

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180889

有源配电网重构与多级无功联动优化

叶学顺, 何开元, 刘科研

(中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 优化控制策略是提升分布式电源消纳能力的核心技术, 也是有源配电网安全、经济、高效、优质运行的重要保障。为解决分布式电源接入后引起的潮流分布剧变、电压抬升、源荷分布不均衡等问题, 提出了配电网拓扑重构以及有载调压器、补偿电容器等多级无功调节设备联动优化策略, 建立了含网损、负荷均衡以及节点电压偏差的多目标综合优化模型。通过参数自适应动态调节及变维数和声记忆库机制, 提出了改进型多目标和声搜索算法对优化模型进行求解, 大幅提高算法收敛速度与寻优能力。在 IEEE 33 节点算例中进行了多个场景的测试验证, 并将改进型多目标和声搜索算法与多目标和声搜索算法、基本和声搜索算法进行了比较, 结果表明模型和算法的有效性。

关键词: 有源配电网; 重构; 无功; 联动优化; 改进型多目标和声搜索算法

Network reconfiguration and multi-level reactive power coordination optimization in active distribution network

YE Xueshun, HE Kaiyuan, LIU Keyan

(China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: Optimal control strategy is one of the key technologies to improve the consumptive ability of distributed generations, which is also an important guarantee of safety, economy, efficiency and high quality during the operation of active distribution network. To solve the problems caused by high penetration of distributed generations, such as power flow direction change, voltage uplift, load unbalance, etc., this paper proposes a coordination optimization strategy which combines topology reconfiguration and multi-level reactive power compensation devices (under-load tap changer, bus capacitor, and feeder capacitor). A multi-objective optimization model based on active power loss, load balancing index and voltage deviation index is established. Through parameter adaptive adjustment and harmony memory library dynamic modification method, an improved multi-objective harmony search algorithm is proposed to solve this optimization model, which can greatly improve convergence speed and optimization ability of the algorithm. A number of experiments with IEEE 33 node test systems in different cases and scenarios are carried out, the computation speed and optimization performance of improved multi-objective harmony search algorithm and multi-objective harmony search algorithm, basic multi-objective harmony search algorithm are compared. The results show that the model and algorithm are feasible and effective.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. PD71-18-001) "Technical Research of Complex Distribution Network Modelling and Digit-mode Hybrid Simulation based on Cyber Physical Systems".

Key words: active distribution network; reconfiguration; reactive power; coordination optimization; improved multi-objective harmony search algorithm

0 引言

能源短缺、环境污染等问题促进了可再生能源发电技术迅猛发展, 对配电网提出了接纳可再生能

源发电的新要求^[1-2]。大量、高密度的分布式电源(Distributed Generation, DG)接入改变了原有配电网结构, 会使配电系统的网损、电压分布、电压稳定性、故障特性等发生变化^[3-4]。

近年来, 国内外针对有源配电系统优化运行进行了大量研究。文献[5]以网损最小为目标, 提出采用联络开关和智能软开关并存的配电网运行优化方

基金项目: 国家电网公司科技项目(PD71-18-001)“基于信息物理系统的复杂配电网建模与数模混合仿真技术研究”

法;文献[6]考虑分布式电源出力、储能装置充放电功率、电容器阻投切等,采用混合整数二阶锥规划方法,提出了主动配电网有功-无功协调方法;文献[7]基于模糊蚁群算法,提出了配电网重构与静止同步补偿器、光伏电源协调配置方法;文献[8]考虑网损、电压偏差和谐波畸变率等多目标,采用帕累托解集改进蛙跳算法实现了多目标配电网重构的快速计算,但是未考虑大量分布式接入的情形。文献[9]提出一种快速非支配性排序的遗传算法提升了配电网多目标重构的效率。文献[7]以提高风力和光伏两种不同类型的 DG 接纳能力为目标,提出了基于遗传算法配电网动态重构方法。这些研究多是在考虑无功调节与网络重构的基础上对有源配电网的运行指标进行优化提升或采用智能软开关的动态重构,但是,针对大量高密度 DG 接入配电网,另一种更具现实意义的思路是考虑在不增加大量新设备投资的情况下,如何利用重构与多级无功补偿设备对配电网运行能力进行优化与提升。

针对多目标优化问题的求解,主要求解算法包括遗传算法、粒子群算法、蚁群算法等进化方法^[10-12],以及内点法、序列二次规划等解析法^[13-15]。智能算法在求解配电网多目标问题时容易早熟、陷入局部最优等突出问题;解析法计算结果准确,但是计算量巨大、耗时长。有源配电网重构与无功联动优化编码变量包括重构开关量、有载调压器(Under Load Tap Changer, ULTC)分接头、母线与馈线电容器投切量等,变量数目大、维数高,针对这种情况,本文采用改进型和声搜索(Improved Multi-Objective Harmony Search, IMOHS)算法进行求解,有效提高了高维多变量多目标优化过程中的收敛性、计算速度。

本文针对高渗透率的有源配电网,采用配电网重构与多级无功联动方法,以运行网损、电压偏差、馈线负荷平衡度指标最小为目标,建立有源配电网运行能力提升的多目标优化模型;同时,从提升算法收敛性与计算速度的角度出发对基础和声搜索算法进行改进,并将其用于所建立的多目标优化模型的求解。在 IEEE 33 节点中进行了仿真实验,验证了模型和算法的有效性。

