

基于模糊故障树的输电线路建设 安全风险分析

瞿业明, 李洪兵, 戚立峰

(浙江中新电力工程建设有限公司承装分公司, 浙江 杭州 311200)

摘要: 输电线路工程的安全建设对于保证电网发展质量具有重要作用, 施工安全管理问题是工程建设安全和可靠性的潜在威胁。为此依据系统论的方法, 提出了智能化建设中电力线路建设工程模糊故障树模型, 并对基于基本事件与中高级事件概率的故障树逻辑结构进行分析, 估算了事故发生的概率, 最后结合实例进行了计算分析, 结果表明所提方法可以对电力建设工程中倒塔事故进行有效分析。

关键词: 输电线路; 建设工程; 模糊故障树模型; 安全风险分析; 发生概率

Safety risk analysis of transmission line construction based on fuzzy fault tree

QU Yeming, LI Hongbing, QI Lifeng

(Zhejiang Zhongxin Power Engineering Construction Co., Ltd. Contracting Branch, Hangzhou 311200, China)

Abstract: The safe construction of transmission line projects plays an important role in ensuring the quality of power grid development, and construction safety management issues are a potential threat to the safety and reliability of project construction. For this reason, a fuzzy fault tree model for power line construction engineering in intelligent construction is proposed based on the method of system theory, and the logic structure of the fault tree based on the probability of basic events and intermediate and high-level events is analyzed, and the probability of accidents is estimated. The calculation and analysis are carried out with examples, and the results show that the method proposed can effectively analyze the collapsed tower accidents in power construction projects.

Key words: transmission line; construction project; fuzzy fault tree model; safety risk analysis; probability of occurrence

0 引言

停电事故预防对于保证电力系统安全、稳定运行具有重要意义, 片区停电乃至大规模停电, 将直接影响居民的正常生活及经济生产^[1-2]。因此强化电力线路建设施工的安全风险分析, 对预测和预防停电事故的发生具有重要作用。

近年来, 电力线路建设施工的安全管控逐渐成为电网公司和科研机构的研究热点之一^[3]。造成电网安全事故的因素有很多, 主要有电力设备

故障、人为失误及自然灾害等。其中自然灾害是造成输电线路发生绝缘子闪络、雷击跳闸等事故的主要成因, 例如我国南部的大面积冰冻灾害以及东部地区的雷雨大风、台风等。研究表明 20 世纪 90 年代以来, 随着超特高压输电线路的建设和投运, 由自然灾害造成的杆塔倒塌、绝缘闪络等事故的累计频率和数量均呈增长趋势^[4-5]。除此以外, 工程建设过程中常常出现施工安全管理问题, 直接影响到我国电网的发展质量和供电企业的社会效益, 同时也影响着供电企业辛苦

打造的电能品牌和企业形象。初步统计,国家电网公司自2005年以来发生的输变电工程施工安全事故近80%系重复发生^[6],特别是近期发生的“5.11”组立抱杆倾斜事故,这与2013年“8.6”组立抱杆倾倒事故、2015年“5.3”组立抱杆倾倒事故类似,为输变电工程施工的安全性问题敲响了警钟。

为此,本文基于模糊故障树理论,通过对故障原因进行分解,分析故障因素之间的逻辑关系,建立了输电线路模糊故障树分析模型。分析计算了基本事件和中间事件的模糊数和模糊算子,对输电线路工程建设的安全风险进行评估。

1 模糊故障树分析法

模糊故障树分析法可以提高系统的可靠性,该理论首先通过对故障原因进行分解,从而建立起故障因素之间的逻辑关系,进而对系统的可靠性进行评估。近年来,模糊故障树分析法已成为评价系统可靠性和安全性的重要手段之一。采用模糊故障树法进行分析包括以下几个步骤。

(1) 模糊故障树的构造

作为模糊故障树的起点和来源,顶层事件发生的概率很小,如杆塔倒塌事件在线路建设工程安全风险分析中就可以归为顶层事件。基本事件表示一般事故发生的概率,又称为最后一级事件。

