

一种基于可靠性分析的输电线路路径设计方法

王川化¹, 余鹏飞²

(1. 江苏兴力工程建设监理咨询有限公司, 江苏 南京 210024;
2. 英国邓迪大学, 苏格兰 邓迪 DD1 4HN)

摘要:对待选路径可靠性进行评估是输电线路规划设计中路径选择工作的重点之一。针对常规的采用多年平均故障率的方法存在的不足, 本文提出了一种基于可靠性分析的输电线路路径设计方法。基于对待选路径跨越区域内已有线路的历史故障信息的统计, 以月为时间尺度计算待选路径各个月份的故障率, 并对其逐月变化特性进行函数拟合; 考虑到与待选路径相连的电源出力也可能是时变的, 本文对电源出力的逐月变化特性进行函数拟合。根据待选路径故障率和电源出力的拟合函数, 通过计算待选路径的全年输送电能损失期望来反映其可靠性水平, 可为待选路径间的比较和最优路径的选择提供重要的参考依据。

关键词:路径选择; 待选路径; 故障率; 逐月变化特性; 输送电能损失

中图分类号: TM715

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)05-0149-06

0 引言

输电线路的规划设计是电网发展的基础, 其中路径选择更是规划设计中的重要环节, 直接关系到后期线路的施工建设、运维、检修等过程^[1]。目前有关输电线路路径选择的研究主要集中在经济性、便利性上, 其中经济性的约束对象主要是线路的总投资, 涉及线路长度、施工费用以及各类拆迁赔偿等问题; 便利性包括施工及后期线路维护、检修的便利性^[2-4]。而输电线路在运行阶段面临来自雷电、大风、覆冰等外部恶劣气象环境的风险, 如何避免或减轻这类风险, 即线路后期运行的安全可靠也应在输电线路路径选择工作中得到充分重视。已有部分研究考虑了线路的安全可靠性问题, 但大都只是“根据运行经验避开故障高发或恶劣环境区域”, 鲜有从线路风险评估的角度研究路径选择问题。

风险评估的最终目的和落脚点是通过计算风险指标实现风险的量化, 而线路等设备的可靠性参数则是计算风险指标的基础^[5]。故障率作为最基本的可靠性参数, 在常规可靠性评估方法中一直取为统计后的多年平均值^[6-8], 仅能用于评估系统多年平均的可靠性水平, 难以客观反映可靠性或风险水平随时间、外部运行条件的变化情况。恶劣气象条件是输电线路运行面临的最大威胁, 也是造成故障跳闸事件的最主要原因^[9], 气象灾害的发生通常具有一定的聚集性规律, 这也造成电网故障呈现类似的特征^[10], 气象灾害多发的时段往往也对应电网

故障事件的高发期, 此时电网的可靠性水平也较低^[11-16]。在发电方面, 水电、风电、光伏发电在电力系统中所占比重越来越大, 其发电出力很大程度上受外部气象条件的影响, 呈现出比较明显的峰谷特性^[17-20]。为了更客观地评估线路运行风险, 有必要反映出风险随时间或外部环境的变化情况, 同时也有必要考虑与线路相连的电源出力的变化情况。

基于上述问题, 本文提出一种基于可靠性分析的输电线路路径设计方法。首先收集、统计待选路径周围已有线路的历史故障数据, 计算待选路径各月份故障率, 并对故障率的逐月变化特性进行函数拟合; 根据线路规划中与待选路径相连的电源类型, 确定其出力的逐月变化特性并同样进行函数拟合。根据得到的拟合函数, 计算待选路径的全年输送电能损失期望, 为路径选择提供参考依据。

1 待选路径区域线路历史数据统计

对电网设备历史运行数据的统计是评估电力系统可靠性及计算相应参数的基础, 而在输电线路的路径选择中, 待选路径并不存在历史运行数据, 考虑到一定空间区域内的输电线路在运行环境上往往具有相似性, 本文借助待选路径附近一定区域内的已有线路的历史运行数据作为评估待选路径可靠性的数据基础, 如图1所示。

