

DOI: 10.7667/PSPC160742

# 一种计及地线影响的输电线路可靠性动态评估方法

易永亮<sup>1</sup>, 熊小伏<sup>2</sup>, 徐望圣<sup>1</sup>, 胡江<sup>1</sup>, 孟祥龙<sup>1</sup>, 王建<sup>2</sup>, 王伟<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司贵阳局, 贵州 贵阳 550003;

2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

**摘要:** 雷击、冰灾等极端气象事件是导致输电线路故障的主要原因, 输电线路的架空地线在夏季的防雷作用以及冬季更易覆冰的特点直接影响线路的可靠性水平。因此有必要研究地线对输电线路可靠性的影响及分析方法, 并提出一种计及地线影响的输电线路可靠性动态评估方法。以“月份”作为时间尺度, 对地线自身和输电导线逐月故障率分别统计并进行拟合。分析夏季、冬季地线状态对输电导线可靠性的影响, 并引入相应的修正系数对输电导线故障率进行修正。利用全概率公式对线路停运概率进行计算, 得到了与地线及导线故障率有关的线路全年逐月停运概率函数。算例验证了所提方法的可行性。

**关键词:** 输电线路; 可靠性; 地线故障; 逐月故障率; 动态评估

## A dynamic evaluation method of transmission line reliability considering the effects of ground wire

YI Yongliang<sup>1</sup>, XIONG Xiaofu<sup>2</sup>, XU Wangsheng<sup>1</sup>, HU Jiang<sup>1</sup>, MENG Xianglong<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>

(1. Guiyang Bureau of EHV Transmission Company, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550003, China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Extreme meteorological events such as lightning and ice disaster are the main reason of transmission line fault. Overhead ground wire is of lightning protection effect in summer and is easier to be iced than conductor in winter, and it directly affects the reliability of transmission line. It is necessary to study the effects of ground wire on transmission line reliability and the corresponding analysis method. This paper proposes a dynamic evaluation method of transmission line reliability which considers the effects of ground wire. ‘Month’ is taken as time scale rather than ‘year’ and the monthly failure rates of ground wire and conductor are respectively statistically calculated and fitted. The effects of ground wire status both in summer and winter on the reliability of transmission line are analyzed respectively, and the corresponding correction coefficients of conductor failure rate are introduced. Total probability formula is adopted to calculate the outage probability of transmission line, and the monthly outage probability function of whole year is obtained, which is related to both of the failure rate of ground wire and the failure rate of conductor. Finally, a specific sample is used to explain the method and the feasibility is verified.

**Key words:** transmission line; reliability; ground wire fault; monthly failure rate; dynamic evaluation

## 0 引言

随着电力系统规模的不断扩大和延伸, 电网必然会覆盖众多复杂、恶劣的气象环境, 尤其对于长期暴露在自然环境下的输电系统来说, 极易受到外部恶劣气象灾害的影响而发生故障, 影响到电能的输送<sup>[1-2]</sup>。

长期运行经验及统计结果表明, 雷电、冰灾、大风等恶劣气象因素是电网运行面临的主要威胁,

是造成输电线路等电力设备故障的“罪魁祸首”<sup>[3-4]</sup>。电网故障与气象灾害两者的发生具有较强的时间相关性<sup>[5-6]</sup>, 气象灾害频繁发生的时期往往也对应着电网的故障高发期, 此时电网的可靠性水平也较低。例如, 线路雷击通常集中发生在雷雨季节的6~8月份, 期间雷电活动及线路雷击总数均可达到全年高峰<sup>[7-8]</sup>。线路覆冰以及覆冰带来的导线舞动事件以冬季居多, 通常集中在11月份到次年的2月份, 且冰害容易引起大范围的线路跳闸, 对电网安全运行影

响极大<sup>[9-12]</sup>。文献[13]分析了河北电网的历史事故资料,发现每年夏季的6~8月是该地区电网大风事故的多发期,占到了全年大风事故总次数的83%。文献[14-16]统计发现,输电线路山火跳闸事故与气象条件密切相关,且多集中在春节、清明节、春耕烧荒等时段,其中尤以2、3月份最为频繁。不难发现,电网的可靠性水平是随外部运行环境或致灾原因而波动的,在评估电网可靠性时若忽略这种波动情况,或者简单地将其处理为恒定值的做法是不妥的。

在评估电网可靠性时,常规方法通常基于设备故障率等可靠性参数的多年平均值,最终反映的是系统可靠性的一个多年平均水平<sup>[17-18]</sup>,难以客观揭示这种电网可靠性水平随时间或外部运行条件的变化情况,也会对某段时期的电网可靠性造成“高估”或“低估”。因此在评估电网可靠性时有必要采用比“多年”更精细的时间尺度,以反映可靠性水平的波动情况。

