

含分布式风电的配电网可靠性研究

陈 笑, 赵彩虹, 李含怡, 胡 骏, 陈建建

(南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 分布式风力发电接入配电网, 对配电网的可靠性产生影响。采用拉丁超立方采样和改进的同步回带消减技术建立风力发电机出力多场景模型。根据配电网中负荷的重要程度, 定义等值有效负荷。以等值有效负荷最大为目标建立配电网孤岛划分模型。对最小路法进行改进, 计算在不同场景下负荷点在孤岛划分范围内的概率, 求得负荷点的可靠性指标。在 IEEE-RBTS Bus6 系统上进行仿真, 算例分析验证了方法的有效性。

[关键词] 风力发电, 配电网, 可靠性, 场景, 孤岛

[中图分类号] TM721 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2016)01-0016-07

Reliability Research of Distribution Network with Distributed Wind Power

Chen Xiao, Zhao Caihong, Li Hanyi, Hu Jun, Chen Jianjian

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

Abstract: Distributed wind power has effect on the distribution network reliability. The paper establishes the model for output power of wind turbines based on Latin hypercube sampling and improves simultaneous backward reduction. Based on the importance of the load, the paper defines the equivalent effective load and an optimization model is established of distribution network islanding scheme with the goal of the maximum equivalent effective load. The paper improves the minimal path, calculates the probabilities of load points which are in the islanding scope, and solves the reliability indices for load points in different scenes. The algorithm is applied to a modified IEEE-RBTS Bus6 test system, the effectiveness of this algorithm is analyzed and confirmed by the simulation example.

Key words: wind power, distribution network, reliability, scene, island

随着常规能源逐渐趋于枯竭以及环境污染日趋严重, 以风能为代表的清洁能源近年来获得快速发展。由于风速受气候影响不断变化, 使得风电场出力表现出极强的随机性和波动性, 因而当其接入配电网时, 对配电网的可靠性评估造成了影响。

传统的配电网是由单一电源点供电的, 一旦馈线发生故障, 可能导致后面的负荷点全部停电。然而当分布式风力发电机接入配电网后, 配电网变成一个与用户多电源连接的网络, 当馈线发生故障时, 风力发电机可能会孤岛运行, 则配电网的可靠性模型和算法也将发生变化^[1-2]。国内外学者对此进行了相关的研究。文献[3-4]分析了分布式电源特别是风电和光伏接入对配电网的影响, 介绍了以解析法和模拟法为主的评估方法。文献[5]根据配电网原始数据的不确定性, 用基于区间算法的配电网可靠性评估, 并考虑到分布式电源作为备用电源对配电网可靠性的影响, 但只将分布式电源作为备用电源利用率不高, 经济性差。文献[6]根据配电网中负荷点的权重系数来建立孤岛划分模型, 并把分布式电源当作恒功率电源接入配电网, 而一般分布式电源的出力具有波动性, 当作恒功率电源过于理想化。文献[7-8]提出了含分布式电源的配电网可靠性模型, 采用改进的最小路法计算含分布式电源的配电网可靠性指标。文献[9]采用拉丁超立方采样法(LHS)和同步回带消减技术(SBR)生成的出力场景来描述风电和太阳能光伏发电出力的随机性。

本文中风力发电机并行于配电网, 用拉丁超立方采样法生成风机出力场景, 在考虑典型日风速场景

重要性的条件下对同步回代消减技术进行改进,这样既减少计算量又尽可能保留原场景的特点,在此基础上建立风机出力多场景模型.分析风机并网和孤岛两种运行方式,计算孤岛划分范围,以等值有效负荷最大为目标函数建立配电网计划孤岛划分模型,充分利用分布式电源.对传统最小路法进行改进,使其适用于含分布式风力发电的配电网可靠性计算.以 IEEE-RBTS BUS 6 系统主馈线 F4 为例进行仿真计算,仿真结果证实本文方法的有效性.

1 风机出力多场景模型

1.1 风机输出功率

由于风速的间歇性和波动性,采用概率方法对风速进行建模.本文用双参数威布尔分布^[10]来表示:

$$F(v) = 1 - \exp[-(v/c)^k], \quad (1)$$

式中, k 为威布尔分布的形状参数; c 为尺度参数,其量纲与速度相同.基于历史风速数据,通过拟合可计算出 k 值和 c 值.

