

# 序优化理论在配电网重构中的应用

李辰雷<sup>1,2</sup>, 卫志农<sup>1</sup>, 韩连山<sup>1</sup>

(1. 河海大学可再生能源发电技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 210098;

2. 国网连云港供电公司, 江苏 连云港 222000)

**摘要:** 配电网重构是非线性组合优化问题, 针对大规模配电网解空间过于庞大的特点, 提出基于序优化理论的配电网重构算法。该算法从配电网运行和开关调整方式入手, 借助开关支路交换法简化网络结构, 得到解环生成原始可行解空间的方法。运用序优化理论制定一种按照评估值优先准则, 进行解集的选择和排序, 改进的粗糙函数不仅能够进行序曲线的确定, 而且能去除大量的无效解, 提高重构速度。通过实际 24 节点和美国 PG&E69 节点系统的算例测试, 验证了方法的有效性。

**关键词:** 序优化; 配电网重构; 粗糙函数; 支路交换法; 网损

## Application of ordinal optimization in distribution network reconstruction

LI Chenlei<sup>1,2</sup>, WEI Zhinong<sup>1</sup>, HAN Lianshan<sup>1</sup>

(1. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering of Ministry of Education, Hohai University,

Nanjing 210098, China; 2. State Grid Lianyungang Power Supply Company, Lianyungang 222000, China)

**Abstract:** Reconstruction of distribution network is a nonlinear combinatorial optimization problem. Aiming at the feature that the solution space of the large-scale distribution network is too large, this paper proposes an algorithm for distribution network reconstruction based on ordinal optimization theory. In accordance with the operations of distribution network and switching mode, the proposed algorithm can simplify the network structure by exchanging switch-branches to obtain the ring opening, which generates the original feasible solution domain. Next, a selection criterion in line with priorities of the assessing values is defined by using the ordinal optimization theory to select and sort the solution set. In this way, the improved rough function not only can determine the ordinal curve, but also is able to remove a large amount of invalid solutions and improve the speed of reconstruction. Finally, the effectiveness of the proposed algorithm is verified by testing the 24 bus system as well as the U.S. PG & E 69 node system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277052).

**Key words:** ordinal optimization; distribution network reconfiguration; rough function; branch exchange algorithm; network loss

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)08-0041-08

## 0 引言

配电系统是联系整个电力系统与用户的重要环节。配电网重构是一种充分发挥现有设备潜力, 提高电网运行的经济水平和供电可靠性, 不需要大量额外投资就能增大社会效益的优化手段。配电网重构的目的是在满足辐射状运行、电力供需平衡、容量和电压等各种约束条件的前提下, 通过改变配电

网线路开关的状态, 变换网络结构, 从而实现某种目标或多目标下的配电网最优方式运行。由于配电网中存在大量的分段开关和联络开关, 因而配电网重构是一个多目标非线性组合优化问题。

Merlin 和 Back 于 1975 年提出最优配电网重构技术<sup>[1]</sup>, 目前已经从以网损最小为主的单目标函数优化发展到多目标函数优化, 涉及供电可靠性、电压优化等方面。该优化问题的研究方法主要有数学优化法、启发式算法以及人工智能优化法。数学优化方法利用现有的数学优化原理进行配电网重构,

随着配电网规模的变大,该方法所需的计算时间过长。启发式方法主要有支路交换法<sup>[2-3]</sup>和最优流模式法<sup>[4-5]</sup>,特点是计算速度快,但不能保证得到最优解,并且最终优化结果受初始判据的影响较大。人工智能算法主要包括粒子群算法<sup>[6-7]</sup>、遗传算法<sup>[8-9]</sup>、禁忌算法<sup>[10-11]</sup>等方法,这些算法虽然理论上可以找到全局最优解或次最优解,但计算量大,效率低,实用性和可靠性较差。

本文将序优化理论应用到配电网重构中,简化网络结构,建立配电网重构模型,明显减少了原始解的数量。通过改进粗糙评估函数,建立表征集合和挑选规则,有效避免了目前各种重构算法迭代过程中大量的计算负担和寻优过程中难收敛的状况,进一步拓展了配电网重构算法的优化空间。

