

基于回路可靠性贡献指标的电网薄弱点分析

肖雅元¹, 张磊¹, 罗毅¹, 王宏刚², 邓集³

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 国家电网公司, 北京 100031;
3. 国网湖南省电力公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 电网薄弱点分析通常采用灵敏度分析方法。提出了一种基于回路的大电网可靠性充裕度评估的薄弱点辨识新方法。该方法采用回路可靠性参数作为电网可靠性评估的输入参数, 结合 Birnbaum 恒定方法确定回路中元件的重要度。为更好地区分系统中的薄弱点, 在传统电网可靠性评估系统指标的基础上, 推导出了回路贡献指标, 从系统-回路-节点三个层面反映了电网的可靠性情况及薄弱环节。对某省实际电网的评估结果表明, 该方法不用进行复杂的灵敏度计算且有效减少系统状态数量, 克服了传统可靠性指标无法准确找到系统薄弱点的问题。

关键词: 回路; 电网可靠性充裕度评估; 回路贡献指标; 元件重要度; 薄弱点分析

Grid weak point analysis based on loop contribution index of the reliability

XIAO Yayuan¹, ZHANG Lei¹, LUO Yi¹, WANG Honggang², DENG Ji³

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China;
3. State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410007, China)

Abstract: Power system's weak point analysis commonly uses sensitivity analysis method. This paper presents a new identification method of weak points based on loop bulk power system reliability of adequacy evaluation. The method puts the loop reliability parameters as input parameters to assess the reliability of the bulk power system, and determines the important degree of circuit elements based on Birnbaum constant method. To better distinguish the weak point in the system, this paper deduces loop contribution indices on the basis of the traditional grid system reliability evaluation indices. The system-loops-node three levels reflect the reliability of the electrical network and weak points. The actual assessment of province's power grid indicates that the method can effectively reduce the number of system status without complex sensitivity calculation, and overcome the problem that the traditional system reliability index can't accurately find the weak points.

Key words: loop; bulk power system reliability of adequacy evaluation; loop contribution indices; components importance; weak point analysis

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)15-0054-06

0 引言

现代电力系统结构复杂、元件众多, 各元件对可靠性的影响各不相同^[1-2]。可靠性指标可以定量反映电力系统可靠性的好坏程度, 但无法辨识出对系统可靠性影响显著的元件。本文借鉴发输电系统可靠性评估方法, 以省级电网作为研究对象, 进行省级电网薄弱点分析研究。

由于发输电系统考虑的因素(如网络结构、电压质量、运行条件等)较多使得薄弱点分析极为复

杂^[3-5]。文献[6]中提出了一种 $N-1$ 下电力系统电压稳定裕度快速估计的新方法, 该方法能快速估算出 $N-1$ 下的系统电压稳定裕度, 并准确识别出系统电压薄弱节点, 但该方法仅能辨识电压薄弱点。文献[7]通过提出节点功率变化度概念来寻找电网的薄弱环节。针对基于电力系统可靠性评估的电网薄弱环节辨识目前也有相关研究。文献[8]采用节点可靠性指标进行电网薄弱点分析, 指出发电机元件故障是该系统经常出现的故障; 但采用节点可靠性指标的薄弱点分析方法只能找到重要的薄弱节点, 不能

全面地反映系统的薄弱环节。文献[9]对韶关电网典型运行方式采用蒙特卡罗方法进行了充裕度评估, 提出了重要度函数值来判断系统的薄弱环节, 但该指标是在元件可靠性参数不变的情况下建立的, 无法反映元件可靠性参数对指标的影响。文献[10]利用可靠性跟踪原理, 对 2010 年广东电网两种典型运行方式进行了可靠性跟踪分析, 找出电网中的薄弱环节, 但该方法仅对两种典型运行方式进行了分析, 薄弱点分析也仅局限在元件层面。文献[11]在回顾和总结近年来国内外建立大电网可靠性评估指标体系方面研究进展的基础上, 评价了新标准、最优可靠性对指标体系的新要求及大电网可靠性灵敏度分析等问题, 并对该领域的研究进行了展望。文献[12]首次推导了大电网可靠性指标灵敏度方程, 它能准确找到制约系统可靠性的瓶颈, 确定系统中最需要增加投资改造的薄弱环节。但该方法通常适用于简单的情况, 在需要考虑系统复杂运行工况或元件多状态可靠性模型时, 灵敏度计算复杂, 往往难以应对。文献[13]把回路引入到电网可靠性评估中, 基于最小割集法对母线节点供电可靠性及灵敏度分析。但该方法对于大规模电网的可靠性评估计算还需进一步研究。

