

## 考虑风电随机性的多场景配电网重构

初壮<sup>1</sup>, 窦孝祥<sup>1</sup>, 于群英<sup>2</sup>

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012;  
2. 国网吉林省电力有限公司电力科学研究院, 吉林 长春 130021)

**摘要:** 配电网重构是配电网优化运行的一项重要措施, 分布式电源(Distributed Generation, DG)以其清洁性和可再生性越来越多地被引入到配电网重构中。针对出力随机的 DG 对配电网重构的影响, 将基于 Wasserstein 距离指标的场景划分法引入到配电网重构中, 将风电划分为多个场景。在兼顾风电随机性以及负荷波动性的条件下, 提出了基于二进制粒子群算法的最优方案确定策略, 建立了配电网重构模型。提出基于排同存异的环路编码及初始种群生成策略, 提高了计算效率。在 IEEE33 节点配电网系统下对所建立的模型进行求解, 验证了所提策略的可行性和有效性, 并得到了同时适应风电随机性以及负荷波动性的最优重构方案。

**关键词:** 配电网重构; Wasserstein 距离; 风电随机性; 负荷波动性; 二进制粒子群算法

### Multi scene distribution network reconfiguration considering the randomness of wind power

CHU Zhuang<sup>1</sup>, DOU Xiaoxiang<sup>1</sup>, YU Qunying<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;  
2. Electric Power Research Institute, State Grid Jilin Electric Power Ltd., Changchun 130021, China)

**Abstract:** Distribution network reconfiguration is an important measure for optimal operation of distribution network. Because of its clean and renewable distributed generation, it is more and more introduced to distribution network reconfiguration. In view of the output random DG's influence on the distribution network reconfiguration, the scene division method based on Wasserstein distance index is introduced into the distribution network reconfiguration and the wind power is divided into a number of scenes. Considering the randomness of wind power and load fluctuations, this paper puts forward the optimal scheme to determine strategy based on binary particle swarm optimization algorithm and establishes the model of distribution network reconfiguration. A loop coding and initial population generation strategy is put forward based on the rule "out the same and reserve the different", the computation efficiency is improved. The established model is solved in the IEEE33 node distribution network system. The feasibility and effectiveness of the proposed strategy are verified and an optimal reconstruction scheme is obtained, which is adapted to the randomness of wind power and the load fluctuation.

**Key words:** distribution network reconfiguration; Wasserstein distance; randomness of wind power; load fluctuation; binary particle swarm optimization algorithm

## 0 引言

配电网重构<sup>[1]</sup>就是重新组合配电网中联络开关和分段开关的开闭状态, 从而使配电网运行于最佳状态。风电等 DG 加入到配电网重构中对减小网损、提高负荷点电压、平衡负荷以及补充能源不足有积极的意义。风电出力具有较强的随机性, 在配电网中的渗透率日益增加, 对重构的影响已不容忽视。

稍早对含 DG 的配电网重构的研究多是将 DG

出力设为定值, 未考虑随机性的影响<sup>[2-4]</sup>。也有学者在研究中考虑了负荷的波动性。文献[5]应用点估计法随机潮流对所建数学模型进行求解, 得到的重构结果能适应负荷的小范围波动。文献[6]建立了多负荷方式的配电网重构模型, 得到了不同负荷运行方式下综合网损最小的重构方案。文献[5-6]在考虑负荷波动性的同时均未考虑 DG 的随机性。

近年来, 一些学者对考虑风电随机性的配电网重构进行了初步的研究。文献[7]建立了风电随机模

型, 介绍了含风电的随机潮流算法, 用粒子群和最小生成树混合算法进行求解。文献[8]利用非序贯蒙特卡洛模拟法产生一组风速, 算出风速所对应的风电出力, 每个出力则对应一个场景, 并且给出了每个场景最优方案确定的方法。文献[9]考虑了风电的随机性, 通过场景分析法建立多场景风力发电模型, 将风电场景划分为零输出、欠额定输出和额定输出三种场景, 分别求解配电网重构的最优方案。对于欠额定输出这一场景, 取该场景下出力的期望值作为计算值, 将期望值代表整个场景内的出力, 误差较大。文献[8-9]为突出风电随机性对配电网重构的影响, 均未考虑负荷的波动性。

