

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201550

# 基于改进和声搜索算法的多目标配电网重构优化

吴建旭, 于永进

(山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘要:** 为了减少有源配电网的网络损耗、提高系统运行的稳定性, 建立了以网络损耗、开关动作数、负荷和电压平衡度为目标的数学模型。针对传统和声搜索算法全局数据依赖性较差、寻优的后半段速率变慢和易陷于早熟困境等问题, 将其自适应参数、取值机制和越界逸出进行了改进。对无功进行随机优化补偿, 利用场景分析法确定风机的出力值, 采用定时模式的电动汽车模型对日负荷进行削峰填谷。基于欧式距离的 K-Means 方法对一天内含分布式电源的配电网络进行分段, 在 IEEE33 电力结构中进行了动静态双重测试。在算法收敛上与传统和声、自适应和声搜索算法对比, 减少了算法的无效运行次数, 提高了算法的运行速度和全局寻优能力。在重构优化结果上与改进蚁群算法对比, 减少了网络损耗和开关动作数, 提高了系统运行的经济性与可靠性。

**关键词:** 有源配电网; 重构优化; 和声搜索算法; 聚类; 场景分析

## Multi-objective distribution network reconfiguration optimization based on an improved harmony search algorithm

WU Jianxu, YU Yongjin

(College of Electrical and Automation Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** In order to reduce the network loss of an active distribution network and improve the reliability of system operation, a mathematical model with the goal of network loss, switching operations, load and voltage balance is established. Given the problems of poor global data dependence of traditional harmony search algorithms, slower speed in the second half of optimization, and easy falling into a premature dilemma, the adaptive parameters, value mechanism and out-of-bounds escape are improved. Random optimization compensation for reactive power, using scenario analysis to determine the output value of the wind turbine. It also uses the electric vehicle model in timing mode to cut peaks and fill valleys for daily load, and the K-Means method based on Euclidean distance segmenting the distribution network containing distributed power sources within a day. It carries out a dynamic and static double test in the IEEE33 power structure. Compared with traditional harmony and adaptive harmony search algorithms in terms of algorithm convergence, it reduces the number of invalid runs of the algorithm and improves the running speed of the algorithm and the global optimization capability. Compared with the improved ant colony algorithm in the reconstruction optimization results, the network loss and the number of switching actions are reduced, and the economy and reliability of the system operation are improved.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61672337).

**Key words:** active distribution network; reconfiguration and optimization; harmony search algorithm; clustering; scenario analysis

## 0 引言

随着传统化石能源储量的不断减少, 大量的分布式电源(Distributed Generation, DG)<sup>[1]</sup>投入电网, 其

中以风电最为典型。风电具有更高的清洁度和可再生性, 但是由于风电出力具有不确定性, 接入配电网后会影响到系统的潮流分布, 从而给配电网重构<sup>[2-3]</sup>和无功优化<sup>[4-5]</sup>带来困难。配电网重构可以使配电网在较低网损下运行, 无功优化可以改善线路的无功分布从而起到提高线路电压的作用。随着配电网规模

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61672337)

的不断扩大, 大量的配电网重构方法<sup>[6-8]</sup>应运而生。文献[9]建立了基于二阶锥规划的数学模型, 提出了一种综合考虑不同类型 DG 并网方式及其特性的配电网重构方法。文献[10]将粒子群算法的群体寻优机制引入细菌觅食算法中, 然后将改进的细菌觅食算法应用于配电网重构。文献[11]利用帕累托最优进行多目标优化, 采用基于图论的遗传算法进行重构。文献[12]提出了一种基于随机矩阵和支持向量机的两阶段配电网综合优化方法。文献[13]基于二阶锥松弛(Second Order Cone Relaxation, SOCR)技术以及大 M 方法, 建立了基于 Misocp 的配电网无功优化模型。文献[14]提出了考虑 MEG 事故前优化配置的配电网两阶段重构韧性提升方法。文献[15]对和声搜索算法(Harmony Search Algorithm, HS)进行了自适应参数改进, 但是在新解生成时对原有数据依赖过大, 非常容易陷入相对最优而无法寻得全局最优。文献[16]利用储能装置实现削峰填谷, 但是没有对动态重构<sup>[17-18]</sup>进行研究。文献[19]将改进的教与学算法应用于重构优化, 便于跳出局部最优, 然而支路开关高频率动作, 并没有对动作次数加以分析。文献[20]提出基于动态规划算法的等效负荷分段方法, 有效限制了开关动作数, 但是忽略了风机出力的不确定性。文献[21]针对风机出力值的随机性, 提出了一种针对风电出力的配电网滚动重构策略, 准确评估了风机的出力值, 但是风机运行时从配电网中吸取大量无功功率, 缺乏对配电网的无功优化。综上所述, 本文着重考虑了风机出力的不确定性, 在基本 HS 算法的基础上加以改进, 搭建以网损、开关动作数、电压和负荷平衡度为目标函数的数学模型。在 IEEE33 节点系统中进行仿真, 验证了模型的正确性和算法的有效性。

