

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2016.03.011

含分布式电源配电网可靠性的评估方案研究

方卫东

(福建工程学院 信息科学与工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 在原有配电网引入分布式电源的情况下,提出一种基于应用改进最小路法结合可靠性指标求解评估含分布式电源 distributed generation(DG)的配电网可靠性评估方案。以 IEEE - RBTS Bus6 系统为例进行不同方案的仿真。仿真结果表明,所提出的可靠性评估模型可以明显地改善配电网系统对用户提供电能的可靠性。

关键词: 配电网; 分布式电源; 最小路法; 可靠性评估

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2016)03-0262-07

A study of reliability assessment schemes of distribution network with DGs

Fang Weidong

(College of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: A modified minimal path method-based reliability assessment scheme (method) of distribution network considering distributed generations (DGs) was proposed to resolve the reliability of power grid. A distributed source model was established and power circle method was used to determine the maximum range of the island. IEEE-RBTS Bus 6 system with the island model was set as an example to verify the proposed algorithm. The results show that the reliability evaluation scheme is effective in improving the distribution network reliability.

Keywords: distribution network; distributed generation; minimal path method; reliability assessment

配电网在众多 distributed generation(DG)接入并网后,配电网不再像传统电网一样,而是产生了显著的转变。辐射式的供电方式是传统的配电网采用的供电方式,这种方式是通过起点的发电厂进行发电,将电能送入大电网,各地的区域配电系统网络通过高压输电线路接受来自大电网的电能,用户普遍的情况就是通过这样的方法得到电能。然而当数量很多的 DG 引入配电系统,整个配电系统变成了一个遍布 DG 和电力用户的网络,电力用户的用电不再单一地依靠电网的输送,

DG 也成了重要的电力保障环节。这些转变对于传统配电网的结构和电网的运行影响很大,因而原来构建的传统可靠性评估模型以及相应的评估指标体系也将发生一定的变化^[1-2]。

评估系统可靠性的一个重要基础假设,就是系统电源供电完全可以达到系统内全部负荷正常工作的需要。但是加入并入 DG 以后的配电网,对于形成的某个孤岛来说,并没有办法时时满足这个前提,DG 所能提供的电量与负荷的需求往往是变化的,这就需要我们考虑根据运行状况的

收稿日期: 2016-05-15
基金项目: 福建省重大专项专题项目(2013HZ0002-1);福建省教育厅科技项目(JA12230);福建工程学院基金项目(GY-Z10053、GY-Z11070)
作者简介: 方卫东(1969-),男,安徽黄山人,高级工程师,硕士,研究方向:电动汽车融入现代电网。

不同,合理地划分孤岛范围,采取适当增加负荷,切断部分的负荷,或者选择性断开部分 DG 等不同的方案^[3]。因此,如果我们把 DG 当成一般的传统电源来讨论显然不是很合理。比较合理的方案是根据 DG 自身的特点、参数,以及在系统中分布状况,投入运行的情况,进行相应的可靠性研究,建立相应的模型,完善相应的配电网可靠性指标,才能更好地评估配电网的可靠性。

1 配电系统可靠性指标

常用的配电系统可靠性指标按照不同的分类标准可以有不同的划分。按评估对象划分的两类配电系统指标通过负荷点指标、系统指标来确定配电系统的可靠性^[4-6]。

1.1 负荷点指标

系统中的负荷点是否能够向电能的使用者可靠地提供电能是进行分析可靠性的重要指标,主要有三个指标: λ (故障率)、 γ (停运时间)以及 U (年平均停运时间)。

(1) 串联关系的等值系统

串联系统,指的是一旦整个系统包含范围内中出现其中某一个元件失效,这时都会造成整个系统无法工作的系统。

负荷点故障率 λ 所指的是在一年中负荷点因故障原因而引起的停电次数的总和,其公式为:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (1)$$

负荷点每次故障平均停运时间 γ 所指的是从停电至恢复供电所需时长的均值,其公式为:

