

## 基于风险管理方法的配网检修计划优化

黄江倩<sup>1</sup>, 赵 舫<sup>1</sup>, 程伟华<sup>2</sup>, 谭 晶<sup>2</sup>, 王纪军<sup>3</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 江苏电力信息技术有限公司, 江苏 南京 210000;  
3. 江苏省电力公司, 江苏 南京 210000)

**摘要:** 针对配电网检修, 提出了最优长期检修计划方法。该方法区别于传统的事故后检修和定期预防性检修的模式, 对配网实行选择性的预防检修计划。基于风险管理方法, 首先通过对元件失效率的解耦处理, 进行风险识别实现了对单独风险因子的分析。然后通过建立决策树获得不同状态转换下的方案来进行风险评估, 继而从经济角度出发, 确定最优的配网检修计划来缓解风险。将该方法应用于美国 PG&E 69 节点配电系统, 经过计算分析得到, 相比于固定时间周期的大修或不执行任何检修, 选择性的检修计划能大幅度减少检修所产生的费用和意外停电所产生的抢修费用, 在理论上达到费用最省。

**关键词:** 配电网检修; 风险管理方法; 决策树; 动态规划

### Optimization of distribution network maintenance plan based on risk management method

HUANG Jiangqian<sup>1</sup>, ZHAO Fang<sup>1</sup>, CHENG Weihua<sup>2</sup>, TAN Jing<sup>2</sup>, WANG Jijun<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Jiangsu Electric Power Information Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China; 3. Jiangsu Electric Power Company Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

**Abstract:** In view of the distribution network maintenance, this paper presents a methodology for optimal long-term maintenance schedule, which is different from traditional overhaul after accident and regular preventive annual maintenance model, adopting selective preventive maintenance plan to the distribution network. First of all, based on risk management methods, risk identification is done by decoupling components' failure rate to realize the analysis of individual risk factors; and then risk assessment is carried out by establishing decision tree to obtain different schemes under different state transitions, afterwards from the economic perspective, to determine the optimal maintenance plan to implement the risk mitigation. The proposed methodology is applied to PG&E69 nodes distribution system in the United States, through calculation and analysis, it is demonstrated to be efficient compared to the fixed time periodic overhaul or maintenance which does not perform any activities, selective maintenance plan can significantly reduce the cost of maintenance and unexpected power outage, which attains minimum cost in theory.

**Key words:** distribution network maintenance; risk management method; decision tree; dynamic programming

中图分类号: TM501

文章编号: 1674-3415(2015)18-0094-07

## 0 引言

配电网设备检修是保证其安全稳定运行的一项重要措施, 合理的检修计划安排不仅可以提高电网企业自身的经济效益, 同时能够最大程度地保证配电网的供电可靠性。因此, 建立一个能够同时考虑经济性和可靠性的配电网检修计划模型具有重要的理论价值和现实意义。

目前, 国外对配电网检修计划优化的研究已相对成熟, 而国内对该问题的研究则主要集中在短期

检修计划的安排上。文献[1]提出一种以配网经济性优先为目标的算法, 进一步考虑了检修过程中的停电损失, 但并未充分考虑配网检修过程中的可靠性; 文献[2]基于最小割集理论, 提出了一种适用于含环网的配电系统可靠性评估方法; 文献[3]提出一种计及可靠性和气象因素的配电网短期维修决策方法; 文献[4-5]主要针对检修时间问题进行优化, 计及了负荷转移对检修计划安排的影响, 但是从配网系统来看仍只针对短期检修计划; 文献[6]以检修停电电量最小为目标, 采用网络拓扑的方法衡量待检修线

