

# 考虑复杂转供和预安排停电的配电网可靠性评估

邱生敏, 王浩浩, 管霖

(华南理工大学 电力学院, 广东省 广州市 510640)

## An Improved Algorithm for Reliability Assessment of Distribution Network Considering Complex Load Transfer and Scheduled Outage

QIU Shengmin, WANG Haohao, GUAN Lin

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China)

**ABSTRACT:** A method to simplify distribution network and classify nodes is proposed to reduce calculation burden. Considering capacity constraint, the method to judge whether power load can be transferred via tie-line after the fault is researched and a method to calculate the reliability index based on the judgment of transferring is proposed. The influence of scheduled outage on reliability of distribution network is analyzed and a method to calculate the reliability index of distribution network under scheduled outage is given. The total reliability index of distribution network is the very summation of above-mentioned two calculated reliability indices. Results of calculation example show that the proposed method is feasible.

**KEY WORDS:** reliability assessment of distribution network; scheduled outage; load transfer; capacity constraint

**摘要:** 为减少计算量, 提出了配电网网络简化及节点分类方法。在考虑容量约束的情况下, 分析了故障后判断负荷能否通过联络线实现转供的方法, 提出了基于转供判断的配电网可靠性指标计算方法。分析了预安排停电对配电网可靠性的影响, 提出了预安排停电情况下的配电网可靠性指标计算方法。将以上 2 部分可靠性指标相加可得配电网总的可靠性指标。算例结果验证了该方法的可行性。

**关键词:** 配电网可靠性评估; 预安排停电; 转供; 容量约束

## 0 引言

随着电力系统的发展, 电力系统网架越来越完善, 设备出现故障后仍能保证为大部分用户持续供电, 同时用户对电力系统供电可靠性的要求也越来越高。之前人们更多地关注输电网可靠性, 然而造成用户停电的往往是配电系统故障, 据统计, 由配电网故障引起的停电占有所有停电的 80%<sup>[1]</sup>。因此, 有必要评估配电网可靠性, 以保证电力系统的安全可靠运行。

配电网可靠性分析方法主要为解析法和和模

拟法<sup>[2]</sup>, 其中解析法包括故障模式法和故障后果分析法等, 但随着配电网的扩大, 该类算法的计算量急剧上升, 因此在解析法的基础上出现了很多改进优化算法<sup>[3-5]</sup>, 如最短路法、故障遍历法、网络简化等值法等。该类优化算法可对复杂配电网系统进行简化, 然而该类算法大多未计及故障后的负荷转移, 难以满足可靠性要求。为此, 文献[6]提出了故障后分块削负荷的方法; 文献[7]考虑了电压质量和保护性能等因素; 文献[8-9]利用容量约束考虑了故障后详细的负荷转移情况; 文献[10]提出了适应于大规模实际配电网的可靠性计算方法; 文献[11-12]对馈线模型做了合理假设; 文献[13-15]考虑了开关故障的影响。

需要指出的是, 上述算法几乎只考虑了故障停电情况, 并未考虑预安排停电情况, 也未建立有效的数学模型解决负荷转供问题。根据广东某市供电局 2009 年配电网可靠性统计数据可知, 该市配电网用户平均故障停电时间为 1.68 h, 而用户平均预安排停电时间为 4.49 h。因此, 预安排停电对可靠性指标的影响有可能比故障停电大, 有必要对预安排停电进行建模。预安排停电不仅与供电计划及供电管理水平有关, 而且受到配电网网架结构的影响。

本文将馈线为研究单元, 以等效节点为研究对象, 对故障后负荷进行转供判断, 并且考虑了预安排停电对配电网可靠性的影响, 以获得精确且具有实际应用价值的配电网可靠性评估结果。

## 1 网络简化和节点分类

### 1.1 网络简化

配电网元件众多、结构复杂, 在进行可靠性评估时有必要对其进行等值简化。本文将变电站出线

断路器、架空开关、配电房、电缆线路和架空线路定义为节点，研究对象由原来的复杂配电网元件变为简单节点。

图 1 为简单配电网， $B_1$  为断路器， $L_1 \sim L_3$  为线路， $S_1 \sim S_6$  为负荷开关， $T_1 \sim T_9$  为变压器， $F_1$  为变电站出线。1~8 为该网络等效节点号，其中线路  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  的等效节点号分别为 2、4、7。图 2 为图 1 的等效节点图。