## 1 配电网重构的数学模型

文献[12-14]提到了不同的重构目标。本文以网损最小作为配电网重构的目标函数,可以表示为

$$\min\left(\sum_{i=1}^{n_b} k_i R_i |I_i|^2\right) \quad (1)$$

式中: $n_b$ 为配电网中的支路数; $k_i$ 代表支路的开断状态,1为闭合,0为断开; $R_i$ 为支路*i*的电阻; $I_i$ 为流过支路*i*的负荷电流。

需要满足的约束条件如下。

### (1) 配电网潮流约束

配电网重构需满足潮流方程。

### (2) 支路电流及节点电压约束为

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad i=1,2,3,\dots,n_n$$

$$I_{j\min} \leq I_j \leq I_{j\max} \quad j=1,2,3,\dots,n_b$$

式中: $n_n$ 为节点数; $n_b$ 为支路数; $U_i$ 为节点*i*的电压; $U_{i\min}$ 、 $U_{i\max}$ 分别为节点*i*的电压下、上界; $I_j$ 为节点*j*的电流; $I_{j\min}$ 、 $I_{j\max}$ 分别为支路*j*的电流下、上界。

### (3) 网络拓扑约束

配电网一般是闭环设计、开环运行,一般情况下网络为辐射状。

### (4) 开关操作限制约束

为了延长开关的使用寿命,要尽量减少重构过程中开关动作的次数。

### (5) 供电约束

配电网重构之后必须给所有的节点供电,即在重构过程中不能出现“孤岛”节点。

## 2 序优化理论

序优化(Ordinal Optimization, OO)是何毓琦教授(Y.C.Ho)于1992年提出<sup>[15]</sup>,旨在解决解空间异常庞大的优化问题。序优化有两个基本思想:第一,“序”比“值”更容易比较,粗糙模型虽然不能准确地判断两个解优劣程度,但却能以很大概率获知两个解孰优孰劣;第二,目标软化,在解空间异常庞大的时候,为求得最优解,在计算量上所需做出的牺牲是巨大的,但是此时,往往一个“足够好解”就可以满足工程需求,即求得一个工程最优解即可。序优化理论将优化问题划分为五种类型<sup>[16]</sup>: Flat型、U型、Neutral型、Bell型以及Steep型,可用序曲线(Ordered Performance Curve, OPC)描述,如图1所示。纵坐标代表粗糙评估值,横坐标代表按照评估值大小排序后的解的编号。

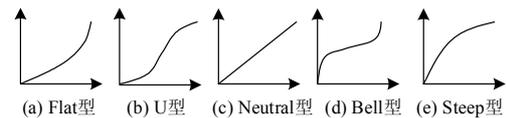


图1 OPC类型

Fig. 1 Types of ordinal performance curves

常规的序优化主要包含以下4个基本步骤:

(1) 建立表征集合。表征集合一般是从解空间按照机会均等的原则随机抽取*N*个,*N*的大小取决于解空间的大小,文献[17]指出在解空间为 $10^8$ 时,*N*采用1000能得到比较满意的结果,后来的文章多采用这一数值。

(2) 确定优化问题的OPC类型。主要利用特定的评估函数(不精确但是很快)对表征集合中的各个解按照从小到大的顺序快速排序。

(3) 确定OPC曲线之后,按照特定的公式选取前*s*个解作为精确求解的对象,并取前*k*个作为真正足够好解。

(4) 重复以上步骤若干次,挑出最好的几组解供选择。

为了使序优化理论更加适用于配电网重构,本文对传统的序优化做了一些改变。由于原始解空间存在大量的无效解,定义的粗糙函数不仅仅能够进行OPC的确定,而且能去除大量的无效解;粗糙评估值虽然不能反映优化的真实结果,但是可以以较大的概率反映解的优劣,若按照均匀随机挑选的准则,评估占优的解和评估处于劣势的解将会得到同等的对待,为了体现出优劣粗糙评估解的区别,并在其他条件不变的情况下得到更高的对准概率<sup>[18]</sup>

(Alignment Probability, AP), 本文定义了一种按照评估值优先的准则, 使得粗糙评估值占优的解被挑选的概率大。

### 3 序优化理论在配电网重构中的应用

#### 3.1 配电网重构中粗糙函数的定义

粗糙函数是序优化理论中的关键问题, 选取合适的函数能简化计算, 提高算法的计算速度。它虽然不是精确解, 但是能以很大概率反映真实解的优劣情况。如何根据具体问题建立能正确反映真实解优劣情况的粗糙函数是序优化算法的关键。