路在系统中的重要性, 短期来讲检修计划能够按轻重缓急进行排序, 但并未对长期可进行负荷转移的检修进行优化; 文献[7]提出了在线路或变压器检修时能否对城市中压配电网进行合环操作的决策方案。上述模型的建立虽然使得配电网短期检修计划安排的问题得到了进一步的解决, 但是随着整个社会对供电可靠性的要求不断提高, 供电企业往往需要对配电网制定长达几个月甚至数年的检修计划安排。从系统角度长期来看, 对每一年的检修计划制定只是一个局部最优, 不同年份间可能会出现重复性的工作, 效率较低。但如果对系统检修进行长期规划, 则可以达到全局最优, 从而使得每一年的检修工作更有效率。为此, 本文综合考虑了配网可靠性与经济性的关系, 在现有研究的基础上, 区别于以往的执行单一的检修行为或在固定时间周期或逐年进行的检修行为, 提出选择性的预防性检修计划对模型进行修正, 对配电网中长期检修计划进行优化, 从而使得每一年的检修工作更有效率, 为系统长远的安全运行服务。本文检修计划的实现分为 4 个步骤, 首先在数据层面, 根据历史数据的统计, 对元件失效率进行解耦处理, 从而实现对单独的风险因子进行分析; 其次在模型方面, 采用决策树来获得不同状态转换下的检修方案; 再次, 在风险层面, 考虑检修经济性, 对不同检修方案进行风险评估; 最后, 在决策层面, 根据风险评估结果选择最优的配网检修计划, 并且通过实例计算验证了该模型的有效性。

## 1 针对检修计划的风险管理程序

为了确定一个最优多年检修方案, 首先要对所有可能的检修情况进行分析, 并且对每种可能的情况进行风险评估。本文使用风险管理方法, 通过使用适当的风险评估标准, 根据成本最小化来选择检修方案。

系统检修计划方案通过建立决策树来获得, 并采用动态规划法对方案进行比较, 确定最优检修计划方案。在建立决策树之前, 首先要针对实际的配网检修, 对元件失效率进行解耦以此来确定主要的故障类型以及其对应的检修方式, 从而可以对各种方式的多种检修组合进行高效分析, 使分析过程更加简捷, 配电网检修方案流程见图 1。

### 1.1 风险和风险因子的解耦

风险与可靠性两者之间的关系为: 风险越高, 可靠性越低, 反之亦然。下面定义几个本文中使用的概念: 风险、失效率和风险因子。风险的定义, 从数学角度出发是失效概率与后果的乘积; 从经济

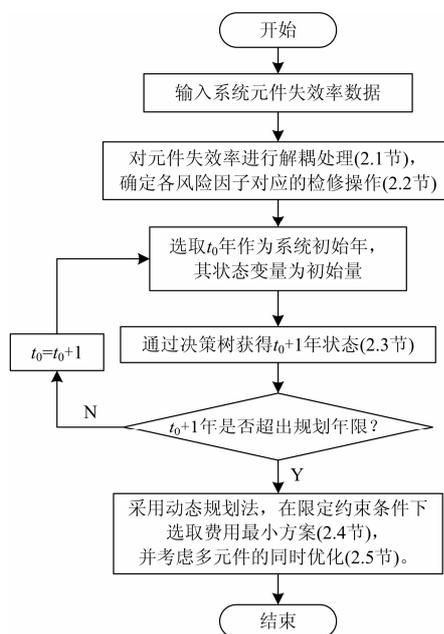


图 1 配电网检修方案流程图

Fig. 1 Model of distribution network maintenance

性角度出发, 即是系统失效引起的预期价值成本, 这两个角度风险的定义都是从系统层面进行考虑的。

本文将元件的失效率( $\lambda_{tot}$ )解耦为若干个不同失效率的和, 即每个失效率是由影响元件可靠性相对应的风险因子导致的式(1)。

$$\lambda_{tot} = \sum_{i=1}^N \lambda_i \quad (1)$$

从功能层面上进行的解耦是根据不同影响风险因子来进行处理的, 如树枝导致的元件失效率、由受污染的绝缘体导致的接地故障等。对元件失效率进行的解耦处理, 为可靠性的分析提供了更为现实和具体定量的条件。不同的风险因子可以通过对历史数据的观察统计来得到, 在此基础上, 采用恰当的函数来模拟这些因子随时间变化的一个大体规律。本文根据数据统计, 给出了在 11 年内的不同风险因子导致的失效率数据(见附表 1)。数据表明, 在未采取预防性检修措施前, 失效率将随时间增长。

