

# 基于惯性矩最优分位点的主动配电网资源优化配置

李 斌<sup>1</sup> 滕予非<sup>2</sup> 吕 林<sup>1</sup> 刘友波<sup>1</sup> 羊 静<sup>3</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072;

3. 国网四川节能服务有限公司, 四川 成都 610021)

**摘要:** 为了准确描述不可控资源的不确定性, 提出了基于惯性矩的最优分位点将光伏-负荷连续概率密度函数离散为多状态模型。在光伏安装容量和配电网综合年费用指标的基础上, 加入平衡节点有功波动指标, 衡量配电网有功平稳运行能力。首先在上层规划不可控资源的最大安装容量, 在下层为应对不可控资源的接入以及时序不确定性和波动性, 优化配置可控资源, 使其满足最小配电网综合年费用期望和平衡节点有功波动标准差。并提出了最短模糊距离的方法对多目标方案优选。采用改进的遗传算法对所提的模型求解, 通过 IEEE 33 节点算例验证所提模型的有效性和合理性, 同时提高了多状态模型的准确性和配电网有功平稳运行能力。

**关键词:** 有功平稳运行; 基于惯性矩的最优分位点; 不可控-可控资源; 不确定性; 最短模糊距离

**Abstract:** In order to describe precisely the uncertainty of uncontrollable resources, continuous probability density function is transformed into discrete multi-states which is based on the optimal quantiles of inertia of moment. On the basis of photovoltaic access capacity and integrated cost of the distribution system, active power volatility is added which measures the capacity of active power smooth operation in distribution network. Maximum access capacity of uncontrollable resources are planned in the upper level and the lower level planning meets the minimum expectation of the integrated distribution system and standard deviation of active power fluctuation in balance bus. The shortest fuzzy distance is established to prefer multi-objective schemes. The model is solved by the improved genetic algorithm. IEEE 33 node example verifies the effectiveness and rationality of the proposed model which improves the accuracy of multi-states and active power smooth operation.

**Key words:** active power smooth operation; based on optimal quantiles of moment of inertia; uncontrollable-controllable resources; uncertainty; the shortest fuzzy distance

中图分类号: TM715 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)04-0008-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.04.002

## 0 引言

光伏等不可控资源接入配电网, 对配电网的电压、潮流等带来了重大影响<sup>[1-3]</sup>。光伏出力和负荷大小的不确定性, 给配电网运行和规划带来了巨大挑战。不可控清洁能源不确定描述和提高配电网的平稳运行能力是亟需解决的问题。

目前学术界对分布式电源(distributed generator, DG)及配电网运行规划和算法进行了大量研究。文献[4]假定DG恒定不变, 以网损为目标对DG规划。文献[5]建立多目标对DG进行选址定容, 提出基于熵和距离的多目标粒子群算法求解, 但未考虑

基金项目: 国家高技术发展研究计划(863项目)(2014AA051901)

DG的不确定性。文献[6]利用节点电压和网损综合敏感性分析, 筛选分布式电源的安装位置节点, 提高了优化配置的精度。文献[7]运用模糊理论, 以年投资运行费用期望为目标函数进行含DG的配电网模糊优化规划。文献[8]考虑DG不确定性的分布式电源优化配置。文献[9]建立DG与电容的综合优化配置模型, 得到DG与电容的综合优化配置较分别独立配置其经济性和电压质量更优, 但其未考虑有功可控资源应对DG的作用。文献[10]提出了主动配电网一体化设计方法, 采用“分布推进”和“一步一反馈”的渐进优化流程得到最终设计方案。文献[11]采用均分区间建立多状态模型描述分布式电源和负荷不确定性, 其代表性不强。

