

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.03.004

基于输电线路全工况信息的风险评估方法

刘珂宏¹, 刘亚东¹, 盛戈皞¹, 陈玉峰², 江秀臣¹, 郭志红²

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 济南 250002)

摘要: 针对传统风险评估方法没有充分反映输电线路的特殊运行环境及其自身特点,提出了基于输电线路全工况信息的风评估方法。该方法首先根据统计方法由输电线路的历史故障、缺陷信息建立风险评估模型,再推导输电线路各部件状态量的量化过程,进而得到具有故障概率含义的输电线路风险评估结果。最后研究了输电线路设备的运行年限,输电线路所处的时间、地理位置信息以及电网的自身运行状态等多方面工况信息对输电线路风险值的影响。通过实例表明,所提方法能够较好地预测输电线路的风险情况,为输电线路的检修计划以及设备的更换提供良好的借鉴参考。

关键词: 输电线路; 风险值; 状态量; 运行年限; 运行环境; 电网状态

All Conditions Information Based Risk Assessment Method for Transmission Line

LIU Kehong¹, LIU Yadong¹, SHENG Gehao¹, CHEN Yufeng²,
JIANG Xiuchen¹, GUO Zhihong²

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China)

Abstract: The traditional risk assessment methods do not adequately consider specific operating environment and characteristics of a transmission line. Therefore, a new risk assessment method considering the information of all conditions is proposed in this paper. First, a risk assessment model is established via statistical methods based on the information of historical failures and defects of a transmission line. Then, the quantization processes of the state parameters of components in the transmission line are derived to obtain the results of risk assessment of transmission line. These results are of failure probability meaning. Finally, the influences of the operating years of equipment in the transmission line, the service time and location information of the transmission line, and the working status of grid on risk value of the transmission line are analyzed. Example shows that the proposed method can predict risks of transmission line and provide a reference for maintenance scheduling and replacement of equipment.

Key words: transmission line; risk value; state parameter; operating years; operating environment; grid status

0 引言

电力系统规模的不断扩大和重要性的与日俱增,使社会对电力系统的可靠运行有了更高的要求。电力工作者不仅要解决已经出现的问题,更需要通过风险评估了解设备发生问题的可能性以及问题的严重程度。不仅如此,风险评估的数据常常用于电网

的运维调度,对电力企业的运行监控、检修管理、故障处理、现场巡视等都能起到指导作用^[1]。输电线路作为电力系统的重要组成部分,对其进行风险评估很有必要^[2]。

目前,国内外对输电线路风险评估的研究较为匮乏,所使用的主要方法有:风险矩阵法、蒙特卡罗方法和故障树分析法等。风险矩阵法把风险发生的可能性高低和风险的影响程度,视为同一平面上的

收稿日期:2015-10-18; 修回日期:2015-11-22

基金项目:上海市科委资助项目(13dz1201300);科技部国际合作项目(S2013GR0102);国家自然科学基金资助(51477100)。

Project Supported by Shanghai Municipal Science and Technology Commission(13dz1201300), International Cooperation Project of Ministry of Science and Technology(S2013GR0102), National Natural Science Foundation of China(51477100).

横纵坐标,进行定性分析^[3];蒙特卡罗方法分析风险发生可能性、风险成因、风险造成的损失等变量的概率分布^[4];故障树分析法研究故障与触发事件、直接原因、间接原因之间的逻辑关系^[5]。

现有方法虽然为输电线路风险评估提供了很好的思路,但输电线路所处的环境复杂,对其进行风险评估需要考虑多方面的因素^[6];如实时和历史在线监测数据、部件使用年限以及线路所处的时段区段信息、电网运行状态等,对此,国内外的相关研究却并不多见^[7]。

另一方面,文中的风险评估着重研究输电线路发生故障的概率,而并没有考虑传统风险评估中涉及的风险后果的严重性。这是因为输电线路故障牵涉到经济、社会、环境、人身等多方面的后果因素,对这些因素缺乏统一的后果评价指标;并且,对于输电线路,发生任何故障都是不能容忍的,这使得研究其故障的概率就显得尤其重要,这样的处理使风险评估兼顾了科学性与简约性。

