

# 基于蒙特卡罗模拟的含微网配电网可靠性评估

梁惠施<sup>1</sup>, 程林<sup>2</sup>, 刘思革<sup>1</sup>

- (1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192;
2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084)

## Monte Carlo Simulation Based Reliability Evaluation of Distribution System Containing Microgrids

LIANG Huishi<sup>1</sup>, CHENG Lin<sup>2</sup>, LIU Sige<sup>1</sup>

- (1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;
2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

**ABSTRACT:** To evaluate the reliability of distribution network containing microgrids such as distributed generations (DGs) and energy storage system, at first the stochastic characteristics of power output of photovoltaic generation and wind power generation are researched, and a reliability model of hybrid generation system consisting of distributed generation and energy storage system is built. On this basis and based on Monte Carlo simulation a reliability evaluation algorithm for distribution network containing microgrids is proposed. Finally, the reliability of modified IEEE DRTS Bus 4 is evaluated by the built model and the proposed algorithm. Evaluation results show that microgrids can effectively improve power supply reliability of distribution system.

**KEY WORDS:** microgrid; distribution system; reliability; distributed generator; energy storage

**摘要:** 以含微网的配电网可靠性评估为研究内容, 首先对光伏发电和风力发电出力随机特性进行了研究, 建立了分布式电源和储能联合发电系统的可靠性模型。在此基础上, 基于蒙特卡罗时序模拟方法, 提出了含微网的配电网可靠性评估算法。最后采用所提出的模型和算法对 IEEE DRTS Bus 4 改进系统进行了评估。算例评估结果表明, 微网能有效提高配电系统的供电可靠性。

**关键词:** 微网; 配电网; 可靠性; 分布式电源; 储能

## 0 引言

随着新能源技术的发展, 低碳经济的要求以及用户自身用电可靠性需求的提高, 分布式电源正被越来越多的电力用户所重视和采用, 而由小容量分布式电源、储能系统和负荷组成的微网则更加令人

关注<sup>[1-3]</sup>。微网将分布式电源、负荷、储能装置及控制系统等结合在一起, 形成一个单一可控的单元, 它既可以与配电系统并网运行, 也可以与配电系统解列后孤岛运行<sup>[4-5]</sup>。

微网对配电网供电可靠性产生了重要影响, 同时也大大增加了配电网可靠性分析的复杂性。国外有学者对此进行了相关的研究。在分布式电源的可靠性模型方面, 目前的研究主要集中在光伏发电和风力发电上<sup>[6-8]</sup>, 但关于储能与分布式电源联合发电系统可靠性模型的研究仍为鲜见。在评估算法上, 目前主要有解析法和模拟法 2 种。文献[9-10]建立了分布式电源的概率模型, 采用解析法对计及分布式电源的配电网可靠性进行了评估。文献[7]对光伏发电和风力发电进行建模, 提出了基于模拟法的微网可靠性评估算法, 但未考虑储能对微网可靠性的影响。文献[11]采用蒙特卡罗方法对孤岛状态下含分布式电源的配电系统可靠性进行了分析。

本文研究了光伏发电和风力发电出力的随机特性, 建立了分布式电源和储能联合发电系统的可靠性模型, 在此基础上基于蒙特卡罗时序模拟方法, 提出了含微网的配电网可靠性评估算法。最后采用所提出的模型和算法对 IEEE DRTS Bus 4 改进系统进行了评估。

## 1 分布式电源和储能联合发电系统的可靠性模型

### 1.1 光伏发电系统输出功率的随机模型

太阳能电池板是光伏发电系统的核心器件, 它的输出功率取决于多种因素, 其中最主要的是电池板上能接收到的太阳光辐射强度。假设太阳能电池

基金项目: 国家自然科学基金优秀国家重点实验室专项基金(50823001)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50823001).