## 1 配电网优化模型

### 1.1 目标函数

配电网是电力系统中规模最大, 分布最广泛, 最具多样性的环节, 是直接面向用户的电力子系统, 由于其结构复杂, 线路较长, 因此如何减少其网络损耗具有很强的现实意义。通过在系统中添加一定的无功优化容量, 调整配电网的物理接线形式, 可以合理地改变配电网的潮流走向, 使得配电网供电可靠。本文以网损、开关动作数最小化和电压、负荷改善度最大化为目标搭建模型, 如式(1)一式(4)所示。

1) 从电网经济性出发, 以有功损耗最低为目标

$$f_1 = \min \sum_{j=1}^m k_j R_j (P_j^2 + Q_j^2) / U_j^2 \quad (1)$$

式中:  $m$  为系统支路总数;  $k_j$  为支路  $j$  开关状态, 闭合为 1, 断开为 0;  $R_j$  为支路  $j$  电阻;  $P_j$ 、 $Q_j$  为支路  $j$  末端流过的有功和无功功率;  $U_j$  为支路  $j$  末端电压。

2) 从电压偏移程度出发, 以电压改善度最佳为目标<sup>[22]</sup>

$$f_2 = \min \sum_{j=1}^m (|U_j - U_n| / U_n) \quad (2)$$

式中,  $U_n$  为线路额定电压。

3) 从负荷偏移程度出发, 以负荷平衡度最佳为目标<sup>[23]</sup>

$$f_3 = \min \sum_{i=1}^m (S_i / S_{i\max})^2 \quad (3)$$

式中:  $S_i$ 、 $S_{i\max}$  为支路  $i$  的复功率和复功率上限。

4) 从开关使用寿命出发, 以动作数最少为目标

$$f_4 = \sum_{i=1}^m |x_{i(k-1)} - x_{i(k)}| \quad (4)$$

式中:  $k$  为时间段;  $x_{i(k-1)}$ 、 $x_{i(k)}$  为  $k$  时段的前一段和  $k$  时段开关  $i$  的状态。

### 1.2 多目标优化

由于上述目标函数数量纲不同, 首先对其归一化处理, 然后将其几何平均值作为多目标优化的目标函数, 其表达式为

$$F = (F_1^\alpha F_2^\beta F_3^\gamma F_4^\lambda)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

式中:  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  为归一化处理后的单目标函数;  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\lambda$  分别为 4 个目标函数在多目标函数中所占的比重, 满足  $\alpha + \beta + \gamma + \lambda = 4$ 。由于静态重构下不涉及开关动作数, 故在静态重构下满足  $\alpha + \beta + \gamma = 3$ 。

为了满足不同的场合下使用要求, 根据调度人员的要求来选取目标函数的权重以决定每个目标在优化中所占的比重。当前目标只有网损时, 可以令  $\alpha = 4$ ,  $\beta = \gamma = \lambda = 0$ 。

### 1.3 约束条件

为了体现重构的合理性, 重构过程必须服从一定的约束, 其中包括潮流、节点电压、支路功率等, 如下所示。

1) 潮流方程等式约束

$$\begin{cases} P_{\text{DG}i} - P_{\text{Li}} - U_i \sum_{j=1}^m U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{\text{DG}i} - Q_{\text{Li}} - U_i \sum_{j=1}^m U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $P_{\text{DG}i}$ 、 $Q_{\text{DG}i}$  为 DG 注入节点  $i$  的有功和无功

功率;  $P_{Li}$ 、 $Q_{Li}$  为节点负荷的有功和无功功率;  $U_i$ 、 $U_j$  为节点  $i$ 、 $j$  的电压;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 、 $\theta_{ij}$  为节点  $i$ 、 $j$  之间的电导、电纳和角度差;  $m$  为与  $i$  相连接的分支数。

2) 节点电压边界约束

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (7)$$

式中,  $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$  分别为节点  $i$  的电压上限和下限。

3) 支路传输功率约束

$$W_i \leq W_{i\max} \quad (8)$$

式中,  $W_i$ 、 $W_{i\max}$  为支路  $i$  的输出功率和输出功率上限。

4) 风电渗透率约束

$$P_w \leq 0.5P_L \quad (9)$$

式中:  $P_w$ 、 $P_L$  为风电出力值和网络总负荷。

5) 无功补偿容量约束

$$Q_i \leq Q_{i\max} \quad (10)$$

式中:  $Q_i$ 、 $Q_{i\max}$  为电容器组  $i$  的无功补偿值和补偿上限。

6) 网络拓扑结构约束

$$g \in G \quad (11)$$

式中:  $g$  为有效解对应的配电拓扑;  $G$  为所有可行的网络拓扑集合。

#### 1.4 风机数学模型

风电输出功率  $P_w$  受风速  $v$  波动的影响, 此时假设  $v$  遵循 Weibull 分布, 如式(12)所示。

$$F(v) = 1 - \exp[-(v/c)^k] \quad (12)$$

式中,  $c$  和  $k$  分别为风速的尺度、形状参数。

$P_w$  与  $v$  的关系如式(13)所示。

$$P_w = \begin{cases} 0 & v < v_{ci}, v \geq v_{co} \\ k_1 v + k_2 & v_{ci} \leq v \leq v_n \\ P_n & v_n \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $v_{ci}$ 、 $v_{co}$ 、 $v_n$  分别为切入、切出和额定风速;  $P_n$  为额定输出功率;  $k_1 = P_n / (v_n - v_{ci})$ ;  $k_2 = -k_1 v_{ci}$ 。

