

基于时间区间的实用配电网重构方法

戴伟华¹, 梅贱生², 熊宁³, 李倡洪¹

(1. 南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 南昌供电公司, 江西 南昌 330006;
3. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 目前, 基于时间区间的配网动态重构还没有很好的解决办法。为把重构技术引入配网的实际运行中, 提出一种基于时间区间的实用重构方法, 它能快速、有效地求解二次以内的重构问题。首先, 文章通过对基于时间区间的配网一次重构进行分析, 得出了关于最佳一次重构时间的推论, 并用算例对其进行了验证。根据此推论, 对二次重构进行了求解。由于不用考虑两次重构时间之间的组合问题, 大大地提高了求解的速度。最后文章对实用法所能节省的网损进行了分析, 进而讨论了多次动态重构的必要性。

关键词: 配电网; 动态重构; 必要性; 时间区间

Practical method on time interval based distribution network reconfiguration

DAI Wei-hua¹, MEI Jian-sheng², XIONG Ning³, LI Chang-hong¹

(1. Information Engineering School, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Nanchang Electric Power Company, Nanchang 330006, China; 3. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: At present, there is no good method on solving distribution network dynamic reconfiguration. In order to introduce reconfiguration technique into real operation of distribution network, a practical method which is able to deal with infra-twice reconfigurations rapidly and effectively is proposed in this paper. At first, analysis is conducted in this paper for time interval based once distribution network reconfiguration. An inference which about what time is the best time for once dynamic reconfiguration is drawn and is verified by study cases. According to this reference, twice reconfigurations are computed. The simulation reveals that computing speed is improved considerably since time combinatorial problem inherent in multi reconfiguration is removed. At last, the necessity of multi reconfigurations is discussed through analysis of power loss reduction induced by practical reconfiguration method.

Key words: distribution network; dynamic reconfiguration; necessity; time interval

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)24-0041-04

0 引言

为提高电力供给的灵活可靠性, 大多数配电网通过改变分段开关和联络开关的状态来平衡各变电站间的负荷, 降低网损和改善电压质量, 我们将该过程称之为配电网重构。目前, 重构主要分为两类: 一是基于时间点的静态重构, 这类方法主要为支路交换法^[1,2]、最优流模式法^[3]、开关组法^[4]和一些人工智能搜索算法^[5-8]; 另一类是基于时间区间(通常为1天)的动态重构^[9-11], 即在负荷不断变换的一个时间区间内, 找出最佳的优化时间和对应的网络结构, 使整个时间区间内的运行费用最小。

静态配网重构是一个多约束, 大规模非线性组合优化问题。目前, 绝大多数方法都是基于此类重

构。静态重构可以给出负荷恒定下的最优网络结构。然而, 实际配电系统上的负荷是动态地随时间变化的。为了更好地保证配电系统的安全、优质、经济运行, 常常需要依据负荷的变化对配网结构进行动态调整, 即需要进行动态重构。

动态重构在理论上能完美地解决配网重构的问题, 但对于这样一个时间(何时进行优化)、空间(采用何种结构优化)相互配合的优化问题, 要进行多次重构, 找出最优控制策略, 计算代价是惊人的。目前, 关于动态重构的文章不多, 也没有很好的解决办法。文献[9]将各时间点的负荷进行等效, 将整个时间序列内变化的负荷拉成1至几个恒定的水平段, 在每个等效的时间段的初始时刻进行优化, 本质上还是静态法。文献[10]为减小运算代价, 采用

简化、折衷的策略对网络结构进行优化。同时将开关操作次数按时间点的先后顺序,根据优化的需要进行分配。如果前面时刻的重构花费了较多的开关操作次数,则后面时刻的重构只能选次优的开关组合方式来避免开关操作次数的越限。显然,该法无法保证开关操作次数的有效分配和网络结构的最优。文献[11]先求出各时间点下的较优结构,然后以时间点作为阶段,将各时间点下的较优结构作为状态,用动态规划法求解,使整个时间区间的网损最小。如果将各时间点下所有可能的开关组合作为状态,肯定能求出全局最优解,但计算代价是无法估量的。所以该文用各时间点下的较优结构作为状态进行简化。但是,某时间点下的较优结构未必是整个时间区间内的最优结构,同样无法保证得到真正的全局最优解。

在实际配网运行中,由于缺乏足够的监视、远控设备,自动化水平不高。一般是通过人工操作补偿电容,分段、联络开关和电压调节器来维持系统的运行^[12]。所以让运行人员一天进行多次网络重构来减小网损在实际操作上不现实。