文中根据输电线路的自身特点和运行情况,提出了一种基于输电线路全工况信息的风险评估方法。该方法首先将输电线路细分为若干部件,针对不同的部件,找到反映其运行情况的参数,将这些状态参数的历史及当前数据通过统计分析方法得到线路的整体风险;然后根据部件的运行年限、线路的运行时段区段信息以及电网的运行状态对风险进行修正;最后,通过实例分析验证了所提方法的实用性和有效性。

1 基于部件状态量的风险评估

1.1 风险评估的整体框架

根据输电线路组成和风险评估的要求,将输电线路分为基础、杆塔、导(地)线、绝缘子、金具、接地装置、附属设施和通道环境8个部件。输电线路的整体风险由各部件的风险结合全工况信息得到,见图1。

由图1可见,风险评估中首先需要得到各部件的风险值。对于不同的部件,都有若干个能够反映其风险状态的状态参量,如杆塔的倾斜度、导线的弧垂、绝缘子的自爆情况等^[8]。针对输电线路的不同部件,建立风险评估模型图见图2。

从图1、2可知,在风险评估整体模型中,涉及到了与输电线路相关的几乎所有数据信息,其全工况信息主要包括以下几个方面。历史数据:历年故障、缺陷统计信息;实时状态数据:在线监测、人工巡视及离线试验结果;设备台账:设备型号、投运年限等;线路工作环境数据:运行时段、地理位置信息及电网

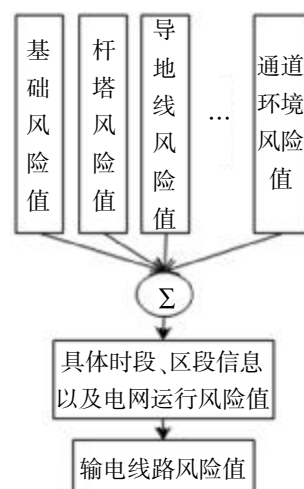


图1 输电线路风险评估整体框架

Fig. 1 Framework of risk assessment for transmission line

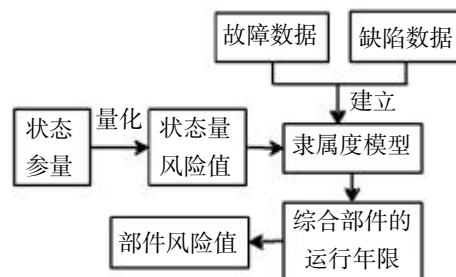


图2 输电线路部件的风险评估模型

Fig. 2 Risk assessment model for components of transmission line

自身运行状态。

1.2 状态量风险度的量化

对于能够通过观测进行量化的状态量,下面提出一种基于统计的状态量风险度量化方法。

统计各状态量在历年运行中的数据以及对应的次数,通过拟合得到状态量数据分布情况见图3。图3中:横轴表示某状态量的监测值 ω ;纵轴表示该监测值出现的次数 ψ 。假定统计数据中处于正常状态的占 $a\%$,则将整体数据 $a\%$ 的分界值记为正常限值,用 μ 表示。在输电线路各种状态量的统计数据中,至少有90%~95%的数据属于正常状态^[9],为了避免漏判,取 $a\%=90\%$ 。

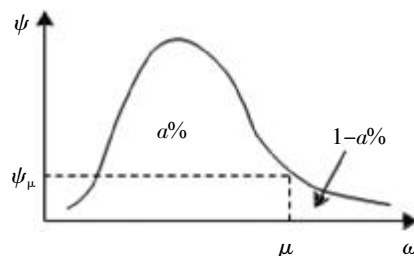


图3 某状态量的统计数据拟合

Fig. 3 Statistical data fitting of a state parameter

当状态量远远超过正常限值,且使部件接近100%故障时,记此时状态量的值为故障限值,用 ξ

表示, 对应状态量的风险度为 100%。

故障限值根据电力规程标准中的注意值或警示值来进行确定, 具体地故障限值是注意值的 3 倍或警示值的 1.3 倍。需要注意的是该倍数并不是一成不变的, 应根据实践的反馈, 不断进行调整。

