

考虑设备状态和系统风险的输电设备检修计划

赵登福¹, 段小峰^{1,2}, 张磊¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 泰州供电公司, 225300, 江苏泰州)

摘要: 为了实现以设备状态为基础、系统运行风险最低为目标的先进检修模式, 根据我国输变电设备状态评估的打分制体系, 建立了估计设备故障率的最小二乘数学模型; 分析了现有用灵敏度指标来评价设备重要度的方法, 提出以设备当前状态给系统带来的风险增量作为重要度评价指标; 考虑系统负荷和设备状态的时序变化, 建立了以系统电量不足期望最小为目标函数的输电设备检修计划模型. 对 RTS-79 标准系统的计算分析表明, 风险增量指标的评价结果比灵敏度指标合理, 据此所制定的检修计划可使检修规划期内的系统风险最低.

关键词: 输电设备; 状态检修; 风险; 检修计划

中图分类号: TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)03-0084-06

Maintenance Scheduling of Power Transmission Equipment Considering Equipment Condition and System Risk

ZHAO Dengfu¹, DUAN Xiaofeng^{1,2}, ZHANG Lei¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Taizhou Power Supply Company, Taizhou, Jiangsu 225300, China)

Abstract: Aiming at the perfect maintenance with the lowest system risk based on equipment condition, the scoring system for transmission and substation equipment state evaluation is referenced to establish a least squares model for estimating the equipment failure rate. By analyzing the sensitivity index, the risk increment index is introduced for assessing equipment importance. Taking sequential changes of system operation state and equipment condition into account, a transmission equipment maintenance scheduling model is proposed, which minimizes the total risk in the planning period. The risk increment index and the maintenance scheduling are verified by analyzing the IEEE RTS-79 standard system.

Keywords: power transmission equipment; condition-based maintenance; risk; maintenance scheduling

随着社会经济的高速发展, 用电需求迅猛增长, 电网规模迅速扩大, 社会对电网供电可靠性的要求也越来越高. 设备检修作为保证电网运行可靠性的一项重要措施, 其检修策略的合理与否对电网的安全、经济运行至关重要.

目前, 我国电力系统正在从定期检修逐步向状态检修过渡^[1], 以设备状态评估为基础的单个设备状态检修策略成为当前的研究热点. 实际上, 单个输

电设备是整个输电系统中的一个元件, 设备的不同状态和检修方式与整个系统的运行特性相关, 因此, 电力设备的检修策略不仅要考虑设备的运行状态, 更要考虑检修对电网运行带来的影响.

文献[2]建立了基于系统可靠性的发电机组检修规划模型. 该模型将系统可靠性指标转化成经济性指标来评价, 以检修规划期内的总运行费用最低为目标函数, 考虑了各个时段的失负荷概率以及运

行和检修约束.文献[3]介绍了一种考虑系统风险的输电系统检修规划方法,不仅给出了最低风险检修计划,而且给出了计划停运期间最可靠的系统运行方式.上述文献都是从系统角度来制定设备检修计划,但没有考虑设备状态因素对检修的影响.

文献[4-5]介绍了评估不同检修策略对系统可靠性和运行成本影响的方法:首先根据系统可靠性灵敏度指标对设备进行重要度排序,然后基于马尔科夫模型计算最重要设备在不同检修策略下的故障率,进而计算在最重要设备不同故障率下系统的可靠性指标,最后得到以系统可靠性最高或检修费用最低为目标函数的设备检修策略.一方面,这种评价设备重要度的灵敏度指标不能反映设备的当前状态;另一方面,该模型仅仅考虑系统的一种典型运行方式,而没有考虑负荷变化因素对检修的影响.

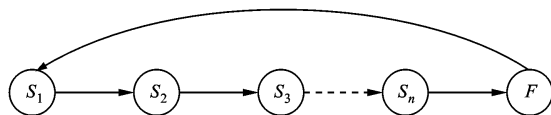
本文建立了估计设备故障率的最小二乘数学模型,在分析了采用灵敏度评估设备重要度方法的基础上,提出了更合理的设备重要度评价指标,进而建立了考虑系统负荷和设备状态变化的输电设备状态检修计划制定模型,并通过算例分析验证了本文方法的有效性.

