

# 高压交流输电线路故障检修技术研究

孙 权, 高 源, 倪春雨

(国网铁岭供电公司, 辽宁 铁岭 112000)

**摘要:** 对高压交流输电线路故障检修技术进行研究, 可以提高电力质量, 减少因线路故障产生的一系列人财有损情况的发生; 当前方法将短期的输电线路检修当作单重不确定性的优化问题, 对其进行建模以及求解; 而在现场运行过程中, 架空线路可靠性指标不能准确表达线路故障发生的可能性, 其理论基础相对薄弱, 仅考虑了单重不确定性的问题, 无法对高压交流输电线路进行高精度地检修; 为此, 提出一种基于层次分析的高压交流输电线路故障检修方法; 该方法先将高压交流输电线路故障划分为: 单相接地故障、高压交流输电线路短路故障、高压交流输电线路导线断路故障; 然后利用多个电流测量点, 通过 FFT 程序对电流故障分量相位进行求解, 根据比较相邻测点相位差判别故障区域, 最后利用图论实现高压交流输电线路故障检修时间控制函数, 以及线路故障检修经济控制目标函数的制定, 与分类和定位结果结合完成高压交流输电线路故障的检修; 实验结果证明, 所提方法可以有效地对高压交流输电线路故障进行检修, 具有一定的利用价值。

**关键词:** 高压交流输电; 线路故障; 检修技术

## Technical Research on High Voltage ac Transmission Line Fault Repair

Sun Quan, Gao Yuan, Ni Chunyu

(State Grid Tieling Power Electric Supply Company, Tieling 112000, China)

**Abstract:** Study of the high voltage ac transmission line troubleshooting technology, can improve the quality of electric power, reduce line fault generated by a series of goods damage situation. The current method is to model and solve the short-term transmission line maintenance as a single, uncertain optimization problem. And in the process of field operation, overhead line reliability index can't accurately express the possibility of line fault occurs, its theoretical basis is relatively weak, only considers the single heavy uncertainty problems, unable to maintenance of high voltage transmission line accurately. In this paper, a method of fault repair of high voltage ac transmission line based on hierarchical analysis is proposed. This method first high voltage transmission line fault is divided into: single phase grounding fault, the high voltage ac transmission line fault, the high voltage ac transmission line conductor circuit malfunction. Then using multiple current measurement point, the current fault component of phase is solved by FFT program, according to comparing adjacent phase difference measuring point judging fault zone, the high voltage ac transmission line is realized by using the graph theory troubleshooting time control function, and the line troubleshooting economic control objective function is formulated, and classification and locating results combined with complete for the maintenance of high voltage transmission line fault. The experimental results show that the proposed method can effectively repair the failure of high-voltage ac power transmission line, and it has certain utilization value.

**Keywords:** high voltage ac transmission; line fault; maintenance technology

## 0 引言

随着电力资源的不断发展, 其在现代社会中发挥的作用也在不断增加<sup>[1]</sup>, 目前关于电力供应和电力的质量控制相关的法律以及法规完善的趋势很明显<sup>[2]</sup>, 在保障电力生产和使用中的人身安全以及设备安全等领域有了更加详细的要求, 这使电力的能源安全生产, 高压交流输电线路的正常运行成为了电力供应管理中的重要内容<sup>[3]</sup>。高压交流输电作为电网中比较重要的组成部分, 其线路的故障是致使电网故障及造成电网存在安全隐患的因素<sup>[4]</sup>, 由此研究线路运行中故障产生的原因以及检修, 是保障电力正常运行的重要举措<sup>[5]</sup>。当前方法无法实现有效的高压交流输电线路故障的检修。在这种情况下, 如何安全可靠地对高压交流输电线路故障进行检修, 成为了亟待解决的问题<sup>[6]</sup>。而基于层次分析的高压交流输电线路故障检修方法可以对高压交流输电线路故障进行高效检修, 可成为解决上述问

