

一种大规模配电网实时重构新方法

车仁飞, 李仁俊

(山东大学电气工程学院, 山东省济南市 250061)

摘要: 提出了一种利用最小树算法和开关交换方法进行大规模配电网重构的新方法。该方法首先利用最小树算法对配电网进行初步重构, 重构的结果基本接近最优解, 然后利用开关交换方法在最小树初步重构的基础上进行精确重构, 最终得到最优解或近似最优解。在最小树初步重构过程中, 采用了简化潮流计算方法、近似网损计算方法和只对受影响电路进行潮流计算的方法, 使得初步重构的耗用时间大大减少。在开关交换重构中采用了精确潮流计算, 保证了最终得到最优解或近似最优解。此外, 为了建立适于配电网重构的拓扑关系, 文中介绍了配电网图的形成方法。实际系统的算例测试结果表明, 该方法效率高, 重构效果明显, 能够适用于大规模配电网的实时网络重构。

关键词: 配电网; 重构; 最小树; 开关交换

中图分类号: TM727.2; TM732

0 引言

配电网重构是电网经济运行、提高安全可靠性的的重要手段。由于重构对象是针对开关的组合优化, 属于 NP 难问题, 无法从数学上找到求取最优解的精确算法, 所以通常采用启发式算法计算近似最优解。一般而言, 配电网的规模越大, 网络中的开关越多, 重构后减少的网损越可观, 提高安全可靠的潜力越大。而大规模配电网的重构, 涉及到大量的拓扑分析计算和潮流计算, 可能消耗很多时间, 给实时应用带来困难。

近年来, 随着配电自动化的发展, 人们对配电网重构问题进行了大量研究^[1~6], 其中比较流行的算法有两种: 最优流模式算法^[1]和开关交换算法^[2,3]。最优流模式算法是由 D. Shirmohammadi 等人提出的一种启发式方法, 它以功率损耗最小为目标函数, 通过计算弱环网中的最优流决定打开哪个开关。该方法能够给出一个近似最优解, 但随着网络规模的增大, 由于算法中涉及到弱环网的潮流计算和最优流的计算, 使得计算时间大大增加。开关交换算法是由 S. Civanlar 等人首先提出: 每次合上一个联络开关形成一个环; 选择环中一个分段开关打开; 计算两个开关交换前后的网损变化情况, 保证开关交换后网损降低。开关交换算法是一个效率很高的方法, 在大多数情况下能够给出一个比较好的重构结果, 该方法的一个缺点是重构结果与网络的初始结构有关。另外, 随着人工智能理论的发展, 很多学者

将人工智能的方法运用到配电网重构中^[4~6], 这些方法在保证得到全局最优解方面效果很好, 但方法中的某些参数可能随着网络规模等因素的变化而变化, 很难确定, 限制了实时应用。

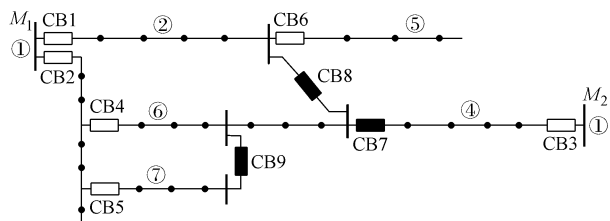
1 用于重构的配电网图的形成

10 kV 配电网是由变电站母线、站内开关、柱上开关、馈线线段、配用变压器、负荷等组成的一个复杂网络, 拓扑关系复杂, 因此在重构前应物理配电网转化为适于重构算法的网络图。

