

DOI: 10.7667/PSPC151502

兼顾均匀性的多目标配电网重构方法

李志¹, 章禹¹, 暴英凯¹, 郭创新¹, 王威², 谢宇哲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宁波供电公司, 浙江 杭州 315000)

摘要: 提出了一种兼顾均匀性的配电网多目标重构方法。分析了不同均匀性网架结构下可靠性与网损的关系, 给出了网架结构均匀性的评价指标。建立了兼顾均匀性的多目标配电网重构模型(distribution network reconfiguration based on system homogeneity, DSH), 并采用改进多目标和声搜索算法来求解 DSH 模型。通过对 IEEE 33 节点测试系统的仿真分析, 验证了 DSH 模型求解算法的有效性与合理性, 给出了考虑可靠性和均匀性的配网重构问题的最优解集, 供决策者根据实际情况选择。

关键词: 配电网重构; 可靠性; 均匀性; 多目标优化

Multi-objective distribution network reconfiguration based on system homogeneity

LI Zhi¹, ZHANG Yu¹, BAO Yingkai¹, GUO Chuangxin¹, WANG Wei², XIE Yuzhe²

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

2. State Grid Ningbo Power Supply Company, Ningbo 315000, China)

Abstract: Based on homogeneity, a new multi-object configuration method is proposed. To enhance the system reliability and homogeneity, a new multi-objective model is established. Then the relationship of reliability and feeder losses with different homogeneity is discussed, and an improved multi-objective harmony search algorithm is applied to the presented method. The test result by IEEE 33 bus system shows that the presented method is rational and effective, and the optimization solutions considering both system reliability and homogeneity are given so that the dispatchers can make choices according to the actual situation.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2013CB228206), National Natural Science Foundation of China (No. 51177143), and Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No. LZ12E07002).

Key words: distribution network reconfiguration; reliability; homogeneity; multi-objective optimization

0 引言

网络重构为配电管理系统中的一项重要内容, 通过调节安装在配电线路上的分段开关和联络开关的开合状态来改变网络结构。合理的重构方案, 不仅可以降低网损、改善电能质量, 还能够提高系统的可靠性。

配电网重构方法主要有启发式算法和智能算法两大类。传统研究^[1-7]主要以降低网损为目标, 忽略了改变网络结构对系统可靠性的影响, 然而降低网

损, 系统可靠性有可能变差。近年来, 已有学者开始研究考虑可靠性的配电网重构问题。文献[8]通过线性加权法将供电不可靠率和网损相加作为单目标进行优化, 运用改进遗传算法进行网络重构。文献[9]通过构造满意度函数, 建立了综合考虑可靠性和网损的单目标重构模型。文献[10]基于层次分析法, 构建了兼顾网络可靠性和经济性的多目标重构模型。文献[11]提出基于罚函数的遗传算法, 来解决考虑可靠性的配电网重构问题。然而在配电网重构中, 随着系统网架结构的改变, 其均匀性也会发生改变, 进而对系统的网损和可靠性产生影响。以上研究都没有明确分析网架结构均匀性和系统可靠性和网损之间的关系。此外, 将可靠性指标、网损简化成单目标进行优化, 难以客观给定权重系数, 具

基金项目: 国家重点基础研究计划(973计划)(2013CB228206); 国家自然科学基金项目(51177143); 浙江省自然科学基金重点项目(LZ12E07002)

有一定的局限性。

配电网均匀性^[12-14]也指其电网结构均匀程度，它反映了电源和负荷分布确定的状况下，网架结构中各输电设备分布及利用状态的差异。不均匀的网架结构一方面会导致部分输电设备利用率长期处于较低水平，效率低下；另一方面会导致部分输电设备长期重载运行，降低系统可靠性，产生薄弱环节。因此在配电网重构中兼顾均匀性，不仅是提高系统自身运行效率的要求，也是保障系统安全稳定运行的重要手段。

在此背景下，本文提出了一种兼顾均匀性的多目标配电网重构(distribution network reconfiguration based on system homogeneity, DSH)模型及其求解算法，旨在改善系统均匀性，同时降低网损，提高系统可靠性。首先分析了不同均匀性网架结构下可靠性与网损之间的关系，然后在传统仅考虑网损的配电网重构模型的基础上引入了兼顾均匀性的可靠性指标，建立了 DSH 模型，并采用改进多目标和声搜索算法来求解 DSH 模型，给出了兼顾可靠性和经济性的配电网重构方案最优解集，最后通过对 IEEE 33 节点测试系统的仿真分析，验证了本文所提方法的有效性与合理性。