本文在前人的研究基础上, 将基于 wasserstein 距离指标的场景划分法引入到配电网重构中, 建立多场景配电网重构模型, 提出基于排同存异的环路编码及初始种群生成策略, 提出基于二进制粒子群算法的最优方案确定策略。研究同时兼顾了负荷的波动性, 在最大负荷运行方式、一般负荷运行方式以及最小负荷运行方式下分别求解相应的最优解。最后根据最优方案确定策略计算出同时适应风电随机性以及负荷波动性的最优重构方案。

## 1 风电的数学模型

现有的研究<sup>[10-11]</sup>一般用 Weibull 分布来描述风速, 数学模型如下:

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

式中,  $k$  和  $c$  分别表示风速  $v$  的形状参数和尺度参数。风电功率和风速的关系如式(2)<sup>[9]</sup>。

$$P_w = \begin{cases} 0 & v < v_{ci}, v \geq v_{co} \\ P_n v / (v_n - v_{ci}) - v_{ci} & v_{ci} \leq v < v_n \\ P_n & v_n \leq v < v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $v_{ci}$  表示风电机组的切入风速;  $v_{co}$  表示风电机组的切出风速;  $v_n$  表示额定风速;  $P_n$  表示风电机组的额定功率。根据文献[10-11],  $0 < P_w < P_n$  时风电出力的概率密度函数如式(3)。

$$f(P_w) = \frac{khv_{ci}}{P_n c} \left[ \frac{(1 + P_w h / P_n)v_{ci}}{c} \right]^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{(1 + P_w h / P_n)v_{ci}}{c} \right)^k \right] \quad (3)$$

上式中,  $h = (v_n / v_{ci}) - 1$ ;

$P_w = 0$  时,  $f(P_w) = 1 - (F(v_{co}) - F(v_{ci}))$ ;

$P_w = P_n$  时,  $f(P_w) = F(v_{co}) - F(v_n)$ 。

## 2 基于 wasserstein 距离指标的场景划分

### 2.1 wasserstein 距离的定义

wasserstein 距离用于衡量两个概率分布之间的差距, 用以下数学表达式表述 wasserstein 距离<sup>[12]</sup>。

$$W_r(G_1, G_2; L) = \int L[G_1(x), G_2(x)]^r dx \quad (4)$$

式中:  $G_1$  和  $G_2$  是两个概率密度函数;  $L(G_1, G_2)$  表示概率测度;  $r$  表示阶数。

### 2.2 基于 wasserstein 距离指标的最优分位点

场景分析法是一种常用的处理随机性问题的有效方法, 它的实质是将随机性问题离散化, 离散成多个场景, 从而将全场景下不确定的数学问题转化成了单个场景下确定的数学问题进行求解, 避免了建立复杂的难以求解的随机数学模型。场景的划分是求解随机性问题的关键。

对于如下的优化问题:

$$d_H = \min \left\{ \left| \int h(w) dG_1(w) - \int h(w) dG_2(w) \right| : h \in H \right\} \quad (5)$$

$G_1$  是一个连续变量, 或是一个拥有庞大数量的质点集合的离散型随机变量。该优化问题是要找到一个含有少量质点的简单离散分布  $G_2$  用于近似描述  $G_1$ 。根据 wasserstein 距离指标描述并求解上述优化问题, 得到的用于描述  $G_1$  的少量质点即是基于 wasserstein 距离的最优分位点。对任一概率密度函数  $G(x)$  确定其最优分位点  $z_s (s=1, 2, \dots, S)$  的数学表达式<sup>[13]</sup>:

$$\int_{-\infty}^{z_s} G^{1+r}(x) dx = \frac{2s-1}{2S} \int_{-\infty}^{\infty} G^{1+r}(x) dx \quad (6)$$

各个分位点的概率由式(7)求出。

$$\begin{cases} P_s = \int_{z_{s-1} + z_s}^{z_s + z_{s+1}} G(x) dx, & s = 2, \dots, S-1 \\ P_1 = \int_{z_0}^{z_s + z_{s+1}} G(x) dx \\ P_S = \int_{z_{s-1} + z_s}^{z_{S+1}} G(x) dx \end{cases} \quad (7)$$

