

# 配电网重构的研究和发展

沈晓东, 刘俊勇, 孙毅

(四川大学电气信息学院, 四川成都 610064)

**摘要:** 对国内外有关配电网重构技术的文献进行综述。重点介绍了五类典型的目标函数: 以提高稳定性和可靠性为目标, 以故障恢复时间最短为目标, 以负荷均匀分布为目标, 以系统有功损耗最小为目标和系统能量损失最小为目标。并介绍了配电网重构的解决方法: 传统的数学优化法, 最优流法, 支路交换法, 近全局寻优技术法和人工智能, 对不同的方法进行了对比和评论, 希望找到一种最好的解决方法。

**关键词:** 配电网; 重构; 目标函数; 算法

中图法分类号: TM53 文献标识码: A 文章编号: 1003- 6954(2003) 02- 0001- 05

配电系统具有环状结构、开环运行的特点。配电系统中包含大量的常合刀闸及少量常开刀闸。正常运行条件下, 配电调度员周期性(如按季节)地进行刀闸操作以调节网络结构(重构网络)。通过网络重构, 一方面平衡负荷, 消除过载, 提高供电电压质量; 另一方面降低网络损耗, 提高系统的经济性。在故障情况下, 闭合一些常开刀闸, 隔离故障支路。同时打开一些常合刀闸, 使系统保持开环运行状态, 把故障支路的负荷全部或部分的转移到另一条馈线或同一条馈线的另一条支路上。所以网络重构是提高配电系统安全性和经济性的重要手段。

## 1 配电网重构的目标函数

配电网重构的优化目标函数有很多种。

1) 以提高系统的稳定性和可靠性为目标, 使系统可以带更多的负荷, 减少甩负荷的可能性。典型的目标函数为

$$\min \sum_{i=1}^{N_p} Lw_i Lu_i(R)$$

式中  $N_p$  为系统负荷点数目之和;

$Lw_i$  为负荷点  $i$  的年平均负荷;

$Lu_i$  为负荷点  $i$  的年停运时间;

$R$  是网络中所有间隔开关的状态。

提高系统可靠性的途径一般有两条: 一是提高组成系统各元件的可靠性性能; 二是增加系统的冗余度。但这两种方法都需要增加投资, 经济性不是很好。进行配电网的重构可以在不增加投资的情况下, 提高系统的可靠性。配电网可靠性进行评估的方法有两类: 一类是解析法, 另一类是模拟法。解析

法<sup>[1~3]</sup>是对预想的停运事件进行逐个评估和计算, 最终得到用户和系统可靠性指标。解析法原理简单, 模型准确, 已广泛用于辐射型配电网的可靠性评估。但配电系统结构比较复杂时, 计算将会很繁杂。配电网可靠性评估常用的最小路法<sup>[2]</sup>属于解析法, 它同时考虑了最小路上的元件和非最小路上的元件故障对负荷点可靠性指标的影响, 并能找出网络的薄弱环节, 是一种非常有效的算法。模拟法是通过模拟元件寿命过程的实际情况, 并对此模拟过程进行若干时间观察, 评估所求的可靠性指标, 模拟法适合与复杂系统计算, 在有些特定场合, 该方法甚至是唯一可行的求解方法。

2) 以故障恢复时间最短, 停电范围最小为目标函数。典型的目标函数为

$$\min F(I, Y, Z) = \left[ \sum_{i=1}^m a_i(1 - y_i) + \sum_{j=1}^{n_1} a_{m+j} z_j \right] + \sum_{i=1}^{n_2} |I_i|^2 R_i$$

式中  $y_i, z_j$  为开关和联络开关的状态;

