

# 基于 Multi-agent 和粒子群引导最小生成树的配电网重构算法

李传健, 刘前进

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 在最小生成树的基础上提出了粒子群引导的最小生成树算法, 并结合粒子间互学习, 优秀粒子自学习, 优胜劣汰机制和 Multi-agent 系统的特点, 构成了一种新的配电网重构算法。该方法加强了信息在环境中的传递, 有效地解决了一般最小生成树的盲目性, 边值的难以确定性和改进粒子群优化算法仿生学意义的不明确性等缺点。在 Multi-agent 系统中, 粒子通过竞争与合作, 提高了粒子间的相互交流, 加快了粒子向全局最优优点靠拢。对粒子进行互学习和自学习操作, 使算法的收敛速度得到进一步的提高。通过对 PG&E69 系统进行仿真, 结果表明提出的算法具有计算速度快, 收敛性好, 求解可靠等优点。

**关键词:** 电力系统; 配电网重构; 粒子群优化算法; 最小生成树; Multi-agent 系统; 学习机制

## A distribution network reconfiguration algorithm based on Multi-agent system and minimum spanning tree led by particle swarm optimization

LI Chuan-jian, LIU Qian-jin

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** A novel distribution network reconfiguration algorithm is proposed, which is based on minimum spanning tree algorithm led by particle swarm optimization proposed on the basis of minimum spanning tree, and combines with collaborative learning between particles, self-learning of excellent particles, survival of the fittest and the features of multi-agent system. The proposed method enhances information transmission in the process, and effectively solves the problems of the blindness of the minimum spanning tree, uncertainty of the value of edge, bionic significance ambiguity of improved particle swarm optimization and so on. In the Multi-agent system, the approach improves the interaction between particles and finds the global optimal solution quickly by competitive and cooperative operation. The convergence speed is further improved through collaborative learning and self-learning. The proposed method is evaluated on a typical example of PG&E 69 nodes distribution system. The result shows that the method has good computation efficiency, good convergence characteristics and high-quality solutions, etc.

**Key words:** power system; distribution network reconfiguration; particle swarm optimization; minimum spanning tree; Multi-agent system; learning mechanism

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)06-0024-05

## 0 引言

配电网重构是优化配电系统运行、降低损耗、提高电压质量的重要手段。由于配电网一般具有闭环设计, 开环运行的特点, 所以配电网重构就是通过改变分段开关和联络开关的开/合状态来改变网络的拓扑结构, 以此来达到降低网损、提高电压质量、故障隔离等目的。

用于处理配电网重构的算法很多, 但是利用图论来解决此问题的相关介绍并不多。文献[1]则将最小生成树 (Minimum Spanning Tree, MST) 算法用于配电网重构, 通过动态调整各条边的权值, 进

行支路交换操作, 最终得到最优解。这类算法虽然都采用图论的理论避开了环网结构, 提高了搜索效率, 但是它们有一个共同的弊端, 即随机搜索或者穷举搜索, 具有一定的盲目性、随意性和自发性。

粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法也被用于处理配电网重构问题。基本的粒子群算法是一种处理连续变量的算法, 但是在配电网重构过程中, 确定支路的通断是用离散变量来表示的, 所以不能直接采用基本粒子群优化算法求解配电网重构问题。有很多学者对 PSO 算法做了一定的修改, 如文献[2]将基本 PSO 算法应用于二进制编码, 并做了大量的研究。文献[3]将高斯分布和二进制

PSO 算法结合,提出改进的二进制 PSO 算法,并结合禁忌搜索算法进行配电网重构。文献[4]将二进制 PSO 算法和离散 PSO 算法相结合,提出一种混合 PSO 算法,有效地将粒子群这一连续算法用于离散优化的配电网重构中,但是这些算法仿生学意义较为模糊,且使 PSO 算法复杂化。

由于这两种算法各自存在着不足,本文将最小生成树理论与粒子群优化算法相结合,提出一种新的配电网重构算法,有效地解决了这两种理论各自存在的不足。此外,本文还利用 Multi-agent 系统便于信息交换的特点,在提出的算法中加入粒子的互学习和自学习及优胜劣汰进化机制,加快最优值的信息传递,提高算法的收敛性。

