

含环配电网的网络重构统一框架研究与实现

网络重构能在不增加额外投资的情况下平衡负荷,消除过载,提高供电质量和电网运行经济性。首先针对负荷均衡和网损最小两个目标建立了统一的重构框架,同时考虑电流约束、电压约束和不能含有孤立节点等约束条件。然后,为了实现全面重构和环路电阻的快速计算,根据配电网结构的特点,设计了开关电流连接图来存储电网模型。最后,针对配电网中存在环或者馈线内联络开关的情况,提出了基于生成树的启发式优化算法。算例结果表明该方法快速有效,可以满足配电网网络重构实际应用需要。

田纪法¹ 焦润海² 冯德品¹ 马建¹ 杨震²/1.国网山东省电力公司临沂供电公司 2.华北电力大学控制与计算工程学院

0 引言

配电网系统具有闭环设计、开环运行的特点,包含一定量常开的联络开关和大量常闭的分段开关,这些开关的存在为电网重构实现提供了条件。电网重构的作用主要体现在以下方面^[1]:

1) 配电网馈线负荷达到平衡,消除支路过载,改善供电电压质量。

2) 降低有功网损,提高配电网运行的经济性。

3) 快速恢复用户供电,减少停电区域,提高供电的可靠性。

在满足各种运行约束条件的前提下,配电网重构是一个非线性、多约束和多目标优化问题,为了提高计算速度或优化效果,保证得到一个最优或者次优的网络结构,研究人员尝试了不同的方法来解决重构问题^[2]。传统的数学优化方法通过建立数学模型来描述网络重构优化问题,主要包括分支定界法^[3]、0-1整数规划方法^[4]等。此类方法比较成熟,可以得到不依赖于配电网初始结构的全

局最优解,但其计算时间长,存在严重的“维数灾”问题。最优流模式算法^[5]认为打开电流最小的开关对系统潮流分布的影响最小,系统功率损耗的增量也最小,该方法计算量大,且开关打开的顺序对结构也有较大影响。支路交换算法^[6]要求电网是辐射结构,首先闭合一个联络开关得到一个单环,然后再以网损最小为目标优化断开一个开关,保持网络为辐射状,此方法计算量较少,但要求网络必须为辐射状。人工智能算法如遗传算法^[7-8]、模拟退化算法^[9]和粒子群算法^[10]等也被应用于网络重构,虽然这些算法一般可以得到一个比较理想的结果,但是其计算量大,且选取规则相对复杂,难以应用于实际生产中。

本文在总结各种网络重构方法的基础上,针对负荷均衡和网损最小这两个目标,分析和推导目标函数与负荷转移之间的内在关系,并通过适当的简化和近似,为多种优化目标建立了统一的重构模型框架,利用生成树算法解决配电网含环或存在馈线内联络开关的问题,最后提出了一种基于支路交换法的迭代式网络重构方法。

1 建立多目标网络重构统一模型框架

(1) 负荷均衡目标

负荷均衡反映了电网中负荷的分布情况,针对某一馈线偶定义负荷均衡率LBR_i计算公式为

$$LBR_i = \frac{\max\{P_1/P_{r1}, P_2/P_{r2}\}}{\min\{P_1/P_{r1}, P_2/P_{r2}\}} \quad (1)$$



田纪法/工程师

关键词/Keywords

配电网·
负荷均衡·
网损最小·
开关电流图·

式中, P_{r1} 、 P_{r2} 为 F_1 、 F_2 两条馈线的额定供电负荷;
 P_1 、 P_2 为 F_1 、 F_2 两条馈线实际的供电负荷。

全网的负荷均衡率定义为全网所有馈线偶负荷均衡率的最大值, 此值越接近1说明全网负荷分配越均衡。

本文将所有负荷视为恒电流, 约定负荷均集中节点。假如某一馈线偶通过联络开关闭合可以形成环, 此环有两个电源点 G_1 和 G_2 , 设两端出线开关电流分别为 I_1 和 I_2 , 且 $I_1 > I_2$, 则有:

- 1) 理想的均衡线路负荷是 $(I_1 + I_2)/2$ 。
- 2) 理想的转移负荷值为 $I_{opt} = (I_1 - I_2)/2$ 。
- 3) 负荷转移方向为从负载较大的 I_1 侧线路, 转往负荷较小的 I_2 侧线路。
- 4) 最优联络点的确定。找到与理想转移负荷值最接近且满足约束条件的开关节点, 作为最优联络点。对于不满足重构约束条件的情况, 则维持原联络点不变。