$a_i$  为权重系数。

最大限度地恢复停电区域的供电, 同时又不引起非停电区域的过负荷, 操作上还要最为简单, 方便, 这是配电网重构的一个大问题。过去大多采用专家系统(ES)方法<sup>[4,5]</sup>。然而, 由于ES不能处理在知识获取过程中不曾遇到过的特殊情况, 难以覆盖所有的故障模式和运行方式; 知识获取的工作量大, 而且有些知识不易表达成规则形式; 不能保证得到最优方案等。这使ES的应用受到限制。

目前有多种算法见于文献。文献<sup>[6]</sup>定义了3个包含电压降和线路参数的开关指标, 通过开关指标的

计算实现故障恢复。文献<sup>[7]</sup>给出了一个综合考虑开关操作次数最少和网损最小的配电网故障恢复重构模型。但是,地区停电恢复问题是一个多目标,多约束,离散寻优问题,ES及常规优化不能很好的解决问题。

3) 使负荷均匀分布,避免设备过载,提高电网的安全性和供电质量。典型的的目标函数为

$$LB_i = \frac{S_i}{S_i^{\max}}$$

$$LB_{\text{sys}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n_b} \frac{S_i}{S_i^{\max}}$$

式中  $LB_i, LB_{\text{sys}}$  分别是支路和系统的负荷平衡指数;

$S_i, S_i^{\max}$  分别是流过支路的功率和支路的容量;

$n_b$  为系统总支路数。

由于负荷的快速变化和电力建设的滞后,使配电网的负荷分布极不平衡,由此带来很大的危害,如增加系统的能量损耗,影响系统的电能质量和增加系统过负荷的危险。实现负荷平衡的手段主要有两种:一是在系统水平的馈线间进行负荷转移;二是进行馈线水平的相间负荷交换。Aoki 等人<sup>[8]</sup>在中提出一个混合整数非线性优化模型,并把它分解成变压器负荷平衡和馈线负荷平衡两个子模型。但这样分解使得馈线的容量无法确定,不能得到最优解。文献<sup>[9]</sup>就负荷平衡问题提出一种网络重构的线性整数规划模型,将问题的目标函数和约束条件都精确地用数学解析表达式表示,试图用解析的方法寻找全局最优解。文献<sup>[10]</sup>中提出了新的负荷平衡指数,并应用它来评估网络的负荷平衡情况。Whei- Min Lin et al<sup>[11]</sup>提出了一个针对三相不平衡配电网的负荷平衡算法。文献<sup>[12]</sup>使用支路负荷平衡系数和系统总的负荷平衡系数来确定系统的负荷水平和系统的容量。

4) 最小化系统有功功率损耗<sup>[17, 19, 23, 25]</sup>。典型的的目标函数为

$$\min P_{\text{loss}}$$

目前,大部分关于配电网重构的文献都以最小化有功为目标。但实际的配电系统中各节点的负荷时刻都在发生变化,以有功功率损耗最小为目标的最优结构也不可能是固定的,它随时会发生改变,并导致频繁的开关操作,这是不经济的也是不现实的。因此,实用的最小化有功功率损耗的方案是选择特定时段内特定时刻的负荷作为计算负荷,通常选用峰值负荷,然后就这一代表状态下有功功率损耗的最小化提

出开关操作的优化方案,完成网络重构。因为采用的是近似的方案,在非峰值负荷时刻没有实现真正最小化系统有功损耗,所以不能得到真正的最优解。

5) 某给定时间段上(一日、一周或一季度)的系统能量损耗最小<sup>[13, 16, 36, 37]</sup>。典型的的目标函数为

$$\min \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i \times X_i + \cos T_{\text{sw}}$$

式中  $\cos T_{\text{sw}}$  是开关的运行费用。

为了便于计算,一般采用阶梯形曲线来近似代替配电系统的实际的连续负荷曲线,同时忽略在较小时时间段(一小时)内负荷的波动情况。其实质是将连续变量离散化,注重变化趋势,忽略小的量变,目的是为了节省能源,简化计算。它保证了在某给定时间段上的系统能量损耗最小。文献<sup>[36, 37]</sup>以降低电能损耗为网络重构的目标函数,前者采用模拟退火法求解,但由于需要进行多层次大量的开关交换,计算量很大;后者采用遗传算法求解,该方法的主要缺点是选取不同的初始基因串会有不同的优化结果。