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (2)$$

负荷点年平均停电持续时间 U 所指的是同一年中某一个负荷点的停电总时长,其公式为:

$$U = \lambda \gamma \quad (3)$$

其中, λ_i 为设备 i 的故障率 (次/a); γ_i 为设备 i 的故障修复时间 (h/次)。

(2) 并联关系的等值系统

并联系统故障发生的条件是所有的元件都产生故障,系统中只要有元件是正常的,系统就可以正常工作。以下是并联系统的负荷点可靠性公式。

负荷点故障率公式为:

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_2 (\gamma_1 + \gamma_2) \quad (4)$$

负荷点每次故障平均停电持续时间的公式为:

$$\gamma = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} \quad (5)$$

负荷点年平均停电持续时间的公式为:

$$U = \lambda \gamma = \lambda_1 \lambda_2 \gamma_1 \gamma_2 \quad (6)$$

1.2 系统指标

(1) 系统平均停电频率指数 (system average interruption frequency index, SAIFI)

这一指数表示配电系统中的电力使用者在一段时长内因为发生故障而造成停电的次数总和。这个指标能够用在一年中某一系统内电力使用者停电的数量之和与该年度由这个系统负责供电的电力用户数相除进行预测:

$$SAIFI = \frac{\sum_i \lambda_i N_i}{\sum_i N_i} \quad (7)$$

式中的 N_i 表示负荷点 i 的用户数量; λ_i 表示负荷点 i 的故障率。

(2) 系统平均停电持续时间指数 (SAIDI) (system average interruption duration index, SAIDI)

这一指数指的是配电网中在一段时间内每个电力用户因为系统发生故障造成停电所持续的时长,该指标能够使用电力使用者在一年中停电持续总时长与该年度由这个系统负责供电的电力用户数相除来进行预测:

$$SAIDI = \frac{\sum_i N_i U_i}{\sum_i N_i} \quad (8)$$

式中的 U_i 表示的是负荷点 i 的等值年平均停电时间。

(3) 系统平均供电可用率指数 (average service availability index, ASAI)

这一指数所指的是配电系统中用户需求的年用电时长跟实际所得到的用电时长的比。假设 8 760 h 是电力用户在一年中需求的供电时长,则 ASAI 可以如式 9 求解:

$$ASAI = \frac{8\,760 \sum_i N_i - \sum_i N_i U_i}{8\,760 \sum_i N_i} \quad (9)$$

(4) 电量不足指标 (energy not supplied index, ENS)

这一指数所指的是在一年的时间中因元件无法正常工作而导致的给电力用户提供电量出现的缺额, 其计算式为:

$$ENS = \sum L_{a(i)} U_i \quad (10)$$

上式中 $L_{a(i)}$ 指的是与停电负荷点 i 相连接的平均负荷 (单位为 kW), 可以用相应负荷点的年峰荷与其负荷系数相乘求得 $L_{a(i)}$ 。

(5) 平均电量不足指标 (average energy not supplied index, AENS)

这一指数所指的是由于整个系统在一整年间的供电量不足从而导致电力使用者的相对停电损失的电量期望值, 其单位为 $\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{用户数} \cdot \text{a})$ 。

$$AENS = \frac{\sum L_{a(i)} U_i}{\sum N_i} \quad (11)$$

(6) 用户平均停电持续时间指标 (customer average interruption duration index, CAIDI)

这一指数所指的是一年中被停电的用户平均停电持续时长, 可以用一年中用户停电持续时长的总和与该年停电用户次数总和相除来进行估计:

$$CAIDI = \frac{\sum_i N_i U_i}{\sum_i \lambda_i N_i} \quad (12)$$

2 最小路法在含分布式电源配电网可靠性评估中的应用

本文提出了计及 DG 的配电网最小路可靠性分析方法。该方法通过对整个系统拓扑结构的矩阵化处理以及 DG 的孤岛划分方式的分析, 采用最小路法对含 DG 的配电网可靠性进行评估。