在场景分析中, 每个用于描述原概率分布的最优分位点都对应一个场景。有相关研究<sup>[14]</sup>已经论证了基于 wasserstein 距离指标的场景划分方法优于采用其他距离指标的场景划分方法, 也即采用 wasserstein 距离指标划分的场景更能精确地描绘出原随机问题的概率分布, 与其他方法相比由此方法得到的离散型概率分布在概率测度空间上和原随机问题概率分布相比, 距离更小。故本文利用基于 wasserstein 距离指标的最优分位点划分风电出力的场景。

## 2.3 风电场景的划分

文献[14]根据式(3)以及式(6)推导出确定风电出力最优分位点的计算公式如式(8)。

$$\begin{aligned} c_3 \Gamma(a) [\Gamma(c_1 + c_2 z_s, a) - \Gamma(c_1, a)] = \\ c_3 \Gamma(a) [\Gamma(c_1 + c_2, a) - \Gamma(c_1, a)] (2s - 1) / 2S \end{aligned} \quad (8)$$

式中： $c_1 = v_{ci} / c$ ； $c_2 = (v_{ci} / c)(h / p_w)$ ； $c_3 = (kc_2)^{-r/(1+r)}(1+r)a$ ； $a = (k+r) / [(1+r)k]$ ； $\Gamma$ 为不完全伽马函数。

## 3 配电网重构模型

对于配电网重构问题，国内外的学者建立了多种目标，每种目标所研究的侧重点不同。其中多以配电网网损最小作为研究目标，本文也将其作为目标函数，其数学模型如式(9)。

$$\min f = \sum_{k=1}^{N_L} R_k \frac{P_k^2 + Q_k^2}{V_k} \quad (9)$$

式中： $N_L$ 代表配电网中支路的数目； $k$ 表示支路的编号； $P_k$ 代表支路 $k$ 的有功功率； $Q_k$ 代表支路 $k$ 的无功功率； $R_k$ 代表支路 $k$ 的电阻值； $V_k$ 代表支路 $k$ 的首节点电压。

配电网重构的约束条件一般有五类<sup>[15-18]</sup>：潮流方程约束、支路功率约束、节点电压约束、网络拓扑约束、DG出力约束。

### (1) 潮流方程约束

$$\begin{cases} P_i + P_{DG_i} - P_{Li} - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_i + Q_{DG_i} - Q_{Li} - U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中： $G_{ij}$ 和 $B_{ij}$ 是节点 $i$ 、 $j$ 间支路的电导和电纳； $P_{DG_i}$ 是节点 $i$ 上DG的有功出力； $Q_{DG_i}$ 是节点 $i$ 上DG的无功出力； $P_i$ 是节点 $i$ 注入的有功功率； $Q_i$ 是节点 $i$ 注入的无功功率； $P_{Li}$ 是节点 $i$ 上负荷的有功功率； $Q_{Li}$ 是节点 $i$ 负荷的无功功率； $\theta_{ij}$ 是节点 $i$ 、 $j$ 间电压相角差。

### (2) 支路功率约束

$$S_k \leq S_{k \max} \quad (11)$$

式中， $S_{k \max}$ 是支路 $k$ 的最大允许容量。

### (3) 节点电压约束

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \quad (12)$$

式中， $U_{i \min}$ 和 $U_{i \max}$ 分别表示节点 $i$ 的最小电压和最大电压。

### (4) 网络拓扑约束

配电网重构后须保证辐射状运行，网络连通无孤岛。

### (5) DG出力约束

$$P_{DG_i \min} \leq P_{DG_i} \leq P_{DG_i \max} \quad (13)$$

式中， $P_{DG_i \min}$ 和 $P_{DG_i \max}$ 分别表示第 $t$ 个DG出力的最小值和最大值。

## 4 基于二进制粒子群算法的多场景配电网重构求解策略

配电网重构的实质是开关的组合问题，0-1二进制编码方式尤其适合，0代表开关打开，1代表开关闭合。本文采用二进制粒子群算法对配电网重构数学模型进行求解，利用所提出的基于排同存异的环路编码策略生成初始种群以及在迭代中更新种群，最后利用提出的最优方案确定策略选出最终方案。二进制粒子群算法结构简单且运行速度快，能较好地解决离散问题，其和传统的粒子群算法相比，最大的区别是<sup>[19]</sup>通过一个以粒子速度为变量的Sigmoid函数来决定该位置取1或者取0的概率，结合配电网重构的实际情况，该函数决定了开关打开或者关闭的概率。

