

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.04.019

采用改进最优模糊C均值聚类和改进和声搜索算法的配电网动态重构*

周洁洁¹, 阙凌燕², 王良毅³, 卢敏², 郭创新^{1*}

(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 310000; 3. 国网重庆市电力公司, 重庆 404100)

摘要: 针对配电网动态重构中的开关操作次数约束难以处理与和声搜索算法寻优效率低的问题, 分别提出了改进的最优模糊C均值聚类法和改进的和声搜索算法, 利用前者对研究时间区间的负荷进行聚类从而将配电网动态重构转为以聚类中心代表各分段负荷的多个静态重构子问题, 利用后者对各静态重构问题进行求解。每个时间点的优化网络结构由相应的聚类中心的重构结果决定, 由此得到配电网重构的操作时间点和操作开关。在IEEE 33节点配电系统负荷数据的基础上构建1天的负荷数据并对该系统进行动态重构。研究表明, 该方法能够控制开关操作次数, 提高静态重构算法的寻优效率。

关键词: 配电网; 动态重构; 改进的最优模糊聚类; 改进的和声搜索算法

中图分类号: TM727 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)04-0531-07

Dynamic reconfiguration of distribution network based on improved optimal fuzzy C-means clustering and improved harmony search algorithm

ZHOU Jie-jie¹, QUE Ling-yan², WANG Liang-yi³, LU Min², GUO Chuang-xin¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310000, China;
3. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 404100, China)

Abstract: Aiming at the constraint of operation times of all switches and the inefficiency of harmony search algorithm, the improved optimal fuzzy C-means clustering technology and the improved harmony search algorithm were proposed. The former was applied to classify the operation state in a time interval according to load data that the dynamic reconfiguration of distribution network was converted to the multiple static reconfigurations that take the corresponding cluster center as the representative load. The latter was applied to solve the static reconfiguration. The optimal network structure at any time was determined by the corresponding cluster center's reconfiguration result, at the same time, the reconfiguration time and the operated switches were known. On the basis of IEEE-33bus system's load data, one day's load data was constructed and the dynamic reconfiguration was carried out. The results indicate that the proposed method can strictly limit operation times of switches and improve the efficiency of harmony search algorithm.

Key words: distribution network; dynamic reconfiguration; improved optimal fuzzy clustering; improved harmony search algorithm

收稿日期: 2014-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(5117143); 国家重点基础研究计划资助项目(2013CB228206); 浙江省自然科学基金资助项目(LZ12E07002)

作者简介: 周洁洁(1990-), 女, 浙江绍兴人, 主要从事配电网优化运行与控制方面的研究。E-mail: zhoujiejie@zju.edu.cn

通信联系人: 郭创新, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: guochuangxin@zju.edu.cn

0 引言

配电网重构是对网络拓扑结构进行优化,通过优化开关状态来调整网络的潮流分布,达到降低网损和均衡负荷等目的。其研究内容主要包括静态重构和动态重构。静态重构基于确定时间点优化,是一个非线性的组合优化问题,主要算法有启发式算法、传统数学优化方法以及智能算法;而动态重构基于时间区段进行优化,因此动态重构能够依据系统负荷随时间的变化对配网网络结构进行动态调整,更符合实际配电系统的日前优化要求。

文献[1]选择能最大限度降低网损量的开关关闭,将时间段按配网中总负荷变动大小来分段,虽然能在一定程度上减少重构次数,但存在一定的不合理性,配网重构是依据每个节点的负荷寻找最优拓扑结构的,即使总负荷不变,各个节点负荷的变化也会导致产生不同的最优拓扑结构;文献[2]将开关操作的费用计入目标函数中,将时变问题分解为多个静态重构子问题,使用遗传算法分别求解每个静态子问题,并使用动态规划得到全局最优时变策略;文献[3]采用混合粒子群算法对各个时间断面分别进行静态求解,选择若干优良解构成解集,引入多代理协调技术来获得动态重构解;文献[4]采用和声搜索算法对每个时间断面分别求解,选取每个断面下的若干优良解构成待选解集,利用动态规划根据待选解集得到动态重构解。文献[2-4]在考虑每个时间断面重构解的组合时,易造成解空间过大而求解困难。文献[5]将配电网动态重构转换为以聚类中心表示负荷状态的多个静态重构问题,并采用改进的化学反应算法求解各个静态问题,重构数与聚类数有关,而一定时间内配电网动态重构的次数受一定的限制,聚类后得到的分段数可能大于动态重构允许的次数。