若状态量的监测值为 x , 则其对应的风险度为

$$Q(x) = \begin{cases} 0 & x \leq \mu \\ \left(\frac{x-\mu}{\xi-\mu}\right)^k & \mu < x < \xi \\ 1 & x \geq \xi \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, k 为趋势指数且取 $k > 1$ 。之所以要引入趋势指数 k , 是因为风险度与状态量的值之间并不是线性关系。当状态量的值在刚超过正常限值时, 风险度的增长较为缓慢, 且其增长速度随着状态量的增大而增大。

以上讨论针对正状态量, 即故障时其值增加的状态量。输电线路中, 还有故障时值减小的负状态量和故障时值向两边偏移的偏差性状态量^[10]。这两者风险度的推导与正状态量类似, 这里不再赘述。

1.3 状态量的隶属度和整体风险值

通过 1.2 节的讨论, 得到各状态量在具体情况下的风险度, 而这并不是其对应到部件上的风险值。因此, 在已知状态量风险度的基础上, 还需要确定各状态量对部件风险值的影响大小, 称之为隶属度, 用 α 表示。

对历史数据中故障或缺陷时出现的状态量进行统计, 可以简单地认为, 出现次数更多的状态量对部件的风险值具有更高的隶属度^[11]。

假设某输电线路的某部件在近 n 年的故障和缺陷记录中出现的相关状态量有 $QS_1, QS_2, \dots, QS_n$, 以及状态量的出现次数分别为 $t_1, t_2, \dots, t_n$, 则该部件状态量 QS_i 的隶属度 α_i 为

$$\alpha_i = \frac{t_i}{\sum_{k=1}^n t_k} \quad (2)$$

某部件第 i 个状态量 QS_i 的单状态量风险值 r_i 为

$$r_i = Q_i \alpha_i \quad (3)$$

单独的 r_i 并不能反映部件的风险大小, 可将其视为部件风险的组成部分。设所有状态量的单状态量风险值分别为 $r_1, r_2, \dots, r_n$, 则该部件的风险值 R 为

$$R = \sum_{i=1}^n r_i \quad (4)$$

之所以能够将各状态量的风险值相加得到部件的风险, 是因为在之前的计算中, 将单状态量风险值视为对整个部件风险的贡献, 而并非导致部件故障的概率。

假设部件各状态量都处于最严重的状态, 即 $Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n = 1$, 那么, 就有以下的推导

$$R = \sum_{i=1}^n r_i = \sum_{i=1}^n Q_i \alpha_i = \sum_{i=1}^n \alpha_i = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{\sum_{k=1}^n t_k} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n t_k} \sum_{i=1}^n t_i = 1 \quad (5)$$

由式(5)可知, 在各状态量情况最差时, 得到部件的风险值为 1, 部件风险值的取值范围为 $[0, 1]$, 这使部件的风险有了故障概率的含义。

假设某段输电线路 8 个部件的风险值分别为 $R_1, R_2, \dots, R_8$, 则根据概率加法公式^[12], 可以得到式(6)的输电线路整体风险值

$$\bar{R} = 1 - \prod_{i=1}^8 (1 - R_i) = \sum_{i=1}^8 R_i - \sum_{1 \leq i < j \leq 8} R_i R_j + \dots + (-1)^7 R_1 R_2 R_3 \dots R_8 \quad (6)$$

2 全工况信息对风险值的修正

2.1 部件的年限系数

电力设备的工作过程中, 会不同程度地受到各种腐蚀和磨损, 如机械磨损, 金属组织和性质变化、绝缘损坏等劣化现象^[13]。部件的老化指数与剩余寿命、故障概率之间的关系见表 1。