板的面积为  $S$ ，某时刻电池板能接收到的光强为  $I(t)$ ，则该电池板的输出功率  $P_{PV}^{[12]}$ 为

$$P_{PV} = \begin{cases} \frac{\eta_C}{K_C} \cdot S \cdot I(t)^2, & 0 < I(t) \leq K_C \\ \eta_C \cdot S \cdot I(t), & I(t) > K_C \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\eta_C$  为电池板的转换效率； $K_C$  为阈值常数，当入射光强小于  $K_C$  时，输出功率与  $I(t)$  呈二次关系，当入射光强大于  $K_C$  时，输出功率与  $I(t)$  呈线性关系。

太阳光的辐射强度主要取决于太阳高度角和云层遮挡对阳光的衰减效应。一天中太阳高度角随时间的变化可以由一个确定性的函数来决定；而天气变化时，云层对太阳辐射强度的衰减效应却是随机的，如图 1 所示。可以认为，某时刻电池板接收的光强  $I(t)$  等于一个由太阳辐射角确定的基础强度  $I_d(t)$  加上一个随机的衰减量  $\Delta I(t)$ ，即

$$I(t) = I_d(t) + \Delta I(t) \quad (2)$$

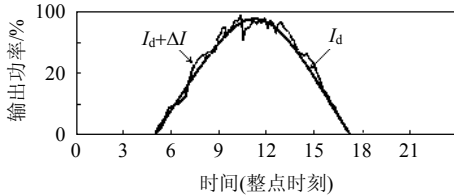


图 1 电池板所接收的光强在一天中的典型变化曲线  
Fig. 1 Typical variation of sunlight intensity accepted by solar panel in a day

定义基础强度  $I_d(t)$  为一个统计时间段内(通常为 1 a)每天  $t$  时刻太阳光辐射强度的平均值。忽略季节变化对日出日落时间的影响，可以近似认为  $I_d(t)$  是一个二次函数，可由下式表示：

$$I_d(t) = \begin{cases} I_{\max} \cdot (-\frac{1}{36}t^2 + \frac{2}{3}t - 3), & 6 \leq t < 18 \\ 0, & 0 \leq t < 6, 18 \leq t < 24 \end{cases} \quad (3)$$

其中： $t$  为一天中的整点时刻； $I_{\max}$  为正午 12:00 时最大日辐射强度的年平均值，即有  $I_{\max} = I(12)$ 。

衰减量  $\Delta I(t)$  主要取决于天空中云层的状态。由于云层不同状态之间的转移概率难以获得，故对  $\Delta I(t)$  做简化处理，可以认为  $\Delta I(t)$  服从正态分布<sup>[4]</sup>。正态分布的概率密度函数表达为

$$f(\Delta I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{\Delta I^2}{2}) \quad (4)$$

### 1.2 风力发电机输出功率的随机模型

风电机组的出力随风速变化而变化，其是否处于发电状态及出力大小都取决于风速的状况。风电机组的输出功率与风速的关系曲线称为风电机组的功率特性曲线，如图 2 所示，其数学表达式可由

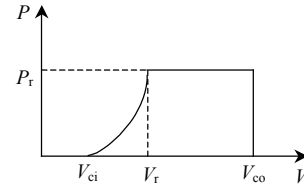


图 2 风电机组功率特性曲线

Fig. 2 Output characteristic curve of wind turbine

式(5)的分段函数近似表示<sup>[13]</sup>：

$$P_t = \begin{cases} 0, & 0 \leq V_t \leq V_{ci} \\ (A + BV_t + CV_t^2)P_r, & V_{ci} < V_t \leq V_r \\ P_r, & V_r < V_t \leq V_{co} \\ 0, & V_t > V_r \end{cases} \quad (5)$$

式中： $P_t$  为  $t$  时刻风电机组出力； $V_t$  为  $t$  时刻的风速， $V_{ci}$ 、 $V_r$ 、 $V_{co}$  分别表示风电机组的切入风速、额定风速和切除风速； $P_r$  为风电机组的额定功率， $A$ 、 $B$  和  $C$  为参数，可由以下公式给出：

$$\begin{cases} A = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} [V_{ci}(V_{ci} + V_r) - 4V_{ci}V_r(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r})^3] \\ B = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} [4(V_{ci} + V_r)(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r})^3 - (3V_{ci} + V_r)] \\ C = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} [2 - 4(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r})^3] \end{cases} \quad (6)$$

