

分布式光伏电源接入对配电网可靠性的影响研究

姜楠¹, 王琦¹, 王恩荣¹, 王华雷², 伏祥运², 封波², 张志福²

(1. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

(2. 连云港供电公司, 江苏 连云港 222004)

[摘要] 随着大量分布式光伏电源的接入, 传统配电网的拓扑结构和潮流运行会发生很大变化, 且光伏电源的不同运行配置也会对配电网可靠性产生不同的影响, 因此有必要对分布式光伏接入配电网后的运行可靠性进行准确的评估和分析. 本文采用网络分区和蒙特卡洛法相结合的评估算法计算了分布式光伏电源接入配电网前后的可靠性指标, 分别研究了分布式光伏电源在接入位置、接入容量、并网方式和运行模式不同时配电网的可靠性程度, 并对可靠性结果进行定量定性分析, 从而研究分布式光伏电源在不同运行配置下对配电网可靠性的影响, 为分布式光伏电源接入配电网的选址提供一定的理论依据.

[关键词] 分布式光伏电源, 配电网, 可靠性评估, 网络分区, 影响因素

[中图分类号] TM615 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2016)02-0001-09

Research on Influence of the Distributed Photovoltaic Supply on Distributed Network Reliability

Jiang Nan¹, Wang Qi¹, Wang Enrong¹, Wang Hualei², Fu Xiangyun², Feng Bo², Zhang Zhifu²

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

(2. Lianyungang Power Supply Company, Lianyungang 222004, China)

Abstract: With the large access of the distributed photovoltaic (PV) supply, both the topology and power flow of the traditional distribution network change greatly, and different operations and configurations of the distributed PV supply yield serious influence on the reliability of the distribution network. Therefore, it is necessary to make accurate assessment and analysis of the reliability of the distribution network with the distributed PV supply. The reliability of the distribution network with and without the distributed PV supply are calculated by combining network partition technology and Monte-Carlo method in this dissertation, the reliability of the distribution network is studied with different access capacities, access positions, synchronizing modes and operation modes of the distributed PV supply, and the obtained calculation results are further analyzed in quantitative and qualitative manner. As a result, the reliability influence factors of distribution network accessing the distributed PV supply are studied under different operations and configurations, which provides a theoretical foundation for the planning design of distribution network accessing the distributed PV supply.

Key words: distributed photovoltaic generation, distribution network, reliability evaluation, network partition, influence factor

配电系统作为电力系统中直接与用户相连的重要环节, 其供电可靠性程度将直接影响到电力用户的用电质量, 因此, 配电系统的可靠性研究是整个电力系统结构及运行特性的重要体现. 近年来, 随着我国能源危机和环境问题的日益严重, 分布式光伏发电技术因其储量丰富、发电灵活和清洁环保等优势被大量接入配电网中, 在改善节能环保效益的同时, 对配电网的安全可靠运行产生了重大影响^[1].

随着分布式光伏电源的大量接入, 配电系统的网络结构和供电模式将发生改变, 由传统的单电源环网供电模式变为多电源与用户互联的新型供电模式, 因此分布式光伏的接入位置、接入容量以及并网方

式的变化都会对配电网中各元件安全稳定运行造成严重的影响;此外,当某一线路发生故障时,还会导致分布式光伏电源对局部电网产生孤岛运行,因此分布式光伏运行模式的变化也会影响系统的可靠运行;而分布式光伏随机性和间歇性还会造成配电网可靠性评估模型和方法的改变,因此对传统配电网的评估算法提出了更高的要求.目前,分布式光伏接入配电网的可靠性研究多集中在对评估算法和模型的改进^[2-5],对其接入位置、并网模式以及运行方式等影响因素的定量定性研究并不多,而分布式光伏的接入对配电网可靠性产生怎样的影响,如何有效地接入才能更好地提高配电网可靠性,是广大用户及电力公司所迫切希望解决的问题.目前已有相关文献对此进行了分析和探讨:文献[6]考虑了风储互补微网中负荷与电源的出力特性,采用蒙特卡洛法分析了微网在孤岛运行下对配电网可靠性产生的影响,但未对其他分布式发电形式及影响因素作深入分析;文献[7]从光储微网的特点入手,采用最小回路法分析了光储微网的接入位置和运行方式对配电网电压及网损的影响,并建立了含光储微网的配电网可靠性评估模型,但缺乏对配电网可靠性的定量定性分析.文献[8]中采用区间算法计算分布式电源接入配电网前后的可靠性指标,分析了分布式电源接入位置不同对配电网可靠性的影响,但该文献只考虑了单个电源接入电网后的影响情况,且未考虑接入容量对可靠性的影响;文献[9]考虑了配网元件参数的不确定性,采用区间算法分析配电网可靠性,研究了多个分布式电源运行方式不同时对配电网的可靠性影响,但该文献只考虑分布式电源的运行方式对可靠性的影响,并未考虑其位置的变化情况.因此,需要针对分布式光伏接入配电网后的影响情况进行综合研究,分析多种影响因素下配电网的可靠性变化情况,为分布式光伏电源接入配电网的选址规划提供理论参考.

