

含分布式电源的配电网可靠性评估

分布式电源的接入会对配电网的可靠性产生影响, 由于分布式电源具有随机性, 传统的可靠性分析将不再适用。针对随机性强的分布式电源, 采用比传统蒙特卡洛抽样更加准确的拉丁超立方抽样建立样本, 利用蒙特卡洛法模拟配电网故障, 根据故障分区法确定各负荷停电时间, 对不同故障位置下孤岛内负荷削减及停电情况进行了分析。以IEEE RBTS BUS6系统作为算例, 对不同孤岛运行模式下的系统可靠性情况进行了分析, 验证了方法的有效性。

王博堃 滕欢 况达/四川省智能电网重点实验室(四川大学)



王博堃/硕士研究生

分布式电源的引入使得传统的单电源辐射式网络变为多电源网络, 在主馈线出现故障时, 分布式电源还可进入孤岛运行方式继续为负荷供电, 同时风光发电还具有很强的随机性^[1-4], 考虑到分布式电源的以上特点, 传统的可靠性分析方法将不再适用, 需要建立新的方法对分布式电源接入后的配电网可靠性进行分析。

文献[5]采用点估计法, 根据分布式电源出力和配电网负荷的概率分布构造估计点计算配电网的可靠性; 文献[6]采用随机函数对系统可靠性指标进行表征, 结合非参数核密度估计技术实现可靠性计算; 文献[7]采用基于区间算法的配电网可靠性计算方法进行计算, 并考虑原始参数的不确定性。上述文献均采用解析法进行可靠性分析, 其优点在于网络简单时计算准确度较高, 且计算速度快; 缺点是在网络复杂时, 建立系统模型会有较大难度。与解析法对应, 模拟法也是采用较多的可靠性算法。模拟法在计算机上模拟各元件故障与修复过程, 抽样各元件状态, 达到模拟年限后

统计各元件失效次数与时间以得到可靠性指标。文献[8]建立了依据不同类型影响区域节点故障的可靠性计算模型, 同时建立了分布式电源对配电网可靠性影响的指标; 文献[9]考虑了风光发电的随机模型, 计算了风光混合发电作为配电网备用电源情况下的系统可靠性; 文献[10]建立了风光蓄元件的时序和状态转移模型, 针对电源元件和非电源元件分别进行了非序贯抽样和序贯抽样; 文献[11]提出发电负荷率的概念, 在综合考虑发电负荷率的基础上进行了配电网可靠性分析。

本文基于蒙特卡洛模拟法, 对风光发电出力采用拉丁超立方方法进行抽样, 采用故障分区法确定负荷停电时间, 分析了不同故障位置下孤岛内的负荷切除情况及负荷停电时间统计, 计算了不同孤岛运行模式下的负荷停电时间。

系统元件模型

1. 风机出力模型

风力发电机出力与风速有直接的关系。目前对风速曲线的描述主要有正态分布和威布尔分布两种方式^[12]。图1为风机出力与风速关系图。

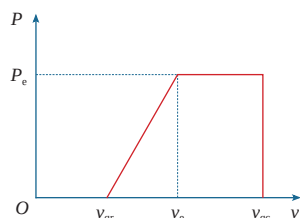


图1 风机输出功率曲线

图1中, P_e 为风机的额定功率; v_{qr} 为

关键词/Keywords

分布式电源 ·
配电网 ·
可靠性 ·
蒙特卡洛法 ·
孤岛运行 ·

切入风速； v_e 为额定风速； v_{qc} 为切出风速。

在风速处于切入风速和额定风速之间时，可用一次函数来表示风机出力与风速之间的关系，即

$$P_w = k_1 v + k_2 \quad (1)$$

式中， v 为风速； k_1 、 k_2 为出力参数， $k_1 = P_e / (v_e - v_{qr})$ ， $k_2 = -k_1 v_e$ 。

由于大部分时间风机所处风速环境都在切入风速和额定风速之间，若用威布尔分布表示风速曲线，则由

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

$$v = (P_w - k_2) / k_1 \quad (3)$$

可得风机出力

$$f(P_w) = \frac{k}{k_1 c} \left(\frac{P_w - k_2}{k_1 c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{P_w - k_2}{k_1 c}\right)^k} \quad (4)$$