虽然风具有随机性和波动性的特点，但大多数地区的风速分布仍具有一定规律，可采用一些经验分布来拟合风速的概率分布。在目前国内外相关研究中，威布尔分布是一种形式较简单且与实际风速分布能较好拟合的概率分布<sup>[14]</sup>。威布尔分布是一种单峰的、2 参数的分布函数簇，其分布函数和概率密度函数分别表达为

$$F(v) = P(V \leq v) = 1 - \exp[-(v/c)^k] \quad (7)$$

$$f(v) = k/c \cdot (v/c)^{k-1} \cdot \exp[-(v/c)^k] \quad (8)$$

式中： $v$  为风速； $k$  和  $c$  为威布尔分布的 2 个参数， $k$  称作形状参数， $c$  称作尺度参数。这 2 个参数可以由平均风速  $\mu$  和标准差  $\sigma$  近似算出：

$$k = (\sigma / \mu)^{-1.086} \quad (9)$$

$$c = \frac{\mu}{\Gamma(1 + 1/k)} \quad (10)$$

### 1.3 分布式电源和储能联合发电系统可靠性模型

#### 1.3.1 分布式电源和储能联合发电系统的功率输出模型

为平滑光伏发电和风力发电出力的波动，储能装置往往和这类间歇性电源配置在一起联合供电，以改善电能质量和提高供电可靠性<sup>[15]</sup>。在微网孤岛运行情况下，当分布式电源输出功率大于负荷需求

功率时，多余能量将储存在储能装置中；当分布式电源输出功率小于负荷需求功率时，储能装置将放电以维持对用户的供电。在可靠性分析中，假定储能装置和分布式电源发电系统是高度自治和可控的，忽略功率调节时间常数的影响，认为在储能装置所储存能量耗尽之前，储能装置和分布式电源发电系统的输出功率可以和负荷达到时刻供需平衡。

在微网孤岛运行期间，当分布式电源输出功率较小(风速/太阳光不足所致)或者不能输出电能(如电源故障、夜间太阳能电池无输出、无风时风机不出力)时，需要依靠储能装置释放电能来维持孤岛系统的稳定，那么孤岛系统运行的时间将受到储能装置存储容量的限制。分布式电源和储能联合发电系统在孤岛运行期间的供电时间  $T_{\text{batt}}$  可以通过求解下式得到：

$$\begin{cases} Q_{\text{remain}} + Q_{\text{charge}} - Q_{\text{discharge}} = Q_{\text{min}} \\ Q_{\text{charge}} = \int_0^{T_{\text{batt}}} [\sum_k P_{\text{DG},k}(t) - P_L(t)] dt, P_L(t) < P_{\text{DG}}(t) \\ Q_{\text{discharge}} = \int_0^{T_{\text{batt}}} [P_L(t) - \sum_k P_{\text{DG},k}(t)] dt, P_L(t) > P_{\text{DG}}(t) \end{cases} \quad (11)$$

式中： $P_L(t)$ 为  $t$  时刻负荷需求功率； $P_{\text{DG},k}(t)$ 为  $t$  时刻微网内第  $k$  个分布电源的输出功率； $Q_{\text{remain}}$  为孤岛运行开始时刻储能装置的剩余容量，考虑到并网运行时配电网可以对储能装置充电，可以认为  $Q_{\text{remain}}$  为储能装置满充时的容量； $Q_{\text{charge}}$  为分布式电源在孤岛运行期间给储能装置充电的电量； $Q_{\text{discharge}}$  为储能装置在孤岛运行期间放电的电量； $Q_{\text{min}}$  为储能装置允许的最小剩余容量。值得指出的是，储能装置的放电功率  $P_{\text{charge}}$  受到其最大放电功率  $P_{\text{max}}$  的限制，即有

$$P_{\text{charge}} = \sum_k P_{\text{DG},k}(t) - P_L(t) \leq P_{\text{max}} \quad (12)$$

