

基于最小过热区域的城市配电网灾害风险评估

俞隽亚¹, 王增平¹, 田红雨², 鹿伟¹, 云辰太¹, 黄哲洙²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 北京 102206;

2. 国网辽宁省电力有限公司沈阳供电公司, 辽宁 沈阳 110811)

摘要: 目前配电网风险评估直接应用于实际预警预案还存在一定困难。研究并提出了一种基于最小过热区域的城市配电网灾害风险评估方法。通过分析各类灾害下相应最小过热区域的停运概率, 计算灾害下配网负荷停电风险, 并以此为判据进行实时预警预案。考虑了配网自身的自愈控制, 克服了传统配电网灾害风险评估中的保守计算。显著提升了计算速度, 有能力评估灾害下多条关联馈线段同时成为初始故障源时的风险情况, 并量化了灾害下配网负荷的停电损失, 可用于比较不同工况下不同灾害的危害程度。最后以实际城市配电网为例验证了所提出方法的实用性、通用性和高效性。

关键词: 配电网; 停电风险; 最小过热区域; 预警预案

Risk assessment of urban distribution network under disaster based on minimum over-heated region

YU Junya¹, WANG Zengping¹, TIAN Hongyu², LU Wei¹, YUN Chentai¹, HUANG Zhezhu²

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Shenyang Power Supply Company, State Grid Liaoning Electric Company Power Supply Limited, Shenyang 110811, China)

Abstract: Currently difficulties exist still in directly applying urban distribution network risk assessment to the practical early warning and plans. This paper proposes a risk assessment method of urban distribution network under disaster based on minimum over-heated region. By analyzing the outage probability of relevant minimum over-heated region under various disasters, it calculates the outage risk value of loads and applies it as a criterion for timely early warning and plans. This paper takes the self-healing control of distribution network into consideration, overcomes the conservative calculation of traditional risk assessment; significantly enhances the computing speed while quantifies the power loss to compare the extent of damage under different operational states. This paper uses the real urban distribution network as an example to verify the practicality, versatility and high-efficiency of this method.

Key words: distribution network; power failure risk; minimum over-heated region; early warning and plans

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)04-0115-06

0 引言

城市配电网作为电力负荷中心, 具有负荷密度高、用户对电力的依赖程度高、安全可靠性和供电质量要求高等特点^[1]。随着全球气候变暖、极端天气增多, 近年来国内外自然灾害频繁发生。面对自然灾害的影响, 提高城市配电网应急处理能力是降低事故对经济和社会影响的关键环节^[2]。

目前, 国家和电网企业均出台了相应的法规和应

急预案, 已初步形成“一案三制”的应急管理新模式^[3]。但是, 目前风险评估和事故预案还是独立的管理系统, 未与配网自身应对风险的继电保护及自愈控制构成完整体系^[4]。对灾害事件的准确预警依赖于先进的风险分析和评估方法。城市配电网的风险评估既要考虑配网外灾害的严重程度, 又要考虑配网本身的运行状态、拓扑结构和设备状况, 还要考虑用户的重要程度。在对灾害事件造成的风险进行准确估计后, 应进一步分析配网本身应对风险的能力。对超出配网自愈控制能力之外的风险, 应进一步做出人为干预的紧急预案^[5]。只有综合各种因素准确

评估风险,充分发挥配网自身应对风险的作用,做出科学合理的紧急预案,才能有效建立我国城市配电网的安全防御体系。

然而,目前配网风险评估直接应用于预警预案还存在一定困难,主要原因是以下四方面:一是基于“ $N-K$ ”连锁故障的风险评估方法不完全适用于灾害下多条关联馈线段均为初始故障源的情况^[6];二是所提出的风险指标没有统一量纲,不具备明确物理意义,无法用于配网在不同工况下应对灾害的风险比较;三是大部分风险评估未考虑配网自身应对风险的重构转供,所得风险值过于保守^[7];四是考虑了配网自愈控制的风险评估计算速度较慢,实时性差^[8]。