表 1 老化指数与故障概率的关系

Table 1 Relation between aging index and probability of failure

状态	老化指数	剩余寿命/年	故障发生概率
报废	10.0	0	1
很差	7.0	<5	高
差	5.5	5~10	中
一般	4.0	10~20	低
很好	0.0	>20	很低

对于所有类别设备老化指数的基本计算结构都是相同的, 可表示为

$$AG_i = AG_0 e^{B(T-T_0)} f_{\text{mod}} \quad (7)$$

式(7)中: AG_i 为被求取年份的老化指数; AG_0 为设备初始老化指数, 一般取 0.5; B 为老化常数; T 为需要求取老化指数的年份; T_0 为设备投运年份; f_{mod} 为修正系数。

一般认为, 按照设备生产厂商给定的预期寿命 n , 在通常的运行环境下 ($f_{\text{mod}}=0$), 设备的老化指数会从刚开始的 0.5 变为最后停运时的 5.5^[14]。由此得到设备的老化常数:

$$B = \frac{\ln(5.5/0.5)}{n} = \frac{\ln 11}{n} \approx \frac{2.40}{n} \quad (8)$$

修正系数 f_{mod} 由缺陷、负荷、环境等因数确定。在最恶劣环境下,预期寿命最后一年的设备老化指数为 10,此时对应的修正系数为 $10/5.5 \approx 1.82$,则根据具体的运行环境, f_{mod} 的取值范围为 $[1, 1.82]$ 。

部件投运后第 t 年的年限系数由式(9)得到

$$FY_i = 0.05AG_i + 1 \quad (9)$$

则最大的年限系数为 1.5,其值可以根据运行反馈信息进行调整。

基础、杆塔、接地装置的年限系数由主体部件得到,导(地)线、绝缘子、金具、附属设施,取线路中各设备年限系数的平均值,对于通道环境,不需要考虑它的年限系数。

2.2 输电线路的运行环境系数

结合运行经验和输电线路自身特点,选取雷击、山火、覆冰、台风、鸟害和外力破坏这六项对输电线路风险影响最大的环境因素^[15]。

在具体的计算中,运行环境对风险的影响可分为时间系数 t 和地理位置系数 p 。对于时间系数 t ,以南方的运行环境为例,根据历年故障缺陷统计,确定特殊时间区段,见表 2。

表 2 运行环境的特殊时间区段

Table 2 Special time zones of operating environment	
特殊运行环境	频发时间区段
雷击	3-9月
山火	9月-次年1月
覆冰	11月-次年2月
台风	6-10月
鸟害 ^[16]	9-11月
外力破坏	9-11月

以覆冰为例,根据历年覆冰故障频发时间的统计,覆冰故障发生概率,即覆冰的时间系数随时间呈式(10)所示的正态分布 $N(\mu_1, \delta_1^2)$ ^[17]。由此得到时间系数的正态分布图,见图 4。

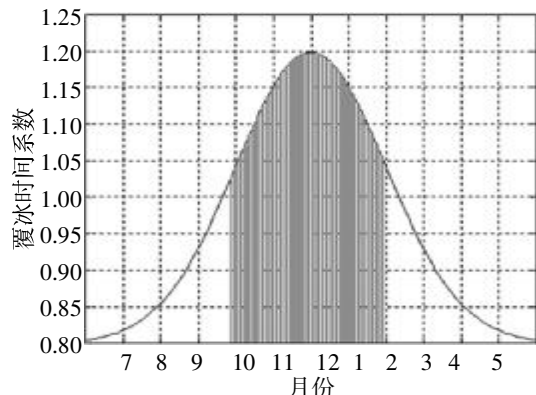


图 4 覆冰故障概率的时间分布

Fig. 4 Time distribution of icing failure probability

$$t(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \delta_1} e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\delta_1^2}} + K_1 \quad (10)$$

