

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2018.2.159

中图分类号: TM73

文献标志码: A

基于支路交换和声搜索算法的配网重构

荣德生, 胡举爽, 韩淑敏

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 葫芦岛 125105)

摘要:采用标准和声搜索算法 HSA (harmony search algorithm) 进行配网重构时, 在搜索最优方案的过程中容易陷入局部最优, 且搜索结果受初始参数值的影响。为此, 引入结合启发式规则的支路交换法对新和声进行局部搜索, 生成第 2 个新和声, 增加了和声记忆库的多样性, 使得算法能够逃离局部最优, 进而提高了算法的全局搜索能力; 采用基于环路分解的编码方式对和声编码, 保证初始解集中每个和声都是可行解。采用 IEEE 33 节点系统进行算例分析, 与标准和声搜索算法、遗传算法进行对比分析, 结果表明该算法的收敛更迅速, 可以快速逃离局部寻优, 且寻优性能不受初始参数的影响, 验证了改进算法满足可实现性较高的寻优性能。

关键词:配网重构; 和声搜索算法; 环路分解; 支路交换法

Distribution Network Reconfiguration Based on Branch Exchange Harmony Search Algorithm

RONG Desheng, HU Jushuang, HAN Shumin

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: In the distribution network reconfiguration using a standard harmony search algorithm (HSA), the algorithm will easily be trapped by local optimums, and the searching results are also affected by the initial parameter values. To solve this problem, branch exchange method is introduced to the local search of a new harmony and further generate a second one, which increases the diversity of harmony memory and helps the proposed method jump out of local optimums, thus improving the global searching ability of the algorithm; the coding of harmony is realized using the encoding method based on loop decomposition, which ensures that every harmony in the initial solution set is a feasible solution. An IEEE 33-node system is adopted as a numerical example. Compared with the standard HSA and genetic algorithm, the proposed algorithm has a faster convergence speed, and it can quickly avoid falling into local optimums. Moreover, the optimization performance is not affected by the initial parameters. It is verified that the improved algorithm can realize a higher searching performance.

Keywords: distribution network reconfiguration; harmony search algorithm; loop decomposition; branch exchange method

配电网重构包含大量分段开关和少量联络开关^[1], 具有开环设计、闭环运行的特点。配网重构就是在满足某些条件约束的前提下, 对网络中这些开关的状态进行改变, 完成对原有网络结构的调整。试着找出一种较优的网络结构组合, 从而对配电系统中的潮流进行重新分布, 可以使网络运行参数得到优化。依据重构时配电系统所处的运行状

态, 可以分为正常运行时的网络重构 (distribution network reconfiguration)、故障情况下的重构或供电恢复 (service restoration)。前者是通过改变分段开关和联络开关的组合状态来改变网络的拓扑结构, 以改变网络中的潮流, 达到降低网损、提高电压质量和平衡负荷等目的, 也是本文主要研究对象; 后者是指故障后的隔离故障, 缩小停电范围, 达到迅速恢复供电的目的。