1 联动优化模型

本文从 DG 接入配电网运行的经济性、“源-荷”均衡程度和电压抬升方面考虑,选取有功网损值、负载均衡度、节点电压偏差作为优化目标。将有源配电网重构中开关动作与电容器组位置和容量配置问题转化为多目标组合优化数学问题。

1.1 目标函数

1) 网损

以配电网运行线路上的有功损耗最小为优化目标之一,表达式为

$$F_{\text{loss}}(x) = \min \sum_{(i,j) \in N} g_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (1)$$

式中: $i, j \in [0, N]$, N 为网络中节点总数; g_{ij} 为第 k 条线路的电导值; V_i 、 V_j 分别为节点 i 、 j 的电压值; θ_{ij} 为节点 i 、 j 的电压相位差。

2) 负荷均衡度指标

E. G. Carrano 等人在 2006 年提出负荷均衡指标(System Load Balancing Index, SLBI)^[16]来度量配电网中负荷均衡程度。该目标函数的表达式为

$$F_{\text{lb}}(x) = \min \frac{1}{N_b} \sum_{k=1}^{N_b} \frac{S_k}{S_k^{\text{max}}} \quad (2)$$

式中: S_k 为馈线 k 送端视在功率; S_k^{max} 为馈线 k 的最大允许视在功率; 当配电网中负荷总量一定时,当负荷功率沿线路分布不均匀时, F_{lb} 值会变大。因此, F_{lb} 越小,表明负荷分布越均匀。

3) 节点电压偏差

节点电压偏差指标(Node Voltage Deviation Index, NVDI)是评估系统安全稳定与电能质量的重要指标。节点电压波动、升高等问题时影响分布式电源接入配电网渗透率的主要因素之一,降低节点电压偏差水平可有效提高含分布式电源配电网运行工况,最大限度实现分布式电源的消纳。目标函数可表示为

$$F_{\text{sv}}(x) = \min \sum_{k=1}^{N_b} \left| \frac{V_i - V^{\text{rated}}}{V^{\text{max}} - V^{\text{min}}} \right| \quad (3)$$

式中: V_i 是节点 i 电压幅值; V_i^{rated} 为节点 i 电压的额定值; V^{max} 、 V^{min} 为节点电压的最大、最小值; N 为网络中的节点数。

1.2 约束条件

1) 潮流平衡约束

$$\begin{cases} P_{\text{DG}i} - P_{\text{d}i} = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{\text{DG}i} - Q_{\text{d}i} - Q_{\text{c}i} = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{\text{DG}i}$ 、 $Q_{\text{DG}i}$ 为节点 i 接入的分布式电源的有功功率和无功功率; $P_{\text{d}i}$ 、 $Q_{\text{d}i}$ 为节点 i 处负荷的有功值和无功值; $Q_{\text{c}i}$ 为无功补充电容器投入容量; G_{ij} 、 B_{ij} 为线路 ij 导纳的实部和虚部。

2) 拓扑结构约束

$$g \in G \quad (5)$$

式中: g 为重构之后的网络拓扑结构; G 为所有可

行的拓扑结构集合。本文中约定重构后配电网网络呈辐射状结构, 且不含孤岛。

3) 节点电压约束

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, i \in [0, N] \quad (6)$$

式中: V_i 为节点 i 的电压; V_i^{\min} 、 V_i^{\max} 为节点 i 电压上、下限值; N 为节点数。

4) 支路传输能力约束

$$I_k \leq I_k^{\max}, k \in [0, N_b] \quad (7)$$

式中: I_k 为馈线支路 k 的流过的电流; I_k^{\max} 为馈线支路 k 允许流过电流的最大值; N_b 为馈线总数。

5) 电容器投切容量约束

$$\begin{cases} Q_{cs}^{\min} \leq Q_{c,m} \leq Q_{cs}, m \in [0, N_{cs}] \\ Q_{cf}^{\min} \leq Q_{c,n} \leq Q_{cf}, n \in [0, N_{cf}] \end{cases} \quad (8)$$

式中: $Q_{c,m}$ 为母线电容器组 m 的投入容量; N_{cs} 为母线电容器组数; Q_{cs}^{\min} 、 Q_{cs}^{\max} 分别为母线电容器组 m 投入容量的上、下限值; $Q_{c,n}$ 为馈线电容器组 n 的投入容量, N_{cf} 为电容器组数; Q_{cf}^{\min} 、 Q_{cf}^{\max} 分别为电容器组 n 投入容量的上、下限值。

1.3 多目标优化处理

上文所提出的多目标函数优化模型可以表示为

$$F = \min \{F_{\text{loss}}(g, r), F_{\text{lb}}(g, r), F_{\text{sv}}(g, r)\} \quad (9)$$

