

考虑电网总风险和检修收益的设备状态检修计划优化

唐燕, 刘艳

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 在状态检修背景下, 由于处于某一状态的设备的检修等级有多种选择, 不同检修等级对设备检修时间、设备检修费用以及设备状态的改善程度等因素都会产生不同的影响, 从而影响设备检修时间的安排。因此, 将检修方式和检修时间同时作为制定检修计划的决策变量。利用风险评估的方法, 给出了电网运行总风险和设备检修收益的定义及求解。考虑到单一风险指标对最终决策的不全面性, 并针对电网运行总风险、设备检修收益单个优化目标对检修后设备的可靠性及检修的经济性的不同影响程度, 建立考虑电网运行总风险和设备检修收益联合优化模型, 并与以电网运行总风险、设备检修收益为优化目标所得结果进行对比, 分析各检修方案对检修的可靠性和经济性的不同影响。通过算例验证了该方法的合理性。

关键词: 状态检修; 检修时间优化; 检修方式优化; 电网运行总风险; 设备检修收益

Optimization for maintenance schedule based on equipment condition considering the overall risk of grid operation and the maintenance revenue

TANG Yan, LIU Yan

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In the background of condition-based maintenance, the equipment in a certain state could choose different maintenance levels, which have different impacts on maintenance time, maintenance costs and the improvement of equipment state, which will in turn affect the time schedule of equipment maintenance. Therefore, both the maintenance mode and the maintenance time are viewed as decision variables of making maintenance schedules. Based on the method of risk assessment, the overall risk of grid operation and the revenue of equipment maintenance are defined. Furthermore, since the single risk indicator for the final decision is not comprehensive. And the maintenance results of single optimization model have different impacts on the economy of equipment maintenance and the reliability of equipment after maintenance. Therefore a joint optimization model integrating the overall risk of grid operation and the revenue of equipment maintenance is established. Then the three maintenance schedules are compared to analyze the maintenance effects on equipment reliability and economy. The result of application verifies the validity of the method.

Key words: condition-based maintenance; maintenance time optimizing; maintenance mode optimizing; overall risk of grid operation; equipment maintenance revenue

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)09-0033-07

0 引言

状态检修作为一种经济、高效的检修方式, 自提出就一直受到人们的重视。相比原有的计划检修, 状态检修依据设备自身的状态, 对设备是否进行检修以及检修内容做出判断, 更具有针对性。完整的状态检修体系包括一系列先进的状态监测技术^[1-2], 故障诊断及预测技术^[3-4], 完善的设备状态评价体系^[5-6], 状态检修辅助决策系统^[7-8]。随着智能变电站^[9-10]的提出, 智能化的设备、数字化的信息和网络化的通信技术给状态检修各个环节带来深刻的影

响。随着这些技术的不断研究和深入, 状态检修体制也会不断完善。

近年来, 针对状态检修各方面技术, 如设备的状态监测技术, 故障诊断及预测、状态评价技术已取得了显著的成果, 如何依据所得设备状态对整个电网设备进行检修计划的安排成为一种发展趋势。设备检修计划的制定经历了从最初依靠人工经验到考虑检修中涉及到的检修费用及停电损失、设备可靠性、网络拓扑结构^[11-13]等因素对检修计划进行优化, 再到以设备状态为基础, 从设备个体、电网整体运行情况^[14-15]安排检修计划。依据设备状态对电

网设备检修计划进行优化, 目前的研究主要利用风险评估的方法, 建立设备状态与设备故障率间的关系, 建立检修优化模型, 从而确定设备的检修时间。如文献[14]在考虑设备状态检修前后故障概率变化情况的基础上, 提出设备故障风险和电网运行风险两个概念, 从设备及电网运行状况出发, 以综合风险费用最小为优化目标安排设备检修计划。文献[15]在文献[14]的基础上从设备检修与电网运行间的辩证关系出发, 基于设备的状态对设备检修前后故障率的预测, 给出电网故障风险和电网检修风险的定义及其表达, 从设备故障、检修及电网运行多方面安排设备检修计划。