以上文献基于安全性和经济性对分布式电源接

入配电网做了大量的研究,但运用有功-无功可控资源的优化配置应对不可控资源不确定性和波动性,并且在规划中体现配电网平稳运行鲜有研究。

针对以上问题,为促进DG大力发展,提出在满足消纳条件下,上层尽可能安装光伏;下层在上层安装容量的基础上,采取基于惯性矩的最优分位点将连续密度函数离散为多状态模型抽取场景集,在光伏最大安装容量和最小配电网年综合费用的基础上,考虑配电网平稳运行能力,进行微型燃气轮机和电容器可控资源的优化配置。并提出最短模糊距离的方法对Pareto最优解集优选。通过IEEE 33节点算例验证所提模型的有效性和合理性。

### 1 不可控资源的不确定性建模

建立了分类时序基于惯性矩的最优分位点多状态模型。具体步骤如下:

1) 根据季节和晴雨天将1年分为 $N_c$ 个大类, $g_i = N_i/N_y$ 为*i*类的概率, $N_i$ 为第*i*类包含的天数。

2) 在1)分类的基础上,1天分为24时段,根据历史数据得到第*i*类*t*时段光照强度和负荷大小的期望和方差,求得光照强度Beta分布参数 $\alpha_i, \beta_i$ 和负荷正态分布参数 $\mu_i, \sigma_i$ 。建立时序基于惯性矩的最优分位点的多状态模型如下:

#### 1.1 光伏基于惯性矩的最优分位点的多状态模型

光伏出力受光照强度影响,太阳光照服从Beta分布<sup>[12]</sup>。从而得到光伏出力概率密度函数为

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

式中: $\alpha$ 与 $\beta$ 为Beta分布参数; $\Gamma$ 为Gamma函数; $P$ 为光伏实际出力; $P_{\max}$ 为光伏最大输出功率。

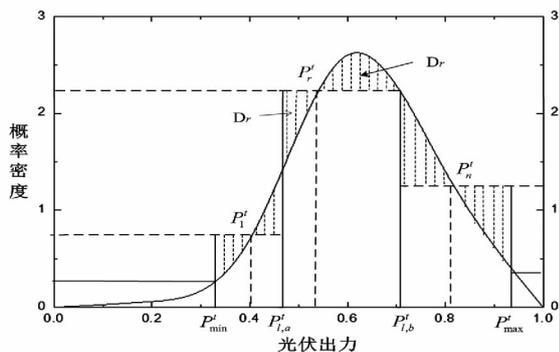


图1 光伏概率密度分布图

计算得到*t*时段光伏有功的最小值 $P'_{\min}$ ,最大值 $P'_{\max}$ 。将*t*时段光伏有功概率密度函数分为 $N_r$

个区间,如图1阴影部分,绕动态 $y = P'_r$ 轴的惯性矩最小,使得相同区间个数条件下,连续概率密度函数分为最相近离散概率密度曲线,进而得到连续的概率密度函数的最优分位点,满足式(2)。多状态代表值为矩形区间的高 $P'_r$ 。

$$\min \sum_{r=1}^{N_r} \int_{D_r} [f(P) - f(P'_r)]^2 d\sigma \quad (2)$$

式中: $N_r$ 为区间个数; $d\sigma$ 为面积积分; $P'_r$ 对应概率为 $g_r$ ,计算公式如下:

$$g_r = \frac{\int_{P'_{r,a}}^{P'_{r,b}} f(P) dP}{\int_{P'_{\min}}^{P'_{\max}} f(P) dP} \quad (3)$$

式中 $P'_{r,a}, P'_{r,b}$ 和 $P'_r$ 分别为*t*时段第*r*个区间光伏有功最小值、最大值和代表值,见图1所示。

光伏采用逆变器复用技术通过逆变器<sup>[13]</sup>接入配电网,光伏*t*时段*r*状态可以吸收和发出无功的最大值为

$$Q_{\text{inmax}} = Q_{\text{oumax}} = \sqrt{S^2 - (P'_r)^2} \quad (4)$$

式中: $Q_{\text{inmax}}, Q_{\text{oumax}}$ 为*t*时段*r*状态光伏吸收和发出无功的最大值; $S$ 为逆变器的额定容量。

