 0.657 * t_2 + 0.266 * t_4 + 0.143 * t_8 - 0.141 * t_9 + 0.042 * t_{12}$	0.94
	相对湿度	$13.190 + 0.352 * t_3 + 0.097 * t_4 + 0.108 * t_5 + 0.207 * t_{11} + 0.174 * t_{12}$	0.76
	风速	$0.206 + 0.209 * t_2 + 0.150 * t_3 + 0.135 * t_4 + 0.032 * t_5 + 0.062 * t_8$	0.51
	气压	$-1.140 + 0.340 * t_2 + 0.558 * t_3 + 0.214 * t_4 - 0.083 * t_8 - 0.015 * t_{11}$	0.98

以宿迁市区某次气象环境下带电作业安全评估结果，对所提方法进行验证。其中，各气象因子实况及订正后的预报结果见表 5。

**Table 5.** Meteorological factor values  
**表 5.**气象因素值

气象环境因素	实况	预报
气压/pa	1022.9	1022.2
温度/°C	14.5	14.4
相对湿度/%	58	65
风速/(m·s <sup>-1</sup> )	6.4	5.2

以该气象环境条件下为例，基于温度、湿度、风速等气象因素的隶属度函数计算评价矩阵。首先，通过 G1 赋权法计算权重  $W = [0.125, 0.201, 0.281, 0.393]$ ，进行归一化处理后，按照隶属度函数计算指标集合的隶属度矩阵：

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0.71 & 0.39 & 0 \\ 0.85 & 0.15 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0.75 & 0 \\ 0 & 0.97 & 0.03 & 0 \end{bmatrix}$$

计算目标隶属度：

$$b_s = W \cdot R = [0.171 \quad 0.572 \quad 0.257 \quad 0]$$

结合目标状态加权值，获得目标最终得分。

$$S = b_s \cdot V^T = 68$$

同理计算可得，基于数值模式订正方程的最终得分为 70，即该次气象环境下的带电作业实况和预报均处于较安全等级范畴，该评估结果及所提方法可为带电作业安全评估提供参考。

#### 4. 结语

作业点勘查和气象条件确认是配网线路带电作业的关键流程，这包括监测天气变化、温度、湿度、风速等因素，以评估作业的安全性和可行性。本文丰富了配电网带电作业安全评估理论，方便了供电公司对带电作业工作及管理人员进行风险管理、合理安排作业时间，为未来的作业计划和决策提供可靠的参考依据，并得到以下结论：

- 1) 利用 G1 赋权法和隶属度函数分别计算气象因子权重和目标隶属度，并通过修正后的数值天气预报计算当前气象条件下的带电作业安全得分；
- 2) 以宿迁市某次气象条件下的带电作业安全评估为例，详细计算了整个评估过程，实况和预报评估结果均处于较安全等级范畴，验证本文所提方法的可行性。

#### 参考文献

- [1] 国家电网公司. 供电企业安全风险评估规范[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 赵伍, 薛警卫, 赵威. 解析 10kV 配网带电作业安全防护措施[J]. 山东工业技术, 2018(23): 179.
- [3] 杨慎涛, 陈劲松, 袁林. 基于 G1 赋权法的配电网带电作业安全综合评估[J]. 四川电力技术, 2020, 43(2): 91-94.
- [4] 徐斌. 10kV 配网旁路带电作业风险与预防控制分析[J]. 电工技术, 2022(6): 166-167, 170.
- [5] 彭勇, 雷兴列, 方玉群, 等. 特高压直流输电线路不停用再启动功能情况下的带电作业安全性分析[J]. 四川电力技术, 2019, 42(4): 85-89.

- 
- [6] 张昊. 电网运行安全风险量化评估软件实现[J]. 云南电力技术, 2017, 45(3): 43-45.
- [7] Benjamin, S.G., Brown, J.M., Brunet, G., Lynch, P., Saito, K. and Schlatter, T.W. (2019) 100 Years of Progress in Forecasting and NWP Applications. *Meteorological Monographs*, **59**, 13.1-13.67.  
<https://doi.org/10.1175/amsmonographs-d-18-0020.1>
- [8] 谢铖. 基于 G1 赋权法的配网带电作业安全评估方法[J]. 自动化应用, 2022(12): 150-152.
- [9] 万静, 孟凡兰. 基于 AHP 和 BP 神经网络纵向结合的水利施工安全评估算法[J]. 四川水泥, 2022(7): 43-45.
- [10] 王凯, 晋民杰. 基于模糊故障树的矿井提升制动系统安全评估[J]. 太原科技大学学报, 2019, 40(6): 467-471.
- [11] 李军, 李继光, 姚建刚, 等. 属性识别和 G1 熵权法在电能质量评价中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 56-61.
- [12] 姚升保, 徐敏. 群组决策中三角模糊数互补判断矩阵的相容性及方案排序研究[J]. 中国管理科学, 2012, 20(5): 152-156.
- [13] 李振华, 丁春. 基于改进模糊层次分析法的环境空气质量综合评价[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(6): 1238-1245.
- [14] 樊梦佳, 袁兴中, 祝慧娜, 等. 基于三角模糊数的河流沉积物中重金属污染评价模型[J]. 环境科学学报, 2010, 30(8): 1700-1706.