在已有研究成果上, 本文在已知设备状态的基础上, 考虑到某一状态的设备可采取检修方式的不确定性, 从而会影响设备检修时间。因此, 将设备检修时间和检修等级作为优化量, 运用风险评估的方法, 从不同评价准则建立考虑电网运行总风险和检修收益的复合优化模型, 对比分析该模型与以电网运行总风险、设备检修收益单个优化目标下的检修方案。结合算例, 验证了复合优化模型结果相比以电网运行总风险为优化目标能提高检修的可靠性, 相比以设备检修收益为优化目标能提高检修的经济性, 兼顾检修的可靠性和经济性, 从而实现整体优化。

1 基于设备状态的故障率求解

风险评估是以风险值作为指标, 是事件发生概率与产生后果的乘积, 基于风险评估的设备状态检修计划优化模型中, 设备故障率是一个重要参数。在状态检修体制下, 建立设备状态与设备故障率间的关系, 为设备检修计划优化奠定基础。

老化作用会使设备的状态变差, 状态检修在设备发生故障之前对其进行检修, 使设备的状态有所改善, 状态改善程度取决于设备检修方式的选择, 所以设备状态的变化情况与设备老化程度和检修程度有关。因此本文采用设备检修等级 J 表示不同程度的检修, 根据国家电网公司《配网状态检修制度》标准汇编, 配电网设备检修方式共分为五类: A类、B类、C类、D类、E类, 其中前三类需要停电检修, 后两类可以带电检修, 本文只考虑前三种检修方式。

本文认为在状态检修方式下, 通过完整的状态评估体系, 能精确地得到设备的健康状态, 以健康指数表征状态评价结果, 采用扣分制形式, 取值范围为 0~10, 值越大代表设备的状态越差。设备健康指数 HI 与故障率 λ 间满足式(1)^[15]。其中, K 为比

例系数; C 为曲率系数。

$$\lambda = Ke^{HI-C} \quad (1)$$

由于设备状态与老化作用和检修程度有关, 本文采用老化系数 B 和不同检修方式下的健康修复因子 β 表征设备老化过程及检修对设备健康指数的影响。在研究周期内, t 时刻的设备健康指数满足式(2)。

$$\begin{cases} HI(t) = HI_0 \cdot e^{B(\Delta T+t)} & t < t_m \\ HI(t) = \beta HI_0 \cdot e^{B(\Delta T+t-T_m)} & t \geq t_m + T_m \end{cases} \quad (2)$$

式中: HI_0 为上一次状态评价结果; ΔT 为距离上次状态评价的时间; T_m 为检修持续时间; t_m 为研究周期内设备对应的检修开始时刻。

根据某时段设备故障率 $\lambda(t)$ 与可靠度 $r(t)$, 以及可靠度与设备故障概率 $f(t)$ 间的关系便可得到设备在某时段发生故障的概率。

$$\begin{cases} r(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \\ f(t) = 1 - r(t) \end{cases} \quad (3)$$

2 设备状态检修计划优化模型

2.1 电网运行总风险

本文在文献[14-15]的基础上, 引用电网故障风险 R_F 和电网检修风险 R_M 作为电网运行总风险 R 。检修和故障为相互对立的两方面, 检修过度会造成过大的检修风险, 检修不足又会造成较大的电网故障风险, 为解决这一矛盾协调二者的关系, 希望找到一个平衡点, 使得电网运行总风险最小。

电网故障风险包括: 设备故障自身损失风险 R_{F1} 对应设备故障检修费用, 设备故障造成的失负荷风险 R_{F2} 。在求解电网故障风险 R_F 时, 引入设备故障检修等级 L 表征设备故障程度, 不同的故障程度, 应采取不同的故障检修方式, 对应的故障风险也不同。具体求解如式(4)。

$$\begin{cases} R_F = \sum_{t=1}^{N_T} (R_{F1} + R_{F2}) = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{f(t) \in F(t)} p_{f(t)} [R_{F1,f} + R_{F2,f}] \\ R_{F1,f} = \sum_{i \in f(t)} C_{i,l} \Delta T_{i,l} \\ R_{F2,f} = \Delta T_f P_f c_F \\ p_{f(t)} = \prod_{i \in f(t)} f_i \end{cases} \quad (4)$$