假设 L 为输电线路待选路径, 以一定的间隔 d 确定两条平行的边界 L_a 和 L_b , 可确定一个以待选路径 L 为中心的带状区域。该区域内包含的已有线路区段(即对应图1中的线路 l_1 的 AB 段, 以及 l_2 的全部区段)的历史故障数据作为数据基础, 以计算待

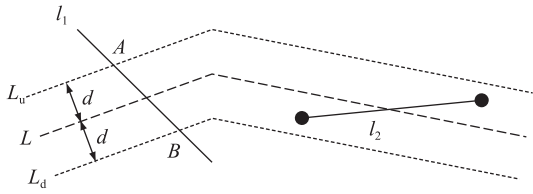


图1 待选路径可靠性数据统计方法
Fig.1 Statistical method of reliability data for selected path

选路径 L 对应的可靠性参数并评估该路径的后期运行可靠性水平。应当注意的是,为了保证数据的充分性,间隔 d 的取值应结合实际已有线路的分布情况,以保证所确定的带状区域能“覆盖”足够多的线路。

2 待选路径故障率逐月变化及其模拟

2.1 待选路径故障率及其逐月变化特性

故障率是电力系统可靠性评估中最基本、应用最广泛的可靠性参数,是输电线路等元件故障发生率的测度^[6]。常规的电力系统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3年间发生了9次故障,则多年统计平均后的故障率即为“9/3”即3次/年。这种采用多年统计平均故障率的方法往往会对设备的可靠性水平或电网风险的客观变化情况造成“削峰”或“填谷”的不利影响,即对故障高发期时的可靠性水平造成“高估”,而对故障低发期时的可靠性水平造成“低估”。

考虑到气象灾害是电网故障的最主要原因,而电网气象灾害在发生时间上通常具有较明显的周期或规律。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、舞动常发生于冬季;鸟类迁徙带来的输电线路鸟害事件以春、秋两季发生居多。不难发现,以月份作为时间尺度可以较好地揭示气象灾害的这种时间规律,而基于月份统计得到的可靠性参数也能更为客观地描述电网可靠性水平随时间的变化情况。因此,本文以月份为时间尺度对待选路径对应的线路故障率进行统计计算,如式(1)所示:

$$\lambda(m) = \frac{\sum_{i=1}^y N_{im}}{\sum_{i=1}^y T_{im}} \quad (1)$$

式中, $\lambda(m)$ 为待选路径在第 m 月份(其中 $m=1,2,\dots,12$)的故障率,次/月; y 为统计年数或已有故障数据年数,年; N_{im} 是图1所示待选路径区域内已有线路在第 i 年第 m 月发生的故障次数; T_{im} 是第 i 年第 m 月的持续时间(均取值为1),月。

在由图1统计待选路径所跨越区域内已有历史数据的基础上,根据式(1)可分别计算待选路径12个月份对应的线路故障率 $\lambda(1),\lambda(2),\dots,\lambda(12)$ 。相比于常规的采用多年平均故障率的方法,式(1)所示的故障率计算方法能够反映待选路径对应的故障高发期、低发期,更客观地揭示待选路径风险水平的变化情况,为路径选择工作提供重要的参考信息。

2.2 待选路径故障率逐月变化特性的拟合

为了更准确地描述待选路径风险水平随时间的变化规律,可在式(1)计算结果的基础上对 $\lambda(m)$ 随月份 m 的变化曲线进行拟合。

考虑到气象灾害是导致输电线路故障的主要原因,而其中尤以雷电、大风、冰灾最为突出。气象灾害在时间上往往表现出一定的聚集性规律,例如雷电、大风常伴随强对流天气发生,密集发生于夏季的6—8月份,而线路的覆冰、舞动等冰灾事件常发生于冬、春两季的12—2月份,因此夏季、冬季往往是输电线路故障事件的高发期,相应的故障率随时间的变化特性曲线通常也具有两个“波峰”。