### 1.2 预防性检修操作

通过预防性维护措施可以降低风险因子, 即减少系统故障概率, 例如: 通过检查和小修可以解决轻微损害; 通过大修可以解决重大损害; 通过移除电线周围的树木可以改善植被影响。假定, 在  $t$  年执行了以上所提到的某一种操作, 则其对应的风险因子导致的失效率降至初始值。对于整个配网系统而言, 将失效率解耦后对单个因子进行的维护操作

能得到其对整个配网可靠性的影响。

在维护检修过程中对一个对象可以采取的行动有：1) 不做任何维修活动；2) 根据检查结果，执行小修和大修；3) 在固定间隔，执行大修；4) 在一个预定义的时间表，执行选择性操作。这些操作行动，有些必须要在无负荷的条件下进行，有些则可以带负荷进行(见附表 2)。

通过对风险因子的解耦，可以同时得到若干个预防性维护检修操作后的结果。事实上，每一个影响因子与一种行为相对应，有助于在实施选择性检修方案时潜在地降低总成本。

### 1.3 配网系统的检修决策树

为了获得配网系统的检修方案，本文将配网作为一个易老化的系统来进行建模。在文献[8-10]中提到了一些考虑了系统老化的可靠性评估模型。不同于这些模型，本文提出了一种解耦状态转换模型，克服了 Markov<sup>[8-10]</sup>模型不能对动态行为提供整体长期考察的缺陷。此外，不同于只针对整个系统的老化进行考虑的模型，本文提出的模型在基于单独的影响因子之间无相互依赖性的前提下，将失效率进行解耦，实现对不同组合检修方案的分析比较。

检修方案通过决策树来获得，下面通过对一条架空线路在 2 年内的检修操作来直观地阐释决策树(图 2)。决策树中的主要元素为决定点、选择点和分支。分支即表示始于决定点终于选择点的维修方案(Selective maintenance schedule, SMS<sub>i</sub>)。有几条分支即为有几个维修方案，对于每一个方案，有一定适当数量的取决于系统本身特性的可能结果或后果。最后，给出在精确定义的状态空间变量值  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  下( $x_i$  表示上一次检修行为距离现今的时间， $i$  为检

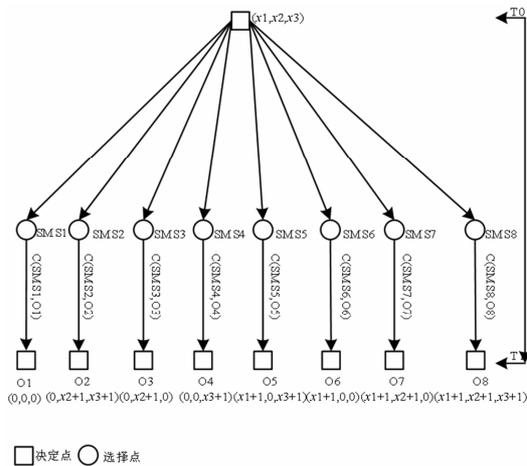


图 2 决策树

Fig. 2 Decision tree for two-year maintenance scenario

修的类型,即下述的三种行为)可能得到的结果  $O_i(x_1, x_2, x_3)$ 。对于每一个结果( $C(SMS_i, O_j)$ )来计算其成本。每个方案的成本是由这个方案具体所采用的预防性检修操作所决定的。具体的计算检修操作产生的费用和由元件失效导致的费用在附录中给出。

在决策树中，每条路径代表了一个多年选择性检修方案( $SMS_i(t)$ )。对于一条线路，转变方案由以下三种可能的行为：1) 检查并消除小错误；2) 主要线路大修并消除主要缺陷；3) 修剪线路周围的树木。

如果没有执行某项检修操作，则变量  $x_i$  的值增加 1，如果执行了某项检修操作，则变量  $x_i$  的值归 0(由于执行了检修操作，元件状态恢复回初始值)。同时，在下一个时间段所有可能的从初始状态转换到其他所有可能状态的组合也根据该规则给出。通过观察状态转换图，可以很清楚地看到下一状态，例如状态(0,  $x_2+1$ ,  $x_3+1$ )表示某馈线，检查和消除小缺点已经执行，但大修和修剪树木并未执行，因此后两个状态变量各自增加 1。