1 状态检修中的设备故障率计算

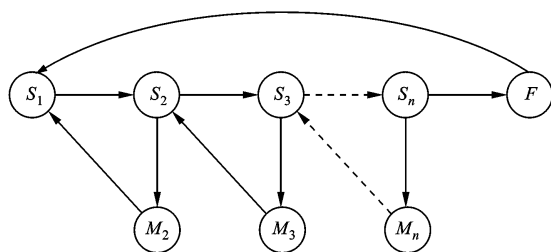
在电力设备状态检修决策中,不同的设备状态需要相应的检修策略.特别是当从系统角度来制定状态检修策略时,设备的故障率参数是进行系统风险评估的基础,是将设备层面和系统层面联系在一起的纽带.因此,设备在不同状态下的故障率计算对最终状态检修策略的制定至关重要.

电力设备由正常状态到故障状态经历了状态转移过程^[6],如图1a所示,图中 $S_1, S_2, \dots, S_n$ 表示电力设备状态转移过程中的逐步老化状态, F 表示故障状态,从完好状态 S_1 逐渐向故障状态 F 转移时,设备发生故障的概率会增大.图1b考虑了检修对状态转移的影响, $M_2, M_3, \dots, M_n$ 表示检修状态,检修后设备会提升到一个较好的状态,因此检修可以有效地延缓故障发生的时间.

目前,我国对输电设备的状态评价方法是根据设备状态量信息和相应的评价导则来对设备各部件进行打分(扣分值),以获得设备的综合状态评分^[1].通常设备的状态扣分越多,其健康状况就越差,因此设备状态评分和故障率之间存在这样的定性关系:设备状态评分上升,故障率也随之上升.文献[7]中假定它们之间服从指数关系



(a) 设备逐步老化的状态转移过程



(b) 考虑检修的状态转移过程

图1 电力设备多状态转移过程

$$\lambda = Ae^{Bx} + C \quad (1)$$

式中: λ 表示设备故障率(次/a); x 为设备状态评分; A 为比例系数; B 为曲率系数; C 为位移系数.

在状态评分体制下,可以建立参数 A, B, C 的求解模型.

设1年内有 n 台设备参与统计,每台设备分别进行 m 次状态评分,每次时间间隔相等,则有

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^m \frac{1}{m} (Ae^{Bx_{ij}} + C) \quad (2)$$

式中: λ_i 表示第 i 台设备的年故障率; x_{ij} 表示第 i 台设备的第 j 次状态评分值, $i=1, \dots, n; j=1, \dots, m$.

这 n 台设备1年内理论上的总故障次数为 $\sum_{i=1}^n \lambda_i$,若实际中由于设备缺陷总共发生了 N_f 次故障,则有如下近似关系

$$N_f \approx \sum_{i=1}^n \lambda_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{1}{m} (Ae^{Bx_{ij}} + C) \quad (3)$$

若已知设备3年以上的状态评价数据,分别将每年的数据代入式(3)中,通过最小二乘法即可求得适用于此类设备的 A, B, C 值.

2 状态检修中的输电设备重要度评价

设备重要度评价结果是运行人员制定检修计划时的重要决策依据.传统的设备重要度排序采用的是确定性方法,这些方法往往只考虑设备发生故障的后果,而没有考虑到设备发生故障的可能性,即没有考虑到设备的运行状态,所以结果通常比较保守.

文献[8]提出用系统风险指标对设备可靠性参数的灵敏度来评价设备的重要度,首先推导了电力不足期望 L_{EDNS} ^[3]与元件强迫停运率 f 的关系式

$$L_{EDNS} = D_1 + f(D_2 - D_1) \quad (4)$$

式中: D_1 的物理意义是已知元件强迫停运率为 0 的条件下系统的风险值; D_2 的物理意义是已知元件强迫停运率为 1 的条件下系统的风险值。

在式(4)的基础上,进一步得到电力不足期望对元件强迫停运率的灵敏度公式如下

$$\frac{\partial L_{EDNS}}{\partial f} = D_2 - D_1 \quad (5)$$

由式(5)可知,灵敏度指标本质上表示设备强迫停运率分别为 1 和 0 时的系统风险差值,而这个差值与设备当前的强迫停运率是无关的,因此灵敏度指标没有反映设备状态。本文根据设备状态对输电系统风险的影响程度来评价设备的重要度,即以灵敏度与设备强迫停运率的乘积为重要度评价指标

$$L^{\text{new}} = \frac{\partial L_{EDNS}}{\partial f} f \quad (6)$$

将式(4)和式(5)代入式(6)中,得

$$L^{\text{new}} = (D_1 - D_2)f = L_{EDNS} - D_1 \quad (7)$$

因为 L_{EDNS} 表示设备当前状态下(即强迫停运率为 f)的系统风险, D_1 表示设备强迫停运率为 0(即完好状态)时的系统风险,所以 L^{new} 的物理意义是:设备当前状态给系统带来的风险增量。