式(10)中: x 为评价时间,月; μ_1 为 t 的均值; δ_1^2 为 t 的方差; K_1 为正态分布偏移值。

同样,地理位置系数 p 可由故障频发区域中故障点密度的统计分析得出以故障频发区域为中心的分布函数^[18]。

对于其他 5 种特殊运行环境,根据覆冰的分析方法,均可得到以时间或地理位置为变量的分布函数。在分布函数的顶点,取 t_i 或 $p_i=1.2$,区段内其具体值按分布曲线得到,在区段外, t_i 或 $p_i=1$ 。

在看待运行环境对风险的影响时,输电线路应当同时处于特殊时间、地理位置区段上;因此,运行环境系数 tp_i 由式(11)得到,其中, $i=1\sim 6$ 时分别表示雷击、山火、覆冰、台风、鸟害和外力破坏。

$$tp_i = \begin{cases} t_i \times p_i & t_i, p_i \neq 1 \\ 1 & t_i = 1 \text{ 或 } p_i = 1 \end{cases} \quad (11)$$

修正后的输电线路风险值 $\bar{R}'$ 由式(12)得到。

$$\bar{R}' = \bar{R} \times TP = \bar{R} \times \prod_{i=1}^6 tp_i \quad (12)$$

2.3 电网运行状态对风险值的影响

电网异常运行主要影响输电线路的导(地)线、绝缘子、金具、接地装置、附属设施。为了体现电网运行状态对输电线路风险值的影响,引入电网状态系数 S ,修正后的输电线路风险值

$$\bar{R}_s = \bar{R} \times S \quad (13)$$

对输电线路风险具有影响的运行状态主要包括潮流越限、电压越限、电压失稳 3 种情况^[19]。

在潮流越限时,短路电流增加了通信线路中的电磁感应,也增加了铁塔附近的跨步电压以及接触电压,给人畜的生命安全造成危害,其产生的电动力可以形成巨大的破坏力;同时,架空导线的温度随短路电流增加而上升,这样就会导致线夹部分过热,加剧了架空线路故障点的损伤,容易出现导线熔断、绝缘子破损等问题。潮流越限情况与电网状态系数 S 的对应关系见图 5。

电压越限和电压失稳对线路风险的影响类似于潮流越限。当电压偏移在 $[0.95, 1.05]$ 内,电压越限的影响不计;当电压偏移达到 0.85 或 1.15 时,取电网状态系数 $S=1.2$ 。电压失稳时,当负荷裕度小于 10% 时,开始计算其对线路风险的影响,直到负荷裕度为 0,取 $S=1.2$ 。

3 算例分析

以某 500 kV 线路 2013 年 7 月的巡视记录和在

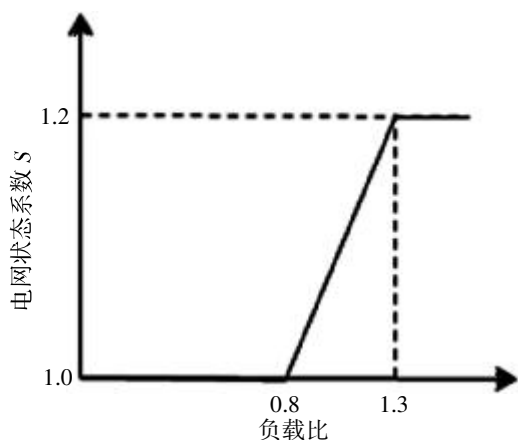


图5 潮流越限与电网状态系数的对应关系

Fig. 5 Correspondence between over-limiting of power flow and power status coefficient

线监测数据为例,验证基于输电线路全工况信息的风险评估方法的有效性。

根据所得数据,该段线路在巡检中的缺陷见表3,同时得到缺陷所对应状态量的风险度和隶属度。

表3 线路的缺陷数据及对应风险度和隶属度

Table 3 Defect data of transmission line and its corresponding risk degree and membership degree