针对上述问题,本文提出一种综合考虑配网重构和紧急切负荷等应急调度措施的灾害下城市配电网停电风险计算方法。在更贴近配网真实风险值的同时,该方法量化灾害下配网负荷的停电损失,并以此判定不同工况下配网的应急预案。该方法以各连通系内的最小过热区域作为单位进行风险评估,在显著提升了计算速度的同时,亦有能力评估灾害下多条关联馈线段同时成为初始故障源时的风险情况,具备较强的实用性、实时性和通用性。

1 基于最小配电区域的过热区域搜索

1.1 最小配电区域的概念和特征

最小配电区域是为减少计算量、加快运算速度引入的一个概念。如果一个区域内所有端点都是开关节点(包括断路器、隔离开关、联络开关)或负荷节点并且没有内点,或者所有内点都是T接点,则称该区域为最小配电区域。没有T接点的最小配电区域就是一条馈线段。

当最小配电区域中任意元件故障或检修时,必然会造成整个最小配电区域停电。因此,最小配电区域是故障隔离以及停电的最小范围。最小配电区域内设备与线路的故障后果均相同,因此不存在算法精度的近似问题。以最小配电区域为单位进行配网重构和风险评估,计算每个区域内负荷的停电风险值,较之原先的系统元件数大大减少,有效减少了计算量。

1.2 分离最小配电区域的流程

为适用于复杂配网并节省存储空间,基于邻接表定义如下矩阵用于最小配电区域的分离。

设配电网中节点个数为 N ,则

节点状态矩阵 T :节点状态矩阵 T 是 $1 \times N$ 的矩阵,即 $T=[t_1, t_2, \dots, t_N]$,若节点 i 处于合闸状态,则 $t_i=1$;否则 $t_i=0$,T接点认定为合闸状态,末梢

点认定为分闸状态。

T接点分布矩阵 B :T接点分布矩阵 B 是 $1 \times N$ 的矩阵,即 $B=[b_1, b_2, \dots, b_N]$,若节点 i 是T接点,则 $b_i=1$;否则 $b_i=0$ 。

入点矩阵 ST :入点矩阵 ST 是 $1 \times N$ 的矩阵, ST 中只有不是T接点且处于合闸状态的节点对应的元素为1,其余节点对应的元素均为0, ST 中值为1的元素对应的节点为最小配电区域的入点, ST 可由节点状态矩阵 T 和T接点分布矩阵 B 得到。

弧结构矩阵 C :弧结构矩阵 C 是 $N \times N$ 的矩阵,若节点 i 和节点 x 相连,且潮流方向为节点 i 流向节点 x ,则 $c_{ix}=1$, $c_{xi}=0$,矩阵 C 中的其余元素均为0。

区域划分矩阵 VP :区域划分矩阵 VP 由两个 $1 \times N$ 的矩阵 VP_1 和 VP_2 构成,对 VP 赋值的过程为——若节点在 VP_1 中相应元素为0,则对 VP_1 中相应元素赋值;反之,则对 VP_2 中相应元素赋值, VP 中绝对值相同的元素对应的节点属于同一最小配电区域,且绝对值对应最小配电区域的编号;值为负的元素对应的节点为相应最小配电区域的入点。

区域编号寄存器 m :区域编号寄存器 m 为配电网中最小配电区域的个数。

分离配电网最小配电区域的方法包括如下步骤:

(1)根据配电网的节点状态矩阵 T 和T接点分布矩阵 B 、初始化入点矩阵 ST 生成弧结构矩阵 C 、区域划分矩阵 VP (包括区域矩阵 VP_1 和 VP_2)、清零队列 Q ,区域编号寄存器 m 置0。

(2)令 $m=m+1$,从入点矩阵 ST 中取出从左至右第一个不为零的元素对应的节点 V_k ,并将其在 ST 中的相应元素置0,在弧结构矩阵 C 中找出其子节点 V_{k1} 、 V_{k2} 、 \dots 、 V_{kN} ,将子节点中的T接点按顺序存入清零队列 Q ,将 V_k 在区域划分矩阵 VP 中的对应位置赋值 $-m$, V_{k1} 、 V_{k2} 、 \dots 、 V_{kN} 在区域划分矩阵 VP 中的对应位置赋值 m 。