题的有效手段<sup>[7]</sup>。

文献 [8] 提出了一种基于不停电的高压交流输电线路故障检修方法。该方法主要针对集中供电的线路故障检修, 在检修的过程中, 假设某个器件已经损坏, 用同型号的器件进行替换, 假设线路故障已经排除, 证明故障是因为该器件损坏造成的, 假设故障还是不能排除, 证明故障的产生和该器件无关, 继续用下一个好器件进行替换, 一直到排除故障。该方法检修效果较好, 但是成本较高。文献 [9] 提出了一种基于设备故障概率分布的高压交流输电线路故障检修方法。线路中有很多馈电支路, 当将其中的某支线路拆除之后, 如果输电线路恢复了正常, 证明故障出现在该支路上, 假设线路还没有恢复正常, 那么排除该支路产生故障的可能, 然后拆除另外一条线路, 假设还不能使线路恢复正常, 那么又将这条线路产生故障的可能排除, 以此类推, 对线路中各馈电支路进行逐一排查, 直到找到故障所在的支路。该方法检修精度高, 但是耗时较长。文献 [10] 提出了一种基于有限元的高压交流输电线路故障检修方法。该方法首先对输电线路综合诊断, 制定检修报告, 并分析该报告, 制定检修策略, 进行多方面考虑, 通过科学合理的办法制定维护策略, 然后制定季度检修策略, 并严格

收稿日期: 2017-06-06; 修回日期: 2017-06-27。

作者简介: 孙 权(1988-), 男, 辽宁铁岭人, 技师, 主要从事高压输电线路运维管理方向的研究。

执行季度检修, 综合评述检修结果, 且做好后期的总结。该方法虽然简单, 但是检修精度低, 检修结果偏差大。

针对上述产生的问题, 提出一种基于层次分析的高压交流输电线路故障检修方法。实验证明, 所提方法可以实现高通用性、高预见性的高压交流输电线路故障检修。可以为该领域后续发展提供强有力的依据。

## 1 高压交流输电线路故障检修

利用基于分别制定的机组和输电线路的修建计划, 假设机组的修建计划已经确定, 在上述条件基础上进行高压交流输电线路故障检修方案。并根据检修方案数学模型的建立, 完成检修。

制定高压输电线路检修方案的过程有两个层面: 先通过输电线路的管理部门对等待检修的线路检修时段进行申报, 调度中心依据申报结果对检修方案进行制定。线路管理部门对各条输电线路检修的经济性和可靠性, 进行深入研究, 找到每条线路在进行检修时可靠性比较好的个别启动时段, 组建检修启动时段的可选集。在制定检修方案时, 找到使系统故障风险的增加量最小的方案, 在寻优的过程中, 把各条线路检修开始时段一直控制在可选集的范围之内, 进而保障检修的实惠性。

综上所述, 高压交流输电线路检修方案的数学模型可表达为:

$$\min \sum_{t=1}^{N_T} (E_t - E_t^*) \quad (1)$$

线路故障检修的启动时段约束为:

$$\tau_l \in \Omega_l \quad (2)$$

每个时间段中同时进行检修的线路数目约束为:

$$y_t \leq y_{\max} \quad (3)$$

故障检修的人力约束为:

$$g_t \leq g_{\max} \quad (4)$$

故障检修的资源约束为:

$$p_{it} \leq p_{i\max} \quad (5)$$

其中:  $N_T$  代表整个规划周期含有的时段数,  $E_t$  代表安排线路检修之后系统在  $t$  时刻内供电不足的风险,  $E_t^*$  代表安排线路检修前系统在  $t$  时刻内供电不足的风险,  $\tau_l$  代表线路  $l$  检修的启动时段,  $\Omega_l$  代表线路  $l$  检修启动时段的可选集,  $y_t$  代表在时段  $t$  中同时进行检修线路的总数,  $p_{\max}$  代表能够同时进行检修的线路总数的最大值,  $g_t$  代表时段  $t$  内需投入的人力,  $g_{\max}$  代表能够一次性投入的人力最大值,  $p_{it}$  代表在时段  $t$  内需投入的第  $i$  种检修资源数量,  $p_{i\max}$  代表同一时间段内能够投入的第  $i$  种检修资源最大量。

根据上述的数学模型, 将任意的一条线路检修的启动时段的某次调整定义成一次搜索。具体过程如下:

将系统中的所有等待检修的输电线路的检修最佳启动时间段组合当作检修问题的初始解, 依据特定规则寻找需要进行调整的时间段  $t^*$ 。

将初始解当作检修方案, 寻找出现在时间段  $t^*$  中所有等待检修的线路, 并将其当作调整对象集。在调整对象集内任意选择一条线路, 根据对其检修的启动时间段调整, 会获得新检修启动时段的组合。