本文采用网络分区和蒙特卡洛模拟法相结合的可靠性评估算法对含分布式光伏电源的配电网进行可靠性分析.首先确定了配电系统中各元件的可靠性模型,介绍了复杂网络分区方法,将其与蒙特卡洛方法相结合,使配电网网络结构得到简化,从而大大减小了可靠性计算的时间.然后利用 IEEE RBTS Bus6 系统进行算例分析,研究分布式光伏在其接入容量、接入位置、并网方式和运行模式四种影响因素下对配电网供电可靠性的影响情况.

1 抽样方法和可靠性模型

本文利用序贯蒙特卡洛仿真法实现配电系统的可靠性评估,在计算过程中涉及到的随机抽样方法和可靠性状态模型如下.

1.1 蒙特卡洛随机变量抽样

电力系统中各设备的运行状态持续时间一般可认为是满足指数分布的随机变量,其抽样公式如下^[10]:

$$\begin{cases} TTF = -\frac{1}{\lambda} \ln R, \\ TTR = -\frac{1}{\mu} \ln R. \end{cases} \quad (1)$$

式中, R 代表 $[0,1]$ 区间上均匀分布的随机数; λ 为元件故障率, $\lambda = 1/T_{MTTF}$,其中 T_{MTTF} 为元件平均无故障工作时间; μ 为元件修复率, $\mu = 1/T_{MTTR}$,其中 T_{MTTR} 为元件平均故障修复时间; TTF 表示元件正常工作时间; TTR 表示元件故障修复时间.

1.2 元件可靠性模型

本文设定系统中各元件模型采用两状态马尔可夫模型^[10],其运行状态分别为:正常工作状态和故障停运状态.其故障转移率为 λ ,修复率为 μ ,故障状态概率为 $P_R = \lambda/(\lambda + \mu)$,正常状态概率为 $P_N = \mu/(\lambda + \mu)$.通常,元件的故障率和修复率都是与时间有关的常数,但因元件的正常工作时间 TTF 和故障修复时间 TTR 都是随机变量,因此其概率分布会有所不同.通常假定元件的 TTF 和 TTR 均服从指数分布,其运行状态的随机抽样方法采用上节中的蒙特卡洛抽样法.

1.3 分布式光伏电源可靠性模型

分布式光伏电源在正常运行时,其运行状态对配电网中的负荷影响并不大,但当其运行在孤岛模式下,光伏电源的停运会对系统的负荷点产生影响.由于同正常运行状态相比,孤岛的持续时间较短,因此仅对其进行状态抽样,即只有在系统发生故障后孤岛成形成,才需要对光伏进行抽样,仅抽样一次.

2 基于网络分区和蒙特卡洛法结合的可靠性评估算法

2.1 复杂网络分区

配电系统作为电力系统的末端环节,元件种类和数量众多,结构繁杂,因此在对配电网进行可靠性分析计算时需要对网络模型进行分区简化,以提高系统可靠性计算的效率^[10].图1为典型配电网的网络结构图.由图1可见,配电系统的网络结构复杂且包含众多开关元件,当某一线路发生故障时,需要通过开关元件的隔离操作将线路的非故障部分转接入相邻线路并恢复供电.因此,配电系统中开关元件的作用十分重要,其位置和开断情况决定着配电网中受故障影响的范围和恢复供电的范围.

本文以自动隔离装置(断路器、熔断器等可自动切除故障的装置)为边界将配电网分为多个自动隔离区,再以手动隔离装置(隔离开关)为边界将配电网分为若干个手动隔离区,根据上述方法,可将配电网划分为若干个区域,其中每个不含开关的区域称为最小区.根据此分区方法将图1的系统进行网络分区,其分区模型如图2所示.

图2中每个最小区均用区节点($N_{1.1}$ – $N_{1.4}$, N_2)表示,而开关元件则由开关弧(CB , S_1 – S_4 , F)表示,其箭头方向为正常的潮流运行方向.

