

基于负荷类型的一种配电网重构算法

罗 绮, 吕 林

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 随着配电网的扩大, 目前的配电网重构算法都不可避免存在计算量大的问题。分析了负荷与配电网网损的关系, 并基于此给出了一种配电网重构的算法。算法对可操作的开关进行了分类, 形成了三步式搜索, 大大提高了重构算法的效率和速度。算例证明了该方法的可行性和有效性。

关键词: 配电网重构; 负荷类型; 优化算法

A modulated algorithm for distribution networks reconfiguration based on load types

LUO Qi, Lü Lin

(School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: As distribution networks getting larger, present optimal algorithm for distribution networks reconfiguration(DNR) will inevitably face the problem that it takes too much time to calculate. This paper analyses the relationship between load and distribution network loss, and then proposes an algorithm for DNR. The algorithm classifies all the switches that can be handled, and divides algorithm into three steps, which can improve the efficiency and speed. Cases have showed its feasibility and efficiency.

Key words: DNR; load types; optimal algorithm

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)07-0042-05

0 引言

配电网重构是配电网经济运行的一个重要手段。根据负荷预测以及网络负荷变化状况, 通过灵活调整网络中联络开关和相应常闭分段开关的开合状态, 可以降低运行网损、提高电压质量、消除过载、提高供电可靠性、提高网络供电能力等, 实现配电网的经济、高效运行。

配电网重构问题实际上是一个大规模非线性组合优化问题。常用的求解方法中支路交换法^[1]和最优流模式法^[2]具有优化速度快、实现简单的特点, 但一般只能获得局部最优解, 且优化结果与网络初始结构有关; 禁忌算法、模拟退火算法和遗传算法等人工智能算法^[3-5]虽然理论上能够保证获得全局最优解, 但存在计算量大, 易早熟收敛。如何减少各种人工优化算法的计算量, 成为其能否投入实际运用的关键。

配电网经济运行研究需要考虑两大因素: 网络拓扑结构和负荷。前者随着对配电网网络结构的深入研究, 配电网闭环设计, 开环运行的特点被广大学者所认识, 并利用它减少了各种优化算法中的无

效编码和不可行解。后者却很少引起人们的重视。本文分析了负荷类型与配电网网损的关系。利用这个关系设计了一种重构算法, 大大提高了搜索效率和速度。算例证明了本方法的可行性和有效性。

1 配电网重构的数学模型

配电网运行重构的目标多为平衡负荷、降低网损, 提高供电质量等。本文以系统有功网损最小为目标函数进行重构的数学表达式为:

$$\text{Min} F \sum_{i=1}^n \Delta S_i \quad (1)$$

式中: ΔS_i 为第 i 条支路上的功率损耗; n 为支路总数。

在网络重构过程中, 还必须满足以下约束:

(1) 网络辐射状运行结构约束, 无环路及孤立节点。

(2) 支路容量约束

$$S_i < S_{i\max}, i=1, 2, \dots, n$$

式中: n 为支路总数, S_i 为支路 i 上的功率, $S_{i\max}$ 为支路 i 的线路容量。

(3) 节点电压约束

$$U_{imin} < U_i < U_{imax}, i=1, 2, \dots, N$$

式中: N 为节点总数, U_i, U_{imin}, U_{imax} 分别为节点 i 的电压及其上下限。

2 负荷类型与网损的关系

2.1 负荷与网损的关系

负荷一般可以按产业或者大小来区分, 本文所指的负荷类型是按大小区分。负荷按大小可以分为重负荷, 一般负荷和轻负荷。对某一配电网, 本文定义大于平均负荷 2 倍的负荷为重负荷; 小于平均负荷 2 倍的为轻负荷; 剩下的为一般负荷。负荷大小与配电网重构的关系主要体现在其与网损的关系。由式 (1) 可以改写为:

$$\Delta S_{\text{总}} = \sum Z_{ij} \left(\frac{S_{ij}}{U_j} \right)^2 \quad (2)$$