在电力系统线路建设中,标准化故障树的建立通常采用人工演绎的方法,故障树由“与”“或”“非”三个逻辑门、基本事件和中间事件组成。在进行线路建设安全风险分析后,本文找出了造成输电铁塔倒塌的原因,最后一级事件表示一般事故发生的概率,称为故障树的基本事件。

(2) 定性与定量分析

本文利用上行法或下行法得到了单调故障树的最小割集,并给出了单调故障树的结构函数,进而建立了故障树。结构函数反映了顶层事件与基本事件之间的逻辑关系。通过布尔代数规则计算,结构函数可表示为

$$y = \phi(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_i M_i \quad (1)$$

式中, $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为基本事件; M_i 为最小割集,其可表示为

$$M_i = \prod_{x_j \in M_i} x_j \quad (2)$$

首先假设两个概率都是模糊数,并在基本事件相互独立且发生概率已知的情况下,利用上述结构函数的方法可计算出顶层事件的发生概率。为了定量分析基本事件对顶层事件发生概率的影响,必须优先计算中间事件的发生概率。

在输电塔线路建设安全风险分析中,基本事件的实际发生概率计算比较困难,因此可采用模糊数来表示。采用这种方法可以解决其值不确定性的两个方面:随机性和模糊性。采用模糊数描述输电铁塔倒塌发生的概率,不仅可以降低概率精确值的获取难度,而且通过结合工程技术人员实际经验和判断,构造模糊隶属函数,并利用模糊集理论处理基本事件的概率误差,可以使其描述更加准确。因此,该方法具有更大的灵活性和适应性。

2 电力线路安全风险的模糊故障树模型

2.1 隶属函数模型

模糊数是域 R 上的凸模糊集,其隶属函数满足

$$\max_{x \in R} \mu(x) = 1 \quad (3)$$

通过式(3)可知,模糊数的隶属度有多种函数形式。

将关于实变量 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 的实函数 $Y = \Phi\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 推广到模糊域上,推导出模糊变量 $\{\underline{x}_1, \underline{x}_2, \dots, \underline{x}_n\}$ 和模糊函数 $Y = \Phi\{\underline{x}_1, \underline{x}_2, \dots, \underline{x}_n\}$,其隶属函数如下

$$\mu_{\underline{Y}}(v) = \bigvee_{v = \Phi(s_1, s_2, \dots, s_n)} \bigwedge_{i=1}^n \mu_{\underline{x}_i}(s_i) \quad (4)$$

如果 L 满足以下条件:① $L(x) = L(-x)$;② $L(0) = 1$;③ $L(x)$ 在 $[0, \infty)$ 中是非递增的分段连续的,便称 L 为模糊参量。

假设 L 和 R 是模糊数的参考函数,满足

$$\mu_m(x) = \begin{cases} L[(m-x)/\alpha] & x \leq m, \alpha > 0 \\ R[(x-m)/\beta] & x > m, \beta > 0 \end{cases} \quad (5)$$

然后将模糊数称为 L - R 类型, 用下式表示

$$\tilde{m} = (m, \alpha, \beta)_{LR} \quad (6)$$

式中, m 为模糊数的平均值, α 和 β 为其左、右分布, 当 α 和 β 等于零时, 它们便不是模糊数。其中, β 分布越大, 函数越模糊。

显然, 模糊数的定义是正向凸模糊集, 并且它是逐片连续的, 且满足

$$\mu_{\tilde{m}}(m) = 1 \quad (7)$$

通常, 模糊故障树的隶属函数一般分为线性、正态和尖点三种类型。本文选取了隶属函数的尖点型模型如图 1 所示, 参考函数如下

$$\begin{cases} L[(m-x)/\alpha] = 1/[1+(m-x)/\alpha] & x \leq m, \alpha > 0 \\ R[(x-m)/\beta] = 1/[1+(x-m)/\beta] & x > m, \beta > 0 \end{cases} \quad (8)$$

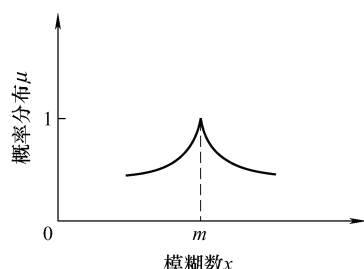


图 1 隶属函数的尖点型模型

Fig. 1 Cusps type model of membership function

图 1 中的尖点型隶属函数曲线的两端都可以延拓到无穷大, 并且 x 轴上的任何一个数都必须包含在该函数中。

根据输电线路铁塔倒塌事故树结构功能特点, 提出模糊数的代数算法如下:

加法规则 $\oplus$

$$(m, \alpha, \beta)_{LR} \oplus (n, \gamma, \delta)_{LR} = (m+n, \alpha+\gamma, \beta+\delta)_{LR} \quad (9)$$

乘法法则 $\odot$

$$(m, \alpha, \beta)_{LR} \odot (n, \gamma, \delta)_{LR} \approx (mn, m\gamma + n\alpha, m\delta + n\beta)_{LR} \quad (10)$$

当函数曲线的左右分布较长时(若不小于平均值), 应采用以下近似公式

$$(m, \alpha, \beta)_{LR} \odot (n, \gamma, \delta)_{LR} \approx (mn, m\gamma + n\alpha - \gamma\alpha, m\delta + n\beta + \beta\delta)_{LR} \quad m > 0, n > 0 \quad (11)$$

在实际工程中, 输电线路塔倒塌事故树的结构功能计算涉及“或门”和“与门”逻辑分析。

对于或门事件, 模糊算子表示如下

$$P_{\tilde{Y}}^{\text{OR}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i) = \text{OR}(p_1, p_2, \dots, p_n) \quad (12)$$

由式(9)可知, 上述方程可表示为

$$P_{\tilde{Y}}^{\text{OR}} = (1, 0, 0)_{LR} - \{[(1, 0, 0)_{LR} - (m_{p_1}, \alpha_{p_1}, \beta_{p_1})_{LR}] \odot [(1, 0, 0)_{LR} - (m_{p_2}, \alpha_{p_2}, \beta_{p_2})_{LR}] \odot \dots \odot [(1, 0, 0)_{LR} - (m_{p_n}, \alpha_{p_n}, \beta_{p_n})_{LR}]\} \quad (13)$$

对于与门事件, 模糊算子表示如下

$$P_{\tilde{Y}}^{\text{AND}} = \prod_{i=1}^n p_i = \text{AND}(p_1, p_2, \dots, p_n) \quad (14)$$

2.2 线路建设安全风险分析研究

本文依据输电线路工程施工管理实践, 应用风险曲线法和杆塔倒塌事故的概率风险等级, 采用模糊故障树方法计算出杆塔倒塌事故的概率。评价指标如表 1 所示。

表 1 塔架倒塌安全风险评价指标

Tab. 1 Safety risk assessment indicator of tower collapses

风险等级	事件概率	风险描述
低风险	<0.3	该事件可通过线路设计、施工和日常维护管理等消除风险
中风险	0.3~0.7	该事件可能会造成局部故障, 但不会影响整个电网运行。需要通过充分考虑线路设计、制订详细的施工管理计划及考虑加固措施等预防事件发生
高风险	>0.7	该事件将影响整个电网安全运行, 必须采取相应管控措施降低风险水平

3 实例分析

2005 年 6 月, 500 kV 仁商 5237 输电塔倒塌, 造成了仁商 5238 线跳闸, 并导致两线停电, 这对华东电网造成了严重影响。现场调查表明, 此次由强风暴造成的倒塌事故中, 共有 406 塔架 10 座倒塌, 倒塔段导线未发生断裂, 其破坏特征是塔腿侧面有压缩且比较完整, 且不存在较严重的变形或屈曲。塔身则存在较为严重的损伤, 其中一部分斜向材料断裂。塔头和塔身的上部由于受到撞击掉落在地上而被摧毁。

402 号、403 号、404 号和 407 号塔受损情况

与 406 号塔相似。409 塔的破坏特征为：塔腿向上整体倒伏，受压主材在上方断裂，塔身严重损坏，与 405、408 号塔相同。411 号塔身损伤特征为：塔腿完整，塔身中部发生严重破坏，塔头落地后部分损坏。410 号塔损坏为角塔翻转，角度为 $12^{\circ}23'$ ，其破坏特征为：塔腿、塔身相对完整，塔头则破坏严重。

