

架空线路冰风荷载风险建模及模糊预测

孙羽, 王秀丽, 王建学, 谢绍宇

(西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049)

Wind and Ice Loading Risk Model and Fuzzy Forecast for Overhead Transmission Lines

SUN Yu, WANG Xiuli, WANG Jianxue, XIE Shaoyu

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACTS: Power systems suffer tremendous economic loss in extreme ice disaster weather, suggesting that it lacks immediate precaution system. According to standards Q/GDW 179—2008 and IEC 60826—2003, the wind and ice loading design curves for transmission lines were built up. According to the random character of load-strength and load-strength interference theory of transmission line, a time-dependent wind and ice loading risk model was established. Unreliability and fault rate can be calculated based on the proposed model, which indicates the risk for cluster fault and common fault of short-term reliability. Furthermore, the line loads were divided into five states, which could reflect the risk margin of the line. Short-term wind and ice load risk forecast was conducted based on fuzzy theory, and presented risk measurement on time scale, which could provide precaution information for operator.

KEY WORDS: extreme ice disaster weather; power system precaution; time-dependent reliability model; fuzzy forecast

摘要: 极端冰灾天气会给电力系统带来巨大的经济损失, 应对极端冰灾电力系统缺乏及时预警。基于架空输电线路设计标准 Q/GDW 179—2008 与 IEC 60826—2003, 建立了架空线路设计冰风荷载曲线。根据线路荷载-强度的随机特性与干涉理论, 建立了线路冰风荷载风险模型, 即线路冰风荷载的时间相依可靠性模型, 用于计算线路不可靠度与故障率, 以反映输电系统群发性故障的风险与短期可靠性的共模故障水平。进一步把线路荷载划分为 5 个运行状态, 给出线路的冰风荷载风险裕度。应用模糊理论对线路的短期冰风荷载风险进行预测, 并给出了时间尺度上线路的风险测度, 可为系统运行人员提供极端冰灾天气时电力系统的预警信息。

关键词: 极端冰灾天气; 电力系统预警; 时间相依可靠性模

型; 模糊风险预测

0 引言

随着全球气候的变化, 电力系统遭受极端冰灾天气影响频繁, 经济损失巨大。统计表明, 全球气候变化及相关的极端气候事件所造成的经济损失在过去 40 年平均上升了 10 倍^[1]。如 2008 年中国南方冰灾造成巨大的经济损失^[2], 充分说明中国电力系统迫切需要建立量化各种气象条件下电网安全水平的技术, 针对极端冰灾天气适时给出预警信息与合理化防御建议^[3]。

极端冰灾天气下架空线路舞动、倒塔、断线是冰荷载与风荷载共同作用的结果, 是典型的小概率大范围事件, 具有广域性、长时性、群发性、破坏性等特点, 给电力系统的安全运行带来极大的风险, 易进一步扩展为综合性社会灾难。电网易遭受极端冰灾影响的主要原因有: 1) 环境恶化导致极端天气频繁发生; 2) 电网规模的扩大使电网通过的微地形和微气象区域增加; 3) 线路设计缺乏历史观测数据, 电网一次系统设计相对薄弱。应对冰灾事件, 强壮的输电网络是电力系统可靠性最基本的物质保障, 但其投资成本将随设计标准的提高而急剧增加, 并且即使提高一次系统的设计标准也很难应对极端冰灾事件^[4]。所以必须融合气象信息系统和地理信息系统, 建立电力系统冰灾预警机制, 及时采取相应融冰措施与主动保护方案, 最大限度减少经济损失。

国内外对极端冰灾天气时的输电线路冰风荷载风险水平研究较少, 多数文献研究极端冰灾天气架空线路的覆冰增长模型。文献[5-6]针对 1999 年瑞典电网冰灾事件, 根据气象信息建立了线路的脆

基金项目: 国家自然科学基金项目(50777052, 50807043)。

Project Supported by National Science Foundation of China (50777052, 50807043).

弱模型以及相应的临界荷载曲线,但依赖于经验,无法用于其他输电线路的研究。文献[7]提供了安大略省气象站的观测数据,研究了冰风荷载计算中稀有风速折减系数的选取,但缺乏风向、覆冰密度和覆冰形状的监测数据。文献[8]建立了基于故障树电网覆冰荷载风险评估模型,将输电系统覆冰数据作为输入量,评估了输电系统风险、线路断线与倒塔情况。文献[9]建议在重冰区输电线路安装覆冰监测仪器,认为对线路覆冰实时监测是一种简单有效的方法。文献[10]指出电力系统在应对极端冰灾天气方面缺乏风险分析和预警系统,应通过实时跟踪外部环境变化,动态地识别高风险、群发性故障,并进行风险评估与风险管理。

本文基于气象预测信息,分析极端冰灾天气情况下线路荷载风险的预警信息与可靠性水平。建立了线路荷载风险模型以及荷载状态划分原则,最后应用模糊理论对输电线路荷载风险进行预测。

1 线路冰风荷载概念

极端冰灾天气情况下覆冰与风的综合荷载是导致线路倒塔、断线的主要原因。冰荷载受冰厚、冰密度的影响,冰密度通过覆冰类型反映,主要将考虑冰厚随时间的变化。风荷载受风速、风向、覆冰形状的影响,风向考虑垂直于导线的严重情况,覆冰形状通过覆冰密度与阻力系数反映^[11],实际中将主要考虑风速随时间的变化。对于长线路,可能跨越几个不同的气象区域,需要考虑其分段特性,将线路等效成多区段的串联模型,选取严重区段用以反映整条线路的故障情况。