本研究采用改进最优模糊C均值聚类技术(optimal fuzzy C-means clustering, OFCMC)对所研究时间区间进行时段划分,将动态重构问题转化为以负荷聚类中心为代表的多个静态重构问题。本研究在文献[6]的基础上,结合启发式规则,对和声搜索算法(harmony search algorithm, HSA)做进一步的改进,并将其应用于求解以聚类中心为代表的静态重构问题上。

1 基于改进 OFCMC 的重构时段划分

针对配电网动态重构中的开关操作次数约束难以处理的问题,本研究采用改进 OFCMC 对所研究时间区间进行时段划分,从而限制重构次数。

1.1 基于 OFCMC 的配电网负荷聚类

模糊聚类分析是根据客观事物之间的特征、亲疏程度以及相似性,通过建立模糊相似关系对客观事物进行聚类的分析方法。文献[7]中提出的 OFCMC 采用遗传-迭代自组织算法,能够较好地解决有关事物聚类方面的问题,得出所研究事物的最优聚类数及最优聚类中心。

本研究采用 OFCMC 对未来一天的预测负荷数据进行聚类,将未来一天等时间间隔地划分为 T 个时段,假定各节点负荷在各个时段内保持不变,则 t 时段 ($t=1,2,\dots,T$) 的负荷状态可表示为 $X_t=[x_{t1},x_{t2},\dots,x_{tn}]$,其中: n —网络的节点数, x_{ti} — t 时段节点 i ($i=1,2,\dots,n$) 的复功率。研究时间区间内所有的负荷状态为 $X=\{X_1,X_2,\dots,X_T\}$,经聚类可将 X 分为 C ($C\in[2,T-1]$) 类;可得对应的聚类中心为 $V=\{V_1,V_2,\dots,V_C\}$,第 m 个聚类中心为 $V_m,V_m=[v_{m1},v_{m2},\dots,v_{mn}]$,其中: v_{mi} —第 m 个聚类中心节点 i 的复功率;可得对应的隶属度矩阵为 $U=(\mu_{mi})_{C\times T}$,其中: μ_{mi} —第 t 个数据 X_t 隶属于第 m 类 V_m 的程度。详细求解方法可参见文献[7]。

1.2 基于改进 OFCMC 的时段划分

将 OFCMC 直接应用于动态重构时段划分时,应基于以下两点进行改进:① OFCMC 仅将负荷特性相近的时段归为一类,但没有考虑负荷的时序特性,因此需要对聚类结果按时间顺序进行排序来确定分段数及各分段的起止时刻;② 在一天内配电网动态重构次数是有限的,而通过时序排列按类分段所形成的分段数可能大于一天内最大重构允许次数,因此需要通过一定的方法对初始分段进行融合。基于以上讨论,本研究将分2步对时段进行划分:首先用 OFCMC 对负荷数据进行聚类,并通过时序排列按类分段从而完成一次划分;在此基础上,利用枚举法对时段进行二次划分。

1.2.1 时段的一次划分

(1) 基于日前负荷预测值,获得未来一天24各个时段的负荷功率。

(2) 为了减少最小数据和最大数据对聚类影响过大,对样本数据进行标准化,将聚类数据压缩在 $[0,1]$ 闭空间。标准化公式如下:

$$x'_{ti} = \frac{x_{ti} - \min\{x_{ti}\}}{\max\{x_{ti}\} - \min\{x_{ti}\}} \quad \begin{cases} t=1,2,\dots,T \\ i=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_{ti} — t 时段节点 i 对应的负荷值, x'_{ti} — t 时段节点 i 对应的标准化负荷值。