### 4.1 基于排同存异的环路编码及初始种群生成策略

配电网运行的基本要求是网络结构保持辐射状且无孤岛存在。若不加处理，用0、1任意产生开关组合的话，将会产生大量的不可行解，计算效率极低。考虑到配电网有以下两个特点：1) 含有大量的分段开关和少量联络开关；2) 一个联络开关决定一个环网，运行时需要打开每个环网中的一个开关以恢复辐射状<sup>[20]</sup>。故本文采用基于环路的编码方式，其中不包含在任何环路内的支路，不参与编码，始终闭合。

不可行解通常有两种情况：1) 有孤岛产生；2) 有新的环路产生。若两个环路有公共的支路，假设两个环路断开了同一条支路，则会有新的环路产生，若断开了公共支路中互异的两条支路，则会产生孤岛且导致网络不连通。“排同存异”顾名思义就是排除相同的、公共的支路，保留不同的支路。基于这种思想，本文制定以下策略，并且检验产生的解对应的拓扑结构是否连通，最终生成的初始种群无不可行解，大大提高了计算效率。假设配电网中包含 $M$ 个环路，各环路用 $b_l (l=1, 2, \dots, M)$ 表示， $b_l$ 中包含组成该环路的所有支路。

(1) 将所有支路闭合。

(2) 在环路 $b_l$ 中随机断开一个支路。

(3) 判断 $b_l$ 断开的支路是否包含在 $b_2$ 中。若是则

更新环  $b_2$ , 将这两个环路的公共支路从  $b_2$  集合中排除, 若不是则不更新环  $b_2$ 。随机选中  $b_2$  中的一条支路断开。

(4) 依次判断  $b_1, b_2, \dots, b_{l-1} (l > 1)$  打开的支路是否包含在  $b_l$  集合中。若是则更新环  $b_l$ , 将这两个环路的公共支路从  $b_l$  集合中排除, 若不是则不更新环  $b_l$ 。随机选中  $b_l$  中的一条支路断开。

(5) 重复步骤(4), 直到  $l = M$ 。

(6) 判断产生的拓扑结构是否连通, 若是则保留此解。

初始种群产生后, 在迭代中依然使用上述策略结合二进制粒子群算法的相关操作共同对种群进行更新, 无不可行解产生, 极大地提高了计算效率。

#### 4.2 基于二进制粒子群算法的最优方案确定策略

为准确地描绘出风电的随机性, 选择  $N-2$  个最优分位点离散风电出力的概率密度函数, 加上风电零出力以及风电额定出力这两个场景, 将风电出力共划分成  $N$  个场景, 求出各分位点对应的风电出力以及相应的概率。为得到同时适应风电随机性以及负荷波动性的重构方案, 将负荷划分为三个场景, 分别在三种负荷运行方式下求解各场景对应的重构方案。需要说明的是,  $N$  个场景不一定得到  $N$  个不同的重构方案, 文献[8]指出, 风电出力只有达到一定值时重构方案才会发生改变, 故  $N$  个场景对应的重构方案可能会有重合。假设用  $S_j (j=1, 2, \dots, N)$  表示场景,  $C_j$  表示场景  $S_j$  对应的概率,  $B_i (i=1, 2, \dots, N)$  表示各场景下的最优方案,  $D_m (m=1, 2, 3)$  表示各运行方式所占的比例。  $Loss_{ij}$ 、  $Loss_{nm}$  表示各方案对应的各场景下的网损值, 本文提出的最优方案确定策略如下。

(1) 首先在一般负荷运行方式下求解各场景下的重构方案, 得到各方案  $B_i (i=1, 2, \dots, N)$ 。

(2) 在重构方案  $B_i (i=1, 2, \dots, N)$  下, 依次求解各个场景  $S_j$  下的网损值, 按照以下数学模型求解方案  $B_i$  对应的综合网损期望值。

$$F_i = \sum_{j=1}^N C_j Loss_{ij} \quad (14)$$

(3) 确定  $\min F_i$  所对应的重构方案  $B_i$  为该负荷运行方式下适应风电随机性能力最强的方案, 记该方案为  $X_1$ 。

(4) 在最大负荷运行方式下重复步骤(1)、(2)、(3), 得到该负荷运行方式下适应风电随机性能力最强的方案, 记该方案为  $X_2$ 。

(5) 在最小负荷运行方式下重复步骤(1)、(2)、(3), 得到该负荷运行方式下适应风电随机性能力最强的方案, 记该方案为  $X_3$ 。

(6) 在重构方案  $X_n (n=1, 2, 3)$  下, 依次求解各个负荷运行方式下的网损期望值  $Loss_{nm}$ , 按照以下数学模型求解方案  $X_n$  对应的综合网损期望值。

