

A Transmission Line Lightning Strike Probability Prediction Method and Its Application to Transmission System Short-Term Reliability Evaluation

Qing Yang¹, Xiaofu Xiong², Jian Wang², Shijie Weng²

¹Production and Technology Department, Yunnan Power Grid Corporation, Kunming

²State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing

Email: yepg_yangqing@126.com, cquxxf@vip.sina.com, wangrelay@foxmail.com, cqwsj@foxmail.com

Received: Feb. 21st, 2014; revised: Mar. 18th, 2014; accepted: Mar. 26th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

Abstract

The transmission lines are exposed to the atmospheric environment and will be affected by adverse weather such as lightning storm, so that it will affect the reliability of transmission system. This paper studies the fault probability model of transmission line during the lightning storm, and evaluates the short-term reliability of transmission system in the forecasting weather condition. Firstly, we build the lightning strike fault probability model of the transmission line based on historical lightning record information, then calculate the lightning strike probability under the forecasting weather conditions, and furthermore evaluate the reliability index of transmission system. We utilize IEEE RTS-79 system to verify the validity of the proposed model and the results show that lightning has great negative influence on the transmission lines and the reliability of transmission system. The reliability evaluation model proposed in this paper can guide the short-term operation and online scheduling for transmission system operators.

Keywords

Lightning, Transmission Line, Reliability Evaluation, Information Diffusion

一种输电线路雷击概率预测方法及其在输电系统短期可靠性评估中的应用

杨清¹, 熊小伏², 王建², 翁世杰²

¹云南电网公司生产技术部, 昆明

²重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆

Email: yepg_yangqing@126.com, cquxxf@vip.sina.com, wangrelay@foxmail.com, cqwsj@foxmail.com

收稿日期: 2014年2月21日; 修回日期: 2014年3月18日; 录用日期: 2014年3月26日

摘要

输电线路长期暴露在大气环境之中, 雷电天气下输电线路易发生雷击跳闸事件, 严重影响输电系统可靠性, 有必要针对雷电天气下的输电网可靠性进行评估。本文研究了输电线路在雷电天气下的故障概率模型, 并用于在预报天气状况下的输电网可靠性预测(评估)。首先根据历史雷电记录建立雷击故障概率模型, 然后根据此概率模型对未来雷电天气下的输电线路雷击故障概率进行计算, 并进而计算输电网可靠性指标。通过IEEE RTS-79测试系统验证了所提方法的有效性, 算例结果表明, 雷电天气对输电线路和系统可靠性有较大的影响。该模型可以指导雷电天气下电网短期运行和在线调度决策。

关键词

雷电, 输电线路, 可靠性评估, 信息扩散

1. 引言

随着电力系统的发展, 系统中电力元件的数量逐步增多、电网结构及其运行控制方式也日益复杂, 远距离、超高压输电和跨区域互联以成为必然趋势。输电线路长期处于户外, 易受恶劣天气等环境因素的影响, 虽然恶劣天气持续时间较短, 但在恶劣天气下元件发生故障的概率明显增大, 对元件和系统产生巨大的破坏作用, 因此需要考虑其对电网运行风险的影响。

雷电是发生于大气中的一种瞬态大电流、高电压、强电磁辐射的天气现象, 通常伴随着强对流天气过程而发生[1]。电力系统的运行经验表明, 雷电流侵入电网过程中, 可能造成短路, 闪络等电气扰动, 影响系统的安全稳定运行, 统计表明, 随着电网规模的扩大, 雷击引起的故障对输电线路和电气设备的危害越来越大。对于国内 500 kV 及以下电压等级输电线路, 雷击跳闸事故占总跳闸事故的 50% [2], 而对于特高压输电线路, 这一比例提高到了 75%~90% [3]-[5]。

雷电灾害对输电线路故障的影响, 国内外进行了大量的研究。输电线路绕击耐雷水平分析模型主要有电气几何法, 改进电气几何法和先导发展模型, 文献[6]对不同高度、不同幅值的雷电先导进行了分析研究, 根据雷电先导的绕击特性, 提出了“绕击充要条件”, 制定雷电绕击防护措施。文献[7]对浙江电网输电线路雷击跳闸与地闪密度、地闪强度、海拔及地面坡度等因素的相关性研究进行了论述, 在此基础上建立了输电线路外部雷击风险多要素综合评估模型。另一方面, 恶劣天气对电力系统可靠性影响的研究越来越受重视, 文献[8]提出了三状态模型, 把天气条件分为正常天气、恶劣天气和极端恶劣天气, 并用于典型配电网可靠性评估, 测试