列举所有可能会出现的组合, 组建成初始解邻域, 在领域内选取评价价值最优的, 且可以满足禁忌需求的解当作最新当前

解。如果当前解优于当前最优解, 那么将其当作新最优解。

假设最优解适应值能够达到给定阈值, 亦或是最优解适应值存在于给定迭代次数内, 且不再上升, 那么求解结束, 否则继续进行迭代。

## 2 基于层次分析的高压交流输电线路故障检修方法

### 2.1 高压交流输电线路故障分类

当前高压交流输电线路发生故障原因一般是: 外力、人为或者是设备自身问题产生故障。其中因为自然的雷击而导致的线路故障占有所有故障的一半以上, 因为人为操作不当而产生的故障也比较多, 输电线路在比较恶劣的情况下运行, 设备本身也会受到外力从而造成损伤。下面是具体分类情况。

1) 单相接地故障。高压交流输电线路在运行时, 单相接地故障是比较常见的故障, 此类故障发生的输电线路主要在雨水或者潮湿的环境下。一旦发生接地故障, 故障相电压会变为 0, 导致线路短路;

2) 高压交流输电线路短路故障。每当高压交流输电线路受到外力或者是人为作用时, 其相应线路的高压输电线路中的相间绝缘体会被击穿, 这会导致高压交流输电线路短路时常发生。

3) 高压交流输电线路导线断路。如果高压交流输电线路导线有断裂的现象, 则会引起供电回路发生故障。如果高压交流输电线路断路点没有明显断路痕迹, 那么会产生间隙, 会有大规模的电弧产生, 使线路的导线位置的温度上升, 从而导致电力系统发生火灾或爆炸, 线路设备也将被烧毁。

### 2.2 输电线路故障定位

本文利用 Kaiser 自卷积窗 FFT 相位比较法, 定位输电线路的故障位置。对 Kaiser 窗旁瓣特征进行分析, 窗函数泄露抑制性和旁瓣特性有关, 此处的泄露是指频谱的泄露, 其中, 旁瓣峰值的电平越低而且衰减的速率越快, 表示对泄漏的抑制能力越强。Kaiser 窗函数的参数是可调节的, 利用调节瓣的宽度与旁瓣的高度间的比重, 就是改变主瓣的比重系数  $\beta$  值, 选取所需的旁瓣性能, 能够充分抑制泄露。Kaiser 窗时域  $w_k(n)$  可表示为:

$$w_k(n) = I_0 \{ \beta \sqrt{1 - [2n/(N-1)]^2} \} / I_0(\beta) \quad (6)$$

其中:  $I_0(\beta)$  代表经过修正的无阶贝塞尔函数, Kaiser 窗中有两个比较重要的参数, 分别是窗长  $N$ 、主旁瓣的比重系数  $\beta$ , 如果要改变  $\beta$  的值, 可通过主瓣的宽度以及旁瓣的衰减自由选择。由 Kaiser 窗的旁瓣性调节可知, 随  $\beta$  值的增大, 旁瓣峰值的电平变小, 渐进衰减的速率增大, 则泄露的抑制性也在不断提高。

当 Kaiser 窗的参数固定在一定数值时, 依靠 Blackman 与 Tukey 对功率谱的估计方法: 为减小周期图估计方差, 实现采样自相关序列的开窗, 并加速旁瓣衰减, 进而使图谱更平滑。其实自相关的实质为自卷积, 利用自卷积对边缘特征进行削弱, 从而减小截断奇异, 能够大幅度提高泄露的抑制性。 $m$  阶的 Kaiser 自卷积窗, 是 Kaiser 窗根据  $m-1$  次卷积运算获得的窗函数, 递推公式可表示为:

$$w_k^{(m)}(n) = w_k^{(m-1)}(n) * w_k(n) = \sum_{x=-\infty}^{+\infty} w_k^{(m-1)}(x) \cdot w_k(n-x) \quad (m \geq 1) \quad (7)$$

参数一定的情况下, 随着卷积阶数不断增加, Kaiser 自卷积窗泄露抑制性会成倍提高, 随着卷积的阶数增加, Kaiser 自卷积窗旁瓣性也会随之提升, 拥有较好的频谱泄露抑制力。下面是 Kaiser 自卷积窗 FFT 相位的比较过程:

首先实现 Kaiser 自卷积窗的计算, 并对其幅值进行归一化:

$$\frac{\sum_{x=-\infty}^{+\infty} \omega_k^{(m-1)}(x) \cdot \omega_k(n-x)}{\omega_k^{(m)}(n)} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \omega_k^{(m)}(i)}{\omega_k^{(m)}(n)} \quad (8)$$