风机输出功率与风速和自身的功率特性相关.当风速 v 增长达到切入风速 v_i 时,风机启动,输出功率 P 随风速的增加而增长;当风速 v 达到额定风速 v_N 时,输出功率也维持在额定值 P_N ;当风速 v 增长达到切出风速 v_o 时,风机将从电网中退出.可以用式(2)来描述风电机组输出功率特性曲线^[11]:

$$P_v = \begin{cases} 0, & 0 \leq v \leq v_i; \\ P_N(av^3 + bv^2 + cv + d), & v_i \leq v < v_N; \\ P_N, & v_N \leq v < v_o; \\ 0, & v \geq v_o. \end{cases} \quad (2)$$

式中, a, b, c, d 为拟合系数,可通过历史风速数据和风机的总出力拟合求得,计算中已包含了风机故障信息.

1.2 风速的拉丁超立方采样

为解决风速和风机输出功率的随机性和波动性,用拉丁超立方采样方法获取多个风速场景来表达风速的概率分布. LHS 属于多维采样方法,相较于一般的随机采样方法,该方法能保证样本值均匀覆盖随机变量的整个样本空间,因此可以更加精确地描述风速的概率分布.拉丁超立方采样获取 N 个样本的具体过程如下:

(1) 将累积概率分布函数 $F_x=f(x)$ 的纵轴等概率分成 P 个区间,每个区间宽度为 $1/P$,在每个区间内随机抽取一个值,满足 $x_1 < \dots < x_k < \dots < x_P (1 \leq k \leq P)$ 且有:

$$P(x_k < x < x_{k+1}) = \frac{1}{P}. \quad (3)$$

(2) 对于随机变量 x 的第 k 个采样值,其对应的累计分布概率为:

$$F_x(k) = \left(\frac{1}{P}\right)r_u + \frac{k-1}{P}, \quad (4)$$

式中, $r_u \sim U(0,1)$ 服从均匀分布, $k=1,2,\dots,P$.

(3) 计算 F_x 的反函数,求得对应的 x 值,在本文中即为风速采样值:

$$x_k = F_x^{-1}\left[\left(\frac{1}{P}\right)r_u + \frac{k-1}{P}\right]. \quad (5)$$

本文中风速数据来自于某市实验风电场 2013 年 4 月 1 日至 2014 年 4 月 1 日 50m 高度的量测值.通过拟合得到双参数威布尔分布的尺度参数为 7.284 1,形状参数为 2.013 5.将风速累积概率分布函数的纵轴划分成 12 个区间,基于 Matlab 平台用 LHS 重复抽样 1 000 次,得到 $1\,000 \times 12$ 个风速样本.

1.3 改进的同步回代消减技术

采用拉丁超立方采样技术对风速的累积概率分布进行抽样后,会得到大量的样本.样本数量越多,精度越高,但计算量也越大.为了提高计算效率并尽可能地

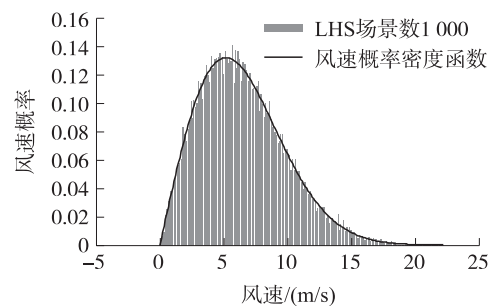


图1 基于LHS的风速采样与风速概率密度函数
Fig.1 The sample of wind speed based on LHS and the probability density function of wind speed

保留样本的拟合精度,需要用场景消减技术减少样本量。

本文对同步回代消减技术进行改进,在考虑典型日场景重要性的同时对原场景进行消减并确定场景概率。传统的同步回代消减技术的具体步骤为:采样得到的 N 个风速样本即为 N 个风速场景 $S_1, S_2, \dots, S_N, i=1, 2, \dots, N$ 。每一个场景对应的概率为 p , 且 $p = \frac{1}{N}$ 。定义场景间距离为两个场景之间距离的绝对值 $D(i, j) = |S_i - S_j|$, 其中 $i, j \in (1, N)$ 。定义场景概率距离为场景间距离与场景概率的乘积 $P_{ij} = D(i, j) \cdot p, i, j \in (1, N)$ 。最终场景目标为 n , 被删除的场景为 Δn 。对任一场景 S_i 计算与其最近的场景 S_j , 并计算场景概率距离 P_{Dmin} , 寻找最小的场景概率距离将其删除并把它概率加到与它距离最近的场景中。更新场景数量, 重新计算直到达到目标场景数 n 。

