

DOI: 10.7667/PSPC180303

兼顾抗毁度的含风电配电网多目标重构

李晏君¹, 张章煌¹, 陈 玮¹, 郭创新¹, 朱炳铨², 童存智²

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007)

摘要: 为了通过配电网重构提高供电可靠性, 从网络保持连通性及抵御破坏能力的角度, 引入网络抗毁度指标作为配电网重构的一个新目标函数。通过有权网络的边权值和节点位置重要度求解网络抗毁度, 同时考虑风电输出的随机性和间歇性, 对该指标进行修正。建立了兼顾抗毁度的含风电配电网多目标重构模型, 并采用改进和声搜索算法来求解此模型。给出了多目标重构的帕累托最优解集, 供决策者根据实际情况选择。通过对 33 节点系统的算例分析, 验证了所提模型求解方法的有效性与合理性。

关键词: 配电网重构; 抗毁度; 帕累托最优解; 多目标; 自适应参数

Multi-objective distribution network reconfiguration with wind power generators considering network invulnerability

LI Yanjun¹, ZHANG Zhanghuang¹, CHEN Wei¹, GUO Chuangxin¹, ZHU Bingshuan², DONG Cunzhi²

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China)

Abstract: In order to improve the reliability of power supply through distribution network reconfiguration, from the point of view of maintaining connectivity and resisting damage ability, network invulnerability index is introduced as a new objective function of the distribution network reconfiguration. The edge weight and node position importance of the weighted network are introduced to calculate the index of network invulnerability. At the same time, considering the randomness and intermittent of the output of the Wind Power Generations (WPG), the index is modified. A model for multi-objective distribution network reconfiguration with wind power generators considering the Degree of Network Invulnerability (DNI) is proposed, and the Improved Harmony Search Algorithm (IHSA) is applied to solve this model. The Pareto optimal solution set for multi-objective reconfiguration is given for the decision-makers to choose according to the actual situation. Case studies on 33-bus system validate the validity and rationality of the proposed method.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900100) and Science Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Company (No. 5211SX1500R4).

Key words: distribution network reconfiguration; degree of network invulnerability; Pareto optimal solution; multi-objective; adaptive parameters

0 引言

配电网一般具有闭环设计、开环运行的特点, 包含有大量分段开关和少量联络开关。配电网重构通过改变这些开关的状态来变换网络结构, 从而降低网损、均衡负荷、消除过载及提高电压质量^[1-2]。配电网的拓扑结构决定了其内在本质的特点。网络

的抗毁度是从网络的连通性角度评估网络拓扑结构的可靠性, 描述了网络抵御破坏的能力。在配电网中, 随着网络拓扑的变化, 其抗毁度也会发生变化, 进而对系统的可靠性产生影响。文献[3]基于中压配电网的抗毁度分析, 优化网络拓扑结构以提高网络的安全可靠性。文献[4]通过自然连通度评价配电网网络抗毁度, 但其仅考虑拓扑连接关系而忽略各节点相连边权值的差异, 具有一定局限性。随着越来越多具有随机性、间歇性的分布式能源接入配电网, 使得系统运行状态具有不确定性^[5]; 此外配电网从

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0900100); 国网浙江省电力公司科技项目资助(5211SX1500R4)

单电源辐射状网络变成了多分布式电源的弱环网络使得配电网潮流改变^[6-9]。人工智能算法^[10-14]能较好地解决含分布式能源的配电网重构问题,如和声搜索算法^[12](Harmony Search Algorithm, HSA)具有易于实现、参数较少、收敛性较强、有较好的全局寻优能力等特点。传统研究^[15-17]进行单目标重构仅能提升单一性能指标,为满足配电网发展要求,研究热点逐渐转向多目标重构。文献[17]提出一种基于模糊理论的交互式方法协调不同的目标函数,并让操作员决定每个目标函数的满意度。文献[18]通过概率负荷潮流获得配电网多目标重构策略以提高可靠性。文献[19]引入区间分析技术计算各目标权重,构造聚合目标函数处理最小化网损和最大化系统可靠性的多目标优化问题。文献[20]考虑安全性要求提出了一种计及N-1安全准则的配电网多目标重构新策略。文献[17-20]通过确定不同目标函数之间的相对权重,将多目标优化问题转化为单目标优化问题,具有较大主观性且只获得一个解。上述多数对配电网重构的研究,未能明确对网络的拓扑性能进行评估;少数研究仅考虑无权网络的抗毁度,未能从连接关系的基础上考虑复杂有权网络的抗毁度,具有一定局限性。此外,人工智能算法对参数设置非常敏感,随着网络改变,参数的最优值会发生变化;对同一配电网重构,搜索前期与后期的最优参数也不相同。上述研究涉及的算法普遍使用固定参数,容易陷入局部最优,导致收敛速度慢。