收稿日期: 2016-04-05; 修回日期: 2017-04-20

配网重构需要对网络中的大量开关进行组合

优化,因此配网重构是一个多目标非线性混合优化问题,在数学上是一个非确定多项式时间难(NP-hard)问题。实际配电系统规模大、分布广,三相不平衡问题比较突出,在实际操作中网络重构又要达到快速和全局最优的指标,因此,如何解决计算速度和寻优质量二者的矛盾,如何处理配电系统的不对称情况和不确定信息,都是网络重构所面临的难题。目前,适用于配电网进行优化重构的较为普遍的优化算法大致分为4类:数学优化理论方法、最优流模式^[2]OPF(optimal flow pattern)法、支路交换法BEM(branch exchange method)和人工智能算法。文献[3]将网络规划的最短路算法应用于配网重构中,利用最短路算法为每个负荷寻找供电路径,方便地形成了树形网络,由于该算法对寻优网络无特殊要求,因此可以容易地用于复杂网络的重构。虽然利用数学优化理论可以得到不依赖于配网初始结构的全局最优解,但存在严重的“维数灾”问题,计算时间较长,难以满足实际需要。结合启发式规则的最优流模式法和支路交换法,虽然能保证重构后配网的辐射性,并能达到降低损耗、平衡负荷的目的,但是计算处理速度较慢,且不能保证得到全局最优解,不适合复杂网络的重构。近年来人工智能的理论和方法在配电网自动化中的应用很广泛。文献[4]采用改进的自适应遗传算法进行配电网的恢复重构,根据含分布式电源的配电网的特点,利用基于环路的编码策略,减少表示孤岛的不可行解;文献[5]提出了一种改进的模拟退火算法,以当前最优解作为当前控制温度下的初始当前解,从而构造了一个单调递减的初始当前解序列,这一改进算法对参数的依赖性更加减小,降低了计算量。但人工智能算法普遍存在依赖初始参数选择和计算量大,容易产生不可行解和陷入局部最优的缺点^[6-8]。

针对标准和声搜索算法容易陷入局部最优和产生不可行解的问题,本文采用引入支路交换法的和声搜索算法,对新和声进行局部搜索,生成第2个新和声,增加了和声记忆库的多样性,使得算法能够逃离局部最优,进而提高了算法的全局搜索能力;采用基于环路分解的编码方式对和声编码,保

证初始解集中的每个和声都是可行解。

1 配网重构的数学模型

1.1 目标函数

配网重构是一个多目标、多约束的组合优化问题。本文在求解配电系统优化重构问题时,以配电网损和电压偏差最少为目标函数,通过给每个子目标函数赋予不同的权重系数并线性加权求和,使其化为单目标优化问题。用数学函数表示如下:

网络损耗为

$$f_1 = \sum_{l=1}^n r_l k_l \frac{P_l^2 + Q_l^2}{V_l^2} \quad (1)$$

式中: f_1 为目标函数; l 为支路编号; n 为网络支路总数; r_l 为支路电阻; k_l 为支路上开关状态变量,1为闭合状态,0为断开状态; V_l 为支路 l 末端节点电压; P_l 和 Q_l 分别为支路 l 注入的有功功率和无功功率。

节点电压是反映网络供电质量和供电可靠性的重要指标。节点电压偏差是指实际电压幅值与指定电压幅值的偏差,表示为

$$f_2 = \Delta V = \sum_{i=1}^{N_b} |V_i - V_{ref}| \quad (2)$$

式中: ΔV 为节点电压偏差; N_b 为网络节点数; V_i 为节点 i 上的电压幅值; V_{ref} 为指定电压幅值。

则综合优化目标函数为

$$\min f = \min (\lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x)) \quad (3)$$

式中, λ_1 、 λ_2 为权重系数, $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。

1.2 约束条件

1)等式约束条件

潮流方程为

$$P_i = P_{Di} + V_i \sum_{j=1}^{N_b} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (4)$$

$$Q_i = Q_{Di} + V_i \sum_{j=1}^{N_b} V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (5)$$

其中: P_i 、 Q_i 分别为节点 i 的输入有功功率、无功功率; P_{Di} 、 Q_{Di} 分别为节点 i 处负荷的有功功率和无功功率; V_i 、 V_j 分别为节点 i 、 j 的电压; G_{ij} 、 B_{ij} 和 δ_{ij} 分别

为节点 i, j 的电导、电纳和相角差。

2) 不等式约束

支路电流及节点电压约束为

$$\begin{cases} V_{j\min} \leq V_j \leq V_{j\max} \\ I_i \leq I_{i\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $V_{j\min}$ 、 $V_{j\max}$ 为节点 j 电压的上下限值; I_i 为流经支路电流值; $I_{i\max}$ 为流经支路 i 的电流上限值。