(1) 使用等效电流法为粗糙评估方法。该方法将所有节点电压定为额定电压, 根据负荷功率的大小来计算注入电流的大小, 然后计算每条支路的损耗, 累加起来作为粗糙函数。遍历所有的解, 对于每个解, 其粗糙评估函数用公式表示为

$$C_j = \min[\text{sgn}(I_{i_{\max}} - I_i)] \sum_{i=1}^{n_b} I_i^2 R_i \quad (2)$$

式中:  $C_j$  为第  $j$  个解的粗糙评估值;  $I_i$ 、 $I_{i_{\max}}$  分别为第  $i$  条支路的电流和最大允许通过电流;  $R_i$  为第  $i$  条支路的电阻;  $n_b$  为第  $j$  个解的支路数;  $\text{sgn}()$  为符号函数。

通过粗糙评估函数挑选出来的解本文把它定义为“准有效解”, 这些解组成的集合为准有效解集合, 用  $\Theta$  表示。

(2) 使用潮流计算迭代一次的结果作为粗糙评估值。

#### 3.2 表征集合的建立和挑选规则

从粗糙集里通过某种挑选规则挑选出来参与序优化计算的解定义为“挑选解”, 其组成的集合称为表征集合, 用  $\Theta_N$  表示。到目前为止, 已经有数十种挑选规则可以用来挑选, 如盲目挑选规则、最优计算量分配规则、宽度—深度规则等。对于配电网重构, 影响挑选规则的主要因素是计算量限制、配电网节点编号方式及解的结构。

本文采用两种挑选规则, 均匀挑选规则和一种新定义的规则, 称为评估值优先准则。均匀挑选规则是从表征集合  $\Theta$  中均匀地挑选出  $N$  个解来确定 OPC 曲线的类型, 一般文献多采用这种方法; 考虑到配电网重构粗糙评估值越小的解目标函数可能越优, 评估值优先准则是在选择粗糙评估之后, 从评估值大于零的  $\Theta$  中按概率挑选出  $N$  个解。挑选规则示意图如图 2 所示。

评估值优先准则如下: 设  $\Theta$  中有  $M$  个解, 在粗糙计算结束之后, 将解的评估结果从小到大排序, 确定 OPC 曲线。将  $M$  个结果按照顺序等分成  $t$  份,

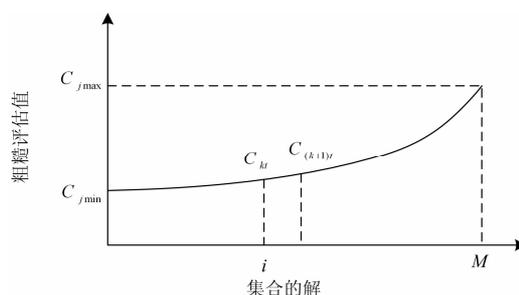


图 2 排序后的粗糙评估值

Fig. 2 Rough assessment value after sorting

每份的大小则为  $M/t$ , 在每份里随机选取  $H$  个, 则第  $i$  份里选取的个数为

$$H(i) = N - \frac{C_k}{\sum_{k=1}^i C_k} M \quad (3)$$

式中:  $H(i)$  表示第  $i$  份选取的解的个数;  $N$  为按照概率从  $\Theta$  挑选出的解的个数;  $C_k$  为  $\Theta$  中第  $k$  个解的粗糙评估值;  $M$  为  $\Theta$  中的解个数。

#### 3.3 选定集合

序优化的目的就是在粗糙模型的基础上得到可接受的、以最大概率包含真实足够好解的选定集合  $Q$ , 然后再利用精确模型对  $Q$  中的每个解进行评价, 找出其中的真实最好解。在确定了 OPC 曲线及表征集合之后, 取表征集合中的前  $s$  个解组成选定集合  $Q$ ,  $s$  的大小采用式(4)的回归函数确定。

$$s(k, g) = e^z k^\rho g^\gamma + \eta \quad (4)$$

式中,  $z$ 、 $\rho$ 、 $\gamma$ 、 $\eta$  为曲线类型所对应的参数, 文献[19]附录给出了不同曲线类型各个参数的取值。文献[20]给出应用于配电网规划序曲线类型各个参数的取值。 $k$ 、 $g$  为预先给定的值,  $k$  表示要求选定集合中至少包含  $k$  个真实足够好解,  $g$  表示将表征集合经过精确评估排序后位于前  $g$  个的解定义为真实足够好解, 它是经过大量计算得到的经验值。