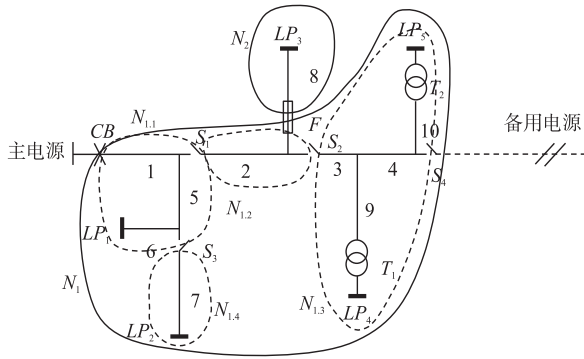


图1 典型配电网网络结构图

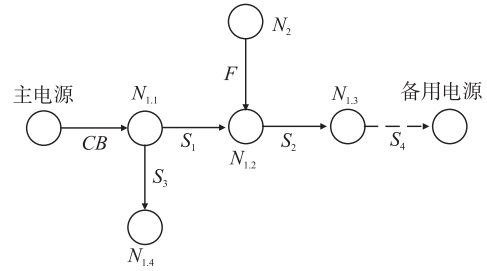


图2 典型配电网网络分区模型

Fig.1 Network structure diagram of typical distribution network

Fig.2 Network partition model of typical distribution network

2.2 可靠性评估指标

配电系统的可靠性指标能够反映配电系统及其设备的结构特性、运行状况和对用户的影响,是衡量一个配电系统可靠性的重要依据.根据可靠性分析的目的和方法,其衡量指标主要分为以下两类:负荷点可靠性指标和系统可靠性指标.

负荷点可靠性指标主要反映单个负荷点的可靠性程度,是可靠性定量分析的基础指标.负荷点可靠性指标众多,目前常用的主要有:负荷点年故障率 λ_i (次/年)、负荷点平均故障修复时间 r_i (小时/次)和负荷点年平均停运时间 U_i (小时/次),其计算公式分别如下:

$$\lambda_i = Dn_i / (T_{ui} + T_{di}), \quad (2)$$

$$r_i = U_i / \lambda_i = T_{di} / n_i, \quad (3)$$

$$U_i = DT_{di} / (T_{ui} + T_{di}). \quad (4)$$

式(2)–(4)中, n_i 表示统计年限内负荷点 i 的停电次数; T_{ui} 和 T_{di} 以小时为单位,表示统计年限内负荷点 i 总工作时间和总停运时间; D 以小时为单位,表示可靠性评估所计及的统计年限,其中非闰年以 8 760 h 计算,闰年以 8 784 h 计算.

系统可靠性指标主要描述的是整个系统的可靠程度,系统指标根据所评估区域中各负荷点指标计算得出,将整个配电系统和主要子系统编制为系统可靠性指标.目前常用的系统指标主要有:系统平均停电频率 SAIFI (次/用户·年)、系统平均停电持续时间 SAIDI (小时/用户·年)、用户平均停电持续时间 CAIDI (小时/用户·年)、系统平均供电可用率 ASAI、电量不足期望 ENS 等.其计算公式分别如下:

$$SAIFI = \sum \lambda_i N_i / \sum N_i, \quad (5)$$

$$SAIDI = \sum U_i N_i / \sum N_i, \quad (6)$$

$$CAIDI = \sum U_i N_i / \sum \lambda_i N_i, \quad (7)$$

$$ASAI = (D \sum N_i - \sum U_i N_i) / D \sum N_i, \quad (8)$$

$$ENS = \sum P_{ai} U_i. \quad (9)$$

式(5)–(9)中, N_i 表示系统中负荷点 i 的用户数量; P_{ai} 表示负荷点 i 的平均负荷, 单位是千瓦时/年; 其余参数同式(2)–(4).

2.3 算法流程

本文将传统解析法中的网络分区法与蒙特卡洛模拟法相结合对含分布式光伏电源的配电系统可靠性进行计算评估.

首先采用网络分区方法将复杂配电网络进行分区简化, 根据分区规则可知, 每个最小分区中各元件的年故障停运率和修复时间均相同, 其次采用蒙特卡洛模拟法(设定系统仿真总时间为 N 年)对系统中各区节点的运行状态进行随机抽样模拟, 避免了对系统同一区域中各元件的重复抽样, 简化了系统可靠性分析的复杂程度, 最后求出整个系统的可靠性分析指标. 该方法简化了配电系统的网络结构, 提高了系统可靠性的分析效率. 其具体流程如图3所示.

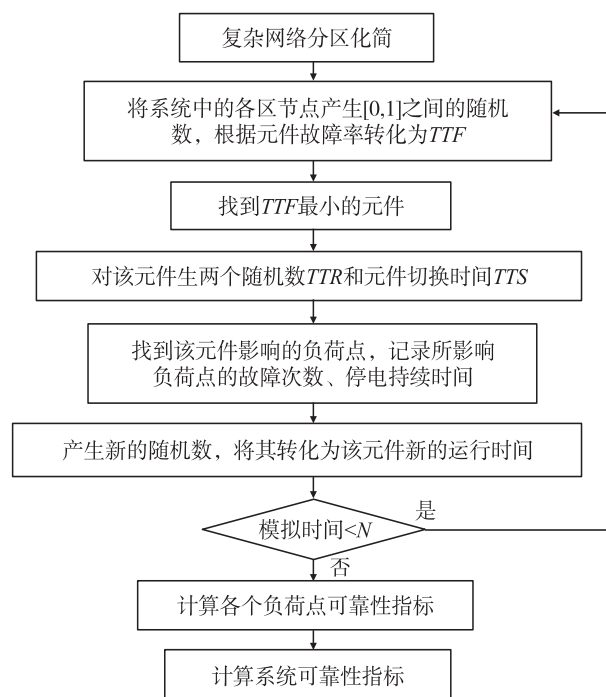


图3 考虑分布式光伏的配电网评估流程

Fig3 Reliability calculation flow chart of distribution system with the distributed PV supply