在此背景下,本文提出兼顾抗毁度的含风电配电网多目标重构(distribution network reconfiguration with wind power generators considering network invulnerability, DNI)模型及其求解算法,旨在引入复杂网络理论分析有权网络结构抗毁度,并计及分布式电源接入如风电对网络抗毁度的影响,综合评估网络拓扑性能,同时降低网损,减少操作开关次数。此外,在传统和声搜索算法中引入自适应参数,通过学习搜索过程中获得的信息,对参数进行自适应调整,避免陷入局部最优,提高收敛性。使用帕累托最优解的概念解决配电网重构多目标优化问题,最终得到一个由一组非支配解组成的解集。

1 网络抗毁度评估

1.1 复杂有权网络相关定义

将一个实际的配电网拓扑结构抽象为复杂有权网络图 $G=(V, E)$ ^[21]。其中, V 为节点集合, E 为边的集合,设边及节点的数量分别为 m 和 n 。

1) 定义 1: 设 ω_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间直接相连边 (i, j) 的权值。则任意两个节点间的权值集合为

$$W = \{\omega_{ij} > 0 | i, j = 1, 2, \dots, m\} \quad (1)$$

ω_{ij} 数值越大,节点间的关系越疏远,对应实际配电网各线路电气距离(即线路阻抗值)越大。

2) 定义 2: 有权网络图 G 的边权邻接矩阵 A 为一个 m 阶的方阵, A 中的元素定义为

$$A_{ij} = \begin{cases} \omega_{ij} & i \neq j \text{ 且 节点 } i, j \text{ 直接相连} \\ \infty & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

由于实际配电网为无向有权网络且具有对称性,故有 $\omega_{ij} = \omega_{ji}$ 。为便于后续评估,对 A 做如下处理:选取网络中电气距离最小的一条线路 L 为基准值,其边权值设为 1;其余各条线路的初始权值按其电气距离与 L 的比值确定。

3) 定义 3: 假设与节点 i 直接相连的边的集合 C_i 。节点 i 的边权值为

$$s_i = \sum_{j \in C_i} \frac{1}{\omega_{ij}} \quad (3)$$

节点 i 的边权值即直接与节点 i 相连的全部边的权值倒数之和。节点边权值越大,表示该节点与周围节点联系越紧密,在网络中越重要。

4) 定义 4: 将与节点 i 直接相连的各条边的权值置为 1 后,记节点 i 到节点 j 最短路径的距离为 l_{ij} 。则节点 i 的节点位置重要度为

$$l_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1, j \neq i}^m l_{ij} \quad (4)$$

节点 i 到其他节点最短路径距离值的平均值越小,表示该节点的位置越重要。

5) 定义 5: 节点 i 的综合重要度为

$$D(i) = \frac{s_i}{l_i} \quad (5)$$

节点边权值 s_i 越大,节点位置重要度 l_i 越小,节点 i 越重要,其综合重要度数值也越大。

对于全连通网络而言,任意节点间均有直接相连边,且每条边的权值都相等且为最小值 1。各边权值都为 1 的全连通网络,其抗毁度在所有网络中是最强的,因此将全连通网络作为参照基础,且考虑配电网辐射状结构定义如下形式的网络抗毁度。

6) 定义 6: 网络 G 的抗毁度为

$$Inv(G) = n \frac{\sum_{i=1}^m D(i)}{\sum_{i=1}^m D_{\text{full}}(i)} \quad (6)$$

式中: $\sum_{i=1}^m D(i)$ 与 $\sum_{i=1}^m D_{\text{full}}(i)$ 分别为网络 G 中所有节点综合重要度之和与对应全连通网络 G_{full} 中所

有节点综合重要度之和。

全连通网络 G_{full} 的抗毁度 $Inv(G_{full})=1$ 。其他网络 G 的抗毁度 $Inv(G)<1$ 。抗毁度越大, 网络结构越稳定, 网络的连通性越强, 抵御破坏能力越强。

1.2 风电接入对网络抗毁度的影响

本文以风电为例考察分布式电源接入对网络抗毁度的影响。风机出力与风速的关系为^[22]

$$P = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \text{ 或 } v > v_{co} \\ k_1 + k_2 v & v_{ci} < v < v_r \\ P_r & v_r < v < v_{co} \end{cases} \quad (7)$$

式中: v_{ci} 、 v_r 和 v_{co} 分别为风机的切入风速、额定风速和切出风速; $k_1=P_r v_{ci}/(v_{ci}-v_r)$; $k_2=P_r/(v_r-v_{ci})$; P_r 为风机的额定输出功率。

