

## 含分布式风光电源的配电系统故障恢复策略

范钧慧<sup>1</sup>, 徐楠<sup>1</sup>, 刘皓明<sup>2</sup>

(1.上海市电力公司检修公司,上海 200063; 2.河海大学能源与电气学院,江苏南京 211100)

**摘要:**具有随机性的风力发电和光伏发电接入配电系统对配电系统的故障恢复有很大的影响。建立了风电场异步电机的稳态模型,将异步风力发电机中的滑差修正量引入到雅克比矩阵中,计算得到含风电场的潮流分布,引入随机潮流分析风电和光伏发电对配电系统故障恢复的影响,建立以系统损耗的期望值最小和开关次数最少为指标的多目标配电系统故障恢复模型,利用基于带精英策略的非支配排序单亲遗传算法求解多目标问题,并通过 IEEE 33 节点配电系统进行仿真,研究结果说明模型的合理性以及方法的有效性。

**关键词:**配电系统;故障恢复;风电;光伏;随机潮流

**中图分类号:**TM912

**文献标志码:**A

**文章编号:**1009-0665(2014)01-0001-04

近年来,随着用户对配电系统供电可靠性和电能质量要求的提高,以及包括风力发电、光伏发电、燃气轮机、燃料电池、蓄电池等分布式电源技术不断发展,分布式电源在配电系统中的容量逐渐增加。分布式电源是在满足现有配电系统运行的基础上设计的小型发电系统,其具有安装灵活、供电方便、低污染等优点。由于分布式电源接在用户侧附近,可直接向用户提供电能,减少了电能传输过程中的损耗,系统经济性大大提高,并可以提高系统的可靠性<sup>[1-4]</sup>。分布式电源与大电网的结合降低了能耗,提高了供电系统可靠性和灵活性,是 21 世纪电力工业的发展方向<sup>[5-7]</sup>。

分布式电源种类较多,特点各异,它们对配电系统的影响有很大差异。分布式电源中有可以人为控制出力的微型燃气轮机和燃料电池,也包含出力与外界自然因素有关的风力发电和光伏发电。对于有功出力与外界自然环境有关的风力发电和光伏发电,由于存在随机性,当系统故障发生后应将这类分布式电源与电网切离,在恢复过程中不利用该类分布式电源形成孤岛,并且恢复过程中需要考虑随机因素的影响。分布式电源特性使传统配电系统故障恢复<sup>[8-11]</sup>不再适用,为了保证含分布式电源的配电系统故障后快速地恢复供电,需要在分析分布式电源对配电系统影响的基础上,深入研究含分布式电源配电系统的故障恢复。针对有功出力与外界环境因素相关性比较大的分布式电源,给出了一种含分布式风光电源的配电系统故障恢复策略,并进行算例验证。

## 1 分布式电源概率模型

### 1.1 风电概率模型

#### 1.1.1 风速概率模型

采用 Weibull 分布来表示风速的分布情况。

Weibull 分布是一种单峰两参数的分布函数簇,其概率密度函数可以表达为:

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

式中: $v$  为风速; $c$  和  $k$  分别表示 Weibull 分布的 2 个参数, $c$  为尺度参数,反映该地区的平均风速, $k$  为形状参数,反映风速的分布特点。

#### 1.1.2 风力机模型

风能通过叶片转化的机械功率可以表示为:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p \quad (2)$$

式中: $\rho$  为空气密度; $R$  为风力机叶片半径; $v$  为风速; $C_p$  为风力机的风能利用系数,是表征风力机效率的重要参数,根据贝茨理论其最大值可以达到 16/27。其中风能利用系数与尖速比( $TSR$ )有关, $TSR$  计算公式如下所示:

$$TSR = \frac{\omega R}{v} \quad (3)$$

式中: $\omega$  为风轮在风速为  $v$  时的旋转角速度(rad/s); $R$  为风轮机的叶片半径。

#### 1.1.3 发电机模型

文中考虑的风力发电机模型主要是异步风力发电机,异步发电机在超同步运行情况下以发电方式运行,此时发电机发出有功功率并从电网吸收无功功率。异步发电机等效模型如图 1 所示。