## 2 配电网重构的解决方法

最优配电网重构技术最早是由 Merlin 和 Back 于 1975 年提出来的,之后不断有研究成果发表,提出了多种方法,如从早期的传统优化手段到启发式和近全局寻优技术,再到近期的人工智能技术。以下作者将对上述各种方法做出分析和讨论。

### 2.1 传统的数学优化法

Merlin 和 Back<sup>[17]</sup>首先提出用分支定界法将重构问题表达成线性规划或非线性规划问题。其主要缺点是用直流潮流算法来计算网络潮流,负荷为纯有功。文献<sup>[18]</sup>提出了一种解决最优配电网重构的回路优化法,将最优网络结构表示成一个整数优化问题,其目标函数为网络有功损耗,是电流的二次函数。其计算简单,效率高,解答可行,其不足之处在于要确定初始可行解,同时对于大网络,花费时间较长。

传统的数学优化法,算法比较成熟,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,不能处理复杂的大规模的电力系统。

### 2.2 最优流模式算法

最优流模式算法是由 D. Shirmohammadi<sup>[19]</sup>等人于 1989 年提出的一种启发式方法,该方法首先闭合网络中的所有开关,形成有几个环的少网孔配电网

统。以网损最小为目标,在满足负荷需求的情况下计算最优潮流,求得环网支路的电流分布;然后将电流最小的支路断开,从而解开一个环,并且重新计算最优潮流;如此重复,直到配电网变成辐射网。这种算法中计算一次开关由合至开需要计算两次环网潮流,计算量大,而且求解潮流时各环网电流相互影响。但是配电网重构的结果与初始网络状态无关,比较容易收敛于最优解。

文献<sup>[20]</sup>在考虑了网络重构的实际运行约束的基础上提出了一个改进最优流模式法,并用一个快速有效的单环网潮流算法求解最优流模式。文献<sup>[21]</sup>在理论上推导出了在最优流模式下打开环网中的一个开关后系统功率损耗变化的计算公式,然后以打开开关所引起的网损增量最小为启发式规则来打开开关以形成新的辐射网。

### 2.3 支路交换法

该算法由 S. Civanlar 等人首先提出,并以公式

$$\Delta P = R_e [E_m - E_n]^* \sum_{i \in D} I_i + R_{loop} \left| \sum_{i \in D} I_i \right|^2$$

式中  $D$  为被转移区域的节点集合;

$m$  和  $n$  为合上的联络开关两端的节点,且  $m$  为从电源点开始电压降落较小的节点;

$I_i$  为节点  $i$  的负荷电流;

$R_{loop}$  为合上联络开关后形成的环网的电阻之和;

$E_m$  和  $E_n$  分别为节点  $m$  和节点  $n$  的电压。

$R_e\{ \}, *, | |$  分别表示复数的实部、共扼和模。

这类方法大都将负荷处理成恒定电流,用重构前的潮流分布进行网损估计。由于重构可能引起较大的负荷转移和电压变化,网损估计有一定的误差。支路交换算法以固定节点注入电流,以优化理论为根据,把开关操作的组合问题变为开关的启发式单开问题,而且只需要估算支路交换引起的网损变化,无需重新计算潮流,计算量小。缺点是每次只能考虑一对开关的操作,给出的配电网重构结果与配电网的初始结构有关,不能保证全局最优。

M. E. Baran 等人在文献<sup>[22]</sup>的基础上提出了一种在支路交换后重新计算潮流的方法,将二次函数求极值的方法用于寻找开关的最优操作,加快了搜索速度。文献<sup>[24]</sup>根据配电系统中存在大量独立拓扑调整的特点提出一次可以实施多个独立拓扑调整的配网重构方法,并通过节点流过的负荷电流值与理想转移

