

文章编号:1000-582X(2006)03-0040-05

采用动态规划技术实现配电网恢复供电*

邓群^{1,2}, 孙才新¹, 周 凇¹, 张晓星¹, 程其云¹

(1. 重庆大学 高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400030; 2. 重庆市电力公司 江北供电局, 重庆 401147)

摘 要:配电网故障区域恢复供电的最佳路径实际上是故障情况下的配电网网络重构. 其目标主要是为了既快速恢复非故障区域供电, 同时又满足线路负载容量的要求、线损最小、操作次数最少、恢复后各馈线负荷平衡、可靠性最高等条件. 目前在配网自动化领域中讨论得比较多的都在如何实现快速隔离故障、快速恢复非故障区域供电的技术手段上, 而对恢复路径的最优化选择的研究则鲜有所见. 配电网非故障区域恢复供电问题是近年来配电网领域研究的新课题. 综合采用动态规划技术及非线性多目标技术进行配电网非故障区域恢复供电的最佳路径选择, 实例证明该方法简单、快速、实用、有效.

关键词:配电网; 恢复供电; 最佳路径; 动态规划

中图分类号:TM727.2

文献标识码:A

配电网在电力系统中所承担的任务就是把从电源或输电网获得的电能直接分配给不同电压等级的用户. 与输电网相比, 它拥有极大数量的电力设备, 并占整个供电系统投资的60%及运行成本的20%. 我国与世界其它发达国家相比, 配电网发展起步较晚, 发展水平较低, 建设相对落后. 城市配电网, 特别是老城网, 已或多或少滞后于城市的经济发展, 成为制约城市发展的瓶颈. 配电网结构不合理, 电力设备数量多但性能落后、免维护水平低且不适合自动化要求等, 导致停电事故频繁发生, 恢复供电效率低、可靠性不高, 严重影响了人民的生活水平和经济建设的发展. 如何使城网改造对症下药, 真正达到提高供电质量、可靠性和安全性, 降低损耗, 正是配电网网络重构所要研究的课题.

对非故障区域实现最佳的恢复供电路径, 仅仅实现快速恢复供电, 对于电力体制改革不断深化的今天是远远不够的. 企业的运作理念应深入到各个可挖掘的环节, 以力争安全、可靠、经济、实效. 因此, 在快速恢复供电的同时, 又必须满足线路负载容量的要求、线损最小、操作次数最少、恢复后各馈线负荷平衡、可靠性最高等条件.

1 最佳路径的分析方法

配电网故障区域恢复供电的最佳路径实际上是故

障情况下的配电网网络重构^[1]. 其目标主要是为了既快速恢复非故障区域供电, 同时又满足线路负载容量的要求、线损最小、操作次数最少、恢复后各馈线负荷平衡、可靠性最高等条件. 目前在配网自动化领域中讨论得比较多的都在如何实现快速隔离故障、快速恢复非故障区域供电的技术手段上, 而对恢复路径的最优化选择的研究则鲜有所见.

配电网故障区域恢复供电的最佳路径实际上是一个多目标最佳路径问题. 目前在最佳路径问题上一般研究较多的是城市交通网络中的最短路径问题^[2]. 基于解决问题的思路不同, 最短路径问题可分为单源最短路径算法和基于启发式搜索最短路径算法.

1.1 单源最短路径算法

1) 基于GIS空间查询语言的最短路径. 这种方法目前更多地停留在理论研究阶段, 如MAX^[3]定义了一套空间查询语言, 对其完备性进行了证明, 并举证分析了范围查询、时态查询, 最邻近查询的应用举例.

尽管针对基于GIS空间发展研究的GeoSQL不失为一种处理最短路径的手段, 但由于GIS受数据库技术发展的制约, 而实际应用领域及背景的不同也使其离商用还有很长的距离.

2) 基于功能模块思想的最短路径. 按照不同的分

* 收稿日期: 2005-11-15

作者简介: 邓群(1970-), 女, 湖北蒲圻人, 重庆市电力公司高级工程师, 重庆大学博士, 主要从事调度自动化、配电自动化、电力信息方面的研究.