使用同步回代消减技术大大减少了场景数量, 提高了计算效率。但是该算法没有考虑到典型日风速的重要性。典型日风速数据往往是该地区多年采集的风速数据, 经过统计分析得出, 是能够代表该地区风速特征的重要数据。根据上文用拉丁超立方采样时将风速累积概率分布函数的纵轴等概率分成 P 个区间, 每个区间边界值为 k/P , 其中 $1 \leq k \leq P$, 则对应的横轴区间边界值为:

$$x_k = F_x^{-1}(k/P). \quad (6)$$

求得对应区间的横轴范围即风速范围, 将典型日风速按求得的风速区间排列(若某区间有多个样本则求平均值), 获得一个新的风速场景。不同典型日风速数据都按此方法处理, 获得新场景数为 N' 。将得到典型日场景和拉丁超立方采样得到的普通场景一起用同步回代消减技术进行消减, 为了凸显典型日场景的重要性, 在消减过程中规定典型日风速场景概率 P_{model} 是普通场景概率 P_g 的 μ 倍, 则典型日风速场景概率为:

$$P_{model} = \frac{\mu}{N + \mu N'}. \quad (7)$$

为了验证改进的同步回代消减技术的拟合精度, 本文基于同一次拉丁超立方采样得到 1 000 个风速场景, 与典型日场景组成原始场景, 在不同 μ 值下进行消减计算, 目标场景数均为 10 个。将消减得到的 10 个场景与原始场景进行拟合比较, 分别计算出不同 μ 值下的拟合精度, 如图 2 所示。

根据图 2 可知, 当 $\mu=0$ 时, 即为不考虑典型日风速的情况, 其拟合精度低于考虑典型日风速场景的拟合精度。 $\mu=3$ 时的拟合精度大于 $\mu=6$ 的拟合精度, 这说明适当的 μ 值可以提高风速场景的拟合精度。综上, 改进的同步回代消减技术能更好地拟合原始风速场景。改进的 SBR 具体实现流程如图 3 所示。

1.4 风机出力场景算例

考虑到所选地区春秋短暂, 夏季炎热多雨, 冬季阴冷干燥, 根据不同季节特点和差异, 确定出现频率最高的具有代表性的日子有 4 种, 夏季晴天、冬季晴天、夏季阴雨天和冬季小风。将典型日风速场景和利用 LHS 生成的风速场景, 通过改进的 SBR 消减为 10 个, 设 $\mu=3$, 生成的场景及其对应的概率如表 1 所示。