在以上分析计算的基础上, 对表征集合  $\Theta_N$  中的解利用重构的精确模型进行计算, 取目标结果中的前  $n$  个作为真实足够好解。

#### 3.4 网络的简化处理

在配电网重构过程中, 网络末端存在着大量不能断开的开关, 一旦断开, 位于其下游的节点将处于“孤岛”状态, 这在常规配电网中是不允许存在的。若将这样的网络进行简化处理, 能大大缩小解空间。参照文献[21]的方式处理, 按照每次打开一个联络开关并断开环中一个分段开关的基本原理, 联络开关的不同组合形成不同的基本状态,

每个基本状态中分段开关的不同又形成了不同的解。

设在图 3 简单的网络中, 节点 6、8 之间存在一条联络线, 支路编号为 8。图 4 给出了一种寻找环的方法: 给定了网络重构前的状态, 首先建立两个临时空解(全为 0, 其长度为包含联络支路的所有支路之和), 从联络开关的两个端点不断地查找其父节点, 找出对应的支路, 每找到一条支路就把相应位置置 1, 这样, 若这两个解对应位不同则该位所代表的支路处于环中。

在确定了环中所有的支路之后, 把联络开关所在的位置置 1, 并分别把环中的某一位上置 0, 即可得到不同的几组初始解(例如图 4 中, 支路 8 替换支路 3)。

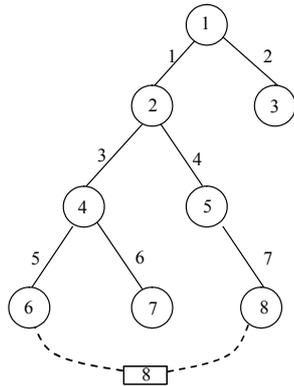


图 3 简单 8 节点网络

Fig. 3 A simple network with 8 nodes

支路	1	0	1	0	1	0	0	0
节点6:	1	0	1	0	1	0	0	0
节点8:	1	0	0	1	0	0	1	0
原始解	1	1	1	1	1	1	1	0
同或(环):	0	0	1	1	1	0	1	0
一个解:	1	1	0	1	1	1	1	1

图 4 解的生成方法

Fig. 4 Ways of creating original solutions

若按照分段开关联络开关任意开合的原则, 图 3 所示的网络初始解空间大小为  $2^6=64$ , 然后需要对所有解进行遍历剔除不满足条件的解; 若按照本文的方法, 直接生成 4 个解。

### 3.5 基于序优化理论的重构流程

基于序优化的重构流程图如图 5。

## 4 算例仿真

为了验证序优化算法在配电网重构上的适用

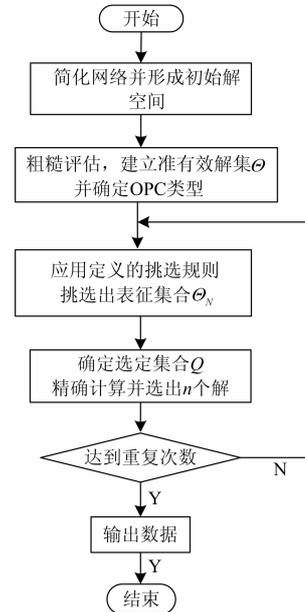


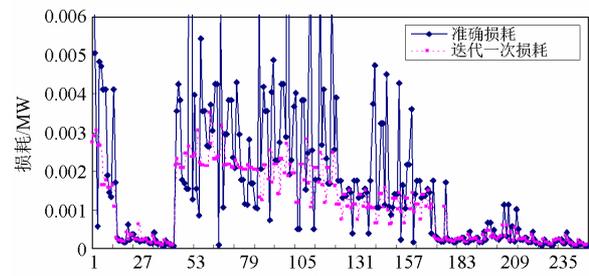
图 5 基于序优化理论重构流程图

Fig. 5 Flow chart of distribution network reconfiguration

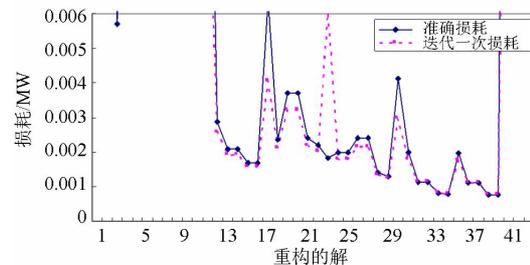
性, 本文选取实际系统 24 节点、美国 PG&E69 节点系统进行了测试计算。测试程序采用 C++ 编程实现, 运行于主频为 2.5 GHz, 内存为 2.0 G 的 PC 兼容机。