(3)从清零队列 Q 中取出从左至右第一个不为零的元素对应的节点 V_m ,并将其在清零队列 Q 中的相应元素置0,在弧结构矩阵 C 中找出其子节点 V_{m1} 、 V_{m2} 、 \dots 、 V_{mN} ,将子节点在区域划分矩阵 VP 中的对应位置赋值 m ,并且将子节点中的T接点按顺序存入清零队列 Q 。

(4)判断清零队列 Q 是否为空,若是则进行下一步,若不是则返回步骤(3),继续取出清零队列 Q 中从左至右第一个不为零的元素对应的节点。

(5)判断入点矩阵 ST 中的元素是否均为0,若是则进行下一步,若不是则返回步骤(2)。

(6)输出区域划分矩阵 VP (包括区域矩阵 VP_1 和

VP_2)。

1.3 最小过热区域的定位

根据从气象局获得的灾害时间、受灾范围、灾害强度等信息,可以得到配网内受灾设备和线路的集合。目前,“大数据”理论逐步融入国家电网的信息处理和应用管理。综合考虑配网内部和外部环境等因素对设备正常运行的影响,可以得到配网不合理运行、设备自然老化、风灾冰灾等导致电力设备停运的概率模型^[9-11]。此类模型能实时分析风灾、冰灾、地震等灾害导致的线路、主变等设备的停运概率,从而计算灾害下配网负荷的停电概率及相应风险值,能够有效应用于配网的灾害风险评估。本文算例采用文献[10]提出的基于条件相依的输电线路短期可靠性模型得到相应灾害下线路的停运概率。

根据灾害预测类型、灾害等级与受灾范围,确定受灾害影响的过热弧(即故障线路)集合 $\{L_1, L_2, \dots, L_k\}$ 与过热弧在该灾害下的停运概率 $\{\varphi_{L_1}, \varphi_{L_2}, \dots, \varphi_{L_k}\}$ 。根据过热弧的位置及停运概率可得到最小过热区域(即受灾最小配电区域)的集合 $\{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ 及相应停运概率 $\{\varphi_{S_1}, \varphi_{S_2}, \dots, \varphi_{S_m}\}$ 。

$$\varphi_{S_i} = 1 - (1 - \varphi_{L_1})(1 - \varphi_{L_2}) \cdots (1 - \varphi_{L_k}) \quad (1)$$

式中: φ_{S_i} 为最小过热区域 S_i 的受灾停运概率; $\varphi_{L_1}, \varphi_{L_2}, \dots, \varphi_{L_k}$ 为最小过热区域 S_i 内相应过热弧的受灾停运概率。

2 灾害下城市配电网停电风险

2.1 风险的定义

城市配网的风险评估包括评估事件发生的概率和评估事件发生后后果的严重程度这两大方面。目前在电力系统风险评估领域被普遍接受的风险表达式^[12]如式(2)。

$$R(Y_t | E, L) = \sum_i [P_r(E_i) \cdot P_r(Y_t | E_i, L) \cdot S(Y_t)] \quad (2)$$

式中: $R(Y_t | E, L)$ 为总的风险指标值; Y_t 为系统运行过程中的某个状态; E_i 为未来 t 时刻可能要发生的某一不确定的事件; L 为未来 t 时刻电网对应的负荷状况; $P_r(E_i)$ 为不确定事件 E_i 发生的概率; $P_r(Y_t | E_i, L)$ 为事故 E_i 发生后系统处于特定运行状况 Y_t 的概率; $S(Y_t)$ 为系统运行在 Y_t 状态下事故的严重程度。