目前对线路冰风荷载研究较少的主要原因在于缺乏气象数据和覆冰时期风速为典型中小风速。长期以来,气象数据累积面临着数据观测周期长、大型试验难以实现与费用高等困难,因此冰灾天气线路荷载计算通常只考虑冰荷载^[12-16],而忽略风荷载。实际中覆冰过后,如果持续低温,覆冰可能持续几周^[2],覆冰与高风速共同作用的概率增大,所以冰灾天气线路荷载的计算应考虑冰风荷载。冰风荷载是指导线承受的冰荷载与风荷载的合成荷载,通常以 N/m 或 kg/m 为单位,表示单位长度导线的受力情况。

2 线路冰风荷载风险模型

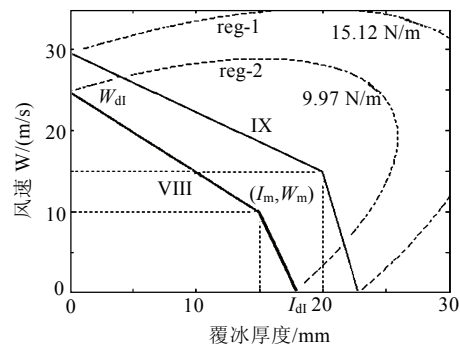
2.1 冰风荷载曲线的建立与冰风荷载计算

根据加拿大安大略省 30 个气象监测站 50 年重

现期的独立气象观测数据^[17](包括最大风速、最大覆冰与线路荷载值),建立基于最小二乘多元非线性回归函数:

$$f = a_0 + a_1 I + a_2 W + a_3 I^2 + a_4 IW + a_5 W^2 \quad (1)$$

式中: $a_0 \sim a_5$ 为回归系数; I 为线路冰厚度, mm; W 为风速, m/s; f 为单位长度导线的荷载值, N/m。回归拟合曲线如 1 所示。



W_{d1} 为只考虑单因素作用时的基本设计风速;
reg-1 为冰风荷载值为 15.12 N/m 的回归拟合曲线;
reg-2 为冰风荷载值为 9.97 N/m 的回归拟合曲线。

图 1 冰风荷载曲线

Fig. 1 Wind and ice loading curves

回归拟合曲线在某些区域同一覆冰条件下同时对 2 个风速,偏离理论分析,主要原因在于历史数据的最大风速、最大覆冰数据为独立观测数据以及缺乏风向记录。

回归拟合曲线与坐标轴相交的 2 点为只考虑单因素作用于线路的情况,分别表示线路设计基本覆冰与线路设计基本风速,覆冰与风速不相关。依据标准 Q/GDW 179—2008^[17]中气象区定义的覆冰与风速的设计值,本文基于线路冰风荷载值相等的 3 点,建立了线路冰风荷载分段线性曲线:

$$\begin{cases} W = b_0 + b_1 I, & 0 < I < I_m \\ W = b_2 + b_3 I, & I_m < I < I_{dl} \end{cases} \quad (2)$$

式中: I_{dl} 为只考虑单因素作用时的设计基本覆冰; $(I_{dl}, 0)$ 为回归拟合曲线与横轴的交点,表示风速为 0 时的线路基本覆冰; $(0, W_{d1})$ 为回归拟合曲线与纵轴交点,表示无冰情况下的基本风速(标准为距地面高度 10 m 的阵风风速或 10 min 平均风速); (I_m, W_m) 为 Q/GDW 179—2008 标准定义的气象区覆冰与风速的设计值,如第 VIII 气象区覆冰与风速设计值为 (15 mm, 10 m/s), 第 IX 气象区覆冰与风速设计值为 (20 mm, 15 m/s), 其单根导线的设计荷载值与回归拟合曲线荷载值近似相等。图中曲线 VIII、IX 是基于气象区 VIII、IX 建立的线路冰风荷载分段函数曲线。

冰风荷载曲线是线路荷载状态划分的基础。

把预测覆冰与风速数据代入式(2)计算分段函数与坐标轴的交点值，将其代入式(1)计算出线路冰风荷载值。

2.2 线路冰风荷载风险建模

依据静态结构可靠性分析理论^[18]，建立线路冰风荷载风险分析的解析模型，用于计算时间相依的线路荷载可靠性水平。假设 $X_i (i=1,2,\dots,n)$ 为描述线路状态的基本变量，线路可靠性分析的功能函数表达式为

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (3)$$

当基本变量 X_i 为随机变量时，线路不可靠度为

$$P_f = P[Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) < 0] \quad (4)$$

本文只考虑结构可靠性的可靠与失效两状态模型，即

$$P_r + P_f = 1 \quad (5)$$

式中： P_r 为线路的可靠度； P_f 为线路的不可靠度。

1) 荷载线路不可靠度的计算。在线路荷载-强度可靠性计算中，根据假设条件的不同，线路强度可以采用固定值或随机变量，本文采用可靠性计算中最常用的形式，考虑线路元件强度的分散特性，将其作为随机变量处理^[11]。由于极端冰灾天气下线路覆冰不断增长，风速实时变化，因此引入了随时间变化的荷载变量，定义一种简单的结构功能函数：

$$Z(t) = g(Q(t), R) = R - Q(t) \quad (6)$$

式中： R 为线路强度随机变量； $Q(t)$ 为线路荷载随机变量；当线路设计强度大于荷载时，线路可靠，当线路设计强度小于荷载时，线路故障。如果线路强度与荷载 2 个随机变量的概率密度函数有重叠部分，则为干涉区。干涉区域的存在，表示线路有故障的可能，但干涉区域面积并不等于失效概率。 $Q(t)$ 、 R 两个随机变量干涉区域局部放大图如图 2 所示。