3) 网络拓扑结构约束

保持配电网放射状运行的结构特征, 重构后不应有孤岛存在。

4) 开关操作次数限制

为延长开关使用寿命, 尽量减少配网重构过程中开关重复操作的次数。

2 支路交换和声搜索算法

2.1 HSA 简介

标准和声搜索算法 HSA (harmony search algorithm) 最早是以 Geem 等音乐人即兴演奏最优美和声为理论依据提出的。算法模拟了音乐创作中乐师们凭借自己的记忆, 通过反复调整乐队中各乐器的音调, 最终达到一个美妙的和声状态的过程^[9]。HSA 将乐器声调的和声类比于优化问题的解向量, 评价即是各对应的目标函数值。文献[10]对演奏者弹奏音乐的过程和工程寻优迭代过程进行了对比, 解释了二者的内在联系, 即音乐人进行演奏的乐器对应工程问题中的决策变量, 弹奏乐器的音调对应决策变量的值域。每种乐器演奏出的音调组合层整体形成一个和声, 类似目标函数值对应的变量。音乐家通过一次次的演奏练习发现最美和声, 相应地, 多个决策变量构成一个解向量, 计算出解向量对应的目标函数值, 比较并将较优解存储在解集中, 继续完成工程寻优。和声搜索算法的参数分析如下。

和声记忆库大小 HMS (harmony memory size) 表示有 HMS 个个体存储在 HM 中。HMS 较大时有利于提高算法的全局寻优性能, 但同时会因计算繁杂降低算法的寻优效率; HMS 过小则无法保证提供充足的采样从而降低算法的寻优性能。

音调微调概率 PAR (pitch adjusting rate) 的值域为 $0 \leq \text{PAR} \leq 1$ 。减小 PAR 值会导致算法极易陷入局部寻优搜索; 增大 PAR 值能够减少 HSA 极易收敛于局部寻优的概率。

和声记忆库取值概率 HMCR (harmony memory considering rate) 的值域是 $0 \leq \text{HMCR} \leq 1$ 。一般情况下选取较大的 HMCR 值, 即 $0.9 \leq \text{HMCR} \leq 1$ 。

迭代次数 NI (iteration number) 指算法迭代次数, 即算法进行工程寻优时的迭代停止标准。

2.2 支路交换 HSA 简介

通过分析算法参数的意义发现, HSA 是基于 HMCR、PAR、HMS 等参数取值的智能优化方法, 其寻优效果对参数值具有很大的依赖性。所以, 在和声搜索算法的寻优过程中, 如果参数选取不合理, 将会导致算法收敛性能差、极易陷入局部最优等。为了降低算法寻优结果对初始参数的依赖性, 弥补 HSA 局部寻优的不足, 本文采用快速支路交换法进行局部寻优搜索, 并且把算法局部搜索产生的新解经过适应度函数值的计算比较, 参与和声记忆库的更新。快速支路交换法在网络重构时忽略对潮流分布的计算, 进而加快了算法的运算速率。通过比较最佳转移负荷的数值和正负号对单环路的最大降损开关进行判别, 极大地缩小了搜索范围。

根据适应度函数值 (适应度值) 来判定算法的寻优方向, 同时规定目标函数的优化方向与适应度值增加的方向是一致的。适应度值在和声搜索算法中作为区别和声记忆库中和声好坏的标准, 反映和声能够达到或者接近最美和声状态 (全局最优方案) 的优良程度, 同时也是更新 HM 的重要依据。

通常把优化问题的目标函数作为最常用的适应度函数, 适应度函数表示为

$$F = \frac{1}{1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{F_1^2 + F_2^2}} \quad (7)$$