根据该风险表达式,可将城市配电网灾害下的停电风险表示为灾害引发的负荷停电概率和相应负荷停电造成的损失^[13],如式(3)所示。

$$R(E) = \sum_{y=1}^n \varphi_y P_y c_y \quad (3)$$

式中: $R(E)$ 表示灾害 E 导致的停电风险值; n 为最小过热区域内的所有负荷数; P_y 为负荷 y 的有功功率,受配网工况影响; c_y 表征负荷 y 重要程度的价值系数,可根据实际供电需求实时调整,日常情况下医院、政府等负荷的价值系数较高,而重大公共活动期间相应场地和交通系统等负荷的价值系数要有所提高; φ_y 为负荷 y 的停电概率,需根据具体灾害类型、等级,受灾范围和相应最小过热区域停运概率、系统工况等因素实时计算,是灾害下城市配电网停电风险计算的重要内容。

2.2 计算流程

在某次灾害即将来临时,电网得到气象部门预报,得知灾害时间、等级和受灾范围后,可较为准确地估算出相应灾害下电力设备的停运概率。在确定最小过热区域及相应停运概率后,构建最小损失切负荷和最小开关操作比重的目标函数、确定配网重构的约束条件,从而计算相应的负荷停电损失和风险。基于以上思路,可得灾害下城市配电网风险评估的具体流程,如图1所示。

图1包括以下九个关键步骤。

步骤1: 划分城市配电网最小配电区域。

步骤2: 根据灾害预测类型、等级与范围,确定受灾害影响的过热弧集合 $\{L_1, L_2, \dots, L_k\}$ 与过热弧在该灾害下的停运概率 $\{\varphi_{L_1}, \varphi_{L_2}, \dots, \varphi_{L_k}\}$ 。

步骤3: 根据过热弧集合得到最小过热区域集合 $\{S_1, S_2, \dots, S_m\}$,根据过热弧的停运概率得到相应最小过热区域的停运概率 $\{\varphi_{S_1}, \varphi_{S_2}, \dots, \varphi_{S_m}\}$ 。

步骤4: 赋初值,设定所有参与灾害风险评估的负荷的不停电概率为1。

步骤5: 构建配电网重构的目标函数,确定配电网重构的约束条件。

目标函数包括最小损失切负荷函数和最小开关操作比重函数,分别为

$$\min G(P) = \sum_{y=1}^n c_y (P_y - P_y^*) \quad (4)$$

$$\min W(P) = d^\alpha \quad (5)$$

式中: P_y 表示负荷 y 的初始有功功率; P_y^* 表示在重构方案 P 下采取紧急切负荷措施后负荷 y 的有功功率; c_y 表征负荷 y 重要程度的价值系数; α 为开关系数,系数越高,开关操作数对重构结果的影响越重; n 为受灾配电网区域的所有负荷数。