式中: g 为配电网重构策略; r 为电容器组配置方案; F_{loss} 、 F_{lb} 、 F_{sv} 分别代表网损、负荷均衡度、节点电压偏差等子优化目标。针对多目标优化模型的处理上, 本文采用 IMOHS 进行求解, 最大限度的保持各个优化目标的独立性, 得到 Pareto 解集, 避免了权衡设置的难题。约束条件中, 潮流平衡约束通过潮流计算方程进行保证, 重构后网络的拓扑约束通过检查是否满足辐射状和无孤岛条件进行保证。节点电压、支路功率约束和电容器组容量约束通过引入惩罚因子, 以罚函数的形式加入到适应度评价函数中。经过处理后, 可得

$$\min F = F + \lambda_1 \Delta V_v + \lambda_2 \Delta S_v + \lambda_3 \Delta Q_{cs} + \lambda_4 \Delta Q_{cf} \quad (10)$$

式中: λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 分别各约束条件的惩罚系数; ΔV_v 、 ΔS_v 、 ΔQ_{cs} 、 ΔQ_{cf} 分别为节点电压偏差、支路功率、电容器组容量超出阈值的惩罚项, 可由以下公式计算。

$$\Delta V_v = \max \left\{ \frac{V_i^{\min} - V_i}{V_i^{\max} - V_i^{\min}}, 0, \frac{V_i - V_i^{\max}}{V_i^{\max} - V_i^{\min}} \right\} \quad (11)$$

$$\Delta S_v = \max \left\{ \frac{S_i^{\min} - S_i}{S_i^{\max} - S_i^{\min}}, 0, \frac{S_i - S_i^{\max}}{S_i^{\max} - S_i^{\min}} \right\} \quad (12)$$

$$\Delta Q_{cs} = \max \left\{ \frac{Q_{cs}^{\min} - Q_{cs}}{Q_{cs}^{\max} - S_{cs}^{\min}}, 0, \frac{Q_{cs} - Q_{cs}^{\max}}{Q_{cs}^{\max} - Q_{cs}^{\min}} \right\} \quad (13)$$

$$\Delta Q_{cf} = \max \left\{ \frac{Q_{cf}^{\min} - Q_{cf}}{Q_{cf}^{\max} - S_{cf}^{\min}}, 0, \frac{Q_{cf} - Q_{cf}^{\max}}{Q_{cf}^{\max} - Q_{cf}^{\min}} \right\} \quad (14)$$

2 求解方法

2.1 有源配电网结构化简

由于实际配电网多分段、多连接的特点, 往往规模比较大、馈线数目较多, 相应的作为优化变量的支路开关与联络开关数也较多, 若采用变量随机优化的方法, 会使得编码数量较大, 同时由于重构前后网络结构的辐射性与连通性约束, 使得随机优化过程中会产生大量的无效解。本文采用网络结构化简方法, 使得计算规模大大较低, 处理方法如下所述。

步骤 1: 首先闭合配电网中所有的开关(包括联络线开关), 得到待重构网络 G_0 ;

步骤 2: 将不在任何环路上的支路删除, 得到网络 G_1 ;

步骤 3: 记录网络 G_1 中每一组环路。

经过上述 3 步的操作, 将原始网络化简为多个以环为基础的网络结构, 以每个环单独进行一组编码, 由于重构前后网络结构辐射性和连通性约束, 因此寻优过程中采用如下变量变化规则:

规则 1: 每个环中运行随机开断一个开关;

规则 2: 环间公共支路只允许断开一个开关。

2.2 拓扑结构约束处理

配电网结构拓扑校验与检查主要是从供电的可行性考虑, 配电网重构可行方案必须满足:

① 拓扑结构中为辐射状; ② 重构后网络连通。

由于本文所采用网络结构化简方法和相对应的优化变量变化规则保证了重构前后网络结构的辐射性要求, 因此还需要进一步保证重构后网络的连通性要求, 连通性校验策略如下所述。

基于图论, 假设配电网重构后的邻接矩阵为 L , 如公式(15)所示。当节点 $i, j(i, j \in [0, N])$ 彼此连通时, $L_{ij}=1$; 否则 $L_{ij}=0$ 。无向图关联矩阵中, 每行元素之和称为该节点的度, 表示了该节点与其他节点的连接紧密程度。显然, 没有与任何节点相连的节点的度为 0, 网络末端和首端的节点的度为 1, 其余节点的度均大于等于 2。

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{1N} \\ L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ L_{N1} & L_{N2} & \cdots & L_{NN} \end{bmatrix} \quad (15)$$

网络图连通性判别方法如下:

1) 根据网络图的连接关系生成关联矩阵 L , 统计其所有节点的度, 检查是否有度为 0 的节点, 若

有,说明存在孤立节点,即判定网络图不连通;

2)若步骤1)中不存在孤立节点,则逐个删除网络中所有度为1的节点,即删除节点对应的行与列。每删除一个节点,再检查是否存在孤立点;

3)重复步骤2)直至网络的维度降到2,此时只剩下一条支路,2个节点度均为1,若仍然没有孤立节点,则可以判定网络图连通,否则,判定网络图不连通,存在孤岛。

以图1中算例进行说明, L 为重构后网络图的关联矩阵,执行步骤1),没有度为0的节点。

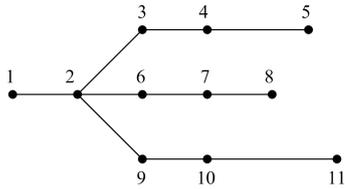


图1 连通性判断算例

Fig. 1 Connectivity judgment example

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$L^{(1)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