#### 1.2 负荷基于惯性矩的最优分位点的多状态模型

负荷服从期望和方差为 $\mu$ 和 $\sigma$ 的正态分布<sup>[14]</sup>,其概率密度函数如下:

$$f(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(P-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

式中 $P$ 为负荷的实际大小。

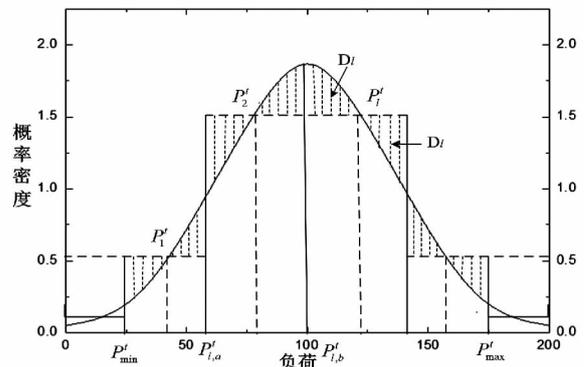


图2 负荷概率密度分布图

计算得到第*i*类*t*时段负荷最小值 $P'_{\min}$ 和最大值 $P'_{\max}$ 。将*t*时段负荷概率密度函数分为 $N_l$ 个区间,如图2阴影部分,绕动态 $y = P'_l$ 轴的惯性矩最小,使得相同区间个数条件下,连续概率密度函数分为最相近离散概率密度曲线,进而得到连续的概率密度函数的最优分位点。通过遗传算法求得每个区间的代表值和对应概率。

$$\min \sum_{l=1}^{N_t} \int_{P_{l,\min}}^{P_{l,\max}} [f(P) - f(P^*)]^2 dP \quad (6)$$

$P^*$ 对应的联合概率为  $g_l$ ，计算公式如下：

$$g_l = \frac{\int_{P_{l,\min}}^{P_{l,\max}} f(P) dP}{\int_{P_{l,\min}}^{P_{l,\max}} f(P) dP} \quad (7)$$

式中  $P_{l,\min}$ 、 $P_{l,\max}$  和  $P^*$  分别为  $l$  时段第  $l$  个区间负荷最小值、最大值和代表值，见图2所示。

## 2 基于改进分位点和平稳运行配电网不可控-可控资源优化配置

双层规划模型中，上层规划结果作用于下层目标函数或约束条件，下层规划结果反馈到上层目标函数或约束条件，实现上下层的相互作用。一般的双层规划数学模型可表示如下：

$$\begin{cases} \min F = F(x, w) \\ s. t. G(x) \leq 0 \\ \min w = f(x, y) \\ s. t. g(x, y) \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中： $F(\cdot)$  为上层目标函数； $G(\cdot)$  为上层约束条件； $f(\cdot)$  为下层目标函数； $g(\cdot)$  为下层约束条件； $x, y$  分别为上层、下层决策变量。

基于改进分位点和配电网平稳运行不可控-可控资源规划中，配电网综合年费用期望需在上层光伏安装容量、微型燃气轮机有功出力 and 电容器组的规划和运行基础上进行计算；光伏安装容量和位置需在返回微型燃气轮机安装容量和联合概率的置信度指标情况下确定。上下层相互制约反复迭代，与双层规划模型相匹配。机会约束是较好解决不确定性的方法，因此采用了机会约束。

### 2.1 上层目标函数与约束条件

在满足容量渗透率和消纳约束的情况下，为促进光伏等清洁能源的发展，希望更多地安装光伏。上层规划以光伏安装容量最大为目标函数。

上层规划目标函数为

$$f_S = \sum_{i=1}^n S_{pvi} + W \cdot R \quad (9)$$

式中： $n$  为节点的总数； $S_{pvi}$  为第  $i$  个节点光伏安装的容量； $R$  为是否满足联合概率的置信度指标； $W$  为惩罚系数。当  $R \geq 1$  时， $W$  为  $-10^9$ ；当  $R$  为其他值， $W$  为 0。