所述的约束条件包括:满足配电网潮流方程;节点电压未越限;支路电流未越限;支路流过的功率未超过支路容量上限。

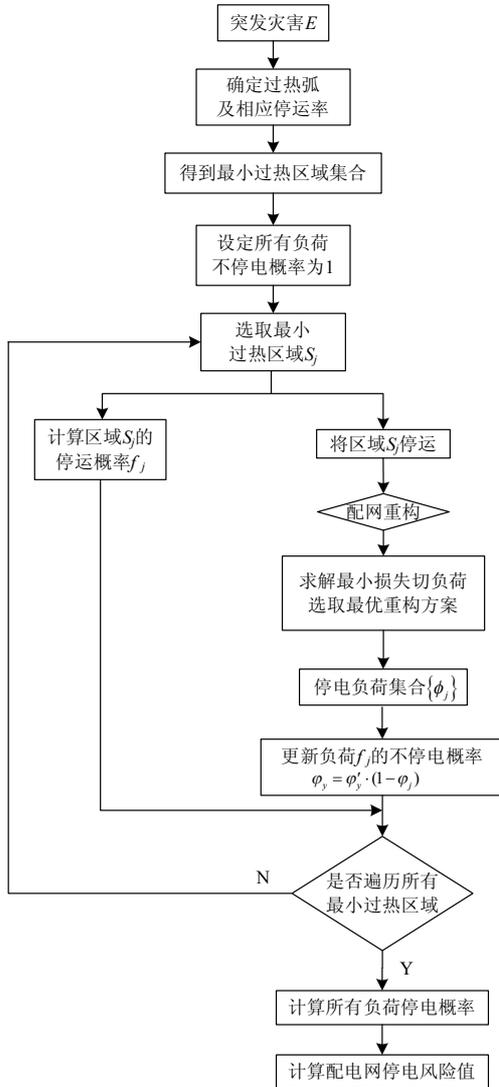


图1 配网风险评估计算流程
Fig.1 Calculation process of distribution network risk assessment

步骤6: 令最小过热区域 S_j 停运, 其中, j 为 $m-1$ 中的值, j 的初始取值为 1, 选取备用转供路径, 求得满足配电网重构的约束条件、并保持系统重要负荷供电且令切负荷损失最小的配电网重构方案。

步骤7: 根据步骤 6 所得的配电网重构方案, 得到需要切除而导致停电的负荷集合 ϕ_j , 更新所有参与灾害风险评估的负荷的不停电概率。对于每一个 $y \in \phi_j$, $\bar{\varphi}_y = \bar{\varphi}_y(1 - \varphi_{S_j})$ 。式中 $\bar{\varphi}_y$ 为负荷 y 的不停电概率, φ_{S_j} 为最小过热区域 S_j 的停运概率。

步骤8: j 加 1 后返回步骤 6, 重复步骤 6 至步骤 7, 直至遍历所有最小过热区域的集合。

步骤9: 计算每一个负荷的停电概率, 得到相

应灾害下城市配电网的风险值。

2.3 目标函数的标准化处理

在选取最优重构方案时, 因多重目标函数的存在, 无法直接比较各重构方案的优劣。本文对各重构方案的目标函数值进行标准化处理后, 对各标准值赋予权重, 以此比较所有可行方案的综合指标值, 从而得出最优重构方案。

本文的目标函数分别为损失切负荷和开关操作比重, 均为成本型指标, 指标值越小越好。目标函数的标准化处理方法如式(6)。

$$O_{ef} = \frac{O'_{ef} - \min_f \{O'_{ef}\}}{\max_f \{O'_{ef}\} - \min_f \{O'_{ef}\}} \quad (6)$$

式中: O_{ef} 表示第 e 个重构方案的第 f 个目标函数标准化后的值且 $O_{ef} \in [0,1]$; O'_{ef} 表示第 e 个重构方案的第 f 个目标函数的有名值, $f=1$ 表征切负荷损失函数, $f=2$ 表征开关操作比重函数。

在得到各方案中各目标函数的标准值后, 利用式(7)得到综合指标值。

$$F_p = \lambda_1 O_{p1} + \lambda_2 O_{p2} \quad (7)$$

式中: F_p 表示重构方案 P 的综合指标值; λ_1 和 λ_2 分别表示切负荷损失函数和开关操作比重函数的权重, 且 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。综合指标值最小的重构方案为最优重构方案。

3 算例分析

本文采用的测试系统如图 2 所示, 为某城市一个电压等级为 10 kV 的较为复杂的配电网结构。系统中有 43 个馈线分段、15 条馈线、5 条变电站母线、29 个分段开关、16 个联络开关。各电源点和线路开关的电气极限均为 400 A, 系统总负荷为 3.072 kA。图中实心圆代表合闸、空心圆代表分闸, 括号内为对应馈线段供出的负荷。