执行步骤2), L 中度为1的行为1、5、8、11,将这些节点对应的行列逐个剔除,剩余的关联矩阵为 $L^{(1)}$ 。剩余关联矩阵 $L^{(1)}$ 中不存在度为0的孤立节点,则继续执行步骤2),删除度为1的节点所在的行、列,如此收缩下去,最后将收缩为一个二节点的系统。而这个系统的两个节点度均为1,根据步骤3),判断网络图连通,不存在孤岛。

3 多目标和声搜索算法的改进研究

3.1 基本和声搜索算法

和声搜索(Harmony Search, HS)算法是Geem.Z.W等人提出的一种优化算法,该算法吸收

了随机优化方法诸多优点^[17-20]。

音乐演奏中通过创作和声达到最佳演奏音效,和声搜索是从该过程中抽象出来的启发式全局搜索算法。算法中,首先随机生成HMS个和声元素并放入和声记忆库(Harmony Memory, HM)中。和声记忆库HM中元素的初始化规则为

$$x_i^j = x_{i,\min} + (x_{i,\max} - x_{i,\min}) \times \text{rand}(0,1) \quad (18)$$

式中: x_i^j 为第 j 维的第 i 个决策变量; $x_{i,\min}$ 、 $x_{i,\max}$ 分别是第 i 个变量取值的下、上限值。

优化搜索过程中,以概率HMCR保留和声记忆库HM中的解分量作为新和声,以概率1-HMCR在和声变量值上、下限范围内按照初始化规则随机生成新解。同时,对保留下来的和声,以音调微调概率PAR判断是否需要进行调整,调整的带宽为BW,调整规则如下

$$x_i^j = x_i^j \pm BW \times \text{rand}(-1,1) \quad (19)$$

通过适应度函数值的大小判断产生的新解是否优于HM中的最差解,如果是,则用新和声向量替换最差适应度函数值的和声向量。重复以上步骤直到满足终止条件,得出优化结果。

3.2 多目标和声搜索算法的改进

本文将非支配排序策略与帕累托 Pareto 解集引入到基本和声搜索算法中,形成多目标和声搜索算法。同时,针对基本和声搜索算法在求解高维多变量优化问题时全局搜索能力不足、计算速度慢等问题,通过对算法参数HCMR、PAR、BW的动态自适应调节改进以提升性能:

$$\begin{cases} HMCR(i) = HMCR_{\min} + \frac{(HMCR_{\max} - HMCR_{\min}) \cdot i}{NI} \\ PAR(i) = PAR_{\max} - \frac{(PAR_{\max} - PAR_{\min}) \cdot i}{NI} \\ BW(i) = BW_{\max} \cdot e^{\frac{(\lg \frac{BW_{\min}}{BW_{\max}}) \cdot i}{NI}} \\ HMS(i) = HMS_{\max} + \text{round} \left[\frac{(HMS_{\max} - HMS_{\min}) \cdot i}{NI} \right] \end{cases} \quad (20)$$

式中: $HCMR(i)$ 、 $PAR(i)$ 、 $BW(i)$ 、 $HMS(i)$ 分别表示第 i 次迭代时使用的和声记忆库保留概率、记忆库扰动概率、扰动带宽、和声记忆库HM容量; $HMCR_{\min}$ 、 $HMCR_{\max}$ 分别表示和声记忆库保留概率的最小、最大取值; PAR_{\min} 、 PAR_{\max} 分别表示和声记忆库扰动概率的最小、最大取值; PAR_{\min} 、 PAR_{\max} 分别表示和声记忆库扰动概率的最小、最大取值; HMS_{\max} 、 HMS_{\min} 分别表示HM容量最大、最小值; $ITER$ 表示最大迭代次数。

通过上述(1)、(2)中的改进后, HMCR、PAR、BW、HMS 均随着迭代次数的增加按照一定规则进行动态调整, 这样改进的效果是: 在新和声生成的初期, 和声记忆库保留概率较小, 而扰动概率、扰动带宽较大, 同时和声记忆库内存 HMS 也较大, 最优解很容易加入和声内存中, 全局搜索面积相对较大, 保证了较强的寻优能力; 随着迭代次数增加, 和声记忆库中的和声越来越逼近最优解, 此时逐步增大和声记忆库的保留概率, 减小扰动概率、带宽, 同时和声记忆库内存 HMS 也逐步减少, 算法收敛速度得到提升, 计算性能提高。改进后, 实现了变参数动态寻优, 在收敛速度和精度之间取得平衡。

3.3 采用 IMOHS 算法的优化求解过程

针对有源配电网重构与无功联动多目标优化模型, 采用 IMOHS 算法求解。

Step 1: 初始化参数

初始化的参数包括迭代次数 ITER 和声记忆库内存 HMS、保留概率 HMCR、扰动概率 PAR、带宽 BW。根据对控制变量进行编码并按照式(20)生成初始和声, 此时的和声记忆库 HM 为

$$HM = \begin{bmatrix} x_{L,1}^1, \dots, x_{L,N_B}^1, x_{ULTC}^1, x_{C,s}^1, \dots, x_{C,f}^1 \\ x_{L,1}^2, \dots, x_{L,N_B}^2, x_{ULTC}^2, x_{C,s}^2, \dots, x_{C,f}^2 \\ \vdots \\ x_{L,1}^{HMS}, \dots, x_{L,N_B}^{HMS}, x_{ULTC}^{HMS}, x_{C,s}^{HMS}, \dots, x_{C,f}^{HMS} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中: $x_{L,j}^j$ 表示第 j 个 ($j \in [0, HMS]$) 和声向量中第 i 个配电系统开关的状态变量; x_{ULTC}^j 为 ULTC 投入档位变量; $x_{C,s}^j$ 表示母线电容器的投入容量; $x_{C,f}^j$ 表示馈线电容器的投入容量。