### 4.1 实际 24 节点系统

迭代一次的潮流计算结果比使用等效电流法计算更精确, 尤其是在配电网负荷较小的时候, 迭代一次的潮流计算结果接近真实的结果。图 6 是 24 节点系统的精确解与迭代一次的结果, 它们的



(a) 采用迭代一次法的解的损耗



(b) 采用迭代一次法损耗图局部放大图

图 6 迭代一次计算结果

Fig. 6 Result of flow calculation with one iteration

误差见图 7。其中, 图 6(b)是图 6(a)的局部放大图。可以看出, 迭代一次的结果仍然与真实结果相接近, 完全可以反映准确结果的趋势。

在低值区, 迭代一次的计算结果与真实值最为接近, 这个从图 7 可以看出, 在第 14~41 之间、170~249 之间的解, 误差很接近零。

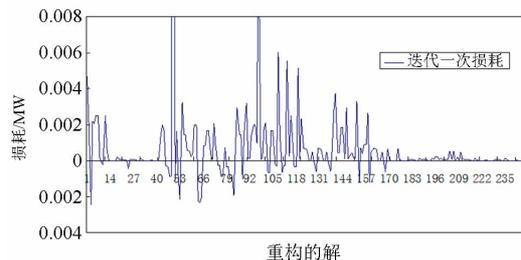


图 7 采用迭代一次法计算的误差

Fig. 7 Error of flow calculation with one iteration

当采用等效电流方法计算的时候, 计算结果如图 8 所示, 可以看出, 这种方法完全无法反映真实结果的“序”, 故本文在采用序优化计算的时候, 采用迭代一次的潮流计算结果。

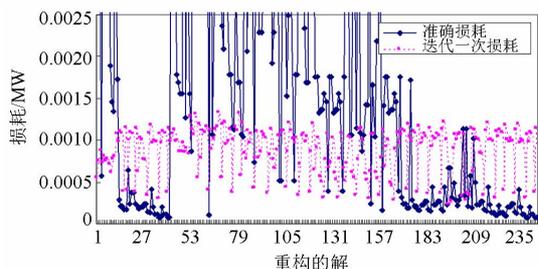


图 8 采用等效电流法计算的结果

Fig. 8 Result of loss calculation with equivalent current method

实际 24 节点系统的序优化粗糙计算结果如图 9 所示, 图中给出的是粗糙评估结果与真实结果的 OPC 曲线, 可以看出, 重构的 OPC 曲线属于 Flat 型, 虽然两条 OPC 曲线是按照各自的大小顺序排列, 但是在 OPC 曲线的低值区域, 两种结果一致性很高, 它们对应的解几乎是相同的。

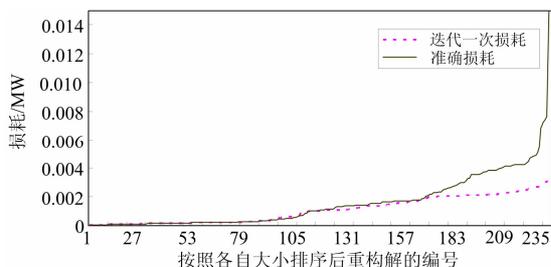


图 9 按照各自顺序排序的 OPC 曲线

Fig. 9 OPC by sequences

图 10 给出的是按照真实结果排列的 OPC 曲线, 迭代一次计算结果的最小值始终有一种递增的趋势, 见图中虚线所示, 这样, 在采用粗糙结果进行排序的时候, 粗糙值比较大的解, 其真实值也较大。而采用等效电流方式的结果却没有这种规律, 如图 11。