#### 1) 等式约束

$$\begin{cases} P_i - P_{Li} = U_{i,k \in A(i)} \sum U_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik}) \\ Q_i - Q_{Li} = U_{i,k \in A(i)} \sum U_k (G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}) \end{cases} \quad (10)$$

式中： $P_i, P_{Li}$  为第  $i$  节点有功出力与有功负荷大小； $Q_i, Q_{Li}$  为  $i$  节点无功出力与无功负荷大小； $U_i, U_k$  分别为  $i$  节点与  $k$  节点电压幅值； $\delta_{ik}$  为节点  $i$  和节点  $k$  之间的电压相角差； $G_{ik}, B_{ik}$  分别为节点导纳矩阵的实部和虚部。

#### 2) 不等式约束

$$\begin{cases} S_{gi} \leq S_{gi}^{\max} \\ \sum_{i=1}^n (S_{pvi} + S_{gi}) \leq \rho S_{\max} \\ S_{pvi} \leq S_{pvi}^{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中： $S_{gi}$  为第  $i$  节点微型燃气轮机安装容量； $S_{gi}^{\max}$ 、 $S_{pvi}^{\max}$  为第  $i$  节点允许安装微型燃气轮机、光伏的最大容量； $\rho$  为容量渗透率。

### 2.2 下层目标函数与约束条件

在上层光伏位置和容量规划的基础上，进行下层运行和规划，求得配电网综合年费用期望和平衡节点有功波动标准差。

配电网综合年费用期望包括设备投资年费用、运行维护年费用期望、损耗年费用期望和置换年费用期望，不包括光伏设备及其光伏相关费用（为促进光伏的发展，在满足消纳的情况下，没考虑营收）。

$$f_C = C_{\text{inv}} + C_{\text{om}} + C_{\text{loss}} - C_{\text{zh}} \quad (12)$$

式中： $C_{\text{inv}}$  为设备投资年费用； $C_{\text{om}}$  为运行维护年费用期望； $C_{\text{loss}}$  为损耗年费用期望； $C_{\text{zh}}$  为置换年费用期望。

$$C_{\text{inv}} = R(r, l_g) (C_g S_g - C_{sg}) + R(r, l_c) (C_c S_c - C_{sc}) \quad (13)$$

$$R(r, l) = \frac{r(1+r)^l}{(1+r)^l - 1} \quad (14)$$

式中： $C_g, C_c$  为微型燃气轮机和电容器单位容量的投资成本； $S_g$  和  $S_c$  为微型燃气轮机和电容器安装容量； $C_{sg}$  和  $C_{sc}$  为微型燃气轮机和电容器的残值； $l_g$  和  $l_c$  为设备微型燃气轮机和电容器的使用寿命； $R(r, l)$  为等年值系数； $r$  为贴现率； $l$  为设备寿命。

$$C_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^{N_{\text{sys}}} N_i P_{t,i}^j P_{i,\text{loss}}^j \quad (15)$$

式中： $V$  为网损电价； $P_{i,\text{loss}}^j$  为第  $i$  类  $t$  时段配电网第  $j$  状态的有功损耗。

$$C_{\text{om}} = C_o + C_m \quad (16)$$

式中： $C_o, C_m$  分别为运行费用期望、维护费用期望。

$$C_o = \sum_{i=1}^{N_c} N_i \sum_{j=1}^{24} \sum_{l=1}^{N_{\text{sys}}} g_{l,i}^j (C_g P_{g,j}^i + C_c Q_{c,j}^i) \quad (17)$$