2.1 最小路法原理分析

以下图较小型的辐射型系统 (图 1) 解释关于利用最小路法进行可靠性评估方法具体处理过程。

在图 1 中的小型系统中, 一旦处于最小路上的元件产生故障状况时, 就会影响相应负荷点的可靠性, 一旦处于非最小路上的元件无法正常工作的话, 当然也会对其可靠性产生影响。先求取最小路。

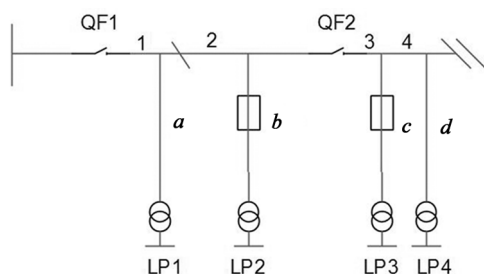


图 1 简单辐射系统

Fig.1 Simple radiation (power) system

为了求解时的方便, 对处于非最小路的元件产生故障对负荷点的影响, 依据系统的实际状况可以等值计算到相应的最小路的节点上; 这样的话, 如果要求取某个负荷点的可靠性指标, 就可以略去非最小路的影响, 直接求解该最小路上的元件与节点。对于最小路上元件处理有几个原则:

(1) 在系统没有备用电源的情况下, 任意的元件如果发生故障情况都会导致该负荷点无法正常工作。如图 1 中如果 LP2 其最小路上的馈线 1 以及馈线 2 和分支线 b 上的元件出现故障, 均会导致 LP2 停止工作;

(2) 在系统有备用电源并且其主馈线上都装设了分段装置的情况下。馈线 1 产生故障情况, LP2 无法正常工作的时间是分段开关的最大动作时间, 假如对馈线 1 进行维护, 那么 LP2 依然可以正常工作。如果最小路的某一元件发生故障状况, 则会使 LP2 无法正常工作。对于非最小路元件处理原则如图 2 所示。

2.2 孤岛划分模型的求解

孤岛的划分方案主要是依据两个点, 一个是依据发生故障状况时具体的故障位置, 以及故障时该区域配电网的时时运行情况, 以此来确定孤岛的划分。在进行孤岛划分时需要考虑两个最重要的原则: 一是在 DG 提供的电能能够满足岛内的总负荷正常工作需求的条件下, 使岛内含有的负荷尽量地多; 二是在考虑孤岛应该包含哪些负荷时, 尽量优先考虑负荷等级更高的负荷。本文遵从上述两个原则, 并结合功率圆确定的最大孤岛范围来划分孤岛。