## 1 配电网重构的数学模型<sup>[5]</sup>

配电网重构一般以降低配电网的线路损耗,提高配电网的电压质量,提高供电可靠性,均衡负荷化等为目标,也可以综合上述多个指标为目标。本文采用以网损最小作为目标函数,其表达式为:

$$\min f = \sum_{i=1}^{N_b} k_i R_i \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{U_i^2} \quad (1)$$

式中:  $N_b$  为网络中支路总数;  $P_i$  和  $Q_i$  为流过支路  $b_i$  的有功功率和无功功率;  $R_i$  为支路  $b_i$  的支路电阻;  $U_i$  为支路  $b_i$  的首端电压;  $k_i$  为开关的状态变量, 0 表示打开, 1 表示闭合。

配电网重构的目标是使  $f$  最小,且满足下面的约束条件,其中包括:潮流方程约束,节点电压及支路电流约束,网络拓扑约束等。即

$$A_i = I \quad (2)$$

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (3)$$

$$I_i \leq I_{i,\max} \quad (4)$$

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

式中:  $A$  为节点/支路关联矩阵;  $i$  为所有支路的复电流矢量;  $I$  为所有节点的复电流注入矢量;  $U_i$ 、 $U_{i,\max}$  和  $U_{i,\min}$  为节点  $i$  的电压及其允许的电压上下限值;  $I_i$  和  $I_{i,\max}$  为支路  $b_i$  的电流及其上限;  $g$  为当前的网络结构;  $G$  为所允许的辐射状网络结构集合,即既无环网又无孤岛的网络结构集合。

## 2 粒子群引导的最小生成树算法

由于单纯采用 PSO 或 MST 来解决配电网重构问题都各自存在着不足, MST 存在盲目搜索和边的权值难以确定等问题, PSO 本身又不合适用于处理离散优化问题。针对上述情况,本文提出了粒子群

引导的最小生成树算法,此算法很好地解决了上述问题,即不修改粒子群的修正公式,保留了粒子群算法的仿生学意义,同时又有目的、有方向地引导最小生成树向最优结构进行生成;反过来,最小生成树算法又可以避免 PSO 优化时生成的大量无效解,提高了算法的计算速度。本文最小生成树算法采用较为常用的 Kruskal 算法。本算法将粒子的位置作为边的权值,在优化时,依据自身最优和当前最优对粒子运动方向进行指导,用 PSO 优化机制修改待优化粒子的位置和速度,从而更新各边的权值,以此改变最小生成树。其过程描述如下:首先,随机初始化粒子的位置与速度,让粒子随机遍布整个解空间。将粒子的位置值视为网络各条边的权值,即粒子位置的每一维对应一条边,该维的值就等于边的权值。通过 Kruskal 算法生成权值最小的树,即一个粒子表示一个树状网络,计算其网络所对应的目标函数  $f$ 。其次将其  $f$  与自身最优和当前最优位置对应网络的目标函数进行比较,如果粒子的当前位置比该粒子以前发现的位置要好,那么更新自身最优位置,并将迄今为止,目标函数值最佳的位置保存在当前最优位置中。最后通过 PSO 修正公式 (6) 修改各个粒子的速度和位置,使下次目标函数  $f$  变小,且边的权值的相对大小向满足能生成目标函数值最优的网络结构变化。由此反复循环,不断修正,直到求出最优解。

PSO 修正公式如式 (6) 所示:

$$\begin{cases} v_{id} = wv_{id} + c_1r_1(p_{id} - x_{id}) + c_2r_2(p_{gd} - x_{id}) \\ x_{id} = x_{id} + v_{id} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $v_{id}$  和  $x_{id}$  为当前粒子第  $d$  维的速度和位置;  $p_{id}$  为粒子第  $d$  维自身当前所找到的最优解;  $p_{gd}$  为整个种群第  $d$  维目前找到的最优解;  $r_1$  和  $r_2$  为 [0,1] 之间的随机数;  $c_1$  和  $c_2$  为学习因子;  $w$  为惯性因子。