式中， k 、 c 分别为风速分布的形状参数和尺度参数。

若用正态分布来描述风速曲线，则风力发电机出力 P_w 的概率密度函数可以表示为

$$f(P_w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v k_1} e^{-\frac{(P_w - k_2 - k_1 \mu_v)^2}{2(k_1 \sigma_v)^2}} \quad (5)$$

式中， σ_v 、 μ_v 分别为风速的方差和均值。

2. 光伏发电出力模型

光伏发电机的出力与光照强度光电转换效率及光伏板总面积密切相关^[13]。若用beta分布近似表示光照强度曲线，则由

$$f(r) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{r}{r_{\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r}{r_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (6)$$

$$P_{pv} = r S \eta \quad (7)$$

可得

$$f(P_{pv}) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{P_{\max} \Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P_{pv}}{P_{\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P_{pv}}{P_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (8)$$

式中， P_{pv} 为光伏发电机的出力； r 为光照强度； η 为光电转换效率； S 为光伏板总面积； α 、 β 为光照强度曲线的beta形状参数； $P_{\max}$ 为光伏发电机的最大输出功率。

3. 拉丁超立方抽样

拉丁超立方抽样 (LHS) 是一种多维分层随机抽样方法。与传统的蒙特卡洛抽样法相比，拉丁

超立方抽样的样本空间更为准确，同时可大大节省样本数量。在得知风力和光伏的概率分布函数之后，风力发电和光伏发电的出力抽样可以经过以下几个步骤完成。

1) 求取累计概率分布曲线。

2) 将累计概率曲线沿纵轴[0, 1]均匀划分为 N 份。

3) 在每个等分区间随机选取一个数，随机生成一个[0, 1]上的数 r_i ，其累计概率为

$$P_i = (1/N)r_i + (i-1)/N \quad (9)$$

4) 每个等分区间的采样值可以通过求取累计概率分布函数的反函数来完成，即

$$X_i = F^{-1}(P_i) \quad (10)$$

通过拉丁超立方抽样可以得到风力发电和光伏发电的出力 $2N$ 维矩阵，随机排列各行，可以得到 N 种不同风力光伏出力组合的场景。

4. 蓄电池模型

蓄电池作为微电网的重要组成部分，可以填补分布式电源出力的波动性，增加含分布式电源配电网的稳定性和可靠性，可以有效减少分布式电源出力的不足导致的用户停电次数。目前使用较多的蓄电池类型有铅酸蓄电池和钒蓄电池等。

蓄电池的充放电时间序列与所处位置外部电源和负荷相关。设 ΔG_t 为外部电源供应与负荷的差值， $\Delta G_t = W_t - L_t$ 。则蓄电池的充放电序列可以表示为

$$B_{t+1} = \begin{cases} B_{\min} & B_t + \Delta G_t \leq B_{\min} \\ B_t + \Delta G_t & B_{\min} < B_t + \Delta G_t \leq B_{\max} \\ B_{\max} & B_{\max} < B_t + \Delta G_t \end{cases} \quad (11)$$

式中， $B_{\min}$ 为蓄电池的最小容量； $B_{\max}$ 为蓄电池的最大容量； B_t 为蓄电池在 t 时刻的充放电状态。

基于蒙特卡洛法的配电网可靠性评估

1. 元件的两状态模型

图2为元件的两状态模型。

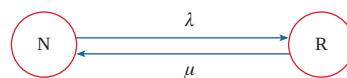


图2 元件两状态模型

图2中, N表示元件的正常运行状态, R表示元件的故障修复状态。相互转换的概率分别为故障率 λ 、修复率 μ 。利用故障率和修复率即可得到元件的无故障工作时间 TTF 和故障修复时间 TTR 。