$$F_n = \sum_{m=1}^3 D_m Loss_{nm} \quad (15)$$

(7) 确定  $\min F_n$  所对应的重构方案  $X_n$  为最终的重构方案, 此方案兼顾了风电出力的随机性以及负荷的波动性, 具有较强的适应外界的能力。

算法整体实现流程如图 1 所示。

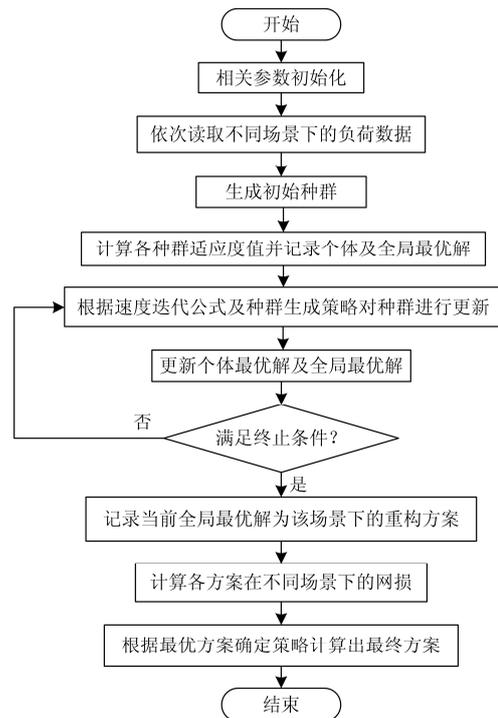


图 1 算法流程

Fig. 1 Algorithm process

## 5 算例分析

在 IEEE33 节点配电网系统下进行仿真计算, 该系统有 32 个分段开关以及 5 个联络开关, 5 个联络开关决定了有 5 个环网的存在。设定二进制粒子群算法惯性因子  $w=0.7298$ , 学习因子  $c_1=1.49618$ ,  $c_2=1.49618$ , 速度变化范围为  $[-4, 4]$ , 种群数量 30, 迭代次数 100。

最大负荷运行方式、最小负荷运行方式以及一般负荷运行方式所占比例为<sup>[6]</sup>: 0.25:0.25:0.5。在一般负荷运行方式下, 采用文献[21]的负荷数据, 在最大负荷运行方式以及最小负荷运行方式下采用文

献[22]的负荷数据。

节点 13 处安装一台额定功率 400 kW 风力发电机 DG<sub>1</sub>, 节点 21 处安装一台额定功率 250 kW 风力发电机 DG<sub>2</sub>, 潮流计算中将其处理成 PQ 节点, 采取单位功率因数控制策略, 无功功率为零, 仅考虑风电输出有功功率的随机性。切入风速  $v_{ci} = 4 \text{ m/s}$ , 切出风速  $v_{co} = 25 \text{ m/s}$ , 额定风速  $v_n = 11 \text{ m/s}$ , 尺度参数  $c = 11$ , 形状参数  $k = 2$ 。取  $r = 2$ ,  $N = 7$ , 划分为 7 个场景。各场景对应的最优分位点  $z_s (s = 1, 2, \dots, 7)$ 、概率  $p_s$  以及 DG<sub>1</sub>、DG<sub>2</sub> 出力实际值如表 1 所示。三种负荷运行方式下的计算结果分别由表 2、表 3、表 4 给出, 表中网损 Loss 以及网损期望值  $F$  的单位均为 kW。

表 1 场景的划分  
Table 1 Scene division

场景	$z_s / p.u.$	$p_s$	DG <sub>1</sub> / kW	DG <sub>2</sub> / kW
1	0.000 0	0.130 0	0.000 0	0.000 0
2	0.064 4	0.060 0	25.760	16.100
3	0.209 9	0.080 0	83.960	52.475
4	0.382 1	0.100 0	152.84	95.525
5	0.589 6	0.130 0	235.84	147.40
6	0.846 4	0.140 0	338.56	211.60
7	1.000 0	0.360 0	400.00	250.00