由上面的过程可以看出,采用粒子的位置作为边的权值具有以下两个优点: 1) 在迭代的过程中,能够根据目标函数修改边的权值; 2) 一定程度上能反映此边被选入后对目标函数的影响。粒子群引导的最小生成树算法从整体方向上考虑,有导向地改变各条边的权值,使生成的树更为有效。

## 3 基于 Multi-agent 新型混合粒子群算法

### 3.1 基于 Multi-agent 系统的互学习机制

MAS 是一种将若干 Agents 相互通信进行互学习来达到共同目标的一种系统算法<sup>[7]</sup>。首先,建立一个格子结构的环境,每个 Agent “居住”在格子当中,如图 1 所示。图 1 中每一个圆圈代表一个

Agent, 圆圈中的数据代表 Agent 所在位置。 $L_{size} \times L_{size}$  为总的格子数, 即粒子的种群数。每个 Agent 的邻居  $N_{i,j}$  定义为:

$$N_{i,j} = \{a_{i^1,j}, a_{i,j^1}, a_{i^2,j}, a_{i,j^2}\} \quad (7)$$

$$\text{其中: } i^1 = \begin{cases} i-1 & i \neq 1 \\ L_{size} & i = 1 \end{cases}; \quad i^2 = \begin{cases} i+1 & i \neq L_{size} \\ 1 & i = L_{size} \end{cases};$$

$$j^1 = \begin{cases} j-1 & j \neq 1 \\ L_{size} & j = 1 \end{cases}; \quad j^2 = \begin{cases} j+1 & j \neq L_{size} \\ 1 & j = L_{size} \end{cases}。$$

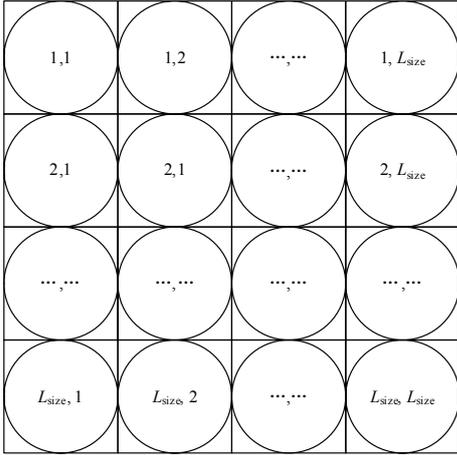


图 1 Agent 的环境结构

Fig.1 Structure of the Agent environment

从式 (7) 中可以看出, 每一个 Agent 可以与四个邻居相互感知, 共享学习知识, 同时与它们进行竞争和合作操作。假如 Agent  $a_{i,j}$ , 且  $x_{i,j} = (l_1, l_2, \dots, l_n)$  是其在优化问题解空间中的位置。 $m$  是其邻居中适应值最小的 Agent。如果满足式 (8), 则 Agent  $a_{i,j}$  为赢家, 否则, 它为输家。

$$f(a_{i,j}) \leq f(m) \quad (8)$$

如果  $a_{i,j}$  是赢家, 则它在解空间的位置保持不变。如果它是一个输家, 则它将由 PSO 修正公式 (6) 来进行更改。

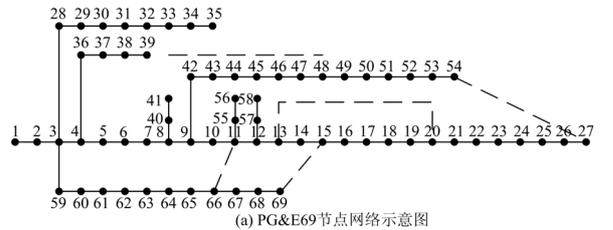
从上面的原理可以看出, 本文将 PSO 与 MAS 相结合, 将粒子视为 Agent, 生存在格子状环境中。通过与邻居的相互竞争与合作, 达成信息交换, 以此来实现与邻居的相互学习。在互学习过程中, 粒子自身的位置就是它所具有的知识, 其知识的优劣则由目标函数进行评估。目标函数值越好的粒子, 其知识的含金量就越高, 越值得其他粒子向它学习。算法中采用式 (6) 来更新在竞争中处于失败的粒子的位置, 即知识较差的粒子, 让它以自身最优和当前最优为认知导向有目的地进行相互学习, 使得粒子不仅仅与其邻居进行相互学习和竞争, 还与当前