3 考虑设备状态和系统风险的输电设备检修计划数学模型

设备检修对系统风险的影响主要有两个方面:一是停电检修意味着设备从系统中退出运行,在检修期间系统处于高风险运行状态,本文称之为风险投资期;二是设备经过检修重新投运后,由于设备健康状况的改善,系统运行风险会有所降低,本文称之为风险收益期。设备检修计划的实质就是确定一个最佳检修时机,平衡风险投资和风险收益,使得检修规划期内的系统总风险最低。

3.1 检修规划顺序

如果对所有设备的检修时段同时优化,由于这是一个不可微、不连续动态规划问题,且包含风险评估过程,故用传统数学规划算法难以求解,而如果采用智能优化算法,由于风险评估涉及蒙特卡罗随机模拟,所以优化时间会很长。因此,本文引入检修规划顺序概念^[2]来确定各设备的检修计划,借助本文第2节中提出的风险增量指标对设备进行重要度排序,越重要的设备对系统风险影响越大,应首先对其进行规划。应当指出,这种顺序并不是检修的先后顺序,而是规划顺序,从而使得对系统风险影响大的输

电设备优先选择检修时段,所以在确定某个设备检修时段之前,应当考虑已安排停运设备的影响。

3.2 目标函数

在检修规划期 T 内,设备的强迫停运率随时间的变化关系如图2所示,可以看出,整个检修规划期由于设备检修而被分割成检修前、检修时、检修后3个区间。在检修区间,因为设备处于停运状态,故其强迫停运率为 1;经过检修后,设备的健康状况得到了提升,所以强迫停运率相对检修前降低。

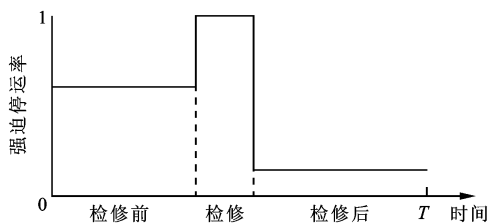


图2 设备状态的时序变化

因此,单个输电设备检修计划数学模型的目标函数如下

$$\min L_{EENS}(x) = \sum_{i=1}^{x-1} (L_{EENS})_i + \sum_{i=x}^{x+D-1} (L_{EENS})_i + \sum_{i=x+D}^N (L_{EENS})_i \quad (8)$$

式中: x 为设备开始检修时段; N 为时段数量; D 为检修持续时间; $(L_{EENS})_i$ 为第 i 时段的电量不足期望^[3], $\sum_{i=1}^{x-1} (L_{EENS})_i$ 、 $\sum_{i=x}^{x+D-1} (L_{EENS})_i$ 和 $\sum_{i=x+D}^N (L_{EENS})_i$ 分别表示设备检修前、检修时和检修后 3 个时段的系统风险。

3.3 约束条件

(1)起始检修时段约束

$$x \in [x_{\min}, x_{\max}] \quad (9)$$

式中: $x_{\min}$ 为设备检修的最早时段; $x_{\max}$ 为设备检修的最晚时段。

(2)各时段的检修资源约束。由于检修资源有限,单个时段通常不允许同时有过多的检修任务,故有

$$R + r(x) \leq r(x)_{\max} \quad (10)$$

式中: R 为此设备需要的检修资源数量; $r(x)$ 为第 x 时段已安排给其他设备的检修资源数量; $r(x)_{\max}$ 为第 x 时段的检修资源数量上限。

(3)切负荷约束。输电网不同于配电网,一般不允许因为设备的检修停运而直接对用户负荷造成影响,即使有影响也应该控制在一定的范围之内,故有

$$w(x) \leq W_{\max} \quad (11)$$

式中: $w(x)$ 为设备在第 x 时段检修时的最小切负荷量,其计算过程采用最优负荷削减模型^[8]; $W_{\max}$ 为系统允许的最大切负荷量。

3.4 计算流程

式(8)所示的优化模型不可微、不连续,且包含风险评估过程,所以不适宜用传统数学规划和智能算法求解. 在实际中,设备检修计划一般分为上半年、下半年、季度、月、日计划. 以半年检修计划为例,检修规划期以周为最小单位可以分为26个时段,所以可行的检修时段有限,因此本文采用枚举法寻优.