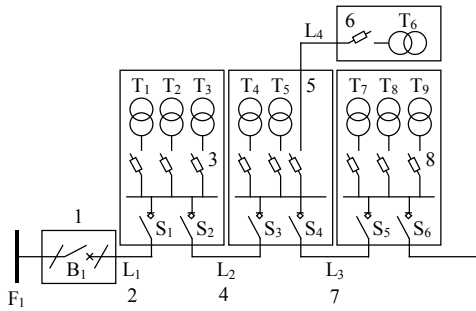


图 1 简单配电网

Fig. 1 Simple distribution network

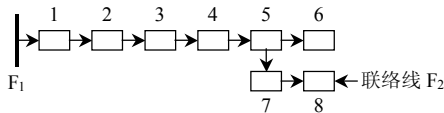


图 2 等效节点

Fig. 2 Equivalent node

节点等效处理原则为：等效节点内任何设备故障影响范围一致，因此可以把等效节点内所有设备当作一个整体进行处理。以图 1 节点 3 为例， $S_1$ 、 $S_3$ 、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  故障均会引起节点 3 所有用户的停电，该等效节点的故障率( $\lambda_3$ )和故障修复时间( $t_3$ )分别为

$$\lambda_3 = \lambda_{s1} + \lambda_{s2} + (1-p) \sum_{i=1}^3 \lambda_{Ti} \quad (1)$$

$$t_3 = \frac{\lambda_{s1}t_{s1} + \lambda_{s2}t_{s2} + (1-p) \sum_{i=1}^3 \lambda_{Ti}t_{Ti}}{\lambda_3} \quad (2)$$

式中： $p$  为配变熔断器可靠率； $\lambda_{s1}$ 、 $\lambda_{s2}$ 、 $\lambda_{Ti}$  分别为  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $T_i$  的故障率； $t_{s1}$ 、 $t_{s2}$ 、 $t_{Ti}$  分别为  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $T_i$  的故障修复时间。

### 1.2 节点分类

假设节点 A 沿着馈线路径返回到该回线路出线断路器需要经过节点 B，则称节点 A 为节点 B 的下游节点；如果未经过节点 B，则节点 A 称为节点 B 的上游节点。图 2 中，节点 5 沿着路径回到出线断路器，需要经过节点 1~4，因此节点 5 称为节点 1~4 的下游节点。由于此路径不经过节点 6~8，因此节点 5 称为节点 6~8 的上游节点。

配电网中，由于首端断路器的保护，某回馈线元件发生故障，并不会影响其他馈线的供电。故障发生后，由故障节点开始向上搜索到断路器，断路器的所有下游节点均停电 1 次。各节点停电时间区别较大：1) 故障节点停电时间为故障修复时间；2) 故障节点的下游节点若不能实现转供，则其停电时间也为故障修复时间；3) 故障节点的下游节点若可以实现转供，则其停电时间为转供时间，同时本文的转供判断即针对故障节点的下游节点进行；4) 故障节点的上游节点可在故障隔离之后重合断路器，并恢复供电，因此其停电时间为故障隔离时间。

由以上分析可知，配电网节点可分为以下 4 类：

- 1) A 类节点，不受故障影响，不需要停电；
- 2) B 类节点，故障后停电 1 次，停电时间为故障隔离时间；
- 3) C 类节点，故障后停电 1 次，停电时间为转供时间；
- 4) D 类节点，故障后停电 1 次，停电时间为故障修复时间。

## 2 配电网可靠性评估

### 2.1 基于转供判断的配电网可靠性评估

#### 2.1.1 馈线容量约束

由于配电网负荷波动较大，要获得实际负荷较为困难，因此在判断馈线转供时，本文不以实际负荷为参考，而是以馈线上挂接的变压器容量为参考。

设某馈线最大允许通过电流为  $I$ ， $I$  根据馈线的线型及截面积取值，对于采用三相供电的 10kV 配电网，每回馈线必须保持一定的容量裕度。

$$S_{max} = \frac{\sqrt{3}\alpha UI}{\delta\beta} \quad (3)$$

式中： $S_{max}$  为馈线上允许挂接的最大变压器容量； $\alpha$  为线路容量裕度，此处取 0.9； $U$  为馈线电压，即 10kV； $\delta$  为该馈线所有配变的最大负荷同时率，此处取 0.8； $\beta$  为配变负载率，此处取 0.6。