最优的粒子进行信息交换, 加快信息的传递速度, 提高了算法的收敛性。

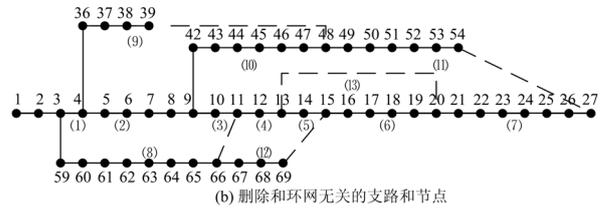
### 3.2 优秀 Agent 的自学习机制

所有的粒子除了与同伴的相互学习以外, 还应该通过自身所拥有的知识进行自学习, 进一步提高求解问题的能力。本文提出一种小范围自学习模型, 对于在 MAS 中获得胜利的 Agent, 由于其求解能力很高, 自学习能力也相对较高, 所以让它在自身小范围的求解空间中用搜索技术来实现自学习功能。

对于配电网重构问题来说, 在进行小范围搜索的同时, 还必须保证网络的连通性与开环性。对网络进行简化, 使其有利于自学习的操作。如图 2 (a) 所示, 为 69 节点的配电网, 其中有些支路不在任何环路上, 如 28-35 和 8-40-41 这样的支路, 在自学习机制中可以不予考虑; 另外, 如支路 4-5 断开和支路 5-6 断开, 虽然它们的损耗有所不同, 但从断开回路的角度来看, 效果是一样的, 则将其合并为一条支路组。通过以上两步简化后, 得到图 2 (b)。这样网络只有 13 条支路组, 用最小生成树生成网络后, 其断开支路必定在 13 条支路组中, 所以只需判断当前网络断开的支路在哪个支路组中, 再通过闭合联络开关, 断开联络开关左右的开关 (在同一支路组中) 来寻找当前粒子在自身小范围内的最优值, 由此实现自学习机制。通过自学习, 用寻找到的最小适应值的粒子  $\bar{a}_{i,j}$  代替  $a_{i,j}$ , 完成  $a_{i,j}$  的自学习操作, 使本来适应值较好的粒子取得更好的解值, 提高了算法的收敛性。



(a) PG&E69 节点网络示意图



(b) 删除和环网无关的支路和节点

图 2 配电网简化示意图

Fig.2 Process of the simplifying of distribution network

### 3.3 混合粒子群算法

结合粒子群引导的最小生成树算法, MAS 互学习和优秀粒子自学习机制的特点, 本文提出一种基于 Multi-agent 新型混合粒子群优化配电网重构算法 (NHMAPSO), 并在此基础上融入优胜劣汰的自然

选择机制。优胜劣汰机制的操作过程为：对每一个粒子计算其适应值，用适应值来衡量粒子对生存环境的适应程度，适应度高的个体获得更多的复制机会，适应度低的个体复制的次数少，甚至逐渐灭绝。适应度函数通过式(9)将目标函数进行变换，然后通过式(10)计算其选择概率。采用轮盘赌的方法进行选择。

$$f'_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(f-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