傅里叶级数对“多峰”特性曲线的拟合具有很好的适应性,且在曲线形状的调节上也比较容易实现,因此本文采用一次傅里叶级数对待选路径故障率的逐月变化特性进行拟合。其表达式如下:

$$f_{\lambda}(x) = a_0 + a_1 \cos(\omega x) + b_1 \sin(\omega x) \quad (2)$$

式中, x 是以月份为单位的时间变量; a_0, a_1, b_1, ω 均为待拟合系数。

3 电源出力的逐月变化特性

火电、水电和以风电、光伏发电、核电为主的新能源发电是目前电力系统最主要的发电方式。火电、核电利用的一次能源分别为化石燃料(煤炭为主)和核燃料,能源供应比较稳定;而水电、风电和光伏发电利用的一次能源分别为水能、风能和太阳能,这些能源通常受外界气候环境的影响进而导致不稳定的发电出力。

对于火电、核电这类“稳定电源”,受气候等外界环境的影响微乎其微,发电出力随月份的变化情况可通过其年平均出力的常数来表示,即发电出力的逐月变化特性可近似表示为一条水平直线,或其拟合函数为常数。

而对于水电、风电、光伏发电这类“不稳定电源”,以气候为主的外界环境是导致其出力不稳定的最主要原因,相应的发电出力呈现出较明显的峰谷特性。从逐月变化情况来看,水电出力特性的

“波峰”出现在一年中的丰水期(通常为6—9月份)，“波谷”出现在一年中的枯水期(通常为12—2月份)^[17]；风电的出力特性与风电场当地风资源的变化情况紧密相关,也具有和水电出力特性类似的“波峰”、“波谷”,风电出力的高峰期通常在11月至次年1月出现,而5—9月往往是弱风期,此时段风电出力也处于“波谷”^[18,19]；光伏发电出力与光伏电站当地太阳辐射的变化趋势几乎是同步的,从季节或月份上看,春夏季的光伏发电出力普遍高于其他时期,冬季往往为全年的最低出力时段^[20],因此光伏发电出力也表现出和水电类似的峰谷特性。对于水电、风电、光伏发电,其出力的逐月变化特性仍可用式(2)所示的傅里叶级数进行拟合。

4 面向路径选择的输电线路可靠性参数处理方法

假设电源到负荷间存在两条待选路径 L_1 和 L_2 , 目的是要在两者中选择一条作为最优路径, 如下图。

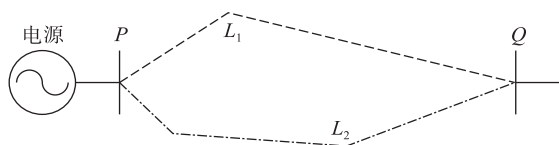


图2 待选路径的比较及最优路径的选择示意图

Fig.2 Illustration of comparing the selected paths and choosing the optimal path

4.1 可靠性指标的选取

为待选路径间的比较和其中的最优路径选取提供直接参考依据的是可靠性指标, 本文选取线路的全年输送电能损失期望 EEL (expected energy loss) 作为评价待选路径可靠性的指标。即当最优路径正常运行时输送电能损失为0, 而在最优路径故障时其输送电能为0, 此时损失电能等于电源发出电能, 指标计算如下:

$$EEL = \sum_{m=1}^{12} U(m) P_G(m) \frac{8760}{12} \Delta m \quad (3)$$

式中, EEL 为全年输送电能损失期望, $\text{MW} \cdot \text{h}$; $U(m)$ 为第 m 月份的线路不可用率; $P_G(m)$ 为第 m 月份的(平均)电源出力, MW 。

根据设备不可用率与故障率的关系^[6], 将式(3)转化为相应拟合函数的定积分形式, 则式(3)可改写为如下形式:

$$EEL = \frac{8760}{12} \int_0^{12} \frac{MTTR f_G(x)}{1/f_\lambda(x) + MTTR} dx \quad (4)$$

式中, $MTTR$ 为线路平均修复时间月; $f_\lambda(x)$ 为待选路径对应故障率逐月变化的拟合函数, $f_G(x)$ 是对电源

出力逐月变化的拟合函数。

线路的平均修复时间 $MTTR$ 通常取为常数, 其大小可通过2.1所述方法统计已有线路的历史数据得到。应注意的是, $MTTR$ 单位通常为小时, 而在式(4)中 $MTTR$ 的单位应转换为月。