式中: $\Delta S_{\text{总}}$ 为总的网损; Z_{ij} 为支路的阻抗; S_{ij} 为支路潮流; U_j 为支路 ij 末端电压。

如图 1 所示四节点配电网, i 为首节点, m 为末节点, U_i, U_j, U_k, U_m 和 S_j, S_k, S_m 分别为对应节

$$\Delta S_{\text{总}} = \frac{Z_{km}}{U_m^2} S_m^2 + \frac{Z_{jk}}{U_k^2} (S_m + S_k + \frac{Z_{km}}{U_m^2} S_m^2)^2 + \frac{Z_{ij}}{U_j^2} (S_m + S_k + S_j + \frac{Z_{km}}{U_m^2} S_m^2 + \frac{Z_{jk}}{U_k^2} (S_m + S_k + \frac{Z_{km}}{U_m^2} S_m^2)^2)^2 \quad (9)$$

$$\Delta S_{\text{总}} = \frac{Z_{N-1,N}}{U_N^2} S_N^2 + \frac{Z_{N-2,N-1}}{U_{N-1}^2} (S_N + S_{N-1} + \frac{Z_{N-1,N}}{U_N^2} S_N^2)^2 + \dots + \frac{Z_{1,2}}{U_2^2} (S_N + S_{N-1} + \dots + S_2 + \frac{Z_{N-1,N}}{U_N^2} S_N^2 + \dots + \frac{Z_{2,3}}{U_3^2} (S_N + S_{N-1} + \dots + S_3 + \frac{Z_{N-1,N}}{U_N^2} S_N^2)^2)^2 \quad (10)$$

$$\Delta P_{\text{总}} = \frac{R_{N-1,N}}{U_N^2} P_N^2 + \frac{R_{N-2,N-1}}{U_{N-1}^2} (P_N + P_{N-1} + \frac{R_{N-1,N}}{U_N^2} P_N^2)^2 + \dots + \frac{R_{1,2}}{U_2^2} (P_N + P_{N-1} + \dots + P_2 + \frac{R_{N-1,N}}{U_N^2} P_N^2 + \dots + \frac{R_{2,3}}{U_3^2} (P_N + P_{N-1} + \dots + P_3 + \frac{R_{N-1,N}}{U_N^2} P_N^2)^2)^2 \quad (11)$$

由此可以推到有 N 个节点的支路的线损表达式 (10):

式 (10) 中, 我们假设节点 i 为该支路中的一个节点, 其上的负荷 S_i 为重负荷, 那么很明显节点 i 越靠近线路末端, 它在式子中出现的频率越高, 对 $\Delta S_{\text{总}}$ 的贡献越大, 相应的总损耗 $\Delta S_{\text{总}}$ 就越大; 如果它为轻负荷则相反。在以网损为目标函数的配电网重构中, 可以表述为如下结论:

在以网损最小为目标函数的配电网重构中, 打开开关支路的首末节点可以限定为网络中拥有轻负荷的节点。这样当打开开关时, 由此产生的两条支

路的末节点将为轻负荷节点。

点的电压和负荷; S_{ij}, S_{jk}, S_{km} 分别为线路潮流; $\Delta S_{ij}, \Delta S_{jk}, \Delta S_{km}$ 为线路的线损。

这样有:

$$S_{km} = S_m \quad (3)$$

$$S_{jk} = S_k + S_{km} + \Delta S_{km} \quad (4)$$

$$S_{ij} = S_j + S_{jk} + \Delta S_{jk} = S_j + S_k + S_{km} + \Delta S_{km} + \Delta S_{jk} \quad (5)$$

$$\Delta S_{km} = \frac{Z_{km}}{U_m^2} S_m^2 \quad (6)$$

$$\Delta S_{jk} = \frac{Z_{jk}}{U_k^2} S_{jk}^2 \quad (7)$$

$$\Delta S_{ij} = \frac{Z_{ij}}{U_j^2} S_{ij}^2 \quad (8)$$

把式 (3)~式 (8) 代入 (2) 中可以得到式 (9);

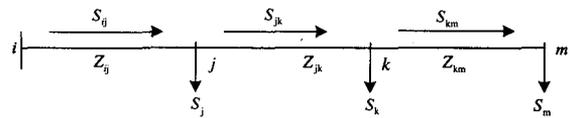


图 1 配电网线路模型

Fig.1 Distribution line model

路的末节点将为轻负荷节点。

把 S 改为 P , 则视在功率变成了有功功率:

所有的优化算法都有一个求解的搜索空间, 合理的限定搜索空间, 可以有效避免不可行解的产生, 提高算法的搜索效率和速度。为了达到这个目的, 很多学者利用配电网闭环设计开环运行的特点, 缩小了算法的搜索范围。现在根据结论, 利用配电网线路上众多的负荷类型上的差异性, 把打开开关的范围, 限定在首末节点为轻负荷的支路上。这样当打开开关以后, 两条支路的末节点的负荷就成为了轻负荷。这样大大的缩小了优化算法的搜索范围和