地线是输电系统的重要组成部分,主要用于输电线路的防雷保护,并可参与电力载波通信、融冰、短路电流分流<sup>[19]</sup>等过程。现行相关标准中规定220 kV及以上电压等级线路应沿全线架设地线,并推荐110 kV线路宜全线架设地线<sup>[20-22]</sup>。然而目前针对输电线路的可靠性评估方法中并未对输电导线和地线进行明确区分,在统计线路历史故障数据时往往考虑的是包括导线、地线及其他设备在内的线路整体的故障情况,这种做法忽略了地线自身的状态对线路输电可靠性的影响。在雷雨天气多发的夏季,地线承担着重要的防雷保护的任务,一旦地线因雷击等原因发生故障<sup>[23-24]</sup>,导线受雷击的风险势必会严重增加;而在输电线路冰害多发的冬季,由于不参与电流输送,即不涉及电流的热效应,地线相比输电导线更易产生覆冰且覆冰情况也更严重<sup>[25]</sup>,且该时期雷电活动极少,地线的存在反而会加重线路风险,地线严重覆冰引起的断线、拉断塔头等事故会使输电线路停运从而影响电能的正常输送<sup>[26-29]</sup>。

针对上述问题,本文提出一种考虑了地线运行状态影响的输电线路可靠性动态评估方法。分别统计地线自身和输电导线部分的历史故障数据作为可靠性评估的数据基础;以月份为时间尺度,计算并拟合输电线路及地线故障率随月份的变化情况;分析不同时期的地线运行状态对线路可靠性的影响,基于此对可靠性指标的逐月份变化情况进行计算,实现对线路可靠性的动态评估。最后采用具体算例对该方法的可行性进行了验证。

## 1 输电线路故障率的逐月变化及拟合

### 1.1 故障数据的收集与统计

在评估输电线路可靠性时为考虑地线运行状态的影响,本文建议对地线和输电导线部分(包括除地线外的导线及其他输电设备)的历史故障数据分别进行统计。

### 1.2 输电线路的逐月份故障率

故障率是可靠性评估中最基本的参数,常规可靠性评估方法中采用的多是“多年统计平均”后的故障率,例如假设某条线路在4年间共发生了12次故障,则经过多年统计平均后的故障率为“12/4”,即“3次/年”。但电网的运行环境是随时间变化的,不同时间或月份电网面临的主要致灾因素也不同,这也决定了电网可靠性也是随时间波动的。多年统计的平均故障率并不能客观反映这种波动情况,容易对故障高发期的电网可靠性水平造成一定程度的“高估”,相应地也会对故障低发期的可靠性水平造成“低估”。

气象灾害是电网故障的主要原因,电网气象灾害在发生时间上通常具有明显的周期或规律<sup>[1-2,5-6]</sup>。例如雷电、大风带来的输电线路雷击、风偏放电常发生于夏季;而线路覆冰、舞动事件常发生于冬季;鸟类迁徙带来的输电线路鸟害事件也以春、秋两季居多。以月份作为时间尺度评估线路可靠性,可以较准确地揭示这种规律,反映线路的故障高发期、低发期,更为客观地描述电网可靠性水平随时间的波动情况。因此,本文提出以月份为时间尺度对导线及地线的故障率进行统计计算,如式(1)所示。

$$\lambda_m = \frac{\sum_{y=1}^Y N_{ym}}{\sum_{y=1}^Y T_{ym}} \quad (1)$$

式中:  $Y$  表示统计年数或已有数据年数;  $\lambda_m$  为某线路的地线或输电导线部分在第  $m$  月的故障率,单位为“次/月”;  $N_{ym}$  是其在第  $y$  年的第  $m$  月发生的故障次数;  $T_{ym}$  为第  $y$  年的第  $m$  月的持续时间,单位为“月”,因此均取为“1”。

### 1.3 故障率逐月变化特性的拟合

根据式(1)可得12组格式为  $(m, \lambda_m)$  的离散数据—— $(1, \lambda_1), (2, \lambda_2), \dots, (12, \lambda_{12})$ , 每组数据均由月份  $m$  与该月份故障率  $\lambda_m$  组成。

基于上述数据,为更准确地描述线路可靠性水平随月份的变化规律,可选用合适的函数对“ $\lambda_m$ - $m$ ”变化曲线进行拟合<sup>[30]</sup>。考虑到以雷电、大风、冰灾

为主的气象灾害是电网故障的主要原因, 其在发生时间上也具有较明显的周期, 其中雷电、大风往往伴随强对流天气发生, 通常密集发生于夏季的 6~8 月份, 而线路的覆冰、舞动等冰灾事件往往发生于冬、春两季的 12~2 月份。电网多年运行经验也表明夏季、冬季是输电线路故障跳闸事件的高发期, 在这两个时期线路故障率随时间的变化曲线也达到了“波峰”。

傅里叶函数对具有“多峰”、“周期性”特性的曲线拟合具有很好的适应性, 且在幅值、周期的调节上也比较容易实现, 本文采用一次傅里叶函数对地线或输电导线故障率的逐月变化特性进行拟合, 其表达式为

$$\lambda(m) = a_0 + a_1 \cos(\omega m) + b_1 \sin(\omega m) \quad (2)$$

式中:  $\lambda(m)$  是拟合后的故障率函数;  $m$  是以月份为单位的时间变量;  $a_0, a_1, b_1, \omega$  为待拟合系数。