式(11)是隐式积分方程，用解析的方法很难求解，可以通过模拟孤岛运行期间每小时分布式电源的出力和负荷的大小来求解。具体算法如下：

1) 初始化。令  $Q_{\text{discharge}}=0$ ,  $Q_{\text{charge}}=0$ ,  $i=1$ , 其中  $i$  为孤岛运行期间的累积小时数。

2) 根据分布式电源的类型，计算孤岛运行期间第  $i$  小时内分布式电源的输出功率  $P_{\text{DG},k}(i)$ 。

①对于光伏发电，抽样该小时段内电池板接收的辐射强度  $I(i)$ ，然后根据式(1)计算  $P_{\text{DG},k}(i)$ 。

②对于风力发电机，抽样该小时段内的风速，然后根据式(5)(6)计算  $P_{\text{DG},k}(i)$ 。

③对于出力稳定的常规机组， $P_{\text{DG},k}(i)$ 即为该机

组的稳定输出功率。

3) 根据时变负荷模型，计算第  $i$  小时内的负荷需求功率  $P_L(i)$ 。

4) 判断是否满足  $\sum P_{\text{DG},k}(i) > P_L(i)$ ，若是，则累计储能装置的充电电量  $Q_{\text{charge}} = Q_{\text{charge}} + \sum P_{\text{DG},k}(i) - P_L(i)$ ；若否，则累计储能装置的放电电量  $Q_{\text{discharge}} = Q_{\text{discharge}} + P_L(i) - \sum P_{\text{DG},k}(i)$ 。

5) 判断是否满足  $Q_{\text{remain}} + Q_{\text{charge}} - Q_{\text{discharge}} \leq Q_{\text{min}}$ ，若是，则  $i$  即为储能装置在孤岛运行期间内供电时间  $T_{\text{batt}}$ ，结束计算，若否，继续下一步。

6) 判断  $i$  是否小于孤岛运行时间，若否，则令  $i=i+1$ ，转到步骤 2)；若是，则  $i$  即为所求的  $T_{\text{batt}}$ ，结束计算。

### 1.3.2 分布式电源和储能联合发电系统可靠性模型

在并网运行模式下，由于有外电网的支撑，分布式电源和储能是否出力并不影响微网内负荷的供电；而在孤岛运行模式下，分布式电源和储能的工作状态将直接影响微网内负荷的供电。根据分析的需要，将分布式电源的工作状态分为故障和无故障 2 种，储能系统的工作状态分为故障、无故障但储能耗尽、无故障且储能未耗尽 3 种。对储能和分布式电源各自的状态进行组合，对微网系统的工作状态进行分析，如表 1 所示。

表 1 微网孤岛运行的工作状态分析  
Tab. 1 Analysis of the operation status when microgrid is in islanded mode

储能及电源的状态组合	储能状态	微网工作情况
储能无故障、 电源无故障	储能未耗尽 储能耗尽	稳定供电 切负荷或停止供电
储能故障、 电源无故障		切负荷或停止供电
储能无故障、 电源故障	储能未耗尽 储能耗尽	稳定供电 切负荷或停止供电
储能故障、 电源故障		切负荷或停止供电

上述几种组合中，在储能由于故障或储能耗尽未能出力的情况下，不论间歇性电源是否出力，由于失去了储能的平滑作用，分布式电源和储能联合发电系统的输出功率将变得不平稳，需要切除这部分电源及与之相应的负荷。在微网内没有其他稳定电源的情况下，微网将停运。

## 2 基于蒙特卡罗模拟的含微网配电网可靠性评估算法

在不影响计算精度的条件下，做如下假设：

1) 所有元件都是可以修复的；2) 不考虑瞬时故障，

只考虑永久故障,即元件故障后,只有元件修复之后才能重新投入运行;3)不考虑断路器等开关设备的误动、拒动;4)微网并网运行和孤岛运行模式之间的平滑切换有一定的失败概率。