(2) 网损最小目标

有功网络损耗反映配电网运行的经济性, 本文的第二目标为全网的有功损耗最小, 即保证配电网运行的经济性。网络重构可以通过开关的不同优化组合来达到全网损耗最小的目标, 根据文献[11]可以得到, 对于闭合某一馈线偶的联络开关, 打开特定分段开关的移环过程, 其有功网损变化量为

$$P = 2(V_{G_1} - V_{G_2})I_x + R_{loop}I_x^2 \quad (2)$$

式(2)可以看作一个以 I_x 为未知数的二次函数, 其图形为一个开口向上的抛物线, 可以在此抛物线的顶点处求得最小值, 对于某一馈线偶, 假定单一假想环的环路总阻抗为 R_{loop} , 联络点两侧的电压降分别为 V_{G_1} 和 V_{G_2} 且 $V_{G_1} > V_{G_2}$, 则有:

- 1) 理想转移负荷值为 $I_{opt} = (V_{G_1} - V_{G_2})/R_{loop}$ 。
- 2) 负荷转移方向。从电压降较大的 V_{G_1} 侧线路, 转往电压降较小的 V_{G_2} 侧线路。
- 3) 最优联络点的确定。找出与理想转移负荷值最接近且可用于网络重构的开关节点, 作为最优联络点。对于不满足重构约束条件的情况, 则维持原联络点不变。

通过对负荷均衡和网损最小两种不同最优目标对应的重构过程分析可以看出: 重构在本质

上均转化为理想负荷的转移, 以及转移方向的确定。据此, 本文针对这两种目标建立统一的网络重构处理框架, 首先根据一定的规则选择出待优化的联络开关, 然后计算理想转移负荷进行移环操作, 并将当前联络开关标记为已优化。重复此过程, 直到全部联络开关都标记为已优化, 实现对全网的重构。

(3) 约束条件

节点电压约束为

$$V_{i,min} \leq V_i \leq V_{i,max} \quad (3)$$

式中, V_i 为母线 i 的电压; $V_{i,min}$ 和 $V_{i,max}$ 分别为节点 i 电压的下限值和上限值, kV, 且上限值设定为高于额定电压的10%, 下限值设定为低于额定电压的10%。

支路容量约束

$$S_i \leq S_{i,max} \quad (4)$$

式中, S_i 为支路 i 的所载负荷量; $S_{i,max}$ 为支路 i 的最大载容量。

电流约束为

$$I_i \leq I_{i,max} \quad (5)$$

式中, I_i 为第 i 条支路的电流值, A; $I_{i,max}$ 为支路 i 的允许电流上限值。

(3) 负荷均衡下的最大支路减小阈值约束

最大支路电流减小值为联络开关移动前后两侧电流较大值之间的差值, 用于判断本次联络开关移动是否为有效操作。如果操作后, 最大支路电流减小值大于该阈值, 则可认为是有效操作, 从而可被列为重构步骤。

(4) 最小网损下的环路网损减小阈值约束

环路网损减小值为联络开关移动前后环路网损之间的差值, 用于判断本次联络开关移动是否为有效操作, 如果操作后, 环路网损减小值大于该阈值, 则可认为是有效操作, 从而可被列为重构步骤。

2 建立开关电流图

配电网的拓扑结构由节点和支路组成, 支路交换法重构本质上是在拓扑结构上根据最佳转移电流确定最优开关的过程。为此, 本项目建立

了一个馈线偶内的开关电流图，以此图为基础可以快速实现馈线内的网络重构过程。建立馈线偶内的开关电流图主要基于以下三方面的原因：一是为了能快速完成一次重构调整过程；二是基于此馈线偶内的开关电流图有利于解决馈线存在自环，或者馈线内联络开关的情况下的重构问题；三是易于求解假想环的环路电阻。

馈线偶节点支路拓扑如图1所示。由拓扑分析可知配电网可以简化为节点/支路模型，此馈线偶的开关电流图是以拓扑分析的节点为顶点，开关为边基础上形成的，如果存在一个开关控制多条支路或者一个支路上有多个开关的情况，则需要增加虚拟节点来保证开关电流连接图每个边上只有一个开关。为了更好地说明开关电流连接图建立的步骤，本文以图1的馈线偶的节点支路图为例建立如图2所示的开关电流图。