显然，造成输电塔倒塌失稳的直接原因是强风暴和塔身的变形。其中，塔身结构的失稳可能是由基础或上部结构破坏所引起，也可能是由于塔腿、塔体或塔顶的不稳定造成。而这整个事件则可能是由于材料的失效、设计的缺陷或施工质量的不合格造成的。本文运用模糊故障树方法，结合其他电网事故统计、故障分析和专家判断，建立了输电铁塔倒塌事故的模糊故障树模型，其逻辑分解如表 2 所示，逻辑结构如图 2 所示。

表 2 输电线路塔坍塌逻辑分解
Tab. 2 Logical decomposition of transmission line tower collapses

安全风险事件	事件的性质	符号
输电线路杆塔倒塌	顶层事件	T
塔身失稳	中间事件	U
塔身结构失稳	中间事件	V
塔身上部结构失稳	中间事件	W
塔腿损坏	中间事件	Z_1
塔体损坏	中间事件	Z_2
塔头损坏	中间事件	Z_3
毁灭性强风暴	基本事件	X_1
塔架加固失效	基本事件	X_2
塔基失稳	基本事件	X_3
塔腿材料失效	基本事件	X_4
塔腿设计缺陷	基本事件	X_5
施工质量不合格	基本事件	X_6
塔体材料失效	基本事件	X_7
塔身设计缺陷	基本事件	X_8
铁塔施工质量不合格	基本事件	X_9
塔头材料失效	基本事件	X_{10}
塔头设计缺陷	基本事件	X_{11}
塔头质量不合格	基本事件	X_{12}

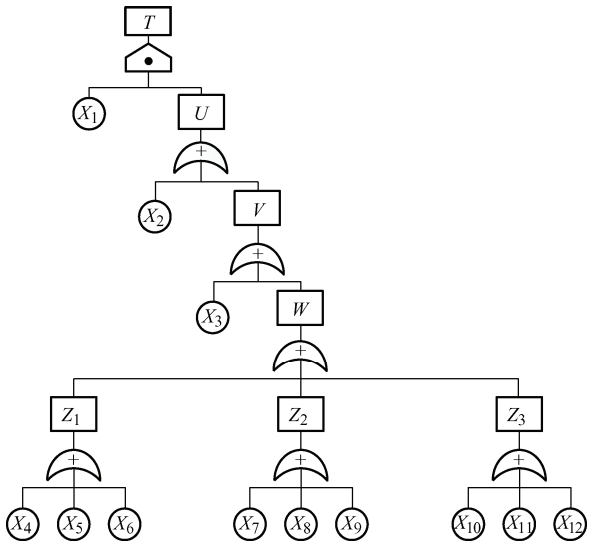


图 2 输电线路杆塔倒塌事故树逻辑结构
Fig. 2 Fault tree logical structure of transmission line tower collapses

假设基本事件相互独立，图 2 为中间风险事件： Z_1 (塔腿失稳)、 Z_2 (塔身失稳)、 Z_3 (塔头失稳)、 V (塔身结构变形)、 W (塔身上部结构失稳)和 U (塔身失稳)，其函数表示方式如下

$$Z_1 = X_4 + X_5 + X_6 \tag{15}$$

$$Z_2 = X_7 + X_8 + X_9 \tag{16}$$

$$Z_3 = X_{10} + X_{11} + X_{12} \tag{17}$$

$$W = Z_1 + Z_2 + Z_3 \tag{18}$$

$$V = X_3 + W \tag{19}$$

$$U = X_2 + V \tag{20}$$

顶层事件 T 的真值函数表示如下

$$T = X_1 \times U \tag{21}$$

式(8)、式(13)和式(14)可用于计算“或门”模糊算子 $OR(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 和“与门”模糊算子 $AND(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 。在本例中使用式(6)，并假设 p_i 的隶属函数集可计算出 $\mu_{pi}(x)$ 。