4.2 一种基于可靠性分析的输电线路路径设计方法步骤及流程

结合上文内容, 针对图2所示的两条待选路径 L_1 和 L_2 , 本文提出一种基于可靠性分析的输电线路路径设计方法, 流程图及步骤如下。

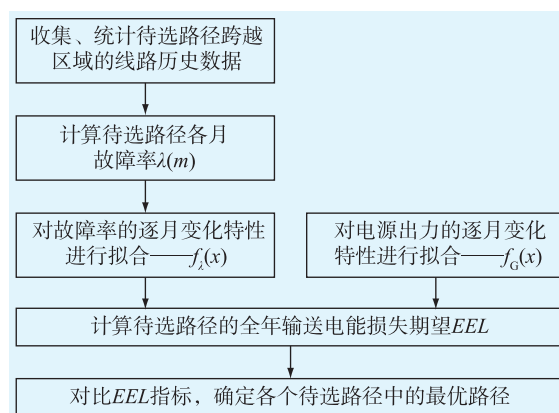


图3 基于可靠性分析的输电线路路径设计方法流程

Fig.3 Flow chart of a transmission line path design method based on reliability analysis

(1) 根据2.1所述方法, 分别收集、统计待选路径 L_1 、 L_2 跨越区域内已有输电线路的历史故障数据;

(2) 基于统计的历史数据, 根据式(1)分别计算待选路径 L_1 、 L_2 各个月份的故障率 $\lambda_{1(1)}, \lambda_{1(2)}, \dots, \lambda_{1(12)}$ 以及 $\lambda_{2(1)}, \lambda_{2(2)}, \dots, \lambda_{2(12)}$;

(3) 将形式分别为 $[m, \lambda_{1(m)}]$ 以及 $[m, \lambda_{2(m)}]$ 的离散数据采用式(2)所示的一次傅里叶级数进行拟合, 令拟合函数分别为 $f_{\lambda_1(x)}$ 和 $f_{\lambda_2(x)}$;

(4) 根据图2中的电源类型, 利用常数或一次傅里叶级数对电源出力的逐月变化特性进行拟合, 拟合函数为 $f_G(x)$;

(5) 基于 $f_{\lambda_1(x)}$ 、 $f_{\lambda_2(x)}$ 和 $f_G(x)$, 根据式(4)分别计算待选路径 L_1 、 L_2 的全年输送电能损失期望 EEL , 选择该指标最小的待选路径作为最优路径。

5 算例分析

5.1 待选路径故障率逐月变化特性

假设要在图2两条待选路径 L_1 和 L_2 中选择一条作为最优路径。采用图1所示方法分别对 L_1 、 L_2 跨越区域内已有线路的历史故障数据进行统计。假设统计年数为3年, 且期间 L_1 、 L_2 跨越区域内已有线路发生故障次数分别为49次和47次, 并假设根

据式(1)计算后的待选路径 L_1, L_2 各月份的故障率分布分别如图4、图5所示。

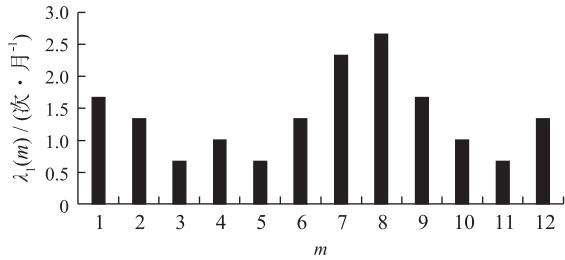


图4 待选路径 L_1 各月份故障率分布

Fig.4 Failure rate distribution of each month of selected path 'L1'