基于蒙特卡罗模拟的微网可靠性评估算法的总体思路为:对系统的故障状态进行蒙特卡罗抽样,分析每个故障状态,将受故障影响的负荷分为不能被恢复的负荷、能通过转供被恢复的负荷和微网内的负荷。对微网内的负荷,模拟孤岛运行期间分布式电源的出力,计算电源和储能联合发电系统的供电时间,从而得到微网负荷的停电时间。最后对所有负荷点分别累加其各自的停电次数和停电时间,即得到负荷点的可靠性指标。算法的具体步骤如下:

1)采用式(13)(14)对所有元件的正常工作时间(time to failure, TTF)和故障时间(time to repair, TTR)进行抽样,依次排列形成每个元件在模拟总时间内的运行状态持续时间序列。

$$T_{TTF}^i = -(1/\lambda_i) \cdot \ln u \quad (13)$$

$$T_{TTR}^i = -(1/\mu_i) \cdot \ln u \quad (14)$$

式中: $\lambda_i$ 和 $\mu_i$ 分别为元件*i*的停运率和修复率; $u$ 为(0,1)之间服从均匀分布的随机数<sup>[16]</sup>。

2)综合所有元件的运行状态持续时间序列,找出系统在给定模拟时间内的所有故障事件。

3)对每个故障事件进行分析,找到该故障所影响到的负荷,将这些负荷分为不能被恢复的负荷、能通过转供被恢复的负荷和微网内的负荷。

4)对于能通过转供被恢复的负荷,将此次停运累加到该负荷点的总停电时间(total time to repair, TTTR) $T_{TTTR}^i$ 和总停电次数 $N_i$ ,令 $T_{TTTR}^i = T_{TTTR}^i + T_{TTS}$ , $N_i$ ,其中 $T_{TTS}$ 为分段开关的操作时间。

对于不能被恢复的负荷,系统该次故障持续时间即为负荷的停运时间,令 $T_{TTTR}^i = T_{TTTR}^i + T_{TTRk}$ , $N_i++$ ,其中 $T_{TTRk}$ 为该次系统故障持续时间。

5)对微网内部的负荷作如下处理:

①根据步骤1)所产生的分布式电源和储能发电系统的运行状态序列,检查孤岛运行期间发电系统是否正常运行。如果运行,继续下一步;如果停运,则令 $T_{batt}=0$ ,转到步骤④。

②产生一个(0,1)之间服从均匀分布的随机数 $u_m$ ,判断 $u_m$ 和微网切换成功概率 $p_m$ 的大小。若 $u_m > p_m$ ,则认为此次切换失败,令 $N_i++$ ;若 $u_m \leq p_m$ ,则认为此次切换成功。

③计算分布式电源和储能联合发电系统在孤

岛运行期间的供电时间 $T_{batt}$ 。

④判断是否满足 $T_{batt} < T_{TTRk}$ ,若是则在储能装置电能耗尽至主网恢复供电前,该负荷停运,令 $T_{TTTR}^i = T_{TTTR}^i + T_{TTRk} - T_{batt}$ , $N_i++$ ;若否则负荷不停运。

6)判断当前故障是否给定模拟总时间内的最后一个故障事件,若否,则返回步骤3),若是,则执行下一步。

7)根据各负荷点的总停电时间 $T_{TTTR}^i$ 和总停电次数 $N_i$ ,计算在总模拟时间里各负荷点的平均故障率 $\lambda_i$ 、平均故障时间 $r_i$ 、年平均停电时间 $U_i$ 等可靠性指标。

8)根据负荷点的可靠性指标计算系统的各项可靠性指标。

### 3 算例与分析

#### 3.1 仿真系统及参数

本文编写程序实现了基于蒙特卡罗模拟的含微网的配电网可靠性评估算法,并对基于IEEE配电网可靠性评估测试系统DRTS Bus 4的改进系统进行了计算。算例中考虑的故障元件包括线路、变压器、开关、母线、分布式电源和储能装置。元件的可靠性参数及负荷参数参见文献[17]。假设系统有5个分布式电源(其中2个光伏发电系统,2个小型风场,1台燃气轮机),形成2个微网,见图3。光伏发电系统和小型风机均带有储能装置,分布式电源和储能装置的故障率均为0.05次/a。微网孤岛切换的成功概率为0.85。分布式电源最大输出功率、配置储能容量及可靠性参数如表2所示。