其中， $i=X_1, X_2, \dots, X_{12}$ ，和隶属函数是对称的， $\alpha_i=\beta_i$ 且满足

$$1/[1 + (m_i - x)/\alpha] = \alpha/(\alpha + 0.5m_i) = 0.1 \tag{22}$$

根据式(22)，及 α_i 与 β_i 关系式 $\alpha_i=\beta_i=0.055\ 6m_i$ ，可计算出输电塔倒塌发生概率的安全风险、中间

事件和基本事件的发生概率和 α 、 β 的分布, 如表 3 和表 4 所示。将计算结果与表 1 比较, 得出顶层事件(T)发生概率大于 0.7, 处于高风险范围, 而中间事件(W 、 V 和 U)则同样处于高风险范围, 因此必须充分考虑强风暴作用下塔身的设计可靠性, 加强设计质量管理, 以达到降低输电塔倒塌安全风险的目的。

表 3 基本事件概率中值及分布
Tab. 3 Probability median value and distribution of basic events

事件性质	符号	概率中值	取值 $\alpha\beta$
基础事件	X_1	1.0	0.056
基础事件	X_2	0.1	0.006
基础事件	X_3	0.05	0.028
基础事件	X_4	0.03	0.002
基础事件	X_5	0.5	0.028
基础事件	X_6	0.08	0.004
基础事件	X_7	0.03	0.002
基础事件	X_8	0.2	0.011
基础事件	X_9	0.08	0.004
基础事件	X_{10}	0.03	0.002
基础事件	X_{11}	0.2	0.011
基础事件	X_{12}	0.08	0.004

表 4 输电线路杆塔倒塌模糊故障树计算结果
Tab. 4 Calculation result of fuzzy fault tree of transmission line tower collapses

事件性质	符号	模糊算子	α 、 β 的发生概率分布
中间事件	T	AND(X_1, U)	0.805, 0.066, 0.066
中间事件	U	OR(X_2, V)	0.805, 0.021, 0.021
中间事件	V	OR(X_3, W)	0.784, 0.022, 0.022
中间事件	W	OR(Z_1, Z_2, Z_3)	0.773, 0.023, 0.023
中间事件	Z_1	OR(X_4, X_5, X_6)	0.554, 0.028, 0.028
中间事件	Z_2	OR(X_7, X_8, X_9)	0.286, 0.014, 0.014
中间事件	Z_3	OR(X_{10}, X_{11}, X_{12})	0.286, 0.014, 0.014

4 结束语

本文针对电网杆塔倒塌的安全风险识别问题, 基于模糊故障树理论, 通过构建输电塔倒塌故障树模型, 研究了电力系统电网的线路建设中的安全风险问题。并得出了以下结论:

1) 电网杆塔倒塌的安全风险识别与评估在

强风暴等灾害作用下具有重要意义。模糊故障树分析方法是评估和预测重大自然灾害对输电线路工程影响的有效方法。

2) 将故障事件分为顶层事件、中间事件以及基础事件。并通过模糊故障树法, 可以得出每一项事件发生的概率, 实现故障事件的预测。

3) 根据各个事件发生的概率以及损失可进行预算分配, 构建更加完善的电力系统及其输电线路的建设管理方案。EA

参考文献

- [1] 杨太华. 基于模糊故障树的电网倒塔事故安全风险分析[J]. 上海电力学院学报, 2009, 25(6): 589-592, 602.
- [2] 谢强, 张勇, 李杰. 华东电网 500 kV 任上 5237 线爬线风致倒塔事故调查分析[J]. 电网技术, 2006(10): 59-63, 89.
- [3] 张禹芳. 我国 500 kV 输电线路风偏闪络分析[J]. 电网技术, 2005(7): 65-67, 73.
- [4] 胡超凡, 陈刚, 赵玉柱. 2004 年国家电网安全运行情况[J]. 中国电力, 2005(5): 9-12.
- [5] 周宗发, 艾欣, 邓慧琼, 等. 基于故障树和模糊推理的电网连锁故障分析方法[J]. 电网技术, 2006(8): 86-91.
- [6] 邓慧琼, 艾欣, 张东英, 等. 基于不确定多属性决策理论的电网连锁故障模式搜索方法[J]. 电网技术, 2005(13): 50-55.

作者简介:



瞿业明

瞿业明(1977—), 男, 副高级工程师, 主要从事输配电工程管理工作。

(收稿日期: 2020-12-10)