文献[20, 24]将风电输出功率以一个静态值的方式代入系统进行配电重构, 并未考虑风速的随机性特征, 在此采用场景分析法对  $v$  和  $P_w$  之间的关系进行场景划分。假定此时只有一台风机, 根据  $v$  的差异将  $P_w$  划分为三个典型场景: 零、欠额定和额定输出场景, 各自发生的几率如式(14)所示。

$$\begin{cases} p_1 = 1 - F(v_{co}) + F(v_{ci}) \\ p_2 = F(v_n) - F(v_{ci}) \\ p_3 = F(v_{co}) - F(v_n) \end{cases} \quad (14)$$

至此, 各个场景的风电输出功率和概率已经得出, 将风机当做 PQ 节点处理代入配电网进行计算, 最后利用轮盘赌的思想得到此时风电的输出功率。

#### 1.5 负荷聚类模型

本文采用基于欧式距离的 K-Means<sup>[25]</sup>时段分块方式。

步骤 1: 随机选  $K$  个点作为原始聚类重心, 分别计算其到每个点的距离(由于日负荷两坐标轴量纲不同, 因此必须进行归一化处理), 如式(15)所示。

$$d(x, k) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - k_i)^2} \quad (15)$$

式中:  $x$  为日负荷所处位置;  $k$  为聚类重心;  $n$  为采样个数。

步骤 2: 将每个点划分到离其最接近的聚类重心。

步骤 3: 根据平均距离中心找到新的聚类重心, 反复以上程序, 直到达到终止条件。

K-Means 聚类结果如图 1 所示。

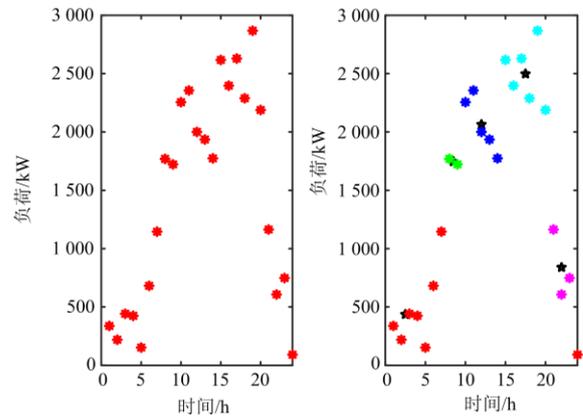


图 1 K-Means 聚类结果

Fig. 1 K-Means clustering results

#### 1.6 网络结构简化

由于实际配电网拓扑繁杂, 支路节点更是数不胜数, 如果采取随机优化势必会产生大量的无效解。为了优化网络结构, 减少无效解, 本文采用网络化简方式, 大大减少了无效解, 提高了计算速度, 其步骤如下。

步骤 1: 闭合全部线路开关, 得到待重构网络  $G_0$ ;

步骤 2: 记录  $G_0$  中每一组环路包含的支路;

步骤 3: 将不包含在环路中的分支从  $G_0$  里删除。

由上可以将待重构网络简化成多个环路组合。

配电网一般为辐射状运行, 为了避免环路和“孤岛”的出现, 还必须遵循以下规则。

规则 1: 每条环路中只得分断一条支路;

规则 2: 环路间的公共支路只允许断开一条。

## 2 算法

### 2.1 基本 HS 算法

HS 算法是由 Z.W.Geem 等学者发现的一种新型智能优化算法, 该算法模仿了乐队乐师在调音过程中根据音调的优劣不断地对乐器的音调进行改动, 最终完成一个完美和声的过程。HS 算法具备概念清晰、可调参数较少、易于实现等特点。

#### 1) 确定参数值

首先确定算法的几个参数, 其中包含和声记忆库的规模( $HMS$ )、和声记忆库取值概率( $HMCR$ )、音调微调概率( $PAR$ )、音调微调带宽( $BW$ )、最大迭代次数  $T_{\max}$ 。

#### 2) 初始化和声记忆库( $HM$ )

在  $HM$  中随机生成  $HMS$  个  $n$  维的和声  $X^1, X^2, \dots, X^{HMS}$ , 和声库的维度代表乐器的种类。

$$HM = \begin{bmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \vdots \\ X^{HMS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \cdots & x_n^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \cdots & x_n^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \cdots & x_n^{HMS} \end{bmatrix} \quad (16)$$

#### 3) 生成一个新和声

(1) 生成在  $[0,1]$  内的随机数  $r_1$ , 与  $HMCR$  相比得到新的和声:

假如  $r_1 < HMCR$ , 从  $HM$  中随机抽取一个和声变量; 假如  $r_1 > HMCR$ , 从  $HM$  外部随机生成一个和声变量。

(2) 生成在  $[0,1]$  内的随机数  $r_2$ , 与  $PAR$  作比较对步骤 1) 所得到的和声变量进行改动:

假如  $r_2 < PAR$ , 根据  $BW$  对得到的和声变量进行微调; 否则不做调整。

(3) 根据上述方法得到一个新的和声变量  $X^{new}$ 。

#### 4) 更新 $HM$

找出  $HM$  内适应度最差和声  $X^{worst}$  并计算其适应度  $f(X^{worst})$ , 对新的和声变量  $X^{new}$  进行评估, 若其适应度  $f(X^{new}) < f(X^{worst})$ , 则将  $X^{new}$  代替  $HM$  中最差的解向量  $X^{worst}$ ; 否则不做调整。