式中： $C_g, C_c$  为单单位有功微型燃气轮机与无功电容器组运行费用； $P_{g,j}^i, Q_{c,j}^i$  分别为  $i$  类第  $j$  状态微型燃气轮机出力与电容器组的无功出力。

$$C_m = b_g S_g + b_c S_c \quad (18)$$

式中:  $b_g$ 、 $b_c$  为单位容量微型燃气轮机与电容器组维护费用;  $S_g$ 、 $S_c$  为微型燃气轮机和电容器组安装容量。

$$C_{zh} = C_{bef} - C_{now} \quad (19)$$

$$C_{bef} = \sum_{i=1}^{N_c} N_i \sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^{N_{sys}} p_{t,i}^j P_{gt}^j \beta_b \Delta t \times (c_c + a_{co_2} E_{co_2} + a_{so_2} E_{so_2} + a_{no_x} E_{no_x}) \quad (20)$$

$$C_{now} = \sum_{i=1}^{N_c} N_i \sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^{N_{sys}} p_{t,i}^j [C_{gt} F_{fj} + P_{gt}^j \Delta t \cdot (a_{co_2} E_{co_2} + a_{so_2} E_{so_2} + a_{no_x} E_{no_x})] \quad (21)$$

式中:  $\beta_b$  为平衡节点煤电所占比重;  $a_{co_2}$ 、 $a_{so_2}$  和  $a_{no_x}$  为单位废气排放费用;  $E_{co_2}$ 、 $E_{so_2}$  和  $E_{no_x}$  为单位电量造成的废气排放量;  $c_c$  为单位煤电的燃煤费用;  $C_{gt}$  为单位燃料费用;  $F_{fj}$  为  $j$  状态燃气总的消耗量。

$$\Delta P = \sum_{i=1}^{24} \left| \sum_{k=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_{sys}} g_i g_{t,i}^j P_{t,i}^j \Delta P_o \right| / 24 \quad (22)$$

$$\Delta P_o = \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^{N_{sys}} g_i g_{t,i}^j P_{t,i}^j \quad (23)$$

下层规划约束条件:

1) 等式约束, 即节点潮流方程

$$\begin{cases} P_i^j - P_{Li}^j = U_k^j \sum_{k \in A(i)} U_k^j (\cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik}) \\ Q_i^j - Q_{Li}^j = U_k^j \sum_{k \in A(i)} U_k^j (G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}) \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $P_i^j$ 、 $P_{Li}^j$  为  $i$  节点  $j$  状态有功出力与有功负荷大小;  $Q_i^j$ 、 $Q_{Li}^j$  为  $i$  节点  $j$  状态无功出力与无功负荷大小;  $U_i^j$ 、 $U_k^j$  分别为  $i$  节点与  $k$  节点  $j$  状态的电压幅值;  $\delta_{ik}$  为节点  $i$  和节点  $k$  之间的电压相角差;  $G_{ik}$ 、 $B_{ik}$  分别为节点导纳矩阵的实部和虚部。

2) 不等式约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{gi}^j \leq S_{gi} \\ 0 \leq Q_{ci}^j \leq S_{ci} \\ 0 \leq T_c \leq T_{max} \\ -Q_{inmax}^j \leq Q_{pv}^j \leq Q_{oumax}^j \end{cases} \quad (25)$$

式中:  $P_{gi}^j$  为  $j$  状态  $i$  节点微型燃气轮机有功;  $S_{gi}$  为  $i$  节点微型燃气轮的装机容量;  $Q_{ci}^j$  为  $j$  状态  $i$  节点电容器组的无功;  $S_{ci}$  为  $i$  节点电容器组装机容量;  $T_c$ 、 $T_{max}$  分别为电容器 24 时段电容器总的投切次数和允许的最大投切次数;  $Q_{inmax}^j$ 、 $Q_{pv}^j$ 、 $Q_{oumax}^j$  分别为  $j$  状态光伏电源吸收无功最大值、实际无功值和发出无功最大值。

$$g\{U_{min} \leq U_m \leq U_{max}\} \geq \alpha \quad m \in \Omega_{node} \quad (26)$$

$$g\{S_{mn} \leq S_{max}\} \geq \beta \quad m \in \Omega_{node} \quad (27)$$

$$R = \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^{N_{sys}} g_i g_{t,i}^j \geq \gamma \quad (28)$$

式中:  $g\{B\}$  表示事件  $B$  发生的概率;  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  为电压、容量和联合概率的置信度;  $U_m$  是节点电压;  $S_{mn}$  为支路容量;  $\Omega_{node}$  为系统的节点集合。