(3) 根据文献[7]可计算得到最佳模糊隶属度矩阵 U 、聚类中心 V 以及最佳聚类数 C ,将所有数据按

最大隶属度归类获得各时段负荷所属聚类。

(4) 记录各时段负荷的聚类编号,按照时间顺序排列,将隶属于同一聚类且相邻的时段汇集成一段,形成段 C_1 。

1.2.2 时段的二次划分

在时段的初步划分结果中,整个研究区间被分成了 C_1 段,且相邻的时段必隶属于不同的聚类。若初始分段数 $C_1 > C_{\max}$ (C_{\max} —最大重构允许次数),则需进行时段的二次划分,具体步骤如下所示:

(1) 设定目标函数,如下式所示:

$$\min f = \sum_{j=1}^{C_{\text{final}}} \Delta P_j \Delta t_j \quad (2)$$

式中: C_{final} —最终分段数, ΔP_j —第 j 个分段的网损功率, Δt_j —第 j 个分段的时长。需满足的约束条件有单时间断面的静态约束,包括潮流约束、节点电压约束、支路容量约束及网络拓扑约束;此外,还应满足重构次数约束。

(2) 引入一个以二进制编码的染色体 F , 设定其基因位的长度为时段一次划分后的分段数 C_1 , 将其首位固定设置为“1”;第 i ($i=2, \dots, C_1$) 位的设置方法为:若将其设置为“1”则表示该分段与上一分段隶属同一聚类,则可将这两分段合并;若为“0”则表示与上一分段隶属不同聚类,则不能合并。假设时段一次划分后共有 8 个分段,则初始染色体可表示为 $F_0 = \{1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$ 。

(3) 保持染色体首位不变,采用枚举法选择其他任意 ($C_1 - C_{\max}$) 个基因位,修改其 0-1 状态(若该位原始状态为“0”,被选中后则修改为“1”),按步骤 2 中的规则进行融合,并根据下式计算新类的聚类中心。共有 ($C_1^{C_1 - C_{\max}}$) 种选择方案,选择使目标函数值达到最小的方案作为最终时段二次划分的方案。目标函数的求解方法详见下文第 3 节。

$$V_{\text{new}} = \sum_{i=1}^T (\mu_{e_i} + \mu_{f_i} + \dots)^h X_i / \sum_{i=1}^T (\mu_{e_i} + \mu_{f_i} + \dots)^h \quad (3)$$

式中: $e, f, \dots (e, f, \dots \in [2, C])$ —合并段中包含的各时间段负荷状态隶属聚类的编号; h —OFCMC 中的一个收敛因子 ($h > 1$ 时收敛)。

本研究提出的基于改进 OFCMC 的时段划分法能将重构次数严格限制在约束范围内,且算法可行。因为,经时段一次划分后得到的分段数必小于 24, 一般规定一天最大重构允许次数为 4, 则时段二次划分中最大的方案数 C_{23}^{23-4} 为 8 855 种;而一天中某些相邻时段的负荷特征非常相似,因此经时段一次划分后得到的分段数必大大小于 24, 方案数必将大大小于 8

855。大量计算表明,典型日经时段一次划分后得到的分段数一般为 8~10 分段,则时段二次划分对应的最大方案数为 70~210,均在可计算范围内,说明该算法的可行性。

2 改进的配电网重构和声搜索算法

HSA 是一种启发式全局优化算法,是对乐师们在音乐演奏中凭借各自的记忆,通过反复调整乐队中各乐器的音乐,最终达到一个美妙和声状态过程的模拟^[8]。

HSA 算法的寻优过程包括和声记忆库考虑、基因调整以及随机变异操作。在寻优过程中如何合理地设置基音调整策略,一直是学者们研究的热点和难点之一^[9]。若该策略设置不合理,将会导致 HSA 盲目地随机搜索,降低算法的收敛性,影响算法的寻优能力。本研究针对这一问题,并结合配电网重构的特点,提出了一种基于启发式规则的基音调整策略,下文将进行详细论述。

