

计及分布式电源的配电网可靠性分析

张 燃¹, 吕 林², 李 勇², 李志奇²

(1. 四川电力科学研究院, 四川 成都 610072; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 大量的分布式电源接入配电网会对配电网的可靠性带来深刻的影响。针对分布式电源建立了配电网可靠性模型, 结合计及停电用户数最优孤岛划分策略, 对传统的最小割集法进行改进, 分析分布式电源的位置以及容量对可靠性指标的影响, 指出在实际的运行过程中, 应该综合考虑各种因素的影响, 合理利用分布式电源来提高配电网可靠性。

关键词: 分布式电源; 配电网; 可靠性; 孤岛

Abstract: A large number of distributed generation (DG) have a profound impact on the reliability of distribution network. The island operation model is established aiming at the reliability for DG. The traditional minimal cut method is improved combined with the optimal island partition strategy considering the number of customer affected by interruption. The reliability for the four different simulation programs of IEEE RBTS BUS 6 is analyzed, which indicates that DG positions and its capacity will bring different influence on the reliability index. It is also pointed out that the practical operation should take all these factors into consideration so as to lay out the DG to improve the reliability of distribution network.

Key words: distributed generation (DG); distribution network; reliability; island

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)04-0021-04

0 引言

随着大量的分布式电源接入配电系统, 配电系统从传统的辐射型的单源网络变成一个遍布负荷和电源的多源新型配电系统。分布式电源接入增加了配电网潮流不确定性, 给配电网的可靠性带来显著影响^[1, 2]。

分布式电源由于其本身的机组类型及所采用的一次能源的多样化, 如何确定其给配电网可靠性带来的何种影响, 是电力公司及用户关心的问题。研究分析分布式电源的接入对配电网可靠性的影响具有十分重要的意义。

目前, 定量分析含分布式电源的配电网可靠性方面的研究较少。文献[3]建立了分布式电源的状态空间模型, 并采用状态枚举的方法对配电系统进行可靠性评估。文献[4]根据分布式电源自身的特性, 提出了符合实际的可靠性评估模型, 并指出分布式电源特性、负荷特性等因素对可靠性评估影响很大。文献[5]通过网络等效化简, 对风电及光伏发电混合系统的配电网进行序贯的蒙特卡洛模拟, 着重考虑分布式电源模型不同的因素。文献[6]采用

区间数的处理方法, 对参数不确定性进行了分析, 验证了分布式电源可以改善配电网可靠性。

下面针对分布式电源, 建立了含分布式电源的配电网可靠性模型; 结合计及停电用户数的孤岛划分策略, 对传统的最小割集法进行改进, 分析分布式电源的位置以及容量对可靠性指标的影响。

1 配电网可靠性评估指标

按照评估对象的不同, 可靠性指标可分为负荷点指标和系统指标。这里将分别选取两类指标中的部分指标进行计算。

负荷点指标: 平均故障率 λ 、平均停电持续时间 r 以及年平均停电时间 U 。具体计算式^[1, 2]如下。

$$\lambda_i = \sum_j \lambda_j \quad (1)$$

$$U_i = \sum_j \lambda_j r_j \quad (2)$$

$$r_i = \frac{U_i}{\lambda_i} \quad (3)$$

系统指标: 系统平均停电频率 (SAIFI)、系统平均停电持续时间 (SAIDI)、平均供电可用率 (ASAI)、期望故障受阻电能 (EENS)。具体计算式^[7, 8]如

下。

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} \quad (4)$$

$$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i} \quad (5)$$

$$ASAI = \frac{\sum 8760 N_i - \sum U_i N_i}{\sum 8760 N_i} \quad (6)$$

$$EENS = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} L_i U_i}{T_{sum}} \quad (7)$$