线路承受的荷载落在阴影区域的概率为

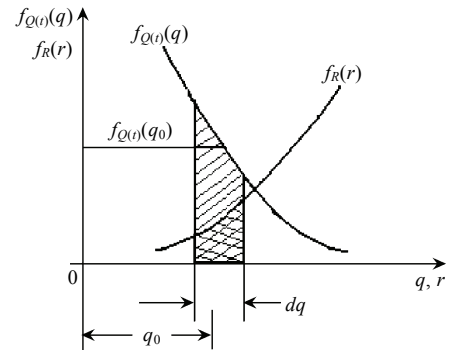
$$P(q_0 - dq/2 \leq Q(t) \leq q_0 + dq/2) = f_Q(q_0) dq \quad (7)$$

线路强度大于荷载的概率为

$$P(R > q_0) = \int_{q_0}^{+\infty} f_R(r) dr \quad (8)$$

当线路荷载与强度 2 个变量相互独立时，在荷载 q_0 领域内，强度大于荷载的概率为

$$P = f_Q(q_0) dq \int_{q_0}^{+\infty} f_R(r) dr \quad (9)$$



$f_R(r)$ 表示线路设计强度的概率密度函数；
 $f_{Q(t)}(q)$ 表示线路承受荷载的概率密度函数。

图 2 荷载-强度不可靠度的干涉理论

Fig. 2 Load-strength unreliability of interference theory

则对于荷载 q 的任何取值，线路不可靠度为

$$P_f(t) = 1 - P(R > Q(t)) = 1 - \int_0^{+\infty} f_{Q(t)}(q) \left[\int_q^{+\infty} f_R(r) dr \right] dq = \int_0^{+\infty} f_{Q(t)}(q) F_R(q) dq \quad (10)$$

式(10)满足荷载与强度 2 个随机变量符合任何分布的不可靠度计算。

当荷载与强度 2 个随机变量均服从正态分布时，功能函数 $Z(t)$ 为服从正态联合分布的随机变量，线路荷载的可靠度表达式为

$$P_r(t) = P(Z(t) > 0) = \int_0^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_{Z(t)}} \exp\left\{-\frac{(z - u_{Z(t)})^2}{2\delta_{Z(t)}^2}\right\} dz \quad (11)$$

其中 $u_{Z(t)}$ 、 $\delta_{Z(t)}$ 分别为联合分布 $Z(t)$ 的均值与标准差，满足如下关系：

$$\begin{cases} u_{Z(t)} = u_{Q(t)} - u_R \\ \delta_{Z(t)}^2 = \delta_{Q(t)}^2 + \delta_R^2 \end{cases} \quad (12)$$

式中： u_R 、 δ_R 分别为线路强度概率密度函数的均值与标准差； $u_{Q(t)}$ 、 $\delta_{Q(t)}$ 分别为线路荷载概率密度函数的均值与标准差，其值为时间的函数。

取 $x = (z - u_{Z(t)}) / \delta_{Z(t)}$ ，转化为标准正态分布，并利用正态分布的对称性，则

$$P_r(t) = \int_{-\infty}^{u_{Z(t)}/\delta_{Z(t)}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{x^2}{2}\right\} dx \quad (13)$$

则线路的不可靠度为

$$P_f(t) = \phi(-u_{Z(t)} / \delta_{Z(t)}) \quad (14)$$

式中 $\phi(\bullet)$ 为标准正态分布函数。

2) 荷载线路故障率的计算。极端冰灾天气下线路故障时间与修复时间的统计数据较少，假设冰灾天气线路故障间隔时间与修复时间服从指数分

布, 根据马尔可夫过程, t_0 时刻线路状态为 $p(t_0)=[p_0(t_0), p_1(t_0)]$, 则线路不可靠度与故障率满足以下关系:

$$P_f(t) = \frac{\lambda(t)}{\lambda(t) + u(t)} + \frac{e^{-(\lambda(t)+u(t))t}}{\lambda(t) + u(t)} [u(t)p_1(t_0) - \lambda(t)p_0(t_0)] \quad (15)$$

在极端冰灾环境下可以不考虑线路修复, 即 $u(t)=0$, 线路初始状态通常为运行状态, 进而得到线路的故障率:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{t} \ln(1 - p_f(t)) \quad (16)$$

因此, 可由式(10)、(14)计算时间相依的线路荷载不可靠度, 由式(16)计算时间相依的荷载线路的故障率。

3 线路冰风荷载状态划分

线路的荷载状态反映了荷载线路的安全裕度水平。本节讨论如何基于线路冰风荷载曲线, 依据线路荷载风险模型, 考虑强度-荷载随机变量的变差系数, 计算荷载线路的不可靠度, 进而划分线路冰风荷载状态。

IEC 60826—2003 标准^[11]定义线路强度/荷载的变差系数为

$$V = \delta/\bar{X} \quad (17)$$

式中: δ 为线路强度(或荷载)的标准差; \bar{X} 为线路强度(或荷载)的均值; 线路强度 R 服从正态分布或对数正态分布, 其变差系数为 0.05~0.2。预测荷载通常服从正态分布, 根据覆冰与风速预测的不确定性选取冰风荷载变差系数^[19]。