#### 5) 检查算法是否终止

重复步骤 3) 和 4), 直到迭代次数达到  $T_{\max}$  为止。

### 2.2 HS 算法的改进

本文对 HS 算法进行了三点修改包括自适应参数调整、改善和声库取值机制、数据越界处理。

#### 1) 自适应参数调整

HS 算法对参数的设置比较敏感, 基本 HS 算法的  $HMCR$  和  $PAR$  取值选用固定值, 存在着收敛度不高和寻优时间长的缺陷。本文采用自适应调整的

方法对  $HMCR$  和  $PAR$  取值进行改进, 使其随着运行次数的增大时刻处在变化中。

在寻优前期, 和声库中的解质量不高, 存在较大的误差, 因此采取大  $HMCR$  和小  $PAR$  使和声库在不断优化的同时提高解的丰富性; 在寻优后期, 和声库中解向量之间的误差非常小, 此时  $HMCR$  应采取小值, 而  $PAR$  应取大一些的值, 提高算法在现有和声周边局部搜寻的能力和收敛效率。改进自适应参数如式(17)所示。

$$\begin{cases} HMCR = HMCR_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{\log\left(\frac{HMCR_{\min}}{HMCR_{\max}}\right)}{T_{\max}} \cdot t\right) \\ PAR = PAR_{\min} + (1 - \exp\left(-\frac{\log\left(\frac{PAR_{\min}}{PAR_{\max}}\right)}{T_{\max}} \cdot t\right)) \cdot PAR_{\max} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $HMCR_{\max}$ 、 $HMCR_{\min}$  为  $HMCR$  取值范围的上下限;  $PAR_{\max}$ 、 $PAR_{\min}$  为  $PAR$  取值范围的上下限;  $t$  为当前迭代次数。

#### 2) 改进和声库取值机制

基本 HS 算法在每一次迭代过程中都会随机在和声库取一个解向量或者在外部生成一个解向量。当  $r_1 < HMCR$ , 会从  $HM$  中随机抽取一个和声变量, 但这样取值的话会导致当  $r_2 > PAR$ , 此次迭代会出现无效的情况。因此本文对和声库取值机制做了如下改进。

从  $HM$  内抽取  $n$  个和声组成一个取值和声库  $HM_{\min}$ , 取  $HM_{\min}$  对角元素组成一个新的和声, 大大降低了算法无效的运行次数。改进公式如式(18)所示。

$$X^{HM_{\min}^{new}} = \text{diag}(HM) \quad (18)$$

#### 3) 数据越界处理

当  $r_2 < PAR$  时, 需对  $X^{new}$  中的  $x_1^{new}, x_2^{new}, \dots, x_n^{new}$  进行微调, 但是很有可能其中的某些元素已经处在边界, 进行微调很可能将数据拉到边界之外, 传统的方法是将越界数据处理为边界值或者舍弃, 但是这样的话不仅会使得和声库的多样性降低, 而且还使得算法在边界积聚大量局部解, 给最优解的获得带来困难。本文采用最优解逼近法将处于外界的数据拉回到最优解的附近, 不仅增加了数据的多样性, 而且提高了收敛速度。

当解向量的第  $i$  维数据越界时, 越界数据处理如式(19)所示。

$$x_i^{new} = x_i^{best} \quad (19)$$

式中:  $x_i^{best}$  为当前最优解向量  $X^{best}$  的第  $i$  维数据。

改进后的 HS 算法流程图如 2 所示。

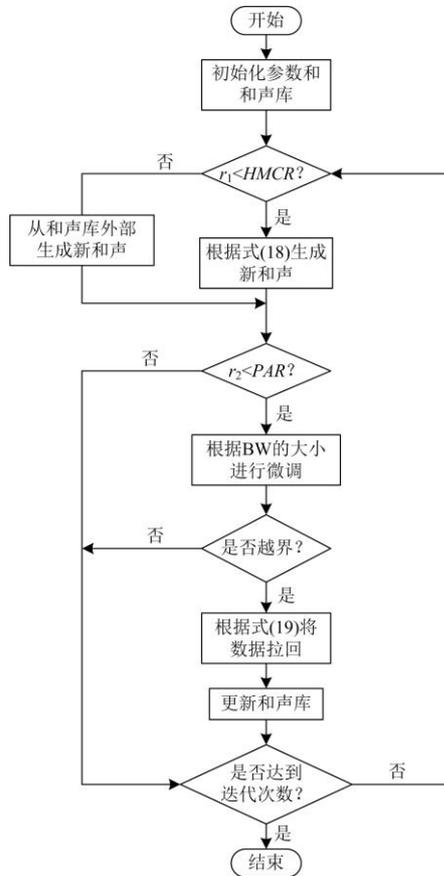


图 2 改进 HS 算法流程图

Fig. 2 Improved HS algorithm flow chart

### 3 算例分析

#### 3.1 基本参数

本文仿真环境采用 Matlab2020a，CPU 为 i5-9300，在 IEEE33 节点系统上运行操作，总有功负荷为 3 715 kW，总无功负荷为 2 300 kvar，基准容量为 10 MV A，基准电压为 12.66 kV。系统接入风机、电容器组和电动汽车(Electric Vehicle, EV)充电桩，其规格如表 1 所示。