Step 2: 计算适应度值, 生成 Pareto 解集

根据和声记忆空间 HM 中各个和声的音调, 计算各个目标函数的适应度值; 根据适应度值的大小, 将 HM 中各个和声进行非支配排序, 其中, 位于第 1 层级内的和声被保存在 Pareto 解集中, 其他层级的和声被保留在 HM 中。

Step 3: 创作新和声

从 Pareto 解集中随机选择一个非支配和声 x^{nd} , 再从和声存储空间中随机选择一个被支配和声 x^d , 以概率 HMCR 创作新和声, 以概率 $1-HMCR$ 在和声变量值上、下限范围内按照初始化规则随机生成新解, 该规则如下:

$$\begin{cases} x_i^{new} = x_i^{nd} + \text{rand}(0,1) \times (x_i^{nd} - x_i^d) & \text{if } r < HMCR \\ x_i^{new} = x_i^{min} + \text{rand}(0,1) \times (x_i^{max} - x_i^{min}) & \text{if } r \geq HMCR \end{cases} \quad (22)$$

式中, r 表示 0~1 之间的随机数。对以概率 HMCR 创作新和声, 以音调微调概率 PAR 判断是否需要进行调整, 调整的带宽为 BW, 调整规则如式(21)。重复 HMS 次, 产生 HMS 个和声构成新生成的和声集。同时计算新生产和声的适应度值。

Step 4: 更新 Pareto 解集以及和声记忆空间

合并当前的 Pareto 解集、HM 以及新生成的和声, 并将其基于快速非支配排序策略进行排序。将第 1 层级内的和声被保存在 Pareto 解集。其他层级的和声使用拥挤度距离比较^[15], 选取 HMS 个相对优秀和声放入和声记忆库 HM 中。

Step 5: 校验算法终止条件

本文设置了两个终止条件: (1) 如果 IMOHS 算法已经达到最大迭代次数 ITER; (2) 如果从第 k 次开始后 n 次迭代, 满足 $\max(|\Delta F^{(k)}|) < \varepsilon$, 其中 ε 为设定的收敛限度, $\Delta F^{(k)} = F^{(k)} - F^{(k-1)}$ 为各目标函数适应度值的差值。当算法满足终止条件(1)或(2)时, 转入 Step6; 否则转入 Step 2。

Step 6: 求取最佳妥协解

为了从 Pareto 解集中挑选出最优解, 在此使用模糊隶属度函数。通过隶属度的大小反映决策者对该目标优化的满意程度, 综合各目标函数的模糊隶属度来求取最优解。首先, 遍历 Pareto 解集, 利用式(22)计算 Pareto 解集中第 k 个解中第 i 个目标函数的隶属度。

$$u_i^k = \begin{cases} 1, & F_i = F_i^{\min} \\ \frac{F_i - F_i^{\min}}{F_i^{\max} - F_i^{\min}}, & F_i^{\min} \leq F_i \leq F_i^{\max} \\ 0, & F_i = F_i^{\max} \end{cases} \quad (23)$$

式中: F_i 为目标函数 i 的值; F_i^{\min} 、 F_i^{\max} 分别为目标函数取值的上下限值;

然后根据决策者偏好设置权重值, 并计算多目标函数最优解的隶属度加权值。所得的最大值对应的 Pareto 解, 即为最优解。本文中设置等权重, 计算表达式为

$$u^k = \frac{\sum_{i=1}^{N_{obj}} \lambda_i u_i^k}{\sum_{k=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{N_{obj}} \lambda_i u_i^k}, \quad k = 1, 2, \dots, N_p \quad (24)$$

式中: N_p 为种群数目; λ_i 为目标函数 i 的取值权重; N_{obj} 为目标函数个数; u_i^k 为隶属度函数值。

4 算例测试与结果分析

4.1 仿真系统及其参数

为了对比验证程序的性能, 在 IEEE 33 节点系

统中的四种场景下进行试验。

- 1) Case 1: 正常运行时, 未进行重构和无功配置;
- 2) Case 2: 只进行重构;
- 3) Case 3: 只进行无功配置;
- 4) Case 4: 重构和多级无功联动。

分布式发电接入数量为 5 个, 分别节点 5, 24 和 29, 具体参数如表 1 所示。

表 1 DG 安装位置与容量

接入节点	DG 类型	容量/kVA	功率因素
5	光伏	50	0.85
12	风电	100	0.9
16	光伏	100	0.85
24	风电	300	0.9
29	风电	300	0.9

ULTC 初始位置为 16, 母线电容器 CS 与馈线电容器 CF₁、CF₂、CF₃ 初始投入组数均为 0, 馈线电容器分别安装在节点 7, 21, 30 节点。无功设备信息如表 2 所示。