在上述所有的计算式中: L_i 、 U_i 、 c_i 分别为负荷点 i 的负荷量、年停电持续时间、单位电量停电损失; T_{sum} 为统计的周期。

2 计及分布式电源的配电网可靠性分析模型

2.1 计及停电用户数的孤岛划分模型

孤岛是分布式电源 (distributed generation, DG) 接入配电网出现的一种新的运行方式。孤岛的出现可以减小停电面积, 提高系统的供电可靠性。电力公司对可靠性进行评价时, 往往是以用户平均停电时间、用户平均停电次数以及供电可用率等指标来进行参考。可见, 用户的数量对可靠性评估有较大的影响, 但部分重要负荷点的用户数可能较少。现有的孤岛划分模型仅从负荷重要性出发, 不考虑节点的用户数量, 可能使整个配电网系统的可靠性不能达到最优。所以, 提出一种计及停电用户数的孤岛划分模型, 综合考虑负荷重要程度和孤岛的用户数量, 从而使配电系统的可靠性尽可能高。孤岛划分模型如下。

$$\begin{cases} \max \sum_{i \in D} \lambda(i) L_a(i) \\ \max \sum_{i \in D} N_i \end{cases} \quad (8)$$

$$s. t. \begin{cases} \sum_{i \in D} L_a(i) \leq P_{DG} \\ \text{区域 } D \text{ 连通} \\ j \in D \end{cases} \quad (9)$$

式中 $L_a(i)$ 为负荷点 i 的负荷; P_{DG} 为 DG 的额定容量; N_i 为负荷点的用户数; D 为孤岛内所有负荷点 $L_a(i)$ 组成的区域; j 为 DG 所在馈线编号; $\lambda(i)$ 为负荷重要度系数, 一类、二类、三类负荷重要度系数分别为 0.5、0.3、0.2。

2.2 孤岛求解方法

由 2.1 节所建立的孤岛划分模型可知, 其实是

一个多目标的问题。这里采用多目标加权组合的方法对上述模型进行求解。具体模型如下。

$$\max \sum_{i \in D} (w_1 \lambda(i) L_a(i) + w_2 N_i) \quad (10)$$

$$s. t. \begin{cases} \sum_{i \in D} L_a(i) \leq P_{DG} \\ \text{区域 } D \text{ 连通} \\ j \in D \end{cases} \quad (11)$$

多目标模型转换为单目标模型后, 在满足条件约束的情况下, 对单目标模型采用深度优先的搜索来求解。

在求解过程中, 根据重要负荷及负荷点用户数的重要程度, w_1 取 0.7, w_2 取 0.3。

2.3 计及分布式电源配电网的可靠性评估方法

文献 [9] 采用了最小割集法对配电网的可靠性进行评估。拟采用改进的最小割集法对可靠性指标进行计算。在最小割集法中, 所有导致负荷点故障的最小割集被列举出来, 然后再根据每个割集中元件的逻辑关系和失效概率对可靠性指标进行计算。这里对最小割集法进行改进, 使之适合于含分布式电源的配电网可靠性分析评估。

改进原则如下: 在求取各个负荷点的故障割集之后, 把分布式电源作为系统的备用电源, 依照孤岛划分策略, 求出各负荷点备用供电途径以及相应的备用割集。若故障割集发生且与备用割集为同一元件或者集合, 那么负荷点的停电持续时间为故障修复时间; 若故障割集发生且与备用割集为不同元件或者集合, 那么负荷点的停电时间为开关操作时间。

除此之外, 在孤岛范围内, 一般认为只有 DG 和主馈线同时出现才会导致负荷点故障, 此时孤岛内元件故障率按 DG 与馈线的二阶故障进行折算, 得到的负荷点 i 的故障率和年平均停电时间计算公式如下。

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^{ND} \lambda_{Dj} \lambda_{Sj} (r_{Dj} + r_{Sj}) \quad (12)$$

$$U_i = \sum_{k=1}^{ND} \lambda_{Dk} \lambda_{Sj} r_{Dk} r_{Sj} \quad (13)$$

对于每个负荷点, 不管 DG 存在与否, 与其相连的馈线段上的故障也会使该负荷点停电, 因此这种情况应作为一个最小割集加入到上面两式中。另外, 对于处在 DG 两侧的负荷点的可靠性也是不同的, 所以, 得到以下结论。

$$\lambda_i = \begin{cases} \sum_{k=1}^{ND} \lambda_{Dk} \lambda_{Sj} (r_{Dk} + r_{Sj}) + \lambda_{Sj} & \text{DG 上游侧负荷点} \\ \sum_{k=1}^{ND} \lambda_{Dk} \lambda_{Ski} (r_{Dk} + r_{Sj}) + \lambda_{Sj} + \sum_{j=1}^{NU} \lambda_{Sj} & \text{DG 下游侧负荷点} \end{cases} \quad (14)$$