目前根据风速的统计规律来描述风速分布规律的模型较多。本文基于威布尔(Weibull)分布进行分析, 其密度函数为

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (8)$$

式中, k 和 c 分别为形状参数和尺度参数。

当风速小于切入速度或大于切出速度时, 风机输出功率应为 0。两种情况对应的概率分别为 $p_1 = \int_0^{v_{ci}} f(v)dv$ 与 $p_3 = \int_{v_{co}}^{\infty} f(v)dv$ 。当风速在切入速度和切出速度之间时, 风机出力是变化的, 将风速区间步长设为 μ m/s, 由式(7)求得风速在区间 $v \sim (v+\mu)$ 对应的风机出力和概率分别为

$$P_i = k_1 + k_2(2v + \mu) / 2 \quad (9)$$

$$p_i = \int_v^{v+\mu} f(v)dv \quad (10)$$

将网络中所有的节点分为 3 个集合, 即电源节点集 V_G 、负荷节点集 V_L , 有分布式电源接入的节点集 V_D 。由于现实复杂网络连接具有稀疏性, 与主电网相比, 配电网的稀疏性更强, 网络常常因为某一节点的故障而崩溃。结合配电网本身特性, 为了反映节点关联关系以及电源节点的重要性, 将电源节点的边权值定义为在基本边权值的基础上再加 1, 以便将电源节点与其他节点的重要度区分开来。

分布式电源如风电机组具有电源的特性, 但考虑其装机容量以及随机性和间歇性等因素, 将有分布式电源接入的节点的边权值做如下处理。

$$\begin{cases} s_D(i) = s(i) + \Delta s \\ \Delta s = \frac{\sum_{j=1}^N P_j p_j}{P_r} = \frac{\sum_{j=1}^N P_j \int_v^{v+\mu} f(v)dv}{P_r} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $s_D(i)$ 是计及风电接入影响的节点 i 的边权值,

其数值为基本边权值的基础上加上各区间出力 P_j 与概率 p_j 乘积之和与风机额定功率的比值; N 为风速区间个数。

2 配电网多目标重构模型

2.1 目标函数

为保证经济效益和系统可靠性, 本文以网损最小化、网络抗毁度最大化和操作开关次数最小化为目标函数。网损 P_{loss} 表示为

$$f_1 = \min P_{loss} = \min \sum_{i=1}^N p_i \sum_{l=1}^{N_l} k_l r_l \frac{P_l^2 + Q_l^2}{U_l^2} \quad (12)$$

式中: N_l 是支路集合, l 是支路编号; k_l 是支路 l 的开关状态; r_l 是支路 l 的电阻; P_l 与 Q_l 分别为支路 l 上流过的有功功率和无功功率; U_l 为支路 l 末端节点的节点电压。

网络抗毁度从网络保持连通能力的角度描述了网络拓扑结构的可靠性, 其数值越大代表网络结构越可靠、连通性越强、抵御破坏能力越强。

$$f_2 = \max Inv(G) \quad (13)$$

式中, $Inv(G)$ 是加权网络抗毁度。

考虑人力资源、开关寿命、时间成本、安全因素, 应该尽可能减少操作开关次数^[23]:

$$f_3 = \min O_p \quad (14)$$

式中, O_p 是操作开关的次数。

2.2 约束条件

1) 潮流约束:

$$P_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (15)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (16)$$

2) 节点电压约束

$$V_{\min} \leq V_n \leq V_{\max} \quad (17)$$

3) 支路容量约束

$$|S_l| \leq S_l^{\max} \quad (18)$$

4) 网络辐射状约束

$$N_l = n - N_g \quad (19)$$

5) 风电出力约束

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (20)$$

式中: P_i 和 Q_i 分别为节点 i 的注入有功和无功功率; V_i 和 δ_i 分别是节点 i 电压的幅值和相角; Y_{ij} 和 θ_{ij} 分别是节点 i 和节点 j 之间支路导纳和相角差; V_{\min} 和 V_{\max} 分别为节点电压幅值最小值和最大值, 取值为 $[0.9, 1.1]$; $|S_l|$ 和 S_l^{\max} 分别是支路 l 的传输功率与支

路 l 的最大传输功率; N_l 是支路的个数; N_g 是电源的个数; P_{Gi} 、 P_{Gi}^{\max} 、 P_{Gi}^{\min} 分别为风电机组 DG_i 的实际出力和出力上下限。

3 模型求解—改进和声搜索算法

和声搜索算法是从音乐即兴创作过程中衍生出的元启发式方法, 音乐演奏者调整演奏乐器的音调以寻求完美的和声状态。虽然该算法概念简单、易于实现, 然而在传统的和声搜索算法^[12]中, 两个重要参数和声记忆库内搜索率(Harmony Memory Considering Rate, HMCR)和音调调节率(Pitch Adjusting Rate, PAR)是固定值。由于搜索效果与所选参数直接相关, 参数选取不当导致搜索效率低下, 并且搜索前后所需参数大小不同, 因此固定参数存在一定的局限性。本文在传统和声搜索算法基础上, 通过引入自适应参数提出了一种改进和声搜索算法(Improved Harmony Search Algorithm, IHSA)。