1 不同均匀性网架下可靠性与网损的关系

配电网重构过程中，开关状态的改变，会导致系统网架结构的均匀性发生变化，从而影响系统可靠性和网损。在不同均匀性网架结构下，降低网损，系统可靠性不一定会提高，甚至有可能变差。因此有必要对不同均匀性的网架结构下系统可靠性和网损的关系进行研究。

1.1 网架结构均匀性的评价指标

网架结构的均匀性主要与供电路径以及线路参数有关，由于配电网中线路参数差别较小，本文中主要考虑供电路径。

在网架结构均匀性较差的情况下，系统各末端节点的供电路径分布不均匀，部分供电路径较长，串联支路较多；在网架结构均匀性较高的情况下，系统各末端节点的供电路径分布均匀，串联支路较少。

由于配电网多为闭环设计，开环运行，在不考虑分布式能源、无功补偿等因素的情况下，同一供电路径上的节点电压递减，并且供电路径中串联支路越多，末端节点电压越低。对于同一配电网，均匀性较差的网架结构中存在较长供电路径，其节点最低电压较低；均匀性较好的网架结构中供电路径的串联支路较少，其节点最低电压较高。因此，可

以将节点最低电压作为判断网架结构均匀性的一个评价指标。

1.2 不均匀网架下系统可靠性与网损的关系

以图 1 所示的 6 节点系统为例进行分析，网架结构 1 的均匀性较差，所有节点串联，供电路径中串联支路较多，而网架结构 2 均匀性较好，2、3 节点和 4、5 节点并联呈辐射状，供电路径中串联支路较少。

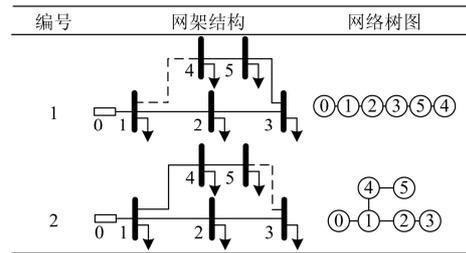


图 1 两种均匀性不同的网架结构

Fig. 1 Two structures with different homogeneity

网架结构 1 的电压最低点为 4 节点，网架结构 2 的电压最低点为 3、5 节点。在其他因素相同的情况下，均匀性较差的网架结构 1 的节点最低电压低于均匀性较好的网架结构 2 的节点最低电压。网架结构 1 的网损较网架结构 2 更高。并且网架结构 1 一旦出现故障，故障点之后的负荷全部失电，系统可靠性较低，网架结构 2 如果出现故障，仅故障点所在分支的负荷会受到影响，系统可靠性较高。

因此，在系统网架结构均匀性较差时，节点最低电压较低，通过重构改善网架结构均匀性，可以提高节点最低电压，降低网损，提高系统可靠性。

1.3 均匀网架结构下系统可靠性与网损的关系

以图 2 所示的 6 节点系统为例进行分析，网架结构 1 与网架结构 2 均呈辐射状，且二者网架结构相似，均匀性较好。

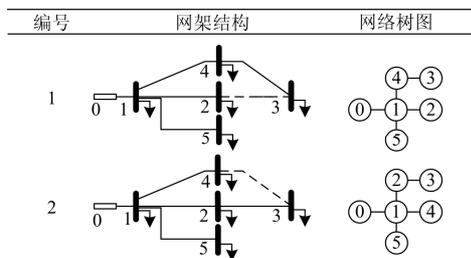


图 2 两种均匀性相同的网架结构

Fig. 2 Two structures with similar homogeneity

在忽略其他因素的情况下，网架结构 1 与网架结构 2 对应的树图一致，二者网架结构均匀性、网损都相同，节点最低电压也相同且较高。如果 2-3 支路故障率较高，网架结构 1 中 2-3 支路未投入运