式中: N_T 为研究周期内的时段数; $F(t)$ 为 t 时段设备故障状态集合; $f(t)$ 为其中一种故障状态; $p_{f(t)}$ 为 t 时段故障状态 f 发生的概率; f_i 为设备 i 发生故障的概率; $C_{i,l}$ 为设备 i 采取故障检修等级 l 的检修

费用; $\Delta T_{i,l}$ 为设备 i 采取故障检修等级 l 的检修时间; ΔT_f 为故障状态 f 造成的停电时间; P_f 为故障状态 f 造成的失负荷量; c_F 为故障造成的单位失负荷费用。

电网检修风险 R_M 包括: 设备检修费用 R_{M1} 、设备检修造成的计划失负荷损失 R_{M2} 和设备检修造成的随机失负荷损失 R_{M3} , 即在检修过程中, 由于设备随机发生故障造成的失负荷。

$$\begin{cases} R_M = R_{M1} + R_{M2} + R_{M3} \\ R_{M1} = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i \in h(t)} C_{i,j} \Delta T_{i,j} \\ R_{M2} = \sum_{t=1}^{N_T} P_{h(t)} c_M \Delta T_{h(t)} \\ R_{M3} = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{f(t) \in F(t)} (p_{f(t)} P_{h(t),f(t)} - p_{f(t)} P_{0,f(t)}) c_F \end{cases} \quad (5)$$

式中: $h(t)$ 为 t 时段检修设备集合; $C_{i,j}$ 为设备 i 采取检修等级 j 的检修费用; $\Delta T_{i,j}$ 为设备 i 采取检修等级 j 的检修时间; $P_{h(t)}$ 为 t 时段检修设备集合 $h(t)$ 引起的计划失负荷量; c_M 为计划检修造成的单位失负荷费用; $\Delta T_{h(t)}$ 为检修设备集合 $h(t)$ 对应的检修时间; $P_{h(t),f(t)}$ 为 t 时段计及检修设备集合 $h(t)$, 故障状态 f 所引起的总的失负荷量; $P_{0,f(t)}$ 为 t 时段不计及检修, 只考虑故障状态 f 所引起的失负荷量。

2.2 设备检修收益

设备检修后状态会有不同程度的改善, 检修越及时, 设备得以检修的概率越高, 越能及早地消除隐患; 且检修程度的不同, 对设备状态的改善程度也会不同, 检修等级越高, 设备状态改善越好, 但与此对应的检修成本也会越高, 所以衡量设备检修收益是一个多变量问题, 不仅与检修时间有关, 还与采取的检修方式相关。本文定义设备检修收益 v 为设备检修前后风险差值 ΔR_F 与电网运行总风险 R 的比值。

$$\begin{cases} v = \frac{\Delta R_F}{R} \\ \Delta R_F = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^N (f_{i,t} - f'_{i,t}) R_{i,t} \\ R_{i,t} = R_{1i,t} + R_{2i,t} = \Delta T_{i,l} P_i \cdot c_F + C_{i,j} \Delta T_{i,j} \end{cases} \quad (6)$$

式中: 电网运行总风险 R 参见式(4)、式(5); N 为电网设备总数; $f_{i,t}$, $f'_{i,t}$ 分别为检修前后设备 i 在 t 时段的故障概率; $R_{i,t}$ 为设备 i 在 t 时段的故障风险,

包括两部分: 设备故障造成的失负荷损失 $R_{1i,t}$ 和设备故障检修费用 $R_{2i,t}$, 其中设备故障检修费用与设备故障程度有关, 同电网故障风险一样, 采用设备故障检修等级 L 表征设备故障程度; $\Delta T_{i,l}$ 为设备 i 采取故障检修等级 l 的检修时间; P_i 为设备 i 故障造成的失负荷量。

