

# 计及转供电概率的配电网可靠性评估

李志铿, 杨海森, 陈超

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院, 广州 510663)

**摘要:** 由于线路间互相联络, 配电网通常具有灵活的故障重构能力, 因此其供电可靠性评估必须考虑联络线的转供容量。但传统方法忽略了联络线路负荷波动对其转供容量的影响, 评估结果容易偏向乐观。通过计及联络线路转供容量的随机性, 在此基础上提出了计及负荷转供电概率的城市配电网供电可靠性评估快速算法。采用美国 PG&E 69 节点配电系统对本文所提出的供电可靠性评估方法进行了分析验证。算例分析证明了本文所提方法的正确性, 表明其能够更加全面客观地评估配电网的供电可靠性。

**关键词:** 配电网; 可靠性评估; 供电概率

中图分类号: TM727.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2014)01-0030-04

## Reliability Evaluation for Distribution System Considering Supply Probability

LI Zhikeng, YANG Haisen, CHEN Chao

(Guangdong Electric Power Design Institute, China Energy Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** As a flexible network reconfiguration can be applied in a distribution system, of which reliability cannot be evaluated by common methods applied in normal distribution systems. In this paper, randomness of wind generators, solar generators and loads are considered and the formula for calculating probability of a load supplied by backup sources is derived. Then a new method for fast reliability evaluation, which includes the network reconfiguration and backup sources, is proposed. A reliability evaluation for different reconfiguration schemes based on the PG&E 69-node system in USA is performed by the proposal method. The results validate the theoretical analysis in this paper and indicate that the proposed method could comprehensively evaluate the reliability and thus provide theoretical basis of the self-healing control scheme formulation and evaluation.

**Key words:** distribution system; reliability evaluation; supply probability

配电网是电力系统中与用户关系最密切的环节, 其供电可靠性直接决定了用户用电服务质量, 是供电企业极为关注的指标之一。

我国配电网一般采用闭环设计、开环运行的接线模式, 在线路故障后, 可根据联络线路的转供容量, 通过手动或自动投切开关恢复部分负荷的供电。早期的配电网可靠性评估方法, 如故障模式影响分析法 (failure-mode-effect analysis, FMEA)<sup>[1]</sup>、故障遍历法<sup>[2]</sup>、蒙特卡罗仿真法<sup>[3]</sup>等, 不仅计算量大、速度慢、计算时间长, 而且并未考虑联络线路转供容量约束, 因而其实用性

受到严重限制。

国内外对此进行了深入研究, 提出了馈线分区法<sup>[4]</sup>、回溯法<sup>[5]</sup>、最短路法<sup>[6]</sup>, 以及基于配电网结构分析的网络等效法<sup>[7]</sup>和分块法<sup>[8]</sup>等旨在提高计算效率的解析方法, 但仍未充分考虑联络线的转供容量限制。文献[9]考虑了配电网联络及转供容量约束的影响, 推导了适合于评估大规模配电网可靠性的显式算法公式。文献[10]则考虑了系统发生 N-1 故障时的转供成功率, 将马尔可夫理论应用于配电网的可靠性评估中。文献[11]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。

上述算法均以负荷功率均恒定不变为前提, 因而将联络线转供容量视为恒定值。然而, 由于负荷

收稿日期: 2014-10-01

作者简介: 李志铿(1981), 男, 广东顺德人, 高级工程师, 博士, 主要从事配电系统优化规划研究 (e-mail) lizhikeng@gedi.com.cn。

功率的不确定性, 这一假设实际上并不成立。可见, 必须充分考虑联络线转供容量的不确定性, 建立其概率模型, 在此基础上提出配电网供电可靠性评估的快速算法。

为此, 本文计及负荷的随机性和联络线转供电的供电次序, 在此基础上推导了非故障停电负荷供电恢复概率的计算公式, 并由此提出了计及负荷转供电概率的城市配电网供电可靠性评估快速算法。最后, 以美国太平洋煤电公司(Pacific Gas and Electric Company, PG&E)的69节点配电网对该算法进行了分析验证。

## 1 基于馈线分区的配电网供电可靠性评估

与输电网相比, 配电网元件数量庞大。由于计算时间和规模的限制, 传统的FMEA法往往难以适用。实际上, 配电网的故障影响范围必定仅限于以开关为端点所组成的局部区域。因此, 首先以开关为界将配电网划分为多个隔离区, 隔离区内的元件视为等效节点, 最后以FMEA法对等效后的配电网进行可靠性评估, 则能够大幅减少计算量。此即馈线分区法<sup>[4]</sup>的基本思路。