本文考虑的惯例为在巡线期间，小故障通过小修消除，且系统进行其余活动的前提为已对系统进行巡线检查。图 3 给出了初始状态为  $x_1=2$ 、 $x_2=3$ 、 $x_3=4$  的转换组合情况。初始状态  $x_1=2$ 、 $x_2=3$ 、 $x_3=4$  分别表示：最后一次的巡线检查是在 2 年前；整体大修是在 3 年前；树木修剪是在 4 年前。通过图 3，可以看到随着时间的推移，可能出现的状态数目以几何级数的速度增长，但考虑到几个不同的状态经过检修后有可能得到同一个结果，实际上可出现的

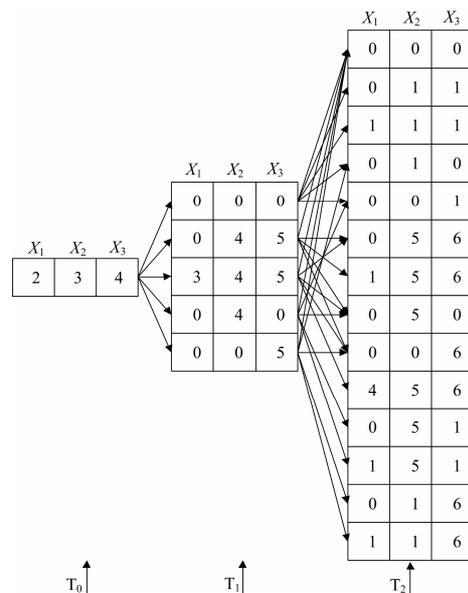


图 3 初始状态为 2、3、4 的状态转换图

Fig. 3 Possible transitions for initial states and three periods

状态数目得到减少, 从而减少了这个问题的维数。图 3 的树图和图 2 决策树并不完全相同, 事实上, 图 3 给出的是实际可进行的状态转换。这个图也表明了并不是所有的转换都是可实现的。

### 1.4 动态规划的应用

从图 3 中我们看到在检修中的决策过程具有动态性, 这就表明需要应用动态规划来选取最优多年预防性检修方案。方案选取基于检修期望总费用最小的原则。

$$d(\text{SMS}_{\text{opt}}) = \min \left( \sum_i^T E(\text{SMS}_i) \cdot (1+p)^{-i} \right)$$

约束条件为  $E(\text{SMS}_i) \leq E(\text{SMS}_i^*)$

其中:  $E(\text{SMS}_i)$  为第  $i$  年总期望花费;  $E(\text{SMS}_i^*)$  为第  $i$  年最大允许花费;  $p$  为折现率;  $T$  为计划年限。

动态规划采用的是基于递归的最小路径算法<sup>[11]</sup>, 由于决策树是一个从左至右规模不断变大的网络图, 为了求取最小路径, 设定一个最终状态  $T$ , 并规定从实际计划最终年的任一状态到设定的最终状态的检修总费用为 0, 见图 4, 为了表示出最短路径的求解思路, 图中并未表示出实际决策树转换中的所有状态。

$$f_n^*(s) = \min_{X_n} \{c_s x_n + f_{n-1}^*(X_n)\}$$

$$f_n^*(s) = f_n(s_n, X_n^*)$$

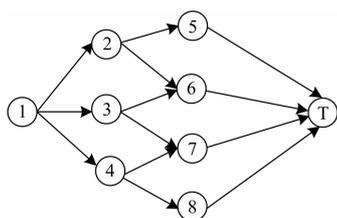


图 4 最短路径求解示意图

Fig. 4 Figure of shortest path

式中:  $f_{n(x)}$  为最优指标函数;  $f_n(s_n, X_n)$  为目标函数——从现在所处年份至规划结束年份累积得到的花费, 若系统在  $n$  年以状态  $s_n$ , 决策变量  $X_n$  开始计算, 依次往之后年份计算( $n+1, \dots, T$ );  $T$  为年数;  $n$  为现在所处年份( $n=1, T$ );  $s_n$  为第  $n$  年状态;  $X_n$  为第  $n$  年控制变量;  $X_n^*$  为第  $n$  年最优策略/决策变量, 即使  $f_n(s_n, X_n)$  最小的变量值;  $c_s x_n$  为转换至状态  $s$  的花费;  $c_{\max n}$  为第  $n$  年的预算约束。