行, 系统可靠性较高, 而网架结构 2 则存在较大风险, 系统可靠性较差。

因此, 在系统网架结构均匀性较好时, 节点最低电压较高, 改变网架结构对系统均匀性和网损影响较小, 并且均匀性相似的网架结构其可靠性并不一定相同。

根据以上分析可以认为, 系统可靠性与网损在网架结构均匀性较差、节点最低电压较低时存在较强一致性, 在网架结构均匀性较好、节点最低电压较高时一致性较弱。

2 兼顾均匀性的多目标配电网重构模型

兼顾均匀性的多目标配电网重构模型(DSH)以降低网损, 提高系统可靠性为目标, 其中兼顾均匀性的可靠性目标将系统可靠性和均匀性耦合在一起, 在网架结构均匀性较差时计算可靠性指标, 在网架结构均匀性较高时不计算可靠性指标。

(1) 目标函数

(a) 网损目标

$$\min F = \sum_{i=1}^N k_i r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \quad (1)$$

式中: F 为系统网损; N 为系统支路总数; k_i 为装在支路 i 上的开关的状态变量, $k_i=0$ 表示开关处于打开状态, $k_i=1$ 表示开关处于闭合状态; r_i 为支路 i 的电阻; P_i 和 Q_i 分别为节点 i 流过的有功和无功功率; U_i 为支路 i 末端节点的节点电压。

(b) 兼顾均匀性的可靠性目标

$$\min E_{\text{PNS}} = \frac{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^N [F_{\text{PNS}}(\bar{X}_i) \times t_i]}{H} \quad (2)$$

式中: E_{PNS} 为年停电功率期望值(expected power not supplied, EPNS), 其意义为在某一研究周期内由于供电不足造成用户减少用电功率的期望值。该指标能同时反映停电的概率与停电的严重程度, 而且更便于把可靠性与经济性挂钩^[15-17]; $F_{\text{PNS}}(\bar{X}_i)$ 表示系统在随机状态 \bar{X}_i 下对应节点上的有功负荷切除功率; t_i 表示随机状态 \bar{X}_i 的持续时间; H 为网架结构均匀性指标, 其值为

$$H = \begin{cases} 1, & V_{\min} \geq V_{\text{hg}} \\ 0, & V_{\min} < V_{\text{hg}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: V_{\min} 为系统节点最低电压; V_{hg} 为网架结构不均匀电压限值。当 V_{\min} 低于 V_{hg} 时, 认为网架结构不均匀, $H=0$, 式(2)无意义, 不计算 E_{PNS} ; 当 V_{\min} 不低于 V_{hg} 时, 认为网架结构均匀, $H=1$, 需要计算 E_{PNS} 。

(2) 约束条件

(a) 潮流约束

$$P_i = P_{Li} + U_i \sum_{j=1, j \neq i}^{N_b} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (4)$$

$$Q_i = Q_{Li} + U_i \sum_{j=1, j \neq i}^{N_b} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (5)$$

式中: N_b 为系统的节点总数; i 和 j 为节点编号; P_i 和 Q_i 分别为节点 i 的注入有功和无功功率; P_{Li} 和 Q_{Li} 分别为节点 i 的负荷有功和无功功率; V_i 和 V_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 和 θ_{ij} 分别为节点 i 和节点 j 之间的电导、电纳和相角差。

(b) 节点电压约束

$$U_{i\min} < |U_i| < U_{i\max} \quad (6)$$

式中, $U_{i\min}$ 、 U_i 、 $U_{i\max}$ 分别为节点 i 的最小电压允许值、节点电压及节点电压最大允许值。

(c) 支路容量约束

$$S_l \leq S_{l\max} \quad (7)$$

式中, S_l 、 $S_{l\max}$ 分别为流过支路 l 的功率及其最大允许值。

(d) 网络辐射状和无孤岛约束

配电网重构后的网架结构仍需保持辐射状结构, 并且不存在孤岛^[18]。

3 DSH 模型求解算法

和声搜索算法(Harmony Search Algorithm, HSA)源于交响乐团演奏者通过反复调整各自所持乐器的音调, 最终达到一个美妙和声的过程^[19]。

多目标 HSA 具有寻优过程简单、收敛速度快等特点, 但是也存在方向性较差、计算可靠性指标时消耗较多时间等问题。本文根据配电网特点, 采用了自适应优化设置和快速迭代技术, 提出了一种改进的多目标 HSA 来求解 DSH 模型。