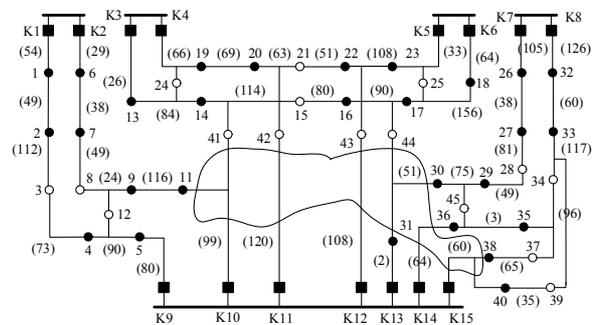


图2 某10 kV复杂配电网
Fig.2 Some 10 kV complex distribution network

假设台风即将影响图 2 中曲线所包围的区域, 根据文献[10]可得相应系统设备(即过热弧)在该灾害下的停运概率。根据过热弧停运率可由式(1)得到该灾害下最小过热区域的停运率, 如表 1 所示。

表 1 最小过热区域停运概率

Table 1 Outage probabilities of the minimum over-heated regions

区域所含节点	停运概率
11,41,K10	0.319 44
42,K11	0.242 07
43,K12	0.203 47
30,31,44	0.290 83
36,K14	0.158 34
38,40,K15	0.243 06

根据本文所述的基于最小过热区域的城市配电网风险评估模型进行仿真分析, 可得各个负荷在相应灾害下的停电风险值。为验证本文风险评估方法在风险值准确性和计算速度快速性上的优势, 分别应用以下两种风险评估方法进行运算: (1)风险评估过程中考虑了配电网重构, 但未应用最小过热区域进行评估计算; (2)风险评估过程中未考虑配电网重构。对本文和以上两种方法的运算结果比较如表 2 所示。其中价值系数单位为万元/A, 风险值的单位为万元。

表 2 配网停电风险计算结果及比较

Table 2 Comparison for the calculation results of 3 cases

负荷量	馈线首端	馈线末端	价值系数	本文	方法 1	方法 2
99	K10	11、41	0.8	25.299 6	25.299 6	25.299 6
116	11	9	0.6	0	0	22.233 0
120	K11	42	1	29.048 4	29.048 4	29.048 4
108	K12	43	0.6	13.184 9	13.184 9	13.184 9
51	31	30、44	0.9	0	0	13.349 1
75	30	29、45	0.8	0	0	17.449 8
49	29	28	0.6	0	0	8.550 4
64	K14	36	0.5	5.066 9	5.066 9	5.066 9
3	36	35、45	0.4	0	0	0.190 0
96	35	34、37	0.6	0	0	9.120 4
60	K15	38	0.9	13.125 2	13.125 2	13.125 2
65	38	37	0.6	0	0	9.479 3
35	40	39	0.4	0	0	3.402 8
运算时间				0.112 4 s	0.236 2 s	0.018 6 s

由表 2 可以看出, 未考虑配网重构的方法 2 对负荷停电风险的评估过于保守, 多个负荷的风险值评估结果远高于真实值; 考虑了配网重构, 但未应用最小过热区域的方法 1 计算时间过长, 不利于灾害预报后对高危线路、高危负荷的应急巡检。在对实际大型复杂配电网进行风险评估时, 本文方法相

较于方法 1 的计算速度优势会更为显著, 有助于灾前针对高危设备的应急巡检。根据风险评估于灾前实时制定防灾预案, 采取巡线检修等措施有针对性地减小灾害下设备停运概率, 可以在一定程度上减小系统风险值, 有效保障重要负荷的正常供电。

4 结语

本文提出了一种基于最小过热区域的城市配电网灾害风险评估算法。首先, 本文考虑了配网负荷转供和紧急切负荷^[14], 克服了传统配电网风险评估中的保守计算, 使其更贴近配网真实风险值; 然后, 量化灾害下配网负荷的停电损失, 具有明确物理意义, 可用于比较电网不同运行工况下不同灾害的危害程度; 与此同时, 以最小过热区域为单位进行配网重构和风险计算, 在未降低评估精度的前提下显著提升了计算速度, 并具备评估在多条关联馈线段同时成为初始故障源时配网风险的能力; 最后通过实际算例验证了本文提出的风险评估方法的实用性和高效性。