2.3 设备状态检修计划复合优化模型

风险决策过程中, 单一的风险指标对于最终的决策来说是不全面的, 理想的决策结果希望综合不同因素, 根据决策者的不同需求提供不同的决策方案。另外, 分别以电网运行总风险、设备检修收益为优化目标所得的检修结果, 对检修后设备的可靠性及检修的经济性的影响各不相同。因此, 本文将电网运行总风险和设备检修收益相结合, 构造检修计划复合优化模型, 对比分析三种检修方案下检修的经济性及检修对设备可靠性的影响。

$$T_{\text{multiple}} = \max(\omega_1 \frac{v}{v_{\max}} - \omega_2 \frac{R}{R_{\max}}) \quad (7)$$

式中, 以电网运行总风险、设备检修收益单个优化目标来说, 希望电网运行总风险越小越好, 设备检修收益越大越好, 由于这两者的方向相反, 所以其中一个量取负值。为避免电网运行总风险和设备检修收益的量纲不同可能带来的数值淹没, 特将其进行了归一化处理。 v_{\max} 和 R_{\max} 分别为设备检修收益和电网运行总风险的最大值, 分别以电网运行总风险和设备检修收益为优化目标, 进行求解。

约束条件如下。

(1) 检修时间约束。本文进行年检修计划安排, 以两周为一个单位, 将一年分为 26 个时段, 设备 i 对应的检修时间上下限约束为

$$1 \leq t_{mi} \leq 26 \quad (8)$$

(2) 同时检修约束。为避免重复停电, 需要将同一间隔、同一线路上的设备同时检修。

$$t_{mi} = t_{mj} \quad (9)$$

(3) 互斥检修约束。为避免某些设备因同时检修导致其他设备过负荷, 或是对于像双回线路、同一变电站的两台主变这类具有互为备用的设备, 式中, T_{mj} 为设备 j 检修持续时间。

$$t_{mi} \geq t_{mj} + T_{mj} - 1 \quad (10)$$

(4) 检修资源约束。同一检修时段检修单位的检修能力, 包括检修人力、物力、技术等, 是有限的, 所以同一时段的检修设备总数也是有限的。式中: N_t 为 t 时段待修设备数; M_t 为 t 时段所允许的检修设备最大总数。

$$N_t \leq M_t \quad (11)$$

(5) 电网安全约束: 设备检修或故障会使设备退出运行, 此时电网的运行方式会发生变化, 电网潮流分布会改变, 需要对线路进行安全校验, 式中: P_i 为线路 i 实际传输功率; $P_{i\max}$ 为线路 i 允许传输的最大功率。

$$P_i \leq P_{i\max} \quad (12)$$

3 模型求解

本文采用粒子群优化算法进行求解, 具体求解步骤如下:

(1) 读入电网数据和设备信息, 如设备状态、支路阻抗、电网负荷、潮流上下限等。

(2) 随机生成一个初始种群和其对应的速度, 种群中每个粒子代表一个检修方案, 包括待修设备的检修开始时间 X 和检修等级 Y , 在生成粒子时检修开始时间的范围为 1~26, 检修等级的范围为 1~3, 代表 A、B、C 三种检修等级。对于同时检修的设备, 在生成粒子时, 将其检修时间赋予相同的值。互斥检修的设备, 检修时间赋予不同的值。

(3) 判断初始种群中粒子的合法性, 对每个检修方案, 根据式(11)、式(12)判断各个检修时段总的待修设备数和电网安全约束。若粒子不合法, 重新生成新的粒子, 构成合格的初始种群。