3.1 针对配电网特点的改进

传统多目标 HSA 中的 $HMCR$ 和 PAR 为固定值, 基音调整时方向性较差, 为了避免结果陷入局部最优, 在迭代初期, 选择适宜的 $HMCR$ 和 PAR , 尽可能扩大搜索范围寻求可行解; 在迭代后期, 可以减小 $HMCR$ 并增大 PAR 以跳出局部最优解。因此进行如下自适应优化设置:

$$HMCR = HMCR_{\max} - \frac{HMCR_{\max} - HMCR_{\min}}{N} \times k \quad (8)$$

$$PAR = PAR_{\max} + \frac{PAR_{\max} - PAR_{\min}}{N} \times k \quad (9)$$

式中: $HMCR$ 为和声记忆库内搜索概率; PAR 为记忆调节概率; $HMCR_{\max}$ 和 $HMCR_{\min}$ 分别为和声记忆

库内搜索概率最大和最小值; PAR_{max} 和 PAR_{min} 分别为记忆调节概率的最大和最小值; N 为迭代总次数; k 为当前迭代次数。

在传统考虑可靠性的配电网优化重构中, 计算可靠性指标消耗较多时间。由不同均匀性网架结构下可靠性与网损的关系可知, 在节点最低电压较低时, 优化网络结构可以同时减小系统网损, 提高可靠性; 在节点最低电压较高时, 减小系统网损, 不一定可以提高可靠性, 甚至有可能使可靠性更差。因此, 可以在基音调整策略中设定节点最低电压限值, 节点最低电压低于限值时可以不计算可靠性指标, 仅沿网损降低方向快速迭代, 从而缩短求解时间。

3.2 DSH 模型求解算法的步骤

DSH 模型求解算法的计算流程如下。

步骤 1: 初始化, 载入配网数据, 设定相关参数 HMS、HMCR 和 PAR 等。

步骤 2: 产生一个新开关状态和声, 若满足配电网网络辐射状和无孤岛约束, 则存入和声库中; 否则返回步骤 2。

步骤 3: 当和声库中和声数达到 HMS 时, 进入步骤 4, 否则返回步骤 2。

步骤 4: 计算和声库中所有和声对应的最低电压、网损, 若最低电压低于限值, 将可靠性指标设为无穷大, 否则计算可靠性指标。

步骤 5: 根据当前迭代次数调整 HMCR 和 PAR, 并产生一个新和声。若满足配电网网络辐射状和无孤岛约束, 则进入步骤 6; 否则返回步骤 5。

步骤 6: 快速非支配排序。如果产生的新和声支配和声库中的任一和声, 则将新和声存入和声库中, 将被支配的和声删去; 如果产生的新和声与和声库中的和声等价, 则将新和声存入和声库中; 否则跳过该和声。

步骤 7: 判断是否达到终止条件, 达到则输出最优解集, 否则返回步骤 2。

DSH 模型的改进多目标 HSA 求解算法的流程图如图 3 所示。

4 算例分析

为了探究不同均匀性网架结构下可靠性和网损之间的关系, 验证 DSH 模型求解算法, 以图 4 中 33 节点系统为例进行分析^[20]。33 节点系统中, 有 32 条支路, 5 条联络支路, 初始状态时, 1~32 号支路分段开关闭合, 33~37 号支路联络开关打开。

设定 $HMS=15$, $HMCR=0.75$, $PAR=0.4$, 自适应参数 $HMCR_{max}$ 、 $HMCR_{min}$ 分别取 0.95、0.65, PAR_{max} 、 PAR_{min} 分别取 0.55、0.25, V_{hg} 取 0.925 p.u.