## 2 地线状态对线路可靠性的影响

地线作为主要的防雷措施, 广泛应用于 110 kV 及以上电压等级的输电线路。在不同时期, 地线对线路输电可靠性的影响也有区别。

### 2.1 地线状态对夏季线路可靠性的影响

夏季(6~8 月份)雷雨多发, 是全年雷电活动最集中的季节, 雷击、大风也是该时期输电线路故障的最主要原因。地线的屏蔽保护起到了有效降低输电线路雷击跳闸风险的积极作用, 一旦地线发生故障, 例如雷击带来的热效应、机械效应或大风环境下引起地线断股、掉线, 输电线路将失去地线的防雷保护, 线路受雷击跳闸的风险也会显著增加。

雷击跳闸率是评价地线防雷效果的一个综合指标, 表示每百公里线路每年的雷击跳闸次数。夏季地线运行状态对线路可靠性的影响可通过雷击跳闸率的变化情况来反映。

地线正常工作时, 线路的落雷情况可分为雷击地线、雷击杆塔以及雷绕击导线 3 种情况, 其中雷击地线通常不会导致跳闸事故, 因此线路的雷击跳闸率  $n_{gA}$  可根据式(3)计算<sup>[31]</sup>。

$$n_{gA} = 0.6h_b\eta(gP_1 + P_aP_2) \quad (3)$$

式中:  $0.6h_b$  表示每百公里线路每年的落雷次数,  $h_b$  为地线悬挂高度;  $\eta$  为建弧率;  $g, P_a$  分别为击杆率和绕击率, 分别表示雷击杆塔与雷绕击导线占该线路落雷次数的比重;  $P_1, P_2$  分别为雷电流幅值超过雷击杆塔耐雷水平  $I_1$  和绕击耐雷水平  $I_2$  的概率。

根据 GB/T 50064-2014<sup>[21]</sup>, 雷电流幅值超过某一水平  $I_0$ (单位为 kA) 的概率  $P(I_0)$  一般按式(4)计算。

$$P(I_0) = 10^{-\frac{I_0}{88}} \quad (4)$$

当地线发生断线、脱落等事故而失去防雷保护作用时, 线路落雷情况将仅由雷击杆塔和雷绕击导线组成, 此时可以近似地将原本“雷击地线”的那部分落雷归入到“雷绕击导线”中去, 即式(3)中的绕击率  $P_a$  等于“1-击杆率  $g$ ”。因此, 地线故障下的线路雷击跳闸率  $n_{gU}$  可近似按式(5)计算。

$$n_{gU} = 0.6h_b\eta[gP_1 + (1-g)P_2] \quad (5)$$

根据可靠性理论, 停运或故障概率  $U$  可由故障率  $\lambda$  及平均维修时间  $r$  计算得到<sup>[17]</sup>, 如式(6)。

$$U = \frac{\lambda}{\lambda + \frac{1}{r}} \quad (6)$$

基于上述内容, 夏季地线在不同状态下输电导线部分的故障率可由如下方法得到:

1) 由于地线故障持续时间远小于地线运行时间, 即绝大部分时间地线都处于正常状态, 因此地线正常状态下, 输电导线部分的故障率可近似地基于导线的历史故障情况由式(1)计算得到, 记为  $\lambda_{1-gA}$ 。

2) 雷击是输电线路夏季最主要的跳闸原因, 线路在夏季的跳闸情况在一定程度上可通过其雷击跳闸情况来反映。因此在地线出现故障的条件下, 可根据雷击跳闸率的变化情况对输电导线故障率进行修正, 如式(7)所示。

$$\lambda_{1-gU} = \alpha\lambda_{1-gA} = \frac{n_{gU}}{n_{gA}}\lambda_{1-gA} \quad (7)$$

式中:  $\lambda_{1-gU}$  是地线故障状态下输电导线部分的故障率;  $\alpha$  为地线故障下故障率的修正系数, 等于地线故障与地线正常时的雷击跳闸率之比“ $n_{gU}/n_{gA}$ ”。

利用全概率公式并结合式(6)、式(7), 输电线路在夏季某一月份的停运概率  $U$  可由式(8)计算。

$$U = (1-U_g)U_{1-gA} + U_gU_{1-gU} = U_g(U_{1-gU} - U_{1-gA}) + U_{1-gA} = \frac{\lambda_g}{\lambda_g + \frac{1}{r}} \left( \frac{\alpha\lambda_{1-gA}}{\alpha\lambda_{1-gA} + \frac{1}{r}} - \frac{\lambda_{1-gA}}{\lambda_{1-gA} + \frac{1}{r}} \right) + \frac{\lambda_{1-gA}}{\lambda_{1-gA} + \frac{1}{r}} = \frac{(\alpha-1)\lambda_g\lambda_{1-gA}}{r\left(\lambda_g + \frac{1}{r}\right)\left(\lambda_{1-gA} + \frac{1}{r}\right)\left(\alpha\lambda_{1-gA} + \frac{1}{r}\right)} + \frac{\lambda_{1-gA}}{\lambda_{1-gA} + \frac{1}{r}} \quad (8)$$

式中:  $U_g$  是地线的停运或故障概率;  $U_{1-gA}, U_{1-gU}$  分别是在地线正常、故障状态下输电导线部分的停运概率;  $\lambda_g$  为地线故障率, 可基于地线的历史故障情况由式(1)计算得到;  $r$  为线路的平均维修时间,