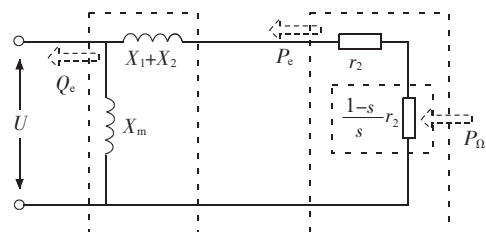


图 1 异步电机等效模型

其中: $X_m$  为励磁电抗; $X_1$  为发电机定子电抗; $X_2$  为发电

机转子电抗;  $r_2$  为发电机的转子电阻;  $s$  为滑差;  $P_e$  为注入电网的有功功率;  $Q_e$  为注入电网的无功功率;  $P_\Omega$  为输入转子的机械功率。从图 1 可以看出,  $P_\Omega$  不仅与异步电机的参数和发电机端电压有关, 并且与  $s$  有关。根据能量守恒功率,  $P_\Omega$  与  $P_m$  应该相等, 因此将  $\Delta P_{mec} = P_m - P_\Omega$  作为不平衡量和滑差修正量引入到牛顿-拉夫逊法中, 迭代过程中当  $P_m$  不等于  $P_\Omega$  时, 对  $s$  进行修正。

## 1.2 光伏发电的概率模型

### 1.2.1 光照强度的随机分布

在某一段时间内, 太阳的光照强度可以近似认为是满足 Beta 分布的, 其概率密度函数可以表示为<sup>[8]</sup>:

$$f\left(\frac{r}{r_{\max}}\right) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{r}{r_{\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1-\frac{r}{r_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (4)$$

式中:  $r, r_{\max}$  分别为实际光照强度和最大光照强度;  $\alpha, \beta$  为 Beta 分布的形状参数;  $\Gamma$  为 Gamma 函数。

### 1.2.2 光伏系统输出功率的随机模型

在给定光照强度的情况下, 光伏方阵总的输出功率  $P_{PV}$  可以通过下式计算得到<sup>[9]</sup>:

$$P_{PV} = r \times A \times \eta \quad (5)$$

式中:  $\eta$  为光伏系统的转换效率;  $r$  为光照强度;  $A$  为光伏系统的总面积。根据概率论与数理统计中随机变量的函数分布定理<sup>[10]</sup>, 以及光照强度与光伏有功出力函数关系, 利用随机变量的函数分布定理, 可以得到光伏有功出力概率分布:

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

式中:  $P_{PV\max}$  为光伏发电的最大输出功率。为了简化计算, 只考虑光伏发电的有功功率, 忽略光伏发电中的无功功率。

## 2 随机潮流计算

为了准确反映风电以及光伏对配电系统故障恢复的影响, 首先考虑含风电以及光伏的随机潮流计算, 采用三点估计法和 Gram-Charlier 展开级数得到各节点电压、各条线路潮流的统计分布。

### 2.1 三点估计法

对每个随机变量  $X_k$  取 3 个估计点, 记为  $X_{k1}, X_{k2}, X_{k3}$ , 可以表示为:

$$X_{ki} = u_k + \xi_{ki} \sigma_k \quad i=1, 2, 3 \quad (7)$$

式中位置度量  $\xi_{ki}$  通过以下公式计算:

$$\begin{cases} \xi_{ki} = \frac{\lambda_{k3}}{2} + (-1)^{3-i} \sqrt{\lambda_{k4} - \frac{3\lambda_{k3}^2}{4}} & i=1, 2 \\ \xi_{k3} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\lambda_{k3}, \lambda_{k4}$  分别为随机变量  $X_k$  的偏度系数和峰度系数, 计算公式为:

$$\begin{cases} \lambda_{k3} = \frac{E[(X_k - u_k)^3]}{(\sigma_k)^3} \\ \lambda_{k4} = \frac{E[(X_k - u_k)^4]}{(\sigma_k)^4} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $E[(X_k - u_k)^3], E[(X_k - u_k)^4]$  分别为随机变量  $X_k$  的三阶和四阶中心矩。  $X_{ki}$  的概率集中度  $p_{ki}$  表达式为:

$$p_{ki} = \frac{(-1)^{3-i}}{[\xi_{ki}(\xi_{k1} - \xi_{k2})]} \quad i=1, 2 \quad (10)$$

$$p_{k3} = \frac{1}{n} - p_{k1} - p_{k2} = \frac{1}{n} - \frac{1}{\lambda_{k4} - \lambda_{k3}^2} \quad (11)$$