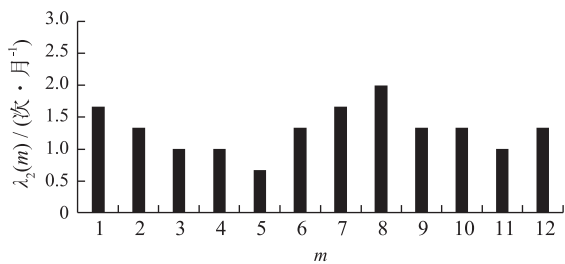


图5 待选路径 L_2 各月份故障率分布

Fig.5 Failure rate distribution of each month of selected path 'L2'

如按常规可靠性评估方法,得到的多年平均故障率分别为 16.3 次/年,15.7 次/年,两者差别不大,难以为路径选择提供有价值的信息。

采用本文提出的方法,基于图4、图5所示的两条待选路径故障率逐月变化特性,利用 MATLAB 软件采用式(2)所示的一次傅里叶级数分别进行拟合,得到待选路径 L_1 和 L_2 故障率逐月变化特性的拟合函数 $f_{\lambda 1}(x)$ 和 $f_{\lambda 2}(x)$ 为:

$$\begin{cases} f_{\lambda 1}(x) = 1.459 + 0.7716\cos(0.8488x) \\ \quad + 0.05244\sin(0.8488x) \\ f_{\lambda 2}(x) = 1.337 + 0.3386\cos(0.8983x) \\ \quad + 0.2217\sin(0.8983x) \end{cases} \quad (5)$$

待选路径 L_1 和 L_2 故障率逐月变化特性对应的散点图及拟合曲线分别如图6、图7所示。

5.2 电源出力的逐月变化特性

假设图2中电源类型为水电,由于水电全年出力的“波峰”、“波谷”分别对应于丰水期(6—9月)和枯水期(12月至次年2月),根据这种特征对电源的各月出力进行假设,如图8中的散点数据。

利用 MATLAB 软件,根据本文第3部分所述,采用式(2)所示的一次傅里叶级数对电源出力的逐月变化特性进行拟合,拟合函数 $f_G(x)$ 如式(6)所示,拟合曲线如图8所示。

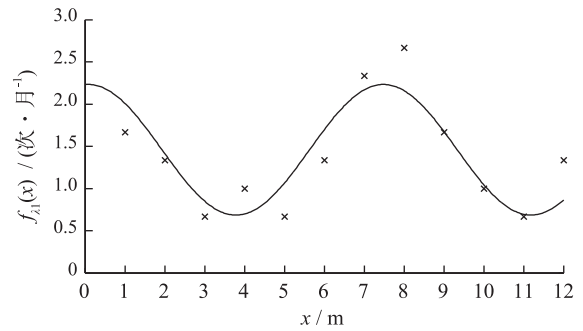


图6 待选路径 L_1 故障率逐月变化特性的拟合

Fig.6 Fitting for monthly time behavior of failure rate of selected path 'L1'

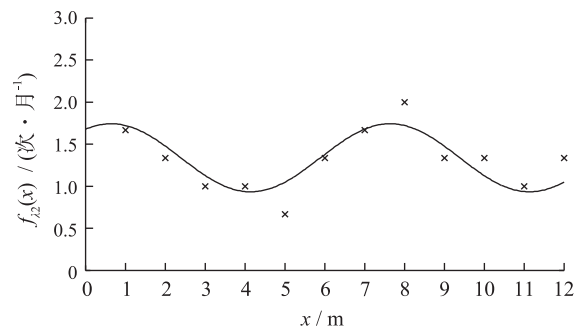


图7 待选路径 L_2 故障率逐月变化特性的拟合

Fig.7 Fitting for monthly time behavior of failure rate of selected path 'L2'