3 分布式光伏接入对配电系统可靠性的影响

3.1 分布式光伏电源接入位置和接入容量的影响分析

本文采用改造后的 IEEE RBTS Bus6 系统^[11-12]作为算例系统, 该系统包含了 1 条 33 kV 母线、1 条 11 kV 母线、4 条主馈线(F_1 – F_4)、38 个配电变压器(不包括 33 kV 母线和 11 kV 母线之间的两个配电变压器)、40 个负荷点(LP_1 – LP_{40})、40 个熔断器(装设在每条负荷支路的首端, 图中没有画出)、9 个断路器、37 个隔离开关以及 1 个联络开关(N/O), 该系统中各负荷点的用户总数为 2 938 个, 总平均负荷为 10.715 5 MW, 其系统图如图4所示. 本文采用上述评估方法计算该系统的可靠性评估指标, 并分析单台分布式光伏电源在接入容量和接入位置发生变化时, 对配电网可靠性所产生的影响. 由于实际情况下断路器与熔断器的故障概率非常小, 因此在计算过程中忽略其故障率, 设定隔离开关的修复时间为 1 h, 线路故障率为 0.065 次/(km·年), 平均故障修复时间为 5 h, 配电变压器的故障率为 0.001 5 次/(台·年), 平均故障修复时间为 10 h; 分布式光伏电源的故障率为 0.089 次/(台·年), 平均故障修复时间为 1 h.

首先假设该配电系统不加分布式光伏电源, 对配电系统进行可靠性分析, 其次针对分布式光伏电源的接入容量, 设计不同种方案, 具体方案如下:

方案一: 单台分布式光伏电源, 并网型运行方式, 集中式接入 53 号馈线, 接入容量为 1 MW;

方案二: 单台分布式光伏电源, 并网型运行方式, 集中式接入 53 号馈线, 接入容量为 2 MW;

方案三: 单台分布式光伏电源, 并网型运行方式, 集中式接入 53 号馈线, 接入容量为 3 MW;

通过分析计算, 得到部分负荷点的可靠性指标和系统可靠性指标分别如表1、表2所示.

从表1中可以看出:

(1) 分布式光伏接入前后, 负荷点 1 和 15 的平均故障率和平均故障修复时间均没有变化, 这是由于这两个负荷点位于的馈线 F_1 和 F_3 与分布式光伏电源所在的 F_4 馈线成并联结构, 当其负荷点 1 和 15 所在线路发生故障时, 分布式光伏电源很难对该线路上的负荷点起到恢复供电的作用, 使得其可靠性指标均没有变化.

(2) 负荷点 30、31 和 40 的故障率和平均故障修复时间则会发生变化. 将方案 1、2、3 分别与不加光伏时的情况相对比, 负荷点 30、31、40 的故障率和故障修复时间均减少, 且接入的容量越大, 指标下降的

越多;分别对比负荷点 30、31、40 的可靠性指标可见,负荷点 31 的可靠性指标改善程度优于负荷点 30,而负荷点 30 的可靠性指标改善程度又优于负荷点 40,这是由负荷点与分布式光伏电源的电气距离所决定的,与其他两个负荷点相比,负荷点 31 与光伏电源的电气距离是最短的。由此可见,负荷点距离分布式光伏电源接入位置的远近程度也会造成其可靠性的变化,距离分布式光伏电源较近的负荷点,其可靠性的改善程度较好。

