

一种适用于配电网重构的动态调整策略

胡国伟^{1,2}, 别朝红^{1,2}

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 提出了一种适用于配电网重构的动态调整策略, 将其与整数粒子群优化算法相结合, 实现了高效的配电网重构. 动态调整策略分为问题变量解空间动态调整策略和粒子位置变量截断方式动态调整策略两部分: 前者是指初始化时, 粒子位置向量中的每一维变量根据已经更新的问题变量动态调整问题解空间, 从而保证映射的问题解都是拓扑可行解; 后者是指粒子更新过程中, 位置向量的每一维变量通过动态调整截断方式来改变粒子位置向量空间到问题解空间的映射关系, 潜在的拓扑不可行解被视为截断误差偏大而自动优化调整, 这样不仅使更新过程不产生拓扑不可行解, 而且更新过程的优化特性得以保留. 动态调整策略可以结合粒子连续运动空间和问题离散解空间的映射关系, 避免粒子搜索过程中产生网络拓扑不可行解, 不仅达到了减少冗余搜索的目的, 还提高了算法的优化性能. 算例结果表明, 提出的结合整数粒子群映射关系的动态调整策略不仅能够有效地求解配电网重构问题, 而且具有良好的鲁棒性.

关键词: 配电网重构; 动态调整策略; 整数粒子群算法

中图分类号: TM72 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)12-0078-07

Dynamic Adjustment Strategy for Distribution Network Reconfiguration

HU Guowei^{1,2}, BIE Zhaohong^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation for Power Equipments, Xi'an 710049, China)

Abstract: A dynamic adjustment strategy (DAS) for distribution network reconfiguration is proposed, and successfully combined with integer particle swarm optimization (IPSO) algorithm to solve distribution network reconfiguration problem efficiently. DAS can be divided into two steps — one refers to dynamic adjustment for solution space of variables of reconfiguration and the other for round method of locator variables of particles. The former guarantees the initialized reconfiguration solution satisfying the topology constraints after solution space of variables of reconfiguration is adjusted dynamically according to the updated variables. The latter ensures the reconfiguration solution in every update procedure to get feasible for topology due to dynamic adjustment for round method of locator variables of particles, and the potential infeasible solution is auto-adjusted optimally. DAS combines the mapping from continuous space for particle to discrete space for reconfiguration to avoid reconfiguration solution infeasible for topology, thus decreases unnecessary search and improves optimization performance. The test systems reveal that the proposed method enables to effectively to solve distribution network reconfiguration with robustness.

Keywords: distribution network reconfiguration; dynamic adjustment strategy; integer particle swarm optimization

收稿日期: 2012-04-28. 作者简介: 胡国伟(1987—), 男, 硕士生; 别朝红(通信作者), 女, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51077108); 国家“863 计划”资助项目(2012AA050201); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090201110017).

网络出版时间: 2012-08-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20120827.1110.006.html>

为了减少故障和满足电网各种运行需要,配电系统一般是环网设计开环运行的,所以配电系统含有大量分段开关和一些联络开关.通过管理分段开关和联络开关,改变网络的拓扑结构,实现配电网重构,达到提高电压质量、减轻线路过载、平衡负荷等目标.一般地,以网损最小为目标的重构同时可以实现其他的要求,所以大多数文献建立以网损最小为目标的网络重构模型.

配电网重构是一个复杂的、不可微的、组合优化问题,尤其是网络辐射型拓扑约束的存在,使问题求解变得非常困难.由于传统算法^[1-2]无法在合理的时间内找到高质量的配电网重构结果,智能搜索算法(如遗传算法^[3]、粒子群算法^[4]等)就成为一种理想的选择.但是,此类算法处理配电网重构最大难点是网络拓扑约束的处理,由于智能算法的随机搜索特点会产生大量拓扑不可行解,严重影响算法的性能.为了处理网络拓扑约束,减少冗余搜索,提高智能算法的搜索能力,文献[5]采用了一种向上节点的表达方式来提高形成拓扑可行解的概率.文献[4-6]利用网络同胚原理对配电网拓扑结构进行简化,简化后将解环效果相同的支路定义为支路组,从而减少了冗余的搜索.文献[7-8]提出了拓扑不可行解的修复方法,将产生的拓扑不可行解转变为可行解.

