

# 分布式发电并网运行对配电网可靠性的影响研究

随新鲜, 王 倩, 杨亚强, 张婷婷

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:**主要研究了分布式发电并网运行对配电网可靠性的影响,考虑当前配电网元件和负荷原始参数的不确定性,采用区间算法计算分布式电源并网运行时的可靠性指标。以一个简单的配电网为模型,得出含 DG 的配电网可靠性指标的计算公式。以 IEEE-RBTS Bus 6 测试系统为算例,分别比较分布式电源的未接入、看成额定容量的发电机以及有多个运行状态的发电机组等情况,来分析不同模型对配电网可靠性的影响,并验证分布式发电并网运行在改善电网可靠性方面的作用。

**关键词:**区间算法;分布式电源;并网运行;可靠性评估

**Abstract:** The impact of distributed generation (DG) parallel operation on the reliability of distribution network is studied. Considering the uncertainty of original parameters in both components and loads of distribution system, the indices for the reliability evaluation of distribution network with DG parallel operation based on the interval computation are calculated. Taking a simple distribution system for model, the formulas for the reliability evaluation of distribution network with DG are obtained. Taking RBTS 6-bus distribution system for example, the impact of different model on the reliability of distribution network is analyzed by comparing with the distributed generation which is not switching in, the generators treated as having rated capacity as well as the generators with multiple operating conditions, thus the effect of DG parallel operation in improving the reliability of distribution network is verified.

**Key words:** interval algorithm; distributed generation (DG); parallel operation; reliability evaluation

**中图分类号:** TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)02-0031-03

## 0 引言

目前,全球范围内的分布式发电技术发展速度很快,分布式发电在电能生产中所占比重不断增加,对配电网结构与运行的影响也越来越大<sup>[1]</sup>。在研究中发现,如果 DG (distributed generation)仅作为备用电源则可以提高系统供电的可靠性。文献[2]指出分布式电源作为馈线的备用电源能大大提高配电网运行的可靠性。然而,大量 DG 与电网并网运行,若相互协调不好,则可能降低系统的可靠性。文献[3]指出在系统中出现扰动时,由于 DG 的不确定性,也可能降低系统的整体可靠性。目前,实际系统一旦出现扰动,通常会切除所有的 DG 使系统恢复到原来的结构,但这并不是最佳解决方案。因此,研究分析 DG 并入配电网后对可靠性的影响具有重要意义。

考虑当前配电网元件和负荷原始参数的不确定性,采用了区间算法来计算分布式电源与电网并网运行时的可靠性指标,并分析不同的分布式电源模型对

配电网可靠性带来的影响。

## 1 基于区间算法的配电网可靠性评估

### 1.1 可靠性区间运算

若给定的区间数均

$[x] = [\underline{x}, \bar{x}]$ ,  $[y] = [\underline{y}, \bar{y}]$ , 且  $\underline{x}, \underline{y}, \bar{x}, \bar{y}$  均大于 0, 则

$$[x] + [y] = [\underline{x} + \underline{y}, \bar{x} + \bar{y}],$$

$$[x] - [y] = [\underline{x} - \bar{y}, \bar{x} - \underline{y}], [x] \cdot [y] = [\underline{x}\underline{y}, \bar{x}\bar{y}],$$

$$[x]/[y] = [\underline{x}/\bar{y}, \bar{x}/\underline{y}] = [\underline{x}/\bar{y}, \bar{x}/\underline{y}]^{[4]}$$

设各负荷点  $i$  的可靠性指标:平均故障率  $[\lambda_i]$  和年平均停运时间  $[U_i]$ 。而负荷点  $i$  的平均停运持续时间  $[\gamma_i]$  可由反演公式求得。

$$[\gamma_i] = \Phi([\lambda_i], [U_i])$$

此时,  $\Phi([\lambda_i], [U_i]) = [\underline{U}_i/\underline{\lambda}_i, \bar{U}_i/\bar{\lambda}_i]$