从表 2 可以看出, 场景 1、场景 2、场景 3、场

表 2 一般负荷运行方式下的计算结果

Table 2 Calculation results under the general load operation mode

场景	$B_i (i = 1, 2, \dots, 7)$	$Loss_{i1}$	$Loss_{i2}$	$Loss_{i3}$	$Loss_{i4}$	$Loss_{i5}$	$Loss_{i6}$	$Loss_{i7}$	$F_i$
1	7-9-14-32-37	139.553 1	137.487 5	133.224 9	128.743 4	124.299 3	120.050 9	118.218 5	125.448 0
2	7-9-14-32-37	139.553 1	137.487 5	133.224 9	128.743 4	124.299 3	120.050 9	118.218 5	125.448 0
3	7-9-14-32-37	139.553 1	137.487 5	133.224 9	128.743 4	124.299 3	120.050 9	118.218 5	125.448 0
4	7-9-14-32-37	139.553 1	137.487 5	133.224 9	128.743 4	124.299 3	120.050 9	118.218 5	125.448 0
5	7-9-12-32-37	146.016 0	143.118 9	137.105 9	130.729 6	124.263 5	117.872 6	114.952 0	125.649 8
6	7-9-12-31-37	153.698 9	149.949 6	142.071 2	133.533 1	124.570 2	115.196 4	117.977 8	128.490 5
7	7-9-12-31-37	153.698 9	149.949 6	142.071 2	133.533 1	124.570 2	115.196 4	117.977 8	128.490 5

表 3 最大负荷运行方式下的计算结果

Table 3 Calculation results under the maximum load operation mode

场景	$B_i (i = 1, 2, \dots, 7)$	$Loss_{i1}$	$Loss_{i2}$	$Loss_{i3}$	$Loss_{i4}$	$Loss_{i5}$	$Loss_{i6}$	$Loss_{i7}$	$F_i$
1	7-9-14-28-32	181.454 2	178.763 9	173.118 7	167.053 9	160.677 9	154.130 9	150.974 7	161.687 1
2	7-9-14-28-32	181.454 2	178.763 9	173.118 7	167.053 9	160.677 9	154.130 9	150.974 7	161.687 1
3	7-9-14-28-32	181.454 2	178.763 9	173.118 7	167.053 9	160.677 9	154.130 9	150.974 7	161.687 1
4	7-9-14-28-32	181.454 2	178.763 9	173.118 7	167.053 9	160.677 9	154.130 9	150.974 7	161.687 1
5	7-9-14-28-32	181.454 2	178.763 9	173.118 7	167.053 9	160.677 9	154.130 9	150.974 7	161.687 1
6	7-9-12-28-32	192.438 8	188.615 1	180.570 0	171.872 4	162.632 6	152.963 7	148.170 7	163.865 4
7	7-9-12-28-32	192.438 8	188.615 1	180.570 0	171.872 4	162.632 6	152.963 7	148.170 7	163.865 4

景 4 所对应的重构方案 7-9-14-32-37 为此运行方式下的最优方案, 网损期望值为 125.448 0 kW, 与一般负荷运行方式下的初始网损 202.676 2 kW 相比, 网损降低了 38.10%。

从表 3 可以看出, 场景 1、场景 2、场景 3、场景 4、场景 5 所对应的重构方案 7-9-14-28-32 为此运行方式下的最优方案, 网损期望值为 161.687 1 kW, 与最大负荷运行方式下的初始网损 277.437 4 kW 相比, 网损降低了 41.72%。

从表 4 可以看出, 场景 4、场景 5 所对应的重构方案 7-9-12-28-32 为此运行方式下的最优方案, 网损期望值为 41.294 1 kW, 与最小负荷运行方式下的初始网损 73.548 7 kW 相比, 网损降低了 43.85%。

选出不同负荷运行方式下适应风电随机性能力最强的三种方案后, 再依次求解各个方案在不同负荷运行方式下的网损期望值, 最终计算出综合网损期望值结果如表 5 所示。不难看出, 7-9-14-28-32 这一重构方案在三种负荷运行方式下的综合网损期望值最小, 与三种负荷运行方式的初始网损期望值 189.084 6 kW 相比, 网损降低了 39.73%。故确定此方案为本次仿真的最优方案, 不仅适应风电出力随机性的能力强, 对负荷的波动性也表现出较强的适应能力。