表 2 风电机组组合场景重构结果

Table 2 Reconstruction result of fans combination scene

场景号	场景概率	场景输出功率/kW	断开开关	网损/kW
I	0.007 8	(0,0)	7,9,14,37,32	139.551 3
II	0.101 4	(153.8,0)	7,9,14,37,32	139.155 1
III	0.020 8	(400,0)	7,9,14,37,32	138.603 6
IV	0.046 8	(0,207.5)	7,9,14,37,31	131.125 7
V	0.608 4	(153.8,207.5)	7,9,14,37,31	130.785 9
VI	0.124 8	(400,207.5)	7,9,14,37,31	130.324 5
VII	0.005 4	(0,600)	7,9,14,37,31	136.890 9
VIII	0.070 2	(153.8,600)	7,9,14,37,31	136.651 9
IX	0.014 4	(400,600)	7,9,14,37,31	136.352 1

表 1 负荷类型参数

Table 1 Load type parameter

序号	负荷	接入节点	功率
1	风机	7、13	600 kW、400 kW
2	电容器组	7、13、29	800 kvar、800 kvar、300 kvar
3	EV	32	充电：7.5 kW 放电：5 kW

#### 3.2 多场景分析

节点 7 处风机 1 的切入、额定、切出风速分别为 2 m/s、12 m/s、20 m/s， $c$  和  $k$  分别为 9.0 和 2.0。节点 13 处风机 2 的切入、额定、切出风速分别为 3 m/s、13 m/s、20 m/s， $c$  和  $k$  分别为 8.5 和 2.0。风机 1 各个场景的概率根据式(13)求得为 0.06、0.78、0.16，每个场景的输出功率根据式(12)求得为 0、153.8 kW、400 kW；风机 2 各个场景的概率为 0.13、0.78、0.09，输出功率为 0、207.5 kW、600 kW。场景划分如图 3 所示。

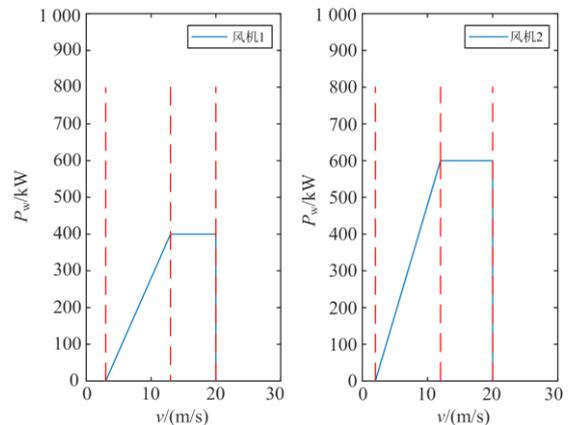


图 3 单台风电机组场景划分

Fig. 3 Single fan scene division

当两台风机同时接入配电网时，需考虑它们的组合场景，该组合系统包含有 9 个场景，分别编号为场景 I—IX，在不考虑随机无功补偿的情况下，各个场景的数据如表 2 所示。



由表 2 可以看出: 场景 IX 下得到的重构结果并不完全等于其余任一场景。相较场景 IX, 场景 VI 的网损减少了 6.027 6 kW。如果忽略风机出力的不确定性, 将场景 IX 直接作为重构方案, 会使得网损偏差

较大, 因此风机模型的多场景处理是十分有必要的。

### 3.3 静态分析

为了满足多种情况的重构要求, 给出了不同优化目标下的静态重构结果, 如表 3 和图 4 所示。

表 3 不同优化目标下的重构结果对比

Table 3 Comparison of reconstruction results under different optimization goals

优化方式	网络拓扑	网损/kW	电压平衡度	负荷平衡度
初始状态	33,34,35,36,37	202.677 1	4.281 7	3.455 7
$\alpha=3, \beta=0, \gamma=0$	7,9,14,32,37	139.551 3	1.147 4	2.856 0
$\alpha=0, \beta=3, \gamma=0$	9,14,28,33,36	146.665 9	1.051 0	3.566 1
$\alpha=0, \beta=0, \gamma=3$	7,9,14,18,37	575.395 7	5.016 1	2.243 1
$\alpha=1, \beta=1, \gamma=1$	7,9,14,28,36	141.916 4	1.061 5	2.618 3

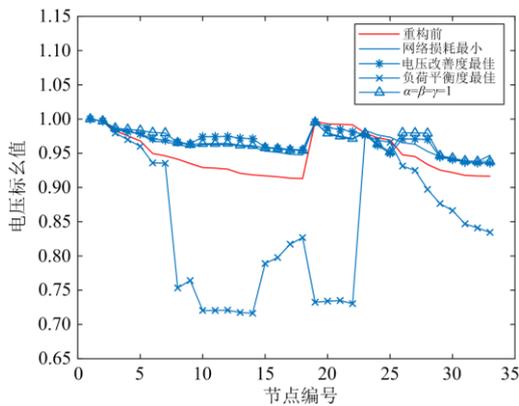


图 4 不同优化目标下节点电压

Fig. 4 Node voltage under different optimization goals

由上可以看出: 单一优化目标下, 均能得到最优解; 在多优化目标下, 也能很好地得到算法的折

中优解。调度人员可以根据实际情况来对算法的权重值进行调节从而满足不同的优化场景。

在仅考虑网损的情况下测试改进 HS 算法的优化效果, 设置算法的参数  $HMS=10, T_{max}=200$ , 在不加入随机无功补偿和 DG 随机出力值的情况下, 对 IEEE33 节点进行重构操作, 迭代结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出: 三种 HS 算法的结果基本上能收敛到较好的程度。本文算法有功损耗减少了 31.15%, 最低节点电压值上升了 2.71%; 在电压改善度上相较基础 HS 提高了 0.054 1; 相较于前两种 HS 算法在运行时间上更有优势, 较基础 HS 下降了 43.61%, 较自适应 HS 降低了 32.61%。上述结果验证了本文算法的有效性。