负荷之间的距离确定打开的分段开关,进一步提高了处理效率。该算法考虑并非所有配网支路上都安装开关,更符合实际情况。

### 2.4 近全局寻优技术

近年来,近全局寻优技术(如模拟退火,遗传算法和 Tabu 搜索)作为许多工程问题的一种可能的解决方法已经引起了广泛关注。

#### 2.4.1 遗传算法(GA)

遗传算法(Genetic Algorithm,简称GA)作为随机性算法在解决实际问题时,首先根据编码随机产生一组初始解,形成包含数据信息的码串,再通过遗传操作使其重新组合,最后码串所对应的解将趋向最优。

文献<sup>[25]</sup>所用算法充分利用了遗传算法的性质解决网络重构问题,但没有利用问题的特有性质而是对全部开关的状态 0~1 编码,这样会在遗传操作中产生大量不可解,降低了求解速度。文献<sup>[26]</sup>利用启发式算法来提高遗传算法的局部寻优能力,并且注意到了配电网的自身特点——网络中的联络开关(指本次网络重构前处于断开状态的开关)只占全部开关的极小一部分,故用联络开关的开合状态来编制染色体,可保证求出的解既有全局优化的性质,又实际可行,并且大大提高了求解的速度。文献<sup>[27]</sup>提出减少配电网重构中不可行解的染色体编码方法和遗传操作策略;通过对配电网结构的简化减少了 GA 染色体长度,从而进一步提高其计算效率。

#### 2.4.2 模拟退火算法(SA)

模拟退火法将组合优化问题与统计力学中的热平衡问题类比,可以有效地绕开局部最优解,以较大的几率找到全局最优解,而且最终解与初始解无关方法。

文献<sup>[28]</sup>提出了一种改进的 SA 算法,即以当前最优解作为当前控制温度的初始当前解,从而构造了一个单调递减的初始当前解序列,这一改进是算法对参数的依赖减小,而且进一步降低了计算量。随后,文献<sup>[29]</sup>中应用 SA 算法提出越界惩罚模型,针对目标函数提出了损耗模型,负荷率中心矩以及混合模型,并引入概率负荷潮流概念,试图摸索解决负荷不确定的问题。

该方法具有良好的收敛性,但其算法性能依赖于退火方案的选择,且需要进行大量的随机迭代,计算量大,将其用于配电网重构时需要进行多层次大量的开关交换,需要进行多次潮流计算和网损估计,计算

量更大。

### 2.4.3 Tabu 搜索算法(TS)

TS 的基本思想是利用一种灵活的“记忆”技术对已经进行的优化过程进行记录和选择, 指导下一步的搜索方向。

文献<sup>[30]</sup>应用了一种改进的 TS 方法和专家系统实现配电系统最优网络重构, 优化目标为损耗最小和电压质量最高, 同时保证足够的供电可靠性。供电可靠性指标是根据在预想事故发生的情况下, 重构后的网络结构能否向用户恢复供电来衡量的。所采用的改进的 TS 方法可以在搜索过程中自动调整有关参数, 无需由使用人员凭经验给定。

### 2.5 人工智能方法

#### 2.5.1 人工神经元(ANN)

ANN 是基于并行分布, 联想的方式实现的。基于 ANN 的算法不需要进行潮流计算, 可以在很短的时间内得出结果, 但其精度取决于样本, 而要获得完整的样本很困难, 需要较长的时间来训练样本。

文献<sup>[31]</sup>提出了用 BP 模型实现配电系统馈线结构重构, 以实现网损最小。首先根据每个地区负荷的测量数据利用一组 BP 模型估计负荷水平, 之后根据负荷水平再由另一 BP 模型决定期望的系统拓扑结构, 最后比较当前的和期望的系统拓扑结构决定控制策略(开关操作顺序)。采用 ANN 结构是分层分布式的。文献<sup>[32]</sup>使用四个 ANN 模型来满足系统的复杂性和负荷的性质, 最适合的一个模型被用来预测开关的最优状态, 在此状态下系统的网损最小。