图 3 为基于线路荷载的风险模型, 考虑荷载-

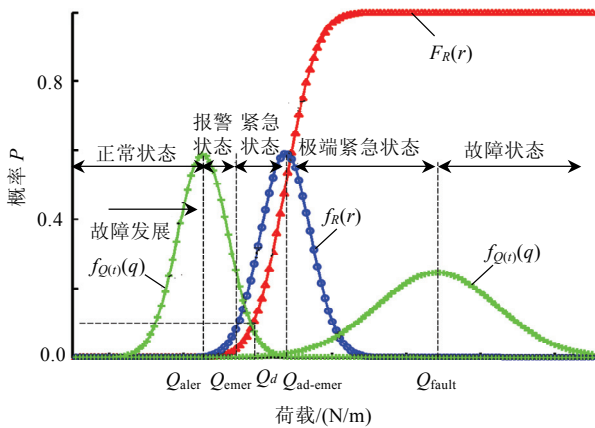


图 3 线路冰风荷载发展与状态划分

Fig. 3 Wind and ice loading development and state division

强度变差系数建立的线路冰风荷载发展过程以及线路荷载的状态划分, 分别为正常状态、报警状态、紧急状态、极端紧急状态与故障状态。线路强度概率密度函数 $f_R(r)$ 与概率分布函数 $F_R(r)$ 为固定不变量; 线路冰风荷载概率密度函数 $f_{Q(t)}(q)$ 随着覆冰厚度的增加与风速的变化从左向右发展。

根据荷载线路的不可靠度进行线路荷载状态划分, 各状态间的临界值的对应关系如表 1 所示。

表 1 线路荷载状态划分

不可靠度/%	临界曲线	临界荷载	临界覆冰	临界风速
1	L_{min}	Q_{aler}	I_{min}	W_{min}
10(IEC 设计值)	L_{mid}	Q_{emer}	I_{mid}	W_{mid}
50($\bar{Q} = \bar{R}$)	L_{dl}	$Q_{ad-emer}$	I_{dl}	W_{dl}
99	L_{max}	Q_{fault}	I_{max}	W_{max}

表 1 中: 线路不可靠度计算的截断误差选取 1%, 即认为线路荷载-强度不可靠度低于 1% 时线路完全可靠, 高于 99% 时线路故障; 不可靠度 10% 为 IEC 60826—2003 标准线路荷载设计值; 不可靠度 50% 为预测荷载等于线路强度的临界值。

荷载状态临界曲线 L_{min} 、 L_{mid} 、 L_{dl} 、 L_{max} 分为各荷载状态间的临界冰风荷载曲线, 如图 4 所示; Q_d 为线路设计荷载; 临界荷载 Q_{aler} 、 Q_{emer} 、 $Q_{ad-emer}$ 、 Q_{fault} 为各荷载状态临界曲线对应的荷载值, 将不可靠度与变差系数代入式(10)、(17)计算得到, 如图所示; 临界覆冰 I_{min} 、 I_{mid} 、 I_{dl} 、 I_{max} 与临界风速 W_{min} 、 W_{mid} 、 W_{dl} 、 W_{max} 分别为荷载状态临界曲线与 x 轴、 y 轴的交点, 如图 4 所示。

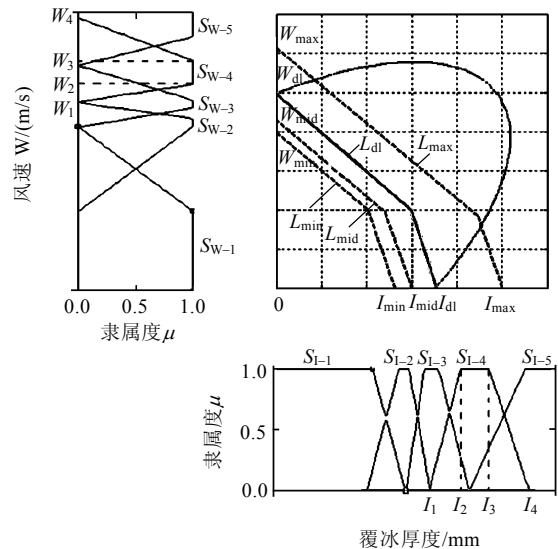


图 4 覆冰与风速模糊输入变量隶属函数的定义

Fig. 4 Definition of fuzzy membership functions of wind and ice input variables.

这样，根据极端冰灾天气下短期气象预测信息，实时跟踪线路冰风荷载所处的状态，能够及时地为系统运行人员提供预警信息。

4 基于模糊理论的线路荷载风险预测

4.1 模糊推理过程

以上给出的线路冰风荷载的计算是基于确定性信息，即确定的风速与覆冰值，但是天气状况常用模糊语言描述，如正常天气、恶劣天气、大风或大雪等。气象参数表征带有模糊特征，如风速不确定性、温度的波动、覆冰预测的不确定性、覆冰形状的不规则性等。模糊理论已在电力系统中得到广泛应用^[20-22]，能够解决系统的模糊不确定性问题，对系统的描述更加接近实际运行工况。

针对以上特点，本文采用模糊理论预测线路冰风荷载风险水平，预测步骤如下：

- 1) 气象预报数据的采集，包括风速、风向、温度、湿度、降水量、覆冰密度等。
- 2) 根据覆冰增长模型预测冰厚度。根据线路走向、风速、风向、确定垂直导线的阵风风速。
- 3) 依据模糊推理算法预测线路冰风荷载值。
- 4) 根据预测荷载值计算线路的荷载风险水平，计算时间相依的线路荷载不可靠度与故障率，确定线路运行状态，提供预警信息。