模型中的约束条件是在预算范围内可执行的的活动以及预防性检修中可用数量的团队的前提下设定的。若在一年内未达到这些约束条件, 就将在已达到的成本基础上乘以一个惩罚因子。这种方法实现

了寻求全局最小的目标。

### 1.5 多元件的同时优化

对于拥有数百条线路的配网公司而言, 为了达到最大效率, 在同时具有多个约束条件的前提下, 协调检修过程中的各项活动是非常有必要的。通过引入  $n$  维向量来实现对系统中多元件的同时观察(在一个区域中有若干条馈线), 每个  $n$  维向量表示了  $j$  线路上  $n$  个元件的状态行为(图 5 为对于  $N$  条线路的一部分决策树)。

当发生维数灾难时, 即元件数量增长时, 在这种情况下, 不再进行寻求全局最优, 而应该先将维护放在优先级地位。这个过程首先应根据提出的模型对系统中的元件进行分析, 而后, 根据文献[12-13]中提到的一个可接受的参数对不同的转化进行分等。

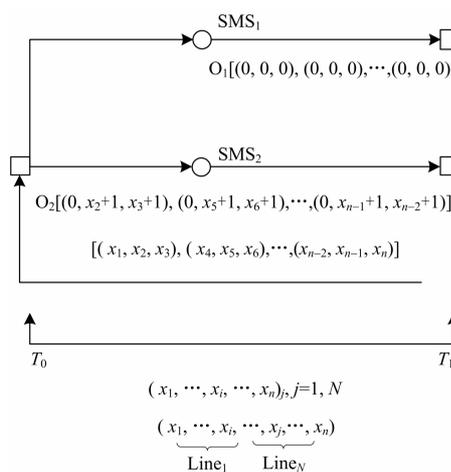


图 5  $N$  条线路决策树的一部分

Fig. 5 Part of decision tree for  $N$  lines

## 2 实际算例分析验证

本文采用国际通用美国 PG&E69 节点配电系统, 对本文所提出的检修计划规划方法的合理性和经济性进行了验证。算例系统图如附图 1 所示, 详细参数见文献[14]。

本文以一条主馈线或分支馈线作为最小检修单元。以美国 PG&E69 节点配电系统为例, 该系统可以分为 8 个检修单元, 其中主馈线为母线节点 0-26, 分支馈线为节点 2-34、节点 2e-90、节点 3-38、节点 7-41、节点 8-54、节点 10-56 和节点 11-58。美国 PG&E69 节点配电系统的参数包含了线路阻抗、各节点有功负荷和无功负荷, 缺少安排检修计划时所需要考虑的馈线长度等数据, 需要根据实际中压配电网所使用的导线的型号来推算出各条馈线的线路长度。根据相关导则可知, 中压配电网一般选用型号为 LGJ-35~

LGJ-120 的导线。本文所选的导线型号为 LGJ-35, 该导线的电阻值为  $0.85 \Omega/\text{km}$ 。由此可以推算出各条馈线的线路长度, 如表 1 所示。

表 1 PG&E69 系统馈线长度及所带负荷

Table 1 Feeder length of PG&E system and its load

馈线 编号	起始 节点	终止 节点	线路 总电阻	线路 长度	馈线 负荷
1	0	26	9.761	11.5	823.8
2	2	34	4.908 4	5.8	91.5
3	2e	90	1.404 2	1.7	185.64
4	3	38	0.460 5	0.5	848.4
5	7	41	0.424 7	0.5	44.1
6	8	54	6.507 9	7.7	1 716.75
7	10	56	0.205 9	0.2	36
8	11	58	0.744 1	0.9	56