$$p_i = \frac{f'_i}{\sum f'_i} \quad (10)$$

式中： $f'_i$  为正态概率密度函数； $f$  为目标函数值； $\mu$  和  $\sigma$  为数学期望和方差。

采用 NHMAPSO 算法的计算过程为图 3：

Step1, 输入初始数据及随机初始化粒子值 ( $N$  个)；

Step2, 对每个粒子对应的网络进行潮流计算，并计算其网络损耗；

Step3, 迭代次数  $t = t + 1$ ；

Step4, 对粒子群采用 MAS 的合作与竞争机制，将粒子分为胜利的粒子和失败的粒子；

Step5, 对失败的粒子进行粒子群引导的最小生成树算法进行修改，对赢家进行自学习操作；

Step6, 计算粒子的适应值，采用轮盘赌进行优胜劣汰操作，选取  $N$  个粒子进入下一次迭代；

Step7, 判断是否满足收敛条件或者是否超过迭代次数，是，进入 Step8，否，返回 Step2；

Step8, 输出结果。

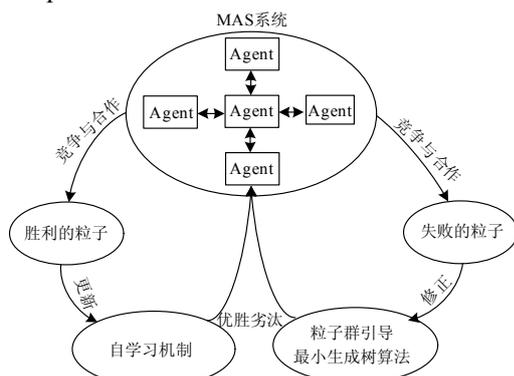


图 3 NHMAPSO 系统逻辑图

Fig.3 Logic diagram of NHMAPSO

## 4 算例分析

用本文提出的算法对文献[8]的算例进行仿真试验。该系统是美国 PG&E 12.66 kV 的配电网，有 74 条支路，5 个联络开关，系统有功负荷为 3.802

MW，无功负荷为 2.694 Mvar。系统网络结构及编号如图 2 所示。取粒子群数为 36， $c_1=c_2=2$ ，迭代次数为 50 次，潮流计算采用牛顿拉夫逊法，前后两次迭代过程所有节点的最大电压幅值修正量小于  $10^{-6}$  kV 为收敛条件。配电网重构前后的比较见表 1。

表 1 重构前后结果

Tab.1 Result before and after reconfiguration

| 情形  | 打开开关集合 |       |       |       |       | 网损/<br>kW | 最低节点<br>电压/pu |
|-----|--------|-------|-------|-------|-------|-----------|---------------|
|     | 重构前    | 39-48 | 65-66 | 54-27 | 69-15 | 13-20     | 224.39        |
| 重构后 | 12-13  | 11-66 | 47-48 | 50-51 | 13-14 | 99.429    | 0.942 5       |

由表 1 中的结果可以看出，重构前后网损区别很大，重构后网损由 224.39 kW 降低到 99.429 kW，降低了 55.69%。节点电压也有了很大的改善，最低电压从 0.908 2 提高到 0.942 5。从图 4 所显示的本算法收敛过程来看，本文提出的算法在 26 代左右就可以很好地收敛到最优值。在 Window 7 操作系统，Intel i5 430 M、2 G 内存的计算机配置下，该算例的平均计算时间约为 20.808 s。重构前后的各节点电压比较如图 5 所示。

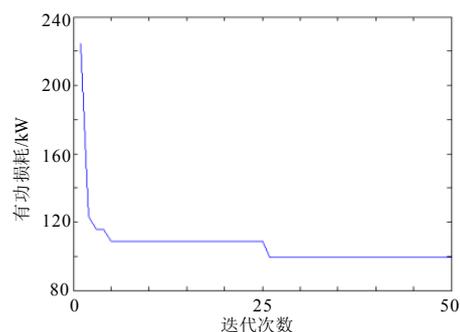


图 4 本算法全局极值的收敛曲线

Fig.4 Convergence curves of the three different methods

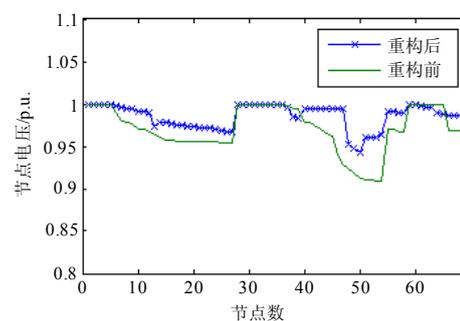


图 5 重构前后节点电压

Fig.5 Node voltage before and after reconfiguration

将计算结果分别与二进制粒子群算法<sup>[4]</sup>、改进模拟植物生长法<sup>[9]</sup>、家族优生学算法<sup>[10]</sup>、动态规划算法<sup>[11]</sup>、模糊遗传算法<sup>[12]</sup>的计算结果进行比较，