3.1 自适应参数

已有涉及和声搜索算法的研究普遍使用固定参数, 但由于该算法对参数设置非常敏感, 参数设置不当时, 其计算速度和收敛性能都会下降。为了在产生新和声向量时, 最大程度利用先前搜索过程的已有信息, 提出自适应参数并以如下形式计算。

$$HMCR_k = \frac{HMCR^a}{1 + \gamma \times \exp(-SD_H \times N(0,1))} \quad (21)$$

$$PAR_k = \frac{PAR^a}{1 + \beta \times \exp((-SD_P \times N(0,1)))} \quad (22)$$

$$\gamma = 2HMCR_{k-2} - HMCR_{k-1} - HMCR_{k-3} \quad (23)$$

$$\beta = 2PAR_{k-2} - PAR_{k-1} - PAR_{k-3} \quad (24)$$

$$SD_H = \sqrt{\frac{1}{HMS} \sum_{i=1}^{HMS} (HMCR_{k-1}^i - \overline{HMCR_{k-1}})^2} \quad (25)$$

$$SD_P = \sqrt{\frac{1}{HMS} \sum_{i=1}^{HMS} (PAR_{k-1}^i - \overline{PAR_{k-1}})^2} \quad (26)$$

$$bw_k = \text{random}(1, HMS) \quad (27)$$

式中: k 是当前生成和声向量的编号; 在历史参数矩阵内, $HMCR^a$ 和 SD_H 是 $HMCR$ 的平均值和方差; PAR^a 和 SD_P 是 PAR 的平均值和标准差; $N(0,1)$ 是期望为 0、标准差为 1 的正态分布随机数; HMS 是和声记忆库大小; bw 是带宽。传统 HSA 中 bw 被设为固定值, 一定程度上限制了算法的寻优能力。为了充分利用和声记忆库的信息, 将 bw 设为一个 1 到 HMS 的随机数, 有利于跳出局部最优。

通过引入自适应参数, 提出了一种新的改进和

声搜索算法, 其特点是学习搜索过程中的已有信息, 自适应改变参数的值以避免陷入局部最优。加速因子 β 和 γ 基于参数变化率, 有利于提前调节并引导搜索过程。黏附因子 SD_H 和 SD_P 根据历史数据的离散程度判断是否陷入局部最优。在产生新的和声向量时, 通过搜索过程中获得的信息对参数进行调整。此外, 自适应参数利用指数函数快速增长的性质, 较好地跟踪重构问题的变化特征。

3.2 帕累托最优解

对于多目标重构问题, 各目标通常相互矛盾, 很难同时使所有目标达到最优值。多数多目标研究使用聚合赋权法将多目标优化问题加权转化为单目标优化问题, 具有较大主观性, 缺乏说服力; 同时单一重构方案无法适应多种优化偏好。本文 IHSA 使用帕累托最优解解决多目标优化问题。帕累托最优解指不存在比这个方案至少一个目标更好而其他目标不低劣的更好的解, 即不可能优化其中部分目标而使其他目标不劣化。帕累托最优解集是一个各个目标函数的非支配集, 结果为一组各项指标上相互协调的均衡解集, 而非单个指标的最优解。

每一次对目标函数求解后, 将各个目标函数值以及操作开关编号放入结果矩阵, 进行快速非支配排序并比较帕累托优胜关系, 删除结果矩阵中的支配解, 当达到最大迭代次数时算法结束, 最终得到一个由一组非支配解构成的解集。综上所述, 利用改进和声搜索算法求解模型的流程如图 1 所示。