利用蒙特卡洛法评估配电网可靠性的实质就是通过不断产生每个元件的 TTF 和 TTR 来模拟配电网中元件的损坏和修复过程。其时序图如图3所示。

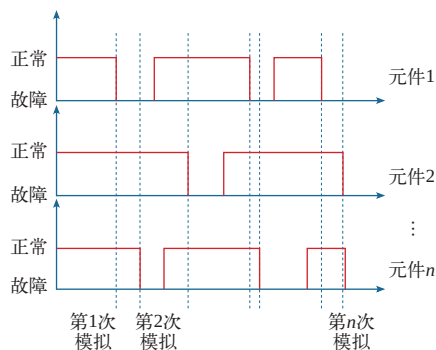


图3 蒙特卡洛法时序图

该时序图表明了蒙特卡洛法的运行过程,即每个元件的损坏与修复的更替过程。

模拟流程为:系统时间设零生成每个元件的 TTF ;找到最小的一个 TTF_i ,进行一次故障处理,统计该元件故障引起的后果;对该故障元件生成一个 TTR ,该元件新的 $TTF'_i = TTF_i + TTR$,重新加入元件 TTF 序列,跳回步骤2;当有元件的 TTF 大于模拟年限时,模拟结束。

2. 配电网故障区域划分

在一次模拟完成,找到故障元件之后,可以通过故障区域划分的方法确定该元件故障导致的各负荷停电情况。

根据配电网的拓扑结构和负荷停电时间的长短,可以将故障区域划分为4类:故障修复区、故障隔离区、故障转带区和无影响区域。

故障修复区是故障元件所处的区域,该区域内负荷停电时间即为故障修复时间。如图4所示,以元件 S_1 故障为例,区域2和区域3都属于故障修复区,其负荷停电时间为故障修复时间。

故障隔离区一般处于故障元件上游,当故障发生时,通过开关倒闸操作可以将故障元件隔离恢复供电,该区域内负荷停电时间为故障隔离时间。图4中, S_1 元件发生故障时,区域1属于故障隔

离区。

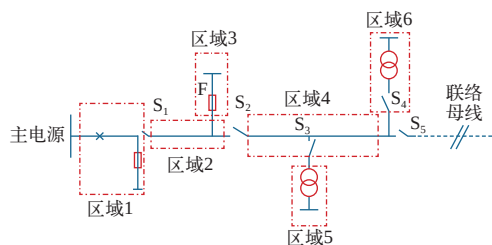


图4 故障区域划分

故障转带区一般位于故障元件下游,该区域与其他供电网络有联络,当故障发生时,可以通过联络线恢复供电。图4中,当 S_1 元件故障时,区域5、区域6属于故障转带区,负荷停电时间为故障转带时间。若故障元件下游与其他供电网络无联络,则该区域归于故障修复区。

无影响区域为故障发生时仍然可以正常运行的区域,若图4中区域3发生故障,熔断器立刻动作,其他区域将不会受到影响。

3. 孤岛运行模式

孤岛的典型运行模式有以下3种^[14]。

1) 隔离开关端口模式。分布式电源通过隔离开关与主馈线相连,如图5中区域1所示。当故障发生时,CB跳开,分布式电源由于过负荷停运,此时断开分布式电源与主馈线的隔离开关,分布式电源恢复运行,进入孤岛运行方式,继续给负荷供电。在该模式下,故障发生时所有负荷都将停电,含分布式电源区域的负荷需要经历一个故障隔离时间后恢复供电。由于该运行方式中隔离开关不具有灭弧功能,且恢复供电时倒闸操作繁琐,实际中采用较少。