类方法(问题特征、实现技术的差异),单源最短路径问题的算法可分为很多种,如 Dijkstra 算法^[4],神经网络法,基于人工智能的启发式搜索算法等.针对不同的背景应用需求及具体的软硬件环境,各种算法在空间复杂度、时间复杂度,易实现性等方面各具特色.

1.2 启发式搜索最短路径算法

1.2.1 启发式搜索策略

基于启发式贪心策略的最短路径算法包括贪心算法,爬山法, A* 算法等.其中贪心算法属于启发式搜索策略中的 BFS (Best First Search) 类型^[5],即对节点评估函数值进行排序,评估值最高者首先扩展.爬山法 (Hill Climbing) 是另一种贪心搜索算法,它将当前至终点的欧氏距离作为扩展路径的启发式策略,对于处理规则交通网络中的最短路径搜索具有一定优势. A* 算法是一种在随机产生式系统中应用比较广泛的启发式搜索算法,它与步进式算法类似,不同点在于当无法得到至终点的路径时, A* 允许路径的回溯与重新选择.

基于启发式方向策略的最短路径算法包括空间有效方向的可控参数法等.空间有效方向的可控参数法通过设置可调节系数,使得当有效方向上路径无效时,能保证得到可用路径.

基于启发式区域策略的最短路径算法包括椭圆限制搜索区域的最短路径算法等.椭圆限制搜索区域算法以待求最短路径的起终点作为焦点,构造椭圆限制区域,进而在该限制区域内进行贪心搜索.

上述多种启发式策略结合可有效提高最短路径算法的效率.从严格意义上讲,这里所描述的各种算法只是搜索策略的逻辑描述,需要结构交通网络的具体存储结构,才能在计算机中有效实现,从而形成各种实用的最短路径算法,如基于邻接矩阵的 Dijkstra 算法,基于邻接表的 Dijkstra 算法等等.

1.2.2 非负权值网络最短路径算法

荷兰数学家 E. W. Dijkstra (1959) 提出的标号设定法 (Label Setting Algorithms) 是目前理论上最完善,迄今为止应用最广泛的非负权值网络最短路径算法.它在“局部最优而导致总体最优”的假设下,寻求最佳路径.不同的实现方法构成了 Dijkstra 算法的庞大家族.如 GeoStar 采用快速排序的 FIFO 队列来实现 Dijkstra 算法,采用最大邻接节点数构造邻接节点矩阵的 Dijkstra 算法,采用最大相关边数的 Dijkstra 算法等.在交通网络中不存在负权边,所以交通网络最短路径算法指标号设定法,即改进的 Dijkstra 算法.

2 最佳路径的选择方法

配电网非故障区域恢复供电的最佳路径实际上并

不是一个简单的最短路径问题^[6],如前所述这是一个多目标最佳路径问题.因此研究配电网非故障区域恢复供电的最佳路径需进行综合分析研究.

2.1 多目标分析

在配电网非故障区域恢复供电的最佳路径选择中,最关心的目标主要有以下内容:

恢复供电的路径中馈线负荷不能过载;恢复区域电压质量应满足要求,即送端至受端的电压降应在送端的 $\pm 7\%$ 以内;可靠性最高,即恢复时间最短;线损最低;开关拉合次数最少;现场操作点最少.

设非故障区域负荷为 V_1 , 馈线负荷限值为 V' , 带路前馈线负荷为 V_2 , 等效电阻为 R (含线路), 等效电抗为 X (含线路), 送端电压为 10 kV, 非故障区域受端电压为 U' , 恢复时间为 T , 开关拉合次数为 S , 现场操作点数为 N 以得到下面的数学模型:

$$V_1 + V_2 < V'. \quad (1)$$

$$|U' - 10| < 0.7. \quad (2)$$

$$\min T. \quad (3)$$

$$\min S. \quad (4)$$

$$\min N. \quad (5)$$

选择最佳路径必须考虑到上述目标,实际上在现实情况下,不可能找到一个可行点能使所有的目标函数都能取极大值,因此将式(1)、(2)、(4)、(5)作为约束条件,使恢复时间最短即最短路径作为主要目标函数,实际上就是将这一复杂的多目标路径选择问题简化为多决策的最短路径问题.