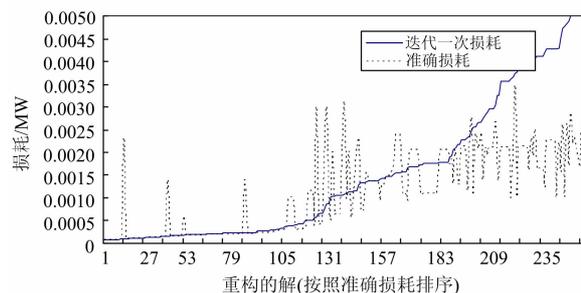


图 10 按照真实结果和迭代一次法排序的 OPC 曲线

Fig. 10 OPC of real result and flow calculation with one iteration

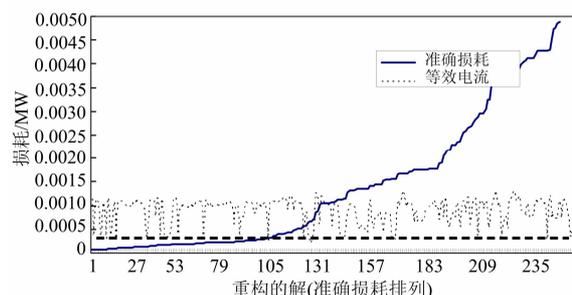


图 11 按照真实结果和等效电流法排序的 OPC 曲线

Fig. 11 OPC of real result and equivalent current method

根据粗糙结果与真实结果的 OPC 曲线特点, 对传统的序优化集合选定方法进行调整, 在形成表征集合的时候, 不在全部的解空间进行挑选, 而是取粗糙评估结果的前一部分作为表征集合。

如表 1 所示, 重构后的有功功率最大下降了 53 kW, 节省了 41.1%。

表 1 实际 24 节点断开支路集合  
Table 1 Open branches of 24 node system

项目	重构前	重构后解 1	重构后解 2
打开支路集合	17-19	8-18	15-23
	8-18	21-23	8-18
损耗/kW	129.0	76	77
项目	重构后解 3	重构后解 4	重构后解 5
打开支路集合	7-8	19-20	7-8
	21-23	8-18	15-23
损耗/kW	78	78	79

## 4.2 美国 PG&E 69 节点系统

该算例系统共 265 761 个可行解, 若迭代次数

超过 9 次,即可认为该结果不收敛,该结果不可取。按照准确解排序的 OPC 曲线如图 12 所示,由于横坐标级数太大,为  $10^5$ ,所以在图中出现黑色区域。图 13 为图 12 的局部放大图,可以看到 OPC 的规律与 24 节点的相似。

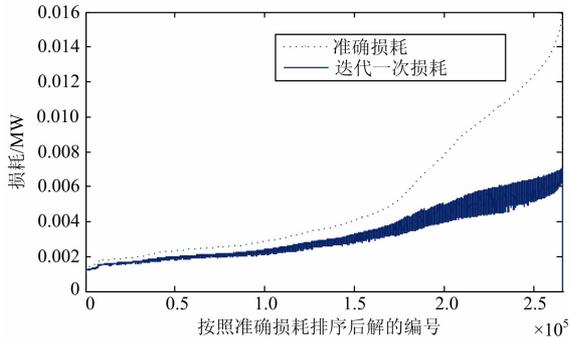


图 12 所有解按照真实结果和迭代一次排序的 OPC 曲线

Fig. 12 OPC of real result and flow calculation with one iteration

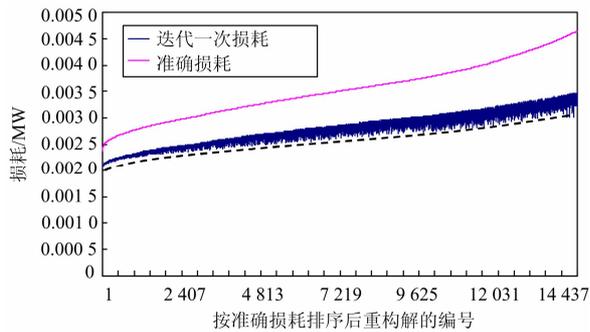


图 13 OPC 曲线局部放大图

Fig. 13 Local enlarging graphs of OPC

重构后的结果如表 2 所示,本文算法重构后网损降低 125.4 kW,减少 55.7%,重构效果明显。与文献[22-23]的研究结果相比优化后的网损更小,验证了本文所用方法的优越性,并且文中方法所需迭代次数和计算量更少,具有较好的实用价值。