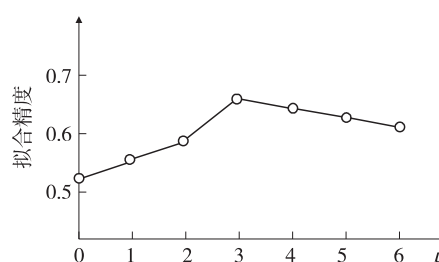


图2 不同 μ 值下的拟合精度

Fig.2 Fitting precision in different μ

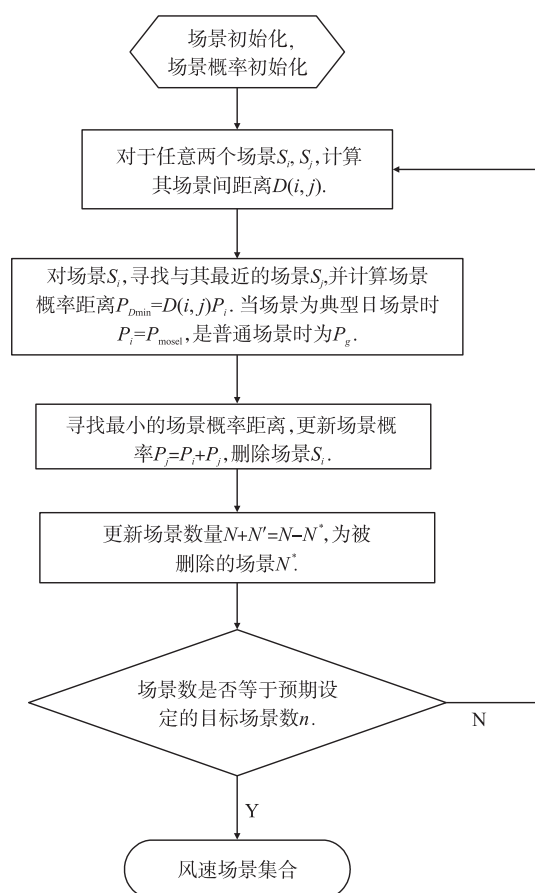


图3 改进的同步回代消减流程图

Fig.3 The improved flow diagram of the SBR

表1 采集风速样本
Table 1 The sampling of wind speed

场景 区间	风速/(m/s)									
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
1	1.215 7	2.121 2	1.491 5	1.152 0	2.032 1	1.026 5	1.392 5	1.132 8	1.924 1	1.382 5
2	2.794 5	2.646 2	2.670 9	2.277 9	2.879 6	2.478 6	2.472 5	3.120 9	2.424 9	3.301 5
3	3.712 4	3.537 9	3.480 5	3.875 0	3.260 9	3.463 3	3.500 5	3.903 1	3.615 5	3.578 5
4	4.124 1	4.635 6	4.613 1	4.152 3	4.208 5	4.374 6	4.417 9	4.054 4	4.394 4	4.321 8
5	5.161 1	4.701 9	4.759 4	5.239 0	5.311 3	4.929 5	5.026 8	5.036 9	5.122 5	5.072 7
6	5.636 8	5.591 6	5.624 3	5.600 1	5.855 8	5.952 3	5.834 7	6.012 9	5.739 8	5.488 4
7	6.300 0	6.187 4	6.384 9	6.166 1	6.099 2	6.460 3	6.453 7	6.414 3	6.306 1	6.192 8
8	7.318 7	7.156 7	7.212 0	7.230 8	7.238 8	7.439 6	7.112 1	7.218 7	7.056 3	6.927 3
9	8.283 9	8.328 6	7.792 5	8.237 2	7.793 9	7.917 8	7.871 2	8.170 1	8.213 9	7.837 5
10	9.142 4	8.678 1	9.369 2	8.849 3	9.234 9	9.272 5	9.547 1	8.771 7	9.222 2	9.087 6
11	10.959 0	10.413 6	10.582 2	10.234 3	10.246 9	11.069 2	10.645 9	10.319 5	10.228 5	10.522 1
12	16.960 5	15.836 1	12.171 4	12.116 1	12.796 6	11.852 0	14.239 6	12.991 5	11.638 5	13.503 5
概率	0.099 0	0.035 0	0.116 0	0.061 0	0.072 0	0.064 0	0.173 0	0.067 0	0.148 0	0.165 0

对于6台额定功率为0.4 MW的风电机组,已知切入风速 v_i 为3 m/s,切出风速 v_o 为25 m/s,额定风速 v_N 为10.5 m/s.将采集到的风速带入式(2),求得相应的风机输出功率如表2所示.

表2 风机输出功率
Table 2 The output power of wind turbines

场景 区间	风速/(m/s)									
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0.038 7	0	0.096 5
3	0.228 0	0.172 1	0.153 8	0.280 0	0.083 5	0.148 3	0.160 2	0.289 0	0.197 0	0.185 1
4	0.359 7	0.523 4	0.516 2	0.368 7	0.386 7	0.439 9	0.453 7	0.337 4	0.446 2	0.423 0
5	0.691 6	0.544 6	0.563 0	0.716 5	0.739 6	0.617 4	0.648 6	0.651 8	0.679 2	0.663 3
6	0.843 8	0.829 3	0.839 8	0.832 0	0.913 9	0.944 7	0.907 1	0.964 1	0.876 7	0.796 3
7	1.056 0	1.020 0	1.083 2	1.013 2	0.991 7	1.107 3	1.105 2	1.092 6	1.058 0	1.021 7
8	1.382 0	1.330 1	1.347 8	1.353 9	1.356 4	1.420 7	1.315 9	1.350 0	1.298 0	1.256 7
9	1.690 8	1.705 2	1.533 6	1.675 9	1.534 0	1.573 7	1.558 8	1.654 4	1.668 4	1.548 0
10	1.965 6	1.817 0	2.038 1	1.871 8	1.995 2	2.007 2	2.095 1	1.846 9	1.991 1	1.948 0
11	2.400 0	2.372 4	2.400 0	2.315 0	2.319 0	2.400 0	2.400 0	2.342 2	2.313 1	2.400 0
12	2.400 0	2.400 0	2.400 0	2.400 0	2.400 0	2.400 0	2.400 0	2.400 0	2.400 0	2.400 0