其次, 对高压交流输电线路故障分量  $i(n)$  进行加窗处理, 获得  $i_{\text{wk}}(n)$ :

$$i_{\text{wk}}(n) = \frac{\sum_{h=0}^{H-1} A_h \cos(2\pi h f_0 n / f_s + \varphi_h) \cdot \omega_k^{(m)}(n)}{\sum_{i=0}^{N-1} \omega_k^{(m)}(i)} \quad (9)$$

针对  $i_{\text{wk}}(n)$  进行 FFT 计算, 获得  $I_{\text{wk}}(k)$ :

$$I_{\text{wk}}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} i_{\text{wk}}(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (10)$$

则  $I_{\text{wk}}(k)$  实部和虚部分别为:

$$\text{Re}_{I_{\text{wk}}}(k) = \frac{\sum_{h=0}^{H-1} A_h \cos(W_N^h + \varphi_h) \omega_k^{(m)}(n)}{\sum_{i=0}^{N-1} \omega_k^{(m)}(i)} \quad (11)$$

$$\text{Im}_{I_{\text{wk}}}(k) = - \sum_{n=0}^{N-1} \frac{\sum_{h=0}^{H-1} A_h \cos(W_N^h + \varphi_h) \omega_k^{(m)}(n)}{\sum_{i=0}^{N-1} \omega_k^{(m)}(i)} \cdot \sin W_N^{kn} \quad (12)$$

则 FFT 响应公式为:

$$\varphi_{\text{Iwk}}(k) = \arctan[\text{Re}_{I_{\text{wk}}}(k) / \text{Im}_{I_{\text{wk}}}(k)] \quad (13)$$

获得测点电流的相位后, 对上述过程迭代, 计算出相邻的下一个测点电流相位谱, 假设这两个测点为  $m$  和  $n$ , 则与其相对应的序列为  $\varphi_{m\text{Iwk}}(k)$  与  $\varphi_{n\text{Iwk}}(k)$ , 对两者进行相减, 获得相位差序列:

$$\Delta\varphi_{mn}(k) = |\varphi_{m\text{Iwk}}(k) - \varphi_{n\text{Iwk}}(k)| \quad (14)$$

对相位差  $\Delta\varphi_{mn}(k)$  均值进行求解, 获得相位值:

$$\Delta\varphi_{n-m} = M_{n-m} = \sum_{k=0}^{N-1} \Delta\varphi_{mn}(k) / N \quad (15)$$

对标准差  $std_{m-n}$  判断的泄露程度进行估计:

$$std_{m-n} = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{N-1} [\Delta\varphi_{mn}(k) - M_{n-m}]^2}{N-1}} \quad (16)$$

$std_{th}$  为一阈值, 如果标准差在  $std_{th}$  内, 表示频谱泄露的比较小, 并不影响相位的计算, 则求得的均值是测点高压交流输电线路故障分量基频相位。如果标准差高于  $std_{th}$ , 那么表示频谱泄露的比较严重, 其均值的可信度比较低, 必须对 Kaiser 窗函数的系数  $\beta$  的值进行调整, 迭代上述过程计算出均值, 对标准差大小进行再次判断, 一直到标准差结果比  $std_{th}$  小。根据实验可知,  $std_{th}$  可设置为 20, 如果标准差比 20 大, 那么对  $\beta$  值进行调整。在高压交流输电线路的基频有波动的情况下, 相位的偏差比较大,  $std_{th}$  必须进行调整。对极端情况进

行考虑, 当  $\beta$  值提升到一定程度时, 抑制性饱和, 会考虑将卷积运算增加一阶。为了顺利完成高压交流输电线路故障的定位, 每一相位存在故障分量的比较都需要执行上述流程。

### 2.3 输电线路故障检修方案的制定

以上内容为基础, 利用图论实现高压交流输电线路故障检修时间控制函数的制定, 以减少检修所需的时间为目的, 假设最少时间段数的目标函数为:

$$u_1^* = \min u_1 = \min v_{\max} \quad (17)$$

其中:  $v_{\max}$  代表图色问题中需要的色数。随着检修日期的推迟, 会带来一定经济上的损失, 因此需要制定其控制目标函数:

$$u_2^* = \min u_2 \min d \sum_{i=1}^n \max((\eta_{e,i} - \eta_i), 0) \quad (18)$$