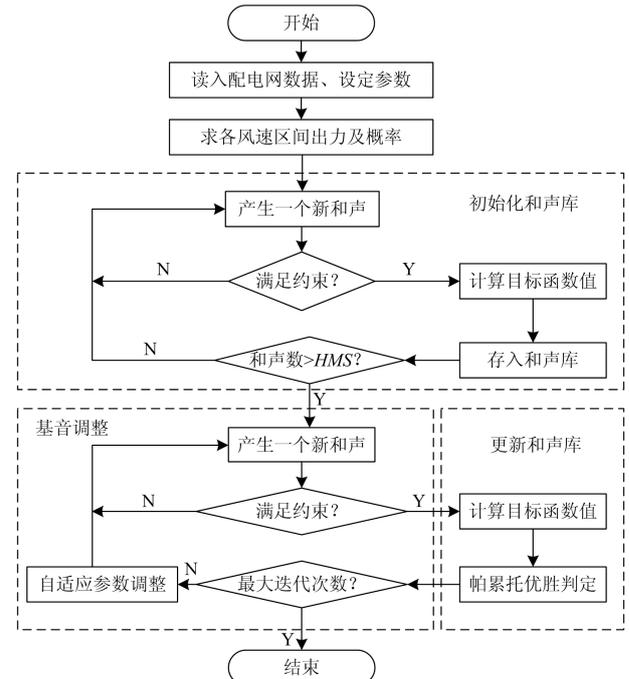


图 1 求解模型流程图

Fig. 1 Flow chart of solving model

4 算例分析

将本文所提模型及求解算法应用于 33 节点系统^[24], 其中 HMS 设为 8, $HMCR$ 和 PAR 的初值分别设为 0.9 和 0.3, 最大迭代次数设为 100。首先使用 IHSA 求解含风电的配电网多目标重构问题, 得到了一个帕累托最优解集。然后通过比较分析两种不同网络抗毁度评估方法的异同。最后分析了引入自适应参数对算法性能的影响。仿真环境为 Matlab2016a, CPU 为 i5-3570, 3.4 GHz 内存 8 GB。

4.1 33 节点系统多目标重构结果

原始系统中有 32 条支路、5 条联络开关支路、1 个电源, 网络首端基准电压 12.66 kV, 三相功率基准值取 10 MVA, 网络总负荷 5 084.26+j2 547.32 kVA。现将 5 台风力发电机组安装在节点 4、8、12、16、30 处, 并假定 5 台风机相同且具有相同的风速变化情况, 风机参数见文献[22], 额定功率为 600 kW, 功率因数为 0.9, 切入风速、额定风速和切出风速分别为: 3 m/s、14 m/s、25 m/s, c 、 k 分别为 9.19、1.93。该系统结构如图 2 所示。风速区间步长设为 $\mu=1$ m/s, 据此求出风电出力与对应的概率, 如表 1 所示。利用 IHSA 求解该系统, 得到的帕累托最优解集如表 2 所示, 对应帕累托前沿如图 3 所示。

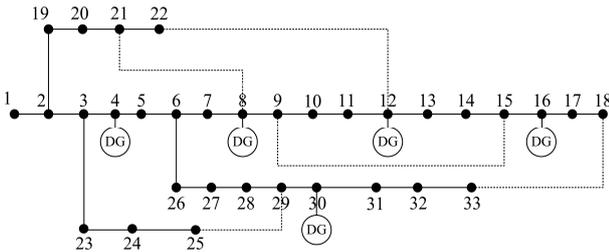


图 2 33 节点系统结构图

Fig. 2 Structure of 33-bus system

表 1 风电出力及其对应概率

Table 1 Wind power output and corresponding probability

区间 编号	风速 区间/ (m/s)	概率	风电出 力/kW	区间 编号	风速 区间/ (m/s)	概率	风电出 力/kW
1	0~3	0.108 9	0.00	8	9~10	0.074 5	354.55
2	3~4	0.073 1	27.27	9	10~11	0.065 2	409.09
3	4~5	0.083 8	81.82	10	11~12	0.055 4	463.64
4	5~6	0.089 7	136.36	11	12~13	0.045 8	518.18
5	6~7	0.091 0	190.91	12	13~14	0.036 8	572.73
6	7~8	0.088 3	245.45	13	14~25	0.104 0	600.00
7	8~9	0.082 5	300.00	14	>25	0.001 0	0.00

表 2 多目标重构结果

Table 2 Result of the multi-objective reconfiguration

编号	P_{loss} /kW	Inv (G)	O_p	打开支路编号
1	100.163 1	0.278 40	2	8,33,34,36,37
2	125.453 6	0.351 55	2	14,33,35,36,37
3	95.696 5	0.302 63	4	10,14,33,36,37
4	118.101 2	0.343 98	4	13,27,33,35,36
5	91.598 4	0.304 36	6	10,14,28,33,36
6	93.108 0	0.317 66	6	9,28,32,33,34
7	99.412 1	0.317 75	8	11,13,28,32,33
8	89.307 5	0.298 60	8	10,12,28,32,33

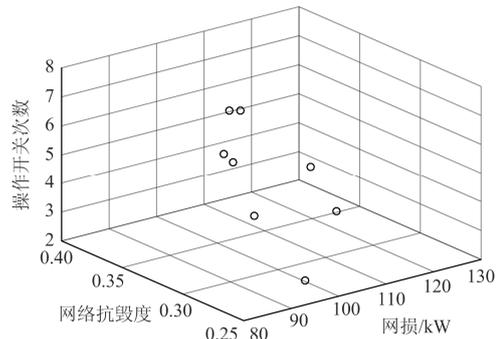


图 3 本文方法的帕累托前沿

Fig. 3 Pareto front of the proposed method

在表 2 中, 系统操作员可以根据实际情况选择帕累托最优解集中的一个解或者部分解作为最终方案。当希望网络结构更可靠时, 选择 Inv 较大的方案; 当强调系统经济性指标时, 选择 P_{loss} 较小的方案; 考虑开关寿命与操作安全时, 选择 O_p 较小的方案。表 2 得到非支配解组成的解集避免加权法的主观性, 也不必为了获得多组解而反复调节加权系数。