利用已有的函数关系  $F=f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , 计算出  $F$  在各个估计点的值  $f$ , 并根据  $p_{ki}$  计算出  $F$  的  $j$  ( $j=1, 2, \dots, 5$ ) 阶矩:

$$E(F^j) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^3 \{p_{ki} \times [f(u_1, u_2, \dots, X_{ki}, \dots, u_n)]^j\} \quad (12)$$

### 2.2 Gram-Charlier 展开级数

对于任意一个随机变量  $X$ , 其期望值为  $u$ , 标准差为  $\sigma$ , 则其标准化随机变量  $\bar{X}$  可以表示为:

$$\bar{X} = \frac{X-u}{\sigma} \quad (13)$$

记  $\bar{X}$  密度函数以及分布函数分别为  $g(x)$  和  $G(x)$ , 根据 Gram-Charlier 级数展开理论,  $G(x)$  和  $g(x)$  可以表示成如下形式:

$$G(x) = \Phi(x) + \frac{C_1}{1!} \Phi'(x) + \frac{C_2}{2!} \Phi''(x) + \dots \quad (14)$$

$$g(x) = \varphi(x) + \frac{C_1}{1!} \varphi'(x) + \frac{C_2}{2!} \varphi''(x) + \dots \quad (15)$$

式中:  $\Phi(x), \varphi(x)$  分别为标准正态分布的累积分布函数和概率密度函数。系数  $C_k$  可以通过下式计算:

$$C_k = (-1)^k \int_{-\infty}^{+\infty} H_k(x) g(x) dx \quad k=1, 2, 3, \dots \quad (16)$$

式中:  $H_k(x)$  为  $k$  阶 Hermite 多项式。

## 3 含分布式风光电源的配电系统故障恢复

### 3.1 故障恢复目标函数

由于风电以及光伏的引入, 原有配电系统的确定性潮流变为随机潮流, 常规的确定性网络损耗作为经济性指标不再适用, 文中采用系统的网络损耗期望值作为经济性指标。对于快速性指标, 主要考虑恢复供电过程中的开关次数。建立的模型如下所示:

$$\min F_1 = \sum_{i=1}^N E_i(P_{\text{loss}}) \quad (17)$$

$$\min F_2 = \sum_{j \in A} S_j \quad (18)$$

式中: $\min F_1$ 为系统网络损耗的希望值最小; $N$ 为线路支路数; $E_i(P_{\text{loss}})$ 为线路*i*的网损期望值,可以通过随机潮流计算得到; $\min F_2$ 为开关动作次数; $A$ 为整个系统范围; $j$ 为开关序号; $S_j$ 为开关动作情况,当开关*j*由断开到闭合或由闭合到断开时, $S_j=1$ ,否则 $S_j=0$ 。

### 3.2 约束条件

(1) 潮流等式约束方程:

$$P_{Gi} + P_i + U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij}) = 0 \quad (19)$$

$$Q_{Gi} + Q_i + U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij}) = 0 \quad (20)$$

(2) 风电机机械功率与电磁功率守恒:

$$P_m = P_\Omega \quad (21)$$

(3) 线路容量约束:

$$S_i \leq S_{i \max} \quad (22)$$

其中: $S_i$ 为线路*i*的容量; $S_{i \max}$ 为线路*i*的容量上限。

(4) 节点电压约束:

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \quad (23)$$

其中: $U_{i \min}$ ,  $U_{i \max}$ 分别为节点*i*的电压下限和上限。

### 3.3 多目标的带精英策略的非支配排序单亲遗传算法的优化求解

#### 3.3.1 带精英策略的非支配排序

对于多目标优化问题,由于多个目标之间往往存在冲突,要寻找一个解在所有目标上均为最优是非常困难甚至无解,因此多目标存在一个解集,这种解集为非支配解或 Pareto 最优解<sup>[11,12]</sup>。多目标优化算法主要有 3 个性能评价指标:所求解要尽量接近 Pareto 最优解;所求解要均匀分布;求解过程中防止获得 Pareto 最优解丢失,其中 NSGA2 采用了快速非支配排序、个体拥挤度距离计算、精英策略使优化过程更加快速均匀地靠近 Pareto 最优解。

#### 3.3.2 单亲遗传算法编码策略

系统中的开关只有 2 种状态,因此可以用二进制来编码,0 代表开关断开,1 代表开关闭合。编码时,利用配电网中“环”的结构特点,将隐含存在的环中的支路编码放在同一个基因块中,为了保证得到的编码对应的配电网满足辐射状和无孤岛条件,只要满足每个基因块中只有一个基因为 0,其余基因全为 1。

如果某个公共支路同时存在 2 个基因块中,还需要另外的判定规则:如果某一公共支路在 2 个基因块中编码同时 0,则此时的编码是不可行解。

## 4 算例分析

采用算例为 IEEE33 节点系统,假设在节点 23 和节点 13 处分别接有风电机以及光伏系统,如图 2 所

示。风电机和光伏系统相关参数如表 1 和表 2 所示。正常运行时,线路 8-14、7-20、11-21、17-32、24-28 断开。假设在时间  $t$  线路 7-8 发生永久性故障。

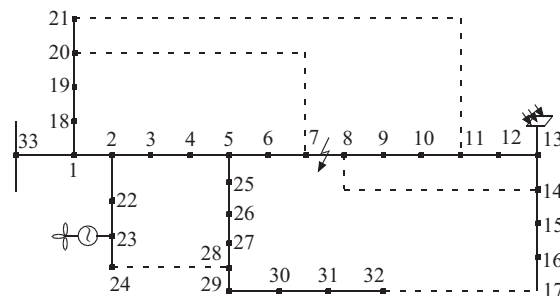


图 2 含风电及光伏的配电系统结构

表 1 风电机相关参数

参数	数值	参数	数值
空气密度 / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1.224 5	转子电抗 / $\Omega$	0.149 1
叶轮半径 / m	24	转子电阻 / $\Omega$	0.004 86
额定电压 / kV	0.69	励磁电抗 / $\Omega$	2.205 9
额定功率 / kW	600	$k$	3.9
定子电抗 / $\Omega$	0.050 7	$c$	10.7

表 2 光伏发电相关参数

参数	数值	参数	数值
光伏总面积 / $\text{m}^2$	10 000	$\alpha$	1.732 1
光电转换效率	0.14	$\beta$	2.888 4
最大辐照度 / ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )	700		

Pareto 优化方案如表 3 所示,从算例分析结果可以看出,方案 3 网络损耗期望值最小,但其需要动作的开关数最多;方案 2 的开关动作次数最少,但是其网络损耗期望值最大;方案 1 的网络损耗期望值以及开关动作次数处于方案 2 和方案 3 之间。在实际故障恢复过程中,操作人员可以根据恢复过程中的侧重不同,选择相应的恢复方案。

表 3 Pareto 优化方案

方案	网络损耗期望值 / kW	开关次数	断开开关
1	117	3	5-6 8-14 17-32 24-28
2	123.8	1	8-14 17-32 24-28 17-20
3	115.2	5	5-6 8-14 31-32 24-28

蒙特卡洛仿真(MCS)是一种通过随机变量的数字模拟和统计分析求取相关问题的数值方法,其具有较高的精度。为了验证文中方法的精确度,对方案 1 分别采用 Gram Charlier 级数展开和 Monte Carlo 法得到状态变量的概率分布曲线进行了比较。异步发电机滑差  $s$  的概率分布曲线如图 3 所示,风电机中尖速比( $TSR$ )

概率分布曲线如图4所示。对异步发电机来说,滑差是一个重要的状态变量,根据图3,利用MSC和Gram Charlier级数展开得到的滑差概率分布基本相同,说明利用Gram Charlier级数展开可以准确表征异步风力发电机的稳态概率模型。