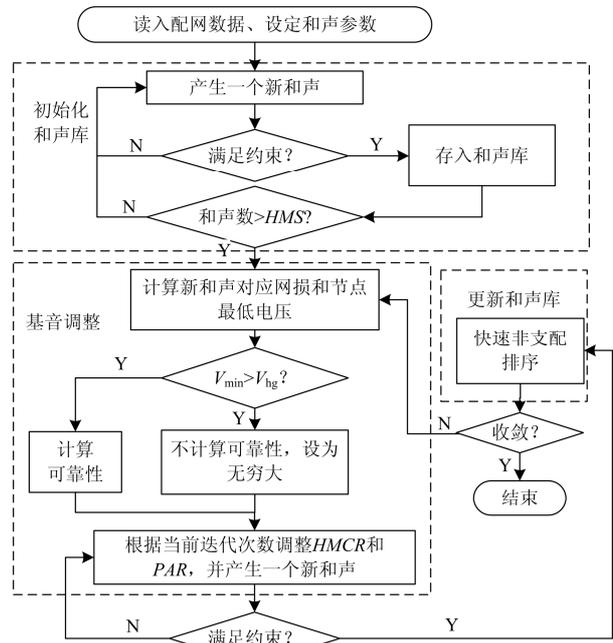


图 3 DSH 模型求解算法流程图

Fig. 3 Flow chart of solving DSH

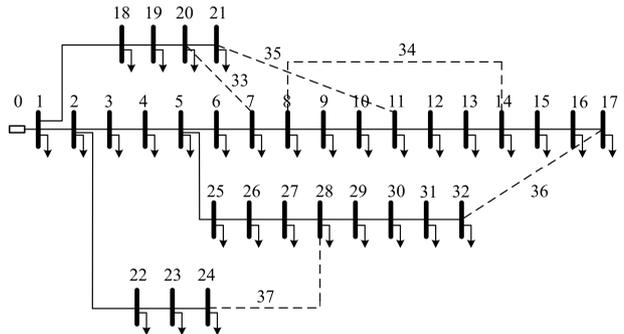


图 4 IEEE 33 节点配电网络

Fig. 4 Structure of IEEE 33-bus distribution system

4.1 不同均匀性网架结构下可靠性与网损关系分析

在配电网重构中, 不同均匀性网络结构对可靠性和网损的影响不同。有必要在进行优化前对于不同均匀性网络结构下可靠性与网损之间的变化关系进行分析。

以降低网损为目标, 对 33 节点系统进行重构, 并计算不同网络结构对应的可靠性、节点最低电压和网损, 如图 5 所示。可以发现, 当 $V_{min} < V_{hg}$ 时, 随着网损降低, 系统可靠性得到提高, 当 $V_{min} > V_{hg}$ 时, 随着网损降低, 系统可靠性不一定得到提高, 甚至存在下降的情况。

取重构过程中的三种不同的开关状态进行分析, 如图 6 所示。状态一开关状态为 35/36/37/38/39, 状态二开关状态为 4/9/34/26/16, 状态三开关状态

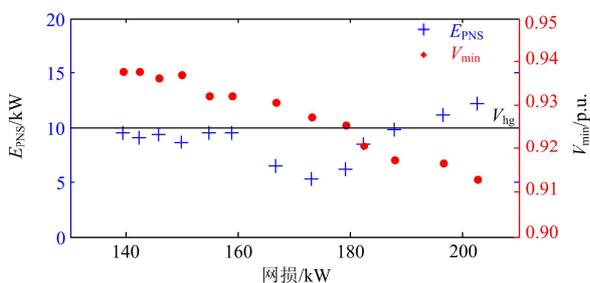


图 5 重构过程中网损与系统 E_{PNS} 的变化关系

Fig. 5 Relationship between feeder losses and E_{PNS}

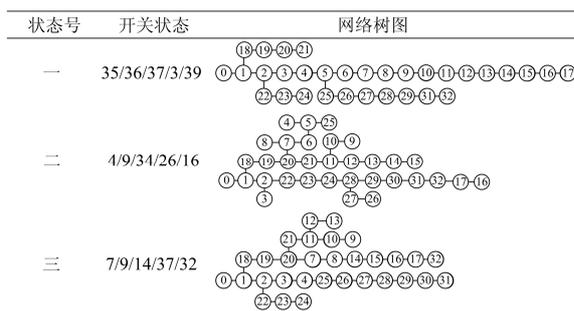


图 6 不同网络结构的网络树图

Fig. 6 Structure of different stages

为 7/9/14/37/32。其中，状态一中供电路径较长，网架结构均匀性最差，状态三中支路多辐射状结构，供电路径较短，网架均匀性最好。

三种状态对应的节点电压如图 7 所示。从图中可以发现，状态一电压最低节点为节点 17，电压为 0.91 p.u.，电压质量最差，状态二电压最低节点为节点 16，电压较高，为 0.93 p.u.，电压质量较好，状态三电压最低节点为节点 31，电压最高，为 0.94 p.u.，电压质量最好。可以发现，节点最低电压越低，系统网架结构均匀性越差，因此，可以将节点最低电压作为网架结构均匀性的评价指标。