如图 3 所示, 通过协调不同指标, 帕累托最优解集是切合实际并具有综合优势的一组均衡解。文献[25]中所提出的 TOPSIS 方法经过均一化可以在获得的帕累托最优解集中优选出一个综合最优解, 该解权衡了所有目标函数以满足不同需要, 并且每一目标函数都具有相对良好的数值。

4.2 本文重构结果与文献[26]对比

采用本文方法和文献[26]方法分别对原始 33 节点系统进行重构, 所得重构结果具体见表 3。

表 3 与文献[26]重构结果对比

Table 3 Comparison of reconfiguration results with ref. [26]

方法	P_{loss} /kW	Inv (G)	O_p	打开支路编号
文献[26]	181.903 0	0.063 008 455 315 924 5	10	4,11,12,26,32
本文方案 1	139.550 8	0.207 30	8	7,9,14,32,37
本文方案 2	175.127 5	0.260 70	2	28,33,34,35,36

文献[26]构建了基于等效最短路径的网络抗毁度指标,并将其应用于配电网多目标重构。由表 3 可以看出,本文与文献[26]方法求得的重构方案有所不同:本文方案 1 求得网损有小幅度减小(减少约 3.7%),但操作开关次数仅需要 2 次;本文方案 2 所需操作开关次数为 8 次,略少于文献[26]给出的方案,但其网损有较大幅度削减(减少约 23.3%)。因此,从提高系统经济性、安全性的角度出发,本文得出的重构方案更优。

不同的重构结果对应网架拓扑不同,使网络抗毁度亦不同,因此有必要分析相同拓扑下两种方法求得网络抗毁度的差异,对比结果具体见表 4。

表 4 相同拓扑与文献[26]网络抗毁度对比

Table 4 Comparison of the network invulnerability in the same topology with ref. [26]

方案	打开支路编号	文献[26] $Inv(G)$	本文 $Inv(G)$	O_p
1	18,11,12,26,32	0.062 949 267 101 854 9	0.209 38	10
2	4,11,12,26,32	0.062 947 228 215 140 0	0.194 61	10
3	18,11,12,23,32	0.062 949 272 515 310 7	0.240 13	10
4	18,11,12,23,36	0.062 949 272 418 700 9	0.246 42	10

从表 4 可以看出,在相同拓扑下本文方法与文献[26]方法求得网络抗毁度最小的方案相同,都为方案 2;但两者求得的抗毁度最大方案不同,本文方法求得方案 4 抗毁度最大,而文献[26]求得方案 3 抗毁度最大。分析原因如下:(1)文献[26]从等效最短路径角度考虑网络抗毁度,本文则通过计算节点边权值与节点位置重要度,从节点综合重要度的角度考察网络抗毁度;(2)文献[26]假定网络为均一网络,网络中各节点间采用等长度、同型号的导线连接,在简单无权网络下仅考虑各节点连接关系,忽略各条线路差异,并没有考察各条线路的权重。与文献[26]的方法相比,本文中的网络抗毁度指标基于复杂有权网络,图中各条边的权重为配电系统各线路的电气距离,即线路阻抗值,更接近真实情况,具有更高的实用性。

4.3 算法性能比较

为了验证本文提出算法的性能,分别使用遗传算法 GA^[10]、HSA 和 IHSA,对原始 33 节点系统进行多目标重构。考虑算法的随机性,重复执行算例 100 次,每次搜索完成采用 TOPSIS 方法从帕累托最优解集中获得一个优选解。多次搜索求出的网损最小值、最大值、平均值、标准差、平均网损减少百分比、平均网络抗毁度和平均求解时间等指标都有所不同,具体见表 5。最大迭代次数设为 100,得到网损收敛曲线如图 4 所示。

表 5 算法性能比较

Table 5 Comparison of algorithm performance

算法	GA[10]	HSA	IHSA	
网损/kW	最小值	139.5	139.5	139.5
	最大值	192.7	189.7	184.2
	平均值	166.2	164.9	159.6
	标准差	14.53	13.34	12.52
平均网损减少百分比/%	17.99	18.64	21.25	
平均网络抗毁度 Inv	0.234 68	0.235 93	0.236 54	
平均求解时间/s	18.63	13.44	12.91	