鉴于上述原因,本文提出一种实用重构方法,对配网进行较少次数(1~2)的重构,用较低的计算代价获得了较优的重构效果。

值得注意的是,国外同行在配网动态优化领域几乎没有研究,是他们忽略了还是多次动态重构没有很大的实用价值?文章在最后进行了探讨。

1 基于时间区间实用配网重构

通常,配网的动态重构是将开关的操作次数作为限制条件,通过某种寻优策略,使整个时间区间内的运行费用最小,具体数学模型见文献[11]。但为了便于运行管理和简化问题,本文将限定开关的操作次数改为限定重构的次数。基于指定重构次数的配网优化,本质就是将有限的重构次数在整个时间区间内进行最有效的分配,同时与对应的网络结构配合,使整个时间区间内的网损最小。

1.1 基于指定重构次数的数学模型

假设一个时间区间内的重构次数为 N , 则该时间区间可分为 N 个子区间。第 i 个时间子区间内的网损由第 i 个时间子区间的长度和第 i 次重构后的网络结构决定。优化目标就是找出这些重构的时刻和相应的网络结构,使整个时间区间内的网损最小。具体数学模型如下。

$$\min P = \sum_{i=1}^N F_i(u_{i-1}, t_i) \quad (1)$$

其中: P 为整个时间区间内的网损费用; N 是重构次数; F_i 是第 i 个子区间的网损费用; u_{i-1} 是第 $i-1$ 次重构后的网络结构, $i=1$ 时对应着网络的初始结构; t_i 为第 i 个子区间时间长度,数值上等于第 i 次重构的时刻减去第 $i-1$ 次重构的时刻。

同时, u_i 还应满足辐射连通性的约束。

虽然本文只讨论 2 次内的重构,但如果将 1 天分为 24 个时间点,也要进行 $2 \times C_{24}^2$ 次公式(1)的优化才能找到最佳的重构时间及对应的网络结构,计算量很大。为简化问题,我们先分析一次重构。

1.2 基于时间区间的实用一次重构算法

对于一次动态重构问题,用时间枚举法肯定能找到最优解。但如前所述,如果将重构次数扩展到 2 次以上,考虑时间之间的组合,计算量就太大了。

我们注意到,如果系统的初始结构不是 0 时的最佳结构,那么在 0 时进行区间重构的优化效果比其他时刻要优。因为它可以纠正 0 时不当结构所带来的网络损耗。如果系统的初始结构就是 0 时的最佳静态结构,那么可以把区间重构时刻定在下一个时间点上。从理论上说,在 0 时还可能存在着些次优静态结构,它们比区间优化结构强,但节省的网损有限,而且这些次优静态结构存在的概率也不大。忽略这些次优静态结构的影响,得出以下推论:

推论:如果网络初始结构不是 0 时刻的最优结构,一次动态重构的最佳时刻在 0 时;否则,最佳的重构时刻发生在第一次静态最优结构发生改变的时点。

为验证该推论的可靠性,以修改过的 IEEE33 节点^[13]为例,各节点的负荷峰值为文献数据的 120%。研究时间区间为 1 天,分 24 个时间点。负荷类型分商业、居民和工业 3 种,各节点中同种负荷类型的负荷/小时变化曲线相同。各种负荷在各节点中所占的比例及其随时间的分布详见附录。

用时间枚举法,分别从 0 时到 23 时对网络进行一次区间重构,使指定时刻点下的结构在整个时间区间内网损最小。各时刻下的优化结果如表 1。

通过计算得知,该网络最佳的一次重构时刻为 0 时,验证了推论的可靠性;最佳的联络开关为 7-8, 14-15, 9-10, 32-33, 28-29;最小区间内网损为 1.526 2 MW。由表 1 还可看出,网损随重构时刻的推迟而单调递增,即重构的越晚,效果越差。同时,本文分别对 IEEE16 节点和 69 节点进行了计算,而且随机改变了负荷的分布和网络的结构,结果都支持了推论中的简化。

表 1 各时刻重构对应的时间区间最小网损

Tab.1 Minimal time interval power loss in each reconfiguration

time					
<i>T</i>	<i>P</i>	<i>T</i>	<i>P</i>	<i>T</i>	<i>P</i>
0	1.526 2	8	1.546 0	16	1.892 3
1	1.528 1	9	1.579 1	17	1.955 5
2	1.529 9	10	1.625 5	18	2.009 1
3	1.531 5	11	1.675 1	19	2.057 5
4	1.532 0	12	1.720 2	20	2.121 6
5	1.532 5	13	1.751 2	21	2.182 1
6	1.534 5	14	1.786 7	22	2.200 6
7	1.538 7	15	1.830 2	23	2.208 5