2.1 可行解的编码方法

配电网重构要求重构后的网络呈辐射状、无孤岛运行。本研究采用文献[10]的基本环与基本环矩阵来确定重构解各维决策变量的可行取值范围,并且其可行解规定为任意两个基本环所包含的公共分段开关最多只能断开一个,从而确定可行重构解。

在辐射状配电网中,闭合一个联络开关后其与若干分段开关组成的单连支回路称为基本环。形成一个基本环后,则必须打开环中的另一开关以恢复网络辐射状。本研究将重构解向量 HV 设置为各基本环中断开支路的组合,采用整数编码的方式,以断开支路的编号为决策变量,联络开关的个数为解向量的维数,编码格式如下式所示:

$$HV = [x_1, x_2, \dots, x_M] \quad (4)$$

式中: x_i —第 i 个重构环中断开支路的编号; M —重构环的个数。

2.2 基于启发式规则的基音调整策略

2.2.1 基音调整策略

支路交换法的基本思想^[11]为:首先合上一个联络开关,在配电网中形成一个环网;其次选择环网中的一个分段开关将其打开,使配电网恢复为辐射状。上述过程称为一次拓扑调整。对于绝大多数配电网来说,沿线电压相角变化极小^[12],因此一次拓扑调整引起的有功线损变化量 ΔP 可简化表示为:

$$\Delta P = 2I_k \times (V_m - V_n) + I_k^2 R_{\text{loop}} \quad (5)$$

式中: I_k —断开支路 k 的支路电流; V_m, V_n —联络开关两端的电压; R_{loop} —联络开关闭合后形成的单连支回路中所有支路电阻之和。

Mesut E. Baran 等人在文献[11]的基础上做了改进,利用网损变化的估算公式(5)为一元二次函数的特点,将其求极值的方法用于寻找断开开关。该函数在其顶点处有最小值,设其顶点坐标为 $(I_{opt}, \Delta P_{opt})$, 其数学表达式如下式所示;当 $I_k \in (0, 2I_{opt})$, ΔP 为负,且 I_k 越接近 I_{opt} , 系统网损减小越多。

$$I_{opt} = \frac{V_n - V_m}{R_{loop}}, \Delta P_{opt} = -\frac{(V_n - V_m)^2}{R_{loop}} \quad (6)$$

根据以上所论述的启发式规则,定义基于启发式规则的基音调整策略为:选择能保持网络辐射状无孤岛运行且支路电流值在 $0 \sim 2I_{opt}$ 之间最接近 I_{opt} 的支路作为决策变量基音调整选择的支路。

2.2.2 基于启发式规则的基音调整策略实现步骤

该策略的具体实现步骤如下所示:

(1) 确定需要进行基音调整的决策变量。 $HV = [x_1, x_2, \dots, x_M]$ 由 HSA 的记忆库考虑和随机变异操作确定,生成随机数组 $R = \text{rand}(1, M)$, 若 $R(m) < \text{PAR}$ (基音调整概率), 则说明需要对 x_m 进行基音调整。

(2) 计算初始状态下辐射状网络的潮流。该状态下网络中断开的支路编号分别为 x_1, x_2, \dots, x_M 。

(3) 进行独立拓扑调整。若合上一个联络开关形成的基本环与其他基本环不存在公共支路,则这两种对应的拓扑调整互不影响,即为独立拓扑调整,反之为非独立拓扑调整^[13]。对步骤1中确定的决策变量,只考虑当前网络拓扑下的所有独立拓扑结构,根据2.2.1中介绍的方法确定各相应基本环中能够降低网损的支路集合,又根据基本环矩阵来确定各相应决策变量的可行取值范围,求得两者的交集,若交集不为空,则从中选择支路电流值在 $0 \sim 2I_{opt}$ 之间且最接近 I_{opt} 的支路作为基音调整选择的支路,否则保持不变。

(4) 判断是否对所有需要进行基音调整的决策变量进行操作。若是,则结束该操作;否则根据步骤3的结果修改网络拓扑并计算新的潮流分布,重复步骤3。

2.3 改进HSA的实现步骤

本研究的重构算法主要包括构建基本环矩阵、利用启发式规则制定基音调整策略及利用和声策略全局寻优这几部分。具体实现步骤如下:

(1) 算法参数的初始化。改进HSA的参数包括解向量的维数 M 、和声记忆库的大小 HMS、和声记忆库考虑概率 HMCR、基音调整概率 PAR、最大迭代次

数 N_{max} 和终止条件。

(2) 初始化和声记忆库。初始状态下联络开关全部断开,分段开关全部闭合,本研究采用文献[10]的基本环矩阵自动生成算法生成基本环矩阵,利用该矩阵及可行解规定随机生成 HMS 个初始和声存入和声记忆库中,计算各初始解的目标函数值。

(3) 生成新和声 $HV^{new} = [x'_1, x'_2, \dots, x'_M]$:

① 生成新的基本环矩阵:根据上一个解所确定的开关状态,将断开的开关视为联络开关,根据基本环矩阵自动生成算法生成新的基本环矩阵。

② 生成一个随机数组 $R_i = \text{rand}(1, M)$, 对各维决策变量都进行以下操作:根据基本环矩阵及可行解规定确定 $x'_m (m = 1, 2, \dots, M)$ 的可行取值范围 B_{1m} ; 判断 $R_i(m)$ 是否小于 HMCR, 若是则将 HM 中第 m 列元素构成一集合 B_{2m} , 取 B_{1m} 和 B_{2m} 的交集, x'_m 从该交集中随机选取; 否则 x'_m 从 B_{1m} 中随机选取。

③ 对步骤②中生成和声 HV^{new} 进行基音调整,具体步骤详见2.2.2节。

(4) 更新和声记忆库:计算新和声的目标函数值,若其优于和声记忆库中最差和声,则用新和声替代最差和声存入和声记忆库中。

(5) 判断算法是否满足终止条件:若满足则停止迭代,否则转至步骤3。

3 配电网动态重构

本研究采用改进 OFCMC 将研究时间区间进行时段划分,并求得各分段的负荷聚类中心。聚类中心是同一类数据的中心,具有表征类中数据的能力;并且,负荷分布状态相近的时段所对应的最佳网络拓扑结构一般也相同或相近。因此,本研究将配电网动态重构问题转化为多个静态重构子问题,对每一分段进行静态重构,以该分段的聚类中心作为代表负荷进行潮流计算,并采用第2节给出的改进 HSA 进行求解。动态重构问题的目标函数见式(2),静态重构子问题的目标函数如下式所示:

$$\min f_{sub} = \Delta P_j \Delta t_j \quad (7)$$

式中: ΔP_j —第 j 个分段的网损功率, Δt_j —第 j 个分段的时长。需满足的约束条件包括潮流约束、节点电压约束、支路容量约束及网络拓扑约束。

4 实验及结果分析

IEEE-33 节点配电系统^[14]作为测试系统进行相关的研究如图1所示。在图1中,虚线为联络线路,各条

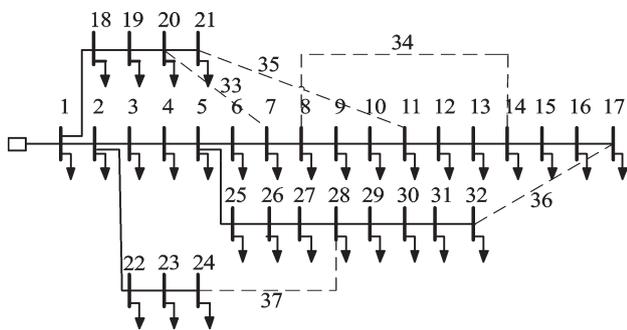


图1 IEEE-33节点配电系统

支路上均装有开关。各节点编号和各虚线线路编号如图所示,实现线路编号为该线路右端节点编号。

4.1 改进HS算法性能验证

本研究改进HSA的参数设置如下:HMS=10;HM-CR=0.85;PAR=0.5; $N_{\max}=300$ 。

文献[15]已表明HSA在求解配电网重构问题时相比于遗传、禁忌搜索算法等具有较好的性能。根据基本环矩阵和本研究的编码方式,利用HSA(称之为算法一)、有关文献的改进HSA(称之为算法二)以及本研究的改进HSA(称之为算法三)对33节点网络进行静态重构。为比较这3种算法的全局收敛性,本研究分别利用这3种不同的算法对测试系统循环计算200次,给出各算法在这200次计算中得到的最优解(网损/kW)、最差解(网损/kW)、标准差以及求得全局最优解的次数和求得全局最优解时重构一次所需的平均时间(次/s),IEEE-33节点系统结果比较如表1所示。从表1中可以看出,3种算法均能求得文献[16]所述的公认的已知全局最优解,但算法三求得全局最优解的次数(97次)比算法一和算法二(分别为51次和72次)多,本研究算法求得的网损标准差比其他两种算法小,且耗时比其他两种算法略短。以上说明本研究算法具有较好的全局收敛性和寻优速度。原因是本研究算法采用了基于启发式规则的基音调整策略,将启发式规则和智能算法相结合,一方面利用HSA的全局搜索能力能够克服支路交换法比对初始解依赖性较大的缺点;另一方面利用启发式规则能够大大缩小算法的搜索范围,减少需要考虑的开关组合,使得算法朝着目标更优的方向搜索。

表1 IEEE-33节点系统结果比较

算法	最优解	最差解	标准差	求得全局最优的次数	求得全局最优重构平均时间
无	202.7	202.7			
算法一	139.5	147.8	0.166	51	7.2
算法二	139.5	145.9	0.126	72	6.6
算法三	139.5	143.7	0.095 1	97	6.1

4.2 配电网动态重构实例分析

本研究构建IEEE-33节点未来一天的预测负荷数据(参见文献[17])并对该系统进行动态重构。将未来一天分为24个时段,第1个时段为0:00~1:00,其他依次类推,假定每个时段内负荷恒定。设定一天内最大重构允许次数为4。

经OFCMC聚类后得到的各时段负荷的最优聚类结果如图2所示。从图2中可以看出,若不对初始分段做进一步的融合处理,则将一天划分成了8段,分段数大于最大重构允许次数。有关文献采取将孤立类的时间段做平滑处理使负荷种类的变化更具连续性的方法,则将分段数减为6,时段划分结果为:分段I为第1~6时段,分段II为第7~8时段,分段III为第9~14时段,分段IV为第15~21时段,分段V为第22~23时段,分段VI为第24时段;本研究采用改进OFCMC对时段进行划分,则将分段次数减至4,时段划分结果为:分段I为第1~8时段;分段II为第9~14时段;分段III为第15~21时段,分段IV为第22~24时段。

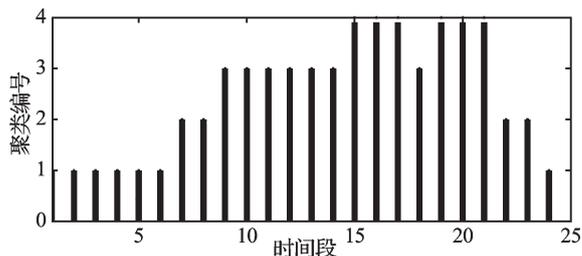


图2 IEEE-33配电网24 h负荷的聚类结果

本研究采取3种方案来验证将动态重构问题转化为基于OFCMC时段划分结果和以负荷聚类中心为代表负荷的多个静态重构问题的合理性和有效性。

方案一:以各时段的实际数据分别进行重构;方案二:基于有关文献时段划分的结果并以聚类中心作为代表负荷进行重构;方案三:基于本研究改进OFCMC时段划分的结果并以聚类中心作为代表负荷进行重构,结果如表2所示。

方案一得到的系统总网损为15 21 kW·h,开关操作的调度次数为11次,闭合/打开总次数为34次;方案二得到的系统总网损为1 525.7 kW·h,开关操作的调度次数为5次,开关闭合/打开总次数为18次;方案三得到的系统总网损为1 527.2 kW·h,开关操作的调度