将配电网用图的概念来建模。考虑配电馈线的起始点是变电站母线, 将所有变电站母线等效为一个共同的节点, 从而当所有分段开关闭合、联络开关断开时, 整个配电网就是一个有着共同根节点的树。令开关作为图的弧, 而令开关之间的馈线段、配变、负荷等形成图的节点, 整个配电网就构成了一个任意两个节点之间有且只有 1 条弧相连的完全无向图 G 。显然, 重构的结果正好构成这个完全图 G 的一个子图。为了保证所有负荷(图的节点)都能够得到电力供应, 该子图 T 必须是连通的, 且包含图 G 中所有节点。同时, 为了保证辐射状供电, 该子图必须是无圈的。综上所述, 配电网图的形成方法如下:

- 所有馈线的起始点(变电站母线)等效为一个节点, 称为根节点, 它是下面最小树重构算法的起始点, 也是重构后形成的最小树的根节点。
- 出线开关、分段开关、联络开关等效为图的弧。
- 开关之间馈线段、配变、负荷等设备等效为节点。

如图 1 所示为一个简单的配电网示意图,图中包含了 3 条馈线, M_1 和 M_2 为变电站母线,CB1,CB2 和 CB3 分别为 3 条馈线的出线开关,CB4,CB5 和 CB6 为分段开关,CB7,CB8 和 CB9 为联络开关。该配电网转化为图,如图 2 所示,其中根节点①由母线 M_1 和 M_2 共同组成;节点②由 CB1,CB6 和 CB8 之间的馈线段、负荷等组成,节点③由 CB2,CB4 和 CB5 之间的馈线段、负荷等组成;弧 1 对应 CB1,弧 2 对应 CB2,……。



带圈数字为图 2 中等效节点编号; □ 为常闭节点; ■ 为常开节点

图 1 一个简单的配电网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the primary circuit of a distribution system

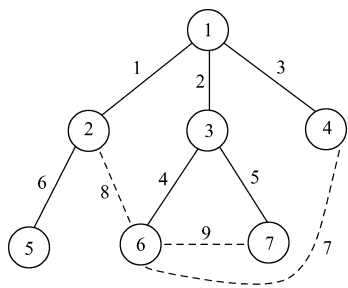


图 2 由图 1 配电网形成的图

Fig. 2 Formed graph from figure. 1

2 最小树重构算法

2.1 最小树重构方法

本文提出的最小树重构方法是从所形成的图 $G=(N,E)$ 的根节点开始,不断扩展一棵子树 $T=(S,E_0)$,直到 S 包括图的所有节点(即 $S=N$),得到最小树。具体说来,就是在 E_0 中每次增加一条弧,使得这条弧是由当前子树节点集 S 与其补集 $\bar{S}$ 所形成的割集 $[S,\bar{S}]$ 中的最小弧,具体算法过程如下:

a. 设 v_0 为 N 的根节点,令 $S=\{v_0\}$, $E_0=\emptyset$ 。

b. 若 $S=N$,结束, $T=(S,E_0)$ 为最小树;否则转步骤 c。

c. 若 $[S,\bar{S}]=\emptyset$,则 G 不连通,结束;否则,设 $W(e^*)=\min_{e \in [S,\bar{S}]} W(e)$,其中 $e^*=(v_1,v_2)$, $v_1 \in S$, $v_2 \in \bar{S}$ 。令 $S=S \cup \{v_2\}$, $E_0=E_0 \cup \{e^*\}$,转步骤 b。

上面所述最小树重构方法,开始时打开所有的开关,然后从根节点开始每次选择一个权值最小的

弧,相当于合上一个开关。每次迭代中首先确定可选的弧(开关)集,即已形成的当前子树节点集与图中其他节点之间的割集,然后从中选择权值最小的弧。当所形成的最小树中包含所有的节点时,算法结束,最小树中的所有弧即为所有的闭合的开关,没有选入最小树中的所有弧,即为断开开关。在选择最小弧时,应满足约束条件(如电压电流上下限),对于不能满足约束条件的最小弧,应选择割集中下一个最小弧,直到满足为止。弧的权值通过下式计算确定:

$$\begin{cases} W_a = \frac{\Delta P_{\text{lossa}}}{\Delta S_{\text{loada}}} \\ W_b = \frac{\Delta P_{\text{lossb}}}{\Delta S_{\text{loadb}}} \\ W_c = \frac{\Delta P_{\text{lossc}}}{\Delta S_{\text{loadc}}} \\ W = W_a + W_b + W_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: ΔP_{lossa} , ΔP_{lossb} , ΔP_{lossc} 分别为所选开关(弧)闭合后 a, b, c 相的网损增量; ΔS_{loada} , ΔS_{loadb} , ΔS_{loadc} 分别为所选开关(弧)闭合后 a, b, c 相的负荷增量; W 为所选开关(弧)的权值。

下面分析最小树重构算法的计算复杂性,该算法的主要计算量在于步骤 c(寻找割集中的最小弧)。如果通过对每条弧进行检查寻找边割中的最小弧,则该步的计算复杂度为 $O(m)$,因为步骤 c 最多执行 $n-1$ 步,所以该算法的复杂度为 $O(mn)$ 。仔细研究步骤 c 中的计算内容,我们可以将计算耗时间分为两种:一种是拓扑分析时间,另一种是潮流计算时间。拓扑分析时间主要用来在已形成的子树和剩余节点之间寻找割集,它是由重构算法的计算复杂性决定的;潮流计算时间主要是通过潮流计算来确定弧的权值,潮流计算时间一般要远远大于拓扑分析时间,所以确定一种合理的潮流计算方法,减少潮流计算时间,是减少重构时间的主要手段。本文采用了两种方法来减少潮流计算时间:①由于在最小树重构过程中,每次计算一个开关权值的时候,仅涉及到已形成子树中从该开关到根节点的部分电路,因此只计算受影响电路的潮流即可,不必计算整个电网的潮流,这样可大大减少潮流计算时间;②在最小树重构过程中,采用简化的潮流计算和近似网损计算方法。

2.2 辐射状配电网简化潮流及近似网损计算方法

为计算方便,对节点、支路进行编号和对支路进行分层:从根节点开始,进行广度优先搜索,节点的编号由顶向下顺序编号,支路由左至右顺序编号,同

时由顶向下将支路进行分层。图 3 为辐射状配电网简化潮流计算示意图。

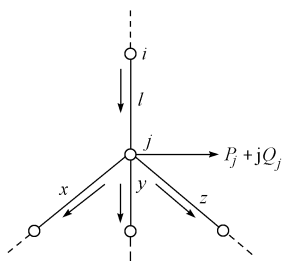


图 3 辐射状配电网简化潮流计算示意图
Fig. 3 Schematic diagram of simplified power flow of a radial distribution system

辐射状配电网简化潮流算法如下：从最后一层支路开始向根节点推进，支路 l 的功率为：

$$\begin{bmatrix} P_{la} + jQ_{la} \\ P_{lb} + jQ_{lb} \\ P_{lc} + jQ_{lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{ja} + jQ_{ja} \\ P_{jb} + jQ_{jb} \\ P_{jc} + jQ_{jc} \end{bmatrix} + \sum_{m \in M} \begin{bmatrix} P_{ma} + jQ_{ma} \\ P_{mb} + jQ_{mb} \\ P_{mc} + jQ_{mc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： P_{la}, P_{lb}, P_{lc} 分别为支路 l 的 a, b, c 相有功功率； Q_{la}, Q_{lb}, Q_{lc} 分别为支路 l 的 a, b, c 相无功功率； P_{ja}, P_{jb}, P_{jc} 分别为节点 j 的 a, b, c 相注入有功功率； Q_{ja}, Q_{jb}, Q_{jc} 分别为节点 j 的 a, b, c 相注入无功功率； P_{ma}, P_{mb}, P_{mc} 分别为与节点 j 直接相连的下层支路 m 的 a, b, c 相有功功率； Q_{ma}, Q_{mb}, Q_{mc} 分别为与节点 j 直接相连的下层支路 m 的 a, b, c 相无功功率； M 为与节点 j 直接相连的所有下层支路的集合，如在图 3 中该集合是支路 x, y 和 z 。