其中, *T* 是优化的时刻; *P* 是整个区间内网损。

1.3 基于时间区间的二次实用算法

根据上述推论, 将第一次重构时刻安排在 0 时; 第二次重构时刻采用枚举法确定, 在 1~23 时依次试探。用上面修改过的 IEEE33 节点为算例, 求二次重构的最优时刻和网络结构, 计算结果如表 2。

表 2 二次重构的计算结果

Tab.2 Results of twice reconfigurations

	RT	TS	<i>P</i>
FR	0	7-8; 14-15; 9-10; 32-33; 28-29	1.522 7
SR	16	7-8; 14-15; 9-10; 32-33; 25-29	

其中, *RT* 是重构时间点; *TS* 是最佳的联络开关位置; *P* 是区间网损; *FR* 表示第一次重构; *SR* 表示第二次重构。

采用实用方法, 进行了 2×23 次重构得到了较佳的优化时刻和网络结构, 而如果考虑重构时刻的配合, 则需进行 $2 \times C_{24}^2$ 次, 效率大大提高。

1.4 实用法求解步骤

- 1) 令时刻点 $i=0$ 。
- 2) 求解 i 时刻的最优静态结构, 判断是否等于网络的初始结构。
- 3) 若是, $i=i+1$, 转 2); 若否, 转 4)。
- 4) 第一次区间重构时刻定在 i 时, 若指定的重构次数为 1, 转 5); 次数为 2, 转 6)。
- 5) 求解最优的网络结构 u , 使时间子区间 $[i, 24]$ 内的网损最小, i 和 u 即为最优的一次重构时刻和网络结构。
- 6) 枚举 $[i, 24]$ 内所有的时刻点, 对每个时刻点 j , 求最优的网络结构 u_1 和 u_2 , 使子区间 $[i, j]$ 与 $[j+1, 24]$ 的网损和 P_j 最小。
- 7) 在所求出的各 P_j 中找出最小的一个 P_k , 则 i 和 k 为最佳的一、二次重构时刻, k 时对应的 u_1 和 u_2 为最佳的网络结构。

2 实用重构法的网损分析

在此节, 本文对实用重构法所能节约网损的效果进行分析。分别用网损节约百分比 $k\%$ 和网损占总负荷的百分比 $P\%$ 来衡量重构的效果。表达式见方程(2)、(3)。

$$k_i \% = (P_{\max} - P_i) / (P_{\max} - P_{\min}) \times 100\% \quad (2)$$

$$L_j \% = P_j / L_{av} \times 100\% \quad (3)$$

其中: 在式(2)中, $k\%$ 为通过实用法节约的网损百分数; i 为重构次数, $i \in \{1, 2\}$; P_{\max} 为最大网损, 即在时间区间内不进行优化产生的网损; P_{\min} 为最小网损, 即在时间区间内对每个时刻点都进行一次优化产生的网损; P_i 为进行 1 次重构、2 次重构、不进行重构和每个时刻都重构产生的网损。 $L_j\%$ 为各次重构产生的网损占平均总有功负荷的百分数; L_{av} 为平均总有功负荷。

以修改过的 IEEE33 节点为例, 对公式(2)、(3)进行计算, 结果见表 3。

表 3 简单次重构网损分析

Tab.3 Power loss analysis of simple times reconfiguration

P_{\max}	P_1	P_2	P_{\min}	$k_1\%$	$k_2\%$
2.211 9	1.526 2	1.522 7	1.520 1	99.12%	99.62%
L_{av}	$P_{\max}\%$	$P_1\%$	$P_2\%$	$P_{\min}\%$	
2.1964+j1.3436	4.2%	2.9%	2.89%	2.88%	

由表 3 可见, 通过 1~2 次重构所节约的网损已达到最大可节约网损的 99.12%~99.62%。另外, 对于一个平均总有功负荷为 2.196 4 MW 的系统, 通过一次重构, 网损占负荷比例从 4.2% 下降到 2.9%; 通过二次重构再下降到 2.89%。而最小网损比例也要占到总负荷的 2.88%。如果加上多次重构所带来的开关操作费用和人工费用, 进行多次动态重构在经济上确实无很大的必要性, 这或许也是国外同行在此领域研究较少的一个原因。