本文提出一种结合整数粒子群映射关系的动态调整策略求解配电网重构问题的算法,动态调整策略分为问题变量解空间动态调整策略和粒子位置变量截断方式动态调整策略两部分.本文的创新点和主要贡献是提出动态调整策略,把配电网重构问题中最困难的网络拓扑约束的处理与粒子连续运动空间到问题离散解空间的映射关系有机结合起来,从而提高解的产生质量.算例结果表明,本文提出的算法不仅能够有效求解配电网重构问题,还具有非常好的鲁棒性.

1 配电网重构数学模型

配电网是闭环设计、开环运行的.配电网重构需要确定满足约束的开环运行时的连通支路集合,以使最终形成的配电网具有最小的网损.

1.1 目标函数

$$\min f = \sum_{i \in N_E} P_{i, \text{loss}} = \sum_{i \in N_E} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} r_i \quad (1)$$

式中: N_E 为连通支路的集合; $P_{i, \text{loss}}$ 为支路 i 的有功功率损耗; r_i 为支路 i 的电阻; P_i 、 Q_i 分别为支路 i 的首段或末端有功和无功功率; U_i 为支路 i 对应功

率 P_i 和 Q_i 端的电压幅值.

1.2 约束条件

(1) 配电网的潮流约束

$$\mathbf{AP} = \mathbf{D} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{A}$ 是节点支路关联矩阵; $\mathbf{P}$ 是馈线潮流矢量; $\mathbf{D}$ 是负荷需求矢量.

(2) 线路电流约束

$$I_i \leq I_{i, \max}, \quad i = 1, 2, \dots, N_E \quad (3)$$

式中: I_i 是第 i 条连通支路的电流; $I_{i, \max}$ 是线路 i 允许流过的最大电流.

(3) 电压幅值约束

$$U_{j, \min} \leq U_j \leq U_{j, \max}, \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

式中: U_j 、 $U_{j, \min}$ 和 $U_{j, \max}$ 分别是节点 j 的电压以及电压的下限和上限; M 为节点的数目.

(4) 网络拓扑约束

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

式中: g_k 为当前的网络结构; G 为配电网可行的辐射状网络集合.

第1个约束条件可以通过潮流计算实现.当违反第2和第3个约束条件违反时,通过引入罚函数,将惩罚项计入到目标函数中来处理这两个约束.第4个网络拓扑约束,一直是配电网重构问题的难点,如果也使用罚函数的方法,由于搜索中会产生大量的拓扑不可行解,会导致算法的初始化和更新过程的效率都很低.本文提出利用动态调整策略处理该约束.

2 整数粒子群优化算法

2.1 算法简介

粒子群优化(PSO)算法由Kennedy和Eberhart^[9]在1995年首次提出,经过十几年已经获得很大的发展.PSO算法一般在连续问题中使用,具有计算简单、收敛速度快、鲁棒性好等优势.近年来,随着离散优化问题的不断出现,许多学者尝试研究整数PSO算法来求解这类问题.整数PSO算法通过对粒子群算法的离散化处理得到,通常是将粒子的位置变量和速度变量通过直接取整截断的方式,然后再利用经典粒子群更新公式框架进行,或者根据重新定义的粒子群算法的“加减法”进行操作^[10].

在传统的粒子群算法中,粒子的位置向量往往就是问题解向量,两者存在直接对应的映射关系,在评估目标函数值时,不需要区分是通过粒子的位置向量还是问题解向量,而在整数粒子群算法中,粒子

的位置向量和问题解向量并不是直接对应的映射关系,所以文中描述时将两者明确分开。

2.2 算法描述

为了充分保留经典粒子群优化算法在连续空间中求解的优势,本文实现整数粒子群算法在粒子的搜索过程中,保持粒子的速度向量和位置向量为实数向量的形式,将粒子位置向量的每一维变量截断为整数,映射到问题解空间。评估目标函数值时,使用的是问题解向量,粒子的位置、速度向量的更新过程受到目标函数值的影响。

设 $\mathbf{x}_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iH}]^T$ 是粒子 i 的位置向量, $\mathbf{l}_i = [l_{i1}, l_{i2}, \dots, l_{iH}]^T$ 是粒子 i 对应的问题解向量, $\mathbf{v}_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iH}]^T$ 是粒子 i 的速度向量,那么粒子的速度更新公式为

$$v_{i,j}^{k+1} = \omega v_{i,j}^k + c_1 \text{rand}() (P_{\text{best},i,j} - x_{i,j}^k) + c_2 \text{rand}() (G_{\text{best},j} - x_{i,j}^k) \quad (6)$$