2.3 计及 DG 最小路法可靠性分析方法

系统引入 DG 后, 一旦产生故障, 如果能够形成孤岛的话, 那么 DG 将可以给孤岛包含的全部负荷点提供电能, 这样该岛内包含的所有负荷点

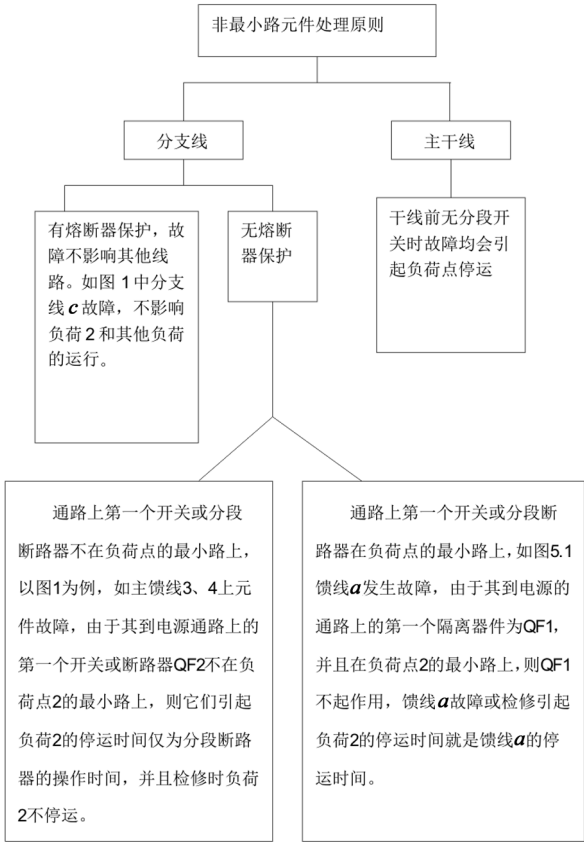


图 2 非最小路元件处理原则

Fig.2 Non-minimal path elements treatment principles

的可靠性就得到了改善。此时处于岛外的其他负荷点,因为其所处的位置超出了 DG 的供电最大范围,将不会造成影响^[7-8]。计算方法与无 DG 的类似,需多加考虑加入 DG 后的影响,即要先进行孤岛的划分,根据约束条件结合功率圆确定孤岛范围,得出孤岛内的负荷点数,计算得出孤岛内负荷点可靠性受影响的改变,求解得到孤岛内负荷点可靠性相关指标结果,通过相关公式就可以求解出整个系统的相关指标。

3 IEEE-RBTS Bus 6 系统可靠性算例分析

IEEE-RBTS Bus6 系统如图 3 所示,系统包含 23 个负荷点,23 个熔断器,23 台变压器,21 个隔离开关,5 个断路器。系统原始数据如表 1-4。对评估配电系统时做一些基本假设:

- (1)系统电源可靠性均为 100%,即假设电源完全可靠;
- (2)假设隔离开关、熔断器的动作百分之百

可靠,假设 0.5 h 是所有隔离开关操作时间;

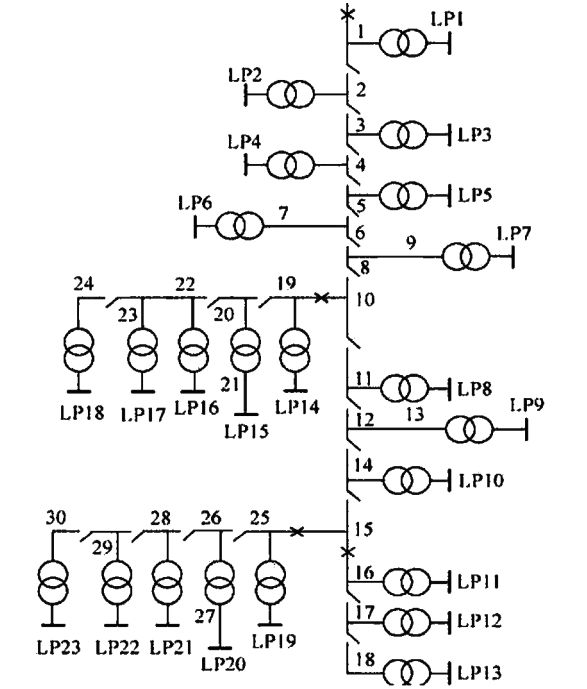


图 3 IEE-RBTS Bus6 系统主馈线 F_4

Fig.3 Main feeder F_4 in IEE-RBTS Bus 6

表 1 设备的可靠性指标

Tab.1 Equipment reliability index

名 称	故障率	平均修复时间/h
馈线	0.05 次/(km · a)	4
配电变压器	0.015 次/台	30

表 2 线路数据

Tab.2 Line data

馈线类型	长度/km	线路标号
1	0.60	7, 13
2	0.75	27
3	0.80	9, 21
4	0.90	4, 10
5	1.60	3, 5, 8, 15, 20, 28
6	2.50	2, 6, 18, 23, 26
7	2.80	1, 12, 16, 22, 25, 30
8	3.20	11, 17, 19, 24, 29
9	3.50	14