本文考虑如下三种检修方式: 1) 线路巡检; 2) 供电走廊清查; 3) 全面检修。其中线路巡检是执行后两种检修方式的必要条件, 所以共有五种检修方式的组合。三种检修方式所涉及的可靠性参数和经济性参数如下所示, 参数的具体定义见附录。

为了检验本文提出的检修计划规划方法, 考虑一个为期五年的检修计划, 并设置三种检修方案: 1) 五年内不执行检修; 2) 在第二年及第五年执行所有三种检修方式; 3) 使用本文提出的检修计划规划方法进行安排。

三种检修方案的检修状态如表 2~表 4 所示, 其中检修状态  $S_i$  表示, 本年距上一次执行第  $i$  种检修方式的年份的跨度。记检修初始年份为第 0 年, 初始年份各个馈线的初始状态如表所示。本算例系统包含 8 个检修单元, 由于检修时间为一年, 可以认为 8 条馈线的检修时间是相互错开的, 不需要考虑执行检修时馈线间的相互影响; 所以每条馈线的检修计划安排是相互独立的, 每条馈线检修费用最经济, 整个配电系统的检修费用也是最经济的。所以在正文中只列出 2 条馈线的检修状态, 完整信息见附录。

表 2 检修方案一

Table 2 Maintenance schedule 1

年份	0	1	2	3	4	5
馈线 1						
$S_1$	1	2	3	4	5	6
$S_2$	2	3	4	5	6	7
$S_3$	5	6	7	8	9	10
馈线 2						
$S_1$	1	2	3	4	5	6
$S_2$	1	2	3	4	5	6
$S_3$	2	3	4	5	6	7

表 3 检修方案二

Table 3 Maintenance schedule 2

年份	0	1	2	3	4	5
馈线 1						
$S_1$	1	2	0	1	2	0
$S_2$	2	3	0	1	2	0
$S_3$	5	6	0	1	2	0
馈线 2						
$S_1$	1	2	0	1	2	0
$S_2$	1	2	0	1	2	0
$S_3$	2	3	0	1	2	0

表 4 检修方案三

Table 4 Maintenance schedule 3

年份	0	1	2	3	4	5
馈线 1						
$S_1$	1	0	0	0	0	0
$S_2$	2	3	4	5	6	0
$S_3$	5	6	7	8	9	0
馈线 2						
$S_1$	1	0	0	0	0	0
$S_2$	1	2	3	4	5	0
$S_3$	2	3	4	5	6	7

经过基于 Matlab 的编程计算, 可以得到三种检修场景所产生的检修费用, 如表 5 所示。通过对这三种检修场景下检修状态和检修费用的分析可以看出: 以馈线一为例, 如果不执行任何检修, 则馈线 1 意外停电的期望费用是 1 694 700 RMB, 可见不执行任何检修所带来的可估计损失是巨大的; 若在第一年和第五年中都执行所有 3 种检修方式, 则馈线 1 检修所产生的费用和意外停电的期望费用总和为 1 381 700 RMB, 比检修方案一(不执行任何检修)节省了约 18%; 当采用本文提出的检修计划规划方法, 馈线 1 检修所产生的费用和意外停电的期望费用总

表 5 三种检修方案比较

Table 5 Comparison of three schedules

检修方案	总费用/RMB	节省率/%
馈线 1		
一	1 694 700	-
二	1 381 700	18
三	911 970	46
馈线 2		
一	683 220	-
二	662 100	3
三	452 010	34

和为 911970 RMB, 比检修方案一节省了约 46%, 比检修方案二节省了约 34%, 并且在理论上取到了最优值, 达到了费用最省。

### 3 总结

本文提出了如何确定最优多年选择性检修计划的方法, 该方法基于风险管理方法与动态规划技术。这个方法主要通过对风险因子的解耦, 以及利用决策树来确定选择性检修方案, 约束条件为在一定时期内总的期望操作花费为最小。本文的算例分析证实了该方法会使期望的操作费用与传统的固定时间周期进行大修费用相比, 有大幅度的减少。因此, 本文提出的方法将对减少配网中检修操作费用有重大应用价值。