本文提出了一种基于电网可靠性充裕度评估的省级电网薄弱点分析新方法。该方法以回路作为电网可靠性评估的最小单元, 引入回路可靠性参数作为电网可靠性评估的输入参数, 并采用 PSASP 软件进行系统状态分析。在系统和节点指标的基础上, 提出了回路可靠性贡献指标; 结合回路重要度分析方法, 即可获得对该薄弱回路影响最大的元件。该方法无需进行复杂的灵敏度计算就能快速有效地辨识系统薄弱环节。

1 回路及其充裕度贡献指标

传统可靠性基础数据的统计管理是以元件为基本单元。2010 年发布的《输电系统可靠性评价实施细则(试行稿)》首次提出了回路的概念, 使可靠性基础数据的管理从元件基本单元管理升级到了以回路为基本单元的管理^[13]。《细则》将连接在传输终端变电站或者是系统输电节点之间, 具有一定功能的设备组, 定义为一个回路。在发输电系统中, 主要包括母线回路、变电回路和输电回路三类基本回路。本文把回路引入到电网可靠性评估中, 以回路可靠性参数作为电网可靠性评估的基本输入参数。

传统的充裕度指标体系已较成熟, 推导出了一套同时适用于负荷点和系统两个层次的指标体系。前者针对具体负荷点而言, 表征故障的局部影响;

后者针对系统而言, 从全局衡量故障对整个系统的影响。系统指标又分为基本指标和导出指标, 导出指标具有标么意义, 可用于不同规模系统之间的相互比较。本文在系统-节点两层指标体系下, 为了更加全面地描述系统的可靠性水平, 结合省级电网评估规模, 提出了系统-回路-节点多层次指标体系。系统指标和节点指标遵循传统可靠性指标体系, 回路指标以回路为描述对象, 指标公式如式(1)~式(4)项所示。

(1) 回路失效切负荷概率(Probability of load curtailments due to circuit failure, PLCCF): 给定时间区间内系统由于回路 l (l 代表系统中某一个任意回路) 失效且调节措施实施后电网依然故障, 导致切负荷的概率。

$$PLCCF_l = \sum_{j=1}^{NL} \frac{T_j}{T} \left(\sum_{i \in L_j} P_i \right) \quad (1)$$

式中: P_i 是包含回路 l 的系统状态 i 的概率; L_j 是多级负荷模型中第 j 个负荷水平下由于回路 l 失效导致切负荷状态的集合; T_j 是系统第 j 级负荷时间; T 是系统总的负荷时间。

(2) 回路失效切负荷期望(Expected node load curtailments, ELCCF) (MW/a): 给定时间区间内系统由于回路 l 失效且调节措施实施后电网依然故障, 导致切除的负荷(期望值)。

$$ELCCF_l = \sum_j \frac{T_j}{T} \left(\sum_{i \in L_j} P_i \times C_i \right) \quad (2)$$

式中, C_i 是系统状态 i 下由于回路 l 失效导致的切负荷量。

(3) 回路过载切负荷的概率(Probability of load curtailments due to circuit overload, PLCCO): 给定时间区间内由于回路 l 过载且调节措施实施后回路依然过载, 导致系统切负荷的概率。

$$PLCCO_l = \sum_{j=1}^{NL} \frac{T_j}{T} \left(\sum_{i \in G_j} P_i \right) \quad (3)$$

式中, G_j 是多级负荷模型中第 j 个负荷水平下由于回路 l 过载导致切负荷状态的集合。

(4) 回路过载切负荷期望(expectation of load curtailments due to circuit overload, ELCCO) (MW/a): 给定时间区间内由于回路 l 过载且调节措施实施后回路依然过载, 导致系统切除的负荷(期望值)。

$$ELCCO_l = \sum_j \frac{T_j}{T} \left(\sum_{i \in G_j} P_i \times C'_i \right) \quad (4)$$