粒子的位置更新公式为

$$x_{i,j}^{k+1} = x_{i,j}^k + v_{i,j}^{k+1} \quad (7)$$

粒子的惯性权重更新公式为

$$\omega = \omega_{\max} - \left(\frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{i_{\text{ter},u}} \right) i_{\text{ter},u} \quad (8)$$

$$v_{i,j}^k, x_{i,j}^k \in R$$

$$\forall i \in [1, P]_Z; \forall j \in [1, H]_Z; \forall k \in [0, K]_Z \quad (9)$$

$$l_{i,j}^k \in Z$$

$$\forall i \in [1, P]_Z; \forall j \in [1, H]_Z; \forall k \in [0, K]_Z \quad (10)$$

粒子的位置变量映射为问题变量

$$x_{i,j}^k \xrightarrow{f} l_{i,j}^k \quad (11)$$

式中: $v_{i,j}^k$ 和 $x_{i,j}^k$ 分别为第 i 个粒子第 j 维第 k 次迭代后的速度和位置; $P_{\text{best},i,j}$ 为第 i 个粒子第 j 维的最优值; $G_{\text{best},j}$ 为粒子第 j 维的最优值; c_1 、 c_2 、 ω 、 $\omega_{\max}$ 、 $\omega_{\min}$ 分别是学习因子、当前惯性权重、惯性权重最大值、惯性权重最小值; $i_{\text{ter},u}$ 、 $i_{\text{ter},\max}$ 分别是当前迭代次数和最大迭代次数; $\text{rand}()$ 为 0 和 1 之间均匀分布的随机数; P 为粒子种群大小; H 为变量维数; K 为最大迭代次数。

从粒子的位置变量到问题的解变量,存在着连续空间到离散空间的映射关系,这种映射不是一一对应的映射,而是存在着映射误差。本文针对配电网重构问题的特点,提出将网络拓扑约束处理和映射关系有机结合的动态调整策略,以提高整数粒子群优化的性能。

3 动态调整策略

3.1 问题解的编码

在配电网重构中,问题解的编码是一个重要环节。以 0、1 来设置所有开关状态的问题解编码方式,所有状态为 1 的开关对应的支路构成开环运行时的连通支路集合,这样虽然简单直观,但是解向量的维数较大,优化过程中容易产生大量的不可行解,影响粒子群算法优化的速度。由于配电网具有闭环设计、开环运行的特点,当所有开关闭合后,配电网必然产生若干闭合环路,将包含支路数最少的闭合环路定义为一个基本环路。为了满足配电网开环运行的网络拓扑约束,每个基本环路必须有 1 个开关断开^[8]。根据这个特点,本文采用以网络中基本环路数量作为问题解的维数、环路开关号为解内容的编码方式^[8,11-12]。图 1 是 IEEE33 测试系统^[13]的拓扑结构图。

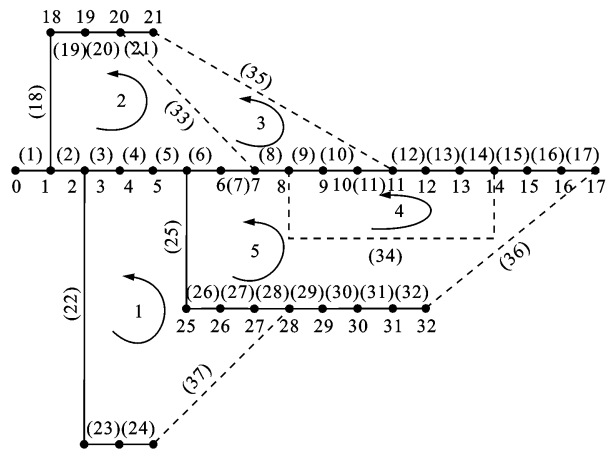


图 1 IEEE33 测试系统拓扑结构图

如图 1 所示,IEEE33 一共有 5 个基本环路,那么问题解的维数就是 5。每一维变量的搜索空间是环路的开关号,这是离散的整数值。对于每一维变量而言,也可以将对应的离散整数值转换成从 0 开始的顺序整数值,这是编程实现的问题,没有实质的影响。