根据线路的冰风荷载状态划分定义覆冰与风速的模糊输入变量隶属函数，如图 4 所示，图中： S_{W-1} 、 S_{W-2} 、 S_{W-3} 、 S_{W-4} 、 S_{W-5} 为各荷载状态对应的风速输入隶属函数； S_{I-1} 、 S_{I-2} 、 S_{I-3} 、 S_{I-4} 、 S_{I-5} 为各荷载状态对应的覆冰输入隶属函数。根据模糊输入变量的上下限可以建立模糊输出变量隶属函数，由 If-then 模糊推理规则，采用 Mandani 模糊推理算法计算冰风荷载值。

1) 模糊输入变量隶属函数定义。图 4 横轴为 5 个覆冰模糊输入梯形隶属函数，分别对应于线路的 5 个荷载状态。如隶属函数 S_{I-4} 的 4 个限值为 I_1 — I_4 ，覆冰 S_{I-4} 的模糊输入隶属函数为

$$\mu_{I_4\text{-input}} = \begin{cases} 0, & x < I_1 \\ (x - I_1)/(I_2 - I_1), & I_1 \leq x < I_2 \\ 1, & I_2 \leq x < I_3 \\ (I_4 - x)/(I_4 - I_3), & I_3 \leq x < I_4 \\ 0, & x \geq I_4 \end{cases} \quad (18)$$

采取同样的方法可建立纵轴风速的梯形模糊输入隶属函数 $\mu_{W\text{-input}}$ 。

2) 模糊输出隶属函数定义。根据梯形模糊输入变量的隶属函数，定义模糊输出变量隶属函数。如表中模糊输出隶属函数 19，其上下限分别由覆冰与风速梯形模糊输入隶属函数的拐点(I_2, W_2)、(I_3, W_3)确定。模糊输出三角隶属函数论域为 $[f_{\min}, f_{\max}]$ ，由式(2)线性分段函数找到坐标轴上与其等势的点代入式(1)，计算 f_{\min} 、 f_{\max} 。三角隶属函数对应的最大隶属度荷载值为

$$f_{\text{mid}} = (f_{\min} + f_{\max}) / 2 \quad (19)$$

则模糊输出变量三角隶属函数为

$$\mu_{f\text{-output}} = \begin{cases} 0, & y < f_{\min} \\ (y - f_{\min}) / (f_{\text{mid}} - f_{\min}), & f_{\min} \leq y < f_{\text{mid}} \\ (f_{\max} - y) / (f_{\max} - f_{\text{mid}}), & f_{\text{mid}} \leq y < f_{\max} \\ 0, & y \geq f_{\max} \end{cases} \quad (20)$$

3) If-then 模糊推理规则。根据线路荷载状态划分，按严重程度分别建立风速的 5 个隶属函数及覆冰厚度的 5 个隶属函数，共 25 个 If-then 模糊推理规则，如表 2 所示。

表 2 If-then 模糊推理规则
Tab. 2 If-then fuzzy inference rules

覆冰输入隶属函数	规则号				
	S_{W-1}	S_{W-2}	S_{W-3}	S_{W-4}	S_{W-5}
S_{I-1}	1	6	11	16	21
S_{I-2}	2	7	12	17	22
S_{I-3}	3	8	13	18	23
S_{I-4}	4	9	14	19	24
S_{I-5}	5	10	15	20	25

4) 模糊推理算法^[23]。采用多规则、多输入单输出 If-then 模糊推理模型，规则数为 25，2 个模糊输入变量分别为覆冰与风速，模糊输出变量为线路荷载值。模糊推理算法采用 Mandani 算法，推理合成规则为乘积运算。输入变量权重系数为 1，合成方法为求和，解模糊方法采用中心平均加权解模糊化方法。

4.2 荷载线路的可靠性计算

根据模糊预测荷载值确定线路荷载风险状态，给出基于荷载状态的预警信息。根据式(10)计算线路不可靠度。当 2 个随机变量都服从正态分布时，采用式(14)的联合正态分布计算不可靠度。极端天气环境下通常认为线路不可修复，线路初始状态为运行状态，采用式(16)计算线路冰风荷载的故障率。

5 算例分析

算例采用瑞典电网 1999 年冰暴天气情况下，历

时 50h 的实际观测风速、覆冰数据^[5]，为突出冰灾的严重性，将线路覆冰率增加一倍，采用简单的覆冰预测模型^[15]。图 5 为实际风速、垂直导线风速分量以及覆冰 3 个参量随时间的变化情况。