式(2)中，忽略了支路 l 上的功率损耗（即认为支路始端功率等于末端功率），对于给定的辐射状配电网，利用式(2)进行一次回推过程可计算出各支路上的近似功率分布。求得功率分布后，按下式近似计算配电网的网损：

$$\begin{bmatrix} P_{lossa} \\ P_{lossb} \\ P_{lossc} \end{bmatrix} = \sum_{l \in N} \begin{bmatrix} r_{la} (P_{la}^2 + Q_{la}^2) \\ r_{lb} (P_{lb}^2 + Q_{lb}^2) \\ r_{lc} (P_{lc}^2 + Q_{lc}^2) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： N 为已形成的当前子树中所有支路集合； $P_{lossa}, P_{lossb}, P_{lossc}$ 分别为已形成的当前子树的 a, b, c 相网损。式中变量均为标么值。

3 开关交换重构算法

上述基于最小树的重构算法已使重构结果接近于最优解，但算例测试结果表明，仅采用最小树重构算法总是比最优流算法的重构效果差一些，进一步研究发现，最小树重构结果的断开开关都在最优流

重构结果的断开开关附近，只需进行 1 次或 2 次开关交换，就可以达到或超过最优流重构的效果，因此作者采用了开关交换方法作为进一步优化的重构算法，使结果更加接近或得到最优解，其效果在网络规模很大时比最优流方法明显。同时，由于两种方法的结合，在未知网络初始结构的情况下，也可以照样给出最优或次最优的重构结果，克服了开关交换法与网络初始结构有关的缺点。

本文采用的开关交换方法与文献[2,3]不同，文献[2,3]的开关交换方法是一个迭代的过程，直到整个网络没有可交换降低网损的支路为止，而本文采用的开关交换方法，由于是在最小树重构结果的基础之上，仅进行一次开关交换过程即可。以下为本文采用的开关交换算法：

- 形成断开开关列表 OpenBreakerList，并按两端电压差的大小由大至小对断开开关进行排序。
- 从 OpenBreakerList 列表中选择两端电压差最大的开关，并在该开关所构成的环中寻找可交换的开关列表 ChangeBreakerList。
- 从 ChangeBreakerList 列表中选择第 1 个交换开关与 b 中选择的断开开关进行交换，即合上 b 中选择的断开开关，断开交换开关，进行潮流计算，确定此次交换是否降低网损，如果是，则从 ChangeBreakerList 列表中选择下一个交换开关完成同样的交换；否则继续。
- 从 OpenBreakerList 列表中删除两端电压差最大的开关。返回到 b 继续，直到 OpenBreakerList 列表为空为止。

在上述开关交换重构算法中，OpenBreakerList 的形成只需寻找网络图中不在最小树中的弧（非树弧，如图 4 中的弧 10），然后按两端电压差的大小进行排序即可。开关交换列表 ChangeBreakerList 的形成是一个递归过程，可以图 4 为例说明。

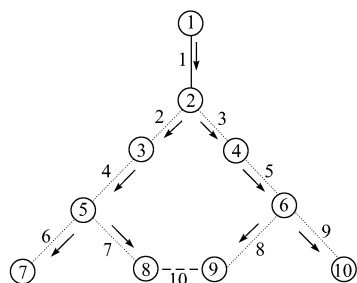


图 4 开关交换列表形成示意图
Fig. 4 Schematic diagram of forming ChangeBreakerList

图 4 是从最小树中抽出的一部分子图，弧 10 为

非树弧(断开开关),假设节点⑨的电压值大于节点⑧的电压值,从节点⑧开始,找到父支路弧7,从弧7的首节点⑤找到父支路弧4,从弧4的首节点③找到父支路弧2,从弧2的首节点②找到父支路弧1;从节点⑨开始,进行同样的过程,顺序找到弧8、弧5、弧3和弧1。去掉两个列表中共同的弧(弧1),由节点⑧形成的弧列表(弧7、弧4和弧2)就是断开开关10的开关交换列表 ChangeBreakerList。