若某联络线本身具有的配变容量之和为  $S_p$ ，则该联络线的可转供容量为

$$S_g = S_{max} - S_p \quad (4)$$

式中  $S_g$  为联络线可提供给与其联络的其他馈线的容量极限，如果超出该极限，将可能导致联络线发生事故。

#### 2.1.2 转供判断

转供原则为使故障后停电用户最少，即 D 类节点最少。图 3 为多联络线配电网等效节点图，馈线

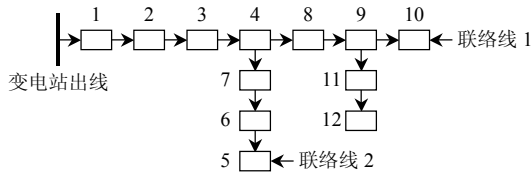


图 3 多联络线配电网等效节点

Fig. 3 Equivalent node of distribution network with multi interconnected feeder

在节点 4 处出现分支，节点 7、8 属于第 1 级分支，节点 9 处也有分支，节点 10、11 属于第 2 级分支，则该馈线最大分支级数为 2。

在同一分支里，对联络节点的上游节点进行转供判断称为下游转供判断，对联络节点的下游节点进行转供判断称为上游转供判断。

图 3 中，如果节点 8 发生故障，则需要做转供判断的节点有 9~12。如果联络线 1 可转供容量足够大，则节点 9~12 均属于 C 类节点。如果节点 9 发生故障，则节点 10 属于 C 类节点，节点 11、12 属于 D 类节点，即使联络线 1 可转供容量足够大，节点 11、12 也不能实现转供。

因此，对于不同类型的节点，可以通过上游联络节点或者下游联络节点实现转供。如果通过下游联络节点转供，则馈线元件故障后一定能够实现转供，如节点 10。如果通过上游节点转供，且联络通道需要经过故障节点，则不能实现该节点的转供。如图 3 中节点 9 故障，则节点 11 的联络通道为：联络线 1-节点 10-节点 9-节点 11，该联络通道经过了故障节点 9，因此不能实现转供。

假设图 3 各节点包含的变压器容量为 1 MVA，联络线 1 可转供容量为 7.5 MVA，联络线 2 可转供容量为 4.5 MVA。转供判断从最大分支级数末端开始进行，具体步骤如下：

1) 对联络线 1 进行下游转供判断，联络线 1 可转供节点 9、10 的负荷。

2) 对联络线 1 进行 2 级分支的上游转供判断，联络线 1 转供节点 11、12 的负荷。

3) 对联络线 1、2 进行 1 级分支的转供判断，联络线 1 可转供节点 4、8 的负荷，联络线 2 可转供节点 4~7 的负荷。由于不能同时由 2 路电源供电，则节点 4 负荷只能有 1 种转供方式。为确定节点 4 负荷的转供方式，需比较 2 回联络线的剩余可转供容量，由剩余可转供容量大的联络线转供节点 4 负荷。由假设条件可知，联络线 1 已经转供了 6 个节点(4、8~12)负荷，剩余可转供容量为  $7.5 - 6 =$

1.5 MVA，联络线 2 已经转供了 4 个节点(4~7)负荷，剩余可转供容量为  $4.5 - 4 = 0.5$  MVA，因此节点 4 应由联络线 1 转供。

4) 接着做主干线的下游转供判断，联络线 1 再转供节点 3 负荷，剩余可转供容量为 500 kVA，不能再转供节点 1、2 负荷。

由以上分析可知，节点 1、2 不能实现转供，节点 3~10 可以通过下游转供，节点 11、12 可以通过上游转供。因此，如果节点可通过下游通道转供，则其一定能实现转供；如果节点通过上游通道转供，则故障节点的位置决定其是否能够实现转供。