由图 5 可以看出: 基础 HS 算法采取固定的参数, 运行速率慢, 容易困在局部相对优解难以跳出。而本文算法很好地跳出了局部最优, 收敛速度更快。

表 4 重构结果对比

Table 4 Comparison of reconstruction results

算法	有功损耗/kW	最低节点电压标么值	重构断开开关	电压改善度	运行时间/s
基础 HS	140.705 8	0.941 3	7,9,14,28,32	0.544 6	15.843 7
自适应 HS	139.551 3	0.937 8	7,9,14,37,32	0.599 7	13.258 1
本文 HS	139.551 3	0.937 8	7,9,14,37,32	0.599 7	8.934 9

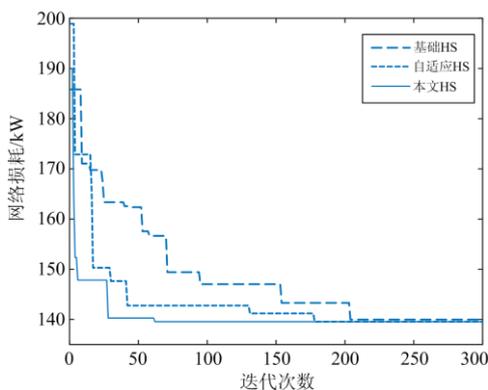


图 5 不同 HS 迭代结果

Fig. 5 Different HS iteration results

### 3.4 动态分析

考虑到风机的有功输出、EV 充放电、日负荷都是动态变化的量。结合某地的一天内的风速变化和表 2 中场景的输出功率决定风机的 24 h 出力值, 如图 6 所示。

在 30 台 EV 接入配电网且仅考虑定时模式<sup>[26]</sup>的情况下, 假定 23:00—次日 08:00 以 150 kW/h 为 EV 充电, 08:00—21:00 以 100 kW/h 进行放电, 其余时刻以 30 kW/h 缓慢充电; 结合某地日负荷变化<sup>[27]</sup>, 得到各自的出力曲线, 如图 7 所示。

由图 7 可以得到待重构负荷曲线, 利用基于欧氏距离的 K-Means 方法将曲线分成 5 段, 如图 8 所示。

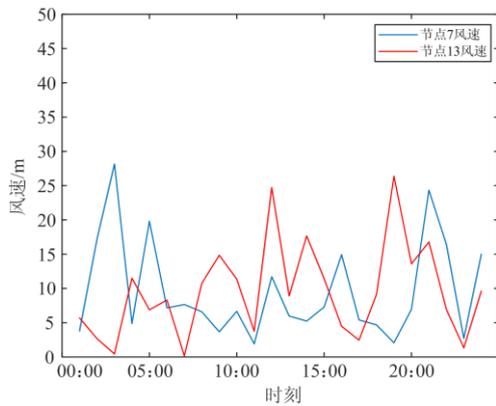


图 6 24 h 风速图

Fig. 6 24-hour wind speed chart

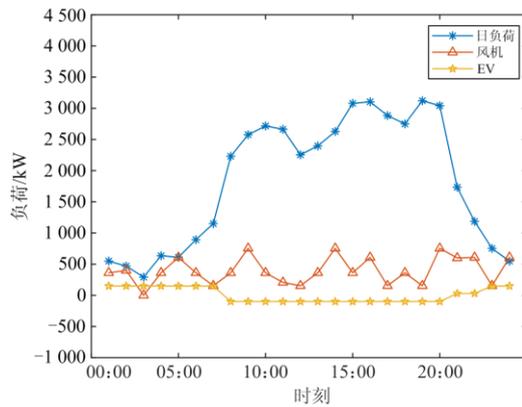


图 7 各负荷功率

Fig. 7 Power of each load

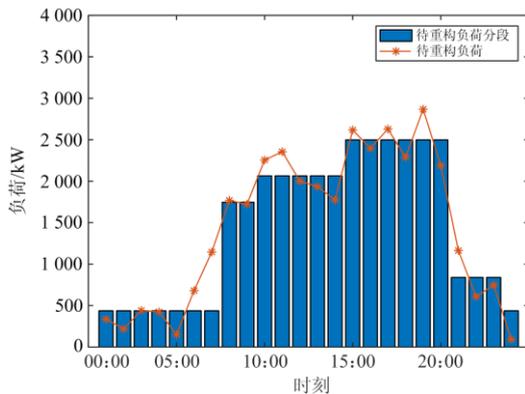


图 8 日综合负荷分段

Fig. 8 Daily comprehensive load segment

根据图 8 对配电网重构优化, 为方便与其他优化算法进行比较, 令  $\alpha=\lambda=2$ ,  $\beta=\gamma=0$ , 结果如表 5 所示。