式中, C'_i 是多级负荷模型中第 j 个负荷水平下由于

回路 l 过载导致的系统切负荷量。

回路指标可量化各回路对电网的充裕度贡献, 其值越大对电网的充裕度的影响也越大, 也即该回路对于电网越脆弱。

2 基于 Birnbaum 恒定方法的回路重要元件分析

传统的电网可靠性充裕度评估是以元件作为电网的最小分析单元, 为了能更全面地对电网进行薄弱点分析, 本文所提方法以回路作为分析的最小单元。回路的元件重要度分析能在回路贡献指标确定薄弱回路的基础上, 进一步确定该回路的重要元件, 即电网的薄弱元件。该方法一方面能减少评估的状态数, 另一方面还能在不采用复杂灵敏度计算公式的情况下求得影响回路充裕度的重要元件。

2.1 回路可靠性参数

回路可靠性参数主要包括回路的不可用度 U_h , 等效的强迫停运率 λ_e 以及等效的平均修复时间 r_e 。对于输电回路和变电回路, 从可靠性等值网络的角度, 可以将其看成由所属元件组成的串联系统。则输电回路和变电回路的可靠性参数如式(5)~式(7)所示。

$$U_h = \sum_{i \in F_1} \lambda_i r_i \quad (5)$$

$$\lambda_e = \sum_i^m \lambda_i \quad (6)$$

$$r_e = U_h / \lambda_e \quad (7)$$

式中: λ_i 是回路所属的第 i 个元件的强迫停运率; r_i 是回路所属的第 i 个元件的平均修复时间; F_1 是所属回路一阶元件故障集合。

导致母线失效的原因有一阶故障(某一个元件随机故障), 此时我们可以采用串联系统予以考虑; 也有二阶故障(元件 1 随机故障, 在其检修期间元件 2 又相继故障或者元件 2 故障, 且在其检修期间元件 1 又相继故障); 三阶及以上故障发生在母线回路上的概率非常小。因此, 本文仅考虑母线回路的二阶故障, 得到其回路可靠性参数如式(8)~式(10)所示。

$$U_h = \sum_{i \in F_1} \lambda_i r_i + \sum_{(i,j) \in F_2} \lambda_i \lambda_j r_i r_j \quad (8)$$

$$\lambda_e = \sum_{i \in F_1} \lambda_i + \sum_{(i,j) \in F_2} \lambda_i \lambda_j (r_i + r_j) \quad (9)$$

$$r_e = U_h / \lambda_e \quad (10)$$

式中, F_2 是所属回路二阶元件故障集合。

2.2 基于 Birnbaum 恒定法的回路灵敏度分析

1969 年, Birnbaum 提出了单元重要度衡量方法^[4], 即在时刻 t 第 i 个单元的 Birnbaum 重要度定义为

$$I^B(i|t) = \frac{\partial h(t)}{\partial P_i(t)}, i=1,2,\dots,n \quad (11)$$

Birnbaum 重要度由系统可靠度对单元可靠度 $P_i(t)$ 的偏导数来获得。这是灵敏度分析常用的方法。

结合 Birnbaum 灵敏度分析方法, 本文推导了适用于回路不可用度对元件强迫停运率和平均修复时间的灵敏度函数。

(1) 输电回路和变电回路不可用度对元件强迫停运率 λ_k 的灵敏度

$$\frac{\partial U_h}{\partial \lambda_k} = r_k \quad (12)$$

(2) 输电回路和变电回路不可用度对平均修复时间 r_k 的灵敏度

$$\frac{\partial U_h}{\partial r_k} = \lambda_k \quad (13)$$

(3) 母线回路不可用度对元件的强迫停运率 λ_k 的灵敏度

$$\frac{\partial U_h}{\partial \lambda_k} = r_k + \sum_{(i,k) \in F_2} \lambda_i r_i r_k \quad (14)$$

(4) 母线回路不可用度对元件平均修复时间 r_k 的灵敏度

$$\frac{\partial U_h}{\partial r_k} = \lambda_k + \sum_{(i,k) \in F_2} \lambda_i \lambda_k r_i \quad (15)$$