相对于直观的 0、1 编码方式,采用基本环路的解的编码方式减少了解的维数和不可行解的产生,但是不能完全避免产生不可行解。当所选择断开的开关处于不同基本环路的公共边时,将出现不可行解。本文提出的动态调整策略可以有效地解决这一问题。

3.2 问题解空间动态调整策略

定义 L_j 是基本环路 j 的拓扑可行解空间,也就

是问题解向量第 j 维变量的拓扑可行解空间; N_j 是基本环路 j 的所有开关的集合,也是问题解向量第 j 维变量的解空间; J_j 是基本环路 j 的公共环路开关的集合,且定义如下

$$J_j = \bigcup_{h=1}^{j-1} (N_h \cap N_j) \quad (12)$$

动态调整策略数学表述为

$$L_j = \begin{cases} N_j - J_j, & \text{if } \exists h \in J_j, h = 1, 2, \dots, j-1 \\ N_j, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

$$l_{i,j}^k = L_j[\text{round}(x_{i,j}^k)] \quad (14)$$

式中: $\text{round}(\cdot)$ 表示取最接近的整数; $L_j[\text{round}(x_{i,j}^k)]$ 的含义是取 L_j 的第 $\text{round}(x_{i,j}^k)$ 个元素。

问题解空间动态调整策略运用于问题解向量的初始化阶段。问题解的每一维变量的搜索空间定义为拓扑可行解空间,随着前面维变量的情况作出动态的调整,不是固定的搜索空间。由于粒子向量是实数向量的形式,属于连续空间,而问题解空间是离散的整数空间,需要对实数变量通过取整函数进行截断,从而建立起粒子搜索空间和问题解空间的映射关系。图 2 给出了问题解向量初始化流程图。

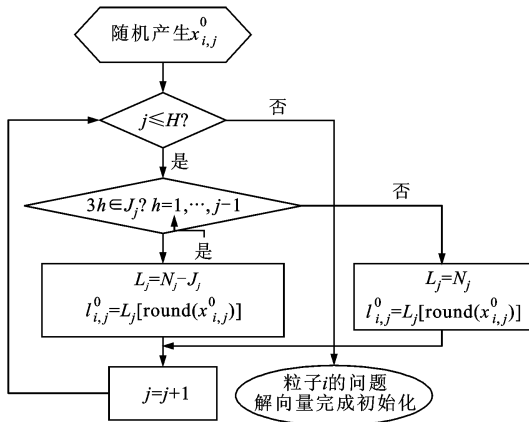


图 2 问题解向量初始化流程图

以 IEEE33 测试系统为例,给出 N_j 和 J_j 如下

$$N_1 = [3, 4, 5, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 37]$$

$$N_2 = [3, 2, 4, 18, 5, 19, 6, 20, 7, 33]$$

$$N_3 = [8, 21, 9, 35, 33, 10, 11]$$

$$N_4 = [9, 12, 10, 13, 11, 14, 34]$$

$$N_5 = [6, 15, 7, 16, 8, 17, 25, 29, 26, 30, 27, 31, 28, 32, 34, 36]$$

$$J_1 = \emptyset$$

$$J_2 = [3, 4, 5]$$

$$J_3 = [33]$$

$$J_4 = [9, 10, 11]$$

$$J_5 = [6, 7, 8, 25, 26, 27, 28, 34]$$

注意 N_j 中对于属于 $N_j - J_j$ 的元素实行交错排列,以满足粒子位置变量截断方式动态调整的需要。

3.3 位置变量截断方式动态调整

在问题解空间初始化阶段,可以直接通过问题解空间的动态调整策略,避免产生拓扑结构不可行的解,但是在更新阶段,没有办法直接作用,因为当前的拓扑可行解空间无法直接约束粒子的更新过程。为此,提出粒子位置变量截断方式动态调整策略。粒子位置向量中的每一维实数变量可以映射得到问题解向量中对应的一个离散解,即一个需要断开的开关编号。由更新公式产生的粒子位置向量中的每一个变量,如果按照 $\text{round}(x_{i,j}^k)$ 截断后映射得到的开关编号,与已经更新得到开关编号处于同一公共边(即这组问题解将成为不可行解),就将该粒子的这一维变量的截断方式动态调整为 $\text{round}(x_{i,j}^k + 1)$,映射得到需要断开的开关编号。由于映射的规则是得到基本环路的开关集合 N 中第 $\text{round}(\cdot)$ 个开关编号,且开关编号是公共边开关编号和非公共边开关编号交错排列,所以动态调整后映射得到的一定是拓扑可行解。图 3 给出了问题解向量更新流程图,数学表述如下