单位为“月”。

## 2.2 地线状态对冬季线路可靠性的影响

冬季(12~次年2月份)对电网运行有显著影响的是低温、冰雪灾害,线路覆冰及覆冰诱发的线路舞动是这一时期电网故障的主要原因。地线不参与电流的正常输送,不具备电流的热效应,因此相对于输电导线来说抵御冰冻的能力较差,相同环境下地线覆冰程度也更严重<sup>[25]</sup>。有统计表明,2008年湖南电网大范围冰灾造成的110 kV及以上电压等级输电线路故障事故中,导线断线或受损共有1046处,而地线断线或受损达到了1771处<sup>[26]</sup>。由于冬季几乎没有雷电活动,相对于降低线路雷击跳闸风险,地线对于输电线路可靠性来说更多的是起到了因覆冰断线、脱落等事故而造成输电线路停运的消极作用,例如地线掉线引起的导线接地、相间短路等。

与夏季类似,冬季地线对输电线路可靠性的影响仍可分为地线正常和地线故障两种情况。

1) 同2.1节,地线正常状态下,输电导线部分的故障率 $\lambda_{1-gA}$ 可根据式(1)计算。

2) 如上所述,冬季地线更易出现覆冰断线等故障进而引起输电线路的停运,地线的存在一定程度上反而降低了线路的可靠性。当地线发生断线等故障退出运行时,输电导线部分的故障率会有所降低。

引入修正系数 $\beta$ ,其计算方法为

$$\beta = 1 - \frac{\sum_{y=1}^Y \sum_{m=1,2,12} N_{ym-gU}}{\sum_{y=1}^Y \sum_{m=1,2,12} N_{ym}} \quad (9)$$

式中: $N_{ym}$ 同式(1),表示某线路的输电导线部分在第 $y$ 年第 $m$ 月的故障次数; $N_{ym-gU}$ 是其中地线导致的输电导线部分的故障次数。式(9)中,月份 $m$ 的取值为“1,2,12”,表示“冬季”,亦可根据线路实际运行中冰灾情况的分布取为其他值,例如“1,2,11,12”等。

修正系数 $\beta$ 表示线路的输电导线部分在冬季由非地线原因引起的故障占冬季总故障事件的比重。因此在冬季地线故障而退出运行条件下,即非地线原因引起的导线部分的故障率 $\lambda_{1-gU}$ 可按式(10)计算。

$$\lambda_{1-gU} = \beta \lambda_{1-gA} \quad (10)$$

与式(8)类似,输电线路在冬季某一月份的停运概率 $U$ 同样可根据全概率公式进行计算。

$$U = (1 - U_g) U_{1-gA} + U_g U_{1-gU} = \frac{(\beta - 1) \lambda_g \lambda_{1-gA}}{r \left( \lambda_g + \frac{1}{r} \right) \left( \lambda_{1-gA} + \frac{1}{r} \right) \left( \beta \lambda_{1-gA} + \frac{1}{r} \right)} + \frac{\lambda_{1-gA}}{\lambda_{1-gA} + \frac{1}{r}} \quad (11)$$

## 2.3 其余月份地线状态对线路可靠性的影响

如2.1节和2.2节所述,地线状态对线路可靠性的影响主要反映在夏季和冬季两个时期。在其余月份,由于雷电活动较少,且线路覆冰情况也很少出现,也就是说:地线故障不会使线路的雷击跳闸风险增加太多,同时地线也不易出现覆冰断线等事故增加线路停运风险。

因此在除夏季、冬季的其余月份,可以忽略地线对输电导线的影响,即地线正常、故障状态下输电导线部分的故障率 $\lambda_{1-gA}$ 和 $\lambda_{1-gU}$ 可以近似认为是相等的。结合式(6),可得

$$\begin{cases} \lambda_{1-gA} \approx \lambda_{1-gU} \\ U_{1-gA} \approx U_{1-gU} \end{cases} \quad (12)$$

式中,地线正常时输电导线部分的故障率 $\lambda_{1-gA}$ 可基于历史故障情况由式(1)计算得到。

根据式(12),利用全概率公式可得输电线路在除夏季、冬季外其余月份的停运概率如式(13)所示。

$$U = (1 - U_g) U_{1-gA} + U_g U_{1-gU} \approx U_{1-gA} \approx \frac{\lambda_{1-gA}}{\lambda_{1-gA} + \frac{1}{r}} \quad (13)$$

## 3 计及地线影响的输电线路可靠性动态评估方法

### 3.1 输电线路逐月停运概率

$$U(m) = \begin{cases} \frac{(\alpha - 1) \lambda_g(m) \lambda_{1-gA}(m)}{r \left[ \lambda_g(m) + \frac{1}{r} \right] \left[ \lambda_{1-gA}(m) + \frac{1}{r} \right] \left[ \alpha \lambda_{1-gA}(m) + \frac{1}{r} \right]} + \frac{\lambda_{1-gA}(m)}{\lambda_{1-gA}(m) + \frac{1}{r}} & \text{夏季: } m \in [5, 8] \\ \frac{(\beta - 1) \lambda_g(m) \lambda_{1-gA}(m)}{r \left[ \lambda_g(m) + \frac{1}{r} \right] \left[ \lambda_{1-gA}(m) + \frac{1}{r} \right] \left[ \beta \lambda_{1-gA}(m) + \frac{1}{r} \right]} + \frac{\lambda_{1-gA}(m)}{\lambda_{1-gA}(m) + \frac{1}{r}} & \text{冬季: } m \in [0, 2] \cup [11, 12] \\ \frac{\lambda_{1-gA}(m)}{\lambda_{1-gA}(m) + \frac{1}{r}} & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