$$f_G(x) = 37.24 - 7.709\cos(0.5697x) - 24.19\sin(0.5697x) \quad (6)$$

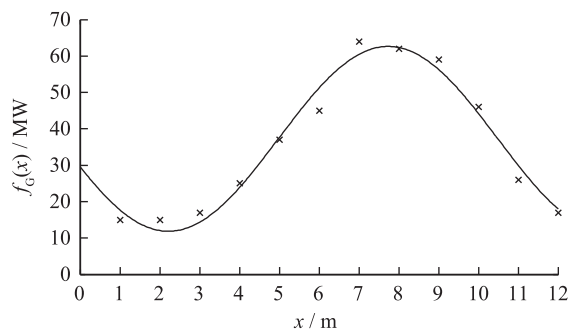


图8 电源出力逐月变化特性的拟合

Fig.8 Fitting for monthly time behavior of power supply output

5.3 待选路径 EEL 指标计算

平均修复时间 $MTTR$ 统一取为 20 h,换算为月份即为 0.0274 月,则根据式(4—6)分别计算待选路径 L_1, L_2 对应的全年输送电能损失期望 EEL_1, EEL_2 , 结果分别为 12 857.83 MW·h, 11 529.64 MW·h。

对比待选路径 L_1 和 L_2 的全年输送电能损失期望可以发现 $EEL_2 < EEL_1$, 即按照待选路径 L_2 建设输电线路,在线路后期运行中损失的输送电能最少,全年期望损失的输送电能约比 L_1 少 1300 MW·h 时。

综上,最终选择 L_2 作为最优路径。

6 结语

对线路后期运行风险或可靠性的评估是输电线路路径设计工作的重要组成部分。目前常规可靠性评估方法中故障率通常取其多年平均值,不能客观反映设备可靠性水平随时间或外部环境的变化情况,因此本文提出了一种基于可靠性分析的输电线路路径设计方法:

(1) 通过统计待选路径跨越区域内已有线路的历史故障数据,可计算待选路径对应各个月份的故障率,并采用了傅里叶级数对待选路径故障率的逐月变化特性进行了拟合。

(2) 根据与待选路径相连的电源类型,对电源出力的逐月变化特性同样进行拟合,对稳定电源,其出力特性可用直线近似,而对于不稳定电源,其出力特性可用傅里叶级数拟合。

(3) 基于待选路径故障率和电源出力逐月变化特性的拟合函数,提出通过计算并对比该待选路径对应的全年输送电能损失期望 EEL 来确定最优路径。

根据本文所提出的输电线路路径设计方法,可以较为准确地反映待选路径的风险水平随时间的变化情况,从而为输电线路的路径规划设计工作提供更为客观、准确的参考依据。

参考文献:

[1] 许建安. 35~110 kV 输电线路设计[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003:207-209.
XU Jianan. Design of 35 ~ 110 kV transmission lines [M]. Beijing:China Water & Power Press,2003:207-209.

[2] 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.

[3] 赵鹏程. 输电线路设计工程的路径选择及质量控制[J]. 广东科技,2009(18):217-219.
ZHAO Pengcheng. Path selection and quality control of transmission line design engineering[J]. Guangdong Science & Technology,2009(18):217-219.

[4] 曾胜利. 浅谈输电线路路径的选择[J]. 科技与创新,2014(19):26-27.
ZENG Shenglin. On the selection of the transmission line route [J]. Science and Technology & Innovation,2014(19):26-27.

[5] LI W. Risk assessment of power systems: models, methods, and applications[M]. Wiley-IEEE Press,2005:1-5.

[6] BILLINTON R, ALLAN R N. Reliability evaluation of power systems[M]. 2nd edition. New York and London:Plenum Press, 1996:182-194.

[7] DL/T 861—2004 电力可靠性基本名词术语[S]. 北京:中国电力出版社,2004.
DL/T 861—2004 Basic vocabulary of electric power reliability [S]. Beijing:China Electric Power Press,2004.

[8] DL/T 837—2012 输变电设施可靠性评价规程[S]. 北京:中国电力出版社,2012.
DL/T 837—2012 Reliability evaluation code for transmission and distribution installation [S]. Beijing: China Electric Power Press,2012.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 甘露,叶宽,张德山,等. 北京市电网灾害的时空分布特征及与气象因素的关系[J]. 气象,2012,38(3):349-352.
GAN Lu, YE Kuan, ZHANG Deshan, et al. Temporal-spatial distributive characteristics of power grid disasters and their relation with meteorological factors over Beijing[J]. Meteorological Monthly,2012,38(3):349-352.