$$U_i = \begin{cases} \sum_{k=1}^{ND} \lambda_{Dk} \lambda_{sk} r_{Dk} r_{sk} + U_{sk} & \text{DG 上游侧负荷点} \\ \sum_{k=1}^{ND} \lambda_{Dk} \lambda_{sk} r_{Dk} r_{sk} + U_{sk} + \sum_{j=1}^{NU} U_{sj} & \text{DG 下游侧负荷点} \end{cases} \quad (15)$$

$$r_i = \frac{U_i}{\lambda_i} \quad (16)$$

在式(12)~(16)中, λ_D 、 r_D 、 r_{sk} 、 λ_{sk} 分别是 DG 的平均故障率、DG 的故障平均修复时间、第 k 段馈线的故障率和故障平均修复时间; ND 、 NU 分别是在 DG 和负荷点之前的馈线段数量、在 DG 和负荷点的馈线段数量。

应用上述求得的负荷点等值故障率和故障停电持续时间, 进而可以求得其他的可靠性指标。

3 算例分析

3.1 算例

选取如图2所示的IEEE RBTS BUS6系统^[10]进行分析。该系统一共含有30条线路、23条负荷点、23个熔断器(装设在每条负荷支路首端,图中未标出)、21个隔离开关、4个断路器。馈电线路、负荷和其他设备的原始数据参考文献[11]。设断路器与熔断器均100%可靠动作。隔离开关的操作时间为0.5h。设接入DG的故障率均为4次/a, 平均修复时间为50h; 所有变压器均未设置备用。

为了全面分析分布式电源对配电系统可靠性的影响, 这里对如下4种不同的情况下配电系统可靠性进行分析。

方案1: 系统中不含任何DG。

方案2: 系统中在分支线20和分支线29处分别接入容量为1MW和1MW的DG。

方案3: 系统中在分支线20和分支线29处分别接入容量为0.5MW和0.5MW的DG。

方案4: 把方案2系统中接在分支线29处的DG改接在分支线26处, 电源容量不变。

3.2 结果分析

所计算的配电网可靠性指标主要有: 负荷点平均故障率、负荷点平均停电持续时间、负荷点年平均停电持续时间、系统平均停电频率、系统平均停电持续时间以及系统平均供电可用率指标等。采用改进的最小割集的方法, 针对上述介绍的模型, 对算例进行计算。计算结果如表1~表5所示。

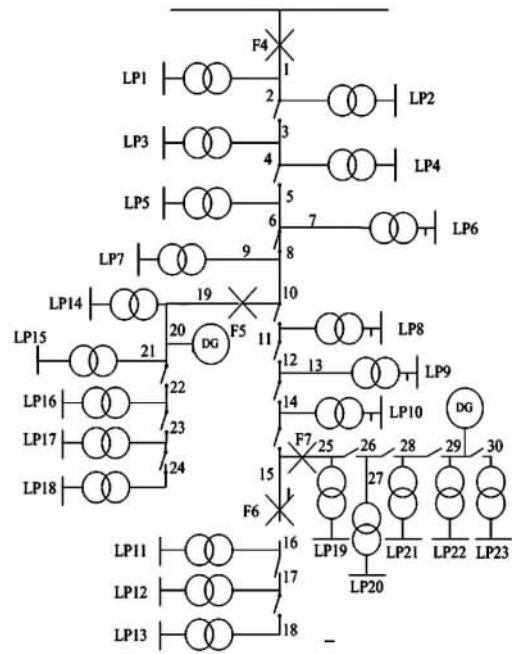


图2 含DG的RBTS Bus6配电网接线图

表1 方案1部分负荷点可靠性指标计算结果

负荷点	$\lambda/(次 \cdot a^{-1})$	$r/(h/次)$	$U/(h \cdot a^{-1})$
LP1	1.290	1.222 9	1.577 5
LP11	1.715	3.645 8	6.252 5
LP14	1.955	2.301 8	4.500 0
LP20	1.973	3.523 4	6.950 0
LP23	1.935	4.201 6	8.130 0

表2 方案2部分负荷点可靠性指标计算结果

负荷点	$\lambda/(次 \cdot a^{-1})$	$r/(h/次)$	$U/(h \cdot a^{-1})$
LP1	1.290	1.222 9	1.577 5
LP11	1.715	3.645 8	6.252 5
LP14	1.977	1.043 0	2.062 2
LP20	2.016	1.313 9	2.649 0
LP23	1.990	1.945 2	3.870 7