分别基于地线、输电导线部分的历史故障情况,由式(1)可计算得到 $\lambda_g, \lambda_{1-gA}$ ,并根据1.3节拟合得到相应的连续函数形式 $\lambda_g(m), \lambda_{1-gA}(m)$ 。根据式(8)、式(11)及式(13),输电线路逐月停运概率 $U(m)$ 可由式(14)所示的分段函数表示。

### 3.2 一种计及地线影响的输电线路可靠性动态评估方法

结合上文内容, 本文提出一种计及地线影响的输电线路可靠性动态评估方法, 其步骤如下:

1) 分别收集、统计地线和输电导线部分(包括除地线外的导线及其他输电设备)的历史故障数据, 如 1.1 节所述。

2) 基于统计的历史数据, 根据式(1)分别计算输电导线部分和地线在各月份的故障率  $\lambda_{l-gA}, \lambda_g$ 。

3) 利用式(2)所示的一次傅里叶函数对离散的各月份故障率  $\lambda_{l-gA}, \lambda_g$  进行拟合, 得到其连续函数形式  $\lambda_{l-gA}(m), \lambda_g(m)$ 。

4) 根据式(3)和式(5)分别计算地线正常、故障状态下的雷击跳闸率  $n_{gA}, n_{gU}$ , 计算修正系数  $\alpha$ , 并统计线路历史冰灾情况, 由式(9)计算修正系数  $\beta$ 。

5) 将  $\alpha, \beta, \lambda_{l-gA}(m), \lambda_g(m)$  代入式(14), 计算输电线路的逐月停运概率函数  $U(m)$ , 借助逐月停运概率函数  $U(m)$  实现对输电线路各个时期可靠性水平的动态评估。

该方法流程图如图 1 所示。

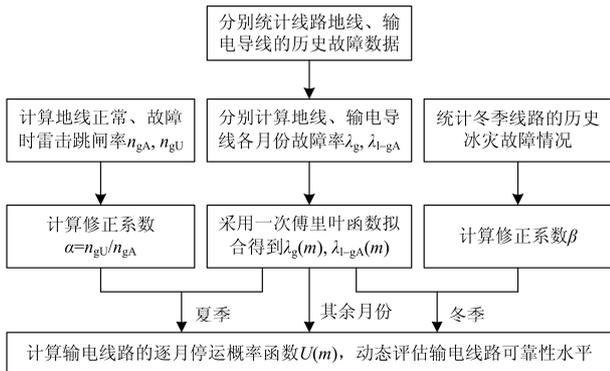


图 1 计及地线影响的输电线路可靠性动态评估方法流程图

Fig. 1 Flow chart of the dynamic evaluation method of transmission line reliability considering the effects of ground wire

## 4 算例分析

### 4.1 地线及输电导线故障率的逐月变化及拟合

假设有某条 220 kV 线路, 对其输电导线部分和地线的历史故障情况分别进行统计, 其中统计年数为 5 年。根据式(1)计算后, 假设该线路输电导线部分和地线的逐月故障率分别如图 2 和图 3 中的柱状图所示。

根据 1.3 节所述, 采用式(2)所示的一次傅里叶函数对图 2 和图 3 所示的逐月故障率进行拟合。利用 Matlab 的 CFTool 拟合工具箱, 可得输电导线部

分和地线的逐月故障率拟合曲线  $\lambda_{l-gA}(m), \lambda_g(m)$  分别如图 2、图 3 所示, 拟合函数表达式分别为

$$\begin{cases} \lambda_{l-gA}(m) = 1.174 + 0.6867 \cos(0.9234m) + 0.2569 \sin(0.9234m) \\ \lambda_g(m) = 0.387 + 0.1911 \cos(1.036m) + 0.335 \sin(1.036m) \end{cases} \quad (15)$$

$\lambda_{l-gA}(m), \lambda_g(m)$  的拟合优度 “R-square” 分别为 0.8231、0.8248, 因此上述拟合结果可以接受。