在进行电网可靠性评估时, 为减少评估状态采用回路作为最小研究单元, 使得评估方法失去了对元件的薄弱点分析能力。因此采用了回路灵敏度分析, 利用元件重要度辨识出对回路的可靠性产生较大影响的元件, 有效地弥补了该问题。

3 基于省级电网的可靠性评估计算流程

利用上述方法进行电网可靠性评估的主要步骤可以叙述如下:

(1) 按照回路规定对评估网络进行回路划分, 结合元件可靠性参数及式(5)~式(10)计算回路可靠性参数。

(2) 确定待评估网络的负荷曲线, 得到待评估网络的待评估运行方式集。

(3) 对待评估方式集以回路为最小单元进行状态扫描。

(4) 对出现充裕性问题的状态进行调节或最优切负荷。

(5) 统计所有待评估运行方式分析的结果后, 可获得电网系统-回路-节点指标; 以回路贡献指标的均值作为薄弱回路的阈值来确定薄弱回路。

(6) 采用式(12)~式(15)进行元件重要度分析, 以各元件灵敏度均值作为重要度元件的阈值, 元件灵敏度大于该阈值的元件认定为重要元件。

(7) 结合步骤(5)和步骤(6)进行电网的薄弱环节分析。

4 算例测试及薄弱点分析

为更好地说明本方法的可行性和实用性, 本文采用 Matlab2013a 编写了基于 Birnbaum 方法的回路元件重要度灵敏度程序, 并结合 PSASP 软件对某省级 2014 年夏大、夏小、冬大、冬小四种典型运行方式下的 500 kV 电压等级电网回路进行了可靠性评估计算及薄弱点分析。其计算条件如下:

(1) 该省截止到 2013 年底全口径装机容量 57 866 MW, 其中水电装机 35 952.8 MW, 占 62.13%, 火电 21 735.8 MW, 占 37.56%, 风电及其他装机 17.20 MW, 占 0.32%。全口径发电量 2 245.01 亿 kWh, 全社会用电量 1 507 亿 kWh, 全社会最大负荷 27 100 MW, 统调用电量 1 310 亿 kWh, 统调最大用电负荷 23 570 MW。现有 500 kV 变电站 26 座, 主变 36 台, 500 kV 线路 111 条, 线路长度 10 736.8 km。

(2) 该省数据包括 500 kV 主干网架、直流部分, 未对 220 kV 和 110 kV 部分系统进行简化。

(3) 系统元件可靠性数据来自输变电可靠性管理系统近五年的统计数据。

4.1 基于回路的元件重要度分析

对每个回路进行元件可靠性参数灵敏度计算并排序, 以元件灵敏度均值为阈值选取重要元件(由于系统元件数众多, 回路的其余元件仅考虑了断路器和隔离开关)。表 1 和表 2 是回路可靠性参数对元件可靠性参数的灵敏度计算汇总结果, 通过该结果确定重要元件。

表 1 和表 2 给出了回路对其所包含元件的重要度分析结果, 基于不同的元件可靠性参数, 其元件重要度分析结果可能会有不同。即表 1 的结果是基于元件的故障率参数得到的, 表 2 的结果是基于元件的修复时间参数得到的, 因此表 1 和表 2 中所包含的元件集合是不相同的。此时在选取重要元件的时候可以采取三种方法, 第一种方法是以表 1 为基准选取重要元件; 第二种方法是以表 2 为基准选取重要元件; 第三种方法是选取表 1 与表 2 元件集合的交集作为重要元件集合。本文采用第三种方法。

表 1 回路对元件强迫停运率 λ 的灵敏度分析结果
Table 1 Sensitivity analysis result of component's forced outage rate based on loop

回路类型	元件类型	重要元件数
输电回路	输电线路	64
	断路器	124
	隔离开关	132
变电回路	变压器	98
	断路器	94
	隔离开关	145
母线回路	母线	55
	断路器	502
	隔离开关	971

表 2 回路对元件平均修复时间 r 的灵敏度分析结果
Table 2 Sensitivity analysis result of component's mean time to repair based on loop

回路类型	元件类型	重要元件数
输电回路	输电线路	54
	断路器	102
	隔离开关	111
变电回路	变压器	86
	断路器	88
	隔离开关	137
母线回路	母线	46
	断路器	401
	隔离开关	870