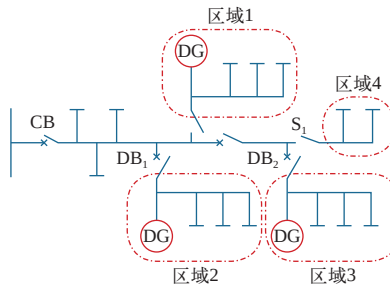


图5 孤岛运行方式

2) 断路器端口模式。分布式电源通过断路器DB与主馈线相连,如图5中区域2所示。当故障

发生时,断路器 DB_1 将快于CB动作,此时含分布式电源的区域将直接进入孤岛运行模式。该模式下,故障发生时含分布式电源的区域将不会出现停电中断。且在主馈线故障恢复后,只需要进行同期操作即可并网。

3) 多用户孤岛运行模式。该运行模式下,在进入孤岛运行之后,分布式电源在满足孤岛内负荷需求之外还有额外容量,可以对主馈线上的一些负荷进行供电。如图5中区域3所示。在故障发生后, DB_2 快于CB动作,含分布式电源的区域将进入孤岛运行模式,在分布式电源还有额外容量时,合上隔离开关 S_1 ,合上断路器 DB_2 ,即可对区域4内负荷进行供电。

4. 孤岛处理方式

当含分布式电源的馈线区进入孤岛运行方式时,如果当前分布式电源的出力无法满足负荷需求,可根据岛内分布式电源的出力以及储能装置荷电和当前负荷情况,进行负荷削减。

当故障处于主馈线,且该故障导致含分布式电源的区域失电时,该区域与主馈线断路器断开,进入孤岛运行方式。如图6中故障点1所示。

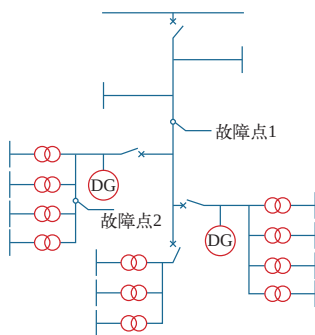


图6 不同故障点位置孤岛处理

设在 t 时刻时分布式电源出力为 $D(t)$,第 i 个负荷点的负荷为 $L_i(t)$,蓄电池在故障修复时间内提供的功率为 $B(t)$,区域内的负荷总数为 N_l 。当满足

$$B(t) + D(t) \geq \sum_{i=1}^{N_l} L_i(t) \quad (12)$$

此时不需要对负荷进行削减。所有孤岛内的负荷属于无影响区域。当不满足式(12)时,按照从最小的负荷点依次到大切除的方式进行负荷削减,直到满足式(12)为止。被削减负荷的停

电时间为故障修复时间。

当故障处于有分布式电源的区域时,如图6中故障点2所示。为了避免故障进一步扩大,断开该区域与主馈线的断路器。在该故障成功隔离后,该区域进入孤岛运行方式,负荷削减的过程同式(12),未被削减的负荷停电时间为故障隔离时间,被削减的负荷停电时间为故障修复时间。如果该故障无法隔离,则孤岛内分布式电源退出运行,该区域内所有负荷停电时间为故障修复时间。

算例分析

采用IEEE RBTS BUS6系统作为算例进行可靠性评估。设馈线故障率为0.065,故障平均修复时间设为5 h,变压器故障率为0.015,故障修复时间为20 h,故障隔离及故障转带时间为1 h。设切入风速、切出风速和额定风速分别为3 m/s、25 m/s和14 m/s。采用文献[8]中风速光强数据。孤岛1设置200 kW风机10台,100 kW光伏发电系统4个;孤岛2设置200 kW风机15台,100 kW太阳能电池10个。抽样10个风光出力组合场景。

年时序负荷数据采用文献[15]数据,各馈线长度及其他设备参数见文献[16]。为验证分布式电源接入前后及孤岛不同运行方式下对配电网的可靠性影响,采用以下3种方案。图7为算例网络。