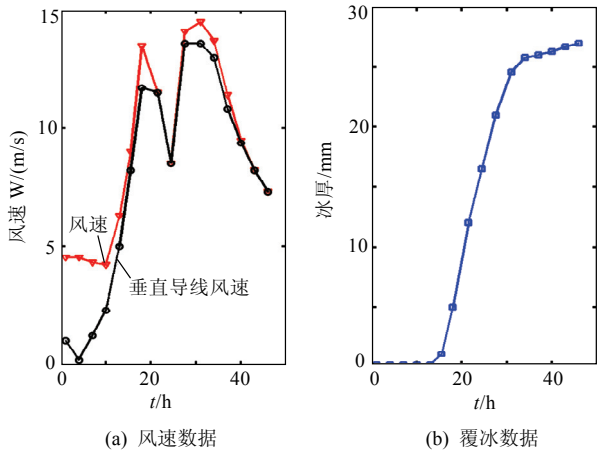


图 5 冰暴天气风速与覆冰数据

Fig. 5 Wind speed and ice accretion data during ice storm

1) 线路冰风荷载曲线的建立与状态划分。依据 Q/GDW 179—2008 标准^[17]，中冰区的覆冰厚度为 15 mm，覆冰时风速为 10 m/s(或 15 m/s，风向垂直导线)，结合文献[7]的气象观测数据，建立线路设计荷载等势线，如图 1 中的曲线VIII，单根导线设计荷载值约为 10 N/m。依据 IEC 60826—2003 标准，线路强度变差系数选取 0.1，线路冰风荷载变差系数选取 0.15，根据式(1)、(2)、(10)、(17)，计算线路荷载各状态临界阈值，如表 3 所示。

表 3 状态临界阈值

Tab. 3 Threshold values of critical state

状态 临界线	不可靠度/ %	荷载值/ (N/m)	标准差	覆冰 厚度/mm	风速/ (m/s)
L_{min}	1	6.68	1.00	13.38	20.99
L_{mid}	10	7.97	1.19	15.15	22.58
L_{dl}	50	9.97	1.49	17.50	25.00
L_{max}	99	16.00	2.40	25.00	30.17

2) 线路荷载风险预测。根据冰风荷载的状态划分建立模糊输入变量的隶属函数，以线路覆冰隶属函数 S_{I-2} 为例，梯形隶属函数的 4 个限值为 5、13.4、14.5、17，代入式(18)，得到覆冰模糊输入隶属函数 S_{I-2} ：

$$\mu_{I-2-input} = \begin{cases} 0, & I < 5 \\ (I - 5) / (13.4 - 5), & 5 \leq I < 13.4 \\ 1, & 13.4 \leq I < 14.5 \\ (17 - I) / (17 - 14.5), & 14.5 \leq I < 17 \\ 0, & I \geq 17 \end{cases}$$

采用同样方法得到风速的模糊输入隶属函数。

模糊输出变量隶属函数对应于表中的 If-then 规则，根据模糊输入隶属函数的上下限(梯形隶属函数的拐点)计算模糊输出变量的上下限及其均值，建立模糊输出三角隶属函数。以表 2 中的规则 3 为例，模糊输入变量的隶属函数上下限分别为(15.5 mm, 0 m/s)，(17 mm, 10 m/s)，其中点(15.5 mm, 0 m/s)在 x 轴上，可以直接代入回归模型求解，计算得输出隶属函数下限。点(17 mm, 10 m/s)落在曲线族 $W = b_0 - I$ 上，即点(17 mm, 10 m/s)与点(0 mm, 27 m/s)荷载值相等，将其代入式(1)，求得： $f_{3min} = 8.26$ ； $f_{3max} = 12.17$ ； $f_{3mid} = (f_{3min} + f_{3max}) / 2 = 10.22$ 。代入式(20)求得规则 3 模糊输出变量的隶属函数：

$$\mu_{f3-output} = \begin{cases} 0, & y < 8.26 \\ (y - 8.26) / (10.22 - 8.26), & 8.26 \leq y < 10.22 \\ (12.17 - y) / (12.17 - 10.22), & 10.22 \leq y < 12.17 \\ 0, & y \geq 12.17 \end{cases}$$

采用 Mandani 模糊推理算法，推理合成规则为 product 复合运算。输入变量权重系数为 1，合成方法为求和，解模糊方法采用中心平均加权解模糊化方法。以风速与覆冰为模糊输入变量，进行模糊预测，如图 6 所示。

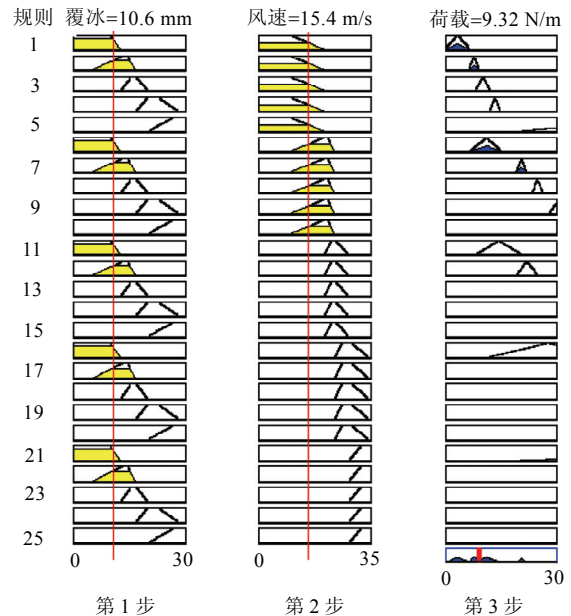


图 6 模糊推理预测过程

Fig. 6 Fuzzy inference forecasting process

图 6 表明调整输入变量覆冰与风速的取值，输出变量冰风荷载值随之显示出来，预测结果较为直观。由于表中计算单根导线的最大荷载值为 16 N/m，因此，只显示了论域为[0,30 N/m]的模糊输出隶属函数。如覆冰为 10.6 mm，垂直导线风速为

15.4 m/s, 需要对 1、2、6、7 规则进行合成运算, 得到模糊预测荷载值为 9.32 N/m, 线路的不可靠度为 35.5%。此时可据图 3 判断线路处于紧急状态, 需要考虑除冰措施与系统特殊保护方案, 如系统主动解列、分区供电平衡等。