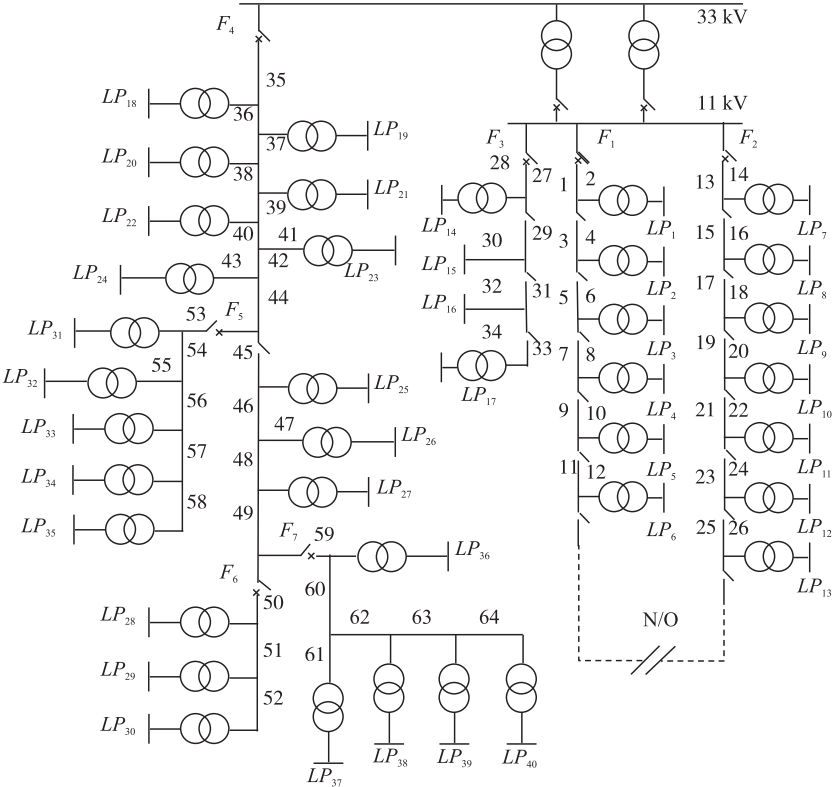


图4 IEEE RBTS Bus6系统图

Fig 4 Distribution system of IEEE RBTS Bus6

表1 分布式光伏电源在不同接入容量下的部分负荷点可靠性指标

Table 1 Partial load point reliability indexes of the distributed PV supply of different access capacities

负荷点	平均故障率				平均故障修复时间			
	不加光伏	方案 1	方案 2	方案 3	不加光伏	方案 1	方案 2	方案 3
负荷点 1	0.330 9	0.330 9	0.330 9	0.330 9	2.455 1	2.455 1	2.455 1	2.455 1
负荷点 15	0.237 5	0.237 5	0.237 5	0.237 5	3.531 8	3.531 8	3.531 8	3.531 8
负荷点 30	2.273 1	2.251 3	2.236 8	2.234 5	5.001 4	4.796 8	4.683 6	4.501 8
负荷点 31	2.565 5	2.401 7	2.329 5	2.285 6	3.790 1	3.578 4	3.416 5	3.402 5
负荷点 40	2.523 1	2.511 3	2.501 2	2.500 1	5.056 8	4.968 8	4.959 6	4.876 9

表2 分布式光伏电源在不同接入容量下的系统可靠性指标

Table 2 System reliability indexes of the distributed PV supply of different access capacities

方案	SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI	ENS
不加光伏	1.212 5	3.719 2	3.067 4	0.999 58	49.539 1
方案一	1.199 8	3.652 6	3.044 3	0.999 69	45.610 6
方案二	1.192 6	3.452 7	2.895 2	0.999 72	42.156 7
方案三	1.189 6	3.362 6	2.826 7	0.999 75	40.922 1

根据各负荷点可靠性指标可以计算出整个系统的可靠性评估指标,由表 2 可看出:

(1)将方案 1、2、3 与不加光伏相比较,系统的可靠性指标中 ASAI 得到提高,其余指标均下降,因此系统的可靠性得到提升,由此可见,分布式光伏电源的接入可以有效的改善系统的可靠性;

(2)分布式光伏电源在接入容量不同时,其系统的可靠性指标也会随之发生变化.随着分布式光伏的接入容量不断增大,系统的可靠性改善程度会不断提高,这是由于当系统中元件发生故障时,分布式光伏电源可对部分受到影响的电源继续供电,从而减少故障负荷点的个数,提升了系统的可靠性.此外,通过分析各系统可靠性指标的数据可见,随着分布式光伏电源的接入容量不断增大,可靠性指标的下降程度是随之减小的.当光伏容量由1 MW变为2 MW时,系统可靠性指标SAIFI、SAIDI、CAIDI和ENS分别下降0.60%、5.47%、4.90%和7.57%,当容量由2 MW升为3 MW时,指标则分别下降约0.25%、2.61%、2.37%、2.93%.由此可见,随着分布式光伏接入容量的增大,系统的可靠性提高速度将逐渐变慢且最终趋于平衡.

除了接入容量外,分布式光伏电源的接入位置也将对配网的可靠性产生一定影响,本节采用单台集中型接入方式,将一个2 MW的分布式光伏电源分别接入系统馈线F4的各条线路中,研究光伏接入位置对系统可靠性的影响,限于篇幅,本文只类举出部分具有代表性接入点的可靠性分析指标,如表3所示.