对于等效后的配电网, 等效节点 $l$ 的平均故障率 $\lambda_l$ 、平均检修率 $\lambda'_l$ 、平均故障停运时间 $\gamma_l$ 和平均计划检修停运时间 $\gamma'_l$ 分别为<sup>[4]</sup>:

$$\lambda_l = \sum_j^{N_s} \lambda_j \quad (1)$$

$$\lambda'_l = \sum_j^{N_s} \lambda'_j \quad (2)$$

$$\gamma_l = \sum_j^{N_s} \frac{\lambda_j \gamma_j}{\lambda_l} \quad (3)$$

$$\gamma'_l = \sum_j^{N_s} \frac{\lambda'_j \gamma'_j}{\lambda'_l} \quad (4)$$

式中,  $\lambda_j$ 、 $\lambda'_j$ 、 $\gamma_j$ 和 $\gamma'_j$ 分别为等效节点 $l$ 中元件 $j$ 的平均故障率、平均检修率、平均故障停运时间和平均计划检修停运时间;  $N_s$ 为该等效节点 $l$ 所包含的实际的元件数。

根据故障后果的不同, 将引起某一个等效节点 $l$ 停运的其他等效节点分为4类<sup>[8]</sup>:

(1)A类节点。该类节点的故障所导致 $l$ 的停运时间, 等于该节点自身的故障修复时间。

(2)B类节点。该类节点的故障也将引起 $l$ 的停运, 但通过转供电倒闸操作, 能够恢复 $l$ 的供电。

(3)C类节点。该类节点同样将引起的 $l$ 停运, 但故障隔离后即能够恢复正常。

(4)D类节点。除了A、B和C类节点以外的其他节点。

基于上述分类, 节点 $l$ 的平均停运率 $\lambda_{sl}$ 、平均停运时间 $\gamma_{sl}$ 和年平均停运时间 $U_{sl}$ 分别为:

$$\lambda_{sl} = \sum_{i \in \Omega_{abc}} (\lambda_i + \lambda'_i) \quad (5)$$

$$U_{sl} = \sum_{i \in \Omega_{abc}} \lambda_i \gamma_i + \sum_{i \in \Omega_a} \lambda'_i \gamma'_i \quad (6)$$

$$\gamma_{sl} = \frac{U_{sl}}{\lambda_{sl}} \quad (7)$$

式中,  $\Omega_{abc}$ 为属于节点 $l$ 的A、B、C类节点集合;  $\Omega_a$ 为属于 $l$ 的A类节点集合。

## 2 计及转供电概率的可靠性评估

### 2.1 随机变量的概率模型

#### 2.1.1 负荷随机概率模型

配电网负荷可被看作是一个随机变量, 且可用正态分布来近似反映其概率特性<sup>[12]</sup>:

$$f(P_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left[-\frac{(P_L - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (8)$$

式中,  $\mu$ 为数学期望,  $\sigma^2$ 为方差,  $P_L$ 为负荷功率。

#### 2.1.2 联络线路转供容量的处理

由于负荷功率波动, 因此联络线路的转供容量显然非恒定不变, 而是可被看作一个随机变量 $P_{Ts}$ :

$$P_{Ts} = P_s - P_L \quad (9)$$

式中,  $P_s$ 为联络线路的额定容量。

### 2.2 负荷的供电恢复概率

由于联络线的转供容量限制, 非故障停电负荷获得供电恢复是一个概率事件。由于联络线路可以有多回, 其容量限制各不相同, 而且, 非故障停电负荷获得供电恢复的优先级往往也并不相同。因此, 非故障停电负荷获得供电恢复的概率与联络线的转供容量限制以及采用何种故障恢复策略有关。

故障恢复策略实质上反映了用于进行故障恢复的联络线组合, 以及该联络线组合对失电负荷的供电次序。这一供电次序是在满足先近后远的物理路径<sup>[2]</sup>的基础上, 根据失电负荷的容量、重要程度、用户数等属性决定的。

以 $N$ 表示某一线路的联络线路数,  $\Omega_{sk}$ 表示根据某一供电次序, 由联络线转供容量所确定的失电

负荷集合, 则可通过状态枚举计算负荷点  $l$  获得后备电源供电的概率  $p_{r,l}$ :

$$p_{r,l} = 1 - \prod_{k=1}^N \text{prob}\{P_j < P_{j,l}, l \in \Omega_j\} \quad (10)$$