2 有源配电网的可靠性评估

2.1 有源配电网计划孤岛划分模型

风机接入配电网后,根据风机的位置、发电容量等预先确定孤岛划分方案,当主馈线发生故障时,依据事先确定的方案对部分负荷供电,形成计划孤岛^[12].本文定义等值有效负荷为负荷大小与负荷权重系数 w_i 的乘积,其中负荷权重系数 w_i 由负荷重要程度来确定.为了充分利用风机,使等值有效负荷之和最大,在不同场景下,根据风机输出功率和等值有效负荷大小确定孤岛划分范围.具体划分方法为:以风机接入点为圆心,沿配电网线路方向,以风机输出功率为半径进行搜索,只要负荷点的等值有效负荷之和小于风机输出功率,则该负荷点在孤岛划分范围内.建立计划孤岛划分模型如下:

$$L_{\max} = \max \sum_{i \in D} w_i L(i),$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} P_{DG} \geq \max \sum_{i \in D} [L(i) + \beta], \\ \text{区域} D \text{ 联通.} \end{cases} \quad (8)$$

式中, i 为孤岛区域 D 内的负荷点; $L(i)$ 为负荷点 i 的负荷峰值大小; P_{DG} 为风机输出功率; β 为网损率.

2.2 有源配电网的可靠性分析

传统可靠性评估指标主要分为负荷点指标和系统侧指标. 负荷点指标是衡量系统对负荷点供电能力的尺度, 是计算系统侧可靠性指标的基础. 常用指标包括年平均停运率 λ 、年平均停电时间 U 、平均停电修复时间 r . 系统侧可靠性指标是评价整个配电系统以及对负荷点供电能力的尺度. 常用指标有系统平均停电频率 (SAIFI)、系统平均停电持续时间 (SAIDI)、用户平均停电持续时间 (CAIDI) 和平均用电有效度 (ASAI) 等^[13-14].

风机接入配电网, 在通常情况下, 风机和输电网一同向配电网供电, 即分布式电源并网运行. 当配电网中设备故障时, 隔离开关动作, 形成孤岛, 分布式电源继续向部分负荷供电, 提高了孤岛内负荷的可靠性.

计算配电网可靠性指标方法有多种, 本文对传统的最小路法进行改进, 使之适用于有源配电网的可靠性分析. 改进的最小路法基本思想是: 求取每个负荷点的最小路, 根据网络情况将非最小路上的设备故障对负荷点的可靠性影响折算到最小路节点上. 当分布式电源并网运行时, 对负荷点可靠性没有影响. 当分布式电源孤岛运行时, 在不同场景下确定其相应的切负荷策略, 在此基础上计算孤岛内负荷点的可靠性指标. 最后根据场景内负荷点在孤岛范围内的概率, 计算在该场景下负荷点的可靠性指数.

当分布式电源孤岛运行时, 在不同场景下确定孤岛划分范围, 分布式电源对孤岛外负荷没有影响, 对于孤岛内的负荷, 只有当分布式电源和主馈线都发生故障才影响负荷点的可靠性计算. 按分布式电源和主馈线的二次故障折算年平均故障率 λ_i 和平均修复时间 γ_i 的折算公式为:

$$\lambda_i = \sum_{K=1}^{N_D} \lambda_{DG} \lambda_{S,K} (\gamma_{DG} + \gamma_{S,K}), \quad (9)$$

$$U_i = \sum_{K=1}^{N_D} \lambda_{DG} \lambda_{S,K} \gamma_{DG} \gamma_{S,K}, \quad (10)$$

$$\gamma_i = \frac{U_i}{\lambda_i}. \quad (11)$$

式中, $\lambda_{DG}, \gamma_{DG}$ 为分布式电源的年平均故障率、平均修复时间; $\lambda_{S,K}, \gamma_{S,K}$ 为第 K 段主馈线的年平均故障率、平均修复时间; N_D 为分布式电源和负荷点 i 两者前面的主馈线数量.