部件	缺陷描述	风险度	隶属度
杆塔	268号C腿塔脚两根小材缺失。	0.2	0.175
导(地)线	195号右架空地线线夹向小号侧偏移10 cm。	0.5	0.034
	230号光纤引流线断4股。	0.8	0.036
绝缘子	159号小号侧左相合成绝缘子跳线串伞裙损坏4处。	0.5	0.041
	207号右相前串第1片玻璃绝缘子自爆。	0.2	0.038
金具	264号耐张绝缘子串连接金具有锈蚀。	0.2	0.025
通道	212-213号之间导线下方新建3处塑料大棚。	0.5	0.050
环境	175号大号侧导线下方有柏树,与导线垂直距离5 m。	0.5	0.116

以导(地)线为例,状态量导地线在线夹内滑移的隶属度为0.034;OPGW光缆线断股的隶属度为0.036,因此,导(地)线的部件风险值在修正前为 $0.5 \times 0.034 + 0.8 \times 0.036 \approx 0.046$,其他部件的修正前风险值可由相同方法得到,具体数值见表4。另外3种部件没有出现缺陷记录,因此其风险值视为0。

以杆塔为例计算部件的年限系数,该段线路的500 kV铁塔的投运年份为1997年,设计年限为50年,由式(8)可得老化常数 $B=0.048$,将其代入式(7),并取 $f_{\text{mod}}=1$,得到老化指数 $AG_1=1.078$,于是由式(9)得到杆塔的年限系数 $FY_1=1.0539$ 。其他部件的年限系数以

及修正后的部件风险值见表4,其中,对于通道环境不考虑其年限系数。

表4 部件的年限系数及修正前后的风险值

Table 4 Age coefficient of components and their risk value before and after revise

部件	修正前风险值	年限系数	修正后风险值
杆塔	0.035	1.054	0.025
导(地)线	0.046	1.091	0.033
绝缘子	0.028	1.175	0.022
金具	0.005	1.152	0.004
通道环境	0.083	—	0.083

由表4中的数据以及式(6)可得该段输电线路此时的风险值 $\bar{R}=0.158$ 。

接下来考虑运行环境系数对输电线路风险值的修正。桂山甲线在7月份受到雷击和台风两种特殊运行环境的影响,对于雷击而言,对应的时间系数 $t=1.12$,地理位置系数 $p=1.07$,因此,雷击的运行环境系数为1.198,同样可得台风的运行环境系数为1.035,则该段输电线路在运行环境系数修正后的风险值 $\bar{R}'=0.196$ 。

由于在该段时间内电网未发生异常,因此电网状态系数 $S=1$,即电网的运行状态对输电线路的风险值没有影响,得到的输电线路风险值为0.196,说明该段线路处于低风险区段,应当加强对该段输电线路的检修,并对已有的缺陷及时地进行整改^[20]。

4 结语

文中所讨论的风险评估方法结合了输电线路的自身特点,能全面地反映输电线路的风险情况。由于对输电线路的风险评估还在起步阶段,在评估过程中使用的方法和一些具体的参数设置还应根据运行反馈的结果进行不断地调整,使评估结果能更加准确合理地反映输电线路的风险。

在得到输电线路的风险之后,应当探究如何用风险评估的结果指导进一步的检修计划制定以及设备更换等工作,因此,基于风险评估对输电线路进行辅助决策,还需要进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 高雪生,陈兵,韩春雷,等. 电力通信运维管理风险评估研究及应用[J]. 电力信息与通信技术,2013,11(9):49-53. GAO Xuesheng, CHEN Bing, HAN Chunlei, et al. Research on electric power communication operation and maintenance management risk assessment and its application[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2013, 11(9):49-53.