2.2 动态规划技术恢复供电的最短路径分析

动态规划 (dynamic programming) 是运筹学的一个分支,是求解决策过程 (decision process) 最优化的数学方法.20 世纪 50 年代初美国数学家 R. E. Bellman 等人在研究多阶段决策过程 (multi step decision process) 的优化问题时,提出了著名的最优化原理 (principle of optimality),把多阶段过程转化为一系列单阶段问题,逐个求解,创立了解决这类过程优化问题的新方法——动态规划.下面采用动态规划技术进行非故障区域恢复供电的最短路径研究.

以某一典型复杂配电网为例 (见图 1), 该连通系共接有 10 个电源点, 8 个分支点, 16 个联络开关.加入配网潮流方向及典型运行方式,以电源点和联络开关作为顶点,图可简化为图 2. 可以看到共有 26 个顶点,虽然定点较多,但由于网络关系并不复杂,实际上是一个相当简单的最短路径问题,由于恢复供电的路径就是指非故障区域相关的联络开关及相应的路由,因此可以理解为求解从不同的电源点到各联络开关的最短路径问题.

$$R^{(16)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 3 & 4 & 5 & 6 & 4 & 8 & 8 & 8 & 11 & 11 & 13 & 14 & 15 \\ 2 & 2 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 4 & 8 & 8 & 8 & 11 & 11 & 13 & 14 & 15 \\ 3 & 3 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 7 & 5 & 8 & 8 & 8 & 11 & 11 & 13 & 14 & 15 \\ 3 & 3 & 3 & 4 & 5 & 6 & 6 & 5 & 8 & 8 & 8 & 11 & 11 & 13 & 14 & 15 \\ 3 & 3 & 3 & 4 & 8 & 8 & 5 & 6 & 9 & 9 & 9 & 9 & 11 & 11 & 13 & 14 & 15 \\ 3 & 3 & 3 & 4 & 8 & 8 & 5 & 6 & 10 & 10 & 10 & 10 & 11 & 11 & 13 & 14 & 15 \\ 3 & 3 & 3 & 4 & 8 & 8 & 5 & 6 & 11 & 11 & 11 & 12 & 12 & 12 & 13 & 14 & 15 \\ 3 & 3 & 3 & 4 & 8 & 8 & 5 & 6 & 11 & 11 & 11 & 13 & 13 & 13 & 14 & 14 & 15 \\ 3 & 3 & 3 & 4 & 8 & 8 & 5 & 6 & 11 & 11 & 11 & 13 & 13 & 14 & 15 & 16 & 16 \\ 3 & 3 & 3 & 4 & 8 & 8 & 5 & 6 & 11 & 11 & 11 & 13 & 13 & 14 & 15 & 15 & 16 \end{bmatrix}$$

从 $D^{(16)}$ 和 $R^{(16)}$ 可以看到每一个电源点到各开关的距离,当配电网某段发生故障时,根据配电网故障判断隔离后,得到相应的非故障区域相邻的联络开关.应用程序可根据生成的 $D^{(16)}$ 和 $R^{(16)}$ 自动计算每一个相邻的联络开关到各电源点的最短距离,形成备选路径提交程序通过约束条件检验.

2.3 非线性多目标规划最优解

如前所述得到了非故障区域恢复供电的数学模型,可以采用非线性多目标规划求解的方法对由 2.2 得到的备选路径进行最优解计算.

设非故障区域负荷为 V_1 ,馈线负荷限值为 V' ,带路前馈线负荷为 V_2 ,等效电阻为 R (含线路),等效电抗为 X (含线路),送端电压为 U ,非故障区域受端电压为 U' ,恢复时间为 T ,开关拉合次数为 S ,现场操作点数为 N 以得到下面的数学模型:

$$\begin{cases} \min T, \\ V_1 + V_2 < V', \\ |U - U'| < 0.7, \\ \min S, \\ \min N. \end{cases}$$

2.3.1 条件判断

假设得到的备选路径有 k 条,首先进行条件判断,如果满足条件

$$\begin{cases} V_1 + V_2 < V', \\ |U - U'| < 0.7, \end{cases}$$

则该路径可进入最后比较筛选.

2.3.2 比较筛选

设满足条件的路径有 j 条($j < k$),设 j 条路径需要拉合开关的次数为 S_j ,现场操作点数为 N_j ,如表 1 所示.