3) 时间相依的线路荷载风险测度。线路的 5 个荷载状态按表 3 门槛值界定, 分别对应 5 个区域, 如图 7 所示。当线路覆冰与风速预测值在区 1 时, 线路完全可靠; 当线路覆冰与风速预测值在区 5 时, 线路故障。图 7 给出了覆冰与风速发展历程: 0—20 h 线路位于正常状态(区 1), 线路安全; 21 h 覆冰与风速坐标为(11.5 mm, 12 m/s), 线路荷载进入报警状态(区 2), 模糊预测单根导线的冰风荷载为 7.17 N/m, 故障概率为 3%; 22 h 覆冰与风速坐标为(15.3 mm, 8.5 m/s), 线路荷载进入紧急状态(区 3), 预测荷载为 9.43 N/m, 故障概率为 38%; 25 h 覆冰与风速坐标为(17.5 mm, 8 m/s), 线路荷载进入极端紧急状态(区 4), 预测荷载为 10.6 N/m, 故障概率为 63%; 30 h 覆冰与风速坐标值为(23 mm, 14 m/s), 线路荷载进入故障状态(区 5), 模糊预测荷载为 20 N/m, 线路故障。因此, 可以看出, 本文所提方法能够为极端冰灾天气情况下输电系统荷载风险水平提供及时的预警信息与风险测度。

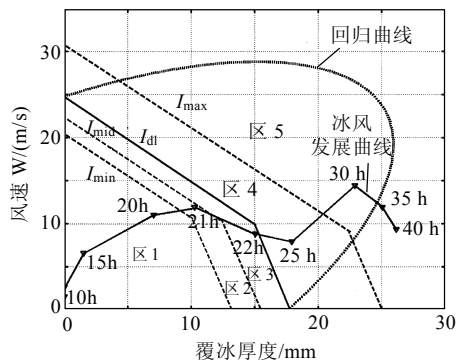


图 7 冰风荷载时间发展的风险测度

Fig. 7 Wind and ice loading risk measurement on time scale

根据线路冰风荷载风险模型, 结合图 5 的覆冰与风速预测数据, 计算各个荷载状态对应的临界时间、临界荷载值、不可靠度、故障率, 如表 4 所示。

由式(10)、(16)分别计算线路不可靠度与故障率随时间的发展情况, 如图 8 所示。

根据线路冰风荷载风险模型计算线路冰风荷载的不可靠度与故障率, 并确定线路的荷载状态, 计算冰风荷载发展到各状态的临界时间、临界荷载值、临界故障率等, 运行人员可以清晰识别线路的

表 4 时间相依的线路荷载风险测度

Tab. 4 Time dependent risk measurement of line loads

时间/h	线路荷载状态	不可靠度	荷载值/(N/m)	故障率
0—20.25	正常状态	完全可靠	0~6.68	0
20.25—21.3	报警状态	1%~10%	6.68~7.97	0~0.0049
21.3—24.5	紧急状态	10%~50%	7.97~9.97	0.0049~0.029
24.5—27	极端紧急状态	50%~99%	9.97~16	0.029~0.17
27—	故障状态	故障	16~	0.17~

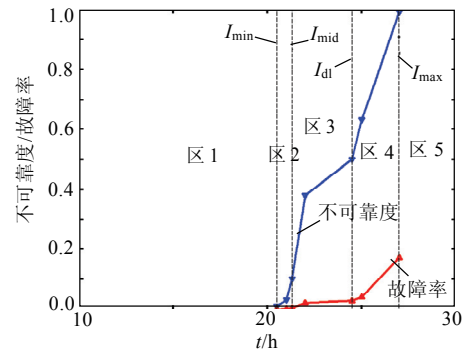


图 8 输电线路时间相依不可靠度与故障率

Fig. 8 Time dependent fault probability and fault rate of transmission line

冰风荷载风险状态, 及时掌握冰风荷载的预警信息以及线路荷载的可靠性参数。图 8 表明线路的不可靠度近似线性增长, 主要原因为覆冰过程中风速较小, 随着冰厚不断增加, 冰荷载占主导荷载。线路故障率近似按对数规律增长, 当不可靠度接近区 5 时, 线路故障率无限大。如果线路为同塔多回线, 则故障率反映了线路的共模故障率。

6 结论

本文构建了线路冰风荷载风险模型, 应用模糊理论进行线路冰风荷载风险预测, 为极端冰灾天气下的输电网运行风险分析提供及时预警信息, 主要包括:

1) 针对极端冰灾天气电网缺乏应对高风险群发性故障及时预警机制的问题, 建立了线路的冰风荷载曲线与冰风荷载的风险分析模型, 并将输电线路荷载划分为 5 个运行状态, 用以计算线路荷载可靠性水平, 并反映线路荷载的风险裕度。

2) 针对气象信息的模糊特征, 提出基于模糊理论的线路冰风荷载风险预测方法。依据线路冰风荷载的状态划分定义模糊输入、输出变量隶属函数, 应用模糊推理算法计算线路冰风荷载风险值。

3) 依据外部气象因素的变化, 计算时间相依的线路不可靠度与故障率, 反映线路倒塔、断线风险与同塔多回线的共模故障情况, 为极端冰灾天气电力系统的风险评估奠定基础。

但构建的分段线性冰风荷载曲线较为简单, 评估结果趋于保守, 随着冰灾天气观测数据的累积, 模型有待进一步完善, 作者的后续工作将研究线路舞动、线路覆冰闪络跳闸的可靠性问题。