表3 分布式光伏电源在不同接入位置下的系统可靠性指标

Table 3 System reliability indexes of the distributed PV supply of different access positions

方案	SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI	ENS
35号线路	1.208 9	3.606 5	2.983 3	0.999 69	47.245 3
36号线路	1.206 6	3.566 2	2.955 6	0.999 70	46.326 6
46号线路	1.196 8	3.466 8	2.896 7	0.999 71	43.761 0
53号线路	1.192 6	3.452 7	2.895 2	0.999 72	42.156 7
49号线路	1.196 2	3.463 6	2.895 6	0.999 71	43.545 3
59号线路	1.200 2	3.509 9	2.924 5	0.999 70	45.397 9

将表3中所得的可靠性计算结果进行对比可见,分布式光伏电源接入位置不同时,其系统的可靠性结果也各不相同.分布式光伏电源接入主馈线中段(46、53号线路)和末段(49、59号线路)区域的可靠性要明显高于其接入首段(35、36号线路)的可靠性程度.这是由于当接入位置在中段和末段时,接入点下游区的负荷减少,但光伏电源可恢复的故障负荷比重增加,而接入系统首段时,下游虽然负荷众多,但限于容量,其可恢复的故障负荷比重较少.由此看出,分布式光伏接入位置的选择与系统中的负荷分布情况是具有一定关系的,当接入点下游可恢复的故障负荷比重越大,该接入位置下的系统供电可靠性会越高.

因此,通过对分布式光伏电源在不同接入位置下的供电可靠性分析,可以看出:在本算例中,当分布式光伏电源接入馈线中末端时能够更有效地提高系统的供电可靠程度,同时,分布式光伏电源的最佳接入位置是与系统中的负荷分布情况相关的.

3.2 分布式光伏电源并网方式的影响分析

分布式光伏电源接入配电系统的电压等级一般在10 kV至110 kV之间,不同的电压等级下分布式光伏电源的并网方式也不相同,在实际应用中,分布式光伏电源一般有两种并网方式:集中式并网和分散式并网.集中式并网是指光伏通过低压线路集中接入到配电系统中,采用该方式接入配电系统时与系统侧电源的作用是一致的,因此在运行调度方面不会增加难度;分散式并网是指分布式电源在其接入总容量不变的情况下,经分支馈线分散接入系统中的各个负荷点.本文针对以上两种并网方式,设置下列4种方案:

方案一:单台分布式光伏电源,并网型运行模式,集中式接入53号馈线,接入总容量为3 MW;

方案二:三台分布式光伏电源,并网型运行模式,分散式接入33、53、59号馈线,接入总容量为3 MW,单台光伏发电系统容量为1 MW;

方案三:三台分布式光伏电源,并网型运行模式,分散式接入33、50、59号馈线,接入总容量为3 MW,单台光伏发电系统容量为1 MW;

方案四:三台分布式光伏电源,并网型运行模式,分散式接入33、53、45号馈线,接入总容量为3 MW,单台光伏发电系统容量为1 MW;

由于各方案中分布式光伏电源接入位置不同,其会形成不同的孤岛,因此四次得到的负荷点可靠性指标不具有可比性,在此不再详述.表4是配电系统中分布式光伏电源并网方式不同时系统可靠性指标.

表4 分布式光伏电源在不同并网方式下的系统可靠性指标

Table 4 System reliability indexes of the distributed PV supply of different synchronizing modes

方案	SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI	ENS
方案一	1.189 6	3.362 6	2.826 7	0.999 75	40.922 1
方案二	1.100 9	3.063 2	2.782 4	0.999 78	37.682 1
方案三	1.109 5	3.098 3	2.792 5	0.999 76	39.335 0
方案四	1.105 8	3.071 9	2.778 0	0.999 76	38.267 9

通过对表4中各方案的数据结果对比可见:

(1)将方案1与方案2、3、4比较可见,方案2、3、4的系统可靠性指标SAIFI、SAIDI、CAIDI和ENS与方案1中对应的各指标相比均在减小,而指标ASAI与方案1相比有所提高。因此,相比于集中式并网方式,分布式光伏电源采用分散式并网方式接入配电网可较好的改善系统的可靠性程度。

(2)将方案2、方案3、方案4进行比较,方案2、3、4中分布式光伏电源的不同点在于各自的接入位置不同。通过上文的分析可知,分布式光伏电源接入主馈线首段时的可靠性远低于接入主馈线中段和末段时的可靠性,因此本节的方案主要研究分布式光伏电源分散接入馈线中段和末段时对系统可靠性的影响。方案2中两个光伏电源在 F_4 主馈线的接入位置分别处于馈线中段和末段;方案3中接入位置则均处于馈线末段;方案4中接入位置均处于馈线中段。通过对比可以发现,当采用方案2时,系统的供电可靠性最好,这是因为分布式光伏电源分散的接入馈线中段和末段后,若 F_4 首段或馈线 F_5 、 F_6 、 F_7 任一点发生故障时,光伏电源都可在开关元件动作隔离后对无故障区域的负荷点进行恢复供电,从而提高整体系统的可靠性程度。