表2 3种方案下开关操作调度表

时段	开关操作方案						系统网损/kW			时段	开关操作方案						系统网损/kW		
	方案一		方案二		方案三		方案一	方案二	方案三		方案一		方案二		方案三		方案一	方案二	方案三
	闭合	打开	闭合	打开	闭合	打开					闭合	打开	闭合	打开	闭合	打开			
1	33/ 34/ 35/ 36/ 37	7/ 9/ 14/ 28/ 32	33/ 34/ 35/ 36/ 37	7/ 9/ 14/ 28/ 32	33/ 34/ 35/ 36/ 37	7/ 9/ 14/ 28/ 32	3.9	3.9	3.9	13	28	37					71.3	72.6	72.6
2							3.9	3.9	3.9	14							82.3	82.6	82.6
3							2.7	2.7	2.7	15	9/ 37	10/ 28	28	37	28	37	100.1	101.4	101.4
4							1.1	1.1	1.1	16							140.7	141.5	141.5
5	28	37					5.0	5.3	5.3	17	10/ 28	9/ 37					142.7	142.7	142.7
6	37	28					4.7	4.7	4.7	18							119.9	119.9	119.9
7	28	37	28	37			10.3	10.3	10.5	19							106.5	106.5	106.5
8							17.6	17.6	18.1	20							139.2	139.2	139.2
9	37	28	37	28			70.6	70.6	70.6	21							131.2	131.2	131.2
10							94.8	94.8	94.8	22	37	28			37	28	39.9	39.9	40.6
11							106.1	106.1	106.1	23	28	37					18.3	18.3	18.4
12							100.9	100.9	100.9	24	37	28	37	28			7.3	7.3	7.3

注:开关操作均在时段的起始时刻点进行

次数为3次,开关闭合/打开总次数为14次。

从表2中分析可知,方案二和方案三的代表负荷所得重构方案能满足同时段数据中绝大多数最优,而少量不满足最优的也与最优非常接近,方案三不满足最优的重构方案比方案二多,因为方案三相比于方案二融合了更多的时段。

方案二和方案三的系统总网损比方案一略大,但开关操作的调度次数和开关闭合/打开总次数大大减少;方案三的系统总网损比方案二略大,但开关操作的调度次数和开关闭合/打开总次数分别减少了2次和4次。以上分析均说明了本研究将动态重构问题转化为基于改进 OFCMC 时段划分结果和以负荷聚类中心为代表负荷的多个静态重构问题的合理性;另外,本研究改进 OFCMC 能将重构次数严格控制在约束范围内,而文献[5]中的方法不一定能满足约束条件,突出本研究算法的有效性。

5 结束语

本研究采用改进 OFCMC 将研究时间区间进行时段划分,求得各分段的聚类中心作为代表负荷用作潮流计算,采用改进 HSA 对每一分段进行静态重构求解,算例验证了本研究算法的可行性和合理性。

该算法具有如下特点:①采用改进 OFCMC 进行时段划分后能将重构次数严格限制的约束范围内;②采用改进 HSA 解决静态重构问题,具有良好的收敛性和寻优效率。

参考文献(References):

- [1] 尹丽燕,于继来.多时间段落的配电网动态重构[J].中国电机工程学报,2002,22(7):44-48.
- [2] 吴建中,余贻鑫.最小化运行费用的时变重构全局优化算法[J].中国电机工程学报,2003,23(11):13-17.
- [3] 李振坤,陈星莺,赵波,等.配电网动态重构的多代理协调优化方法[J].中国电机工程学报,2008,28(34):72-79.
- [4] SHARIATKHAH M H, HAGHIFAM M R, SALEHI J, et al. Duration based on reconfiguration of electric distribution networks using dynamic programming and harmony search algorithm[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2012 (41):1-10.

(下转第543页)

本文引用格式:

周洁洁,阙凌燕,王良毅,等.采用改进最优模糊C均值聚类和改进和声搜索算法的配电网动态重构[J].机电工程,2015,32(4):531-536,543.
ZHOU Jie-jie, QUE Ling-yan, WANG Liang-yi, et al. Dynamic reconfiguration of distribution network based on improved optimal fuzzy C-means clustering and improved harmony search algorithm[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(4): 531-536, 543.