表 2 无功设备信息

ULTC	110/10 kV, -10%~10%, 32 档
电容器组	母线电容器: 每组 0.3 Mvar 馈线电容器: 每组 0.15 Mvar

仿真程序运行的环境为 Matlab2016a, CPU 为 Intel Core i5 3630QM, 2.4 GHz。IMOHS 算法参数为: $HMS_{max}=100$, $HMS_{min}=50$, $HMCR=[0.2, 0.9]$, $PAR=[0.4, 0.9]$, $BW=[0.0001, 0.1]$, $ITER=100$, $\omega_1=1/3$, $\omega_2=1/3$, $\omega_3=1/3$, $\lambda_1\sim\lambda_4=1\ 000$ 。为能完整观测算法随迭代次数增减的收敛过程, 此处仅采用算法终止条件(1)。

图 2 是非支配排序中位于第 1 层级的 Pareto 解集, 从中可以看出各个优化解都处于一个曲面中, 相互不存在支配关系, 较好地保持了各个优化目标之间的相互独立性。图 3(a)是总隶属度函数值随迭代次数的不断优化, 图 3(b)~图 3(d)展示了各目标函数的优化过程。

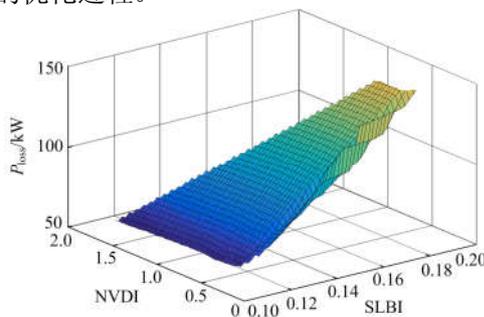


图 2 Pareto 解集

Fig. 2 Pareto solution set

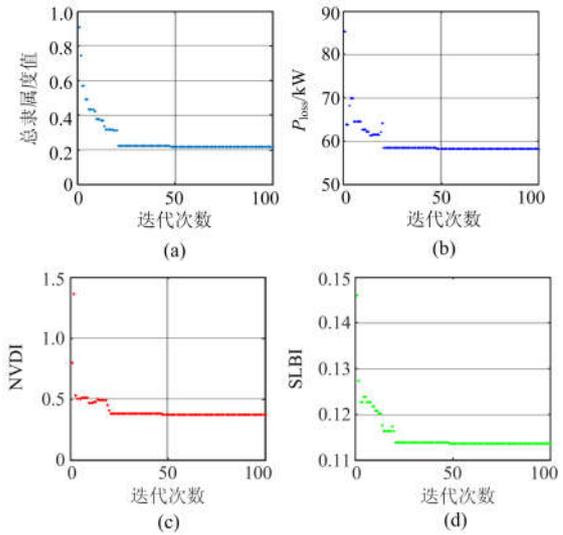


图 3 收敛过程

Fig. 3 Convergence process

场景 Case1~Case4 的优化结果如表 3 所示。从表中可以看出, 相对于 Case1 中的初始状态, Case2 中网损降低了 30.96%, NVDI 降低了 35.03%, SLBI

表 3 IEEE 33 节点系统中 4 种场景下的仿真结果

场景	优化目标	仿真结果
Case1	开关动作编号	{8-21,9-15,12-22,18-33,25-29}
	ULTC 档位	16
	CS 投入组数	0
	CF 投入组数	0
	P_{loss}/kW	127.851 9
	SLBI	0.169 6
	NVDI	1.928 1
Case2	开关动作编号	{7-8, 11-12, 14-15, 28-29, 32-33}
	ULTC 档位	—
	CS 投入组数	—
	CF 投入组数	—
	P_{loss}/kW	88.272 0
	SLBI	0.132 6
	NVDI	1.252 6
Case3	开关动作编号	—
	ULTC 档位	21
	CS 投入组数	6
	CF 投入组数	CF ₁ : 4, CF ₂ : 1, CF ₃ : 6
	P_{loss}/kW	74.097 1
	SLBI	0.137 7
	NVDI	0.654 4
Case4	开关动作编号	{7-8, 8-9, 9-15, 15-16, 28-29}
	ULTC 档位	19
	CS 投入组数	4
	CF 投入组数	CF ₁ : 1, CF ₂ : 3, CF ₃ : 8
	P_{loss}/kW	58.248 0
	SLBI	0.113 6
	NVDI	0.375 5

降低了 21.82%; Case3 中 P_{loss} 、NVDI、SLBI 分别降低了 42.04%、66.06%、18.81%; 而 Case4 中 P_{loss} 、NVDI、SLBI 分别降低了 54.44%、80.52%、34.34%。Case4 中结果比 Case2、Case3 中的优化结果更明显。考察 Case1~Case4 中的节点电压, 如图 4 所示, Case4 中的节点电压波动明显小于 Case1~Case3 中的情况, 可以看出重构与多级无功协调有效平抑了网络电压波动水平。