其中:  $d$  代表因检修线路故障带来的经济损失系数,  $\eta_{e,i}$  代表各项工作希望检修时间段的系数,  $\eta_{a,i}$  代表各项工作实际空闲时间段的系数。接下来以时间最少控制函数和经济控制函数为支撑, 利用 2.1 中的故障分类和 2.2 中的故障定位实现故障的检修。

针对接地故障, 主要对接地线路中的绝缘部分检修, 利用绝缘部分电阻值完成测量, 判断接地绝缘处损坏程度。如果电力线路的分支比较多, 那么能通过开关分布状况, 通过断路器将整个电路分段, 再依据分段分别进行检修。

由于超负荷造成的短路或者断路故障, 这就需要在线路进行设计时, 要选择材料相对好的线路, 再者电力企业需依据电力线路实际安全点流量, 实现电力线路能源传输, 防止出现断路短路等故障。

## 3 实验结果与分析

为了证明基于层次分析的高压交流输电线路检修方法的可行性, 需要进行一次实验。在 Visual C 环境下搭建高压交流输电线路检修实验平台。实验数据取自于辽宁省电力有限公司, 利用本文所提方法对实验数据进行实验, 观察本文方法的整体性能。

### 3.1 实验参数

搭建全长为 500 km, 电压为 220 kV 的输电系统。其中, 采样的频率为 1 MHz, 过渡的电阻以及接地的电阻分别为 20  $\Omega$ , 线路的弧垂为 5 m, 并设置不同的故障类型与故障点, 利用文献所提方法与本文方法在上述的实验环境下进行实验, 下面是不同方法盖亚交流输电线路故障检测的效果对比。

### 3.2 实验结果

图 1 是不同方法高压交流输电线路检修定位准确率 (%) 对比。

分析图 1 可知, 文献 [8] 所提方法利用替换的形式完成高压交流输电线路的故障定位, 定位效果并不理想。文献 [9] 方法利用排除法的形式实现高压交流输电线路的故障定位, 定位正确率低。文献 [10] 所提方法并没有有描绘出具体的操作步骤, 只是在理论上对线路故障检修进行了分析和探讨, 导致线路故障定位正确率低。本文所提方法利用利用 Kaiser 自卷积窗 FFT 相位比较法, 对高压交流输电线路的故障进行定位, 定位精度高。证明了本文所提方法具有较高的可行性。图 2 是不同方法输电线路检修所耗成本 (元) 对比。

(下转第 93 页)

参考文献:

[1] Luca P, Marco S. Control method for an oxygen linear sensor [P]. E. P. Patent 0973030A1, 2000. 1. 19.

[2] Luca P, Marco S. Control device for a linear oxygen sensor [P]. E. P. Patent 1001261A1, 2000. 5. 17.

[3] Aoki K. Controller of exhaust gas sensor [P]. U. S. Patent 20060047468A1, 2006. 3. 2.

[4] Bevot C, Schnaibel E, Wagner J. Method for operating a heatable exhaust gas probe [P]. U. S. Patent 008286470B2, 2012. 10. 16.

[5] Kawaguchi S, Hibino Y, Ichida R. Oxygen sensor controlling apparatus, oxygen sensor controlling method and computer readable recording medium [P]. U. S. Patent 20140013819A1, 2014. 1. 16.

[6] 孙伟, 唐 岚, 甘海云. 宽域氧传感器接口控制单元开发 [J]. 西华大学学报 (自然科学版), 2007, (04): 24-25.

[7] 卢继飞. 发动机空燃比测量仪的研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2014.

[8] 周树艳, 陆召振, 张 雷. 宽域氧传感器加热方法及其控制电路 [P]. 中国: 105159359A. 2015-12-16.

[9] 陈佳臻. 宽带废气氧传感器控制器研制 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.

[10] 张媛媛, 徐科军, 黄云志, 等. 基于鲁棒 PID 算法的 UEGO 控制器的设计与实验 [J]. 振动与冲击, 2011, (03): 139-144.

[11] 闵 兵. 宽域废气氧传感器控制方法及系统研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.