- [2] 武 星,殷晓刚,魏 泉,等. 电力产品可靠性研究的本质动因和前景展望[J]. 高压电器,2011,47(10):75-80.
WU Xing, YIN Xiaogang, WEI Quan, et al. Motivation and prospect of research on electrical equipment reliability[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(10): 75-80.
- [3] 朱启超,匡兴华,沈永平. 风险矩阵方法与应用述评[J]. 中国工程科学,2003,5(1):89-94.
ZHU Qichao, KUANG Xinghua, SHEN Yongping. Risk matrix method and its application in the field of technical project risk management[J]. Engineering Science, 2003, 5(1): 89-94.
- [4] 许 亮. 计及多因素的电网冰灾风险评估[D]. 广州:华南理工大学,2012.
XU Liang. Ice disaster risk evaluation of power system considering multi-factors[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [5] 何迎春. 基于故障树的架空输电线路可靠性评估方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
HE Yingchun. Study of a reliability assessment method of overhead transmission line based on fault tree[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [6] 刘 勇. 区域输电网雷击闪络风险评估技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.
LIU Yong. The research on lightning flashover risk assessment of regional transmission grid [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [7] 陈 立,郭丽娟,邓雨荣. 基于状态和风险评估的老旧变压器安全经济性管理分析[J]. 高压电器,2012,48(2):81-85.
CHEN Li, GUO Lijuan, DENG Yurong. Safety and economics analysis of the aged transformer based on the condition evaluation and risk assessment[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(2): 81-85.
- [8] 赵联英. 塞北地区 500 kV 输电线路状态评价及对策研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
ZHAO Lianying. Evaluation and countermeasures of saibei area 500 kV power transmission lines status[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [9] 张大波. 基于状态监测与系统风险评估的电力设备维修及更新策略研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
ZHANG Dabo. Maintenance and replacement strategies of electric power equipment based on condition monitoring and system risk evaluation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [10] 李 磊. 基于气象环境的电力设备状态检修策略研究[D]. 重庆:重庆大学,2013.
LI Lei. Study on condition-based maintenance strategy for power equipment based on meteorological environment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [11] 吕丽丽. 高压输电线路状态在线监测研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
LYU Lili. Research on state online monitoring for high-voltage transmission lines[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [12] 刘 鹏. 基于复杂网络理论与模糊理论的电网风险评估[D]. 天津:天津大学,2012.
LIU Peng. Risk assessment of transmission lines based on complex network and fuzzy probability[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [13] 方玉群. 基于可靠性的输电设备状态检修体系研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.
FANG Yuqun. Research for condition based maintenance system of transmission facility based on reliability [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [14] 潘罗平. 基于健康评估和劣化趋势预测的水电机组故障诊断系统研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2013.
PAN Luoping. Study on fault diagnosis systems of hydropower based on health assessment and deterioration trend forecast[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013.
- [15] 周松林. 风电功率预测及微电网概率潮流分析[D]. 合肥:合肥工业大学,2013.
ZHOU Songlin. Research on wind power prediction and probabilistic power flow of microgrid[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [16] 王少华,叶自强. 架空输电线路鸟害故障及其防治技术措施[J]. 高压电器,2011,47(2):61-67.
WANG Shaohua, YE Ziqiang. Analysis of bird damage accidents on overhead transmission lines and prevention techniques[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(2): 61-67.
- [17] 范作民,林兆福. 发动机故障诊断主状态量模型的数学模型[J]. 中国民航学院学报,1991,9(3):1-9.
FAN Zuomin, LIN Zhaofu. Mathematical model for main condition parameter model of engine fault diagnosis [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 1991, 9(3): 1-9.
- [18] 刘 欢,阮江军,李振柱,等. 地闪密度按杆塔画圆差异化统计分析[J]. 高压电器,2014,50(6):75-80.
LIU Huan, RUAN Jiangjun, LI Zhenzhu, et al. Statistical method of CG lightning density by circling tower[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(6): 75-80.
- [19] 刘瑞叶,李卫星,李 峰,等. 电网运行异常的状态特征与趋势指标[J]. 电力系统自动化,2013,37(20):47-53.
LIU Ruiye, LI Weixing, LI Feng, et al. State features and tendency indices embodying abnormal operation of power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 47-53.
- [20] 郭丽娟,鲁宗相,邓雨荣. 基于风险的输变电设备状态检修实用化技术研究[J]. 高压电器,2013,49(1):81-86.
GUO Lijuan, LU Zongxiang, DENG Yurong. Risk based maintenance technology of transmission and transformation facilities[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1): 81-86.
- 刘珂宏(1989—),男,硕士研究生,研究方向为输电线路状态评估。