系统的平均故障率为  $[\lambda_s] = \sum [\lambda_i]$ , 系统的年平均停运时间为  $[U_s] = \sum [U_i]$ , 则系统的平均停运持续时间为  $[\gamma_s] = \Phi([\lambda_s], [U_s]) = [\underline{U}_s/\underline{\lambda}_s, \bar{U}_s/\bar{\lambda}_s]$ 。

### 1.2 含 DG 的配电网可靠性计算模型

一个含 DG 的简单配电网如图 1 所示。

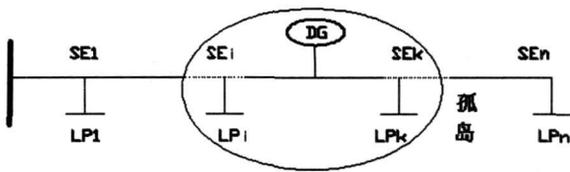


图 1 含 DG 配电网的结构示意图

图 1 中断路器、隔离开关及变压器等元件未画出,且其故障率均为零。对于含分布式电源系统中的一个孤岛来说,发电量并非总是满足该岛负荷的需求,系统会根据情况做出反应,切除部分负荷或者从该岛断开分布式电源。这里采用启发式孤岛划分算法使 DG 迅速地最优地向配电网供电<sup>[5]</sup>。

先假设孤岛能够形成,孤岛内 DG 上游侧 (DGU) 的负荷 LP 问题属于 DG 与供电干线的二重故障问题 (供电干线的二重故障影响小忽略不计),且负荷点所在的供电干线段发生故障,负荷点必停电,恢复供电的时间由线路故障修复时间决定;对于孤岛内 DG 下游侧 (DGD) 的负荷点 LP<sub>k</sub> 除了 DG 与供电干线的二重故障影响外, DG 与负荷点之间的供电干线段发生故障亦可导致负荷点停电。则负荷点 LP<sub>x</sub> 的故障率和年平均停电时间为

$$[\lambda_{LP_x}'] = \begin{cases} \sum_{q=1}^N [\lambda_b] [\lambda_q] ([\gamma_b] + [\gamma_q]) \\ + [\lambda_x] \text{--- DGU} \\ \sum_{q=1}^N [\lambda_b] [\lambda_q] ([\gamma_b] + [\gamma_q]) + \sum_{p=1}^M [\lambda_p] [\gamma_p] \\ + [\lambda_x] \text{--- DGD} \end{cases} \quad (1)$$

$$[U_{LP_x}'] = \begin{cases} \sum_{q=1}^N [\lambda_b] [\lambda_q] [\gamma_b] [\gamma_q] \\ + [\lambda_x] [\gamma_x] \text{--- DGU} \\ \sum_{q=1}^N [\lambda_b] [\lambda_q] [\gamma_b] [\gamma_q] + \sum_{p=1}^M [\lambda_p] [\gamma_p] \\ + [\lambda_x] [\gamma_x] \text{--- DGD} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $[\lambda_b]$ ,  $[\gamma_b]$ ——DG 的故障率和故障平均修复时间;

$[\lambda_q]$ ,  $[\gamma_q]$ ——处于负荷点 LP<sub>x</sub> 与 DG 两者前面的各条供电干线段的故障率和故障平均修复时间;

$[\lambda_p]$ ,  $[\gamma_p]$ ——DG 与负荷点 LP<sub>x</sub> 之间各条供电干线段的故障率和故障平均修复时间;

N, M——处于负荷点 LP<sub>x</sub> 与 DG 两者前面的供电干线段的条数和 DG 与负荷点 LP<sub>x</sub> 之间的供电干线段的条数。