$$l_{i,j}^k = \begin{cases} N_j[\text{round}(x_{i,j}^k + 1)], & \text{if } \exists l_{i,a}^k \in J_j (a < j) \text{ 且 } N_j[\text{round}(x_{i,j}^k)] \in J_j \\ N_j[\text{round}(x_{i,j}^k)], & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $N_j[\text{round}(x_{i,j}^k)]$ 表示取 N_j 中第 $\text{round}(x_{i,j}^k)$ 个元素。粒子位置变量截断方式动态调整策略应用于更新过程,确保产生的问题解向量都是拓扑可行解。

从粒子连续空间映射到问题离散空间的过程中,整数群优化算法存在着截断误差。截断方式的动态调整策略本质上是将潜在的拓扑不可行解视作截断误差偏大而自动优化处理,也可以认为是通过调整截断误差获得拓扑可行解,从而提高解的质量。

在评估目标函数值时,潮流计算采用前推回代法,潮流的收敛条件是前后两次迭代所有节点中最大的电压幅值差小于 10^{-5} kV。采用本文算法求解配电网重构的整个流程如图 4 所示,其中包含了基于动态调整策略的问题解向量初始化过程和问题解向量更新过程。

4 算例分析

采用 IEEE33 测试算例^[13] 和美国 PG&E69 算

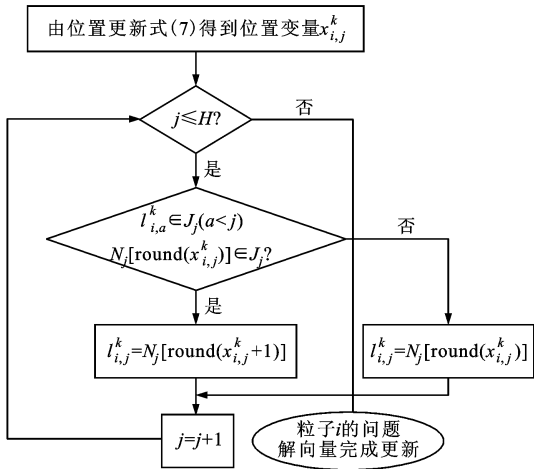


图 3 问题解向量更新流程图

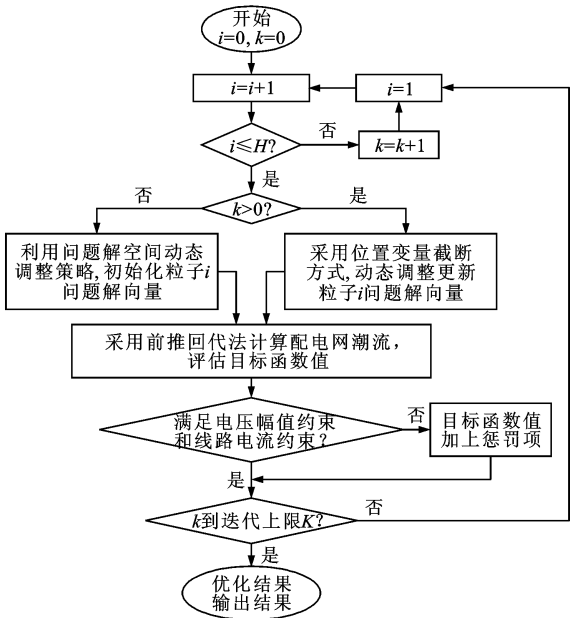


图 4 本文算法的流程图

例^[14]检验本文提出的算法. 整数粒子群优化算法的参数:种群大小为 20,最大迭代次数为 50,惯性权重最大值为 1.2,惯性权重最小值为 0.2,学习因子为 0.5. 计算环境为 Windows XP SP2 操作系统,AMD Turion CPU 1.81 GHz、2 GB 内存.