设平均风速为14.6 km/h,风速标准方差为9.75。风机切入风速 $V_{ci}$ 、额定风速 $V_r$ 和切除风速 $V_{co}$ 分别为9、38和80 km/h。太阳能电池板的转换效率 $\eta_c=0.10$ , $k_c=200 \text{ W/m}^2$ ,电池板表面接受的日辐射量在各月中的平均值如表3所示。

#### 3.2 可靠性评估结果

用本文的评估算法对上述算例系统进行10万h的模拟计算。图4、图5分别对比了在没有微网和有微网情况下各负荷点的停运率和年平均停电时间。

由负荷点的可靠性指标可得到配电系统的可靠性指标,计算结果见表4。其中SAIFI为系统平均停电频率指标(system average interruption frequency index);SAIDI为系统平均停电持续时间指标(system average interruption duration index);ASAI为平均系统有效度指标(average system

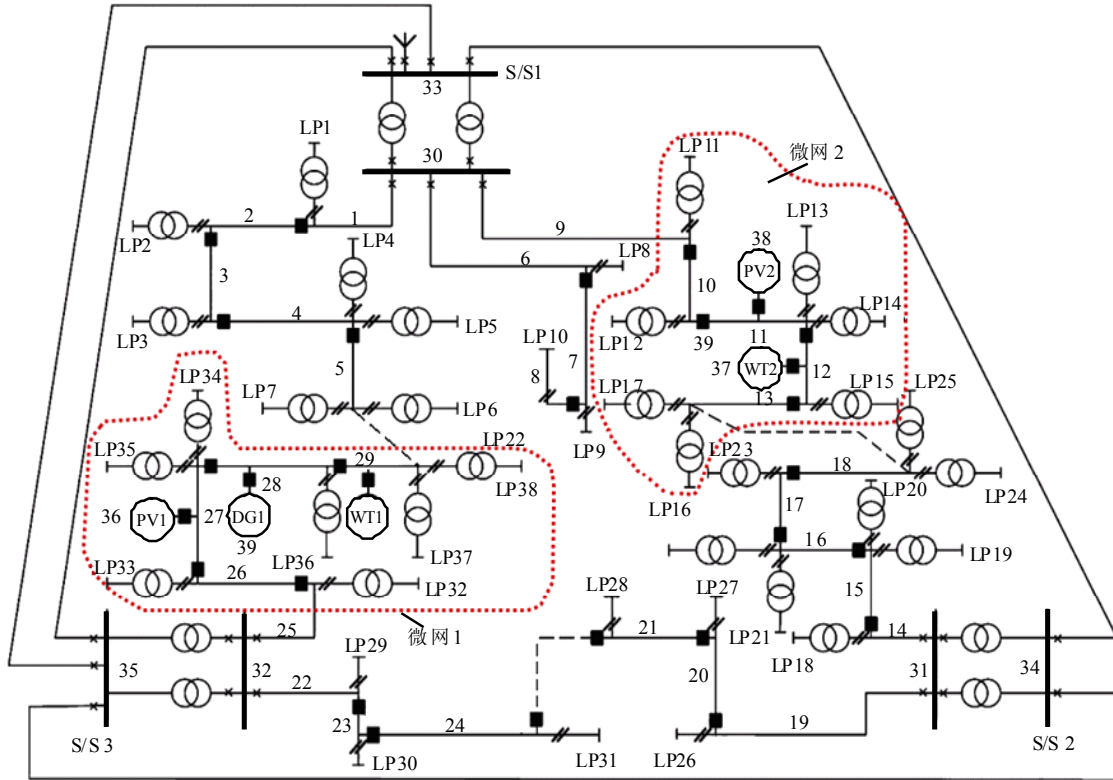


图 3 改进的 IEEE DRTS Bus 4 系统

Fig. 3 Modified IEEE DRTS bus 4 system

表 2 分布式电源及储能参数

Tab. 2 Data of distributed generators and storage

标号	分布式电源类型	最大输出功率/kW	储能容量/(kW·h)	故障率/(次/a)	平均修复时间/h
PV1	光伏发电	1000	200×4	0.12	72
PV2	光伏发电	1500	300×4	0.12	72
WT1	风力发电	2000	400×4	0.22	60
WT2	风力发电	2500	500×4	0.22	60
DG1	燃气轮机	1500	—	0.18	12

表 3 太阳能电池板表面接收的日辐射

Tab. 3 The daylight intensity in every month

月份	1	2	3	4
日辐射量/(kWh/m <sup>2</sup> )	2.01	3.19	5.28	6.32
月份	5	6	7	8
日辐射量/(kWh/m <sup>2</sup> )	5.66	3.87	3.37	2.79