如表 2 所示。

表 2 与其他算法的比较

Tab.2 Comparison with other methods

| 计算结果      | 本文的<br>算法 | 混合粒<br>子群算<br>法 | 改进模拟<br>植物生长<br>法 | 家族优生<br>学算法 | 动态规<br>划算法 |
|-----------|-----------|-----------------|-------------------|-------------|------------|
| 重构后的网损/kW | 99.43     | 99.67           | 100.96            | 101.01      | 99.06      |
| 最低节点电压/pu | 0.943     | 0.943           | 0.933             | 0.927       | 0.930      |

通过 MAS 系统，加强了 PSO 对最小生成树的引导作用，避免了粒子过早收敛于局部最优的缺点。经过连续多次运行本算法程序，都能较好地收敛于最优解。这说明了本算法具有优越的稳定性和全局最优性。

### 5 结论

(1) 粒子群引导的最小生成树算法克服了一般最小生成树的穷举性和盲目性，同时又保留了粒子群的仿生学意义，解决了改进粒子群算法仿生学意义不明确的缺点。

(2) 在 MAS 中，构造一个格子状的环境，粒子通过竞争与合作机制，提高了粒子间的相互交流，不像在基本 PSO 中粒子的单独作用，这样有利于粒子向全局最优点靠拢，再加上粒子的互学习和自学习机制，提高算法的收敛速度。

(3) 通过对算例进行仿真，结果表明，该方法具有较好的计算效率和收敛稳定性，能够很好地处理配电网重构问题。

### 参考文献

[1] 王磊, 吕娟, 张强. 基于最小生成树算法的配电网重构[J]. 陕西电力, 2009, 37(1): 13-17.  
WANG Lei, Lü Juan, ZHANG Qiang. Distribution network reconfiguration based on minimum spanning tree algorithm[J]. Shaanxi Electric Power, 2009, 37(1): 13-17.

[2] Kennedy J, Eberhart R C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm[C]. //Proceedings of the 1997 Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Piscataway, NJ: IEEE service Centre, 1997: 4104-4109.

[3] 卢志刚, 杨国良, 张晓辉, 等. 改进二进制粒子群优化算法在配电网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(7): 30-34.  
LU Zhi-gang, YANG Guo-liang, ZHANG Xiao-hui, et al. Reconfiguration of distribution network based on improved particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(7): 30-34.

[4] 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 Zhen-kun, CHEN Xing-ying, YU Kun, et al. Hybrid particle swarm optimization for distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 35-41.

[5] 刘健, 毕鹏翔, 董海鹏, 等. 复杂配电网简化分析与优化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.  
LIU Jian, BI Peng-xiang, DONG Hai-peng, et al. Analysis and optimization on power distribution network[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

[6] 赵波, 曹一家. 电力系统无功优化的多智能体粒子群优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 1-7.  
ZHAO Bo, CAO Yi-jia. A multi-agent particle swarm optimization algorithm for reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 1-7.

[7] 段涛, 陈维荣, 戴朝华, 等. 多智能体搜寻者优化算法在电力系统无功优化中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 10-15.  
DUAN Tao, CHEN Wei-rong, DAI Chao-hua, et al. Reactive power optimization in power system based on multi-agent seeker optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 10-15.

[8] Baran M E, Wu F F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 725-732.

[9] 于永哲, 黄家栋. 基于改进模拟植物生长法的配电网网络重构[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 40-43.  
YU Yong-zhe, HUANG Jia-dong. Reconfiguration of distribution network based on improved plant growth simulation algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 40-43.

[10] 麻秀范, 张粒子, 孔令宇. 基于家族优生学的配网重构[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 97-102.  
MA Xiu-fan, ZHANG Li-zi, KONG Ling-yu. Reconfiguration of distribution network based on family eugenics based evolution algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 97-102.

[11] 刘柏私, 谢开贵, 周家启. 配电网重构的动态规划算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 29-34.  
LIU Bo-si, XIE Kai-gui, ZHOU Jia-qi. Electrical distribution networks reconfiguration using dynamic programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 29-34.

[12] 刘莉, 陈学允. 基于模糊遗传算法的配电网网络重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 66-69.  
LIU Li, CHEN Xue-yun. Reconfiguration of distribution networks based on fuzzy genetic algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 66-69.