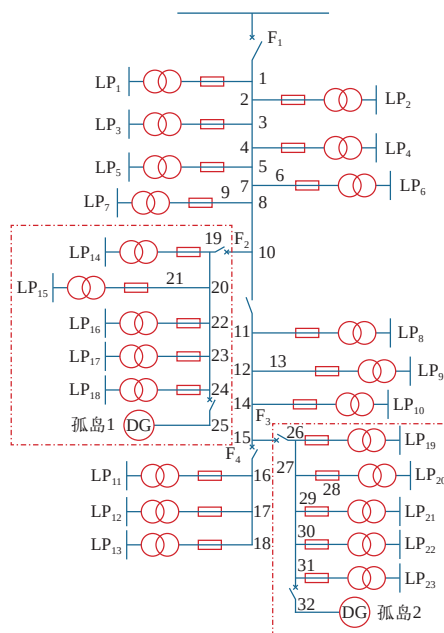


图7 算例网络

方案1。配电网中不接入分布式电源。

方案2。在孤岛1和孤岛2接入分布式电源，以断路器接口模式运行。

方案3。在孤岛1和孤岛2接入分布式电源，

孤岛2的分布式电源以多用户孤岛运行模式运行，在主馈线故障且自身有额外容量时为LP8、LP9和LP10供电。

计算结果如表1~表4、图8~图10所示。

表1 孤岛1风光出力场景

	S_1/MW	S_2/MW	S_3/MW	S_4/MW	S_5/MW	S_6/MW	S_7/MW	S_8/MW	S_9/MW	S_{10}/MW
风	1.521 4	0.908 0	0.594 6	1.121 0	0.247 8	1.308 7	0.799 7	1.852 1	2.000 0	1.658 9
光	0.296 9	0.335 8	0.209 1	0.027 1	0.270 9	0.394 9	0.400 0	0.140 8	0.080 3	0.223 5

表2 孤岛2风光出力场景

	S_1/MW	S_2/MW	S_3/MW	S_4/MW	S_5/MW	S_6/MW	S_7/MW	S_8/MW	S_9/MW	S_{10}/MW
风	2.621 0	1.682 9	1.104 9	3.000 0	0.411 5	2.203 2	1.453 8	1.867 9	2.364 6	0.974 1
光	0.458 5	0.889 1	0.841 5	0.240 8	0.673 7	1.000 0	0.593 2	0.719 5	0.493 0	0.357 7

表3 某些负荷点可靠性指标计算结果

	方案1			方案2			方案3		
	$\lambda/(\text{次/a})$	$\gamma/(\text{h/次})$	$U/(\text{h/a})$	$\lambda/(\text{次/a})$	$\gamma/(\text{h/次})$	$U/(\text{h/a})$	$\lambda/(\text{次/a})$	$\gamma/(\text{h/次})$	$U/(\text{h/a})$
L_2	1.382	3.495	4.830	1.382	3.495	4.830	1.382	3.495	4.830
L_{10}	1.399	5.432	7.599	1.399	5.432	7.599	1.399	4.572	6.396
L_{13}	1.853	5.487	10.167	1.853	5.487	10.167	1.849	5.482	10.136
L_{15}	2.254	4.765	10.740	1.565	3.972	6.216	1.565	3.972	6.216
L_{22}	2.219	5.339	11.847	1.601	4.677	7.488	1.513	4.630	7.005

表4 方案2孤岛1内负荷停电情况

	L_{15}	L_{16}	L_{17}
$\lambda/(\text{次/a})$	1.565	1.579	1.663
$\gamma/(\text{h/次})$	3.972	3.981	4.254
$U/(\text{h/a})$	6.216	6.286	7.074