(上接第 53 页)

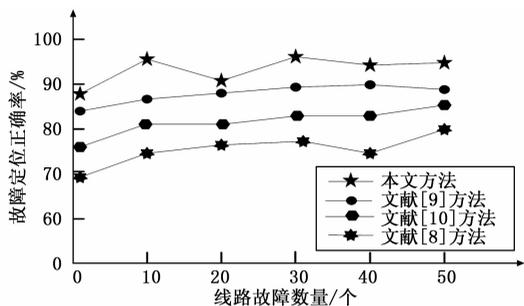


图 1 不同方法线路故障定位正确率对比

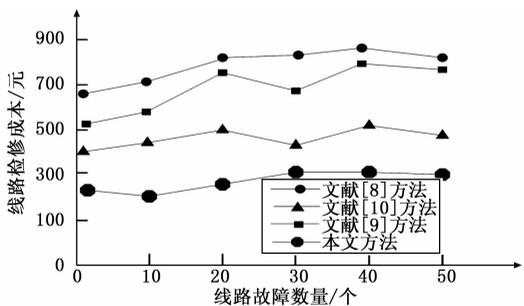


图 2 不同方法输电线路检修所耗成本对比

由图 2 可知, 文献 [8] 方法在检修的过程中, 假设某个器件已经损坏, 用同型号的器件进行替换, 假设不是该器件损坏造成的线路产生故障, 需要一直进行替换, 查找, 导致检修成本直线上升。文献 [9] 方法将馈电支路上的某支线路拆除之后, 如果输电线路恢复了正常, 证明故障出现在该支路上, 假设线路还没有恢复正常, 那么排除该支路产生故障的可能, 继续进行排查, 这样的检修方式会耗费大量的人力和物力。文献 [10] 方法理论大于实践, 成本与其他文献方法相比相对较少。本文所提方法对线路故障进行分类检修, 减低了检修所用成本。下图是不同方法线路检修时间 (s) 对比。

观察图 3 可知, 本文所提方法利用对高压交流输电线路故障的分类, 线路故障的准确定位, 故障的高效修复, 并设有最少时间段数的目标控制函数, 使本文所提方法具有很高的利用价值和通用性, 时间成本较低, 可扩展性也比较高, 进一步证明了本文所提方法是切实可行的。

实验证明, 所提方法可以实时准确地对高压交流输电线路进行检修, 可以为未来的线路检修领域提供借鉴。

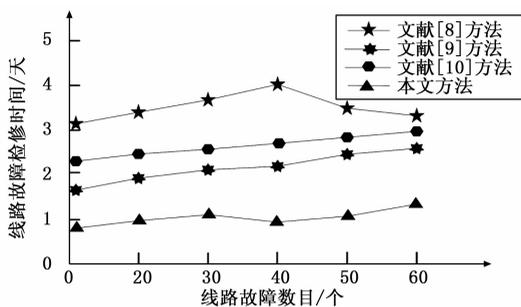


图 3 不同方法线路检修时间对比

4 结束语

采用当前方法对高压交流输电线路进行检修时, 存在预见性低、盲目性高、容易导致其他设备隐患陆续发生的问题。提出一种基于层次分析的高压交流输电线路检修方法。通过实验证明, 所提方法可以迅速可靠地对高压交流输电线路进行检修, 是该领域发展的风向标。

参考文献:

[1] 黄 娟. FSK202-3 型 X 线机故障检修一则 [J]. 临床放射学杂志, 2016, 35 (5): 814-814.

[2] 高韶坤, 艾建军. 数控机床主轴速度误差过大报警故障检修 [J]. 机床与液压, 2016, 44 (20): 174-176.

[3] 易 毅, 廖俊龙, 陈 彬, 等. 配电网电缆故障成本风险评估模型法研究 [J]. 计算机仿真, 2016, 33 (12): 128-131.

[4] 吴姝雯, 张化昭, 赵 淳, 等. 110kV 双回输电线路复合材料杆塔防雷优化设计研究 [J]. 科技通报, 2015, 31 (10): 258-261.

[5] 邓荣军, 王 斌, 熊 典, 等. 基于遗传算法的输电线路无人机巡检路径规划 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (4): 1299-1301.

[6] 杨东东, 马红光, 徐东辉. ITD 与 DLE 相结合的模拟电路故障诊断 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15 (12): 70-74.

[7] 谢永超. 基于 AT89S51 单片机机车故障显示屏测试仪的设计与实现 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (13): 157-160.

[8] 王 峰, 雷红才, 彭 详, 等. 基于不停电检测的架空输电线路状态检修优化 [J]. 中国电力, 2016, 49 (10): 84-89.

[9] 巩 宇. 基于设备故障概率分布的抽水蓄能机组检修策略优化计算模型研究 [J]. 水力发电, 2016, 42 (7): 83-86.

[10] 彭 湃, 程汉湘, 陈杏灿, 等. 基于有限元的超高压输电线路电场的数值分析与测量 [J]. 电测与仪表, 2016, 53 (3): 56-61.