根据计算求得负荷点在孤岛划分范围内的可靠性指数 M_{island} 和在孤岛划分范围外的可靠性指标 M_{out} , 若已知负荷点在孤岛划分范围内的概率为 p_{island} , 则在该场景下该负荷点 i 的可靠性指标 M_i 为:

$$M_i = p_{\text{island}} M_{\text{island}} + (1 - p_{\text{island}}) M_{\text{out}}. \quad (12)$$

3 算例分析

3.1 原始数据

本文的算例结构参考 IEEE-RBTS BUS 6 系统主馈线 F4, 在分支线 29 处加入上文算例中的风电机组, 系统接线图如图 4 所示.

该系统有 23 个负荷点、30 条线路、21 个隔离开关、23 个熔断器 (装设在每条负荷支路首段)、23 台配电变压器、5 台断路器和 1 个风电机组. 设断路器 100% 可靠动作, 熔断器 100% 可靠熔断, 隔离开关操作时间 0.5h. 设备的原始数据参考文献 [15].

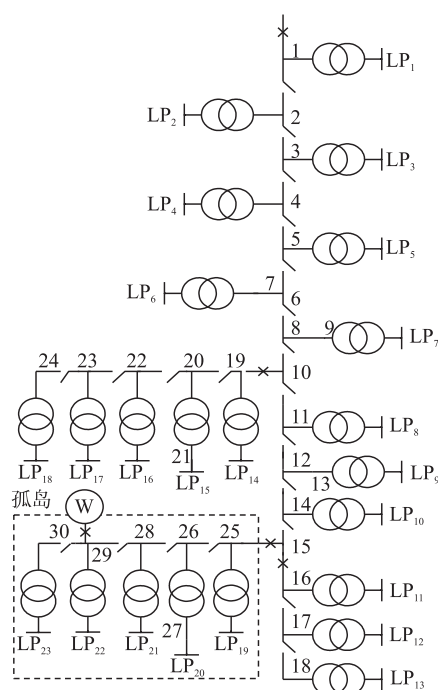


图4 含风机的配电网接线图

Fig.4 Connecting diagram of distribution network with wind turbines

3.2 计划孤岛划分方案

根据前述的计划孤岛划分模型,在不同场景下计算和判断孤岛范围.首先要根据式(8)确定在不同场景下负荷点的状态,计算负荷在孤岛范围内的概率 p_{island} .由于负荷的重要性不同,分为一类负荷、二类负荷和三类负荷.而权重系数 w_i 由负荷重要程度来确定,故本文设其值分别为0.5、0.3、0.2.表3为在风机不同的输出功率 P_{DG} 下孤岛中所包含的负荷点.

表3 不同 P_{DG} 下孤岛内包含的负荷点Table 3 Load points included in island under different P_{DG}

输出功率/kW	负荷点编号	输出功率/kW	负荷点编号
$0.2776 \leq P_{DG} < 0.2831$	19	$1.2990 \leq P_{DG} < 1.5340$	23, 20
$0.2831 \leq P_{DG} < 0.5025$	22	$1.5340 \leq P_{DG} < 1.8116$	23, 21
$0.5025 \leq P_{DG} < 0.7375$	20	$1.8116 \leq P_{DG} < 1.8171$	23, 21, 19
$0.7375 \leq P_{DG} < 0.7965$	21	$1.8171 \leq P_{DG} < 2.0365$	23, 21, 22
$0.7965 \leq P_{DG} < 1.0741$	23	$2.0365 \leq P_{DG} < 2.3141$	23, 21, 20
$1.0741 \leq P_{DG} < 1.0796$	23, 19	$2.3141 \leq P_{DG} < 2.3196$	23, 21, 20, 19
$1.0796 \leq P_{DG} < 1.2990$	23, 22	$2.3196 \leq P_{DG} < 2.4000$	23, 21, 20, 22

3.3 计算负荷点可靠性指标

根据上述模型和算法,计算出负荷点的可靠性指标.如表4所示.