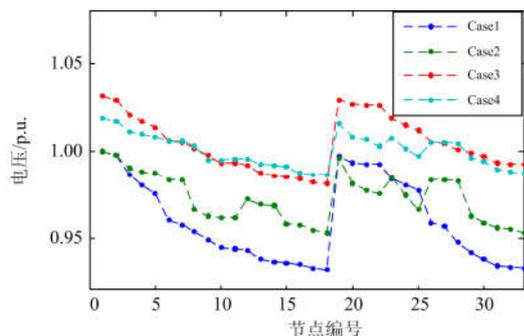


图 4 4 种场景下电压分布状况

Fig. 4 Voltage distribution in four cases

4.2 IMOHS 算法性能分析

1) IMOHS 参数设置对优化性能的影响分析

IMOHS 优化性能与参数选取关系密切。影响 IMOHS 的主要参数为和声记忆库 HM 的大小 HMS 和迭代次数 ITER。在 4.1 中的 IEEE 33 节点测试系统, 不同参数设置下的最优结果变化如表 5 和图 5 中所示。

表 5 不同设置下 IMOHS 对比

Table 5 Comparison of IMOHS under different settings

指标	S1	S2	S3	S4	S5
HMS	20	50	100	100	200
ITER	50	100	100	200	200
耗时/s	17.21	86.25	179.05	330.52	722.91
总隶属度值	0.2553	0.2299	0.2185	0.2166	0.2116

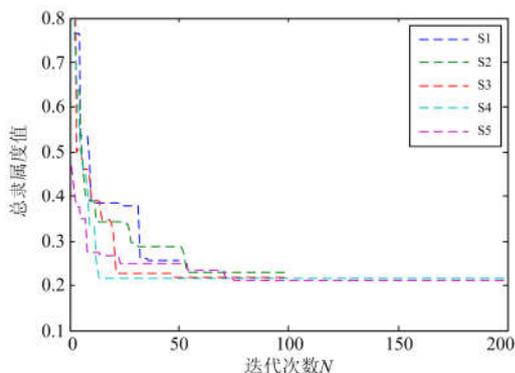


图 5 不同设置下的迭代曲线

Fig. 5 Convergence curve under different settings

可以看出在一定条件下, HMS 与 ITER 的大小对优化解的质量由显著的影响。HMS 决定了早期寻优过程中向最优解逼近的速度, ITER 则有益于后期寻优区域的拓展。HMS 设置过小, 可供新和声选用的基础值变少, 算法会长期在一个狭窄的小空间里寻找优化解从而导致不能得到全局最优结果。若 ITER 增大, 则相应地进入新区域寻优的概率也将变大, 全局搜索能力得到加强。当 HMS 和 ITER 充分大时, 继续增加 HMS 和 ITER 的值, 最优解之间的差别很小, 但是计算时间却会指数增加。

2) IMOHS 改进效果分析

为了检验所改进的 IMOHS 算法的有效性, 将 IMOHS 算法分别与基本和声算法 HS 算法、多目标和声搜索 (Multi-Objective Harmony Search, MOHS) 算法进行对比。HMS 设置为 100, 迭代次数 ITER 均设置为 100, 采用算法终止条件(1)。

3 种算法的寻优过程如图 6 所示, 最优化解的值如表 6 所示。从图中的收敛曲线可以看出, HS 算法多目标优化过程的寻优能力明显比 MOHS 和 IMOHS 差, 同时, IMOHS 比 HS、MOHS 收敛到更小的值。

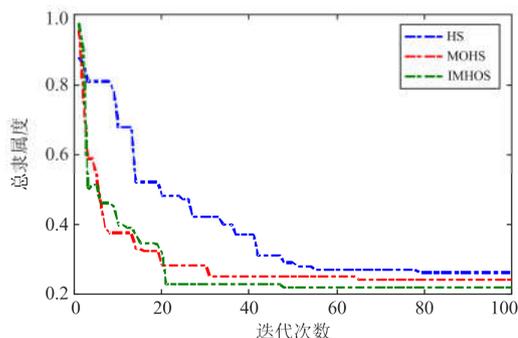


图 6 IMOHS 算法与 HS、MOHS 算法对比

Fig. 6 Comparison MOHS with HS and MOHS

表 6 IMOHS 算法和 HS、MOHS 算法对比

Table 6 Comparison MOHS with HS and MOHS

指标	HS 算法	MOHS 算法	IMOHS 算法
总隶属度值	0.261 4	0.239 8	0.218 5
收敛开始代数	78	65	48
寻优时间	17.72	215.93	179.05

进一步地, 从表 6 中可以看出, 寻优得到的总隶属度值, IMOHS 算法相较于 HS 算法提高了 16.41%, 相较于 MOHS 算法提高了 8.84%, 有了一定幅度提升; IMOHS 算法在迭代 48 次后开始收敛领先于 HS 算法的 78 代、MOHS 算法的 65 代; 寻优时间方面, IMOHS 算法用时 179.05 s, MOHS 算法用时 215.93 s, HS 算法只用时 17.72 s, 这是由于

HS 算法不需要非支配排序与维护 Pareto 解集, 但 HS 算法的寻优能相对于 MOHS、IMOHS 算法差, 且当各个目标函数的权重改变时就需要重新计算。考虑到 IMOHS、MOHS 算法的时间控制在了 179.05 s、215.93 s (<5 min), 同时 IMOHS 算法相对比 MOHS 计算时间减少了 20.6%, 显示了 IMOHS 算法改进后的良好性能。