因此,根据分布式光伏电源在不同并网方式下对系统可靠性指标的影响可以得出:分布式光伏电源分散地接入配电网馈线中末段时,能更好的改善系统的可靠性水平。

3.3 分布式光伏电源运行方式的影响分析

分布式光伏电源的运行方式不同,其接入后会造成配电网网架结构的变化,进而影响系统的可靠性程度。分布式光伏电源的运行方式主要有三种,分别是分布式光伏作为系统电源的备用电源、分布式光伏承担基荷和光伏与系统电源并网运行。

本文分别采用这三种运行方式,对算例系统的运行可靠性进行计算分析,设置以下3种方案:

方案一:单台分布式光伏电源,并网型运行模式,集中式接入53号馈线,接入总容量为3MW;

方案二:单台分布式光伏电源,分布式光伏电源作为备用型运行模式,集中式接入53号馈线,接入总容量为3MW;

方案三:单台分布式光伏电源,分布式光伏电源承担基本负荷型运行模式,集中式接入53号馈线,接入总容量为3MW;

通过分析计算,得到部分负荷点的可靠性指标和系统可靠性指标分别如表5、表6所示。

通过分析对比表5中方案一、二、三的可靠性指标可见,当分布式光伏并网运行时(方案一),其平均故障率和平均故障修复时间均有所下降,它主要受两方面的影响:一方面是主网运行状态,另一方面则是孤岛运行的范围及持续时间,这说明分布式光伏采用并网运行方式可以较好的提高系统的供电可靠性;当分布式光伏电源作为配电网备用电源运行时(方案二),各负荷点的平均故障率较大,这是考虑了配电网供电未恢复时分布式光伏发生故障的原因,但其故障修复时间明显减少,较好的提高了负荷点的供电可靠性;当分布式光伏电源在承担基荷时(方案三),各负荷点中只有负荷点31的可靠性指标得到改善,这是由于当光伏作为主电源承担基本负荷时,其发电容量是按照既定的调度曲线供电的,如果在故障期间分布式光伏的出力和系统电源出力划分不合理,即会造成部分故障负荷点在完成故障隔离后不能恢复供电。

表5 分布式光伏电源在不同运行方式下的配电网部分负荷点指标

Table 5 Partial load point reliability indexes of the distributed PV supply of different operation modes

负荷点	平均故障率			平均故障修复时间		
	方案一	方案二	方案三	方案一	方案二	方案三
负荷点 28	0.834 2	2.235 6	2.225 1	4.796 8	2.122 5	5.037 7
负荷点 31	0.879 5	2.537 2	0.879 6	3.578 4	1.959 8	3.684 7
负荷点 36	1.119 8	2.510 2	2.511 3	4.966 6	2.459 6	5.033 2
负荷点 40	1.118 6	2.509 8	2.510 9	4.968 8	2.460 3	5.035 1

表6 分布式光伏电源在不同运行方式下的系统可靠性指标

Table 6 System reliability indexes of the distributed PV supply of different operation modes

方案	SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI	ENS
方案一	1.189 6	3.362 6	2.826 7	0.999 75	40.922 1
方案二	1.200 5	3.505 6	2.920 1	0.999 72	42.366 7
方案三	1.193 0	3.398 9	2.849 0	0.999 73	43.206 5

根据各负荷点可靠性指标可以计算出整个系统的可靠性评估指标,由表6中数据可以看出,分布式光伏电源在不同运行模式下对配电网可靠性的影响情况是互不相同的。

(1)将方案一与方案二中数据对比可见,当分布式光伏电源采用并网运行模式时,其可靠性程度较高。这是由于在该模式下,分布式光伏电源能够在系统发生故障时继续给周围的部分负荷点供电,使这些负荷点能够不受故障点影响而失电,从而有效提高了系统可靠性。

(2)将方案一与方案三中数据对比可见,当分布式光伏电源采用并网运行模式时,其可靠性程度较高。此两种模式最主要的差别是并网运行时,系统侧电源容量可以很大,当开关元件对故障点动作隔离后,其前向区域中的负荷点能够被恢复供电,而方案三中的系统电源是需要按照调度部门规定的调度曲线进行供电的,因此若分布式光伏出力和系统侧电源出力不能协调合理,便会造成前向区域中的部分负荷点无法恢复供电,因此该方案下的可靠程度相对较低。

(3)将方案二和方案三中数据对比可见,其系统可靠性分析结果各有优劣,这是由于方案二中前向区域内负荷点的故障恢复程度较好,而方案三后向区域内负荷点的故障恢复程度较好,所以这两种运行模式下系统可靠性影响程度的高低具有偶然性。