由表 5 可以看出: 每个时段的重构结果都不相同, 均存在较大差异。将本文算法与改进蚁群算法

(Ant Colony Optimization, ACO)作比较, 对比结果如表 6 所示。

表 5 各时段重构结果

Table 5 Reconstruction results in each period

序号	时段	断开支路号	无功补偿量/kvar
1	23:00—次日 08:00	7,9,14,28,31	0/0/100
2	08:00—10:00	7,8,34,37,31	500/400/300
3	10:00—15:00	7,9,14,37,36	400/200/300
4	15:00—21:00	7,10,34,37,32	700/300/300
5	21:00—23:00	6,9,14,28,31	100/0/200

表 6 不同方式下的优化结果

Table 6 Optimization results in different ways

优化方式	开关动作总数	总网损/kW
改进 ACO 负荷不分段	62	533.657 8
本文 HS 负荷不分段	61	521.817 9
改进 ACO 负荷分段	19	562.815 3
本文 HS 负荷分段	15	553.562 2

由表 6 可以看出, 本文在不分段情况下, 网损相较改进 ACO 降低了 11.839 9 kW; 与不分段相比, 本文算法在分段情况下虽然增加了一定的网损值, 但开关动作数却减少了 46 次, 极大地延长了开关寿命, 提升了系统重构的可靠性, 证明了本文算法的有效性。

## 4 结论

重构优化是消除高渗透率 DG 对电力系统造成波动的有效途径。本文以网损、开关动作数、电压和负荷波动最小为目标, 对 HS 算法自适应参数、取值机制和越界逸出进行改进, 充分考虑到风电出力 and 负荷的不确定性, 利用 EV 来实现削峰填谷, 对配电网施以一定的无功补偿, 选取 K-Means 方法对一天内的负荷进行最优分段。通过静态迭代, 验证了本文改进 HS 算法的有效性; 通过动态重构优化, 表明了本文算法有效减少了系统运行网损, 降低了电压和负荷的不均衡度, 延长了开关使用寿命, 提高了系统的稳定性和经济性。

加强风电场景的细化, 提高系统的 DG 渗透率指标将是未来工作的重点。

## 参考文献

- [1] 赵波, 王财胜, 周金辉, 等. 主动配电网现状与未来发展[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 125-135.  
ZHAO Bo, WANG Caisheng, ZHOU Jinhui, et al. Present and future development trend of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 125-135.

- [2] MISHRA S, DAS D, PAUL S. A comprehensive review on power distribution network reconfiguration[J]. *Energy Systems*, 2017, 8(2): 227-284.
- [3] YADAI AH C, GOSWAMI S K, DEBASHIS C. Effect of network reconfiguration on power quality of distribution system[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2016, 83: 87-95.
- [4] 王玲玲, 王昕, 郑益慧, 等. 计及多个风电机组出力相关性的配电网无功优化[J]. *电网技术*, 2017, 41(11): 3463-3469.  
WANG Lingling, WANG Xin, ZHENG Yihui, et al. Reactive power optimization of distribution network considering output correlation of multiple wind turbines[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(11): 3463-3469.
- [5] 付英杰, 汪泓, 谭阳红. 基于 Pareto 最优解的含分布式电源配电网无功优化[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2017, 29(1): 18-23.  
FU Yingjie, WANG Feng, TAN Yanghong. Reactive power optimization of distribution network containing distributed generation based on Pareto optimal[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2017, 29(1): 18-23.
- [6] 谭文勇, 刘敏, 罗永平, 等. 配电网动态重构算法及时段划分研究综述[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(11): 63-67, 73.  
TAN Wenyong, LIU Min, LUO Yongping, et al. Review of research on algorithm and time division of dynamic reconfiguration of distribution network[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(11): 63-67, 73.
- [7] ANA M, JULIANA S, BÁRBARA S, et al. Comparative study of distribution networks reconfiguration problem approaches[J]. *RAIRO-Operations Research*, 2021, 55: 2083-2124.
- [8] 陈泽兴, 张勇军, 黄豫, 等. 基于条件风险价值的综合能源配电网优化重构方法研究[J]. *全球能源互联网*, 2020, 3(6): 590-599.  
CHEN Zexing, ZHANG Yongjun, HUANG Yu, et al. Optimal reconfiguration of distribution networks in integrated energy systems based on conditional value at risk[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2020, 3(6): 590-599.
- [9] 周鹏. 含分布式电源并网特性的配电网重构策略[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(15): 34-40.  
ZHOU Peng. Reconfiguration strategy of distribution network considering characteristics of grid-connected distributed generation[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(15): 34-40.
- [10] 彭文强, 毛弋, 邓海潮, 等. 改进型细菌觅食算法应用于配电网重构[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2017, 29(7): 93-97.  
PENG Wenqiang, MAO Yi, DENG Haichao, et al. Application of improved bacterial foraging algorithm to distribution network reconfiguration[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2017, 29(7): 93-97.
- [11] SOUFI H, KAHOU LI O, ABDALLAH H H. Multi-objective distribution network reconfiguration optimization problem[J]. *Electrical Engineering*, 2019, 101(1): 45-55.
- [12] 安然, 吴俊勇, 邵美阳, 等. 基于随机矩阵和支持向量机的两阶段配电网综合优化[J]. *供用电*, 2019, 36(10): 2-8, 72.  
AN Ran, WU Junyong, SHAO Meiyang, et al. Two-stage comprehensive optimization method of distribution network based on random matrix and support vector machine[J]. *Distribution & Utilization*, 2019, 36(10): 2-8, 72.
- [13] 郑能, 胡瑞馨, 丁晓群, 等. 考虑多种类型的分布式电源和网络重构的配电网无功优化[J]. *智慧电力*, 2019, 47(3): 90-96.  
ZHENG Neng, HU Ruixin, DING Xiaoqun, et al. Reactive power optimization of distribution network considering multiple types of distributed generations and network[J]. *Smart Power*, 2019, 47(3): 90-96.
- [14] 刘建存, 秦超, 余贻鑫. 考虑 MEG 事故前优化配置的配电网两阶段重构韧性提升方法[J]. *智慧电力*, 2020, 48(8): 1-7.  
LIU Jiancun, QIN Chao, YU Yixin. Two-stage reconfiguration method for resilience enhancement of distribution networks considering optimal pre-positioning of MEGs[J]. *Smart Power*, 2020, 48(8): 1-7.
- [15] 叶学顺, 何开元, 刘科研. 有源配电网重构与多级无功联动优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(13): 115-123.  
YE Xueshun, HE Kaiyuan, LIU Keyan. Network reconfiguration and multi-level reactive power coordination optimization in active distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(13): 115-123.
- [16] MONTEIRO R V A, BONALDO J P, DA SILVA R F, et al. Electric distribution network reconfiguration optimized for PV distributed generation and energy storage[J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 184: 1-9.
- [17] 易海川, 张彼德, 王海颖, 等. 提高 DG 接纳能力的配电网动态重构方法[J]. *电网技术*, 2016, 40(5): 1431-1436.  
YI Haichuan, ZHANG Bide, WANG Haiying, et al.