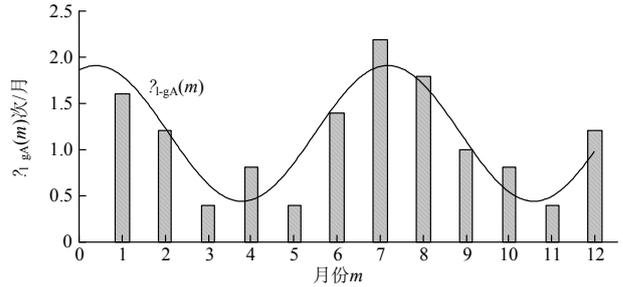


图 2 输电导线部分逐月故障率  $\lambda_{l-gA}(m)$

Fig. 2 Monthly failure rate ' $\lambda_{l-gA}(m)$ ' of the conductor

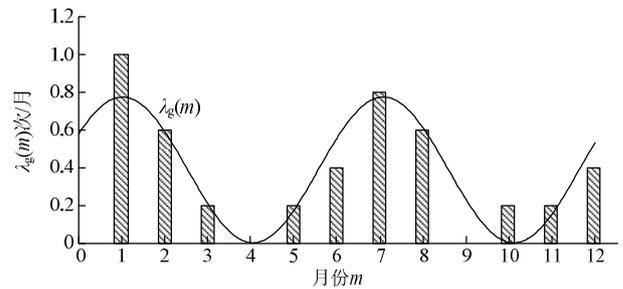


图 3 地线逐月故障率  $\lambda_g(m)$

Fig. 3 Monthly failure rate ' $\lambda_g(m)$ ' of the ground wire

### 4.2 修正系数 $\alpha, \beta$ 的计算

#### 1) 修正系数 $\alpha$

表 1 算例线路参数

Table 1 Parameters of transmission line in the sample

地线高度 $h_b$	建弧率 $\eta$	击杆率 $g$	绕击率 $P_a$	雷击杆塔耐雷水平 $I_1$	绕击耐雷水平 $I_2$
24.5 m	0.8	1/6	0.144%	110.2 kA	12 kA

参照 DL/T 620—1997<sup>[18]</sup>附录 C 的 C11 给出的 220 kV 线路参数, 假设本文算例的 220 kV 线路具有相同的参数, 如表 1 所示。

将雷击杆塔耐雷水平  $I_1$  和绕击耐雷水平  $I_2$  代入式(4), 分别计算雷电流幅值超过  $I_1$  和  $I_2$  的概率  $P_1, P_2$  为

$$\begin{cases} P_1 = 10^{-\frac{I_1}{88}} = 10^{-\frac{110.2}{88}} = 5.59\% \\ P_2 = 10^{-\frac{I_2}{88}} = 10^{-\frac{12}{88}} = 73.05\% \end{cases} \quad (16)$$

根据式(3)计算地线正常状态下该线路的雷击跳闸率  $n_{gA}$  为

$$n_{gA} = 0.6 \times 24.5 \times 0.8 \times \left( \frac{1}{6} \times \frac{5.59}{100} + \frac{0.144}{100} \times \frac{73.05}{100} \right) = 0.122 \text{ [次/(100 km} \cdot \text{年)]} \quad (17)$$

根据式(5)计算地线故障状态下该线路的雷击跳闸率  $n_{gU}$  为

$$n_{gU} = 0.6 \times 24.5 \times 0.8 \times \left( \frac{1}{6} \times \frac{5.59}{100} + \frac{5}{6} \times \frac{73.05}{100} \right) = 7.268 \text{ [次/(100 km} \cdot \text{年)]} \quad (18)$$

式(18)的结果表示, 在失去地线防雷保护的条件下, 该线路每百公里每年发生的雷击跳闸次数约为 7 次。

根据式(7)可得修正系数  $\alpha$  为

$$\alpha = \frac{n_{gU}}{n_{gA}} = \frac{7.268}{0.122} = 59.57 \quad (19)$$

## 2) 修正系数 $\beta$

修正系数  $\beta$  是基于线路的冬季冰灾故障情况统计得到的。假设在冬季的 12 月份~次年 2 月份, 该线路共发生 20 次故障, 其中因地线故障引起的有 10 次(这一假设与图 2 和图 3 所示的故障情况是对应的), 则根据式(9)可得

$$\beta = 1 - \frac{10}{20} = 0.5 \quad (20)$$

## 4.3 线路的逐月停运概率

假设该线路的平均维修时间  $r$  为 30 h, 即“0.041 月”。将式(15)、式(19)、式(20)代入式(14), 可得该线路的逐月停运概率函数  $U(m)$  如图 4 所示。

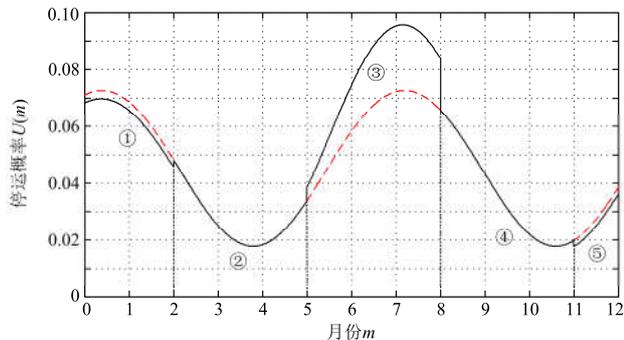


图 4 线路逐月停运概率  $U(m)$

Fig. 4 Monthly outage probability ' $U(m)$ ' of transmission line

图 4 中, 黑色实线表示线路的逐月停运概率  $U(m)$ ; 红色虚线部分表示忽略地线自身故障情况的影响, 即仅根据输电导线的故障率  $\lambda_{l-gA}(m)$  计算得到的停运概率, 其表达式如式(13)所示。