式中,  $\text{prob}\{\cdot\}$  为事件概率;  $P_{j,l}$  为在联络线  $j$  的供电次序中, 首个负荷到负荷  $l$  的总负荷需求;  $P_j$  为联络线  $j$  的转供容量。

以某一线路上有联络线 a 和 b 为例, 应用公式 (10) 可得非故障停电负荷  $l$  的供电概率为:

$$p_{r,l} = 1 - \text{prob}\{P_a < P_{a,l}, l \in \Omega_a\} \text{prob}\{P_b < P_{b,l}, l \in \Omega_b\} \quad (11)$$

式中, 第二项表示负荷  $l$  不能仅由联络线 a 供电的概率; 第三项为负荷  $l$  不能仅由联络线 b 供电的概率。

### 2.3 可靠性指标计算

假设了 B 类节点计划检修时, 可以制定完善的预安排停电计划, 事先将负荷  $l$  切换至联络线, 完全避免其停电, 在计及负荷的供电恢复概率后, 式 (5) 和 (6) 应修正为:

$$\lambda_{sl} = \sum_{i \in \Omega_{abc}} (\lambda_i + \lambda'_i) \quad (12)$$

$$U_{sl} = \sum_{i \in \Omega_{ac}} \lambda_i \gamma_i + \sum_{i \in \Omega_b} \lambda'_i \gamma'_i + \sum_{i \in \Omega_b} \lambda_i [(1 - p_{r,l,i}) t_1 + p_{r,l,i} t_2] \quad (13)$$

式中,  $p_{r,l,i}$  为元件  $i$  故障或检修时负荷  $l$  的供电恢复概率;  $\Omega_{ac}$  和  $\Omega_b$  则分别为负荷  $l$  的 A、C 类和 B 类节点集合;  $t_1$  为故障修复时间;  $t_2$  为故障隔离和开关切换时间之和。

## 3 算例分析

### 3.1 系统拓扑结构与参数

在美国 PG&E 69 节点配电系统<sup>[13]</sup>的基础上增加线路间的联络, 以此对本文所提出的供电可靠性

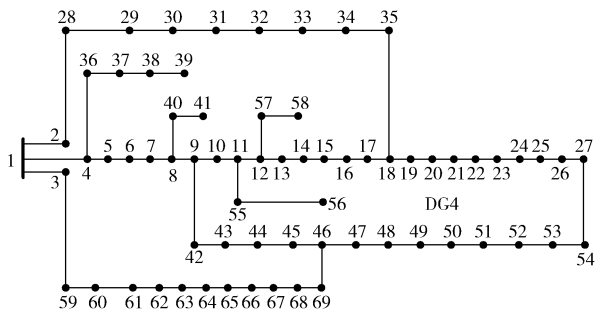


图 1 PG&E 69 节点配电系统

Fig. 1 69-bus Distribution System of PG&E

评估方法进行分析验证。该系统的拓扑结构见图 1, 相关参数见文献[13]。其中, 不失一般性, 假定每一负荷点配变均装有熔断器, 每一馈线段上均装有断路器, 且为了清晰起见, 熔断器和断路器未在图中标识; 负荷的功率期望值取其配变额定容量, 方差为 20%。

各种元件可靠性参数如表 1 所示。

表 1 系统主要元件可靠性参数  
Table 1 Reliability Parameters of Elements

可靠性参数	断路器	线路	配电变压器	熔断器
$\lambda$ (次/a)	0.002	0.05	0.015	0
$\gamma$ (h/次)	4	8	10	—
$\lambda'$ (次/a)	1	0.5	0	0
$\gamma''$ (h/次)	8	8	—	—
可靠动作率	80%	—	—	100%
$t_s$ (h)	0.1	—	—	0

### 3.2 计算结果及分析

假定该配电网按照以下原则确定失电负荷的供电次序: (1) 在保证供电路径连续的前提下, 优先满足重要负荷; (2) 对于重要程度相同的负荷, 优先满足容量较大的负荷点; (3) 对于具有相同重要程度且容量一致的负荷点, 优先满足用户数较多的负荷点; (4) 对于具有相同重要程度、容量和用户的负荷点, 优先满足与联络线邻近的负荷点。