参考文献

- [1] 杨德昌, 李勇, REHTANZ C, 等. 中国式智能电网的构成和发展规划研究[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 13-20.
YANG Dechang, LI Yong, REHTANZ C, et al. Study on the structure and the development planning of smart grid in China[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 13-20.
- [2] 毛安家, 张戈力, 吕跃春, 等. 2011 年 9 月 8 日美墨大停电事故的分析及其对我国电力调度运行管理的启示[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 74-78.
MAO Anjia, ZHANG Geli, LÜ Yuechun, et al. Analysis on large-scale blackout occurred in South America and North Mexico Interconnected Power Grid on Sept. 8, 2011 and lessons for electric power dispatching in China[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 74-78.
- [3] 高明, 李文云, 袁德君, 等. 使用故障树理论对电网调度自动化系统应急预案完备度的量化分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 58-63.
GAO Ming, LI Wenyun, YUAN Dejun, et al. Completeness degree quantitative analysis of dispatching automation system emergency preplan based on FTA[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 58-63.
- [4] 何永秀, 朱荏, 罗涛, 等. 城市电网规划自然灾害风险评估研究[J]. 电工技术学报, 2012, 26(12): 205-210.

- HE Yongxiu, ZHU Jiang, LUO Tao, et al. Risk assessment of natural disaster in urban electric power network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 26(12): 205-210.
- [5] 程正刚, 房鑫炎, 俞国勤, 等. 基于脆弱性的电力应急体系灾害损失预评估[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 68-72.
- CHENG Zhenggang, FANG Xinyan, YU Guoqin, et al. Vulnerability based disaster loss pre-evaluation of power emergency system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 68-72.
- [6] 张国华, 张建华, 杨志栋, 等. 电力系统 $N-K$ 故障的风险评估方法[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 17-21.
- ZHANG Guohua, ZHANG Jianhua, YANG Zhidong, et al. Risk assessment method of power system $N-K$ contingencies[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 17-21.
- [7] 范云滩, 刘剑, 李俊娥, 等. 基于符号动力学的配电网结构风险评估[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1244-1251.
- FAN Yuntan, LIU Jian, LI June, et al. Symbolic dynamics based risk assessment of distribution network structure[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1244-1251.
- [8] 李锐, 陈颖, 梅生伟, 等. 基于停电风险评估的城市配电网应急预警方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 19-23.
- LI Rui, CHEN Ying, MEI Shengwei, et al. An early warning method for emergency response based on power failure risk analysis of distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 19-23.
- [9] 汪兴强, 丁明, 韩平平. 互联电力系统可靠性评估的改进等效模型[J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 201-207.
- WANG Xingqiang, DING Ming, HAN Pingping. An improved equivalent model for reliability evaluation in interconnected power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(9): 201-207.
- [10] 何剑, 程林, 孙元章, 等. 条件相依的输变电设备短期可靠性模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 39-46.
- HE Jian, CHENG Lin, SUN Yuanzhang, et al. Condition dependent short-term reliability models of transmission equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 39-46.
- [11] 谢开贵, 吴韬, 黄莹, 等. 基于二分法的高压直流输电系统可靠性最优分解[J]. 电工技术学报, 2010, 24(5): 149-154.
- XIE Kaigui, WU Tao, HUANG Ying, et al. Reliability optimal distribution for HVDC systems using bisection method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 24(5): 149-154.
- [12] MCCALLEY J D, VITTAL V, WAN H, et al. Voltage risk assessment[C] // Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, 1999, 1: 179-184.
- [13] 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 reliability assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 19-25.
- [14] 孙羽, 王秀丽, 王建学, 等. 电力系统短期可靠性评估综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 143-154.
- SUN Yu, WANG Xiuli, WANG Jianxue, et al. An overview of the short-term reliability evaluation of power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 143-154.

收稿日期: 2014-05-07; 修回日期: 2014-08-13

作者简介:

俞隽亚(1991-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: alpsfreaky@126.com

王增平(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统自动化、继电保护、变电站综合自动化等;

田红雨(1964-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护及自动化, 现从事电力系统可靠性管理工作。

(编辑 魏小丽)