(4) 对于合格的初始种群, 计算每个粒子的适应度值, 适应度函数如式(7)。

(5) 对每个粒子, 将其适应度值与个体极值进行比较, 如果较优, 则更新当前的个体极值 P_{besti} 。对每个粒子, 将其适应度值与全局极值进行比较,

如果较优, 则更新当前的全局极值 P_{gbesti} 。

(6) 根据式(13)更新每个粒子的位置和速度, 产生新的粒子。判断新粒子的合法性, 判断条件为式(11)、式(12)。若粒子合格, 重复步骤(4)~(6), 如果粒子不合法, 将其适应度值赋与目标模型相差较大的值。

$$\begin{cases} v_i^{t+1} = \omega v_i^t + c_1 r_1 (P_{besti}^t - x_i^t) + c_2 r_2 (P_{gbesti}^t - x_i^t) \\ x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \end{cases} \quad (13)$$

式中: ω 是惯性权重, 一般在[0.4,0.9]之间; c_1 、 c_2 是学习因子, 通常取值为 2; r_1 、 r_2 是[0,1]间的随机数; x_i 、 v_i 为当前时刻粒子的第 i 维的位置和速度; P_{besti} 是个体极值; P_{gbesti} 是全局极值。

(7) 当达到最大迭代次数或最优值的适应度值在迭代次数内不再变化, 则结束, 得到最优的检修方案。

4 算例分析

本文采用用于研究、教学的一个配电网可靠性测试系统 IEEE—RBTS Bus2^[16-17]。系统结构图如文献[18]。待修设备信息见附录 A 表 A1。在对每个时段计算适应度值时, 需要对电网不同检修设备集合或故障设备集合进行潮流分析, 求得失负荷量, 该配电网研究周期的负荷曲线如附录 A 图 A1 所示。优化结果如表 1 所示, 其中方案一为复合优化模型结果, 方案二为最小化电网运行总风险结果, 方案三为最大化设备检修收益结果。表 2 为不同方案下的不同风险值。

表 1 三种检修方案对比

Table 1 Comparison of three maintenance schedules

设备编号	方案一		方案二		方案三		设备编号	方案一		方案二		方案三	
	检修时间	检修等级	检修时间	检修等级	检修时间	检修等级		检修时间	检修等级	检修时间	检修等级	检修时间	检修等级
2	4	3	7	3	2	3	30	8	2	2	3	8	2
3	4	3	14	3	11	3	31	8	2	2	2	8	2
5	1	2	1	2	1	1	34	1	1	1	2	1	3
6	3	3	20	2	19	3	37	1	3	13	3	12	2
8	16	3	14	3	6	3	39	20	2	5	3	5	2
9	9	2	23	3	3	2	42	3	3	12	3	3	2
10	9	3	23	3	3	1	45	15	2	15	2	5	2
12	2	3	4	2	11	3	47	23	3	15	2	15	2
13	16	2	7	3	6	2	50	2	2	1	2	1	1
14	15	3	7	2	11	3	51	23	2	2	2	8	2
17	4	3	6	3	15	2	53	23	3	14	3	19	2
20	15	1	3	2	6	2	56	17	2	9	3	4	3
22	5	2	11	2	9	2	59	6	2	15	3	14	3
24	5	3	6	2	9	3							

表 2 三种检修方案的风险与收益
Table 2 Risk and revenue corresponding to three maintenance schedules

方案	方案一	方案二	方案三
检修前故障风险/万元	1 212.4	1 212.4	1 212.4
检修后故障风险/万元	739.48	770.79	715.63
检修风险/万元	762.79	702.11	925.6
电网运行总风险/万元	1 502.28	1 472.91	1 641.23
设备检修收益	0.314 8	0.299 8	0.302 7

对比三种检修方案,我们可以知道:

(1)对于设备状态最差的几个设备,如设备 5、34 和设备 50,三种检修方案均安排在前三个检修时段,说明三种检修方案均能基于设备状态,将健康状况较差的设备提前检修,相比传统的计划检修方式,能更加及时地消除设备故障带来的损失。