从表 5 中可以看出,两种涉及和声搜索算法的目标函数统计值优于遗传算法,如平均网络抗毁度更大,平均网损减少更多。由于引入自适应参数,改进和声搜索算法(IHSA)寻优能力更强、平均求解时间更短、标准差更小、网损平均值更小,这些指标均优于传统和声搜索算法(HSA)。遗传算法、传统和声搜索算法的稳定性能不如改进和声搜索算法,且平均求解时间也长于改进和声搜索算法。

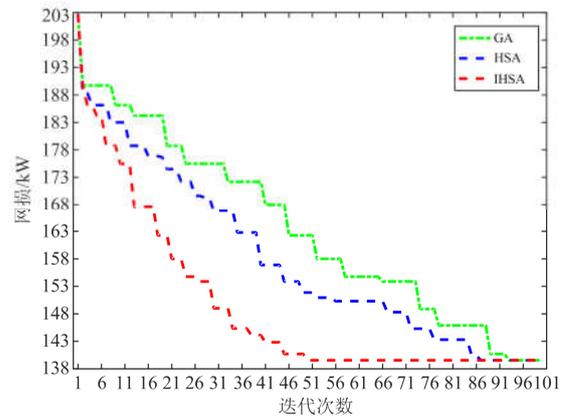


图 4 33 节点系统网损收敛曲线

Fig. 4 Loss convergence curve of 33-bus system

从图 4 可以看出,传统和声搜索算法 HSA 由于每次产生新和声向量时进行基音调整,因而其收敛速度略快于遗传算法 GA。而改进和声搜索算法 IHSA 引入自适应参数,在搜索过程中不断产生小而频繁的变化,在局部扩大了搜索范围提升了找到优质解的概率,使得 IHSA 比 HSA 收敛更快。在搜索初期 IHSA 的网损收敛曲线降幅最大,在迭代 51 次后网损基本收敛,相较于 HSA 迭代 87 次和 GA 迭代 92 次基本收敛,本文提出的 IHSA 在算法的收敛性方面具有较明显的优势。

5 结论

本文引入网络抗毁度作为配电网重构一个新

的目标函数, 从复杂有权网络角度考察配电网网架的可靠性, 并计及风电等分布式电源接入对网络抗毁度的影响, 建立了兼顾抗毁度的含风电配电网多目标重构模型(DNI), 并采用改进和声搜索算法(IHSA)求解该模型, 给出了多目标配电网重构的最优解集。解集中抗毁度数值较大的方案对应网络具有更强的连通性、更强的抵御破坏能力和更均衡的结构。算例分析体现了网络抗毁度在配电网重构中的适用性, 为配电网网络安全性量化评估提供了新的依据和思路。引入自适应参数改进了和声搜索算法, 在求解 DNI 模型时, 能够实现较高的求解效率并获得较好的重构结果。帕累托最优解能够较好地协调各种不同的指标, 当面对实际场景需要考虑不同经济技术指标时具有更加实用的意义。

参考文献

- [1] 祖国强, 肖峻, 左磊, 等. 基于安全域的配电网重构模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1401-1409.
ZU Guoqiang, XIAO Jun, ZUO Lei, et al. A reconfiguration model for distribution network based on security region[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1401-1409.
- [2] 武鹏, 程浩忠, 刘育权, 等. 考虑合环约束的配电网重构方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 163-168.
WU Peng, CHENG Haozhong, LIU Yuquan, et al. Distribution network reconfiguration method considering loop closing constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 163-168.
- [3] 杨丽徙, 曾新梅, 方强华, 等. 基于抗毁性分析的中压配电网拓扑结构[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 65-69.
YANG Lixi, ZENG Xinmei, FANG Qianghua, et al. Medium voltage distribution network topology based on survivability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 65-69.
- [4] 李奔, 刘会家, 李璐. 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.
- [5] CHEN Qixin, ZHAO Xiangyu, GAN Dahua. Active-reactive scheduling of active distribution system considering interactive load and battery storage[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 320-330. DOI: 10.1186/s41601-017-0060-2.
- [6] 谢海波, 武小梅, 林翔, 等. 含分布式电源的配电网无功优化研究综述[J]. 广东电力, 2017, 30(2): 102-109.
XIE Xiaobo, WU Xiaomei, LIN Xiang, et al. Review on reactive power optimization for power distribution network with distributed generation[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(2): 102-109.
- [7] 王钊, 徐备, 张师. 分布式储能对配电网电压稳定的影响分析[J]. 广东电力, 2017, 30(5): 48-51.
WANG Qian, XU Bei, ZHANG Shi. Analysis on influence of distributed energy storage on voltage stability of power distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(5): 48-51.
- [8] 任洪波, 吴琼. 分布式热电联产系统设计优化研究进展[J]. 热力发电, 2017, 46(1): 11-16.
REN Hongbo, WU Qiong. Design optimization for distributed combined heat and power cogeneration systems: research progress[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(1): 11-16.
- [9] 钟迪, 李启明, 周贤, 等. 多能互补能源综合利用关键技术研究现状及发展趋势[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 1-5, 55.
ZHONG Di, LI Qiming, ZHOU Xian, et al. Research status and development trends for key technologies of multi-energy complementary comprehensive utilization system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 1-5, 55.
- [10] 黄红程, 顾洁, 方陈. 基于无向生成树的并行遗传算法在配电网重构中的应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 89-96.
HUANG Hongcheng, GU Jie, FANG Chen. Application of undirected spanning tree-based parallel genetic algorithm in distributed network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 89-96.
- [11] 郭腾云, 刘艳. 基于博弈方法的含分布式电源配电网重构优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 28-34.
GUO Tengyun, LIU Yan. Game theory based reconfiguration optimization for distribution network with distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 28-34.
- [12] 陈春, 汪飒, 刘蓓, 等. 基于基本环矩阵与改进和声搜索算法的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 55-60.
CHEN Chun, WANG Feng, LIU Bei, et al. Distribution network reconfiguration Based on the basic ring matrix and improved harmony search algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 55-60.
- [13] 毛文晋, 李红伟, 李超. 一种考虑 DG 出力优化分配的配电网重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 57-63.
MAO Wenjin, LI Hongwei, LI Chao. A distribution system