3 结论

本文通过对基于时间区间的配网重构分析, 得出了以下成果和结论:

- (1) 提出了基于重构次数的配网动态重构数学模型。
- (2) 提出了基于时间区间的最佳一次重构时间的推论。根据此推论, 对二次重构进行了求解, 进而提出一种实用的基于时间区间的重构方法。
- (3) 通过具体数据, 说明了配电网多次动态重

构可带来的经济效益价值有限。

附录:

表 1 三种负荷在各节点中的比例

Tab.1 Proportion of three type load in each bus

No	C	R	I	No	C	R	I
2	0.2	0.5	0.3	18	0.4	0.5	0.1
3	0.5	0.3	0.2	19	0.5	0.2	0.3
4	0.5	0.2	0.3	20	0.7	0.3	0
5	0.6	0.1	0.3	21	0.5	0.3	0.2
6	0.4	0.4	0.2	22	0.3	0	0.7
7	0.6	0	0.4	23	0.5	0.4	0.1
8	0.3	0.3	0.4	24	0.4	0.5	0.1
9	0.4	0.6	0	25	0.6	0.4	0
10	0.3	0	0.7	26	0.7	0.3	0
11	0.6	0.2	0.2	27	0.1	0	0.9
12	0.5	0.5	0	28	0.6	0.3	0.1
13	0.6	0.4	0	29	0.4	0.1	0.5
14	0.4	0.4	0.2	30	0.7	0.2	0.1
15	0.5	0.1	0.4	31	0.4	0.4	0.2
16	0.2	0.7	0.1	32	0.2	0.1	0.7
17	0.3	0.3	0.4	33	0.3	0.7	0

其中, No 是节点号, 1 节点为变电站节点, 未接有负荷; C、R、I 分别表示商业、居民和工业用户。

表 2 三种负荷的时间分布

Tab.2 Load distribution in hour of three type load

T	C	R	I	T	C	R	I
0	0.1	0.1	0.3	12	0.6	0.7	0.5
1	0.1	0.1	0.3	13	0.7	0.6	0.6
2	0	0.1	0.4	14	0.8	0.5	0.8
3	0	0.1	0.2	15	1	0.6	0.8
4	0	0.4	0.2	16	1	0.7	0.7
5	0	0.3	0.3	17	0.8	0.8	0.7
6	0.1	0.4	0.3	18	0.6	0.9	0.8
7	0.2	0.4	0.4	19	0.7	1	0.9
8	0.7	0.3	0.8	20	0.6	1	1
9	0.8	0.3	1	21	0.2	0.6	0.8
10	0.8	0.5	0.9	22	0.1	0.5	0.5
11	0.7	0.6	0.9	23	0.1	0.2	0.4

其中, T 是时间点。

参考文献

[1] Civanlar S, Grainger JJ, Yin Lee. et al. Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1988, 3(3): 1127-1223.
 [2] 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.
 [3] 雷健生, 邓佑满, 张伯明. 综合潮流模式及其在配电系统网络重构中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 57-62.
 LEI Jian-sheng, DENG You-man, ZHANG Bo-ming. Hybrid Flow Pattern and Its Application in Network Reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1):57-62.
 [4] Kashem M A, Ganapathy V, Jasmon G B. A Novel Method for Loss Minimization in Distribution Networks[A]. In: Internet Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies[C].London:2000,251-256.
 [5] Huang Y C. Enhanced Genetic Algorithm-based Fuzzy Multi-objective Approach to Distribution Network Reconfiguration[J]. IEE Proc Gener,Transm,Distrib, 2002, 149(5):615-620.
 [6] 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 Xue-yun. Reconfiguration of Distribution Networks Based on Fuzzy Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 66-69.
 [7] 陈根军. 基于 Tabu 搜索的配电网重构算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 28-33.
 CHEN Gen-jun. A Tabu Search Approach to Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 28-33.
 [8] Hoyong Kim, Yunseok Ko, Kyung-Hee. Artificial Neural-network Based Feeder Reconfiguration for Loss Reduction in Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(3):1356-1366.
 [9] 邓佑满, 张伯明, 田田. 虚拟负荷法及其在配电网动态优化中的应用[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(4): 241-244.
 DENG You-man, ZHANG Bo-ming, Tian Tian. A Fictitious Load Algorithm and It's Application to Distribution Network Dynamic Optimizations[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(4): 241-244.
 [10] 尹丽燕, 于继来. 多时间段的配电网动态重构[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 44-48.
 YIN Li-yan, YU Ji-lai. Dynamic Reconfiguration of Distribution Network with Multi-time Periods[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7):44-48.
 [11] 吴建中, 余贻鑫. 最小运行费用的时变重构全局优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 13-17.
 WU Jian-zhong, YU Yi-xin. Global Optimization Algorithm to Time-varying Reconfiguration for Operation Cost Minimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 13-17.