一般情况下只需要对故障节点的下游节点做转供判断，但若故障节点为变电站出线断路器，则其后所有节点均为故障节点的下游节点，因此需对该种情况下的所有节点进行转供判断。

对于节点 A， $\Omega$  为故障后能为节点 A 提供转供的联络线集合， $\Omega = \{\text{联络线 1, 联络线 2, \dots, 联络线 } n\}$ 。

若  $\Omega$  为空集，则节点 A 不能实现转供。若  $\Omega$  只包含 1 回联络线，如联络线 1，则如果联络线 1 接入馈线的节点在节点 A 上游，节点 A 能够实现上游转供；如果联络线 1 接入馈线的节点在节点 A 下游，节点 A 能够实现下游转供。

所有节点转供判断结果共有 3 种：1) 能够实现下游转供；2) 能够实现上游转供；3) 既不能实现上游转供也不能实现下游转供。

转供判断流程如图 4 所示。

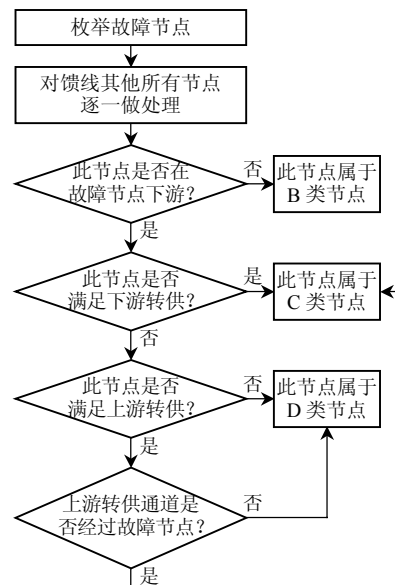


图 4 转供判断流程

Fig. 4 Flow chart of load transfer judgement

### 2.1.3 可靠性指标计算

本文利用故障遍历法估算可靠性指标。对配电

网内每条馈线所有节点依次进行故障假设，利用转供判断结果确定各个节点的停电时间，并求取所有故障情况下的系统总的停电时户数、停电次数和停电缺供电量，将该叠加结果除以系统总用户数，即可得到系统用户平均故障停电次数  $S_{AIFI}$ 、系统用户平均故障停电时间  $S_{AIDI}$  和系统用户平均缺供电量  $A_{ENS}$ 。

$$S_{AIFI} = [\sum_{i=1}^n \lambda_i (N_{Bi} + N_{Ci} + N_{Di})] / \sum_{i=1}^n N_i \quad (5)$$

$$S_{AIDI} = [\sum_{i=1}^n \lambda_i (N_{Di} t_i + N_{Bi} t_g + N_{Ci} t_z)] / \sum_{i=1}^n N_i \quad (6)$$

$$A_{ENS} = [\sum_{i=1}^n (S_{Di} t_i + S_{Bi} t_g + S_{Ci} t_z) \lambda_i \beta] / \sum_{i=1}^n N_i \quad (7)$$

式中： $n$  为系统节点总数； $\lambda_i$  为节点  $i$  的等效故障率； $N_{Bi}$ 、 $N_{Ci}$ 、 $N_{Di}$  为节点  $i$  发生故障时线路 B、C、D 类节点的用户数； $N_i$  为节点  $i$  的用户数； $t_i$  为节点  $i$  的故障修复时间； $t_g$ 、 $t_z$  为故障隔离时间和转供时间； $S_{Di}$ 、 $S_{Bi}$ 、 $S_{Ci}$  为节点  $i$  发生故障时线路 D、B、C 类节点的变压器容量。

## 2.2 考虑预安排停电的配电网可靠性评估

### 2.2.1 预安排停电和故障停电的区别

配电网的预安排停电主要是由检修设备或建设电网对用户造成的停电。转供电实现的概率越大，预安排停电的时间就越少，因此较为完善的配电网中预安排停电时户数往往较小。由于预安排停电是可以预知的，因此检修或施工之前可对停电区域用户进行隔离和转供，以减少预安排停电的范围。检修或施工的节点(即预安排停电节点)必须停电；预安排停电节点的上游节点可以通过隔离由原来馈线供电；对于预安排停电节点的下游节点，如果其可通过转供通道由其他联络馈线供电，则不需要停电，如果不能实现转供，则必须停电。