- Distribution network dynamic reconfiguration method for improving distribution network's ability of accepting DG[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1431-1436.
- [18] 程杉, 倪凯旋, 苏高参, 等. 基于 DAPSO 算法的含分布式电源的配电网重构[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 195-202.
- CHENG Shan, NI Kaixuan, SU Gaocan, et al. Reconfiguration of distribution network with distributed generations based on DAPSO algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 195-202.
- [19] 潘本仁, 王和春, 张妍, 等. 含分布式电源的主动配电网重构策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 102-107.
- PAN Benren, WANG Hechun, ZHANG Yan, et al. Study on an active distribution network reconstruction strategy with distributed power supply[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 102-107.
- [20] SHARIATKHAH M H, HAGHIFAM M R, SALEHI J, et al. Duration based reconfiguration of electric distribution networks using dynamic programming and harmony search algorithm[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2012, 41(1): 1-10.
- [21] 唐可, 邱晓燕, 王兰, 等. 基于风电功率预测信息的配电网滚动实时重构策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(4): 72-77.
- TANG Ke, QIU Xiaoyan, WANG Lan, et al. Scrolling reconfiguration strategy for distribution network based on prediction information of wind power[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2017, 29(4): 72-77.
- [22] 李镒, 王利利, 刘向实, 等. 基于门当户对遗传算法的配电网多目标主动重构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 30-38.
- LI Meng, WANG Lili, LIU Xiangshi, et al. Multi-objective active reconfiguration of distribution network based on the "properly matched marriage" genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 30-38.
- [23] 吴锋, 胡剑琛, 莫若慧. 基于负荷重构策略的电网调峰方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(7): 38-44.
- WU Feng, HU Jianchen, MO Ruohui. Research on power grid peak-shaving method based on load reconfiguration strategy[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(7): 38-44.
- [24] ONLAM A, YODPHET D, CHATTHAWORN R, et al. Power loss minimization and voltage stability improvement in electrical distribution system via network reconfiguration and distributed generation placement using novel adaptive shuffled frogs leaping algorithm[J]. Energies, 2019, 12(3): 553.
- [25] 周世兵, 徐振源, 唐旭清. K-means 算法最佳聚类数确定方法[J]. 计算机应用, 2010, 30(8): 1995-1998.
- ZHOU Shibing, XU Zhenyuan, TANG Xuqing. Method for determining optimal number of clusters in K-means clustering algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(8): 1995-1998.
- [26] 王皓靖, 王育飞, 张宇, 等. V2G 模式下电动汽车的有序充放电策略[J]. 上海电力学院学报, 2019, 35(2): 137-142.
- WANG Haojing, WANG Yufei, ZHANG Yu, et al. On sequential charging and discharging strategy of electric vehicle in V2G mode[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2019, 35(2): 137-142.
- [27] 杨胡萍, 彭云焰, 熊宁. 配网动态重构的静态解法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(8): 53-57.
- YANG Huping, PENG Yunyan, XIONG Ning. A static method for distribution network dynamic reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(8): 53-57.

收稿日期: 2020-12-14; 修回日期: 2021-04-26

作者简介:

吴建旭(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网重构; E-mail: skwjx95@163.com

于永进(1980—), 男, 通信作者, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: yaydjt@163.com

(编辑 周金梅)