表 4 最小负荷运行方式下的计算结果

Table 4 Calculation results under the minimum load operation mode

场景	$B_i (i=1, 2, \dots, 7)$	$Loss_{i1}$	$Loss_{i2}$	$Loss_{i3}$	$Loss_{i4}$	$Loss_{i5}$	$Loss_{i6}$	$Loss_{i7}$	$F_i$
1	7-9-14-28-32	49.484 8	48.192 5	45.633 5	43.156 8	41.045 6	39.638 5	39.443 9	42.376 1
2	7-9-14-28-32	49.484 8	48.192 5	45.633 5	43.156 8	41.045 6	39.638 5	39.443 9	42.376 1
3	7-9-14-28-32	49.484 8	48.192 5	45.633 5	43.156 8	41.045 6	39.638 5	39.443 9	42.376 1
4	7-9-12-28-32	51.749 9	49.965 5	46.396 2	42.869 1	39.702 2	37.283 3	36.636 6	41.294 1
5	7-9-12-28-32	51.749 9	49.965 5	46.396 2	42.869 1	39.702 2	37.283 3	36.636 6	41.294 1
6	7-9-12-28-31	56.895 4	54.585 5	49.862 9	44.994 1	40.271 2	35.983 6	34.267 0	41.769 1
7	7-9-12-28-31	56.895 4	54.585 5	49.862 9	44.994 1	40.271 2	35.983 6	34.267 0	41.769 1

表 5 三种负荷运行方式下的计算结果

Table 5 Calculation results of three kinds of load operation mode

待选最优方案	$Loss_{n1}$	$Loss_{n2}$	$Loss_{n3}$	$F_n$
7-9-14-32-37	125.448 0	165.627 6	44.223 5	115.186 8
7-9-14-28-32	125.873 1	161.687 1	42.376 1	113.952 4
7-9-12-28-32	125.698 6	163.865 4	41.294 1	114.139 2

## 6 结论

(1) 本文将基于 Wasserstein 距离指标的场景划分法引入到配电网重构中, 在兼顾风电随机性和负荷波动性的情况下求解重构模型, 得到了适应外界能力较强的重构方案。

(2) 为得到一种同时适应风电随机性以及负荷波动性的重构方案, 本文提出了多场景下的最优方案确定策略, 通过比较各场景下的网损期望值可直观地确定最优重构方案。

(3) 考虑到配电网重构的特点, 本文提出了基于排同存异的环路编码及初始种群生成策略并结合对网络连通性的判断, 用于初始种群的产生以及迭代中种群的更新, 无不可行解产生, 大大提高了计算效率。

## 参考文献

- [1] 刘志勇, 刘杨华, 林舜江, 等. 基于模糊多目标协调优化的配电网重构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 133-138.  
LIU Zhiyong, LIU Yanghua, LIN Shunjiang, et al. Fuzzy multi-objective coordination optimization for distribution network reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 133-138.
- [2] 崔金兰, 刘天琪, 李兴源. 含有分布式发电的配电网重构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(15): 37-40, 49.  
CUI Jinlan, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Network reconfiguration at the distribution system with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(15): 37-40, 49.

- [3] 王佳佳, 吕林, 刘俊勇, 等. 基于改进分层前推回代法的含分布发电单元的配电网重构[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 60-64.  
WANG Jiajia, LÜ Lin, LIU Junyong, et al. Reconfiguration of distribution network containing distribution generation units based on improved layered forward-backward sweep method[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 60-64.
- [4] 李秀卿, 李文, 杨云鹏. 含有风力发电机组配电网多目标重构的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 63-67.  
LI Xiuqing, LI Wen, YANG Yunpeng. Distribution network multi-objective reconfiguration with wind turbines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 63-67.
- [5] 董少峤, 刘念, 赵天阳, 等. 考虑负荷随机性的含 DG 多目标配电网重构[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(11): 58-62.  
DONG Shaoqiao, LIU Nian, ZHAO Tianyang, et al. Reconfiguration of multi-objective distribution network with distributed generation by considering stochastic loads[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(11): 58-62.
- [6] 刘宏江, 李林川, 张长盛. 基于多种负荷方式的含分布式电源的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 117-121.  
LIU Hongjiang, LI Linchuan, ZHANG Changsheng. Reconfiguration of distribution network with distributed generations based on various load modes[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 117-121.
- [7] 李传健, 刘前进. 考虑风力发电随机性的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 34-39.  
LI Chuanjian, LIU Qianjin. Distribution network reconfiguration considering randomness of wind power generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 34-39.
- [8] 王威, 韩学山, 许星明. 含风电机组的配电网重构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 106-109.