- reconfiguration method considering the optimal active power dispatching of DGs[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(13): 57-63.
- [14] 初壮, 窦孝祥, 于群英. 考虑风电随机性的多场景配电网重构[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(1): 132-138.
CHU Zhuang, DOU Xiaoxiang, YU Qunying. Multi scene distribution network reconfiguration considering the randomness of wind power[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(1): 132-138.
- [15] 黄伟, 纪双全. 基于馈线偶的配电网快速减小网损重构方法[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(5): 75-80.
HUANG Wei, JI Shuangquan. A distribution network reconfiguration method via rapid network loss reduction based on dual feeders[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(5): 75-80.
- [16] 马草原, 孙展展, 尹志超, 等. 基于双重混合粒子群算法的配电网重构[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(11): 120-128.
MA Caoyuan, SUN Zhazhan, YIN Zhichao, et al. Reconfiguration of distribution network based on double hybrid particle swarm algorithm[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(11): 120-128.
- [17] KABOODI T, OLAMAEI J, SIAHKALI H, et al. Optimal distribution network reconfiguration using fuzzy interaction and MPSO algorithm[C] // *Smart Grid Conference*, December 9-10, 2014, Tehran, Iran: 1-5.
- [18] KAVOUSHI-FARD A, NIKNAM T. Multi-objective stochastic distribution feeder reconfiguration from the reliability point of view[J]. *Energy*, 2014, 64(1): 342-354.
- [19] ZHANG P, LI W, WANG S. Reliability-oriented distribution network reconfiguration considering uncertainties of data by interval analysis[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2012, 34(1): 138-144.
- [20] 刘佳, 程浩忠, 肖峻, 等. 计及 N-1 安全准则的智能配电网多目标重构策略[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(7): 9-15.
LIU Jia, CHENG Haozhong, XIAO Jun, et al. A multi-objective reconfiguration strategy for smart distribution network considering N-1 security criterion[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(7): 9-15.
- [21] 吴霜, 卫志农, 孙国强, 等. 考虑网络抗毁性的配电网网架多目标规划[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(3): 137-142.
WU Shuang, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Multi-objective planning of distribution network considering network survivability[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(3): 137-142.
- [22] 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.
- [23] ASRARI A, LOTFIFARD S, PAYAM M S. Pareto dominance-based multi-objective optimization method for distribution network reconfiguration[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(3): 1401-1410.
- [24] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [25] ZHAN J, GUO C, WU Q, et al. Generation maintenance scheduling based on multiple objectives and their relationship analysis[J]. *Journal of Zhejiang University Science C*, 2014, 15(11): 1035-1047.
- [26] 李珂, 王金凤, 杨丽徙, 等. 基于多场景抗毁性分析的配电网网络结构优化[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(1): 34-37.
LI Ke, WANG Jinfeng, YANG Lixi, et al. Optimization of medium voltage distribution network based on multi-scenario survivability analysis[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(1): 34-37.

收稿日期: 2018-03-20; 修回日期: 2018-04-10

作者简介:

李晏君(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网重构、配电网优化运行; E-mail: liyanjun1024@zju.edu.cn

张章煌(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网分布式能源预测, 配电网态势感知;

陈玮(1994—), 男, 博士研究生, 研究方向为配电网优化运行、配电网故障恢复。

(编辑 许威)