#### 2.5.2 专家系统(ES)

专家系统擅长解决电力系统中难以建立数学模型而又依赖专家经验知识的问题。它的主要缺点是: 知识获取难; 处理复杂问题的时间长; 容错能力差; 基础理论还不完善。文献<sup>[4,5]</sup>提出一种基于专家系统的故障恢复与配电网重构算法, 充分利用了调度人员的经验, 但不能保证得到全局最优解。Peponis. G 等人提出了针对大规模配电网的基于启发式方法的配电网重构算法, 不但降低了网损, 也改善了负荷分布。

#### 2.5.3 模糊集理论(FST)

模糊集理论提供了对研究对象多种属性的选择方案, 适用不能用经典的布尔逻辑描述的模型, 并能很好地利用专家的经验。但是模糊集理论在线处理能力较差, 理论上不能得到最优解, 必须依赖于其他技术的联合应用。

文献<sup>[34]</sup>提出一种模糊逻辑和进化算法相互配合的算法, 用模糊集控制进化进度, 从而得到全局或近全局最优。文献<sup>[35]</sup>提出一种模糊遗传算法, 即通过模糊规则在线地改变 PC 和 PM 的值, 模糊遗传算法改进了简单遗传算法的性能, 提高了收敛速度, 避免了未成熟收敛。

## 3 结论

对国内外关于配电网重构技术的文献进行了综述。重点分析了五种典型的目标函数和五种典型的解决方法。对它们各自的优缺点, 适用场合进行了对比和分析, 并将分析的结果归纳后附在附表中。近来, 研究人员已经将研究重点转向多目标函数的综合优化和多种优化解决方法联合运用上。希望找到最佳的解决方案。

### 参考文献

- [1] 别朝红, 王锡凡. 配电系统的可靠性分析 [J]. 中国电力, 1997, 30(5): 10- 13.
- [2] Brown, Richard E. Distribution reliability assessment and re-configuration optimization [C]. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, 28(2), 2001: 994- 999.
- [3] 王秀丽, 吴宏晓, 别朝红, 王锡凡. 以提高系统可靠性为目标的配电网网络重构 [J]. 中国电力, 2001, 9: 40- 43.
- [4] Paik Y M, Lee K H. Application of expert system to power system restoration on local control center [J]. Electrical Power & Energy Systems, 1995, 17(6): 407- 415.
- [5] Krischen S, Volkman T L. Restoring a power system with an expert system [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(2): 558- 564.
- [6] Lin Whei- Min, Chin Hong- Chan. A new approach for distribution feeder reconfiguration for loss reduction and service restoration [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(3): 870- 875.
- [7] 李海锋, 张尧, 钱国基, 黄健. 配电网故障恢复重构算法研究 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 34- 37.
- [8] Aoki. K, Kuwabara. H, Satoh. T and Kanezashi. M. An efficient algorithm for load balancing of transformers and feeders [J]. IEEE Trans. PWRD, 1988, 3(4): 1865- 1872.
- [9] Qin Z, Dariush S, Edwin W H. Distribution feeder reconfiguration for service restoration and load balancing [J]. IEEE Transactions on Power System, 1997, 12(2): 724- 729.