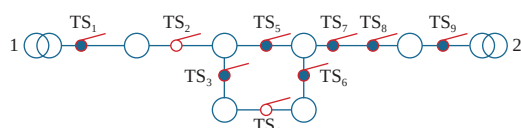


图1 馈线偶节点支路拓扑

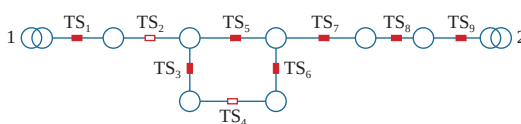


图2 馈线偶开关电流连接

对于图1和图2，边上面的图形表示开关，空心的表示打开的开关，实心的表示连接的开关。建立馈线偶内开关电流连接图的基本步骤如下：

1) 步骤1。根据选定重构目标的特定规则选择出需要重构的联络开关。

2) 步骤2。基于此联络开关通过拓扑分析获取此联络开关连接的两条馈线的节点和支路信息。

3) 步骤3。以拓扑分析中节点为顶点，支路为边建立节点支路图。

4) 步骤4。根据支路上的开关信息，填充节点支路图上的开关信息，如果支路上多于一个开关，开关TS₄、TS₅在同一条支路上，则需要要在TS₄、TS₅中添加一个虚拟支路和一个虚拟节点，从而构建出节点开关图。

5) 步骤5。根据潮流结果，填充此节点开关图上节点的电压和开关上的电流值，从而最终形成馈线偶内的开关电流连接图。

3 含环网的处理

供电可靠性是配电网的一个重要目标，为了保证电力稳定、不间断供应，配电网中以环网结构建设或者运行，通常分为馈线内和馈线间两种情况。尤其是馈线内联络，这种情况增加了网络重构处理的复杂性，但是也为更灵活、更优化的重构奠定基础。

3.1 馈线间合环处理

在网络重构前，如果馈线间的联络开关处于闭合状态，则配电网中存在他环，而经典支路交换算法要求配电网为辐射状。为了解决此问题，本文在进行全网重构前，首先获取配电网的环路信息，识别电网中的他环结构。然后，对于每一个环路，搜寻此环路上两个电源点之间路径上的所有开关，如果存在闭合的常开开关，则打开此开关进行解环；否则，打开环路开关序列中间位置的开关进行解环；保存此解环开关。通过以上的解环步骤，则可以保证在开始全网重构前配电网为辐射状，然后针对特定目标进行全网网络重构。检查重构结果的开关序列中是否含有在环路结构上的开关，若有则用此打开的联络开关替代前面保存的解环开关；否则，删除此前保存的解环开关，即保持配电网中没有参与重构的环路。

3.2 基于生成树的馈线内联络处理

智能电网环境下，为了提高供电可靠性增加了配电网结构的复杂性，可能在一条馈线内存在联络开关，本文提出一种基于生成树的方法来处理馈线内联络的情况。

以图2为例，馈线F1和馈线F2之间存在联络开关TS₂，假设重构过程负荷从馈线2向馈线1转移，馈线2内的联络开关TS₄状态是打开。由于重构过程中不能形成孤立点，所以在闭合开关TS₂后，若想实现负荷正确的转移，只能在开关序列TS₅、TS₇和TS₈中进行选择。如果闭合开关TS₄，打开开关

TS₅, 可选择打开的开关序列变为TS₃、TS₄、TS₆、TS₇和TS₈。可见, 通过馈线内的移环操作, 使得开关重构序列更加灵活, 更有利于形成最优的网络结构。因此, 针对移环这个重要操作, 本文采取基于生成树的方法构造所有可能的开关重构序列, 并尝试获得满足重构目标的最优组合, 具体过程如下:

- 1) 步骤1. 建立一对馈线偶的开关电流图。
- 2) 步骤2. 在开关电流连接图上求初始生成树。
- 3) 步骤3. 在初始生成树上进行一次馈线内网络重构过程。
- 4) 步骤4. 统计出所有不在初始生成树上, 但在开关电流图上的边 (定义为环路联络边)。
- 5) 步骤5. 对每个联络边, 在初始生成树上获取联络边对应的两个顶点之间的路径, 从而找到此开关电流图中的所有环, 以及这些环上的边。
- 6) 步骤6. 通过对不同环上的不同边进行组合, 则可以得到此开关电流图的所有生成树, 对每个生成树再进行网络重构。
- 7) 步骤7. 从所有生成树情况下的网络重构结果中选择最优结果, 获得最优开关序列。