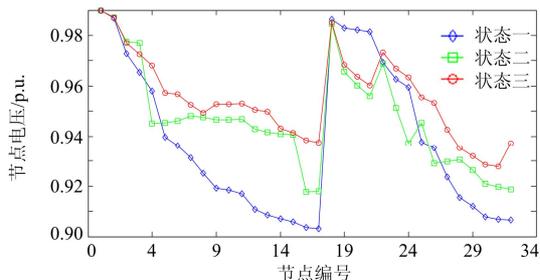


图 7 不同网络结构的各节点电压

Fig. 7 Voltage profiles of different stages

三种状态对应的最低节点电压和网损如表 1 所示。其中，状态一为初始状态，其网损为 202.67 kW，作为参考状态，状态二为中间状态，其网损为

173.05 kW，状态三为网损最优状态，其网损为 139.55 kW。与初始状态比较，状态二网损降低了 14%，状态三网损降低了 31.14%。随着网架结构均匀性的提高，节点最低电压提高，网损下降。

表 1 三种状态的最低节点电压和网损

Table 1 Feeder losses and the lowest voltage of different stages

状态号	开关状态	网损/ kW	网损 降幅/%	节点最低 电压/p.u.	电压 增幅/ %
一	35/36/37/3/39	202.67	0	0.91	0
二	4/9/34/26/16	173.05	14	0.93	2.2
三	7/9/14/37/32	139.55	31	0.94	3.3

三种状态对应的系统缺供电量的互补累积分布函数图如图 8 所示。可以发现，状态一到状态二，函数图像向下偏移，系统可靠性提高，而状态二到状态三，函数图像向上偏移，系统可靠性反而变差。

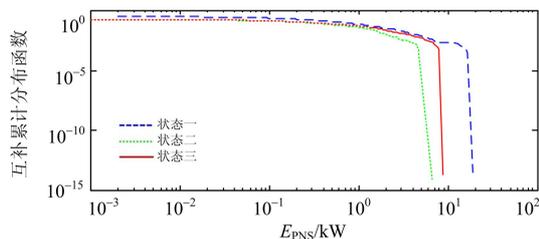


图 8 系统 E_{PNS} 的互补累积分布函数图

Fig. 8 Cumulative complementary distribution of the expected power not supplied

三种状态对应的可靠性指标和网损如表 2 所示。从表 2 中可以看到，状态一的 E_{PNS} 为 12.16 kW，作为参考状态，状态二的 E_{PNS} 为 5.24 kW，状态三的 E_{PNS} 为 9.49 kW，从状态一到状态二，系统可靠性随着网损的降低而提高， E_{PNS} 降幅为 57%，从状态二到状态三，系统可靠性随着网损的降低却反而变差， E_{PNS} 降幅为 22%。可以发现，可靠性与网损在系统网架结构均匀性较差、节点最低电压较低时存在较强一致性，在系统网架结构均匀性较好、节点最低电压较高时一致性较弱。

表 2 三种状态的可靠性指标和网损

Table 2 Reliability indices and feeder losses of different stages

状态号	断开开关	网损/ kW	网损 降幅/%	$E_{PNS}/$ kW	E_{PNS} 降幅/%
一	35/36/37/38/39	202.67	0	12.16	0
二	4/9/34/26/16	173.05	14	5.24	57
三	7/9/14/37/32	139.55	31	9.49	22

根据以上分析发现，在进行考虑可靠性的配电

网多目标优化重构时,在节点最低电压较低时,可以不计算可靠性,将网架结构向网损较低的方向优化,在节点电压较高时,则需要计算系统网损和可靠性,通过非支配排序优化网架结构。