### 2.3 多目标最优决策

通过多目标优化算法求得 Pareto 最优解集, 提出最短模糊距离的方法进行方案优选。对 3 个目标分别构造模糊隶属度函数<sup>[15]</sup>, 使得光伏安装容量、配电网综合年费用期望和平衡节点有功波动标准差在  $[0, 1]$  内量化评估。最小值目标采用式 (29) 求隶属度, 最大值目标采用式 (30) 求隶属度。

$$\mu(f) = \begin{cases} 1 & f \leq F_0 \\ \frac{F_1 - f}{F_1 - F_0} & F_0 < f \leq F_1 \\ 0 & f > F_1 \end{cases} \quad (29)$$

$$\mu(f) = \begin{cases} 1 & f > F_1 \\ \frac{F_0 - f}{F_0 - F_1} & F_0 < f \leq F_1 \\ 0 & f \leq F_0 \end{cases} \quad (30)$$

随机变量隶属度都在  $[0, 1]$  波动,  $(1, 0, 0)$  为光伏安装容量的最优值;  $(1, 1, 1)$  为虚拟理想最优解。

$$l_{best} = \sqrt{(x-1)^2 + (y-1)^2 + (z-1)^2} \quad (31)$$

求得 Pareto 最优解集, 通过式 (29) ~ 式 (30) 求得隶属度对  $(x, y, z)$ , 此隶属度对到虚拟理想最优隶属度  $(1, 1, 1)$  的距离最短为优选方案。

## 3 求解算法

步骤 1: 上层采用二进制编码, 通过遗传算法进行上层规划, 并将上层规划的光伏安装位置和容量传递到下层。

步骤 2: 依据上层光伏安装位置和容量, 采用 1.1 小节的理论抽取时序多状态, 下层采用浮点数编码, 并根据下层的目标函数, 进行电容器组和微型燃气轮机的优化运行。

步骤 3: 进行联合概率的叠加, 在每个状态下进行遗传、变异, 并通过机会约束求解微型燃气轮机和电容器组容量。将  $R$  和微型燃气轮机的容量返回到上层进行计算, 后遗传、变异, 并返回步骤 2 继续优化运行, 并通过。直到满足终止条件。

## 4 算例分析

以 IEEE 33 节点配电系统<sup>[16]</sup> 为例仿真分析。平衡节点基准电压取为 10 kV, 配电网的最大负荷为 6 348 kW, 最小负荷为 1 469 kW。光伏电源安装

待选节点为4、13、17、21、27; 光伏无功的费用参考文献[17]; 平衡节点注入功率的60%由火电厂提供, 单位电量废气及排放费用与燃煤成本参考文献[18]; 微型燃气轮机和电容器的待选节点为7、14、17、22、25、31、33; 单位容量设备投资费用和维护费用参考文献[19]; 电容器的24个时段最多投切次数为4次; 燃气消耗量 $F_{T_g}$ 可通过曲线拟合得到和单位电量废气排放量参考文献[20]; 设定以下3种方案进行仿真分析。方案1、方案3采用基于惯性矩的最优分位点的多状态模型; 方案2采用文献[11]的多状态模型。方案其他参数见表2。