- (3)假设无备用变压器,在变压器故障时,相关负荷点必须等变压器修复成功投入运行后才能

恢复供电；

(4)当分支馈线发生故障时,由于有熔断器,故一个负荷点停电,不会影响其他负荷点。

(5)由于孤岛形成的概率计算十分复杂,假设孤岛形成概率为 1。

表 3 负荷数据
Tab.3 Loading data

负荷点的数目	负荷点的编号	负荷的类型	负荷点的用户数	负荷值/MW
1	2	三类	126	0.180 8
1	5	一类	132	0.207 0
2	1,6	二类	147	0.165 9
2	15,20	二类	1	0.186 1
2	4,18	三类	1	0.243 1
2	7,23	一类	1	0.210 1
2	9,21	一类	1	0.283 1
3	3,13,17	三类	1	0.250 1
4	10,12,16,22	二类	76	0.158 5
4	8,11,14,19	三类	79	0.155 4

表 4 负荷点可靠性指标
Tab.4 Reliability index for loading points (data)

负荷点编号	$\lambda_i / \text{次} \cdot \text{a}^{-1}$	$\gamma_i / \text{h} \cdot \text{次}^{-1}$	$U_i / \text{h} \cdot \text{a}^{-1}$
LP1	1.290 0	1.222 9	1.577 5
LP2	1.290 0	1.562 0	2.015 0
LP3	1.290 0	1.779 1	2.295 0
LP4	1.290 0	1.901 2	2.452 5
LP5	1.290 0	2.118 2	2.732 5
LP6	1.320 0	2.492 4	3.290 0
LP7	1.330 0	2.714 3	3.610 0
LP8	1.290 0	3.230 6	4.167 5
LP9	1.320 0	3.619 3	4.777 5
LP10	1.290 0	4.085 3	5.270 0
LP11	1.715 0	3.645 8	6.252 5
LP12	1.715 0	3.972 3	6.812 5
LP13	1.715 0	4.227 4	7.250 0
LP14	1.955 0	2.301 8	4.500 0

续表 4

负荷点编号	$\lambda_i / \text{次} \cdot \text{a}^{-1}$	$\gamma_i / \text{h} \cdot \text{次}^{-1}$	$U_i / \text{h} \cdot \text{a}^{-1}$
LP15	1.995 0	2.476 2	4.940 0
LP16	1.955 0	2.695 7	5.270 0
LP17	1.955 0	2.919 4	5.707 5
LP18	1.955 0	3.205 9	6.267 5
LP19	1.935 0	3.288 1	6.362 5
LP20	1.972 5	3.523 4	6.950 0
LP21	1.935 0	3.658 9	7.080 0
LP22	1.935 0	3.948 3	7.640 0
LP23	1.935 0	4.201 6	8.130 0

本文从以下两种方案对配电系统进行可靠性的计算:方案一:系统主馈线未接入分布式电源,系统只由主网供电;方案二:在系统主馈线接入一个分布式电源,形成孤岛,如图 4 所示。

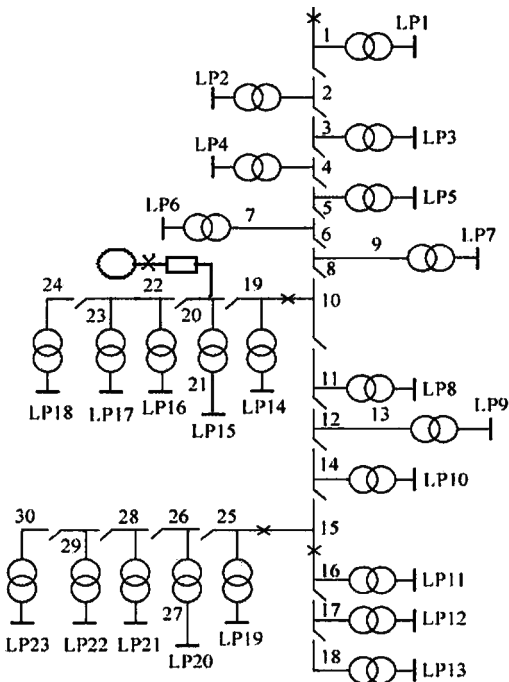


图 4 含 DG IEEE - RBTS Bus 6 系统主馈线
Fig.4 Main feeder in IEE-RBTS Bus 6 with DG

- 1)方案一:系统主馈线未接入分布式电源,系统只由主网供电,计算出系统性指标如表 5。
- 2)方案二:在系统主馈线接入一个分布式电源,形成第一孤岛,第二孤岛不作用。