4.2 DSH 模型求解算法计算结果

表3为DSH模型求解算法计算得出的最优解集和单目标HSA方法计算得出的最优解。通过表3可以发现,多目标最优解集中的所有解都是互不支配的。以单目标HSA方法的最优解为基准,计算网损降幅和 E_{PNS} 降幅,可以发现最优解集中的系统网损最大值为173.06 kW,最小值为139.55 kW; E_{PNS} 最大值为9.77 kW,最小值为5.55 kW。文献[8]中采用的GA的最优开关方案为7/10/14/28/36,最低网损为142.43 kW, E_{PNS} 为8.25 kW。并且,本文所提方法的计算时间为23.21 s,比文献[8]的40.23 s节省了42.31%。

表3 不同方法的最优解集

Table 3 Non-dominated solutions with different methods

优化方法/ 时间	断开开关	网损/ kW	网损 降幅/%	E_{PNS} / kW	E_{PNS} 降幅/%
多目标/ 23.21 s	7/9/14/37/32	173.06	-24.01	5.55	43.20
	7/10/14/28/36	159.39	-14.22	5.81	40.63
	6/8/34/28/16	156.27	-11.98	5.90	39.61
	6/11/14/37/17	148.43	-6.37	7.74	20.77
	7/10/14/28/36	142.43	-2.06	8.25	15.49
GA ^[8] / 40.23 s	7/10/14/28/36	142.43	-2.06	8.25	15.49
单目标	7/9/14/37/32	139.55	0.00	9.77	0.00

并且,以降低网损为目标的单目标HSA的最优解也在DSH模型求解算法的最优解集中。这是因为单目标的优化得到开关方案对应的系统网损是全局最优解,即最小网损解,DSH模型求解算法的最优解集中的开关方案对应的系统网损必然不会更小,即不能支配单目标优化最优解,所以,单目标优化最优解作为一个非支配解,必然在DSH模型求解算法的多目标最优解集中。

图9为DSH模型的非支配最优解集。可以发现,DSH模型求解算法可以一次性给出最优解集,当决策者倾向于更可靠的系统的时候,可以直接从最优解集中选取可靠性较高的解;当决策者倾向于更经济的系统的时候,可以直接从最优解集中选取网损较低的解,避免了传统方法中为了得到多组解不断修改加权系数或者归一化函数的重复计算。

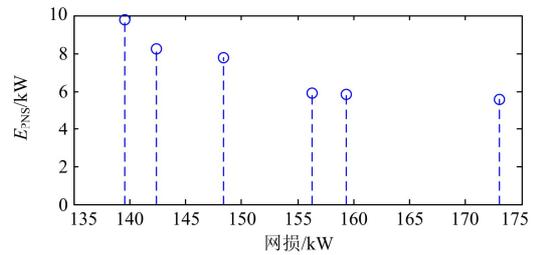


图9 DSH模型的非支配最优解集

Fig. 9 Non-dominated solutions of DSH

5 结论

传统考虑可靠性的配电网重构,没有明确不同均匀性网架结构下系统可靠性和网损之间的关系。为此,本文建立了兼顾均匀性的配电网多目标优化重构(DSH)模型,分析了不同均匀性网架结构下系统可靠性和网损的关系,通过多目标HSA求解DSH模型,给出了兼顾可靠性和均匀性的配电网重构方案最优解集。

在IEEE 33节点系统进行了测试,仿真结果表明:可靠性与网损在网架结构均匀性较差、节点最低电压较低时一致性较强;在网架结构均匀性较好、节点最低电压较高时一致性较弱;DSH模型求解算法能够实现系统可靠性和均匀性的统一,一次性得到配电网重构的最优方案集,供调度员根据不同的可靠性和网损要求做出合适的选择。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 刘健, 林涛, 赵江河, 等. 面向供电可靠性的配电自动化系统规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 52-60. LIU Jian, LIN Tao, ZHAO Jianghe, et al. Specific planning of distribution automation systems based on the requirement of service reliability[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 52-60.
- [3] 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. Reliability evaluation of distribution systems with meshed network based on the minimum-cut set[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 133-138.
- [4] 别朝红, 王秀丽, 王锡凡. 复杂配电系统的可靠性评估[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(8): 9-13.