表 2 PG & E 69 节点重构结果

Table 2 Reconstruction results of PG & E 69 node system

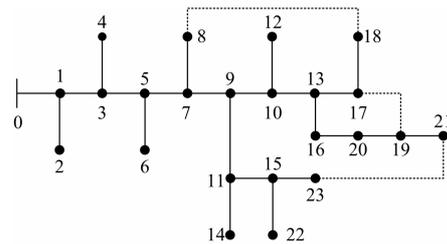
项目	重构前	文献[22]	文献[23]	本文算法
打开支路集合	11-66 13-20 15-69 27-54 39-48	11-66 12-20 13-14 50-51 44-45	11-66 13-20 13-14 50-51 47-48	11-66 13-20 12-13 50-51 46-47
损耗/kW	225.00	100.81	99.95	99.62

## 5 结论

本文提出了基于序优化理论的配电网重构算法,建立了以网损最小为目标函数的优化模型,在

优化中同时考虑网络结构特点和解空间特征,定义了一种评估值优先准则,使得算法能够正确反映真实解的优劣。通过实际算例验证,本文算法对减小网损有明显的优化效果,相比其他优化方法,本算法的操作策略在于软化了优化目标,利用“足够好解”满足工程需求。算法目前只考虑了针对单一目标的静态重构,在实际应用中,往往还需要对组合优化目标进行动态重构,现有算法需要进一步完善和扩展。

## 附录



附图 1 实际 24 节点系统接线图

Fig. 1 Wiring diagram of of 24 node system

附表 1 实际 24 节点系统参数表

Table 1 Parameter table of 24 node system

支路	首端节点	末端节点	电阻/ $\Omega$	支路电抗/ $\Omega$	有功/kW	无功/kVar
	0	1	0.033 2	0.04	0	0
	1	2	15.050 4	40.033 8	384.2	67.8
	1	3	0.067 5	0.061 8	0	0
	3	4	34.881	80.074 2	192.1	33.9
	3	5	0.09	0.082 4	0	0
	5	6	34.813	80.004	192.1	33.9
	5	7	0.045	0.041 2	0	0
	7	8	19.549 9	50.012 7	307.36	54.24
	7	9	0.022 5	0.020 6	0	0
	9	10	0.022 5	0.020 6	0	0
	10	12	2.053 5	8.012 4	1921	339
	10	13	0.035 5	0.024 6	0	0
	13	16	1.575 5	6.361 4	2 420.46	427.14
	13	17	0.013	0.004	0	0
	17	18	4.898 9	16.012 7	960.5	169.5
	20	19	8.5	20	0	0
	16	20	1.0	2.0	768.4	135.6
	19	21	3.5	10	1 536.8	271.2
	9	11	0.112 5	0.103	0	0
	11	15	0.031 5	0.021 2	0	0
	15	22	8.518 9	20.012 7	768.4	135.6
	15	23	34.818 9	80.012 7	192.1	33.9
	11	14	0.45	0.412	0	0
	8	18	1	2	—	—
	21	23	1	2	—	—
	17	19	0.013	0.004	—	—