月份	9	10	11	12
日辐射量/(kWh/m <sup>2</sup> )	2.35	2.14	1.65	1.59

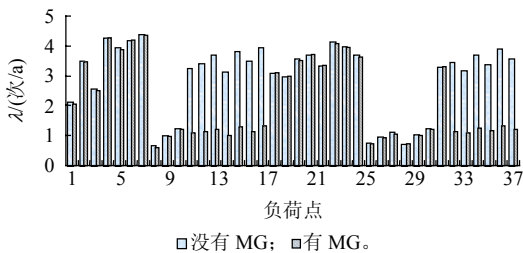


图 4 2 种情况下负荷点的停运率

Fig. 4 Comparison of load points' failure rate in two conditions

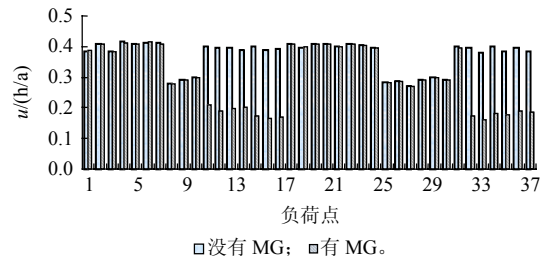


图 5 2 种情况下负荷点年平均停电时间对比

Fig. 5 Comparison of load points' annual average interruption duration in two conditions

表 4 配电网可靠性指标

Tab. 4 Reliability indices of distribution system

系统可靠性指标	没有微网	有微网
SAIFI/(次/户·a)	0.397 8	0.324 1
SAIDI/(h/户·a)	3.398 9	2.975 0
ASAI	0.999 61	0.999 67
EENS/(MW·h/a)	60.343	50.818

availability index).

计算结果表明：1) 分布式电源对微网内负荷点的可靠性有很大影响，微网内负荷点的停运频率和停运时间均有大幅下降。微网的孤岛运行能在配电网发生故障时保证对微网内负荷的供电，大大缩短停运时间，而从并网到孤岛运行的无缝切换能有效减小停运率，从而提高微网内负荷的供电可靠性。然而，分布式电源对微网外负荷点的供电可靠

率没有影响。

2) 对比加入微网前后的配电网可靠性指标, 可看到有微网条件下配电网可靠性指标明显优于没有微网条件下的可靠性指标, 说明微网的适当接入可有效提高配电网的供电可靠性。

## 4 结论

1) 本文研究了光伏发电和风力发电输出功率的随机特性, 建立了分布式电源和储能联合发电系统的功率输出模型, 并提出了求解联合发电系统在孤岛运行期间供电时间的方法。在此基础上, 通过分析分布式电源和储能的状态组合, 建立了分布式电源和储能联合发电系统的可靠性模型。