表2 方案汇总表

方案	最优多状态模型	微型燃气轮机	电容器组
方案1	√	×	√
方案2	×	√	√
方案3	√	√	√

方案1、方案2和方案3的 Pareto 最优解集如图3和图4所示。

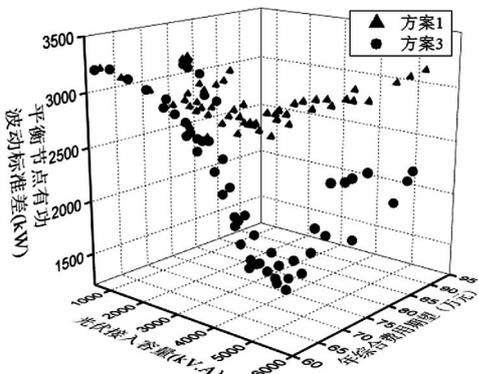


图3 方案1和方案3多目标指标对比

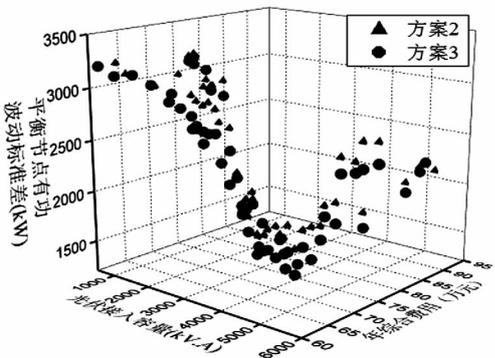


图4 方案2和方案3多目标指标对比图

由图3和图4分析如下: 方案1和方案3对比, 为应对不可控资源不确定性和波动性, 有功-无功可控资源较只进行无功可控资源优化配置, 在保证消纳、满足电压和容量置信度的条件下, 综合年费用更低, 且平衡节点有功波动更小。

表3 不同方案的规划结果指标

方案	光伏安装容量/(kV·A)	配电网综合年费用期望/万元	平衡节点有功波动标准差/kW
方案1	4 700	82.32	3 150
方案2	4 600	79.71	2 180
方案3	4 700	75.47	1 920

分别在方案1、方案2和方案3的 Pareto 最优解中, 基于最小模糊距离进行方案优选, 优选方案规划结果和指标如表3、表4所示。方案1和方案3对比, 应对相同容量光伏不可控资源, 配电网系统综合费用降低了6.85万元; 平衡节点有功波动标准差减少了39.1%。即有功-无功可控资源优化规划, 提高了配置方案的经济性, 增强了配电网平稳运行能力。方案2和方案3对比, 单位光伏配电网综合年费用降低了1.26万元; 平衡节点有功波动标准差降低了11.9%。即所提的基于惯性矩的最优分位点的多状态场景模拟不确定性更具代表性, 提高了计算精度, 在进行优化规划有功-无功可控资源上减少设备浪费。

通过蒙特卡洛模拟抽取随机场景 $24 \times 8$ 个, 在3种方案的规划下优化运行, 统计所有状态所有节点电压标幺值如图5和图6所示。

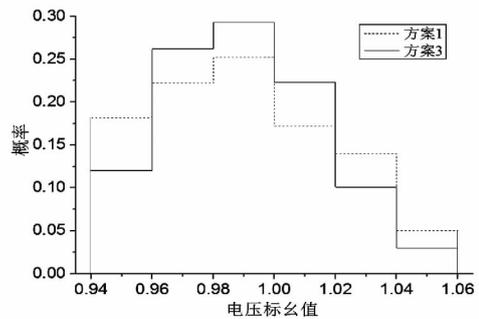


图5 方案1与方案3电压对比图

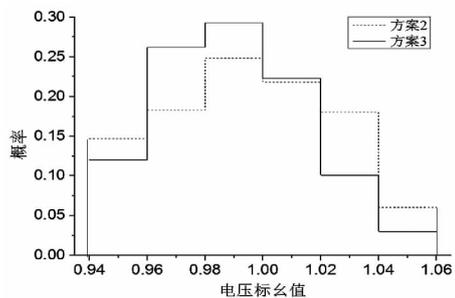


图6 方案2与方案3电压对比图

方案1、方案2和方案3节点电压标幺值在0.96~1.04范围内的分别占总体的74.8%、76.3%和86.2%。方案3较方案1和方案2, 总体电压质量更优, 说明有功-无功可控资源联合优化配置较无功优化配置应对电压波动更优。方案3较方案2, 计算精度提高了10.1%, 说明所建立的基于惯性