表 5 系统可靠性指标
Tab.5 System reliability index

系统指标	结果
SAIFI/次/用户数 a ⁻¹	1.520 9
SAIDI/h/用户数 a ⁻¹	4.201 4
CAIDI/h · 停电用户数 a ⁻¹	2.762 4
ASAI(%)	0.999 52
ENS/MW · ha ⁻¹	22.976 7
AENS/用户数 · a	0.019 4

DG 位于负荷点 15。
LP(15)+LP(14)=0.186 1+0.155 4=0.341 5
<P_{DG}=0.5
LP(15)+LP(16)=0.186 1+0.158 5=0.344 6
<P_{DG}<LP(15)+LP(16)+LP(17)=0.594 7,所以
该孤岛包括 LP14、LP15、LP16 三个负荷点,则该
孤岛负荷点可靠性参数如表 6 所示。

表 6 DG 位于 LP15 的孤岛内负荷点可靠性参数
Tab.6 Loading points reliability parameter with DG
in LP15

负荷点	λ /次 · a ⁻¹	U /h · a ⁻¹
LP14	1.670 0	1.837 5
LP15	1.710 0	2.257 5
LP16	1.670 0	2.587 5

计算如下：
LP14：
 $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8 + \lambda_{10} + \lambda_{11} + \lambda_{12} + \lambda_{14} + \lambda_{15} + \lambda_{19} + \lambda_{20} + \lambda_{22} + \lambda_T = 1.670\ 0$
 $U = 4 \cdot \lambda_{19} + 0.5 \cdot (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8 + \lambda_{10} + \lambda_{11} + \lambda_{12} + \lambda_{14} + \lambda_{15} + \lambda_{20} + \lambda_{22}) + 30 \cdot \lambda_T = 4 \times 0.16 + 0.5 \times 1.495 + 30 \times 0.015 = 1.837\ 5$
LP15：
 $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8 + \lambda_{10} + \lambda_{11} + \lambda_{12} + \lambda_{14} + \lambda_{15} + \lambda_{19} + \lambda_{20} + \lambda_{21} + \lambda_{22} + \lambda_T = 1.710\ 0$
 $U = 4 \cdot (\lambda_{19} + \lambda_{20} + \lambda_{21}) + 0.5 \cdot (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8 + \lambda_{10} + \lambda_{11} + \lambda_{12} + \lambda_{14} + \lambda_{15}$

$+ \lambda_{22}) + 30 \cdot \lambda_T = 2.257\ 5$
LP16：
 $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8 + \lambda_{10} + \lambda_{11} + \lambda_{12} + \lambda_{14} + \lambda_{15} + \lambda_{19} + \lambda_{20} + \lambda_{22} + \lambda_T = 1.670\ 0$
 $U = 4 \cdot (\lambda_{19} + \lambda_{20} + \lambda_{22}) + 0.5 \cdot (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_8 + \lambda_{10} + \lambda_{11} + \lambda_{12} + \lambda_{14} + \lambda_{15}) + 30 \cdot \lambda_T = 2.587\ 5$
综合表 4 与表 6,得表 7。