为了保证最终得到最优或近似最优的重构结果,在开关交换重构中采用了精确的三相潮流计算方法。

4 算例及分析

为克服目前文献中算例普遍存在网络结构过于简单的现象,本文采用山东潍坊的一个实际配电网

系统进行测试。该系统有31条馈线,1 000多条支路(馈线段),58个环(包括不同馈线之间的合环和同一条馈线不同分支线构成的环),961个节点,总有功负荷为235 035.20 kW,总无功负荷为41 476.80 kvar。因为目前实际配电网中拥有的开关数很少(每条馈线大约3个或4个开关),对重构算法而言,不能构成大规模配电网,所以测试时把网络中的每条支路(馈线段)对应一个开关,使网络中的支路数等于开关数,增大了网络的规模,使之能够明显看出重构的效果。表1给出了不同馈线组合(不同规模)的重构结果和耗费时间,为进行比较,作者同样实现并给出了开关交换法和最优流法的计算结果。表1是在Intel Pentium III 801 MHz微机上的测试结果,为了更好地分析算法的效率,表中将耗费时间分解为拓扑分析时间和潮流计算时间。

表1 实际配电网算例测试结果
Table 1 Test results of a real distribution system

馈线数	开关数	环数	初始网损/kW	本文方法			开关交换法			最优流法		
				重构后网损/kW	耗费时间/s		重构后网损/kW	耗费时间/s		重构后网损/kW	耗费时间/s	
					拓扑分析	潮流计算		拓扑分析	潮流计算		拓扑分析	潮流计算
5	130	7	213.35	181.63	0.005	0.005	181.63	0.010	0.010	181.64	0.005	0.015
7	166	11	435.43	384.40	0.01	0.01	384.39	0.01	0.03	384.52	0.01	0.05
8	200	13	807.21	740.14	0.01	0.02	740.13	0.01	0.04	754.37	0.01	0.09
9	251	17	1 757.35	1 543.05	0.01	0.05	1 543.04	0.01	0.08	1592.52	0.01	0.20
10	312	19	2 323.31	1 927.87	0.02	0.06	1 927.87	0.01	0.11	2021.90	0.01	0.32
11	335	21	2 775.23	2 231.45	0.03	0.07	2 231.38	0.02	0.13	2323.77	0.02	0.41
13	431	25	2 984.27	2 164.48	0.04	0.09	2 162.13	0.04	0.16	2234.08	0.04	0.76
15	499	29	3 231.10	2 298.68	0.05	0.11	2 299.39	0.06	0.21	2371.30	0.06	1.14
16	521	32	3 294.61	2 337.38	0.06	0.12	2 340.25	0.08	0.20	2399.14	0.09	1.51
18	630	36	4 758.37	3 431.16	0.09	0.16	3 431.98	0.10	0.27	3511.84	0.11	2.26
21	679	40	4 880.62	2 947.84	0.11	0.16	2 948.60	0.11	0.27	3035.84	0.14	3.46
23	720	43	5 369.39	3 082.12	0.11	0.17	3 082.89	0.09	0.30	3170.13	0.16	4.20
25	771	46	5 643.44	3 252.49	0.12	0.17	3 253.25	0.09	0.31	3342.93	0.18	5.24
27	868	52	5 940.59	3 403.22	0.14	0.19	3 403.98	0.12	0.29	3491.72	0.29	7.94
29	951	55	6 021.19	3 479.16	0.14	0.23	3 479.79	0.12	0.37	3567.62	0.33	9.44
31	1018	58	6 072.32	3 507.26	0.18	0.23	3 507.90	0.11	0.42	3595.72	0.37	11.18