解空间,提高了算法的运算速度。

结论是以单条线路的优化作为出发点。由于配电网的闭环设计特征,打开一个开关将形成两条拥有同一电源点的支路,因此还需要考虑双支路的优化,特别是对于重负荷远离电源点,且在支路末端的线路。

2.2 负荷与线路均衡性的关系

文献[7]的研究工作从计算结果上验证了“辐射型配电网负荷均衡意味着优化”这种经验性结论^[8]。文献[9]介绍负荷均衡度的概念,并且采用杠杆模型的表达方式,从二次电流矩的角度概念性的分析了二次电流矩的均衡与辐射型配电网线路功率优化的关系。其中定义了二次电流矩模型的5个基本概念:

1) 逆流路径:逆流而上,节点 n_i 到源节点 n_0 所经历的支路集合和节点集合构成逆流路径,记做 W_i 。

2) 阻抗距离:逆流路径 W_i 的所有支路阻抗之和叫做 W_i 的阻抗距离。即

$$Z_i = \sum_{b_j \in W_i} z_{b_j} \quad (12)$$

其中:

$$z_{b_j} = r_{b_j} + jx_{b_j} \quad (13)$$

为支路 b_j 的阻抗。

3) 节点等效二次电流:设 $n_k, n_s \in W_i$, 并且 $n_s \subset n_k$, 那么

$$\tilde{I}_{nk}^2 = I_{bk}^2 - I_{bs}^2 \quad (14)$$

记作 n_k 的节点等效二次电流,如图2所示。其中, I_{bk} 和 I_{bs} 为电流幅值。

4) 二次电流矩:逆流路径 W_i 的二次电流矩为

$$T_{W_i}^2 = \sum_{n_j \in W_i} Z_k \tilde{I}_{nj}^2 \quad (15)$$

显然,二次电流矩具有功率量纲。

5) 二次电流矩均衡度:2个不同的二次电流矩之差

$$B^2(n_i, n_j) = T_{W_i}^2 - T_{W_j}^2 \quad (16)$$

是这2个二次电流矩的均衡度。均衡度大表明网络损耗大。

在打开开关以后,为了表征新形成的两条支路的平衡度,判断开关操作是否增加了线路的不平衡度,这里需要定义相对不平衡度 σ :

$$\begin{cases} \text{if } \frac{T_{W_i}^2}{T_{W_j}^2} < 1, \sigma = \frac{T_{W_i}^2}{T_{W_j}^2} \\ \text{else, } \sigma = \frac{T_{W_j}^2}{T_{W_i}^2} \end{cases} \quad (17)$$

设定 σ_0 为阈值,如果开关操作引起的不平衡度 $\sigma < \sigma_0$, 证明开关操作为非可行解,需要重新操作。

相对不平衡度与线路潮流和阻抗有关系,实际上也和负荷有关系。在两条线路之间可以通过开关转移负荷,可以增加线路的平衡性。对于二次电流矩过大的线路,把其线上的重负荷转移到另外一条二次电流矩较小的线路,可以快速的改善线路平衡性。因此,此时应该对重负荷进行操作。

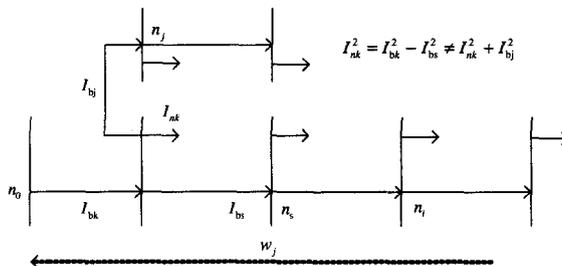


图2 节点等效二次电流

Fig.2 Nodal equivalent quadratic current

3 基于负荷类型的配电网重构算法

考虑负荷类型的配电网重构的算法流程如下:

1) 对配电网所有的负荷按照以下原则分类:低于平均负荷一半的负荷为轻负荷、高于平均负荷两倍的负荷为重负荷,剩下的为一般负荷;

2) 根据配电网拓扑结构确定算法搜索域,即每次重构要保证配电网开环运行,并且不能出现孤岛。具体做法是:首先把所有联络开关闭合,由此而形成的每个环网上的所有支路作为一个单独的搜索域进行编码。同时必须满足:每一个环网上必须有一个开关打开,包含两个环网支路的任意一条公共支路不能同时出现两个打开开关;

3) 根据负荷类型的三步式搜索:

① 第一步,对首末节点为轻负荷的开关进行搜索。首先选择每个环中首末节点为轻负荷的支路开关作为操作对象,在所有环中进行搜索。分别求取此条件下,各种开关组合所对应的网损 ΔP_{local} 以及任一打开开关所形成的两条支路的二次电流矩,进而求出相对不平衡度 σ 。选择 $\sigma > \sigma_0$ 的开关组合,求取 $\Delta P_{globe} = \text{Min}\{\Delta P_{local}\}$, ΔP_{globe} 所对应的开关组合为最终的开关组合;

② 第二步,对重负荷节点左右开关进行操作。如果其中一个环进行①中搜索,得到的全部开关对应的相对不平衡度都有: $\sigma < \sigma_0$, 则选择该环上的重负荷左右的开关再次搜索,并计算 ΔP_{local} 。选择 $\sigma > \sigma_0$ 的开关组合,求得 $\Delta P_{globe} = \text{Min}\{\Delta P_{local}\}$ 。 ΔP_{globe} 所对应的开关组合为最终开关组合。

③ 第三步, 余下开关的搜索。如果某个环完成①、②步搜索之后, 得到的 σ 都有: $\sigma < \sigma_0$, 那么就对该环剩下的开关进行搜索, 再计算各自的 ΔP_{local} 。得到 $\Delta P_{globe} = \min\{\Delta P_{local}\}$ 。 ΔP_{globe} 所对应的开关组合就为最终的开关组合。

本文采用的算例 1 为 33 节点系统, 算例 2 为 69 节点系统。前者总负荷为 3175 kW + j2300 kvar, 平均负荷为 112.58 kW + 69.70 kvar; 后者总负荷为 3802 kW + j2694 kvar, 平均负荷为 55.10 kW + j30.04 kvar。额定电压都为 12.66 kV, σ 分别取 0.6 和 0.8。按照负荷划分原则划分负荷, 见表 1。

4 算例

表 1 负荷划分结果

Tab.1 Results of the classified load

| 算例 | 轻负荷数 | 重负荷数 | 一般负荷数 | 首末节点为轻负荷的支路 | 有重负荷节点的支路 |
|----|------|------|-------|-------------|-----------|
| 1 | 14 | 8 | 10 | 11 | 15 |
| 2 | 23 | 7 | 18 | 36 | 14 |

表 2 优化结果

Tab.2 Optimization results

| | 算例 1 | | | | 算例 2 | | | |
|----------|--------|----------|----------------|----------------|--------|----------|----------------|----------------|
| | 重构前 | 文献[6]的方法 | 本文的方法 | | 重构前 | 文献[6]的方法 | 本文的方法 | |
| | | | $\sigma_0=0.6$ | $\sigma_0=0.8$ | | | $\sigma_0=0.6$ | $\sigma_0=0.8$ |
| 打开开关集合 | 8-21, | 7-8, | 7-8, | 7-8, | 11-66, | 14-15, | 14-15, | 14-15, |
| | 9-15, | 14-15, | 12-13, | 14-15, | 13-20, | 44-45, | 44-45, | 44-45, |
| | 12-22, | 25-29, | 25-29, | 25-29, | 15-69, | (45-46, | (45-46, | (45-46, |
| | 18-33, | 9-10, | 9-10, | 9-10, | 27-54, | 46-47, | 46-47), | 46-47, |
| | 25-29 | 32-33 | 32-33 | 32-33 | 39-48 | 47-48), | 51-52, | 47-48), |
| | | | | | 50-51, | 66-67, | 50-51, | |
| | | | | | 11-66, | 13-20 | 11-66, | |
| | | | | | 13-20 | | 13-20 | |
| 网损/kW | 221.54 | 146.77 | 153.24 | 146.77 | 256.43 | 128.92 | 154.36 | 128.92 |
| 最大搜索步数 | \ | \ | 二 | 三 | \ | \ | 一 | 二 |
| 最大搜索域(条) | \ | 48600 | 6160 | 9680 | \ | 365568 | 32832 | 52668 |

表 3 网损优化结果

Tab.3 Network loss optimization results

| | 算例 1 | | | 算例 2 | | |
|-----------------------|----------|----------------|----------------|----------|----------------|----------------|
| | 文献[6]的方法 | 本文的方法 | | 文献[6]的方法 | 本文的方法 | |
| | | $\sigma_0=0.6$ | $\sigma_0=0.8$ | | $\sigma_0=0.6$ | $\sigma_0=0.8$ |
| 与初始网络结构比较, 网损降低百分数(%) | 33.75 | 30.83 | 33.75 | 49.73 | 39.8 | 49.73 |