表3 方案3部分负荷点可靠性指标计算结果

负荷点	$\lambda/(次 \cdot a^{-1})$	$r/(h/次)$	$U/(h \cdot a^{-1})$
LP1	1.290	1.222 9	1.577 5
LP11	1.715	3.645 8	6.252 5
LP14	1.977	2.317 5	4.582 2
LP20	2.007	3.526 6	7.079 2
LP23	1.979	2.386 5	4.722 6

表4 方案4部分负荷点可靠性指标计算结果

负荷点	$\lambda/(次 \cdot a^{-1})$	$r/(h/次)$	$U/(h \cdot a^{-1})$
LP1	1.290	1.222 9	1.577 5
LP11	1.715	3.645 8	6.252 5
LP14	1.977	1.043 0	2.062 2
LP20	2.300	1.121 4	2.579 2
LP23	1.965	2.310 0	4.5392

表5 系统可靠性指标计算结果

	SAIFI	SAIDI	ASAI	EENS
方案1	1.524 9	4.201 5	0.999 50	22.976 8
方案2	1.534 2	3.307 8	0.999 62	17.8062
方案3	1.533 1	3.830 4	0.999 56	19.394 1
方案4	1.533 3	3.330 3	0.999 62	16.556 0

1) 对比方案1和方案2,由于增加了分布式电源,可以从表中看出,与分布式电源相近的负荷点的故障率略有增加,这是由于计及了分布式故障的影响。但是平均停电持续时间、年平均停电持续时间等负荷点的可靠性指标得到了提高;对比方案1与方案2的系统可靠性指标,可以看出虽然SAIFI有所增加,但是SAIDI、ASAI以及EENS等指标都得到了一定程度的改善,说明了分布式电源能提高配电网可靠性。

2) 对比方案3与方案2,可以看出在电源容量不同的情况下,方案2中负荷点和系统的各项可靠性指标均优于方案3的结果,说明分布式电源容量的不同对配电网的可靠性会产生影响且容量越大影响也越大。

3) 对比方案4与方案3,从表中可看出部分负荷点的可靠性指标均发生了改变。这说明,负荷点的可靠性与分布式电源接入配电网的位置有着密切关系,不同的接入点对配电网可靠性的影响不同。

4 结 论

建立了计及分布式电源的配电网可靠性模型,结合计及停电用户数的孤岛划分模型,并采用改进的最小割集法对算例进行了计算。结果说明分布式电源的接入对配电网可靠性影响很大,分布式电源

的容量的不同,接入位置的不同对其影响也不同,应当综合考虑各种因素,合理利用分布式电源来提高配电网的可靠性水平。

参考文献

- [1] 韦钢,吴伟力,胡丹云,等. 分布式电源及其并网时对电网的影响[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 36-40.
- [2] 郭永基. 电力系统可靠性[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [3] FOTUHI - FIRUZABAD M, RAJABI - GHANAVIE A. An Analytical method to Consider DG Impacts on Distribution System Reliability [C]//Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific. Dalian, China: IEEE/PES, 2005: 1-6.
- [4] ANDRADE WS, BORGES CLT, FALCAO DM. Modeling Reliability Aspects of Distributed Generation Connected to Distribution Systems [C]//Power Engineering Society General Meeting. Montreal Que, Canada [s. n.], 2006: 6.
- [5] 王旭东, 林济铿. 基于网络化简的含分布式电源的配电网可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 38-43.
- [6] 钱科军, 袁越. 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.
- [7] Ghajar R, Billinton R. Economic Costs of Power Interruptions: A Consistent Model And Methodology [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2006, 28(1): 29-35.
- [8] Charles W. R., Richard D. C., Vito J. L. Distribution System Reliability Assessment Due to Lightning Storms [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2153-2159.
- [9] 贺先强, 丁坚勇, 陈丹. 计及分布式发电影响的配电网可靠性评估[J]. 电气应用, 2008, 27(3): 60-64.
- [10] BILLINTON R, JOHNNAVITHULA S. A Test System for Teaching Overall Power System Reliability Assessment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1670-1676.
- [11] ALLAN R N, BILLINTON R, SJARIEF I, et al. A Reliability test System for Educational Purpose: Basic Distribution System data and Results [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(2): 813-820.

(收稿日期: 2012-05-15)