结果指出恶劣天气下故障率显著增加,对电网可靠性造成严重影响。文献[9]认为大风、载冰和闪电是最具有破坏性的气象因素,并研究了风速对系统可靠性评估结果的影响。文献[10]采用了随时间变化的气象模型,模拟了大规模冰灾对输电系统的影响过程,计算了大规模冰灾下测试系统的可靠性指标,结果表明在大规模冰灾的影响下,输电系统可靠性大幅度下降;气象参数和地理环境等因素将对输电系统的可靠性产生较大影响。

因此,本文从概率角度出发,建立了一种可以基于雷电气象信息计算输电线路雷击故障概率的模型,并根据该模型预测线路在雷电天气下发生雷击故障的概率,进而研究了雷击概率对电力系统短期可靠性的影响,以 IEEE RTS-79 为算例,计算了雷电天气下测试系统的可靠性指标,并与正常天气条件下的可靠性指标作比较,反映雷电活动对电力系统的影响。

2. 雷电天气下电网失效率选取方式

输电线路,特别是高压架空线路长期暴露于外部环境,易受恶劣天气的影响。雷电是一种多发、易发的恶劣天气,在雷电天气下常常发生雷击线路,导致运行中的线路跳闸,影响输电环节的可靠性。雷电天气下线路的故障率与雷击跳闸次数、雷天天气持续时间等有关。

进行雷电天气下得输电网可靠性评估,基本的方法是蒙特卡洛抽样法,对每条线路的状态进行抽样时需要确定线路的故障概率,一种方式是采用统计的方法,专门统计雷电天气下输电线路的雷击故障率;另一种方式是找到雷电天气下,雷击故障发生的概率与雷电气象参数的关系,即雷击概率分布模型,通过气象参数来预测雷击故障发生的概率,作为输电线路的故障率。现有的可靠性统计方法没有区分造成故障的气象类型,因此,现有的方法无法获得雷电天气下输电线路的故障率。本文拟采用第二种方法来预测雷电天气下的线路故障概率,作为线路的故障率。

3. 输电线路雷击故障概率模型

3.1. 输电线路雷击故障分析

电气几何法中指出,输电线路雷电绕击故障概率与雷电流幅值和击距有关。由于雷电跃变点位置不易确定,导致击距不易确定,而大量的统计规律表明,雷电放电路径可近似认为垂直下行。因此,选取雷电流幅值和落雷侧面距离两个参数计算输电线路绕击跳闸概率。

统计获取同一电压等级 n 条输电线路的 m 次故障事件,得到 m 次故障事件发生时的雷电流幅值和落雷侧面距离,其中雷电流幅值取平均值, m 次故障参数分别记为:

$$(X, Y) = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)\} \quad (1)$$

式中 X 表示雷电流幅值, Y 表示落雷侧面距离。

信息扩散方法是一种从知识样本中学习有关规律的数据处理技术,可以摆脱主观数学假设的约束,基于样本数据的驱动来估计样本的概率密度函数,其二维正态扩散模型如式(2)所示:

$$\tilde{f}_m(u, v) = \frac{1}{2\pi m h_1 h_2} \sum_{j=1}^m \exp\left[-\frac{(u-x_j)^2}{2h_1^2} - \frac{(v-y_j)^2}{2h_2^2}\right] \quad (2)$$

式中 h_1 、 h_2 为扩散系数,可以根据样本集合中样本的最大值 b 和最小值 a 及样本个数 M 来确定,其计算公式为[11]:

$$\begin{cases} h_1 = 1.4230 \times \frac{b-a}{M-1} & M \leq 9 \\ h_2 = 1.4208 \times \frac{b-a}{M-1} & M \geq 10 \end{cases} \quad (3)$$

3.2. 雷电绕击概率计算

$f(u, v)$ 的物理意义为输电线路发生跳闸故障时, 雷电流幅值和落雷侧面距离的联合概率密度函数。其本质是条件概率密度函数, 可记为 $f(BC|A)$, A 表示线路雷击故障事件, B 表示雷电流幅值, C 表示落雷侧面距离。