表4 部分负荷点的可靠性指标1

Table 4 The reliability index of partial load points 1

场景 编号	年平均故障率 λ /(次/年)										λ
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	无 DG
1	1.290	1.290	1.290	1.290	1.290	1.290	1.290	1.290	1.290	1.290	1.290
19	1.935	1.938	1.935	1.942	1.938	1.935	1.935	1.935	1.938	1.935	1.935
20	1.987	1.987	1.995	1.987	1.987	1.987	1.987	1.987	1.984	1.984	1.973
21	1.951	1.951	1.947	1.951	1.951	1.951	1.959	1.951	1.951	1.959	1.935
22	1.943	1.943	1.943	1.939	1.939	1.948	1.948	1.952	1.943	1.948	1.935
23	1.967	1.967	1.967	1.967	1.967	1.967	1.967	1.967	1.967	1.963	1.935

表5 部分负荷点的可靠性指标2

Table 5 The reliability index of partial load points 2

场景 编号	年平均故障率 λ /(次/年)										λ
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	无 DG
1	1.578	1.578	1.578	1.578	1.578	1.578	1.578	1.578	1.578	1.578	1.578
19	6.625	6.243	6.625	5.862	6.243	6.625	6.625	6.625	6.243	6.625	6.625
20	5.516	5.516	1.995	5.516	5.516	5.516	5.516	5.516	5.875	5.875	6.950
21	5.651	5.651	6.008	5.651	5.651	5.651	1.959	5.651	5.651	4.937	7.080
22	6.927	6.927	6.927	6.927	6.927	6.571	6.571	6.214	6.927	6.571	7.640
23	5.645	5.645	5.645	5.645	5.645	5.645	5.645	5.645	5.645	5.645	8.130

从表4和表5可以看出,分布式电源只对孤岛内负荷可靠性有影响,考虑到分布式电源的故障率,所以负荷点的年平均故障率 λ 略有增加,但变化不大,说明年平均故障率对分布式电源的接入有着较小的灵敏度.年平均停电时间 U 减小,根据式(11)可知负荷点的平均修复时间 γ 也减小.对于同一负荷点,分布式电源输出功率越大,对其可靠性指标影响越大.而在同一分布式风电输出功率下,负荷点的等值有效负荷越大,其可靠性指标变化也越大.就整体而言,分布式电源接入配电网对其负荷点的可靠性有着积极的影响.

4 结语

本文用拉丁超立方采样将连续的风速变量离散化,在考虑典型日风速场景重要性的同时对同步回代消减技术进行改进,减少场景数量,兼顾算法的拟合精度和计算效率,选取其中具有代表性的场景,在此基础上建立风机出力多场景模型.分析分布式风力发电接入配电网的并网运行和孤岛运行两种方式,建立了不同场景下相应的切负荷策略,建立计划孤岛划分模型.对最小路法进行改进,计算求得含风机的配电网可靠性相较于传统配电网有所提高,因此风机的接入是对传统配电网的有益补充.本文没有考虑到风机接入位置和容量对配电网可靠性的影响,可作为下一步的研究目标.

[参考文献](References)