通过对比不难发现, 在考虑了地线状态的影响后, 输电线路的停运概率有着不同程度的变化, 主要表现在冬、夏两季。

冬季的 12 月到次年 2 月期间, 由于地线故障的条件下线路的覆冰断线风险有所降低, 根据式(10)及  $\beta$  的值也可发现, 地线一旦发生故障, 线路的故障率约为正常时的一半。因此在考虑地线影响后线路的停运概率会略微有所减小, 如图 4 中的①、⑤部分所示。

夏季的 6~8 月份, 地线故障条件下线路的雷击跳闸风险会显著增加, 根据式(7)和  $\alpha$  的值可知, 地线一旦故障, 线路的雷击跳闸率将增加数十倍。因此在考虑地线影响后线路的停运概率有所增加, 如图 4 中的③部分所示, 在雷击事件发生较频繁的 7 月份, 计及地线影响后的线路的停运概率会增大 30% 左右。

图 4 所示的  $U(m)$  可以动态地反映线路停运概率随月份的变化情况, 为线路规划、运维、检修等工作提供客观的参考依据。

## 5 结论

在外部气象灾害的影响下, 输电线路的可靠性水平是随时间波动变化的, 但常规的可靠性评估方法得到的往往是多年平均的可靠性水平, 难以反映这种波动情况; 而且在不同时期, 地线运行状态对线路的可靠性水平也会有不同程度、不同性质的影响。针对这些问题, 本文提出了一种计及地线影响的输电线路可靠性动态评估方法。本方法对线路的地线自身及输电导线部分各个月份的故障率分别计算, 并采用一次傅里叶函数进行拟合得到故障率的连续函数形式; 分别分析了夏季、冬季地线状态对线路可靠性的影响, 依据雷击跳闸率的变化情况以及历史冰灾故障情况对输电导线的故障率进行修正, 并利用全概率公式对考虑地线不同状态下线路的停运概率进行了计算, 得到了与地线、输电导线故障率有关的分段函数形式的线路逐月停运概率函数。本文所提方法可以客观地反映地线影响下线路可靠性水平随时间的波动变化情况, 为线路规划阶段的路径选择、运行阶段不同时期或月份的运维、调度、检修决策的制定等工作提供重要的参考依据。

## 参考文献

- [1] CIGRE TB 598. Guidelines for the management of risk associated with severe climatic events and climatic change on overhead lines[R]. Working Group B2.54, 2014.
- [2] 周宁, 熊小伏. 电力气象技术及应用[M]. 北京: 中国

- 电力出版社, 2015.
- [3] 梁志峰. 2011-2013 年国家电网公司输电线路故障跳闸统计分析[J]. 华东电力, 2014, 42(11): 2265-2270.  
LIANG Zhifeng. Statistical analysis of transmission line fault tripping in State Grid Corporation of China in 2011-2013[J]. East China Electric Power, 2014, 42(11): 2265-2270.
- [4] 薛禹胜, 吴勇军, 谢云云, 等. 停电防御框架向自然灾害预警的拓展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 18-26.  
XUE Yusheng, WU Yongjun, XIE Yunyun, et al. Extension of blackout defense scheme to natural disasters early-warning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 18-26.
- [5] 方丽华, 熊小伏, 方嵩, 等. 基于电网故障与气象因果关联分析的系统风险控制决策[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 113-119.  
FANG Lihua, XIONG Xiaofu, FANG Song, et al. Power system risk control decision based on cause and effect correlation analysis of fault and meteorology[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 113-119.
- [6] 熊小伏, 王建, 袁峻, 等. 时空环境相依的电网故障模型及在电网可靠性评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 28-35.  
XIONG Xiaofu, WANG Jian, YUAN Jun, et al. Temporal and spatial environments dependent power grid failure method and its application in power grid reliability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 28-35.
- [7] 王剑, 刘亚新. 2006 年华北电网输电线路雷击故障分析[J]. 华北电力技术, 2006(12): 1-5.  
WANG Jian, LIU Yaxin. Analysis of lightning failure of transmission lines in North China Power Grid during 2006[J]. North China Electric Power, 2006(12): 1-5.
- [8] 吴传奇, 丁黎, 贺恒鑫, 等. 湖南省电网雷电活动时空分布特征[J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 932-938.  
WU Chuanqi, DING Li, HE Hengxin, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of lightning activity of Hunan power grid[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4): 932-938.
- [9] 蒋兴良, 易辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [10] 陆佳政, 张红先, 方针, 等. 湖南电力系统冰灾监测结果及其分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 99-105.  
LU Jiazheng, ZHANG Hongxian, FANG Zhen, et al. Result and its analysis of ice disaster monitoring of Hunan power system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(12): 99-105.
- [11] 曾庆沛. 高压输电线路导线舞动研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.  
ZENG Qingpei. The study on galloping of conductor of high-voltage transmission line[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [12] 张忠瑞, 王飞, 张巍. 辽宁电网输电线路舞动的气象影响分析[J]. 东北电力技术, 2012(4): 26-31.  
ZHANG Zhongrui, WANG Fei, ZHANG Wei. Meteorological impact analysis for transmission line of Liaoning grid galloping[J]. Northeast Electric Power Technology, 2012(4): 26-31.
- [13] 付桂琴, 曹欣. 雷雨大风与河北电网灾害特征分析[J]. 气象, 2012, 38(3): 353-357.  
FU Guiqin, CAO Xin. The characteristic analysis of thunderstorm gale and electrical network disaster in Hebei[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(3): 353-357.
- [14] 陆佳政, 周特军, 吴传平, 等. 某省级电网 220 kV 及以上输电线路故障统计与分析[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 200-207.  
LU Jiazheng, ZHOU Tejun, WU Chuanping, et al. Fault statistics and analysis of 220 kV and above power transmission line in province-level power grid[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 200-207.
- [15] 吴田, 阮江军, 张云, 等. 输电线路因山火跳闸事故统计特性与识别分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 138-143, 148.  
WU Tian, RUAN Jiangjun, ZHANG Yun, et al. Study on the statistic characteristics and identification of AC transmission line trips induced by forest fires[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 138-143, 148.
- [16] 刘明军, 邵周策, 上官帖, 等. 输电线路山火故障风险评估模型及评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 82-89.  
LIU Mingjun, SHAO Zhouce, SHANGGUAN Tie, et al. Study on models and methods of risk assessment of transmission line fault caused by fire[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 82-89.
- [17] BILLINTON R, ALLAN R N. Reliability evaluation of power systems[M]. 2nd ed. New York and London: Plenum Press, 1996.
- [18] 李文沅. 电力系统风险评估: 模型、方法和应用[M]. 周家启, 等. 译. 北京: 科学出版社, 2006.
- [19] 齐郑, 饶志, 杨琳琳. OPGW 架空输电系统任一点接地短路电流分布的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 86-94.  
QI Zheng, RAO Zhi, YANG Linlin. Research of current distribution between OPGWs in overhead transmission