根据条件概率密度公式:

$$f(BC|A) = \frac{f(ABC)}{f(A)} \quad (4)$$

可得:

$$f(A|BC) = \frac{f(ABC)}{f(BC)} = \frac{f(BC|A) \times f(A)}{f(B)f(C)} \quad (5)$$

则条件概率为:

$$p(A|BC) = \frac{\iint f(BC|A) dBdC \times p(A)}{\int f(B) dB \int f(C) dC} \quad (6)$$

式中, $p(A|BC)$ 表示特定雷电流幅值、侧面距离条件下输电线路发生绕击跳闸的概率。 $p(A)$ 表示输电线路绕击故障概率, $f(B)$ 表示雷电流幅值概率密度, $f(C)$ 表示落雷侧面距离概率密度, 事件 B 和事件 C 相互独立。

在输电线路绕击概率模型中, 绕击跳闸概率可用输电线路绕击率计算得到[12], 计算公式如下所示:

$$P(A) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (7)$$

式中: λ 为输电线路绕击跳闸率, t 为某次雷电天气持续时间。

雷电流幅值概率密度选用 IEEE Std 推荐的计算公式[13]

$$f(I) = \frac{2.6}{31^{2.6}} \times \frac{I^{(2.6-1)}}{[1+(I/31)^{2.6}]^2} \quad (8)$$

侧面距离分布概率采用平均分布概率, 可用下式计算:

$$P(C) = \frac{1}{L} \quad (9)$$

式中, L 为落雷侧面距离最大值。

4. 输电线雷击概率预测

雷电天气对输电系统短期可靠性评估的影响分析中, 首先需要确定雷电天气下输电线路发生雷击故障的概率, 第 2 节中讨论了输电线雷击故障模型, 该模型与雷电流幅值和落雷侧面距离两个参数相关。因此, 雷击概率预测的关键是需要得到雷电流幅值和落雷侧面距离这两个特征参数的预测值。

4.1. 雷达相关参数的获取

雷电流是一非周期冲击波, 它与气象、自然条件、地理环境等因素有关, 是一个随机变量, 雷达等雷电探测设备得不到雷电流的预报幅值。但研究表明, 雷电流幅值与回波强度, 回波顶高, 垂直积累液态水含量等参数值有关[14], 而回波强度等参数值可以通过气象雷电预报获取。而雷电侧面距离主要受雷电离线路的侧面距离可以通过雷云移动的方向和雷云移动的速度计算。因此, 进行雷击概率预测的关键

气象参数是雷达回波强度、回波顶高、垂直累积液态水含量、雷云移动方向和速度等。

根据气象雷达探测, 获取的雷达资料是网格化的数据, 其网格分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$, 如图 1 所示, 其中圆圈表示气象雷达的探测范围, 直线表示某条输电线路。

4.2. 落雷侧面距离的计算

4.2.1. 确定线路方程

获取输电线路所在网格的经纬度信息, 根据经纬度信息确定输电线路的坐标, 两端点分别记为 $M_1(x_1, y_1), M_2(x_2, y_2)$, 可以得到输电线路的直线方程, 记为 $aX + bY + c = 0$ 。

4.2.2. 计算侧面距离

获取雷云放电点坐标, 雷云所处网格中心点近似为雷电放电点, 记为 $M_0(x_0, y_0)$, 计算雷电放电点到输电线路的侧面距离, 即计算点到线的距离, 其计算公式如下:

$$d = \frac{|ax_0 + by_0 + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (10)$$

4.3. 利用BP神经网络预测雷电流幅值

通过历史数据建立雷电流幅值和回波强度, 回波顶高, 垂直累积液态水含量之间的相关性模型, 如式(11)所示, 再根据这些参数的预报值得到雷电流幅值的预测值。

$$y = f(x_1, x_2, x_3) \quad (11)$$

式中: y 表示雷电流幅值, x_1 表示回波强度, x_2 表示回波顶高, x_3 表示垂直累积液态水含量。

为得到式(11)的具体表达式, 选取历史 M 次输电线路绕击事件作为样本进行分析研究, 输入变量为气象雷达记录的回波强度等 3 个参数值, 输出为跳闸时雷电流最大幅值。由于输入, 输出量之间的关系非线性, 难于用显式的数学表达式来表示, 而人工神经网络具有较强的非线性映射能力和自适应、自学习的能力。因此本文选用 BP 神经网络[15]对雷电流幅值和回波强度、回波顶高、垂直累积液态水含量之间的关系进行辨识, 其具体步骤如下:

- (1) 获取 M 次雷击事件发生时的参数信息作为训练样本数据。
- (2) 应用 MATLAB 神经网络函数建立三层前向 BP 网络, 并初始化权值和阈值。
- (3) BP 算法对网络进行训练, 保存训练结果。
- (4) 比较训练结果和历史数据, 验证所训练网络的正确性。

4.4. 输电线雷击概率预测

根据雷达设备探测, 得到不同网格内回波强度, 回波顶高, 垂直累积液态水含量等参数值, 由雷电流幅值预测模型可得到对应网格内的雷电流预测幅值; 再获取相应网格的坐标位置, 得到侧面距离。根据输电线路雷击故障概率模型, 可得到对应网格的线路雷击故障概率。

若输电线路所经过区域有 M 个网格处于雷电天气条件下, 则线路的雷击故障概率可表示为:

$$P = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - p_i) \quad (12)$$

其中 P 为雷电天气下输电线路发生故障的概率, p_i 是第 i 个网格的线路发生雷击故障概率。

5. 雷电天气下输电系统可靠性评估

输电线路运行过程中易受雷电天气因素的影响, 需要建立雷电天气条件下的短期可靠性评估模型,

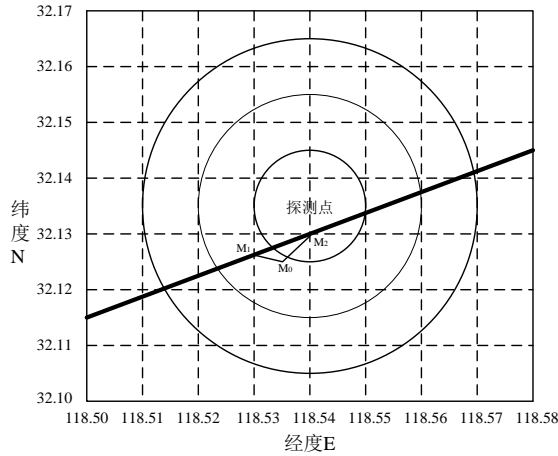


Figure 1. Latitude and longitude coordinates figure
图 1. 经纬度坐标图

可以预测电力系统的短期风险，提前做好电网的预警防范措施。

计及雷击概率的电网短期可靠性评估是根据当前的雷电天气条件，通过雷电流幅值预测模型和输电线路雷击故障概率模型预测输电线路发生雷击故障的概率，作为输电线路的强迫停运概率；未遭受雷电天气影响的输电线路采用原始可靠性基础数据，然后通过蒙特卡洛方法对系统进行状态抽样，进而对电力系统进行可靠性分析。在评估过程中，潮流计算采用直流潮流模型，系统解列状态采用深度优先搜索算法进行判断，负荷削减模型采用最优削减模型。

本文采用失负荷概率(*LOLP*)和电力不足期望值(*EDNS*)来表征系统的可靠性指标。其中 *LOLP* (loss of load probability)表示给定时间内系统不能满足负荷需求的概率，即：

$$LOLP = \sum_{s \in F} \frac{m(s)}{M} \quad (13)$$

式中： M 是系统状态抽样总数， $m(s)$ 是抽样中系统状态 s 出现的次数。

EDNS(expected demand not supplied)表示给定时间内系统因发电容量不足或电网约束造成负荷削减的期望值，即：

$$EDNS = \sum_{s \in F} \frac{m(s)}{M} \times C(s) \quad (14)$$

式中： $C(s)$ 表示系统状态 s 的削负荷量。

图 2 为输电线路雷击概率对电力系统短期可靠性影响分析的评估流程图。

其算法基本步骤如下所示：

- (1) 获取每个网格的雷达回波参数；
- (2) 神经网络模型预测网格雷电流幅值；
- (3) 计算网格落雷点到输电线路的侧面距离；
- (4) 计算网格中输电线路的雷击故障概率；
- (5) 形成各输电线路故障概率，即强迫停运概率；
- (6) 用蒙特卡洛方法进行状态抽样；
- (7) 分析系统状态，计算切负荷量；
- (8) 形成可靠性指标；