- [1] 李琼慧,黄碧斌,蒋丽萍.国内外分布式电源定义及发展现状对比分析[J].中国能源,2012,34(8):31-34.
LI Q H, HUANG B B, JIANG L P. The definition of distributed power at home and abroad and analysis of present situation of the development of comparative[J]. Energy of China, 2012, 34(8): 31-34. (in Chinese)
- [2] 别朝红,李更风,王锡凡.含微网的新型配电系统可靠性评估综述[J].电力自动化设备,2011,31(1):1-6.
BIE Z H, LI G F, WANG X F. Review on reliability evaluation of new distribution system with micro-grid[J]. Electric power automation equipment, 2011, 31(1): 1-6. (in Chinese)
- [3] 蔡红丽.考虑分布式发电的配电网可靠性分析[D].南京:南京理工大学,2010.
CAI H L. Distribution network reliability analysis considering the impacts of distributed generation [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [4] YOKOYAMA R, NIIMURA T, SAITO N. Modeling and evaluation of supply reliability of micro grids including PV and wind power[C]//Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, USA: IEEE, 2008: 1-5.
- [5] 王成山,谢莹华.基于区域非序贯仿真的配电系统可靠性评估[J].电力系统自动化,2005,29(14):39-43.
WANG C S, XIE Y H. Distribution system reliability evaluation based on zone non-sequential simulation[J]. Automation of electric power systems, 2005, 29(14): 39-43. (in Chinese)
- [6] 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,2007,31(22):46-49.
LIU C Q, ZHANG Y. Distribution network reliability considering distribution generation[J]. Automation of electric power systems, 2007, 31(22): 46-49. (in Chinese)
- [7] 向真,张伟.基于改进最小路法的含分布式电源配电网供电可靠性评估[J].陕西电力,2012,38(4):38-41.
XIANG Z, ZHANG W. Reliability evaluation based on improved minimal path algorithm for the distribution system with distributed generation[J]. Shaanxi electric power, 2012, 38(4): 38-41. (in Chinese)
- [8] 沈宏,付广春.改进最小路法在配电系统可靠性评估中的应用[J].中国电力,2010,43(10):20-22.
SHEN H, FU G C. Improved minimal algorithm for reliability evaluation of distribution system[J]. Electric power, 2010, 43(10): 20-22. (in Chinese)
- [9] 柳丹,李强,袁晓冬.考虑随机性的微网能量优化调度模型[J].电力系统保护与控制,2014,45(11):112-117.
LIU D, LI Q, YUANG X D. Economic and optimal dispatching of power microgrid with renewable energy resources based on stochastic optimization[J]. Power system protection and control, 2014, 45(11): 112-117. (in Chinese)
- [10] 何禹清,彭建春,孙芊.考虑风电能量随机性的配电网可靠性快速评估[J].中国电机工程学报,2010,30(13):16-22.
HE Y Q, PENG J C, SUN Q. Fast Algorithm for distribution system reliability evaluation considering the random energy output of wind power generators[J]. Proceeding of the CSEE, 2010, 30(13): 16-22. (in Chinese)
- [11] PAPAVALIOU A, OREN S S, O'NEILL R P. Reserve requirements for wind power integration: a scenario-based stochastic programming framework[J]. IEEE trans on power systems, 2011, 26(4): 2 197-2 206.
- [12] 陈璨,吴文传,张伯明,等.基于多场景技术的有源配电网可靠性评估[J].中国电机工程学报,2012,32(34):67-73.
CHEN C, WU W C, Zhang B M, et al. An active distribution system reliability evaluation method based on multiple scenarios technique[J]. Proceeding of the CSEE, 2012, 32(34): 67-73. (in Chinese)

(下转第60页)

- XIONG H D. Numerical simulation study of solar phase change heat storage tank [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2006. (in Chinese)
- [14] 周慧涛. 太阳能供暖系统中相变蓄热器热性能研究[D]. 河北: 河北科技大学, 2014.
ZHOU H T. Study of thermal performance of the phase change thermal storage in solar heating system [D]. Hebei: Hebei University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [15] 徐国英, 张小松. 复合热源热泵系统集成热/蒸发器的模型[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(增刊 1): 61-64.
XU G Y, Zhang X S. Simulation model of collector/evaporator for multi-source heat pump [J]. Journal of engineering thermophysics, 2006, 27(S1): 61-64. (in Chinese)
- [16] 彭冬根, 张小松, 董华, 等. 圆柱阵列式太阳能空气集热器性能研究-应用于溶液除湿空调系统再生[J]. 太阳能学报, 2008, 29(4): 443-448.
PENG D G, ZHANG X S, DONG H, et al. Performance study of cylindrical array typed solar energy air collector-applied in the regeneration of liquid desiccant air conditioning system [J]. Acta energiae solaris sinica, 2008, 29(4): 443-448. (in Chinese)
- [17] 罗运俊, 何梓年, 王长贵. 太阳能利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 45-49.
LUO Y J, HE Z N, WANG C G. Utilization technology of solar energy [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 45-49. (in Chinese)

[责任编辑: 陈 庆]

(上接第22页)

- [13] 解翔, 袁月, 李振杰. 含微电网的新型配电网供电可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 67-72.
XIE X, YUAN Y, LI Z J. Reliability analysis of a novel distribution network with microgrid [J]. Automation of electric power systems, 2011, 35(9): 67-72. (in Chinese)
- [14] 袁修广, 黄纯, 张磊, 等. 计及微网孤岛运行方式的配电网可靠性评估[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 690-697.
YUAN X G, HUANG C, ZHANG L, et al. Reliability evaluation of distribution network considering islanded operation of microgrid [J]. Power system technology, 2015, 39(3): 690-697. (in Chinese)
- [15] BILLINTON R, JONNAVITHULA S. A test system for system for teaching overall power system reliability assessment [J]. IEEE trans on power systems, 1996, 11(4): 1 670-1 676.

[责任编辑: 严海琳]