- BIE Zhaohong, WANG Xiuli, WANG Xifan. Reliability evaluation of complicated distribution systems[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(8): 9-13.
- [5] BILLINTON R, WANG P. Reliability-network-equivalent approach to distribution-system-reliability evaluation[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(2): 149-153.
- [6] 张玉涛, 唐俊, 张明清, 等. 基于蒙特·卡罗方法的可靠性仿真过程模型研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(7): 1374-1377.
- ZHANG Yutao, TANG Jun, ZHANG Mingqing, et al. Research on reliability simulation process model based on Monte Carlo method[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(7): 1374-1377.
- [7] 丁明, 张静, 李生虎. 基于序贯蒙特卡罗仿真的配电网可靠性评估模型[J]. 电网技术, 2004, 28(3): 38-42.
- DING Ming, ZHANG Jing, LI Shenghu. A sequential Monte-Carlo simulation based reliability evaluation model for distribution network[J]. Power System Technology, 2004, 28(3): 38-42.
- [8] 余健明, 蔡利敏, 杨文字. 基于提高系统可靠性降低网损的配电网网络重构[J]. 电工技术学报, 2004, 19(10): 70-73.
- YU Jianming, CAI Limin, YANG Wenyu. Distribution network reconfiguration for system reliability improvement and power loss reduction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(10): 70-73.
- [9] 何禹清, 刘定国, 曾超, 等. 计及可靠性的配电网重构模型及其分阶段算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 56-60.
- HE Yuqing, LIU Dingguo, ZENG Chao, et al. Novel model and multistage algorithm for distribution network reconfiguration considering system reliability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 56-60.
- [10] 卫健, 吕林, 魏震波, 等. 计及可靠性因素的配电网多目标重构算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 71-75.
- WEI Jian, LÜ Lin, WEI Zhenbo, et al. Multi-objective reconstruction algorithm of distribution network considering the reliability factors[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 71-75.
- [11] TSAI L H. Network reconfiguration to enhance reliability of electric distribution systems[J]. Electric Power Systems Research, 1993, 27(2): 135-140.
- [12] 曹一家, 江全元, 丁理杰. 电力系统大停电的自组织临界现象[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 1-5.
- CAO Yijia, JIANG Quanyuan, DING Lijie. Self-organized criticality phenomenon for power system blackouts[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 1-5.
- [13] 潘智俊, 张焰, 祝达康, 等. 计及电网运行非均匀性的多目标输电网规划[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 53-58.
- PAN Zhijun, ZHANG Yan, ZHU Dakang, et al. Multi-objective transmission network planning considering grid-operational heterogeneity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 53-58.
- [14] 孙伟卿, 王承民, 曾平良, 等. 电力系统均匀性评价方法与指标综述[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1205-1212.
- SUN Weiqing, WANG Chengmin, ZENG Pingliang, et al. Review on evaluation method and index of power system homogeneity[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1205-1212.
- [15] 暴英凯, 王越, 唐俊熙, 等. 序贯蒙特卡洛方法在电力系统可靠性评估中的应用差异分析[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1189-1195.
- BAO Yingkai, WANG Yue, TANG Junxi, et al. Analysis on differences of applying sequential Monte Carlo methods in power grid reliability assessment[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1189-1195.
- [16] BILLINTON R, ALLAN R N. Reliability evaluation of power systems[M]. New York: Plenum Press, 1984: 400-422.
- [17] WANG Y, GUO C, WU Q H. A cross-entropy-based three-stage sequential importance sampling for composite power system short-term reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4254-4263.
- [18] 束洪春, 刘宗兵, 朱文涛. 基于图论的复杂配电网可靠性评估方法[J]. 电网技术, 2006, 30(21): 46-49.
- SHU Hongchun, LIU Zongbing, ZHU Wentao. A new method of reliability evaluation for complex distribution network based on graph theory[J]. Power System Technology, 2006, 30(21): 46-49.
- [19] SRINIVASA RAO R, NARASIMHAM S V L, RAMALINGA RAJU M, et al. Optimal network reconfiguration of large-scale distribution system using harmony search algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1080-1088.
- [20] BILLINTON R, JONNAVITHULA S. A test system for teaching overall power system reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1670-1676.

收稿日期: 2015-08-24; 修回日期: 2015-10-17

作者简介:

李志(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行风险评估与配电网重构; E-mail: lizhiee@zju.edu.cn

章禹(1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行风险评估与配电网重构;

暴英凯(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行风险评估与操作可靠性。

(编辑 魏小丽)