由于故障是不可预知的，因此由故障引起的停电范围往往比预安排停电大，且发生故障的同一馈线中各个节点的停电时间并不相同，各节点可在故障隔离之后恢复供电。

### 2.2.2 可靠性指标计算

对于不需要大规模建设及改造的成熟配电网，其每回馈线的各个节点的年预安排停电次数和每次预安排停电时间是比较固定的。如果某地区的配电网建设及改造频繁，则各节点的年预安排停电次数比较大。馈线每次平均预安排停电时间与配电网管理水平有关。假设某地区所有节点发生预安排停

电的概率是相同的，因此该地区的每个节点预安排停电次数  $\lambda_y$  和预安排停电时间  $t_y$  均比较固定，其中， $\lambda_y$  = 地区年预安排停电次数/地区总节点数， $t_y$  = 地区每次平均预安排停电时间。

本文同样利用遍历法对配电网内每条馈线所有节点进行停电假设，并求取所有故障情况下的系统总的停电次数和停电时户数，将该叠加结果除以系统总用户数，即可得到  $S_{AIFI}$ 、 $S_{AIDI}$  和  $A_{ENS}$ 。

$$S_{AIFI} = (\sum_{i=1}^n \lambda_y N_{Di}) / \sum_{i=1}^n N_i \quad (8)$$

$$S_{AIDI} = (\sum_{i=1}^n \lambda_y t_y N_{Di}) / \sum_{i=1}^n N_i \quad (9)$$

$$A_{ENS} = (\sum_{i=1}^n \lambda_y t_y S_{Di} \beta) / \sum_{i=1}^n N_i \quad (10)$$

## 2.3 配电网可靠性指标计算

在第 2.1 及 2.2 节的基础上，将故障时基于转供判断得到可靠性指标与预安排停电情况下的可靠性指标相加，即可得出系统可靠性指标(总用户平均停电次数、总用户平均停电时间和总用户平均缺供电量)。

## 3 算例分析

本节以图 5 所示的具有复杂联络线的配电网为例进行配电网可靠性评估。假设所有负荷节点的变压器( $T_1 \sim T_{39}$ )容量为 1 MVA，所有线路( $L_1 \sim L_{17}$ )长度

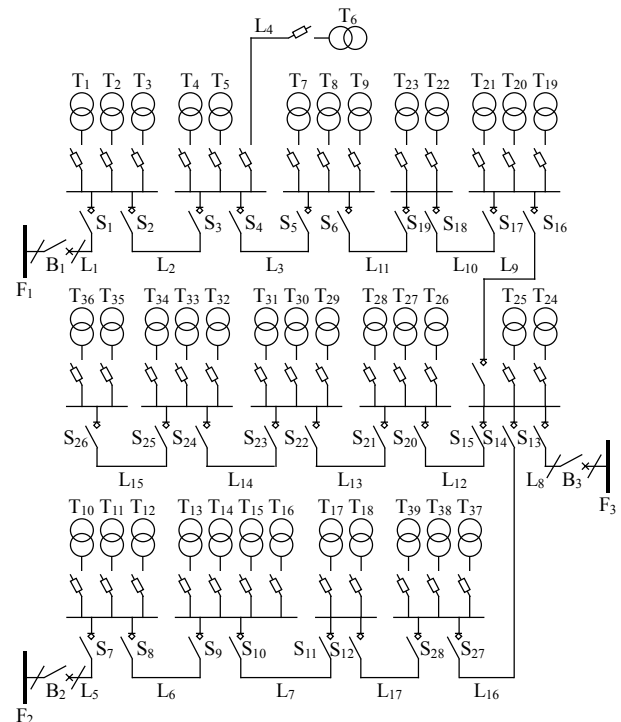


图 5 算例配电网

Fig. 5 Distribution network of example

为1 km,所有馈线的线路截面均为 $300\text{ mm}^2$ , $S_1\sim S_{28}$ 为负荷开关, $F_1\sim F_3$ 为变电站出线, $B_1\sim B_3$ 为变电站出线断路器。