表 7 DG 位于 LP15 时负荷点可靠性指标
Tab.7 Loading points reliability index with DG in LP15

负荷点 编号	λ _i /次 · a ⁻¹	γ _i /h · 次 ⁻¹	U _i /h · a ⁻¹
LP1	1.290 0	1.222 9	1.577 5
LP2	1.290 0	1.562 0	2.015 0
LP3	1.290 0	1.779 1	2.295 0
LP4	1.290 0	1.901 2	2.452 5
LP5	1.290 0	2.118 2	2.732 5
LP6	1.320 0	2.492 4	3.290 0
LP7	1.330 0	2.714 3	3.610 0
LP8	1.290 0	3.230 6	4.167 5
LP9	1.320 0	3.619 3	4.777 5
LP10	1.290 0	4.085 3	5.270 0
LP11	1.715 0	3.645 8	6.252 5
LP12	1.715 0	3.972 3	6.812 5
LP13	1.715 0	4.227 4	7.250 0
LP14	1.670 0	1.100 2	1.837 5
LP15	1.710 0	1.320 1	2.257 5
LP16	1.670 0	1.549 4	2.587 5
LP17	1.955 0	2.919 4	5.707 5
LP18	1.955 0	3.205 9	6.267 5
LP19	1.935 0	3.288 1	6.362 5
LP20	1.972 5	3.523 4	6.950 0
LP21	1.935 0	3.658 9	7.080 0
LP22	1.935 0	3.948 3	7.640 0
LP23	1.935 0	4.201 6	8.130 0

系统可靠性指标计算如下：

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} = \frac{1\ 754.764\ 7}{1\ 183} = 1.483\ 3$$

$$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i} = \frac{4\,962.228\,7}{1\,183} = 4.194\,6$$

$$CAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum \lambda_i N_i} = \frac{4\,962.228\,7}{1\,754.764\,7} = 2.827\,9$$

$$ASAI = \frac{\sum N_i \times 8\,760 - \sum U_i N_i}{\sum N_i \times 8\,760} = \frac{1\,183 \times 8\,760 - 4\,962.228\,7}{1\,183 \times 8\,760} = 0.999\,52$$

$$ENS = \sum L_{a(i)} U_i = 21.638\,5$$

$$AENS = \frac{\sum L_{a(i)} U_i}{\sum N_i} = 0.018\,29$$

综合以上指标数据与表 5 比较结果,显然可以得到这样的结论:在 DG 并网后,对于配电网的负荷点和系统系列可靠性指标有明显的改善。但

从不同的方案下的对比结果我们可以得出结论:如果在不同的位置并入 DG,或者并入不同数量的 DG,以及并入的 DG 的容量大小不同,这些对于系统的可靠性指标的改善程度不一样,以及对于负荷点的影响范围也有所不同。所以在接入 DG 的时候,应该注意接入 DG 的位置及容量,最大程度发挥 DG 的作用。

4 结语

通过构建实际运行情况的 DG 可靠性模型,通过采用最小路法方法引入 DG 的系统可靠性求解,实现对系统的可靠性进行准确评估。以 IEEE-RBTS Bus6 系统为例,采用不同的方案,求解一系列的负荷点和系统可靠性指标,从而得出含 DG 的配电网的可靠性指标变化情况,验证了文中使用的方案的合理性。

参考文献:

[1] 刘传铨,张焰.计及分布式电源的配电网供电可靠性[J].电力系统自动化,2010,31(22):46-49.
[2] 郭永基.电力系统可靠性分析[M].北京:清华大学出版社,2003.
[3] 丁明,王敏.分布式发电技术[J].电力自动化设备,2004,24(7):31-36.
[4] 徐荆州.分布式发电对配电网可靠性的影响分析[D].南京:东南大学,2007.
[5] Van Brunt R J. Physic and chemistry of partical discharge and corona-recent advances and future challenge[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1994,1(5):761-784.
[6] 王志群,朱守真,周双喜,等.分布式发电对配电网电压稳定的影响[J].电力系统自动化,2004,28(16):56-60.
[7] 裴玮,盛 鹄,孔力,等.分布式电源对配网供电电压质量的影响与改善[J].中国电机工程学报,2008,28(13):152-157.
[8] 陈海焱,陈金富,段献忠.含分布式电源的配电网潮流计算[J].电力系统自动化,2006,30(1):35-40.

(责任编辑:肖锡湘)