4.1 IEEE33 算例分析

IEEE33 测试算例有 32 个负荷节点,1 个电源节点,5 个联络开关. 初始状态断开的开关是 33、34、35、36、37,初始网损为 202.71 kW,最低的节点电压(标么值)为 0.913 1. 使用本文提出的算法反复重构 200 次,并将结果与其他算法的结果进行了比较,结果如表 1 所示. 由于计算环境的差异,故未给出计算效率的比较. 本文平均计算时间为 0.265 s.

从表 1 结果可以看出,本文提出的算法在重构后,最小网损比改进禁忌搜索算法和调和算法略高,但比遗传算法的结果要好,而最低的节点电压比 4 种算法都要高. 实际上,从重构的方案看,本文的最优重构结果与其他算法的类似,之所以网损的结果有差异,主要源于配电网潮流和网损计算时有一定的数值误差. 比较结果充分证明了本文算法的有效性. 另外,200 次重构结果中,本文算法的最大网损值、平均网损值、平均网损减少值以及标准差都明显好于其他算法,说明本文提出的算法具有良好的鲁棒性.

表 1 IEEE33 优化结果比较

项目	遗传 算法 ^[15]	改进 遗传 算法 ^[16]	改进禁 忌搜索 算法 ^[17]	调和 算法 ^[18]	本文 算法
最小网损 /kW	141.60	139.50	139.28	138.06	139.50
最大网损 /kW	202.70	198.40	196.30	195.10	156.13
平均网损 /kW	166.20	164.90	163.50	152.33	142.89
标准差 /kW	14.53	13.24	12.11	11.28	2.62
平均网损 减少比例/%	18.01	18.65	19.34	24.85	29.51
最小网损 减少比例/%	30.15	31.20	31.29	31.89	31.17
最低的节 点电压	0.929 0	0.931 5	0.921 0	0.934 2	0.937 8

4.2 PG&E69 算例分析

PG&E69 算例有 69 条母线、5 个联络开关,初始状态断开的开关有 69、70、71、72、73,初始网损为 225.32 kW. 本算例优化结果的对比见表 2,算例的 200 次重构的结果见表 3,其中平均计算时间为 0.515 s.

表 2 PG&E69 算例的优化结果对比

项目	混合粒子 群算法 ^[6]	免疫 算法 ^[7]	粒子群 算法 ^[4]	本文 算法
重构后网 损/kW	99.69	101.01	99.74	99.71
最低的节 点电压	0.943	0.931	0.942	0.942

表 3 PG&E69 算例 200 次重构仿真结果

最小网损 /kW	最大网损 /kW	平均网损 /kW	标准差 /kW	重构方案 (断开的 开关编号)	平均网损减少 比例/%	最小网损减少 比例/%
99.71	132.20	106.25	3.85	14,44,50, 69,72	52.84	55.75

从表 2 可以看出,随着网络规模的增大,本文的算法在最小网损和最低的节点电压上与其他算法类似,进一步证明了本文算法的有效性.表 3 的结果表明,在初始网损为 225.32 kW 的情况下,本文算法的平均网损减少只比最小网损减少低 3 个百分点,且标准差仅为 3.85 kW,说明本文算法具有良好的稳定性.图 5 和图 6 给出了两个算例在 200、300、400、500、600、700、800 次重构之后的网损均值和方差的情况.从图中可以看到,重构结果的网损均值和标准差都比较稳定,说明本文算法的结果基本不受仿真次数的影响,具有良好的鲁棒性.