考虑设备状态和系统风险的输电设备检修计划总体制定流程如图3所示.

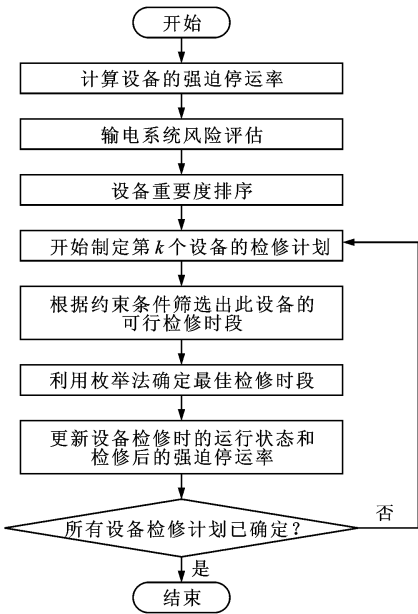


图3 输电设备检修计划制定流程

4 算例分析

用本文方法对 RTS-79 标准系统^[9]进行计算分析,系统接线如图4所示. 全网各时段的负荷水平如图5所示,纵坐标表示占系统峰荷的百分比,峰谷差为10%,假定各时段母线负荷根据峰荷数据按比例分配.

4.1 重要度评价指标分析

以双回线路15-21为例,将线路15-21#1线的强迫停运率在原始数据上提高3倍,线路15-21#2线的强迫停运率不变,比较它们在系统峰荷运行方式下的相对重要度,结果如表1所示.

线路15-21#1线和#2线是一组双回线,它们在网络功率传输方面的作用同等重要,但#1线的强迫停运率大于#2线,因此在检修决策中#1线相

比#2线需要更多关注度. 从表1中可以看出,按照灵敏度指标得出的重要度评价结果则与此相反,显然本文指标得出的评价结果更符合实际.

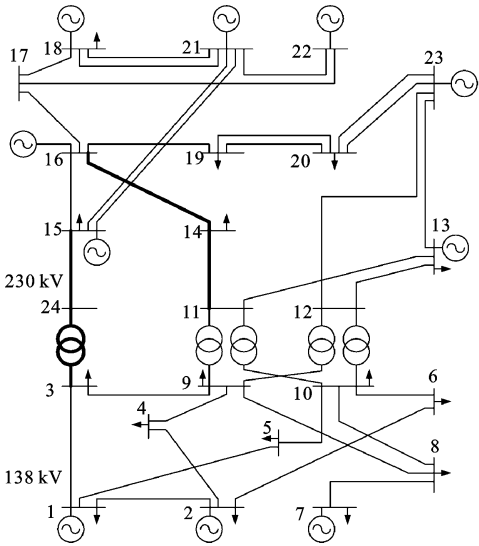


图4 RTS-79系统接线图

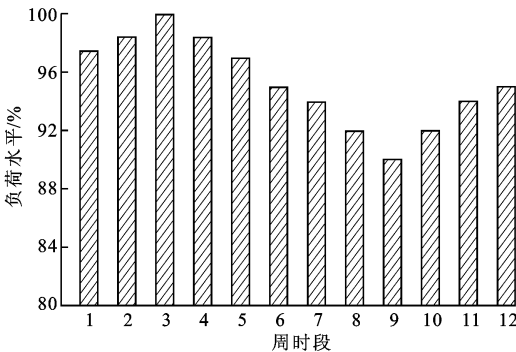


图5 各时段的负荷水平

表1 线路15-21#1线、#2线重要度比较

线路	强迫停运率	灵敏度/ MW	本文指标/ 10 ⁻⁵ MW
#1线	0.000 515×3	0.044 830	6.926 23
#2线	0.000 515	0.067 580	3.480 37
重要度	#1线>#2线	#1线<#2线	#1线>#2线

4.2 一般情况下的输电设备检修计划分析

在 $T=12$ 周的检修规划期内需要安排3条线路和1台变压器检修,待检修设备信息见表2,其中强迫停运率等于设备正常状态的强迫停运率乘以相应的倍数. 相关的检修约束条件为:设备起始检修周时段 $x \in [1, 12]$,检修资源足够充足,不允许由于设备检修而导致系统失负荷,即 $W_{\max}=0$.