根据历史统计数据,配电网各基本元件的故障率和故障修复时间如表1所示。

表1 元件参数  
Tab.1 Parameters of components

设备类型	故障率/(次·a <sup>-1</sup> )	故障修复时间/(h·次 <sup>-1</sup> )
电缆	0.03	8.0
架空线	0.22	7.0
配电变压器	0.05	5.5
断路器	0.01	10.0
负荷开关	0.01	6.5
熔断器	0.09	4.0

根据供电局管理水平,配电网管理参数如表2所示。

表2 配电网管理参数  
Tab.2 Parameters of distribution network management

故障隔离时间/h	转供时间/h	馈线年预安排停电次数/(次/节点·a)	馈线每次预安排停电时间/h
1.0	1.5	0.2	8.0

采用本文方法对算例系统进行可靠性评估,并与文献[8]结果进行了对比,结果如表3所示, $R_S$ 为系统可靠性指标。

表3 算例系统可靠性评估结果  
Tab.3 Results of evaluation for example's reliability

可靠性指标	$R_S/\%$	$S_{AIDI}/(\text{h/a})$	$S_{AIFI}/(\text{次/a})$	$A_{ENS}/(\text{kW}\cdot\text{h/a})$
故障引起	99.9967	0.29	0.16	296.0
预安排停电引起	99.9873	1.11	0.25	1108.0
总可靠性指标	99.9840	1.40	0.41	1404.0
文献[8]	99.9841	1.39	0.54	1294.3

由表3可知,由故障引起的系统用户平均停电时间为0.29 h,而由预安排停电引起的系统用户平均停电时间却为1.11 h,因此预安排停电对可靠性指标影响往往较大,故有必要提高配电网管理水平。

文献[8]的供电可靠性为99.9841%,而本文计算结果为99.9840%,两结果几乎一致,因此也证明了本文方法的正确性。

此外,应用本文算法评估广东某市区2009年配电网可靠性,并与实际统计结果对比,结果如表4所示。

应用本文算法所得该市供电可靠性 $R_S$ 为99.956%,该市区2009年配电网供电可靠性实际统

表4 某市配电网可靠性评估结果  
Tab.4 Results of evaluation for a city's distribution network

可靠性指标	$R_S/\%$	$S_{AIDI}/(\text{h/a})$	$S_{AIFI}/(\text{次/a})$	$A_{ENS}/(\text{kW}\cdot\text{h/a})$
本文计算结果	99.956	3.85	1.29	4206
实际统计值	99.955	3.92	1.30	4253

计结果为99.955%,与本文算法结果几乎一致,因此也证明了本文算法可适于复杂大规模配电网的可靠性评估。

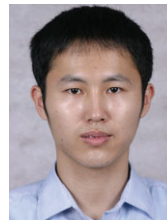
## 4 结论

本文将配电网基本元件等效为简单节点,提出了故障后转供判断方法,并考虑了转供容量约束,同时本文还考虑了预安排停电对配电网可靠性的影响。结合转供判断和预安排停电确定的配电网可靠性指标可综合评估配电网可靠性,本文方法能够较好地适应各种不同网架结构的实际配电网的可靠性评估。供电单位可根据可靠性评估结果指导配电网的规划和日常运行维修工作。由于预安排停电会引起可靠性指标的大幅度下降,因此本文探索了预安排停电对配电网可靠性的影响,关于如何合理安排计划停电以提高供电可靠性将是下一步研究的重点。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] Brown R E, Gupta S, Christie R D, et al. Distribution system reliability assessment using hierarchical Markov modeling[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(4): 1929-1934.
- [3] 周念成, 谢开贵, 周家启, 等. 基于最短路的复杂配电网可靠性评估分块算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(22): 39-44. Zhou Niancheng, Xie Kaigui, Zhou Jiaqi, et al. A distribution system reliability evaluation algorithm based on the shortest path[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(22): 39-44(in Chinese).
- [4] 万国成, 任震, 田翔. 配电网可靠性评估的网络等值法模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 48-52. Wan Guocheng, Ren Zhen, Tian Xiang. A distribution system reliability assessment based on network equivalent model[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 48-52(in Chinese).
- [5] 李志民, 李卫星, 刘迎春. 辐射状配电系统可靠性评估的故障遍历算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 21(11): 53-55. Li Zhimin, Li Weixing, Liu Yingchun. Radial distribution system reliability evaluation of fault traversal algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 21(11): 53-55(in Chinese).
- [6] 邵黎, 谢开贵, 王进, 等. 基于潮流估计和分块负荷削减的配电网可靠性评估算法[J]. 电网技术, 2008, 32(24): 34-35. Shao Li, Xie Kaigui, Wang Jin, et al. Reliability evaluation algorithm of distribution network based on power flow estimation and section load shedding[J]. Power System Technology, 2008, 32(24): 34-35(in Chinese).
- [7] 张国华, 杨京燕, 张建华, 等. 计及电压暂降和保护性能的配网可靠性算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(1): 28-30. Zhang Guohua, Yang Jingyan, Zhang Jianhua, et al. Arithmetic of distribution network reliability calculation in consideration of voltage sags and protective relays[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(1): 28-30(in Chinese).