由于 DG 发电量并非总能满足岛内的负荷需求,需判定形成孤岛的的概率。若孤岛不能形成,可按系统没有安装 DG 情况分析<sup>[6]</sup>。设 LP<sub>x</sub> 表示包含在 DG 孤岛内的任一负荷点,则  $[\lambda_{LP_x}'']$ ,  $[U_{LP_x}'']$  和  $[\gamma_{LP_x}'']$  分别为负荷点 LP<sub>x</sub> 在无 DG 作用下的故障率、年平均停电时间和平均停运持续时间。

取负荷点 LP<sub>x</sub> 被包含在 DG 孤岛内的概率为 P<sub>LP<sub>x</sub>'</sub>, 则孤岛内负荷点的可靠性指标的计算公式如下。

$$[\lambda_{LP_x}] = P_{LP_x'} [\lambda_{LP_x}'] + (1 - P_{LP_x'}) [\lambda_{LP_x}'' ] \quad (3)$$

$$[\gamma_{LP_x}] = P_{LP_x'} [\gamma_{LP_x}'] + (1 - P_{LP_x'}) [\gamma_{LP_x}'' ] \quad (4)$$

$$[U_{LP_x}] = [\lambda_{LP_x}] [\gamma_{LP_x}] \quad (5)$$

在得到所有负荷点的可靠性指标后,系统的可靠性指标可根据文献 [7] 中相应公式求出。配电网的可靠性指标主要包括:系统平均停电频率 SAIFI 系统平均停电持续时间 SAIDI 用户平均停电持续时间 CAIDI 系统平均供电可用率 ASAI 系统缺供电量 ENSI

## 2 算 例

以 IEEE-RBTS Bus 6 测试系统<sup>[8]</sup>主馈线 F4 为算例,系统结构如图 2 所示。该系统一共有 30 条线路、23 个负荷点、23 个熔断器、23 个用户变压器、21 个隔离开关、4 个断路器, 1183 个用户,总平均负荷为 4.5703 MW。在主馈线 23 和 29 处分别加入 1 个分布式电源 DG,其最大输出功率均为 1 MW。计算过程中假设断路器和熔断器的故障率为 0,隔离开关操作时间为 0.5 h 其区间值为 [0.4, 0.6]。各馈线的故障率为 0.05 次/km·a 其区间值为 [0.04, 0.06],平均修复时间为 4 h 区间值为 [3, 2, 4, 8]。用户变压器的故障率为 0.015 次/台·a 其区间值为 [0.012, 0.018],平均修复时间为 30 h 区间值为 [24, 36]。分布式电源的故障率为 4 次/a,区间值为 [4, 5, 5, 5],平均修复时间为 50 h 区间值为 [45, 55]。

分布式电源有不同的可靠性模型。将通过分别比较分布式电源的未接入、将其看成额定容量的发电机以及随机容量发电机 (有多个运行状态的发电机) 等情况,来观察不同模型对配电网可靠性的影响。