表 2 待检修设备当前状态下的强迫停运率

设备名	设备状态	强迫停运率	检修持续时间/周
线路 15-24	异常	0.000 515×5	1
线路 14-16	异常	0.000 477×5	1
线路 11-14	注意	0.000 490×2	1
变压器 3-24	注意	0.001 753×2	1

待检修设备的重要度按照它们的当前状态给系统带来的风险增量由大到小排序,见表 3.

表 3 待检修设备重要度排序

序号	设备名	系统风险增量/ 10^{-5} GW·h
1	线路 14-16	96.20
2	线路 11-14	81.61
3	变压器 3-24	12.42
4	线路 15-24	9.12

根据设备的重要度依次制定检修计划,各设备在不同时段检修时的系统电量不足期望见图 6.

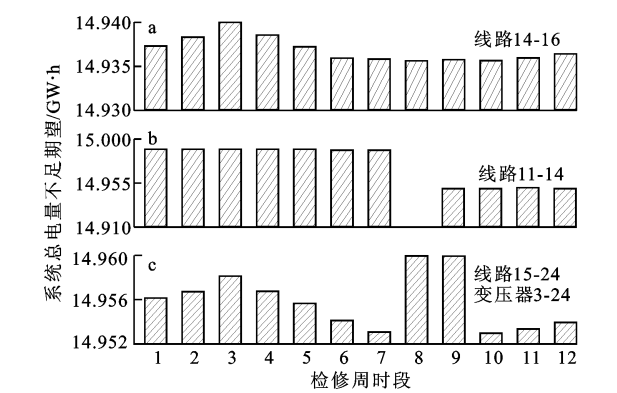


图 6 设备在各时段检修时的系统总电量不足期望

首先为线路 14-16 选择检修时段. 根据检修约束条件,其可行的检修周时段为{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12},在各时段检修时的系统总电量不足期望如图 6a 所示. 线路 14-16 在第 8 时段检修时的系统总电量不足期望最小,而负荷最低点是第 9 时段,说明在负荷最低点检修时系统总风险不一定最低,还与网络拓扑和设备状态有关.

其次为线路 11-14 选择检修时段. 根据检修约束条件,其可行的检修时段为{1,2,3,4,5,6,7,9,10,11,12},在各时段检修时的系统总电量不足期望如图 6b 所示. 第 8 时段为不可行检修时段,这是由于在第 8 时段已安排线路 14-16 检修,若再检修线路 11-14,会直接导致第 14 号节点的负荷被全部切

除,从而不满足切负荷约束条件. 从图 6b 中可以看出,线路 11-14 在第 9 时段检修时系统总电量不足期望最小.

变压器 3-24 和线路 15-24 属于相关“陪停”元件,可以安排一起检修. 根据检修约束条件,其可行的检修时段为{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12},在各时段检修时的系统总电量不足期望如图 6c 所示. 若在第 8、9 时段开始检修,系统电量不足期望很大,因为变压器 3-24、线路 15-24 和线路 11-14、线路 14-16 是 230 kV 和 138 kV 系统潮流断面上的联络线,若同时检修,会将传输的功率转移到系统的其他线路上,引起其他线路过载. 从图 6c 中可以看出,变压器 3-24 和线路 15-24 在第 10 时段检修时的系统电量不足期望最小.

综上,最终的设备检修计划如表 4 所示,表中“√”代表对应设备的检修时段.

表 4 设备检修计划表

待检修设备	周时段						
	1	...	8	9	10	11	12
线路 15-24					√		
线路 14-16			√				
线路 11-14				√			
变压器 3-24					√		

4.3 负荷水平和设备状态对检修计划的影响分析

为了进一步研究系统负荷水平和设备健康状况对检修计划的影响,本文分 4 种情况进行比较分析,如表 5 所示. 为了便于对比分析,假设在同一种情况下各待检修设备的健康状态相同. 4 种情况下的设备检修计划如表 6 所示.