由表1的测试结果可以看出,从重构效果来看,本文提出的方法与开关交换法相差不大,但多数情况下本文提出的方法要略优于开关交换法,最优流法的结果比前两种方法要差一些;从重构需要的时间来看,本文提出的方法所用的时间比开关交换法少,大大低于最优流法,并且随着网络规模的增大,最优流法所需时间增加很快,而本文提出的算法和开关交换法增加缓慢。另外,从表1可看出,最优流算法所消耗的时间主要集中在潮流计算中,因为每打开一个环,就要进行两次弱环网的潮流计算。

5 结语

- 本文提出的重构算法具有以下特点:
- a. 重构效果好。由于采用了最小树重构算法和开关交换重构算法相结合的方法,重构结果与网络的初始结构无关,能够保证得到最优解或近似最优解,测试结果表明,本文提出的算法优于传统的最优流法和开关交换法。
 - b. 重构时间少。在最小树重构过程中采用了简化潮流计算方法和近似网损计算方法,潮流计算只针对拓扑关系发生变化的电路,在开关交换重构

过程中只进行一次交换过程即可,大大减少了重构时间。

c. 考虑了配电网三相负荷不对称等因素,算法中全部采用三相模型进行潮流计算、网损计算和权值计算。

d. 由于重构效果明显、随着网络规模的增长重构时间增长较慢、重构结果与网络的初始结构无关等特点,该算法能够适应大规模配电网实时重构的要求。

参考文献

- 1 Shirmohammadi D, Hong H W. Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2): 1492~1498
- 2 Civanlar S, Grainger J J, Yin H, et al. Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(3): 1217~1223
- 3 Baran M E, Wu F F. Network Reconfiguration in Distribution

- Systems for Loss Reduction and Load Balancing. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401~1407
- 4 Chiang H D, Jean-Jumeau R. Optimal Network Reconfigurations in Distribution Systems, Part One: A New Formulation and a Solution Methodology. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(4): 1902~1909
- 5 Kim H, Ko Y, Jung K H, et al. Artificial Neural Network Based Feeder Reconfiguration for Loss Reduction in Distribution Systems. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(3): 1356~1366
- 6 余贻鑫,段 刚(Yu Yixin, Duan Gang). 基于最短路算法和遗传算法的配电网重构(Shortest Path Algorithm and Genetic Algorithm Based Distribution System Reconfiguration). 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2000, 20(9): 44~49

车仁飞(1971—),男,博士研究生,讲师,主要从事配电网自动化方面的研究。E-mail: cherenfei@sdu.edu.cn

李仁俊(1939—),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统运行与控制及配电自动化方面的研究。

A NEW REAL-TIME RECONFIGURATION APPROACH TO LARGE SCALE DISTRIBUTION SYSTEM

Che Renfei, Li Renjun

(Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: A new real-time reconfiguration approach for large-scale distribution system, based on the minimum spanning tree algorithm and the switch exchange method, is presented. First, the approach reconfigures the distribution system preliminarily using the minimum spanning tree algorithm and the reconfiguration result is close to the optimal solution. And then, the switch exchange method is used to reconfigure the distribution system accurately to obtain the optimal or near-optimal solution based on the first step. In details, for the simplified power flow calculation method and the approximate power loss calculation method are adopted in the first configuration and the power flow calculation is only performed to the affected circuit, the time consumption is very little. At the same time, the accurate power flow calculation is used to guarantee the optimal or near-optimal solution in the switch exchange reconfiguration. Also, the method of forming distribution system graph is introduced. The test results of a real distribution system indicate that the proposed approach has high efficiency and good reconfiguration result. The application to real-time reconfiguration for large-scale distribution system is feasible.

Key words: distribution system; reconfiguration; minimum spanning tree; switch exchange