参考文献

- [1] 丁一汇, 张锦, 宋亚芳. 天气和气候极端事件的变化及其与全球变暖的联系[J]. 气象, 2002, 28(3): 3-7.
Ding Yihui, Zhang Jin, Song Yafang. Changes in weather and climate extreme events and their association with the global warming [J]. Atmosphere, 2002, 28(3): 3-7(in Chinese).
- [2] 侯慧, 尹项根, 陈庆前, 等. 南方部分 500kV 主网架 2008 年冰雪灾害中受损分析与思考[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11): 12-15.
Hou Hui, Yin Xianggen, Chen Qingqian, et al. Review on the wide area blackout of 500 kV main power grid in some areas of south China in 2008 snow disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 12-15(in Chinese).
- [3] 张恒旭, 刘玉田, 张鹏飞. 极端冰雪灾害下电网安全评估需求分析与框架设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 8-14.
Zhang Hengxu, Liu Yutian, Zhang Pengfei. Requirements analysis and framework design for power system security assessment considering extreme ice disasters[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 8-14(in Chinese).
- [4] 薛禹胜, 费圣英, 卜凡强. 极端外部灾害中的停电防御系统构思(一)新的挑战与反思[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 1-6.
Xue Yusheng, Fei Shengying, Bu Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters (part-I) new challenges and reflection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 1-6(in Chinese).
- [5] Broström E, Ahlberg J, Söde L. Modeling of ice storms and their impact applied to a part of the swedish transmission network[J]. IEEE Lausanne Power-tech, 2007(5): 1593-1598.
- [6] Broström E, Söde L. Modeling of ice storms for power transmission reliability calculations[C]//The 15th Power Systems Computation Conference. Liege Belgium: University of Liege, 2005: 1-7.
- [7] Krishnasamy S, Kulendran S. Combined wind and ice loads from historical extreme wind and ice data[J]. Atmospheric Research, 1998(46): 123-129.
- [8] Tom B, Gutwin P. Application of BCTC standardized risk estimation model to assess risk due to ice storms[C]//8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Ames: Iowa State University, 2004: 970-974.
- [9] Farzaneh M, Savadjiev K. Statistical analysis of field data for precipitation icing accretion on overhead power lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1080-1087.
- [10] 薛禹胜, 费圣英, 卜凡强. 极端外部灾害中的停电防御系统构思(二)任务与展望[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 1-5.
Xue Yusheng, Fei Shengying, Bu Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters (part II) tasks and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 1-5(in Chinese).
- [11] International Electro-technical Commission. CEI/IEC 60826: 2003 Design criteria of overhead transmission lines[S]. Switzerland, NYSE: IHS, 2003.
- [12] Chaine P M, Casfonguay G. New approach to radial ice thickness concept applied to bundle like conductors[R]. Toronto: Industrial Meteorology Study IV, Environment Canada, 1974.
- [13] Goodwin E J, Mozer J D, DiGioia A M, et al. Predicting ice and snow loads for transmission lines[C]//Proceedings of the First IWAIS. Hanover: HN, 1983: 267-273.
- [14] Makkonen L. Modeling power line icing in freezing precipitation [J]. Atmospheric Research, 1998, 46(1): 131-142.
- [15] Kathleen F J. A simple model for freezing rain ice loads [J]. Atmospheric Research, 1998(46): 87-97.
- [16] 刘和云, 周迪, 付俊萍, 等. 导线雨淞覆冰预测简单模型的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 44-47.
Liu Heyun, Zhou Di, Fu Junping, et al. A simple model for predicting glaze loads on wires[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 44-47(in Chinese).
- [17] 国家电网公司. Q/GDW 179—2008: 110kV~750kV 架空输电线路设计技术规定及条文说明[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
State Grid Corporation of China. Q/GDW 179—2008: Technical code for design of 110~750kV overhead transmission line[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2008(in Chinese).
- [18] 卡普尔, 兰伯森. 工程设计可靠度[M]. 元心山, 赵霖, 译. 台北: 科技图书股份有限公司, 1983: 122-136.
Kapur, Lamberson. Reliability in engineering design[M]. Yuan Xinshan, Zhao Lin, translate. Taipei: Sci-Tech Book Limited Corporation, 1983: 122-136(in Chinese).
- [19] Ryerson C, Ramsay C. Quantitative ice accretion information from the automated surface observing system[J]. Ryerson and Ramsay, 2007(46): 1423-1437.
- [20] Liew A C, Chang C S. Applications of fuzzy systems in power systems[J]. Electric Power Systems Research, 1995, 35(1): 39-43.
- [21] Lu C, Shen C. Estimation of sensitive equipment disruptions due to voltage sags[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 1132-1137.
- [22] Shen C, Lu C. A voltage sag index considering compatibility between equipment and supply[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 996-1002.
- [23] 王涛, 王艳平, 唐剑涛. 模糊数学及其应用[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2005: 141-161.
Wang Tao, Wang Yanping, Tang Jiantao. Fuzzy mathematics and application[M]. Shenyang: Northeast University Press, 2005: 141-161(in Chinese).



孙羽

收稿日期: 2011-01-05。

作者简介:

孙羽(1979), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统短期可靠性与电力市场, sunyu62003@yahoo.com.cn;

王秀丽(1961), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统可靠性、电力系统规划与电力市场;

王建学(1976), 男, 副教授, 主要研究方向为电力市场和电力系统运行。

(责任编辑 刘浩芳)