4 含环配电网的重构算法

4.1 馈线偶重构流程

针对一个馈线偶的重构, 其本质是快速定位需要打开的分段开关, 具体来说: 首先通过拓扑分析找到两个电源点之间的环网路径, 计算最佳转移电流, 在明确转移方向的基础上找到其流经电流值与最佳转移电流最接近的分段开关, 将其作为最优开关并保存。此外, 如果在馈线偶的某条馈线上存在自环, 则采用本文提出的生成树算法进行移环操作, 然后再进行最优开关的定位流程, 一个馈线偶内的重构流程如图3所示。

4.2 全网重构流程

配电网的网络重构过程以联络开关为操作对象, 每一个联络开关对应一个馈线偶。对于任一联络开关构成的假想环, 可以找到相应的最优解环点 (即最佳联络开关位置)。配电网利用循环搜索进

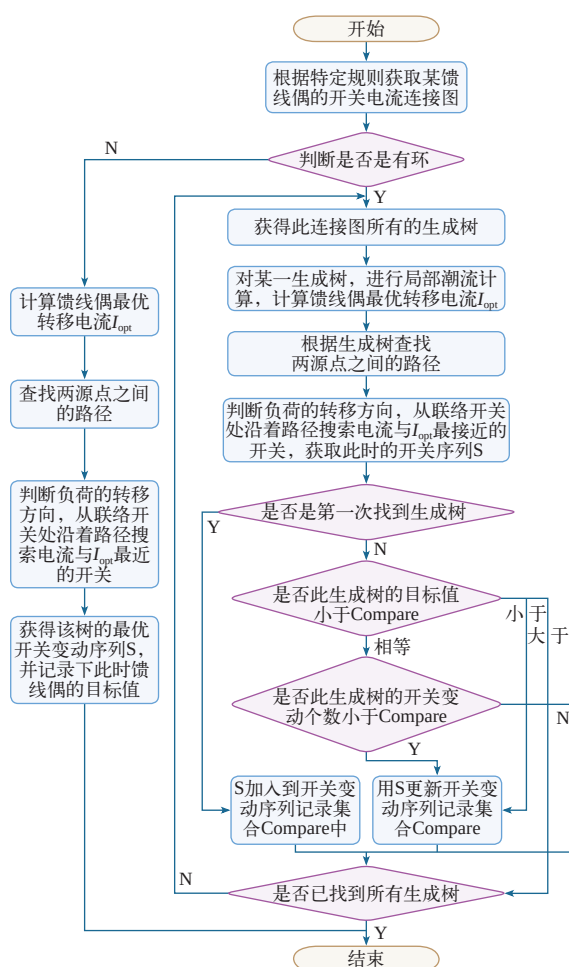


图3 馈线偶重构流程

行全网网络重构以解决环网存在耦合的问题, 所谓循环搜索, 即顺序实施馈线偶内的网络重构。

为实现馈线偶的顺序重构, 将所有馈线偶根据重构目标值进行排序, 如负荷均衡目标按照负荷均衡率进行从大到小的排序。依据此顺序进行重构, 利用“优化标记”的标定和消除, 防止重复重构。对于某个馈线偶实施优化操作后, 无论其是否发生开关重构, 都应该将该联络开关标记为已优化, 以防止反复针对该联络开关进行重构而陷入死循环。此外, 联络开关重构后还应将与该开关相连接的其他馈线偶的联络开关标记为待优化。当配电网所有的联络开关标记为已优化时, 重构过程结束, 其流程图如图4所示。