表 5 4 种情况列表

情况	系统峰谷差	所有待检修设备状态
1	大	注意
2	大	异常
3	小	注意
4	小	异常

表 6 4 种情况下设备的检修计划

设备名	检修周时段			
	情况 1	情况 2	情况 3	情况 4
线路 15-24	8	10	7	9
线路 14-16	10	9	8	1
线路 11-14	9	8	9	2
变压器 3-24	8	10	7	9

由表 6 可知:情况 1 和情况 2 下设备的健康状况虽然不同,但是检修时段都集中处于负荷最低的第 8、9、10 三个时段,这说明在系统峰谷差较大的情况下,影响设备检修时段的主要因素是负荷水平,设备状态是次要因素,此时在负荷低谷检修的系统总风险通常较低;情况 4 相对于情况 3 而言,线路 14-16 和线路 11-14 的检修时段提前到第 1、2 时段,这说明在系统峰谷差较小的情况下,影响设备检修时段的主要因素是设备状态,负荷水平是次要因素,在最低负荷水平期间进行检修时系统总风险并不一定最低。

5 结 论

本文同时考虑设备状态和系统风险,研究了输电设备检修计划的制定问题,通过对 RTS-79 系统的计算分析,所得结论如下。

(1)本文所提出的评价设备重要度的风险增量指标物理意义明确,避免了灵敏度指标不能考虑设备状态的不足。

(2)引入了检修规划顺序概念依次确定各输电设备的检修计划,所建立的输电设备检修计划模型以系统运行方式和设备状态的时序变化为前提,在满足起始检修时段约束、检修资源约束和切负荷约束的条件下,能够使检修规划期内的系统总风险最低。

(3)在负荷最低点检修时系统总风险不一定最低,它还与网络拓扑和设备状态有关。在系统峰谷差较大的情况下,影响设备检修计划的主要因素是负荷水平;在系统峰谷差较小的情况下,影响设备检修计划的主要因素是设备状态。

参考文献:

[1] 国家电网公司.《输变电设备状态检修试验规程》等七项国家电网公司技术标准(Q/GDW 168—2008~Q/GDW 174—2008) [S]. 北京:国家电网公司, 2008.

[2] 冯长有,王锡凡,别朝红,等.基于系统可靠性评估的机组检修规划模型[J].西安交通大学学报,2009,43(8):80-85.

FENG Changyou, WANG Xifan, BIE Zhaohong, et al. Unit maintenance scheduling model based on system reliability [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(8): 80-85.

[3] 李文沅.电力系统风险评估:模型、方法和应用[M].北京:科学出版社,2005:181-194.

[4] ENDRENYI J, ANDERS G J, BERTLING L, et al. Comparison of two methods for evaluating the effects of maintenance on component and system reliability [C]//Proceedings of 2004 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Ames, Iowa, USA: Iowa State University, 2004: 307-312.

[5] BERTLING L, ALLAN R, ERIKSSON R. A reliability-centered asset maintenance method for assessing the impact of maintenance in power distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 75-82.

[6] ENDRENYI J, ABORESHEID S, ALLAN R N, et al. The present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(4): 638-646.

[7] BROWN R E, FRIMPONG G, WILLIS H L. Failure rate modeling using equipment inspection data [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 782-787.

[8] 赵渊,周家启,周念成,等.大电力系统可靠性评估的解析计算模型[J].中国电机工程学报,2006,26(5):19-25.

ZHAO Yuan, ZHOU Jiaqi, ZHOU Niancheng, et al. An analytical approach for bulk power systems [J]. Proceedings of CSEE, 2006, 26(5): 19-25.

[9] Probability Methods Subcommittee. IEEE reliability test system [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 2047-2054.

[本刊相关文献链接]

考虑设备状态和系统风险的设备重要度评估模型. 2012, 46(2): 83-87.

利用增量二次规划和启发式方法的电力系统动态无功优化. 2010, 44(8): 106-111.

短期负荷预测的样本动态组织方法. 2009, 43(4): 95-100.

电力系统多时段无功优化研究. 2008, 42(6): 698-702.

电力系统充裕度分析中的快速组合事件概率算法. 2008, 42(6): 713-717.

一种考虑可靠性指标的最优潮流模型. 2007, 41(10): 1219-1223.

(编辑 葛赵青 杜秀杰)