### 附录

附表 1 风险因子导致的失效率数据

Table 1 Data of failure caused by risk factors

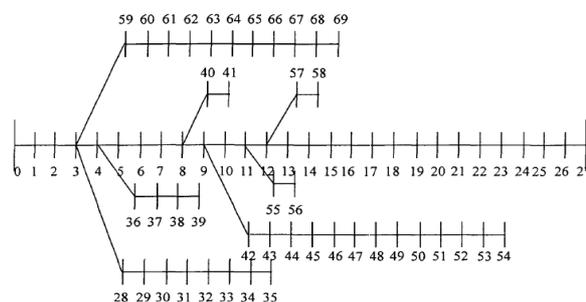
	植被影响	小故障影响	大故障影响
第 1 年	0.300	0.700	0.300
第 2 年	0.750	1.500	0.750
第 3 年	0.925	1.972	1.053
第 4 年	1.100	2.444	1.357
第 5 年	1.275	2.916	1.661
第 6 年	1.450	3.388	1.964
第 7 年	1.625	3.860	2.268
第 8 年	1.800	4.332	2.5716
第 9 年	1.975	4.804	2.8752
第 10 年	2.150	5.276	3.1788
第 11 年	2.325	5.748	3.4824

附表 2 选择性操作内容

Table 2 Activities in selective maintenance

活动	电压	具体进行的操作
巡线检查	有	沿着线路检查绝缘情况, 线路节点, 垂度控制, 确定必要的树木修剪活动, 注意邻近装配点, 接地测量等
	无	检查清洁绝缘体
小修	无	更换避雷器, 断路器
树木修剪	无	部分或全部修剪馈线走廊

检修费用计算公式对于一条架空线路的检修费用包括以下几项: 1) 线路巡检以及消除小故障的费用  $C_{ins}$ ; 2) 清洁供电走廊费用  $C_{clr}$ ; 3) 整体大修费用  $C_{ovh}$ ; 4) 计划外断电损失费用  $C_{uo}$ ; 5) 电能损耗费用  $C_{los}$ 。



附图 1 美国 PG&E69 节点配电系统

Fig. 1 PG&E69 nodes distribution system in US

对于电能损耗费用, 对同一条馈线来说其特征(导线直径)不会随时间改变, 在设定的年限里, 该费用是相同的, 因此该项费用不计入检修费用, 即实施检修活动的总费用为

$$C(SMS_i, O_i)(t) = C_{ins}(t) + C_{clr}(t) + C_{ovh}(t) + C_{uo}(t)$$

式中:  $C_{ins} = (c_{RSi} \cdot n_{RSi} + c_{mati}) \cdot l + (c_w \cdot P_{min} \cdot d_{ins}) \cdot (1+q)^{t-1}$  为巡线、大修、消除小故障单位时间(1 h)的费用;  $n_{RSi}$  为巡线检查单位长度线路(1 km)所需的小时数;  $c_{mati}$  为对单位长度(1 km)线路进行小修所需材料费用;  $l$  为馈线长度;  $c_w$  为一千瓦时电的平均售价;  $P_{min}$  为计划内断电造成的功率损失;  $d_{ins}$  为巡线检查持续时间;  $q$  为年负荷增长率。

$$C_{clr} = (c_{RSc} \cdot n_{RSc}) \cdot l + (c_w \cdot P_{min} \cdot d_c) \cdot (1+q)^{t-1}$$

式中:  $c_{RSc}$  为单位时间(1 h)清洁供电走廊的费用;  $n_{RSc}$  为清洁供电走廊单位长度线路(1 km)所需的小时数;  $d_c$ : 供电走廊清洁持续时间。

$$C_{ovh} = (c_{RSr} \cdot n_{RSr} + c_{matr}) \cdot l + (c_w \cdot P_{min} \cdot d_{rem}) \cdot (1+q)^{t-1}$$

式中:  $c_{matr}$  为对单位长度线路(1 km)进行大修所需的材料费用;  $n_{RSr}$  为对单位长度线路(1 km)大修所需的小时数;  $d_{rem}$  为大修持续时间。

$$C_{uo} = \lambda_{np}(t) \cdot l \cdot c_{pn} \cdot \beta \cdot P_{max} \cdot (1+q)^{t-1} + \lambda_{np}(t) \cdot l \cdot c_w \cdot \beta \cdot P_{max} \cdot d_{np} \cdot (1+q)^{t-1} + \lambda_{np}(t) \cdot l \cdot c_{matnp} + \lambda_{np}(t) \cdot c_{RS} \cdot n_{np}$$