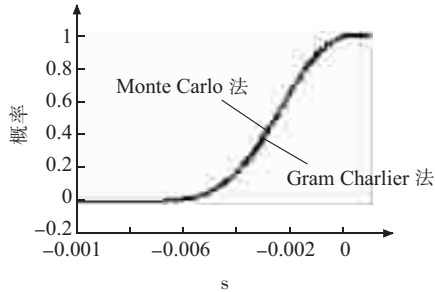


图3 异步发电机滑差概率分布曲线图

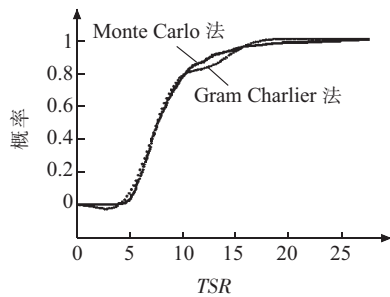


图4 异步发电机尖速比概率分布曲线

网损的概率分布如图5所示,从图中可以看出,Gram Charlier级数展开得到的线路网络损耗的概率分布与MSC得到的线路网损概率分布基本相同。

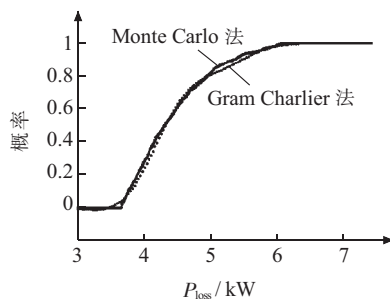


图5 线路22-23损耗概率分布曲线

图6给出了接有异步风电机系统的节点电压幅值概率分布曲线。从图中可以看出,节点电压都满足精度要求,说明该模型以及算法的精确性。

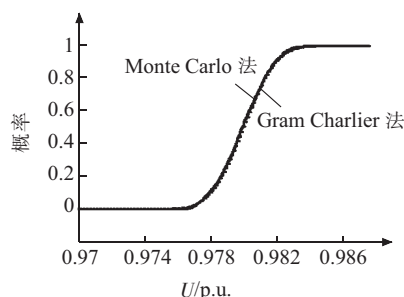


图6 节点23电压幅值的概率分布曲线

## 5 结束语

首先建立了风电机等效模型和光伏发电系统的有功出力随机模型,考虑了风电机原动力与尖速比、滑差等参数之间的函数关系,在牛顿-拉夫逊法中,通过引入滑差修正量,相应地对雅克比矩阵进行修改,得到了含风电机的系统潮流计算。光伏系统等效为随机注入功率,然后利用两点法以及Gram Charlier展开级数计算含风力发电以及光伏发电的随机潮流。在分析了含风电和光伏分布式电源配电系统特点的基础上,建立了最小化网损期望值和开关操作次数的多目标模型,并利用考虑精英策略的非支配排序单亲遗传算法进行优化多目标问题。

### 参考文献:

- [1] DUGAN R C, Mc DERMOTT T E, BALLG J. Planning for Distributed Generation [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2001, 7(2): 80-88.
- [2] DUGAN R C, Mc DERMOTT T E. Distributed Generation [J]. Industry Application Magazine, 2002, 8(2): 19-25.
- [3] 梁有伟,胡志坚,陈允平. 分布式发电及在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 71-75.
- [4] BARKER P P, De MELLO R W. Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems. I. Radial Distribution Systems [J]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, 3(3): 1645-1656.
- [5] MITCHELL C. Value of Distributed Generation-policy Implications for the UK [C]//Proceeding of the 1998 IEE Colloquium on Economics of Embedded Generation, London, UK: IEE Stevenage, United Kingdom, 1998: 1-11.
- [6] DALY P A, MORRISON J. Understanding the Potential Benefits of Distributed Generation on Power Delivery Systems [C]//Rural Electric Power Conference, Little Rock, AR, US: Institute of Electrical and Electronics Engineers Tnc, 2001: 1-13.
- [7] 丁磊. 多微网配电系统的分层孤岛运行及保护控制 [D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [8] 盛四清, 梁志瑞, 张文勤, 等. 基于遗传算法的地区电网停电恢复 [J]. 电力系统自动化, 2011, 25(16): 53-55.
- [9] 李海峰, 张尧, 钱国基, 等. 配电网故障恢复重构算法研究 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 34-37.
- [10] 梁勇, 张焰, 侯志俭. 遗传算法在配电网重构中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 10(4): 29-34.
- [11] 唐斌, 罗安, 王击. 改进遗传算法的编码策略及其在配电网重构中的应用 [J]. 继电器, 2004, 32(13): 35-39.
- [12] 顾国华, 秦永刚. 基于随机规划理论的含异步风电机的配电网故障重构 [J]. 江苏电机工程, 2013, 32(2): 60-63.