因此,通过对分布式光伏电源在不同运行模式下的配电网可靠性分析,可以得出:分布式光伏电源与配电网并网运行时,能较好地改善系统的可靠性;当分布式电源作为备用电源接入电网时,分布式光伏电源的启动以及其与系统电源之间的配合协调是影响整体系统可靠性的重要因素;当分布式光伏电源承担基荷时,其只对孤岛范围内的负荷点可靠性有一定的提高,对其他负荷点的可靠性改善效果并不明显。

4 结语

本文主要针对分布式光伏电源接入对配电网可靠性的影响展开研究,采用网络分区和蒙特卡洛模拟法相结合的可靠性评估算法对含有分布式光伏电源的配电系统进行可靠性分析,该方法将复杂配电网进行分区简化,以最小区为单位进行故障分析,大大缩小了可靠性计算的复杂度,有效提高了仿真算法的速度。此外本文结合 IEEE RTBS Bus6 算例系统,分别计算了分布式光伏电源在接入位置、接入容量、并网方式以及运行模式不同时配电系统的可靠性程度,详细研究了配电系统负荷点可靠性指标和系统可靠性指标的变化情况,并对计算结果进行定量定性分析,为分布式光伏电源接入配电网的规划选址和优化运行提供一定的理论依据。

[参考文献](References)

- [1] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014(1): 1-14.
DING M, WANG W S, WANG X L, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014(1): 1-14. (in Chinese)
- [2] 王震,鲁宗相,段晓波,等. 分布式光伏发电系统的可靠性模型及指标体系[J]. 电力系统自动化, 2011, 15: 18-24.
WANG Z, LU Z X, DUAN X B, et al. Reliability model and index system of distributed photovoltaic systems[J]. Automation of electric power systems, 2011, 15: 18-24. (in Chinese)
- [3] 葛少云,王浩鸣,王源山,等. 含分布式风光蓄的配电系统可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2012(5): 16-23.
GE S Y, WANG H M, WANG Y S, et al. Reliability assessment of distribution system with distributed Wind-PV-ES hybrid power system[J]. Automation of electric power systems, 2012(5): 16-23. (in Chinese)
- [4] 李志铿,汪隆君,王钢,等. 计及故障重构的含分布式电源配电网可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2013(4): 35-40.

- LI Z K, WANG L J, WANG G, et al. Reliability assessment of distribution network with the distributed generation considering failure reconfiguration[J]. Automation of electric power systems, 2013(4):35-40. (in Chinese)
- [5] 芦晶晶, 赵渊, 赵勇帅, 等. 含分布式电源配电网可靠性评估的点估计法[J]. 电网技术, 2013(8):2 250-2 257.
- LU J J, ZHAO Y, ZHAO Y S, et al. A point estimation method for reliability evaluation of distribution network with distributed generation[J]. Power system technology, 2013(8):2 250-2 257. (in Chinese)
- [6] 曾艾东, 徐青山, 丁茂生, 等. 风储互补微网对配电网可靠性的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014(4): 26-33.
- ZENG A D, XU Q S, DING M S, et al. Study on impact of Wind/Storage hybrid micro-grid system on distribution system reliability[J]. Journal of south China university of technology(natural science edition), 2014(4):26-33. (in Chinese)
- [7] 杨海晶, 李朝晖, 宋宁希, 等. 含光储微网的配电网可靠性影响研究[J]. 电测与仪表, 2015(4):42-46.
- YANG H J, LI Z H, SONG N X, et al. Reliability of the distribution network with the access of photovoltaic-battery micro grid access[J]. Electrical measurement & instrumentation, 2015(4):42-46. (in Chinese)
- [8] 钱科军, 袁越, ZHOU C K. 分布式发电对配电网可靠性的影响研究[J]. 电网技术, 2008, 11:74-78.
- QIAN K J, YUAN Y, ZHOU C K. Study on impact of distributed generation on distribution system reliability[J]. Power system technology, 2008, 11:74-78. (in Chinese)
- [9] 随新鲜, 王倩, 杨亚强. 分布式发电对配电网可靠性的影响研究[J]. 电力学报, 2010(1):56-60.
- SUI X X, WANG Q, YANG Y Q. Study on impact of distributed generation on distribution system reliability[J]. Journal of electric power, 2010(1):56-60. (in Chinese)
- [10] 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(4):38-43.
- WANG X D, LIN J K. Reliability analysis based on network simplification for the distribution network including distributed generation[J]. Automation of electric power systems, 2010(4):38-43. (in Chinese)
- [11] ALLAN R N, BILLINTON R. A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results[J]. IEEE transactions on power systems, 1991, 6(2):813-821.
- [12] BILLINTON R, JONNAVITHULA S. A test system for teaching overall power system reliability assessment[J]. IEEE transactions on power systems, 1996, 11(4):1 670-1 676.

[责任编辑:陈 庆]