表 1 筛选表

路径	次数	
	S_j	N_j
$j=1$	S_1	N_1
$j=2$	S_2	N_2

续表 1

路径	次数	
	S_j	N_j
$j=\dots$	\dots	\dots
$j=k$	S_k	N_k
最小值	$\min(S_1, S_2, \dots, S_k)$	$\min(N_1, N_2, \dots, N_k)$

从表 1 中可以分别得到拉合开关次数最少的路径和现场操作点数最少的路径,由于这 2 个比较条件不可能完全同时满足,因此在选择最佳路径时,首先考虑操作时间最短的路径,在实际运行中,可以分别对满足 2 个比较条件的最优解进行操作时间计算,取时间较短的路径作为最终路径.

3 结论

我国的城市配电网由于历史的原因和没有行之有效的规划标准导致网架结构非常薄弱,据不完全统计,目前配电网事故在整个电力系统事故中比例占到了 80% 以上.在当前电力体制改革不断深化的今天,研究配电网供电的可靠性问题无疑是面向电力市场的重要课题,日益提高的用户需求也对电力系统自身存在的不足提出了挑战.笔者旨在讨论当配电网故障隔离后,综合采用动态规划的最短路径技术和非线性多目标规划技术对非故障区域尽快恢复供电的最佳路径选择问题.针对一个典型的复杂配电网建模,并综合考虑各种因素,采用最短路径分析、条件判断、比较筛选法得到了最佳路径.由于在计算分析中,对不相关因素进行了初始筛选,因此大大提高了计算速度,为该研究方向提供了又一种解决方案.

参考文献:

- [1] 陈竟成. 配电网建模、馈线分析及动态网络着色[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(24): 28-31.
- [2] 王明俊, 于尔铿, 刘广一. 配电系统自动化及其发展[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [3] SUMIC Z, VENKATA S S, PISTORESE T. Automated Underground Residential Distribution Design Part 2: Prototype Implementation and Results[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1993, 8(2): 644-650.
- [4] 乐阳, 龚健雅. Dijkstra 最短路径算法的一种高效率实现[J]. 武汉测绘大学学报, 1999, 24(3): 209-212.
- [5] MUSTAFA K, MEHMET A, FAOUZI K. Neural Networks for Shortest Path Computation and Routing in Computer Networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1993, 4(6): 941-953.
- [6] 尤如华. 一种使用的配网重构方法[J]. 电力系统及其自动化, 2000, 12(5): 25-28.

Realization of Distribution Power Recovering with Dynamic Programming

DENG Qun^{1,2}, SUN Cai-xin¹, ZHOU Quan¹, ZHANG Xiao-xing¹, CHENG Qi-yun¹

(1. Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology

Under the State Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Jiangbei Power Supply Bureau, Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 401147, China)

Abstract: Distribution power reconfiguration is realization of distribution power recovering. The target is not only to recover power supply immediately for the non-trouble area, but also meet the capacity of the line load, the least wire lose, the least operating steps, keeping lines balance and the highest reliability. At present most researches focus how to separate trouble quickly and how to recover the non-trouble area. Few researches discussed selecting optimized recovering path. The problem to realize distribution power recovering is a new task in the distribution power field. Examples prove it is a simple, fast, practically and efficient method to select the best path to recover the non-trouble area with dynamic programming and non-linear multi-object technology.

Key words: distribution; power recover; best path; dynamic programming

(编辑 李胜春)

(上接第 14 页)

Reference Efficiency of Planetary Gear Train

CUI Li, QIN Da-tong, SHI Wan-kai

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Reference efficiency of a pair of gear drive without planetary motion is the base to calculate efficiency of the whole planetary gear train. The authors find reference efficiency for speed increase is higher than that of the same drive used for speed reduction. This is different from the earlier viewpoint. New equations are derived for correctly calculating the reference efficiency of spur gear and helical gear with internal conjugate and external conjugate either in the state of speed increase or speed reduction respectively. The equations are also used to calculate efficiency of 2K-H planetary gear train.

Key words: planetary gear train; reference efficiency; speed increase; speed reduction

(编辑 张小强)