4.2 电网可靠性评估指标结果及薄弱点分析

表 3、表 4、表 5 分别给出了该省电网可靠性评估的系统可靠性指标、节点可靠性指标以及回路可靠性指标。

从表 3 可知该省 500 kV 电网可靠性水平很高, 系统严重程度指标 $SI=0.00778$ 属于 0 级。一方面是因为该省含有大量电源, 其充裕性程度本来就很高; 另一方面该省作为连接邻省间的重要通道, 其网架结构很好。未来进行可靠性改善可有针对性地提高局部的可靠性水平。表 4 给出了对电网可靠性影响较大的重要节点。由于本文是对基于回路的电网薄弱点进行分析, 因此对系统指标和节点指标不做过多讨论。

基于回路贡献指标均值, 表 5 得到了该省网的薄弱回路。结合评估步骤(5)和(6), 由表 1、表 2 和表 5 可快速地搜寻到影响电网可靠性的薄弱环节, 如表 6 所示。

表3 电网可靠性评估系统可靠性指标

Table 3 System contribution indices of power system

reliability assessment	
系统可靠性指标	统计结果
系统切负荷概率 PLC	0.000 017 4
系统切负荷持续时间 $EDLC/(h \cdot a^{-1})$	0.152 4
电力不足期望 $EDNS/(MW/a)$	0.000 89
电量不足期望 $EENS/(MW \cdot h/a)$	7.830 2
系统停电指标 $BPII/(MW/MW \cdot a^{-1})$	0.000 000 014 7
系统消减电量指标 $BPECI/(MW \cdot h/MW \cdot a^{-1})$	0.000 13
系统严重程度指标 SI	0.007 78

表4 电网可靠性评估节点可靠性指标

Table 4 Node contribution indices of power system

reliability assessment		
节点	节点切负荷概率	节点切负荷期望
	$PNLC$	$ENLC$
节点1	0.000 004 63	0.000 036
节点2	0.000 004 63	0.000 036
节点3	0.000 004 63	0.000 036
节点4	0.000 004 63	0.000 036
节点5	0.000 004 63	0.000 032
节点6	0.000 004 63	0.000 032
节点7	0.000 004 63	0.000 030 4
节点8	0.000 004 63	0.000 030 4
节点9	0.000 004 63	0.000 030 4
节点10	0.000 004 63	0.000 030 4

表5 电网可靠性评估回路可靠性指标

Table 5 Loop contribution indices of power system

reliability assessment				
回路	$PLCCF$	$ELCCF$	$PLCCO$	$ELCCO$
回路1	0.000 008 79	0.000 575	-	-
回路2	0.000 007 87	0.000 306	-	-
回路3	0.000 001 85	0.000 112	-	-
回路4	0.000 001 62	0.000 188	-	-
回路5	0.000 001 39	0.000 025 9	-	-
回路6	0.000 000 926	0.000 094 9	-	-
回路7	0.000 000 926	0.000 043 1	-	-
回路8	0.000 000 926	0.000 017 3	-	-
回路9	0.000 000 926	0.000 017 3	-	-
回路10	0.000 000 926	0.000 025 9	-	-
回路11	-	-	0.000 017 4	0.000 89

表6 电网薄弱环节

Table 6 Weak points of power system

薄弱回路	薄弱元件个数	薄弱回路	薄弱元件个数
回路1	2	回路7	3
回路2	4	回路8	2
回路3	4	回路9	4
回路4	3	回路10	2
回路5	2	回路11	3
回路6	2		

5 结论

本文提出了一种基于回路的电网可靠性充裕度评估方法及运用于薄弱点分析的可靠性指标。该方法能减少电网可靠性评估的状态数量，大大降低了电网可靠性评估的计算复杂度。同时提出的系统-回路-节点分层指标思想，丰富了电网可靠性评估指标体系。在不用进行复杂灵敏度计算的情况下，从回路的角度对电网的薄弱环节进行了全面的分析。