### 作者简介:

范钧慧(1975),男,江苏宜兴人,工程师,从事电力系统运行、电网建设方面的工作;

作者简介:

吴 鹏(1983),男,河南西平人,博士,从事线圈类电力设备状态评估研究工;

田 猛(1982),男,河南开封人,工程师,从事高电压试验技术研究工作;

陆云才(1982),男,江苏南通人,工程师,从事线圈类电力设备状态

评估研究工作;

陈铭明(1986),男,江苏南通人,硕士,从事电能计量技术管理与电能质量研究工作;

蔚 超(1984),男,山东莱芜人,硕士,从事线圈类电力设备状态评估研究工作;

吴益明(1964),男,江苏镇江人,高级工程师,从事高电压技术和变压器类设备的研究工作。

## Impacts of Jin – Su HVDC Project on Transformer DC Magnetic Bias in Jiangsu Power Grid

WU Peng<sup>1</sup>, TIAN Meng<sup>2</sup>, LU Yuncai<sup>1</sup>, CHEN Mingming<sup>1</sup>, WEI Chao<sup>1</sup>, WU Yiming<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Zhenjiang Power Supply Company, Zhenjiang 212000, China)

**Abstract:** During the period of high-power bipolar power imbalance adjustment of the  $\pm 800$  kV Jinping-Suzhou HVDC project, an on-line monitoring system is constructed. The impacts, including neutral DC current, vibration, and audible noise, of DC magnetic bias on the 500 kV and 220 kV main transformers 100 km from Suzhou converter station grounding pole are studied. The filed test found that DC magnetic bias increases vibration and audible noise, but no overheating happens and having little impact on main transformers' safe operation. Finally, several suggestions are provided that DC magnetic bias test should be implemented to transformers before coming to operation and on-line monitoring tracking of DC magnetic bias should be strengthened.

**Key words:** HVDC project; DC magnetic bias; bipolar imbalance; on-line monitoring; field test

(上接第 4 页)

徐 楠(1978),男,浙江宁波人,高级工程师,从事电力系统运行、电网建设、电力市场方面的研究;

刘皓明(1977),男,江苏东台人,副教授,从事智能配电网、微电网方向的研究工作。

## Fault Recovery Strategy for Distribution Systems with Distributed Wind-Solar Generating System

FAN Junhui<sup>1</sup>, XU Nan<sup>1</sup>, LIU Haoming<sup>2</sup>

(1. Inspection & Maintenance Company, Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200063, China;

2. College of Energy and Electric Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** Wind power and solar power with the stochastic characteristics have greater influences on fault recovery strategies of distribution system. This paper proposes fault recovery strategies for the distribution system considering the influences of wind and solar power. Firstly, a simplified steady-state equivalent model of an asynchronous generation is used to demonstrate the wind power generators, and the stochastic model of wind speed is adopted. The slip ratio is added into Jacobian matrix to calculate power flow of distribution system. The probabilistic output of solar power is considered as an injection power which is influenced by solar irradiance. Secondly, three-point estimate method is employed to solve probabilistic power flow of distribution systems. The recovery problem is presented as a multi-objective problem with the minimum mean of the system loss and the numbers of switch operation. Fast Elitist Non-Dominated Sorting Partheno-Genetic Algorithm is used to solve this multi-objective problem. A test system is used to show that the models and algorithms proposed are efficient.

**Key words:** distribution systems; fault recovery; wind power; solar power; probabilistic power flow

# 欢迎投稿 欢迎订阅