[12] 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.

[13] 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.
WU Tian, RUAN Jiangjun, ZHANG Yun, et al. Study on the statistical characteristics and identification of AC transmission line trips induced by forest fires[J]. Power System Protection and Control,2012,40(10):138-143.

[14] 路永玲,周志成,陶风波,等. 江苏电网 2014 年输电线路雷击跳闸分析[J]. 江苏电机工程,2015,34(5):9-11.
LU Yongling, ZHOU Zhicheng, TAO Fengbo, et al. Analysis on the transmission line lightning trips in the Jiangsu Power Grid in 2014[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2015,34(5):9-11.

[15] 刘贞瑶,顾林,叶辉. 江苏电网 2004~2006 年架空输电线路雷击跳闸分析[J]. 江苏电机工程,2008,27(2):42-45.
LIU Zhenyao, GU Lin, YE Hui. Analysis of lightning flashover for overhead transmission lines from 2004 to 2006 in Jiangsu Power Grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2008,27(2):42-45.

[16] 张立春,朱宽军. 输电线路覆冰舞动灾害规律研究[J]. 电

- 网与清洁能源,2012,28(9):13-19.
- ZHANG Lichun, ZHU Kuanjun. Research on the law of disasters caused by transmission line galloping [J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(9): 13-19.
- [17] 庄凌凌, 赵岳恒. 澜沧江上游流域梯级电站出力特性分析 [J]. 云南电力技术, 2015, 43(3): 110-112.
- ZHUANG Lingling, ZHAO Yueheng. Analysis on output characteristics of upper reaches of Lancang river cascade hydropower stations [J]. Yunnan Electric Power, 2015, 43(3): 110-112.
- [18] 赵冬梅, 尹颢涵, 王建锋. 间歇性能源出力特性综合分析体系及其应用 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(5): 7-14.
- ZHAO Dongmei, YIN Haohan, WANG Jianfeng. Comprehensive analysis system of intermittent energy output characteristics and its application [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(5): 7-14.
- [19] 卫鹏, 刘建坤, 周前. 考虑相关性的沿海大规模风电场出力特性研究 [J]. 江苏电机工程, 2016, 35(5): 6-9.
- WEI Peng, LIU Jiankun, ZHOU Qian. Research on power output characteristics of coastal large scale wind farms considering their correlation [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(5): 6-9.
- [20] 朱红路, 刘珠慧. 环境因素影响下的光伏系统出力特性分析 [J]. 华北电力技术, 2014(8): 50-55.
- ZHU Honglu, LIU Zhuhui. PV system output analysis of environmental factors affect [J]. North China Electric Power, 2014(8): 50-55.

作者简介:



王川化

王川化(1960—),男,江苏南京人,高级工程师,从事电力建设监理工作(E-mail: 13951921710@139.com);

余鹏飞(1988—),男,新疆乌鲁木齐人,硕士研究生,从事电力风险与电力市场工作。

A Transmission Line Path Design Method Based on Reliability Analysis

WANG Chuanhua¹, YU Pengfei²

(1. Jiangsu Xingli Engineering Construction Supervision & Consultation Co. Ltd., Nanjing 210024, China;

2. University of Dundee, Scotland Dundee DD1 4HN, UK)

Abstract: Reliability assessment for selected paths is one of the focuses in path selection of transmission line planning and design process. Considering the disadvantages of conventional methods which adopt average annual failure rate, a transmission line path design method based on reliability analysis is proposed in this paper. Based on statistics for historical failure information of existing lines in the area where selected paths cross, failure rate of each month of selected paths is calculated in monthly scale and its monthly time behavior is fitted. Owing that the power supply output connected to the selected path may be also time-varying, the monthly time behavior of power supply output is then fitted. Finally, according to fitting functions of selected path failure rate and power supply output, the reliability level corresponding to the selected path can be reflected through calculating the expected energy loss of full year, which can provide important reference for comparing several selected paths and choosing the optimal path.

Key words: path selection; selected path; failure rate; monthly time behavior; expected energy loss

(编辑 陈娜)