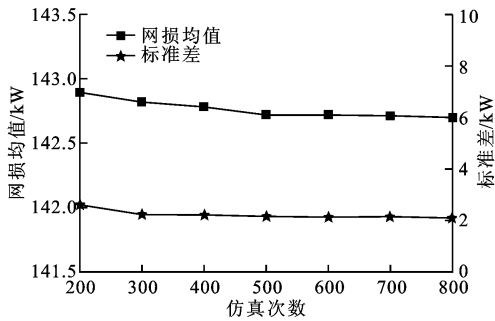


图 5 IEEE33 不同仿真次数的结果

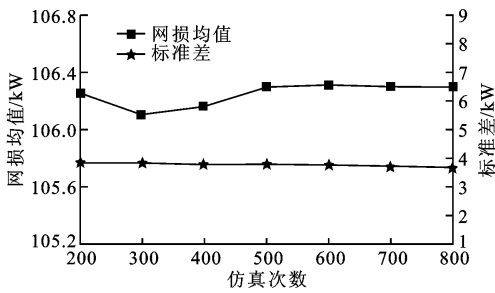


图 6 PG&E69 算例不同仿真次数的结果

5 结 论

本文提出的动态调整策略适用于配电网重构,将其与整数粒子群优化算法相结合,可以实现高效的配电网重构.将网络拓扑约束的处理与粒子连续

运动空间到问题离散解空间的映射关系有机结合的动态调整策略,不仅可以有效地避免算法在初始化和更新过程中不产生拓扑不可行解,而且还可以提高解的质量.对两个不同算例的多次求解表明,本文算法不仅可以有效地解决配电网重构问题,而且算法具有良好的鲁棒性.

参考文献:

[1] 孙健,江道灼.一种多目标配电网重构新算法[J].电力系统自动化,2003,27(20):57-60.
SUN Jian, JIANG Daozhuo. A new multi-objective algorithm for distribution network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 57-60.

[2] 雷健生,邓佑满,张伯明.综合潮流模式及其在配电系统网络重构中的应用[J].中国电机工程学报,2001,21(1):57-62.
LEI Jiansheng, DENG Youman, ZHANG Bomng. Hybrid flow pattern and its application in network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1): 57-62.

[3] 毕鹏翔,刘健,刘春新,等.配电网重构的改进遗传算法[J].电力系统自动化,2002,26(2):57-61.
BI Pengxiang, LIU Jian, LIU Chunxin, et al. A refined genetic algorithm for power distribution network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 57-61.

[4] 许立雄,吕林,刘俊勇.基于改进粒子群优化算法的配电网重构[J].电力系统自动化,2006,30(7):27-30.
XU Lixiong, LÜ Lin, LIU Junyong. Modified particle swarm optimization for reconfiguration of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 27-30.

[5] 陈根军,李继洸,唐国庆.基于 Tabu 搜索的配电网重构算法[J].中国电机工程学报,2002,22(10):28-33.
CHEN Genjun, LI Jiguang, TANG Guoqing. A Tabu search approach to distribution network reconfiguration for loss reduction[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10):28-33.

[6] 李振坤,陈星莺,余昆,等.配电网重构的混合粒子群算法[J].中国电机工程学报,2008,28(31):35-41.
LI Zhenkun, CHEN Xingying, YU Kun, et al. Hybrid particle swarm optimization for distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2008,28(31):35-41.

- [7] 蒙文川,邱家驹. 基于免疫算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17):26-29.
MENG Wenchuan, QIU Jiaju. An artificial immune algorithm to distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17):26-29.
- [8] 王超学,崔杜武,崔颖安,等. 使用基于中医思想的蚁群算法求解配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2008,28(7):13-18.
WANG Chaoxue, CUI Duwu, CUI Ying'an, et al. Distribution network reconfiguration using a novel ant colony system based on traditional Chinese medicine theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2008,28(7):13-18.
- [9] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization[C] // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway, NJ, USA:IEEE, 1995: 1942-1948.
- [10] 沈林成,霍霄华,牛轶峰. 离散粒子群优化算法研究现状综述[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(10): 1986-1990,1994.
SHEN Lincheng, HUO Xiaohua, NIU Yifeng. Survey of discrete particle swarm optimization algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(10): 1986-1990,1994.
- [11] MENDOZA J, LOPEZ R, MORALES D, et al. Minimal loss reconfiguration using genetic algorithms with restricted population and addressed operators real application[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006,21(2):948-954.
- [12] AHUJA A, PAHWA A. Using ant colony optimization for loss minimization in distribution networks[C] // The 37th Annual North American Power Symposium. Ames, Iowa, USA; IEEE Service Center, 2005: 470-474.
- [13] 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.
- [14] BARAN M E, WU F F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989,4(1):725-734.
- [15] NARA K, SHIOSE A, KITAGAWA M, et al. Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1992, 7(3):1044-1051.
- [16] ZHU J Z. Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm[J]. Electric Power System Research, 2002,62:37-42.
- [17] ZHANG D, FU Z, ZHANG L. An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems[J]. Electric Power System Research, 2007,77:685-694.
- [18] RAO R S, NARASIMHAM S V L, RAJU M R, 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.

(编辑 杜秀杰)