5 算例验证

为了证明本方法的正确性和高效性, 采用如

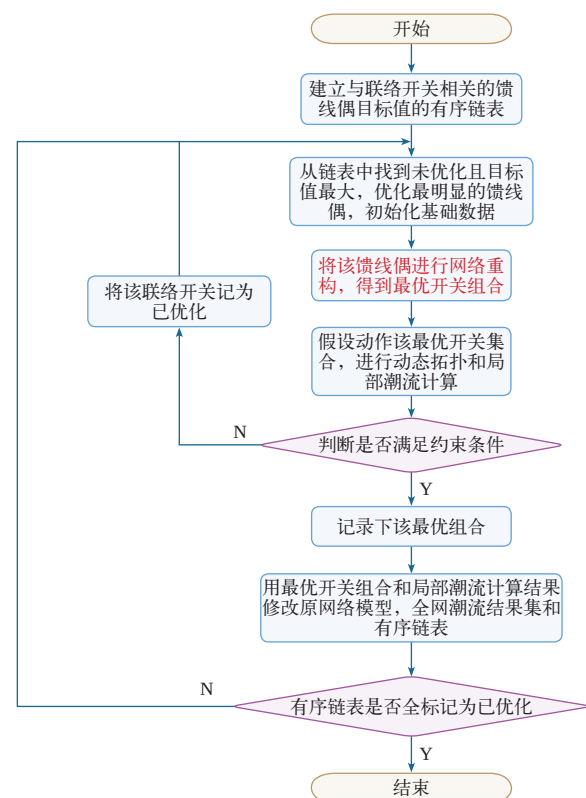


图4 配电网全网络重构的流程图

图5所示的82节点配电网系统, 此算例包含了4条馈线、78条支路、82个节点、20个联络开关和45个分段开关。并且此算例已经将配电网中的各个分支的负荷等效连接到了主干线上, 并假定此配电网的额定电压为10.5 kV, 各个馈线的出线电压等于额定电压。

(1) 以负荷均衡为目标的结果

利用本文的重构模型和方法进行重构, 可以得到如表1所示的82节点系统以负荷均衡为目标的重构前后的对比结果。

表1 以负荷均衡为目标重构前后结果

	重构前	重构后
联络开关的集合	BS149-174, BS44-177, BS142-144, BS46-138, BS136-143	BS153-154, BS175-176, BS148-149, BS46-138, BS136-143
全网负荷均衡率	2.209	1.315
最低电压(pu)	0.983	0.985