表 4 搜索效率优化结果

Tab.4 Optimization results of search efficiency

| | 算例 1 | | 算例 2 | |
|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | $\sigma_0=0.6$ | $\sigma_0=0.8$ | $\sigma_0=0.6$ | $\sigma_0=0.8$ |
| 与文献[6]比较, 最大搜索域缩小百分数/(%) | 87.33 | 80.08 | 91.02 | 85.59 |

优化结果如表 2 所示。

与初始网络相比较, 见表 2 和表 3, 在算例 1 和算例 2 中得到的最优化结果都与文献[6]一致。然而从表 4 中可以看出, 本文提出的方法, 搜索域与文献[6]相比缩小了 80% 以上, 带来了速度上的巨大

飞跃。在算例 1 中虽然出现了需要进行第③步搜索的情况, 但是由于需要进行第③步的环只有一个, 搜索域也仅仅增加了 7.25%。与文献[6]的算法相比, 本文所提的算法得到的结果一样, 但是搜索域减小了 80.08%。

σ_0 值的选择对于优化结果影响很大,如表 2 和表 3 所示。当 σ_0 过小,对线路负荷不均衡度反应不敏感,允许了部分不均衡度大的开关操作,因此会错过部分最优解。两个算例都说明了当 $\sigma_0=0.8$ 时效果较好,但也有增大搜索域的可能性。在实际应用中,电网调度人员应该综合考虑重构的网损目标和运行时间,选择合适的 σ_0 。

5 结论

在配电网重构领域,大多数的研究都集中于优化算法的改进。随着人们对配电网特殊网络结构的逐渐认识,根据网络结构设计编码从而改进优化算法,促进了配电网重构研究的进一步发展,也增大了智能算法的应用空间。尽管如此,由于计算量大,智能算法离在线应用还有不少距离。本文提出一种基于负荷类型的配电网重构算法。首先从负荷与配电网损耗的关系上进行了相关分析,提出了按负荷类型进行三步式搜索。算法大大的减少了需要考虑的开关的数量,缩小了优化算法的搜索空间。

参考文献

- [1] 毕鹏翔,刘健,张文元.配电网重构的改进之路交换法[J].中国电机工程学报,2001,21(8):98-103.
BI Peng-xiang, LIU Jian, ZHANG Wen-yuan. A Refined Branch Exchange Algorithm for Distribution Networks Reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 98-103.
- [2] 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):22-24.
WU Ben-yue, ZHAO Deng-fu, LIU Yun, et al. An Improved Optimal Flow Pattern Algorithm for Distribution Network Reconfiguration[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(4): 22-24.
- [3] 胡敏莹,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.
HU Min-you, CHEN Yuan. Simulated Annealing Algorithm of Optimal Reconfiguration in Distribution System[J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18(2): 24-28.
- [4] 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.
- [5] 葛少云,刘自发,余贻鑫.基于改进禁忌搜索的配电网重构[J].电网技术,2004,28(23):22-26.
GE Shao-yun, LIU Zi-fa, YU Yi-xin. An Improved Tabu Search for Reconfiguration of distribution Systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 22-26.
- [6] 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 Li-xiong, Lu Lin, LIU Jun-yong. Modified Particle Swarm Optimization for Reconfiguration of Distribution Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 27-30.
- [7] Baran M E, Wu F F. Networks Reconfiguration in Distribution System or Loss Reduction and Load Balancing[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [8] 蔡中勤.配电网 Newton 法潮流及功率矩法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2000.
CAI Zhong-qin. Newton Load Flow and Power Moment Method Research on Distribution Network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2000.
- [9] 屠强,郭志忠.辐射型配电网重构的二次电流矩法[J].中国电机工程学报,2006,26(16):57-61.
TU Qiang, GUO Zhi-zhong. The Quadratic Current Moment Method for Radial Distribution Network Reconfiguration[J]. Proceedings of CSEE, 2006, 26(16): 57-61.

收稿日期:2007-09-05; 修回日期:2007-11-12

作者简介:

罗 绮(1982-),男,硕士研究生,研究方向为配电网经济运行; E-mail:cityhunterluo@163.com

吕 林(1963-),男,副教授,硕士生导师,主要从事配电网自动化方面的研究。

(上接第 41 页 continued from page 41)

收稿日期:2007-08-25; 修回日期:2007-11-08

作者简介:

章 健(1963-),男,博士,副教授,硕士生导师,主

要研究方向为电力负荷建模、电力系统分析与运行;

王雷涛(1979-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统监测与控制; E-mail: wlt1234@126.com

张 锋(1982-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用。