(2)对比方案一和方案二:方案一相比方案二将设备检修时间提前了,尤其是在电网中对供电可靠性影响较大的设备及状态较差的设备,如主变 2、设备 17、设备 42 等,说明复合优化模型相比单纯最小化电网运行总风险的优化模型能及时消除设备故障,降低设备故障风险,提高设备可靠性,表 2 中检修后故障风险取值已明确反映这一特点。结合电网负荷曲线,方案二中的设备检修时间安排在负荷低谷期,但由于方案一相比方案二检修时间提前,导致方案一在检修过程中失负荷损失增大。又由于方案一为了降低检修后的故障风险,采取的检修等级高于方案二,造成了较高的检修费用,所以方案一的检修风险高于方案二。

(3)对比方案一和方案三:方案三相比方案一设备检修时间提前的幅度更大,如设备 2 从第 4 检修时段移到第 2 检修时段,设备 9、10 从第 9 个检修时段移到第 3 个检修时段,且方案三中设备检修等级高于方案一,所以单纯最大化设备检修收益的优化模型相比复合优化模型进一步降低了设备故障风险,但由于其检修时间提前幅度大,加之采用较高的检修等级,导致方案三的检修风险最大。

从上述分析可知,复合优化模型相比单纯最小化电网运行总风险的优化模型能更及时地消除设备故障风险,提高设备的可靠性;相比单纯最大化设备检修收益的优化模型,能降低检修风险,提高检修的经济性。因此,采用复合优化模型制定检修方案,能够兼顾可靠性和经济性,从而达到最大的检修收益。

5 结语

本文考虑到设备检修过程中检修方式的不确

定性,不同检修方式下的检修时间、检修成本和检修效果的不同,从而对检修时间的安排产生影响。分别从以电网运行总风险、设备检修收益及两者复合优化模型制定检修方案,对比分析三种方案下检修的经济性及检修对设备可靠性的不同影响。针对 IEEE—RBTS Bus2 系统的应用结果说明了该方法的合理性。

设备状态的获取是基于设备状态进行检修决策的前提,下一步还需充分有效地利用相关设备的状态监测数据,并以此为基础准确评价出设备所处状态,使依据本文模型所制定的检修方案更具现实指导意义。

附录 A

表 A1 待修设备信息
Table A1 Data of the equipment to be maintained

待修设备编号	健康指数	故障率	距离上次评估时间/周
2	6.8	0.028 731	22
3	1.1	0.001 158	23
5	8.3	0.092 88	25
6	8	0.021 689	30
8	1	0.001 119	28
9	9.3	0.028 884	25
10	2.3	0.003 281	28
12	5.1	0.017 374	35
13	3.6	0.002 911	35
14	4	0.003 259	26
17	6.2	0.030 167	22
20	6.1	0.030 14	30
22	2.6	0.001 824	25
24	6	0.006 867	28
30	6.4	0.011 788	28
31	3.2	0.005 534	28
34	8.3	0.102 857	26
37	4.9	0.004 608	28
39	5.3	0.019 179	32
42	7.4	0.066 063	34
45	8.5	0.016 311	18
47	2.6	0.003 757	25
50	8.6	0.114 956	20
51	4.3	0.004 872	22
53	5.9	0.006 716	33
56	3.6	0.003 675	25
59	5.3	0.007 246	30