(下转第57页 continued on page 57)

- 北京: 北京机械工业出版社, 1998.
- WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun. Harmonic Suppression and Compensation of the None Power[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [8] 范瑞祥, 罗安, 周柯, 等. 并联混合型有源电力滤波器的建模和控制策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 55-61.
- FAN Rui-xiang, LUO An, ZHOU Ke, et al. Modeling and Control Strategy Analysis of Parallel Hybrid Active Power Filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 55-61.
- [9] 赵勇, 韩春立, 李建华, 等. 兼顾降低网损和抑制谐波要求的配电系统优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 6-10.
- ZHAO Yong, HAN Chun-li, LI Jian-hua, et al. Balance to Reduce Net Loss and Harmonic Suppression Requirements of the Distribution System Optimized Operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 6-10.
- [10] 林琳. 企业供电系统有源滤波技术的研究和工程应用[D]. 长沙: 中南大学, 2004.
- LIN Lin. Technology Research and Engineering Applications of the Enterprise Power Supply System Active Filter[D]. Changsha: Central South University, 2004.
- [11] 张鹏鹰, 王向军, 曹跃云. 并联型电力有源滤波器直流侧电容电压控制的研究[J]. 电力电子技术. 2000 (3): 3-6.
- ZHANG Peng-ying, WANG Xiang-jun, CAO Yue-yun. Study of Parallel APF DC Bus Voltage Control[J]. Power Electronics. 2000 (3): 3-6.
- [12] 于瑞红. 并联混合型有源电力滤波器的研究[D]. 成都: 西华大学, 2006.
- YU Rui-hong. Study of Parallel Hybrid Type of APF[D]. Chengdu: Xihua University, 2006.
- [13] 范瑞祥, 罗安, 李欣然. 并联混合型有源电力滤波器的系统参数设计及应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 106-111.
- FAN Rui-xiang, LUO An, LI Xin-ran. Design Parameters and Applied Research of Parallel Hybrid Active Power Filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 106-111.
- [14] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [15] 黄永安, 马路, 刘慧敏. Matlab7.0/Simulink 6.0 建模仿真开发与高级工程应用. 北京: 清华大学出版社, 2005.

收稿日期: 2008-02-10; 修回日期: 2008-05-05

作者简介:

陈艳(1969-), 女, 硕士, 研究方向为电力系统谐波抑制与无功补偿. E-mail:chengyan1988@163.com

(上接第 44 页 continued from page 44)

- [12] Tiak Thakur & Jaswanti. Study and Characterization of Power Distribution System Network Reconfiguration[A]. In: IEEE PES Transmission and Distribution conference & Exposition[C]. Latin America: 2006.
- [13] ZHU Ji-zhong, XIONG Xiao-fu, et al. A Comprehensive Method for Reconfiguration of Electrical Distribution Network[A]. In: Power Engineering Society General Meeting[C]. 2007. 1-7.

收稿日期: 2008-03-01; 修回日期: 2008-04-03

作者简介:

戴伟华(1969-), 男, 副教授, 研究方向为电工与电力电子技术;

梅贱生(1982-), 男, 硕士, 研究方向为电网的优化调度;

熊宁(1975-), 男, 博士研究生, 研究方向是电网可靠性. E-mail:civilaviation@hotmail.com

(上接第 50 页 continued from page 50)

- YANG Li-xi, WANG Jin-feng, CHEN Gen-yong. GIS-Based Optimal Planning for Distribution System by Tabu Search[J]. Journal of Zhengzhou University, 2002, 23(3):75-77.
- [4] Boulaxis N G, Papadopoulos M P. Optimal Feeder Routing in Distribution System Planning Using Dynamic Programming Technique and GIS Facilities[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(1):242-247.

收稿日期: 2008-03-31; 修回日期: 2008-05-07

作者简介:

刘子俊(1980-), 男, 主要研究方向为继电保护及人工智能在电力系统中的应用; E-mail:tedljz@163.com

于德龙(1981-), 男, 主要研究方向为电力系统运行与规划等;

胡少强(1955-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动装置、故障检测等。