式中: F_1 为网络损耗指标; F_2 为节点电压偏差指标。

2.3 算法流程

基于支路交换的 HSA 在配网重构中的实现流程如图 1 所示。算法应用的实现步骤如下。

步骤 1 输入配电网的基本数据。

步骤 2 设置算法参数。设置初始解集的规模 M 、和声编码的长度 L 、最大迭代次数 NI 、 $HMCR$ 、 HMS 和 PAR 。

步骤 3 采用基于环路分解的编码方式对开关进行编码，并且产生由 M 个个体组成的初始解集 Q ，完成对初始和声解集的初始化。

步骤 4 采用基于支路电流的前推回代法求解配电系统中的潮流分布，并记录各支路的有功和无功功率。

步骤 5 计算初始解集中个体的适应度值的大小，对适应度函数值排列时遵照降序原则，选出排在前 HMS 的和声，存入和声记忆库 HM ，初始化和声记忆库。

步骤 6 按照标准 HS 搜索算法即兴创作第 1 个新和声，采用结合启发式规则的支路交换法进行局部搜索生成第 2 个新和声。

步骤 7 求解新生成和声的适应度函数值并对其判断。当比 HM 中最差和声更优时，则用新和声替换 HM 中的最差和声，并将新和声存放至 HM 内；否则，保持 HM 中原有的和声不变。

步骤 8 校验是否达到算法寻优时设定的迭代运算的终止条件。当计算的迭代计数个数达到 NI 时，则终止运算过程；否则，继续重复步骤 5~7。

3 算例分析

图 2 为 IEEE33 节点系统的网架，总负荷为 3 715 kW+j2 300 var，基准功率值为 10 MVA。网络中包含 33 个节点、37 条支路和 5 个联络开关，实线为网络中分段开关的所在位置，虚线为网络中联络开关所在的位置。为了验证本文方法的有效性与其可行性，分别用本文方法、文献[9]标准和声搜索算法和文献[11]遗传算法对上述配电网进行网络重构。

根据本文基于环路分解的编码方式，设置和声编码长度 $L=5$ 、 $M=50$ 、 $HMS=10$ 、 $HMCR=0.9$ 、 $PAR=0.4$ 、 $NI=50$ ，目标函数中 $\lambda_1=0.6$ 、 $\lambda_2=0.4$ 。

重构前（图 2），IEEE 33 节点配电系统中支路 8-21、9-15、12-22、18-33 和 25-29 是处于断开状态的，系统的有功损耗为 202.66 kW，节点最低电压为 0.913 1p.u.（节点 18 处）。在 MATLAB2012a 的语言环境下，运用本文算法对此网络重构后（如图 3），

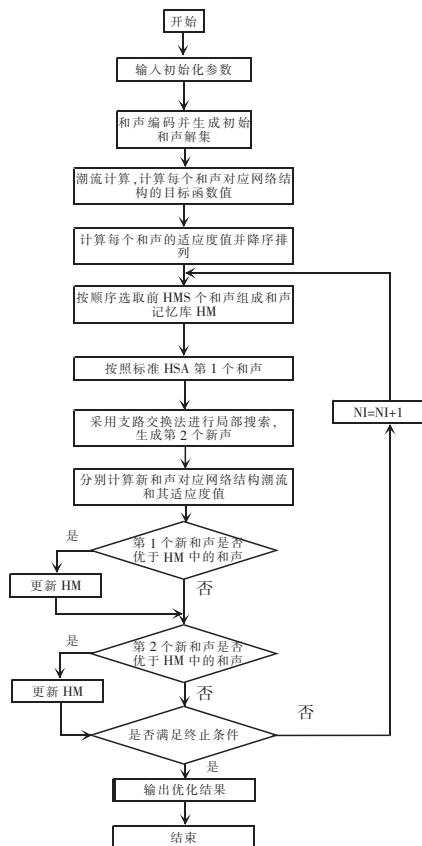


图 1 支路交换 HSA 的配网重构流程

Fig.1 Flow chart of distribution network reconfiguration based on branch exchange HSA