(下转第 33 页 continued on page 33)

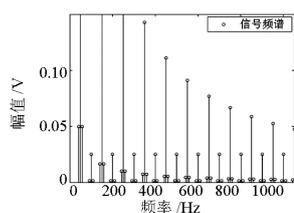


图 4 包络分解法幅频图

Fig.4 Spectrum of envelope decomposition method

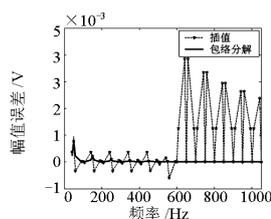


图 5 幅值误差图

Fig.5 Amplitude error of two methods

## 5 结论

平稳工频信号一定不含间谐波, 含间谐波的工频信号一定不是平稳工频信号, “产生”间谐波的最主要原因是工频信号的幅值非平稳。从这一认识出发, 建立了含间谐波的非平稳工频信号的数学模型, 导出了间谐波与工频信号包络的直接关系——公式(9)。从公式(9)出发, 引出了间谐波分析的新方法——包络分解法。

包络分解法主要包括三个部件: (1) 从工频信号中提取包络, (2) 对包络按频率分解, (3) 从包络分解结果计算间谐波的频率、幅值。包络的分解可以用滤波器、DFT、Wavelet、HHT 等有效方法。包络分解法排除了整次谐波频谱泄漏产生的虚假间谐波, 用于实际电网时它提供的间谐波信息更为真实、精确。

## 参考文献

- [1] 王柏林. 随机环境下电力系统谐波分析算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 22-25.

- WANG Bo-lin. Algorithms for harmonic analysis of power systems under stochastic condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 22-25.
- [2] Hao Q, Rongxiang Z, Tong C. Interharmonics analysis based on interpolating windowed FFT algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 1064-1069.
- [3] Liu Z, Himmel J, Bong K W. Improved processing of harmonics and interharmonics by time-domain averaging[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(4): 2370-2380.
- [4] Zhu T X. Exact harmonics/interharmonics calculation using adaptive window width[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2279-2288.
- [5] Morsi W G, El-Hawary M E, Suitable mother wavelet for harmonics and interharmonics using wavelet packet transform[C]. //IEEE Canadian Conf on Electrical and Computer Engineering, 2007: 748-752.
- [6] 田伟, 王洪希, 白晶. 基于互高阶谱MUSIC法的间谐波检测[J]. 继电器, 2007, 35(22): 49-52.
- TIAN Wei, WANG Hong-xi, BAI Jing. Inter-harmonics parameter estimation on crosshigh-spectrum based on music method[J]. Relay, 2007, 35(22): 49-52.
- [7] 牛卢璐. 基于ESPRIT的谐波和间谐波参数估计方法[J]. 继电器, 2007, 35(9): 37-40.
- LIU Lu-lu. ESPRIT based method for harmonics and interharmonics parameters estimation[J]. Relay, 2007, 35(9): 37-40.
- [8] 马秉伟, 周莉, 刁均伟. 基于现代谱估计方法的间谐波检测[J]. 继电器, 2005, 33(3): 25-27.
- MA Bing-wei, ZHOU Li, DIAO Jun-wei. Interharmonics measurement using modern spectral estimation method[J]. Relay, 2005, 33(3): 25-27.

收稿日期: 2010-04-07; 修回日期: 2010-06-02

作者简介:

王柏林(1948-), 男, 教授, 研究方向电能质量监测理论与装置、谐波分析方法与谐波测量仪、IEC 电能质量测量标准、PQDIF 等方面;

熊杰锋(1976-), 男, 博士生, 研究方向为电能质量、谐波分析。E-mail: jiefengxiong@163.com

(上接第 28 页 continued from page 28)

收稿日期: 2010-04-06; 修回日期: 2010-05-14

作者简介:

李传健(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向是配电

系统运行、控制及其自动化; E-mail: ewebdak@163.com

刘前进(1967-), 男, 博士, 副教授, 主要从事继电保护教学及电力系统保护、录波、质量分析等设备开发, 电力系统图模一体化数字化仿真系统的研究。