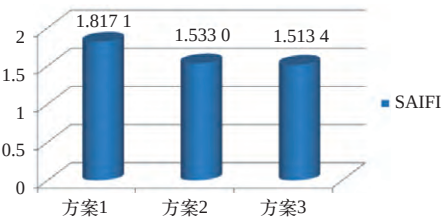


图8 系统平均停电频率

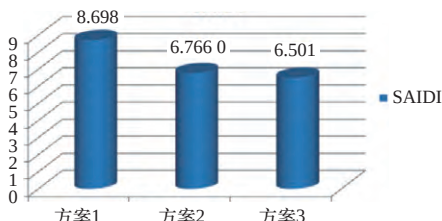


图9 系统平均停电持续时间

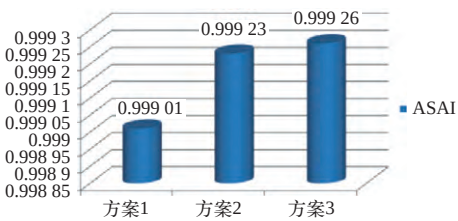


图10 系统平均供电可靠性

- 1) 将方案1、方案2进行对比分析，可以得到在分布式电源接入系统后，非分布式电源接入区域的可靠性几乎没有变化，分布式电源只影响接入部分的可靠性，系统整体可靠性提高。
- 2) 在同一个孤岛内，大负荷的可靠性比小负荷的可靠性更高。这是由于在孤岛运行时，分布式电源出力不足，根据负荷切除策略从小到大切负荷的结果。该策略可以根据孤岛内负荷的重要程度进行改变以达到最好的效果。
- 3) 比较方案2、方案3，在孤岛3进入多用户孤岛运行模式下，指定馈线负荷的停电次数虽然没有减少，但停电时间明显减少。多用户孤岛运

行模式对指定馈线上的负荷可靠性有明显提高,但需要分布式电源有较大容量,同时分布式电源容量提高也可以提高该孤岛的可靠性。因此需要在综合考虑分布式电源的经济性、可靠性的基础上进行分布式电源容量配置。

结束语

采用拉丁超立方方法对分布式电源的出力进行抽样,形成一组风光出力场景,采用蒙特卡洛模拟法计算了不同孤岛运行模式下的配电网可靠性。计算结果表明,分布式电源的接入对接入区域的负荷可靠性有较大提升,多用户孤岛运行模式下分布式电源不仅对孤岛内负荷可靠性有提升,还可提高指定馈线区域上负荷的可靠性,但该运行模式需要分布式电源有较大的容量,需要结合分布式电源经济性和可靠性综合进行配置。下一步将在综合考虑分布式电源及储能装置的可靠性和经济性的前提下分析分布式电源接入对配电网的影响。

参考文献

- [1] 王建,李兴源,邱晓燕.含有分布式发电装置的电力系统研究综述[J].电力系统自动化,2005,29(24):90-96.
- [2] 康云龙,郭红霞,吴捷,等.分布式电源及其接入电力系统时若干研究课题综述[J].电网技术,2010,34(11):43-47.
- [3] 梁有伟,胡志坚,陈允平.分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J].电网技术,2003,27(12):72-75.
- [4] 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,2011,35(15):18-24.
- [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,2013,37(8):2250-2257.
- [6] 田洪迅,袁蓉,赵渊.含分布式电源的配网可靠性概率计算[J].电网技术,2013,37(6):1562-1569.
- [7] 钱科军,袁越,Zhou Chengke.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.
- [8] 雷振,韦钢,蔡阳,等.含分布式电源区域节点的配电网模型和可靠性计算[J].电力系统自动化,2011,35(1):39-43.
- [9] 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):33-38.
- [10] 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,2012,36(5):16-23.
- [11] 李志奇,吕林,张燃.含微网的新型配电网可靠性分析[J].华东电力,2012,40(5):803-807.
- [12] 王成山,郑海峰,谢莹华,等.计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[J].电力系统自动化,2005,29(24):39-44.
- [13] Karaki S H, Chedid R B, Ramadan R. Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3):766-772.
- [14] Bollen M H J, Sun Y, Ault G W. Reliability of distribution networks with DER including intentional islanding [C]//Proceedings of International Conference on Future Power Systems. International Conference on Future Power Systems, Nov. 16-18, 2005 Amsterdam, Netherlands, Piscataway USA: IEEE, 2005: 6.
- [15] IEEE Reliability Test System Task Force. IEEE reliability test system [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6):2047-2054.
- [16] Billinton R, Johnnavithula S. A test system for teaching overall power system reliability assessment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4):1670-1676.

(收稿日期:2015-01-10) EA