- system with grounding fault at any point[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 86-94.
- [20] GB 50545—2010 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.  
GB 50545—2010 code for design of 110 kV~750 kV overhead transmission line[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.
- [21] GB/T 50064—2014 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.  
GB/T 50064—2014 code for design of overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installations[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [22] DL/T 620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 北京: 中国电力出版社, 1997.  
DL/T 620—1997 overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installations[S]. Beijing: China Electric Power Press, 1997.
- [23] 胡毅, 叶廷路, 王力农, 等. 光纤复合架空地线的雷击断股机理与防治措施[J]. 电网技术, 2006, 30(16): 70-76.  
HU Yi, YE Tinglu, WANG Linong, et al. Strands breaking mechanisms of optical fiber composite overhead ground wire caused by lightning stroke and corresponding preventive measures[J]. Power System Technology, 2006, 30(16): 70-76.
- [24] 赖达峰. 输电线路雷击架空地线断线的原因分析及防雷措施[J]. 科技创新导报, 2011(17): 139.  
LAI Dafeng. Reason analysis and lightning-prevention measurement of overhead ground wire break when transmission line was struck by lightning[J]. Science and Technology Innovation Guide, 2011(17): 139.
- [25] 刘浩梁, 陆佳政, 周力行, 等. 微气象条件下架空地线的覆冰增长[J]. 电力建设, 2010, 31(4): 5-8.  
LIU Haoliang, LU Jiazheng, ZHOU Lixing, et al. Overhead ground wire icing growth under micro-meteorological conditions[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(4): 5-8.
- [26] 陆佳政, 蒋正龙, 雷红才, 等. 湖南电网 2008 年冰灾事故分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11): 16-19.  
LU Jiazheng, JIANG Zhenglong, LEI Hongcai, et al. Analysis of Hunan Power Grid ice disaster accident in 2008[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 16-19.
- [27] 杨济海, 彭汐单. 对抗覆冰光纤复合架空地线的思考[J]. 电力系统通信, 2008, 29(191): 14-16.  
YANG Jihai, PENG Xidan. Discussion on anti-icing OPGW[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2008, 29(191): 14-16.
- [28] 刘春城, 李宏男, 刘佼. 高压输电线路抗冰灾的研究现状与发展趋势[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(1): 155-162.  
LIU Chuncheng, LI Hongnan, LIU Jiao. Present status and trend of icing disaster resistance of high-voltage transmission lines[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(1): 155-162.
- [29] 王欣伟, 王琪, 李杰. 绝缘子、架空导线及塔形结构在输电线路覆冰跳闸中的影响作用[J]. 山西电力, 2015(2): 16-18.  
WANG Xinwei, WANG Qi, LI Jie. The effects of insulator, overhead transmission lines and tower structure on icing trips of transmission lines[J]. Shanxi Electric Power, 2015(2): 16-18.
- [30] 程正兴. 数据拟合[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986.
- [31] 赵玉林. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

收稿日期: 2016-05-22; 修回日期: 2016-07-13

作者简介:

易永亮(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为输电线路类设备运维、检修管理; E-mail: 65890516@qq.com

熊小伏(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能电网、电力系统保护与控制、电力系统风险评估及气象灾害预警; E-mail: cqquxf@vip.sina.com

徐望圣(1976-), 男, 本科, 工程师, 研究方向为输电线路类设备运维、检修管理。

(编辑 周金梅)