2) 提出了基于蒙特卡罗时序模拟的含微网的配电网可靠性评估算法, 并对改进的 IEEE DRTS Bus 4 测试系统进行了可靠性评估。

3) 评估结果表明, 在有微网的情况下, 微网内负荷点的停运频率和停运时间均有下降, 但微网对微网外负荷的供电可靠率没有影响。对于配电网而言, 有微网条件下配电网的可靠性指标明显优于没有微网条件下的可靠性指标, 可见微网能有效提高配电网系统的供电可靠性。

## 参考文献

- [1] Lasseter R H, Piagi P. Microgrid: a conceptual solution[C]// Proceedings of IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany: IEEE, 2004: 4285-4290.
- [2] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-105.  
Lu Zongxiang, Wang Caixia, Min Yong. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-105(in Chinese).
- [3] 郑漳华, 艾芊. 微电网的研究现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2008, 32(16): 27-31.  
Zheng Zhanghua, Ai Qian. Present situation of research on microgrid and its application prospects in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(16): 27-31(in Chinese).
- [4] 丁明, 张颖媛, 茆美琴. 微网研究中的关键技术[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 6-11.  
Ding Ming, Zhang Yingyuan, Mao Meiqin. Key technologies for microgrids being researched[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 6-11(in Chinese).
- [5] 黄伟, 孙昶辉, 吴子平, 等. 含分布式发电系统的微网技术研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 14-18.  
Huang Wei, Sun Changhui, Wu Ziping, et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 14-18(in Chinese).
- [6] Abouzahr I, Ramakumar R. An approach to assess the performance of utility-interactive photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1993, 8(2): 145-153.
- [7] Yokoyama R, Niimura T, Saito N. Modeling and evaluation of supply reliability of microgrids 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.
- [8] Billinton R, Chen Hua, Ghajar R. A sequential simulation technique for adequacy evaluation of generating systems including wind energy[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1996, 11(4): 728-734.
- [9] Bae I S, Kim J O. Reliability evaluation of distributed generation based on operation mode[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(2): 785-790.
- [10] Bollen M H J, Sun Y, Ault G W. Reliability of distribution networks with DER including intentional islanding[C]//2005 International Conference on Future Power Systems. Amsterdam, Netherlands: IEEE, 2005.
- [11] 孙瑜, Math Bollen, Graham Ault. 孤岛状态下含分布式电源的配电系统可靠性分析[J]. 电网技术, 2008, 32(33): 77-81.  
Sun Yu, Math Bollen, Graham Ault. Reliability analysis of islanded distribution systems with distributed energy resources[J]. Power System Technology, 2008, 32(33): 77-81(in Chinese).
- [12] Cha S T, Jeon D H. Reliability evaluation of distribution system connected photovoltaic generation considering weather effects[C]// 8th International Conference on Probability Methods Applied to Power Systems. Iowa, USA: Iowa State University, 2004: 451-456.
- [13] Billinton R, Guang Bai. Generating capacity adequacy associated with wind energy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(3): 641-646.
- [14] 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.  
Wang Chengshan, Zheng Haifeng, Xie Yinghua, et al. Probabilistic power flow containing distributed generation in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 39-44(in Chinese).
- [15] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2009, 32(7): 1-9.  
Zhang Wenliang, Qiu Ming, Lai Xiaokang. Application of energy storage technologies in power grids[J]. Power System Technology, 2009, 32(7): 1-9(in Chinese).
- [16] Billinton R, Guang Bai. Generating capacity adequacy associated with wind energy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(3): 641-646.
- [17] Allan R N, Billinton R, Sjarief I, et al. A reliability test system for educational purposes: basic distribution system data and results[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(2): 813-820.



梁惠施

收稿日期: 2011-03-24。

作者简介:

梁惠施(1983), 女, 硕士, 电气工程师, 研究方向为配电网规划, 分布式发电及微电网, E-mail: lianghs@epri.sgcc.com.cn;

程林(1973), 博士, 副教授, 主要从事电力系统可靠性分析、电力系统安全经济分析等方面的教学和科研工作;

刘思革(1975), 男, 博士, 工程师, 主要从事输配电网规划的研究工作。

(责任编辑 李兰欣)