表4 不同方案规划结果

方案	光伏安装位置	光伏安装容量 (kV·A)	微型燃气轮机 安装位置	微型燃气轮机安 装容量/(kV·A)	电容器组 安装位置	电容器 安装容量/(kV·A)
方案1	4, 13, 21, 27	1 800, 1 200, 1 000, 700	不考虑	不考虑	7, 17, 22, 25, 31	450, 1 020, 960, 830, 1 440
方案2	4, 17, 21, 27	1 800, 800, 1 100, 800	6, 17, 25, 33	200, 300, 300, 300	7, 17, 25, 31	620, 850, 850, 980
方案3	4, 13, 21, 27	1 800, 1 200, 1 000, 700	6, 17, 25, 33	300, 200, 0, 300	7, 17, 25, 31	420, 1 130, 570, 1 320

矩的最优分位点多状态模型更好地模拟了不可控资源的不确定性,在进行电压调整时提高了计算精度。

## 5 结 论

有功-无功可控资源应对光伏、风电等不可控资源不确定性和波动性带来的问题较只进行无功可控资源优化配置在经济性和电压质量上更佳,同时提高配电网平稳运行能力,使得规划运行一体化考虑的更加全面。所提的基于惯性矩的最优分位点的多状态模型更好地模拟了不可控资源的不确定性,提高了计算精度,为促进不可控清洁能源的接入和发展具有一定的指导意义。

### 参考文献

[1] Ashem A, Ledwich G. Distributed Generation as Voltage Support for Single Wire Earth Return Systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1002-1011.

[2] 吕清洁,王韶,刘庭磊. 含分布式发电的配电网有功-无功综合优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 71-76.

[3] 周家南,苏宏升. 计及负荷电压静特性的含分布式电源的前推回代潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 26-32.

[4] 向月,刘俊勇,刘友波,等. 考虑质心映射与路径解析的分布式电源优化配置搜索策略[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 133-140.

[5] 栗然,马慧卓,祝晋尧,等. 分布式电源接入配电网多目标优化规划[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 6-13.

[6] 黄付顺,王倩,何美华,等. 基于综合敏感性分析的时序分布式电源规划[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 44-49.

[7] 杨毅,韦钢,周冰,等. 含分布式电源的配电网模糊优化规划[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(13): 19-23.

[8] Martins V F, Borges C L T. Active Distribution Network Integrated Planning Incorporating Distributed Generation and Load Response Uncertainties [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2164-2172.

[9] 邓威,李欣然,刘志勇,等. 考虑无功补偿影响因素

的间歇性分布式电源综合优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 80-88.

[10] 柳春芳. 主动配电网一体化设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 49-55.

[11] 张璐,唐巍,丛鹏伟,等. 基于机会约束规划和二层规划的配电网广义电源优化配置[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 50-58.

[12] Karaaki 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.

[13] 胡楷,杨俊,单庆晓. 光伏并网逆变器复用技术仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(11): 2728-2731.

[14] 刘健,徐精求,董海鹏. 配电网概率负荷分析及其应用[J]. 电网技术, 2004, 28(6): 67-70.

[15] 陈水利. 模糊集理论及其应用[J]. 北京: 科学出版社, 2005.

[16] Baran M E, Wu F F. Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, 3(4): 1401-1407.

[17] Rabiee A, Shayanfar H A, Amjady N. Reactive Power Pricing [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2009, 7(1): 18-32.

[18] 徐讯,陈楷,龙禹,等. 考虑环境成本和时序特性的微网多类型分布式电源选址定容规划[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 914-921.

[19] 钱科军,袁越,石晓丹,等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 11-15.

[20] 杨艳红,裴玮,齐智平. 基于动态运行策略的混合能源微网规划方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 30-36.

### 作者简介:

李 斌(1990), 硕士生, 研究方向为配电网规划与运行分析;  
 滕予非(1984), 博士、高级工程师, 研究方向为电力系统分析与控制;  
 吕 林(1963), 教授, 研究方向为配电网规划、重构优化等;  
 刘友波(1983), 博士, 研究方向为主动配电网规划和运行分析。  
 (收稿日期: 2017-02-24)