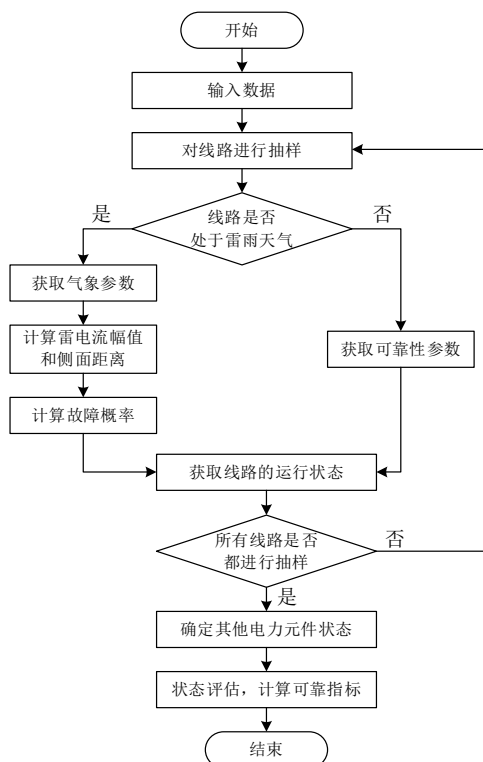


Figure 2. Reliability evaluation flow chart
图 2. 可靠性评估流程图

- (9) 判断是否达到收敛条件，如没有达到，进行下一次抽样；
(10) 形成系统可靠性总指标。

6. 算例分析

6.1. 算例介绍

本文以 IEEE RTS-79 系统为例，根据电压等级将整个系统划分为区域 1 和区域 2，其接线图如图 3 所示。

根据假设线路 24-15、线路 11-14、线路 12-23、线路 11-13、线路 12-13、线路 13-23 将受到雷电天气的影响。本文雷电气象模型中需要的数据可由气象预报获取。

获取天气雷达探测的回波参数数据，根据神经网络训练结果，得出雷电流预测幅值，根据雷云的网格坐标，计算出落雷侧面距离，依据输电线路雷击故障概率模型，得到输电线路发生雷击故障的概率。

以线路段 24-15 为例，根据天气雷达预报数据，假设其探测获取的回波参数如表 1 所示，其中有效数据的网格点有 3 个，有效数据范围(回波强度 30~70 dBz，最大回波顶高>7 km，侧面距离<500 m)。

根据神经网络训练结果，得出雷电流预测幅值，雷达探测获取雷云的网格坐标，按上节的方法计算出落雷侧面距离，依据输电线路绕击故障概率分布模型，得到每个网格对应的输电线路雷击故障概率 p ，如表 2 所示。由表 2 可知， $p_1 = 0.01$ ， $p_2 = 0.38$ ， $p_3 = 0.12$ 。根据公式(12)可得，输电线路段 24-15 的雷击故障概率 $P_{24-15} = 0.45$ 。相应的可以预测得到其他输电线路的故障概率，如表 3 所示。