方案一假设不考虑 DG 作用,先求出各负荷点的可靠性指标 (限于篇幅,此处不再列举各负荷节点的

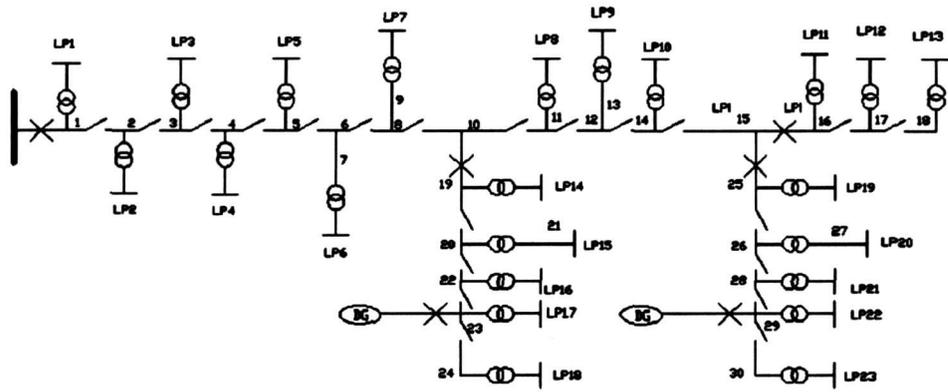


图 2 含 DG 的 IEEE-RTS Bus<sup>6</sup>测试系统主馈线 F4 的结构图

1 可靠性指标), 最后计算出系统的可靠性指标。如表所示。

表 1 方案一中系统的可靠性指标

系统可靠性指标	不考虑 DG 作用	
	点值	区间值
SAIFI	1.52486	[1.21989, 1.82980]
SAIDI	4.20144	[2.42643, 5.45850]
CAIDI	2.75530	[1.32606, 4.47458]
ASAI	0.99952	[0.99937, 0.99972]
ENSI	22.97671	[14.07837, 31.42156]

方案二将 DG 看成额定容量的发电机模型来计算配电网可靠性指标。表 2 列出方案二的部分负荷点可靠性指标计算结果与不考虑 DG 情况进行对比。

方案三是将 DG 看成随机容量的发电机组, 表 3 为方案二和方案三的系统可靠性指标的比较结果。

从表 1、表 2、表 3 可以看出:

1) 因原始输入数据的波动, 其系统的可靠性指

表 2 方案二部分负荷点的可靠性指标

部分负荷点	$\lambda$		$\mu$	
	无 DG	方案二	无 DG	方案二
1	[1.0320, 1.5480]	[1.0320, 1.5480]	[1.0096, 2.2716]	[1.0096, 2.2716]
7	[1.0640, 1.5960]	[1.0640, 1.5960]	[2.3104, 5.1984]	[2.3104, 5.1984]
14	[1.5640, 2.3460]	[1.5783, 2.3784]	[2.8800, 6.4800]	[1.3098, 2.9944]
15	[1.5960, 2.3940]	[1.6134, 2.4336]	[3.1616, 7.1136]	[1.6008, 3.6598]
18	[1.5640, 2.3460]	[1.5883, 2.4012]	[4.0112, 9.0252]	[2.4709, 5.6401]
19	[1.5480, 2.3220]	[1.5733, 2.3794]	[4.0720, 9.1620]	[1.2915, 2.9896]
20	[1.5780, 2.3670]	[1.6060, 2.4308]	[4.4480, 10.0080]	[1.6757, 3.8634]

表 3 方案二与方案三的系统可靠性指标对比

系统可靠性指标	方案二		方案三	
	点值	区间值	点值	区间值
SAIFI	1.53428	[1.22595, 1.84357]	1.53237	[1.23552, 1.831493]
SAIDI	3.303767	[1.84767, 4.17640]	3.48330	[1.98811, 4.25829]
CAIDI	2.153301	[1.00222, 3.440667]	2.27311	[1.08551, 3.44655]
ASAI	0.99962	[0.99952, 0.99979]	0.99960	[0.99951, 0.99977]
ENSI	16.33038	[9.84219, 22.05745]	17.65965	[10.65878, 23.83483]

(下转第 52 页)

线稳定评估、市场环境下的输电阻塞问题进行研究并提出初步的解决思路。

基于人工智能的在线稳定评估方法具有在线评估速度快、生成的规则解释性强等优点。新方法可以提供运行调度人员重点监视的潮流量,根据潮流量的大小实时地掌握当前运行方式下电网的稳定水平,生成的规则可以为运行调度人员通过改变运行方式来提高系统的稳定性提供直接的理论依据,但由于该方法还只处于探索起步阶段,仍存在大量技术问题亟待解决。

指出输电阻塞是影响市场环境下电网安全的重要环节,如何完善相关的市场机制,使得电力市场的设计和运行能为电网安全提供更可靠的保障。

### 参考文献

[1] 管霖,曹绍杰.基于人工智能的大系统分层在线暂态稳定评估[J].电力系统自动化,2000,24(21):23-26.