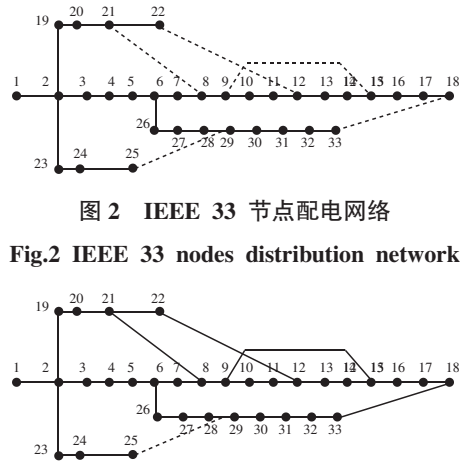


图 2 IEEE 33 节点配电网

Fig.2 IEEE 33 nodes distribution network

图 3 重构后的 IEEE 33 节点配电系统结构

Fig.3 Structure of the IEEE 33 nodes distribution system reconstruction

网络中断开的支路为 7-8、9-10、14-15、25-29 和 32-33(为最优结构),此时系统有功损耗是 139.50 kW,

最低电压为 0.938 0 p.u.(节点 32 处)。重构对比分析结果见表 1。

表 1 IEEE 33 节点配电网重构后的对比结果

Tab.1 Comparison results of IEEE 33 nodes distribution network reconstruction

算法	断开的支路	网络的有功损耗/kW	最低节点电压(p.u.)	目标函数	重构时间/s
重构前	8-21,9-15,12-22,18-33,25-29	202.66	0.913 1(18)	-	-
文献[9]	7-8,9-10,14-15,32-33,25-29	139.50	0.937 8(32)	0.109 2	6.4
遗传算法 ^[11]	7-8,9-10,14-15,32-33,25-29	142.34	0.931 5(32)	0.112 8	10.5
本文算法	7-8,9-10,14-15,32-33,25-29	139.50	0.938 6(32)	0.108 3	7.2

为了验证本文算法的寻优效率,连续测试本文算法和文献[9]、文献[11]算法各 100 次,将算法性能指标进行对比分析。为了比较算法的全局收敛性,定义全局寻优率 η 为

$$\eta = \frac{R_B}{R_N} \times 100\% \quad (8)$$

式中: R_B 为得到全局最优结果的次数; R_N 为总运行次数。

算法性能比较如表 2 所示。由表 1 和表 2 可知,对于 IEEE 33 节点系统,本文方法得到全局最优结果所需的最小、最大和平均迭代次数分别为 2 次、190 次和 84 次。相比文献[9]的标准 HS 算法和文献[11]遗传算法,本文算法的迭代次数明显要小,且全局寻优率达到 99%,远远高于文献[9]标准 HS 算法的 21%。由此可知,本文算法收敛性要优于文献[9]标准 HS 算法,并且全局寻优率也更高。这是因为通过引入结合启发式规则的支路交换法进行“局部搜索”,局部搜索和全局搜索相结合能使算法有效逃离局部最优,并改善算法的全局收敛性能,所以本文算法的收敛速率较快,全局最优解的搜寻性能更高、更好。和文献[11]中的遗传算法性能比

较,本文算法稳定性更高,收敛速度也更快。另外,对于 IEEE 69 节点系统,利用本文算法得到最优结果所需的最小、最大和平均迭代次数分别为 2 次、198 次和 106 次,与 IEEE 33 节点系统相近,故本文算法稳定性好,收敛速度不随节点规模变大而变差。

在 IEEE 33 节点配电网重构前后的电压分布如图 4 所示。从图 4 及表 1 可知,仿真结果表明,采用本文算法得到的网损和目标函数值最低,节点电压偏差最小,由 202.66 kW 减少到 139.50 kW,比初始网络网损减少 31.2%,提高了配电网运行的经济性;最低节点的电压从 0.913 1 p.u.上升至 0.938 6 p.u.,改善了配电网中各个节点的电压分布情况,提高了供电电压的质量。

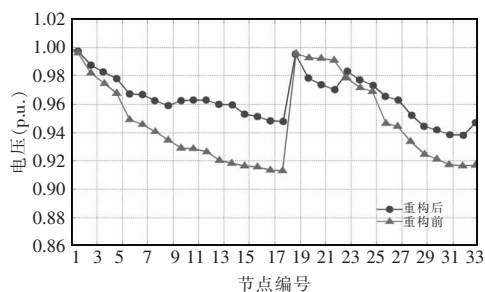


图 4 电压分布

Fig.4 Distribution of voltage

表 2 算法性能比较

Tab.2 Comparison of performance among different algorithms

重构算法	全局最优	全局最优	全局最优	全局寻优率/%
	最少迭代次数	最大迭代次数	平均迭代次数	
本文	2	190	84	99
文献[9]	78	>200	160	21
文献[11]	45	>200	189	-