6.2. 测试系统可靠性指标的模拟结果

对 IEEE RTS-79 测试系统进行可靠性评估。比较雷电天气条件下与正常天气条件下的可靠性评估结

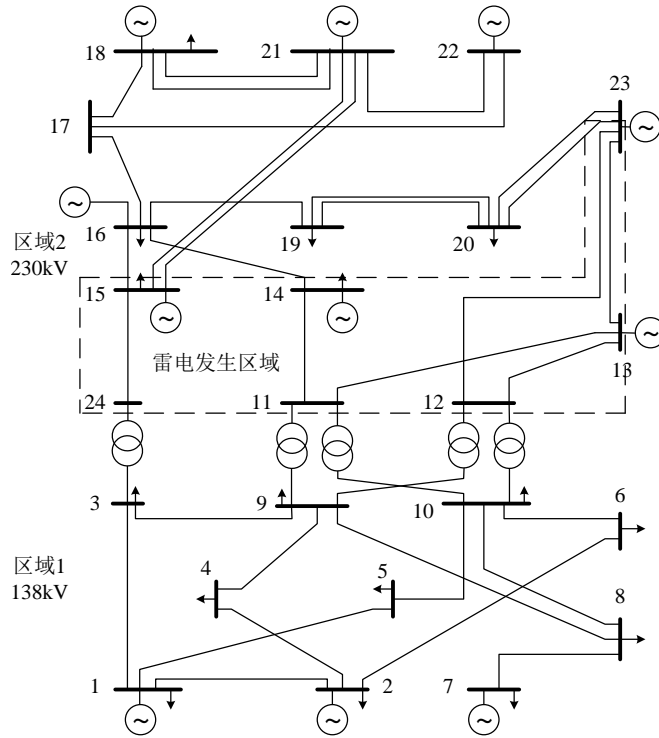


Figure 3. Single line diagram of IEEE RTS-79
图 3. IEEE RTS-79 电气接线图

Table 1. Radar forecast parameters
表 1. 雷达预报参数值

网格	回波强度 dBz	回波顶高最大值 km	垂直累积液态水含量 kg/m ²
网格 1	54	13.7	37
网格 2	40	9.1	27
网格 3	48	11.2	35

Table 2. Failure probability of line section in each grid
表 2. 输电线网格区段故障概率

预测项	网格 1	网格 2	网格 3
雷电流幅值(kA)	67.2 ± 3.5	22.3 ± 3.5	44.3 ± 3.5
落雷侧面距离(m)	89 ± 5	56 ± 5	102 ± 5
故障概率 p	0.01	0.38	0.12

Table 3. Failure probability of transmission line
表 3. 输电线路故障概率

线路	线路 24-15	线路 11-14	线路 12-23	线路 11-13	线路 12-13	线路 13-23
故障概率	0.45	0.25	0.3	0.35	0.40	0.45

果，如表 4 所示，其中 $LOLP$ 表示测试系统失负荷概率； $EDNS$ 表示测试系统电力不足期望值。

由表 4 的结果可知，在雷电天气条件下，测试系统的可靠性指标将会大幅度增加， $LOLP$ 由正常天

气的 0.086 变成雷电影响下的 0.137, $EDNS$ 由 15.04 MW/a 变成 29.75 MW/a。计算结果表明雷电天气对系统的可靠性指标会产生较大的影响, 雷电天气条件下不考虑雷击故障对输电线路的影响, 将会使系统的可靠性偏高, 得到偏乐观的估计。因此, 有必要在电网的短期可靠性评估中考虑恶劣天气对系统的影响, 使得可靠性指标与实际值更接近。表 5 给出测试系统某些节点的可靠性指标。

由表 5 的比较结果可知, 雷电天气对于不同的负荷点影响结果不同, 负荷点 3、4 的可靠性指标变化较大, 而负荷点 18、19 的变化不大。因为在 IEEE RTS-79 测试系统中, 区域 2 通过联络线向区域 1 送电。当系统处于雷电天气条件下, 联络线停运概率较大, 可能导致系统解列。而负荷点 18、19 所处的区域 2 发电机容量大, 电力供应充足, 因此可靠性指标变化不大。

6.3. 雷击故障率对系统可靠性的影响

相同的雷电参数下, 不同的输电线路雷击故障率对应着不同的故障概率。为了分析故障率对系统可靠性的影响, 分别取 $\lambda = 0.001$, $\lambda = 0.005$ 和 $\lambda = 0.01$ (次/小时·公里), 得到的可靠性指标如表 6 所示。

由表 6 结果可知, 相同天气条件下, 输电线路不同的故障率对系统的可靠性指标影响很大, 当 $\lambda = 0.001$ 时, 输电线路故障概率较小, 系统出现故障概率较小, 可靠性指标和正常天气下相差不大, 当 $\lambda = 0.01$ 时, 输电线路雷击故障概率很大, 线路故障后停运对电能传输的约束很大, 相应的可靠性指标变化也很明显, 失负荷概率 $LOLP$ 达到 0.607。

导致输电线路绕击故障率不同的原因主要在于, 线路雷击故障率不止取决于雷电参数, 还受到避雷线保护角、地面倾角、导线高度等因素的影响。避雷线对导线的保护角影响输电线路的屏蔽性能, 相同的雷电参数下, 保护角越大, 导致输电线路的绕击率越高; 山坡地形对输电线路的故障率也有较大的影