- [10] Kashem, M A and Moghawemi M. Maximizing radial voltages stability and load balancing via loss minimization in distribution networks [C]. Proceedings of the international conference on Energy management and power delivery (EMPD' 98). Sirgapore. 3- 5 March 1998: 91- 96.
- [11] Lin W M and Chin H C. A current index based load balancing technique for distribution systems [C]. Proceedings of the international conference on power system technology. (POWERCON' 98). Aug. 1998: 223- 227.
- [12] M. A. Kashem, V. Ganapathy and G. B. Jasmon. Transformer and feeder load balancing using a heuristic search approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(1) : 184- 190.
- [13] Robert P. Broadwater; Asif H. Khan; Hesham E. Shaalan and Robert E. Lee. Time varying load analysis to reduce distribution losses through reconfiguration [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 8(1), 1993: 294- 300.
- [14] C S Chen; M Y Cho. Energy loss reduction by critical switches [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 8(3), 1993: 1246 - 1253.
- [15] Rubin Taleski; Dragoslav Rajicic. Distribution network reconfiguration for energy loss reduction [J]. IEEE Trans on Power Systems, 12(1), 1997: 398- 406.
- [16] Vesna Borozan; Nikola Rajakovic. Application assessments of distribution network minimum loss reconfiguration [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 12(6), 1999: 563- 567.
- [17] Merlin A, Bask. H. Search for a minimal- loss operating spanning tree configuration in urban power distribution systems [C]. Proc of 5th Power Systems Comp Con, Cambridge, UK, 1975: 2- 6.
- [18] Chiang- Hsiao Dong, ReneJean Jumeau. Optimal network reconfiguration distribution systems Part I: A new formulations and a solution methodology [J]. IEEE Transaction on PWRD, 1990, 5(4) : 1902- 1909.
- [19] Shimohammadi D, Wayne Hong H. Reconfiguration of electric distribution network for resistive line losses reduction [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2) : 1492- 1498.
- [20] 邓佑满, 张伯明, 相年德. 配电网重构的改进最优流模式算法[J]. 电网技术, 1995, 19(7) : 47- 50.
- [21] 吴本悦, 赵登福, 刘云, 等. 一种新的配电网重构最优流模式算法[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(4) : 21- 24.
- [22] Civanlar S et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988; 3(3) : 1217- 1223.
- [23] Baran M E, Wu F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2) : 1401- 1407.
- [24] 毕鹏翔, 刘健, 张文元. 配电网重构的改进支路交换法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8) : 98- 103.
- [25] Nara K, Shiose A, Kitagawa M, et al. Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum re-configuration [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(3) : 1044- 1051.
- [26] 余贻鑫, 邱炜, 刘若沁. 基于启发式算法与遗传算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2001, 25(11) : 19- 22.
- [27] 毕鹏翔, 刘健, 刘春新, 张文元. 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.
- [28] 胡敏, 陈元. 配电系统最优网络重构的模拟退火算法[J]. 电力系统自动化, 1994, 18(2) : 24- 28.
- [29] 胡敏, 王辉. 模拟退火算法对配电网的分析运用[J]. 电力自动化设备, 1995, 1: 8- 12.
- [30] Toune S, Genji T, Fujita N, et al. Optimal Network Reconfiguration Considering Customer Reliability [C]. In: ISAP' 99. Rio de Janeiro (Brazil) : 1999.
- [31] Kim H, Ko Y, Jung K H. Artificial neural- network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 8(3), 1993: 1356- 1366.
- [32] Kashem, M. A; Ganapathy, V; Ledwich, G. Artificial neural network techniques for on- line distribution network reconfiguration based resistive loss reduction [J]. International Journal of Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering and Communications, 9(3), 2001: 137- 147.
- [33] Peponis G; Papadopoulos M Reconfiguration of radial distribution networks: application of heuristic methods on large- scale networks [C]. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution 6 Nov 1995: 631- 637.
- [34] Wang G S; Wang P Y; Song Y H; Johns, A. T. Co-ordinated system of fuzzy logic and evolutionary programming based network reconfiguration for loss reduction in distribution [C]. IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 3, Sep, 1996: 1838- 1843.
- [35] 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.
- [36] Chiang H D. Optimal network reconfiguration in distribution systems part2: solution algorithm and numerical results. [J], IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(3) : 1568- 1574.
- [37] Nara K. Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum reconfiguration [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(3) : 1047- 1051.