- [8] 方水平, 管霖. 以负荷点为中心的配电系统可靠性评估算法[J]. 继电器, 2008, 36(20): 21-25.  
Fang Shuiping, Guan Lin. Fault-spreading-method for the reliability evaluation of distribution system based on minimal path method with consideration of capacity constraint[J]. Relay, 2008, 36(20): 21-25 (in Chinese).
- [9] 吴素农, 吴文传, 张伯明. 考虑传输容量约束的配电网可靠性快速评估[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 22-25.  
Wu Sunong, Wu Wenchuan, Zhang Boming. An efficient reliability evaluation method for distribution system with transmission capacity constraints[J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 22-25(in Chinese).
- [10] 管霖, 冯焱, 刘莎, 等. 大规模配电网可靠性指标的近似评估算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 23-26.  
Guan Lin, Feng Yao, Liu Sha, et al. Approximate evaluation algorithm for reliability indices of cosmically distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 23-26(in Chinese).
- [11] 任倩, 张勇军, 任震, 等. 基于馈线分块等值的中压配电网可靠性评估改进 FMEA 法[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(12): 53-56.  
Ren Qian, Zhang Yongjun, Ren Zhen, et al. An improved FMEA distribution system reliability evaluation method based on equivalent of the feeder[J]. Electric Power Automated Equipment, 2007, 27(12): 53-56(in Chinese).
- [12] 束洪春, 张静芳, 刘宗兵. 基于馈线分区的复杂配电网可靠性区间分析[J]. 电网技术, 2008, 32(19): 41-45.  
Shu Hongchun, Zhang Jingfang, Liu Zongbing. Interval analysis on reliability evaluation of complex distribution network based on feeder partitioning[J]. Power System Technology, 2008, 32(19): 41-45(in Chinese).
- [13] 林济铿, 王旭东, 郑卫洪, 等. 基于网络简化的计及开关故障配电网可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 33-35.  
Lin Jikeng, Wang Xudong, Zheng Weihong, et al. Distribution network reliability evaluation based on network simplification and switching fault analyses[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 33-35(in Chinese).
- [14] 彭鹤, 谢开贵, 邵黎, 等. 基于开关影响范围的复杂配电网可靠性顺流评估算法[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 13-16.  
Peng Hu, Xie Kaigui, Shao Li, et al. Down-stream algorithm of reliability evaluation for complex electrical distribution networks based on the effects of switches[J]. Power System Technology, 2007, 31(9): 13-16(in Chinese).
- [15] 熊俊, 肖先勇, 邓武军, 等. 基于广度优先搜索算法和区域节点行向量法的复杂配电网可靠性评估[J]. 电网技术, 2005, 31(9): 27-32.  
Xiong Jun, Xiao Xianyong, Deng Wujun, et al. Distribution system reliability evaluation based on breadth first search algorithm and zone node row vector algorithm[J]. Power System Technology, 2005, 31(9): 27-32(in Chinese).



收稿日期: 2010-11-17。

作者简介:

邱生敏(1985), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划和可靠性、电力系统稳定和控制,  
E-mail: qiuscut@163.com;

王浩浩(1987), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统可靠性、电力系统稳定和控制;

管霖(1970), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划和可靠性、电力系统稳定和控制、人工智能等。

(编辑 徐梅)