## 参考文献

- [1] MERLIN A, BACK H. Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system[C]// Proc 5<sup>th</sup> Power Syst Computation Conf, Cambridge, U K, 1975: 1-18.
- [2] 张栋, 张刘春, 傅正财. 配电网重构的快速支路交换法[J]. 电网技术, 2005, 29(9): 82-85.  
ZHANG Dong, ZHANG Liuchun, FU Zhengcai. A quick branch-exchange algorithm for reconfiguration of distribution networks[J]. Power System Technology, 2005, 29(9): 82-85.
- [3] 毕鹏翔, 刘健, 张文元. 配电网网络重构的改进支路交换法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 98-103.  
BI Pengxiang, LIU Jian, ZHANG Wenyuan. A refined branch-exchange algorithm for distribution networks reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 98-103.
- [4] VESNA B, RAJICIC D. Improved method for loss minimization in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3): 1420-1425.
- [5] 吴本悦, 赵登福, 刘云. 一种新的配电网网络最优流模式算法[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(4): 21-24.  
WU Benyue, ZHAO Dengfu, LIU Yun. An improved optimal flow pattern algorithm for distribution network reconfiguration[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(4): 21-24.
- [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] 陈春, 汪泓, 黎灿兵, 等. 含分布式风电的配电网预防性重构[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 175-177.  
CHEN Chun, WANG Feng, LI Canbing, et al. Preventive reconfiguration of distribution networks with distributed wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 175-177.
- [8] HUANG Y C. Enhanced genetic algorithm-based fuzzy multi-objective approach to distribution network reconfiguration[J]. IEEE Proceedings of Generation, Transmission, and Distribution, 2002, 149(5): 615-620.
- [9] 徐玉琴, 张丽, 王增平, 等. 基于多智能体遗传算法并考虑分布式电源的配电网大面积断电供电恢复方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 135-141.  
XU Yuqin, ZHANG Li, WANG Zengping, et al. Algorithm of service restoration for large area blackout in distribution network with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 135-141.
- [10] 张立梅, 唐巍. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 123-130.  
ZHANG Limei, TANG Wei. Back/forward sweep power flow calculation method of distribution networks with DGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 123-130.
- [11] 张忠会, 李曼丽, 熊宁. 基于改进禁忌搜索的配电网重构[J]. 继电器, 2007, 35(10): 41-44.  
ZHANG Zhonghui, LI Manli, XIONG Ning. An improved tabu search for reconfiguration of distribution system[J]. Relay, 2007, 35(10): 41-44.
- [12] 李伟, 张振刚, 闫宁. 基于改进小生境遗传算法的 Pareto 多目标配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 1-5, 16.  
LI Wei, ZHANG Zhengang, YAN Ning. Pareto multi-objective distribution network reconfiguration based on improved niche genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 1-5, 16.
- [13] LIN C H, CHEN C S, WU C J, et al. Application of immune algorithm to optimal switching operation for distribution-loss minimization and loading balance[J]. IEEE Proceedings of Generation, Transmission, and Distribution, 2003, 150(2): 183-189.
- [14] 陈焕飞, 刘朝, 贾宏杰, 等. 基于 Bender's 分解的含 DG 配电系统网络重构[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(21): 22-26.  
CHEN Huanfei, LIU Zhao, JIA Hongjie, et al. Bender's decomposition based reconfiguration for distribution network with distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(21): 22-26.
- [15] HO Y C, SREENIVAS R S, VKAILI P. Ordinal optimization of discrete event dynamic systems[J]. Theory and Applications, 1992, 2(2): 61-88.
- [16] LAU T W E, HO Y C. Universal alignment Probabilities and subset selection for ordinal optimization[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1997, 93(3): 455-489.
- [17] 贾庆山. 增强序优化理论研究及应用[D]. 北京: 清华大学, 2006.  
JIA Qingshan. Enhanced ordinal optimization: a theoretical study and applications[D]. Beijing: Tsinghua

- University, 2006.
- [18] LIN S Y, HO Y C. Universal alignment probability revisited[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 2002, 113(2): 399-407.
- [19] 刘云, 陈金富, 谢敏. 基于序优化理论的配电网规划[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(22): 21-24.  
LIU Yun, CHEN Jinfu, XIE Min. Distribution network planning based on the ordinal optimization theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(22): 21-24.
- [20] 冯伟江, 胡敏羨. 考虑安全约束的配电系统最优网络重构[J]. 电力系统自动化, 1993, 17(4): 1-16.  
FENG Weijiang, HU Minxian. Network reconfiguration with security constraints in distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1993, 17(4): 1-16.
- [21] 李启旺, 袁荣湘, 丁伟, 等. 灵敏度分析与支路交换法相结合的配电网重构算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 62-65.  
LI Qiwang, YUAN Rongxiang, DING Wei, et al. A comprehensive method for distribution network reconfiguration based on sensitivity analysis and branch-exchange algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 62-65.
- [22] 刘莉, 陈学允. 基于模糊遗传算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 66-69.  
LIU Li, CHEN Xueyun. Reconfiguration of distribution networks based on fuzzy genetic algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 66-69.
- [23] 郝文波, 于继来. 基于负荷受电路径电气剖分信息的配电网重构算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 42-48.  
HAO Wenbo, YU Jilai. Distribution network reconfiguration algorithm basing on electrical dissection information of load path[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 42-48.
- 
- 收稿日期: 2014-06-29; 修回日期: 2014-08-24
- 作者简介:
- 李辰雷(1988-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统运行分析; E-mail: lcl1919@foxmail.com
- 卫志农(1962-), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化; E-mail: wzn\_nj@263.net
- 韩连山(1986-), 男, 硕士, 研究方向为风力发电系统电压稳定控制。E-mail: han-tianfly@163.com
- (编辑 周金梅)