该方法运用于某省级电网的可靠性评估计算工作中，得到了较好的效果。随着电网规模的增大，其优势也将更加明显。

参考文献

- [1] 吴昊, 张焰, 刘波. 考虑风电场影响的发输电系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 36-42. WU Hao, ZHANG Yan, LIU Bo. Reliability assessment of generation and transmission systems considering wind farm effects[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 36-42.
- [2] 谢开贵, 王岸, 胡博. 计及储能设备运行策略的风/柴/储混合系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 1-7. XIE Kaigui, WANG An, HU Bo. Reliability evaluation of wind-diesel-storage hybrid system considering energy storage system operating strategies[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 1-7.
- [3] 陈召阳, 吕飞鹏. 考虑运行方式的电网关键线路辨识[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(11): 32-36. CHEN Zhaoyang, LÜ Feipeng. Key line identification of power grid based on operation mode[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2014, 26(11): 32-36.
- [4] 王涛, 李渝, 顾雪平, 等. 考虑地理分区边界优化的电网关键输电断面辨识[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 220-228. WANG Tao, LI Yu, GU Xueping, et al. Identification of the key transmission sections considering optimization of

- geographical partition boundary for power grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 220-228.
- [5] 叶剑华, 林济铿, 胡世骏, 等. 计及气象因素的电网静态安全指标体系[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(9): 59-64.
YE Jianhua, LIN Jikeng, HU Shijun, et al. Index system of steady security of power grid considering meteorological factors[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2014, 26(9): 59-64.
- [6] 张继楠, 姜涛, 贾宏杰, 等. 计及电力系统 $N-1$ 的电压稳定裕度估计方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(6): 1-8.
ZHANG Jinan, JIANG Tao, JIA Hongjie, et al. Voltage stability margin estimation with $N-1$ contingency[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2013, 25(6): 1-8.
- [7] 李玲玲, 鲁修学, 孙东旺, 等. 基于元件功率的区域电力系统薄弱环节辨识算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 77-83.
LI Lingling, LU Xiuxue, SUN Dongwang, et al. An identification algorithm of the weak links for regional power system based on element power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 77-83.
- [8] 郑望其, 程林, 孙元章. 2005年南方电网可靠性充裕度评估[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 5-8.
ZHENG Wangqi, CHENG Lin, SUN Yuanzhang. Dequacy evaluation for south China electric power grid in 2005[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 5-8.
- [9] 柳玉波, 黄慧, 许亮, 等. 韶关电网可靠性评估及薄弱环节分析[J]. 供用电, 2010(5): 31-34.
LIU Yubo, HUANG Hui, XU Liang, et al. Reliability evaluation and weak links analysis of Shaoguan Power Network[J]. Distribution & Utilization, 2010(5): 31-34.
- [10] 纪静, 谢开贵, 曹侃, 等. 广东电网薄弱环节辨识及可靠性改善分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(13): 98-102.
JI Jing, XIE Kaigui, CAO Kan, et al. Identification of weaknesses and improved reliability analysis in Guangdong Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13): 98-102.
- [11] 王超, 徐政, 高鹏, 等. 大电网可靠性评估的指标体系探讨[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(1): 42-48.
WANG Chao, XU Zheng, GAO Peng, et al. Reliability index framework for reliability evaluation of bulk power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2007, 19(1): 42-48.
- [12] 赵渊, 周念成, 谢开贵, 等. 大电力系统可靠性评估的灵敏度分析[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 25-30.
ZHAO Yuan, ZHOU Niancheng, XIE Kaigui, et al. Sensitivity analysis on reliability assessment of bulk power system[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 25-30.
- [13] 谭文刚, 刘为, 靳东一, 等. 大电网可靠性评估的灵敏度分析新方法[J]. 黑龙江电力, 2014, 36(3): 263-265.
TAN Wengang, LIU Wei, JIN Dongyi, et al. A novel sensitivity analysis method for reliability evaluation of large power system[J]. Heilongjiang Electric Power, 2014, 36(3): 263-265.
- [14] 郭强. 系统可靠性理论: 模型、统计方法及应用[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2011.

收稿日期: 2014-10-21; 修回日期: 2015-02-03

作者简介:

肖雅元(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统可靠性评估; E-mail: xiaoyayuan2525@163.com

张磊(1986-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统优化运行与控制等工作;

罗毅(1966-), 男, 副教授, 围绕 EMS/DMS 开展研究工作, 主要从事电力系统安全运行监控、AVC、配电自动化和 IT 技术在电力系统中的应用研究。

(编辑 周金梅)