利用本文所提可靠性评估方法, 表 2 给出了对应的供电可靠性指标计算结果, 并与传统的馈线分区法进行了比较。由表 2 可见, 联络线的存在使 SAIDI、CAIDI、ASAI 和 EENS 等可靠性指标大幅改善, 而且线路存在联络线路时, 由于可通过预安排停电, 避免 B 类节点计划检修造成的停电, 因此 SAIFI 也得到大幅减少。此外, 比较两种方法的分析结果, 本文所提方法的计算得到的 ASAI 较传统方法高, 而 EENS、SAIDI、CAIDI 等指标则比传统方法低, 表明传统方法以负荷装机容量来评估联络线的转供容量, 因而其评估结果过于保守; 而本文所提方法更加客观地反映了联络线容量的随机波动对供电可靠性的影响。这一计算结果与理论分析相吻合。

表2 系统可靠性指标

Table 2 Calculated System Reliability Indexes

指标	系统 不存在 联络线	存在联络线	
		基于传 统的馈线 分区法	计及联 络线转供 概率
SAIFI (次/户年)	7.217	5.5890	5.5890
SAIDI (h/户年)	57.625	20.6485	20.2211
CAIDI (h/户年)	7.985	3.3683	3.4513
ASAI	0.99342	0.9976	0.9977
EENS (MWh/年)	240.546	79.152	77.505

## 4 结论

本文充分考虑负荷功率波动导致的联络线转供容量不确定性, 推导了非故障停电负荷的供电恢复概率的计算公式。在此基础上, 通过对传统馈线分区法进行改进, 提出了计及联络线转供容量概率的配电网可靠性评估快速算法。理论分析和算例分析表明, 所提出的可靠性评估算法更加客观地反映了联络线容量的随机波动对供电可靠性的影响, 为全面定量地评估配电网的供电可靠性提供理论依据。

### 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] 李卫星, 李志民, 刘迎春. 复杂辐射状配电系统的可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 69-79.  
LI Weixing, LI Zhimin, LIU Yingchun. Evaluation of Complex Radial Distribution System Reliability [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 69-79.
- [3] 马立克, 王成山. 计及风能/光能混合发电系统的配电系统可靠性分析 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 33-39.  
MA Like, WANG Chengshan. Reliability Analysis on the Integration of Wind/PV Hybrid Distributed Generation in Distribution System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 33-39.
- [4] 谢莹华, 王成山. 基于馈线分区的中压配电系统可靠性评估 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 35-39.  
XIE Yinghua, WANG Chengshan. Reliability Evaluation of Medium Voltage Distribution System Based on Feeder Partition Method [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 35-39.
- [5] 张鹏, 王守相. 大规模配电系统可靠性评估的区间算法[J].

中国电机工程学报, 2004, 24(3): 77-84.

ZHANG Peng, WANG Shouxiang. A Novel Interval Method for Reliability Evaluation of Large Scale Distribution System [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 77-84.

- [6] XIE Kaigui, ZHOU Jiaqi, BILLINTON R. Reliability Evaluation Algorithm for Complex Medium Voltage Electric Distribution Networks Based on the Shortest Path [J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(6): 686-690.
- [7] 万国成, 任震, 田翔. 配电网可靠性评估的网络等效法模型研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 48-52.  
WAN Guocheng, REN Zhen, TIAN Xiang. Study on Model of Reliability Network Equivalent of Distribution System Reliability Evaluation [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 48-52.
- [8] 刘柏私, 谢开贵, 马春雷, 等. 复杂中压配电网的可靠性评估分块算法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 40-45.  
LIU Bosi, XIE Kaigui, MA Chunlei, et al. Section Algorithm of Reliability Evaluation for Complex Medium Voltage Electrical Distribution Networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 40-45.
- [9] 管霖, 冯焱, 刘莎, 等. 大规模配电网可靠性指标的近似估测算法 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 92-98.  
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): 92-98.
- [10] 聂雅卓, 周步祥, 林楠, 等. 考虑转供容量约束的配电网马尔可夫可靠性算法 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 60-64.  
NIE Yazhuo, ZHOU Buxiang, LIN Lan, et al. Markov Reliability Algorithm for Distribution Network Considering the Alternative Supply Capacity Limitation [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 60-64.
- [11] 邱生敏, 王浩浩, 管霖. 考虑复杂转供和预安排停电的配电网可靠性评估 [J]. 电网技术, 2011, 35(5): 122-126.  
QIU Shengmin, WANG Haohao, GUAN Lin. An Improved Algorithm for Reliability Assessment of Distribution Network Considering Complex Load Transfer and Scheduled Outage [J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 122-126.
- [12] ZHANG P, LEE S T. Probabilistic Load Flow Computation Using the Method of Combined Cumulant and Gram-Charlier Expansion [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(1): 676-682.
- [13] BARAN M E, WU F F. Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, 4(1): 725-734.

(责任编辑 黄肇和)