[2] 管霖,王同文,唐宗顺.电网安全监测的智能化关键特征识别及稳定分区算法[J].电力系统自动化,2006,30(21):22-27.

[3] 李军,刘艳,顾雪平.基于信息熵的属性离散化算法在暂态稳定评估中的应用[J].电力系统自动化,2005,29(8):26-31.

[4] 王同文,管霖,章小强,等.基于扩展 k 阶近邻法的电力系统稳定评估新算法[J].电力系统自动化,2008,32

(3):18-21.

[5] 王皓,孙宏斌,张伯明,等.基于混合互信息的特征选择方法及其在静态电压稳定评估中的应用[J].中国电机工程学报,2006,26(7):77-81.

[6] 于之虹,郭志忠.改进主成分分析法用于暂态稳定评估的输入特征选择[J].电力系统自动化设备,2003,23(8):17-21.

[7] 于之虹,郭志忠.遗传算法在暂态稳定评估输入特征选择中的应用[J].继电器,2004,32(1):16-20.

[8] 王同文,管霖.基于模式发现的电力系统稳定评估和规则提取[J].中国电机工程学报,2007,27(19):25-31.

[9] 许涛,贺仁睦,王鹏,等.基于统计学习理论的电力系统暂态稳定评估[J].中国电机工程学报,2003,23(11):51-55.

[10] 冯天晶,杨光.电力市场的输电阻塞管理方案研究[J].高电压技术,2006,32(10):106-108.

[11] 马进,宋永华,卢强,等.开放电力市场环境下的动态阻塞管理[J].电力系统自动化,2004,28(10):23-28.

[12] 彭慧敏,薛禹胜,许剑冰.关于输电阻塞及其管理的评述[J].电力系统自动化,2007,31(13):101-107.

[13] 柯进,管霖.电力市场下的输电阻塞管理技术[J].电力系统自动化,2002,26(14):20-25.

[14] 麻常辉,薛禹胜,鲁庭瑞,等.输电规划方法的评述[J].电力系统自动化,2006,30(12):97-101.

(收稿日期:2009-12-20)

(上接第 33 页)

### 3 结 语

分布式发电并网运行是智能电网发展的必然趋势。正确考虑不同分布式电源的可靠性模型,合理地分布式电源选址定容,可以有效地提高配电网供电可靠性,从而保证分布式发电与传统发电相结合的配电网健康有序的运行与发展。

以上采用了区间算法对配电网在元件及负荷原始参数不确定因素时进行了可靠性评估,使得计算结果更接近工程实际。

### 参考文献

[1] Mukesh Nagpal, Frank Phlips, Richard Fulton, et al. Dispersed Generation Interconnection Utility Perspective [J]. IEEE Transactions on Industry Applications Vol 42, No. 3, May/June 2006.

[2] 钱科军,袁越, ZHOU Cheng-ke 等.分布式发电对配电网可靠性的影响研究[J].电网技术,2008,32(11):74-78.

[3] 王赛一.分布式电源对配电系统的影响[J].上海电力,2006,19(5):515-518.

[4] 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):79-84.

[5] 易新,陆于平.分布式发电条件下的配电网孤岛划分算法[J].电网技术,2006,30(7):50-54.

[6] 王守相,王成山.现代配电系统分析[M].北京:高等教育出版社,2007.

[7] 郭永基.电力系统可靠性分析[M].北京:清华大学出版社,2003.

[8] Allan R N, Billinton R. A Reliability Test System for Educational Purposes—Basic Distribution System Data and Results [J]. IEEE Trans on Power Systems 1991, 6(2): 813-821.

[9] 施伟国,宋平,刘传铨.计及分布式电源的配电网供电可靠性研究[J].华东电力,2007,35(7):37-41.

(收稿日期:2009-08-02)