通过表1可知, 此82节点的配电网系统重构前的全网负荷均衡率为2.209, 重构后的全网负

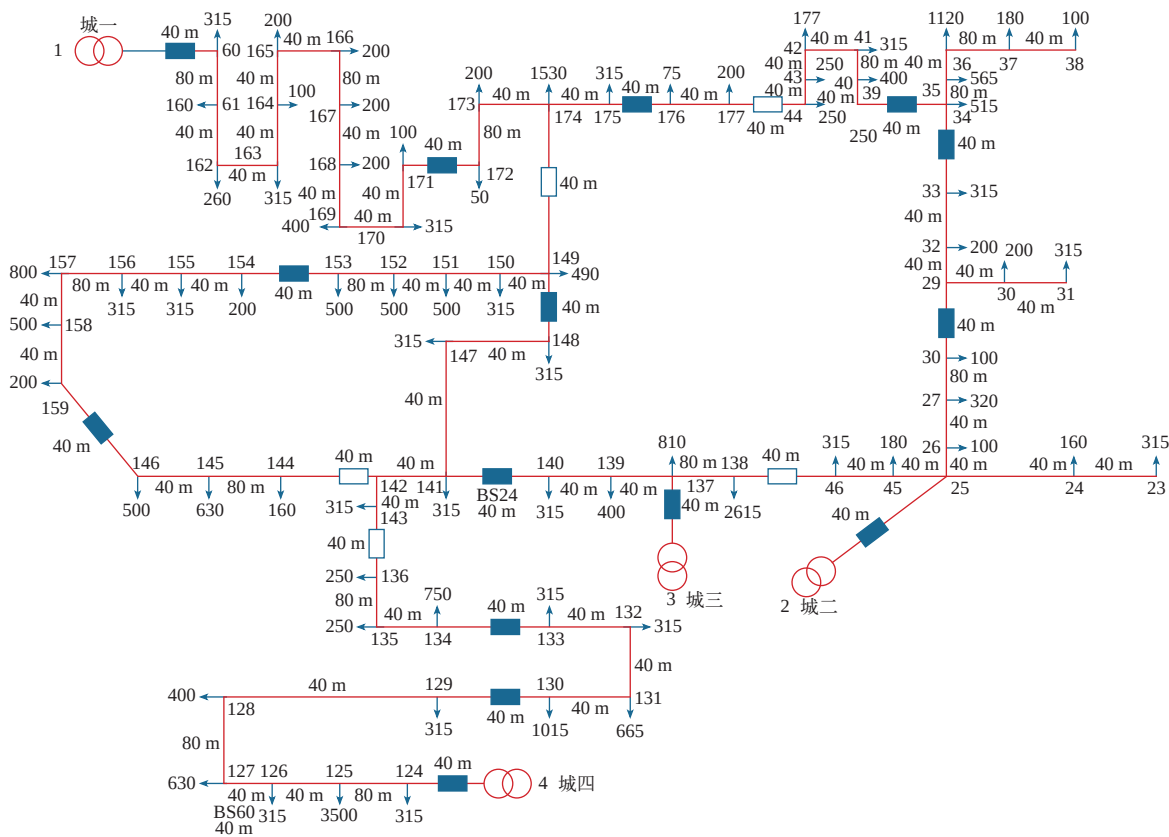


图5 82节点配电网系统

荷均衡率为1.315, 重构后的负荷均衡率提高了40.47%, 且由于本文对馈线内联络开关的处理, 使得在重构馈线偶1和3时, 联络开关由BS142-144, BS149-174重构为BS148-149, BS153-154, 从而得以重构此馈线偶, 可见本方法对于全网负荷均衡率的提高有明显的效果, 可以降低配电网的运行风险, 提高供电的质量。

(2) 以网损最小为目标的结果

利用本文的重构模型和方法进行重构, 可以得到如表2所示的82节点系统以网损最小为目标的重构前后的对比结果。

表2 以网损最小为目标重构前后结果

	重构前	重构后
联络开关的集合	BS149-174, BS44-177, BS142-144, BS46-138, BS136-143	BS149-174, BS175-176, BS146-159, BS46-138, BS133-134
全网有功损耗/kW	65.02	57.89
最低电压(pu)	0.983	0.986

通过表2可知, 此85节点的配电网系统重构前的全网有功损耗为65.02 kW, 重构后的全网有功损耗为57.89 kW, 重构后全网有功损耗减少了7.13 kW, 下降了10.97%, 且由于本文对馈线内联络开关的处理, 针对馈线3, 联络开关由BS142-144重构为BS146-159, 从而使得此馈线的最低电压得到提升, 同时降低了有功损耗, 可见本方法对于全网有功损耗的减少有明显的效果, 可以提高配电网运行的经济性。

6 结束语

本文方法针对负荷均衡和网损最小为目标, 提出了统一的实现框架, 易于编程实现, 适合中大规模配电系统, 可以减少重构中潮流计算次数, 从而降低配网重构的时间。针对实际电网可能存在环网的情况, 本文提出了含环电网的解决办法, 即基于生成树的启发式优化算法。通过此算法, 可以使得配电网通过网络重构形成一个更优的网络结构。为了快速地实现网络重构和提高环路电阻的计算速度, 本文建立了开关电流连接图的数据结构来存储配电网的数据。

参考文献

- [1] 邓桂秀, 江修波, 蔡金锭. 浅谈配电网网络重构研究现状与发展[J]. 机电技术, 2013 (4) .
- [2] 李飞, 邱正美, 马丽, 等. 配电网网络重构算法综述[J]. 电网与清洁能源, 2011 (12) : 76-80.
- [3] Melin A, Bask H. Search for minimal-loss operating spanning tree configuration in urban power distribution ststens [C]. Cambridge Proc. of 5th Power Systems Comp. Con., 1975: 2-6.
- [4] N D R Sarma, K S Prakasa Rao. A new 0-1 integer programming method of feeder reconfiguration for loss minimization in distribution systems [J]. Eletric Power System Reserch, 1995 (33) : 121-135.
- [5] Darish Shirmohammadi, H Wayne Hong. Reconfiguraion of electric distribution networks forresistive line losses reduction [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4 (2) : 1492-1498.
- [6] Civanlar S, Grainger J J, Yin H, et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3 (3) : 1217-1223.
- [7] Koiehi Nara, Atsushi Shiose, Minoru Kitagawa. Implementation of genetic algorithm for distirbution systems loss minimum reconiguration [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7 (3) : 1044-1051.
- [8] 张忠城, 王淳. 模糊自适应遗传算法在配电网网络重构中的应用[J]. 江西电力, 2006 (2) : 12-19.
- [9] 王凌, 郑大钟. 基于Cuahcy和GLalssina分布状态发生器的模拟退火算法 [J]. 清华大学学报, 2000, 40 (9) : 109-102.
- [10] 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网络重构中的应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2009 (7) .
- [11] 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 (80) : 99-103.

(收稿日期: 2015-03-03) EA