4 结语

针对标准和声搜索算法容易陷入局部最优和产生不可行解的问题,本文采用引入支路交换法和声搜索算法,对新和声进行局部搜索,生成第 2 个新和声,增加了和声记忆库的多样性,使得算法能够逃离局部最优,进而提高了算法的全局搜索能

力。采用本文算法对典型 IEEE33 节点配电网进行了重构,结果表明,引入支路交换的和声搜索算法并利用启发式规则指明有效搜索方向,缩小了重构的寻优范围,增大了有效解的概率,提高了算法的搜索效率,具有良好的寻优性,且不受初始参数值的影响,搜索性能不随网络规模的扩大而变差,是求解配网重构问题的一种较好算法。通过比较重构前后的结果,发现最低节点电压得到升高,改善了系统的供电质量;网络的损耗有效降低,减少了网络运行的成本。

但本文算法中,虽然加入局部搜索提高了算法的寻优性能,但同时也延长了算法运行时间,对此还需继续改进。另外,本文主要针对配电系统正常运行时的重构问题进行了探究,而对于配电系统处于故障状态时如何优化重构网架,从而达到快速恢复供电的效果的问题有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 刘健,毕鹏翔,董海鹏. 复杂配电网简化分析与优化[M]. 北京:中国电力出版社, 2002.
- [2] 邓佑满,张伯明,相年德. 配电网重构的改进最优流模式算法[J]. 电网技术, 1995, 9(7):47-50.
Deng Youman, Zhang Boming, Xiang Niande. An improved optimal flow pattern algorithm for distribution network reconfiguration[J]. Power System Technology, 1995, 19(7):47-50(in Chinese).
- [3] 余贻鑫,段刚. 基于最短路算法和遗传算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9):45-50.
Yu Yixin, Duan Gang. Shortest path algorithm and genetic algorithm based distribution system reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9):45-50(in Chinese).
- [4] 胡雯,孙云莲,张巍. 基于改进的自适应遗传算法的智能配电网重构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23):85-90.
Hu Wen, Sun Yunlian, Zhang Wei. Reconfiguration of smart distribution using improved adaptive genetic algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 85-90(in Chinese).
- [5] 胡敏姜,陈元. 配电系统最优网络重构的模拟退火算法[J]. 电力系统自动化, 1994, 18(2):24-28.
Hu Minyou, Chen Yuan. Simulated annealing algorithm of optimal reconstruction in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18(2):24-28(in Chinese).
- [6] Das D. A fuzzy multi-objective approach for network reconfiguration of distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1):202-209.
- [7] 葛少云,刘自发,余贻鑫. 基于改进禁忌搜索的配电网重构[J]. 电网技术, 2004, 28(23):22-26.
Ge Shaoyun, Liu Zifa, Yu Yixin. An improved Tabu search for reconfiguration of distribution systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(23):22-26(in Chinese).
- [8] Irving M R, Luan W P, Daniel J S. Supply restoration in distribution networks using a genetic algorithm[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24(6):447-457.
- [9] Geem Z W, Kim J H, Loganathan G V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search[J]. Simulation Transactions of the Society for Modeling & Simulation International, 2001, 76(2): 60-68.
- [10] Mahdavi M, Fesanghary M, Damangir E. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems[J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 188(2):1567-1579.
- [11] 邓永生. 遗传算法在配电网重构中的应用研究[D]. 重庆:重庆大学, 2002.



荣德生

作者简介:

荣德生(1975-),男,博士研究生,副教授,研究方向:电气传动系统自动化技术,现主要从事煤矿自动化技术与安全技术的科研工作,E-mail:345178299@qq.com

胡举爽(1990-),男,通信作者,硕士研究生,研究方向:配电网重构、规划与可靠性,E-mail:1403436227@qq.com。

韩淑敏(1990-),女,硕士,研究方向:智能控制与故障诊断技术,E-mail:3143482517@qq.com。