式中:  $c_{matnp}$  为消除故障所需的材料费用;  $n_{np}$  为消除故障所需时间;  $d_{np}$  为非计划断电持续时间;  $c_{pn}$  为非计划断电造成后失负荷(MVA)造成的费用;  $\beta$  为线路上相对于最大功率的平均功率比;  $\lambda_{np}(t)$  为在  $t$  年馈线上的失效率。

### 参考文献

[1] 黄弦超, 舒隽, 张粒子, 等. 免疫禁忌混合智能优化算法在配电网检修优化中的应用[J]. 中国电机工程学报,

- 2004, 24(11): 98-102.  
HUANG Xianchao, SHU Jun, ZHANG Lizi, et al. Distribution maintenance scheduling using an intelligent optical approach mixed with immune algorithm and tabu search[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 98-102.
- [2] 王秀丽, 罗沙, 谢绍宇, 等. 基于最小割集的含环网配电系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 52-58.  
WANG Xiuli, LUO Sha, XIE Shaoyu, et al. Reliability evaluation of distribution systems with meshed network based on the minimum-cut set[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 52-58.
- [3] 熊小伏, 李磊, 方丽华, 等. 基于可靠性和气象因素的配电网短期维修决策方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 61-66.  
XIONG Xiaofu, Li Lei, FANG Lihua, et al. A decision method of short-term distribution network maintenance schedule based on reliability and meteorological factors[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 61-66.
- [4] 黄弦超, 张粒子, 舒隽, 等. 配电网检修计划优化模型[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 33-37.  
HUANG Xianchao, ZHANG Lizi, SHU Jun, et al. Maintenance schedule optimization model in distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 33-37.
- [5] 张粒子, 黄弦超, 舒隽, 等. 配电网检修计划优化模型设计[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(21): 54-56.  
ZHANG Lizi, HUANG Xianchao, SHU Jun, et al. Design and implementation of an optimization model for distribution network maintenance scheduling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(21): 54-56.
- [6] 刘永梅, 盛万兴. 基于网络拓扑和遗传算法的配电设备检修计划优化模型[J]. 电网技术, 2007, 31(21): 11-15.  
LIU Yongmei, SHENG Wanxing. Optimization model for distribution equipment maintenance scheduling based on network topology and genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(21): 11-15.
- [7] 肖白, 赵龙安, 张宇, 等. 城市中压配电网合环操作分析与决策[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 133-138.  
XIAO Bai, ZHAO Longan, ZHANG Yu, et al. Analysis and decision of loop closing operation in urban mid-voltage distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 133-138.
- [8] The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability, A report of the IEEE PES task force on impact of maintenance strategy on reliability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(4): 638-646.
- [9] MEEUWSEN J, KLING W, PLOEM W. The influence of protection system failures and preventive maintenance on protection systems in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1): 125-133.
- [10] ANDERS G J, EDRENYI J, YUNG C. Risk-based planner for asset management[J]. IEEE Computer Application Power, 2001, 14(4): 718-723.
- [11] HILLIER F, LIEBERMAN G. Introduction to operations researches[M]. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [12] LI F, BROWN R. A cost-effective approach of prioritizing distribution maintenance based on system reliability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 1164-1169.
- [13] WILLIS H, WELCH G, SCHRIEBER R. Aging power delivery infra-structures[M]. New York: Marcel Dekker, 2001.
- [14] KUNTZ P, CHRISTIE R, VENKATA S. Optimal vegetation maintenance scheduling of overhead electric power distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(4): 439-441.

收稿日期: 2014-12-02; 修回日期: 2015-01-22

作者简介:

黄江倩(1990-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统可靠性评估及电力系统风险评估研究; E-mail: 49767462@qq.com

赵 舫(1962-), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事电力系统信息系统研究。

(编辑 姜新丽)