Table 4. Reliability indexes of the test system

表 4. 测试系统可靠性指标

气象条件	$LOLP$	$EDNS$ (MW)
正常	0.086	15.04
雷电	0.137	29.75

Table 5. Reliability indexes of load node

表 5. 负荷节点可靠性指标

气象条件	节点号	$EDNS$ (MW)	气象条件	节点号	$EDNS$ (MW)
正常	3	0.79	雷电	3	2.72
	4	0.66		4	1.59
	18	1.58		18	1.76
	19	0.93		19	1.06

Table 6. Reliability indexes of test system under different failure rates

表 6. 不同故障率下测试系统可靠性指标

故障率	$LOLP$	$EDNS$ (MW)
正常	0.086	15.04
$\lambda = 0.001$	0.092	15.68
$\lambda = 0.005$	0.137	29.75
$\lambda = 0.01$	0.607	238.86

响,随着地面倾角的增加,输电线路绕击故障率变高;导线高度也影响着绕击故障率,且随着导线高度的增加,线路故障率增加的越明显。因此,相同的雷电参数下,避雷线保护角、地面倾角、导线高度等因素对系统的可靠性也有着较大的影响,文中主要以输电线路雷击故障率来体现。

7. 结论

本文研究了雷击故障对输电线路可靠性的影响,并给出了雷电天气下的输电系统短期可靠性评估模型。通过分析输电线路雷击概率分布模型,确定了使用雷达气象参数预测雷电流幅值和计算雷电侧面距离,进而预测雷击故障概率,以进行短期可靠性评估。通过对 IEEE RTS-79 测试系统的计算,结果表明雷电天气对系统的可靠性指标会产生较大的影响,雷电天气条件下不考虑雷击故障对输电线路的影响,将会使系统的可靠性偏高,得到偏乐观的估计。本模型可以反应雷电天气对输电线路故障率和系统可靠性的影响,并有利于寻找电力系统可靠性的薄弱环节,提前做好风险防控措施,提高电力系统抵御恶劣天气的能力。

参考文献 (References)

- [1] 余勇,彭骏,卜俊伟 (2010) 基于地理信息系统的雷电业务系统. *成都信息工程学院学报*, **3**, 308-311.
- [2] 杨庆,司马文霞,冯杰 (2008) 云广特高压直流输电线路雷电屏蔽性能研究. *高电压技术*, **3**, 442-446.
- [3] 李培国 (2000) 国外对特高压输电线路雷击跳闸原因的一个新观点. *电网技术*, **7**, 63-65.
- [4] 维列夏金,吴维韩 (1998) 俄罗斯超高压和特高压输电线路防雷运行经验分析. *高电压技术*, **2**, 76-79.
- [5] 周浩,余宇红 (2005) 我国发展特高压输电中一些重要问题的讨论. *电网技术*, **12**, 1-9.
- [6] 王惠忱 (1999) 雷电绕击机理分析. *高电压技术*, **3**, 52-54.
- [7] 童杭伟,陈林云,张斌 (2013) 输电线路外部雷击风险评估模型的研究. *华东电力*, **9**, 1906-1910.
- [8] Billiton, R. and Acharya, J.R. (2006) Weather-Based Distribution System Reliability Evaluation. In: *Proceedings of IEE Generation, Transmission and Distribution Conference*, IEE, Stevenage, 499-506.
- [9] Zhou, Y.J., Pawha, A. and Yang, S. (2006) Modeling Weather-Related Failures of Overhead Distribution Lines. *IEEE Transactions on Power System*, **4**, 1683-1690.
- [10] 王建学,张耀,孙羽 (2011) 大规模冰灾对输电系统可靠性的影响分析. *中国电机工程学报*, **28**, 49-56.
- [11] 黄崇福,王家鼎 (1995) 模糊信息优化处理技术及其应用. 北京航空航天大学出版,北京.
- [12] 周家启,黄雯莹,吴继伟 (1986) 工程系统可靠性评估——原理和方法. 科技文献出版社重庆分社,重庆.
- [13] Transmission and Distribution Committee of the IEEE PES (1997) IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines. IEEE Std., 1243.
- [14] 常越,陈德生 (2010) 多普勒天气雷达与雷电预警关系研究. *气象与环境科学*, **1**, 36-39.
- [15] 李蔚,盛德仁,陈坚红 (2007) 双重 BP 神经网络组合模型在实时数据预测中的应用. *中国电机工程学报*, **17**, 94-97.