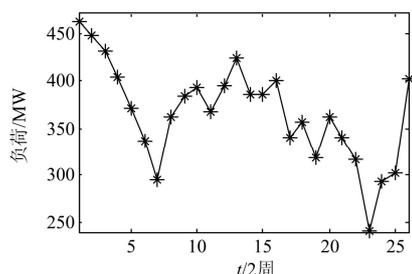


图 A1 年度负荷曲线

Fig. A1 Yearly load curve

参考文献

- [1] 幸晋渝, 刘念, 郝江涛, 等. 电力设备状态监测技术的研究现状及发展[J]. 继电器, 2005, 33(1): 80-84.
XING Jin-yu, LIU Nian, HAO Jiang-tao, et al. Present situation and development of condition monitoring techniques for electrical equipment[J]. Relay, 2005, 33(1): 80-84.
- [2] ASCEBRENNER D, KRANZ H G, RUTGER W R, et al. On line PD measurements and diagnosis on power transformers[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(2): 216-222.
- [3] 庄哲民, 殷国华, 李芬兰, 等. 基于小波神经网络的风力发电机故障诊断[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 224-228.
ZHUANG Zhe-min, YIN Guo-hua, LI Fen-lan, et al. Fault diagnosis of wind power generation based on wavelet neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 224-228.
- [4] 熊树, 俞阿龙. 基于 BP 网络远程无线电力变压器故障诊断系统[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 207-211.
XIONG Shu, YU A-long. Power transformer long distance wireless fault diagnosis system based on BPNN[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 207-211.
- [5] TANG W H, SPURGEON K, WU Q H, et al. An evidential reasoning approach to transformer condition assessments[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1696-1703.
- [6] 张懿议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 13-20.
ZHANG Yi-yi, LIAO Rui-jin, YANG Li-jun, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 13-20.
- [7] 蒋涛. 基于 JAVA 的电力设备状态检修辅助决策系统开发研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2010.
JIANG Tao. Based on JAVA power equipment condition-based overhaul decision support system development and research[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2010.
- [8] 张怀宇, 朱松林, 张扬, 等. 输变电设备状态检修技术体系研究与实施[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 70-73.
ZHANG Huai-yu, ZHU Song-lin, ZHANG Yang, et al. Research and implementation of condition-based maintenance technology system for power transmission and distribution equipments[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 70-73.
- [9] 曹楠, 李刚, 王冬青. 智能变电站关键技术及其构建方式的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 63-68.
CAO Nan, LI Gang, WANG Dong-qing. Key technologies and construction methods of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 63-68.
- [10] 李孟超, 王允平, 李献伟, 等. 智能变电站技术特点分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 59-62, 79.
LI Meng-chao, WANG Yun-ping, LI Xian-wei, et al. Smart substation and technical characteristics analysis[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 59-62, 79.
- [11] 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): 50-52, 62.
ZHANG Li-zi, HUANG Xian-chao, 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): 50-52, 62.
- [12] 许旭锋, 黄民翔, 王婷婷, 等. 基于模糊机会约束二层规划的配电网检修计划优化[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 157-163.
XU Xu-feng, HUANG Min-xiang, WANG Ting-ting, et al. Optimization of distribution network maintenance scheduling based on fuzzy chance-constrained bi-level

- programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 157-163.
- [13] 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 Yong-mei, SHENG Wan-xing. Optimization model for distribution equipment maintenance scheduling based on network topology and genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(21): 11-15.
- [14] 潘乐真, 鲁国起, 张焰, 等. 基于风险综合评判的设备状态检修决策优化[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(11): 28-32, 66.
PAN Yue-zhen, LU Guo-qi, ZHANG Yan, et al. Decision-making optimization of equipment condition-based maintenance according to risk comprehensive evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(11): 28-32, 66.
- [15] 李明, 韩学山, 杨明, 等. 电网状态检修概念与理论基础研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 43-52.
LI Ming, HAN Xue-shan, YANG Ming, et al. Basic concept and theoretical study of condition-based maintenance for power transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 43-52.
- [16] ALLAN R N, BILLINTON R, SJARIEF I, et al. A reliability test system for educational purposes: basic distribution system data and results[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(2): 813-820.
- [17] BILLINTON R, KUMAR S, CHOWDHURY N, et al. A reliability test system for education purpose: basic data[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(3): 1238-1244.
- [18] BILLINTON R, JONNAVITHULA S. A test system for teaching overall power system reliability assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1670-1676.

收稿日期: 2013-07-31; 修回日期: 2013-08-16

作者简介:

唐燕(1988-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网状态检修; E-mail: hdtangyan@163.com

刘艳(1973-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统安全防御与恢复技术, 智能技术在电力系统中的应用。