5 结论

配电网重构与无功优化是提升配电网运行指标, 消除大量高渗透率分布式电源接入配电网带来的影响的主要技术手段。本文所建立的优化模型, 实现了配电网重构与多级无功之间的协调联动, 相对于单一重构与无功优化更有利地减小了有源配电网运行网损、电压偏差波动与负荷不均衡度。同时, 本文提出的 IMOHS 算法相对于基本 HS 算法、MOHS 算法具有一定的优势, 在求解变量多、维数高、强线性的有源配电网重构与多级无功联动优化模型中展现出良好的计算速度与全局寻优能力。

参考文献

- [1] 李军, 颜辉, 张仰飞, 等. 配电网和微网中分布式电源选址定容方法对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 147-154.
LI Jun, YAN Hui, ZHANG Yangfei, et al. Comparison of locating and sizing methods of DGs between in micro-grids and in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 147-154.
- [2] 张曦, 张宁, 龙飞, 等. 分布式电源接入配网对其静态电压稳定性影响多角度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 120-125.
ZHANG Xi, ZHANG Ning, LONG Fei, et al. Research of the impacts on static voltage stability of distribution networks with distributed generation from different aspects[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 120-125.
- [3] 周鑫, 王韶, 张文龙, 等. 配电网固定串联补偿多目标优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 115-122.
ZHOU Xin, WANG Shao, ZHANG Wenlong, et al. Multi-objective optimization of fixed series compensation in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 115-122.
- [4] 刘健, 尹海霞, 尚海仓, 等. 基于二分法的本地控制改善含分布式电源配电网电压质量[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 61-67.
LIU Jian, YIN Haixia, SHANG Haicang, et al. Voltage performance improvement by dichotomy based local control for power distribution networks with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 61-67.
- [5] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 一种联络开关和智能软开关并存的配电网运行时序优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2315-2321.
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. A hybrid optimization method for distribution network operation with SNOP and tie switch[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2315-2321.
- [6] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2575-2583.
LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power coordinated multi-period optimization for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2575-2583.
- [7] TOLABI B, ALI H, RIZWAN M H, et al. Reconfiguration, Optimal placement of DSTATCOM, and photovoltaic array in a distribution system based on fuzzy-ACO approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 1(6): 210-218.
- [8] ELDURSSI A M, O'CONNELL R M A. Fast Non-dominated sorting guided genetic algorithm for multi-objective power distribution system reconfiguration problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 593-601.
- [9] 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.
- [10] 崔挺, 孙元章, 徐箭, 等. 基于改进小生境遗传算法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 43-50.
CUI Ting, SUN Yuanzhang, XU Jian, et al. Reactive power optimization of power system based on improved genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 43-50.
- [11] 刘科研, 何开元, 盛万兴. 基于协同粒子群优化算法的配电网三相不平衡状态估计[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 1026-1031.

- LIU Keyan, HE Kaiyuan, SHENG Wanxing. A cooperative particle swarm optimization based state estimation of unbalanced three-phase distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 1026-1031.
- [12] 刘焯焯, 雷金勇, 蔡润庆, 等. 基于 SVM-MOPSO 混合智能算法的配电网分布式电源规划[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 46-54.
- LIU Huanghuang, LEI Jinyong, CAI Runqing, et al. Distributed generation planning in distribution network based on hybrid intelligent algorithm by SVM-MOPSO[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 45-54.
- [13] 盛万兴, 程绳, 刘科研. 基于信赖域序列二次规划算法的含 DG 配电网优化控制[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 662-668.
- SHENG Wanxing, CHENG Sheng, LIU Keyan. Optimal control of distribution network containing distributed generations based on trust region sequential quadratic programming algorithm[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 662-668.
- [14] 郑佳滨, 刘明波, 谢敏. 求解含储能装置的微电网动态最优潮流的对偶半定规划方法[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2879-2887.
- ZHENG Jiabin, LIU Mingbo, XIE Min. Dual semi-definite programming method for dynamic optimal power flow with energy storage device[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2879-2887.
- [15] 孙东磊, 李雪亮, 韩学山, 等. 考虑运行方式优化和拓扑校正控制的参考电网优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 92-97.
- SUN Donglei, LI Xueliang, HAN Xueshan, et al. Optimization method for reference network considering operation mode optimization and topology correction control[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 92-97.
- [16] CARRANO E G, SOARES L A E, TAKAHASHI R H C, et al. Electric distribution network multi-objective design using a problem specific genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 995-1105.
- [17] GEEM Z W, KIM J H, LOGANATHAN G V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search[J]. Simulation, 2001, 76(2): 60-68.
- [18] KIM Y J, AHN S J, HWANG P I, et al. Coordinated control of a DG and voltage control devices using a dynamic programming algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 42-51.
- [19] GOMES F V, CARNEIRO S, PEREIRA J L R, et al. A new heuristic reconfiguration algorithm for large distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1373-1378.
- [20] NEKOOE K, FARSANG M M, NEZAMABADI-POUR H, et al. An improved multi-objective harmony search for optimal placement of DGs in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 557-567.

收稿日期: 2018-07-17; 修回日期: 2018-11-20

作者简介:

叶学顺(1985—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为配电网优化控制与仿真。E-mail: yxs1799@163.com

(编辑 姜新丽)