- WANG Wei, HAN Xueshan, XU Xingming. Research of the configuration of distribution network with wind turbines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 106-109.
- [9] 何禹清, 彭建春, 文明, 等. 含风电的配电网重构场景模型及算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 12-18.
- HE Yuqing, PENG Jianchun, WEN Ming, et al. Scenario model and algorithm for the reconfiguration of distribution network with wind power generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 12-18.
- [10] LIU X. Economic load dispatch constrained by wind power availability: a here-and-now approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2010, 1(1): 2-9.
- [11] LIU Xian. Economic load dispatch constrained by wind power availability: a wait-and-see approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(3): 347-355.
- [12] 王群, 董文略, 杨莉. 基于 Wasserstein 距离和改进 K-medoids 聚类的风电/光伏经典场景集生成算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2654-2661.
- WANG Qun, DONG Wenlue, YANG Li. A wind power/photovoltaic typical scenario set generation algorithm based on Wasserstein distance metric and revised K-medoids cluster[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2654-2661.
- [13] HOCHREITER R, PFLUG G C. Financial scenario generation for stochastic multi-stage decision processes as facility location problems[J]. Annals of Operations Research, 2007, 152(1): 257-272.
- [14] 黎静华, 韦化, 莫东. 含风电场最优潮流的 Wait-and-See 模型与最优渐近场景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 15-23.
- LI Jinghua, WEI Hua, MO Dong. Asymptotically optimal scenario analysis and Wait-and-See model for optimal power flow with wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 15-23.
- [15] 文娟, 谭阳红, 雷可君. 基于量子粒子群算法多目标优化的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 73-78.
- WEN Juan, TAN Yanghong, LEI Kejun. Multi-objective optimization of distribution network dynamic reconfiguration based on integer coded quantum particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 73-78.
- [16] 田昊, 吕林, 高红均, 等. 计及电网运行特性的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 9-14.
- TIAN Hao, LÜ Lin, GAO Hongjun, et al. Dynamic reconfiguration of distribution network considering power grid operation characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 9-14.
- [17] 李奔, 刘会家, 李珺. 考虑网络结构优化的含风电配电网多目标重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 57-62.
- LI Ben, LIU Huijia, LI Jun. Multi-objective reconfiguration of distribution network with wind power generators considering network survivability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 57-62.
- [18] 陈春, 汪飒, 刘蓓, 等. 一种避免不可行解的配电网快速重构方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 34-43.
- CHEN Chun, WANG Feng, LIU Bei, et al. A fast network reconfiguration method avoiding infeasible solutions for distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 34-43.
- [19] 王增平, 姚玉海, 郭昆亚, 等. 基于等级偏好优序法和切负荷的配电网故障恢复[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 185-192.
- WANG Zengping, YAO Yuhai, GUO Kunya, et al. Distribution network service restoration based on rank preference optimal and load shedding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 185-192.
- [20] 麻秀范, 丁宁, 李龙. 配电网重构中网络辐射形与连通性的判断[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 289-293.
- MA Xiufan, DING Ning, LI Long. Judging radial and connectivity of network in distribution networks reconfiguration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 289-293.
- [21] RAJARAM R, KUMAR K S, RAJASEKAR N. Power system reconfiguration in a radial distribution network for reducing losses and to improve voltage profile using modified plant growth simulation algorithm with distributed generation (DG)[J]. Energy Reports, 2015, 1: 116-122.
- [22] 刘宏江. 含分布式电源的配电网重构[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- LIU Hongjiang. Distribution network reconfiguration with distributed generation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.

收稿日期: 2016-01-07; 修回日期: 2016-02-23

作者简介:

初 壮(1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行分析; E-mail: chuzhuang@hotmail.com

窦孝祥(1993-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网优化运行。E-mail: xiaoxiangstudy@163.com

(编辑 魏小丽)