

基于时间分段的配电网重构

王智宇,涂光瑜,罗毅,李晨

(华中科技大学电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 在分析了只针对单个时间断面研究配电网重构算法的不足的基础上,提出了基于时间分段的配电网重构方法。利用负荷变化幅度对重构时间进行初步分段,并考虑重构中开关动作对配电网造成的不利影响对其进行修正。同时,在比较目前研究的各种主流重构算法的基础上,根据配电网的运行特征对网络重构的遗传算法进行了改进。仿真算例表明,提出的这种基于时间分段的配电网重构方法可以明显地减少重构后的网损,又不致增加操作费用,适于工程实际应用。

关键词: 配电网重构; 时间分段; 遗传算法

中图分类号: TM76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)08-0035-05

0 引言

配电网优化是配电自动化(DMS)的重要部分,任一个配电网在特定的负荷情况下理论上都存在一个最优的运行结构,在这个最优结构下各负荷点的运行电压、网络损耗、负荷平衡的协调为最优,配电网重构的目标就是根据目前的网络结构以及负荷情况计算出最优结构,以使配电系统尽可能地运行在最优状态下。

由于配电网的复杂性,配电网的重构问题在数学上可以归结为一个带有众多约束条件的大规模非线性组合优化问题。目前,对于配电系统网络重构所做的大量工作集中于寻求一种算法,使得能在尽短的时间计算得到一个最优解,即寻求一种更高效的算法。诸多文献中的算法大致有下列几种:

(1)启发式算法:如支路交换法^[1]和破坏法^[2],它们缺乏严格数学意义上的全局最优性;(2)传统的数学优化方法:如分支定界法,存在“维数灾”问题;(3)神经网络法^[3],只能求解小规模网络,而且由于训练中采用支路交换法的优化结果,其最优性难以保证;(4)模拟退火法^[4],其温度控制难以掌握,寻优速度很慢;(5)遗传算法^[5]与进化规划^[6],由于其编码方式主要基于开关开合或线路被选择与否进行编码,在遗传操作中会产生大量不可行解,并且由于仅依靠遗传操作进行寻优,没有利用问题的特有性质,所以收敛速度慢,局部精确寻优能力差^[7]。

这些算法研究在加快计算最优运行结构的速度、减小开关动作次数、全局优化网络、最大可能减小网损等方面做了许多有益的工作。但是,单纯的

算法却难以直接运用于实际工程,其原因是这些算法仅针对某一个特定时间断面的数据进行计算,而实际情况下配电网供应的负荷是连续改变的。随着负荷的变化对配电网结构进行调整,可以使得配电系统在这个时间面上更加安全经济地运行。由于负荷是连续不断变化的,所以仅仅寻求数学上的实时最优所造成的结果只能是开关频繁进行操作,这无疑将增加系统的操作费用,并对开关的使用寿命以及系统的稳定性和可靠性都产生不利的影响。如何在限制重构次数的前提下使重构效能最大,是将配电网重构算法与实际工程运用结合起来的关键。

针对上述问题提出一种基于时间分段的配电网重构方法,利用电力系统所提供的负荷预测信息对配电网进行分时间段重构,并分析比较了短期(日)负荷预测与超短期(分钟级)负荷预测对时间段划分的指导性,给出单个时间段内的计算模型、仿真系统的流程图以及对一组数据的算例。仿真算例表明,本文提出的这种基于时间分段的配电网重构方法可以在限定操作费用范围的前提下明显地减少重构后的网损,证明了算法的有效性。

1 重构时间段的划分方案

1.1 时间段的初步划分

配电网重构能使配电系统运行在一个最优的状态,但同时重构操作亦会引起运行费用增加、系统稳定性变差等不良影响。如何协调这两个方面是充分发挥网络重构作用的前提。以制定日开关动作计划为例,由于开关操作越频繁其操作费用与系统稳

定性变差的问题就会越突出,但在负荷较为平稳时重构带来的收益较小,所以这种情况下不适宜进行重构。一个可行的办法是对时间进行分段,在每个时间段初计算出此时的网络最佳运行结构,并保持这种结构运行直至下一时间段开始,而在这个时间段内不进行重构操作,于是就限制了开关的操作次数,这样问题便集中在如何提高时间段的划分效率上。

时间分段一般有两种方法:等时间间隔分段与不等时间间隔分段。后者基于运行模式对时间间隔不等分段的思想,根据负荷曲线升降变化幅度的大小动态地调整时间段长度与时段数,可使得网络结构的调整发生在负荷变化幅度很大的时候,缺点在于划分时间段较为复杂;前者简单易实现,但是缺点在于会造成负荷相对平稳时过多地进行网络重构以及负荷起落较大时不能及时调整网络结构。比较两种方式,尽管等时间间隔网络重构相对简单,但不等时间间隔划分更能适应配电网运行的实际需求。

时间段划分必须制定一个划分标准 ρ ,当负荷变化幅度超过这个标准,结束当前的时间段,开始下一个时间段。一个变量的变化幅度通常可以由对其趋势曲线求导得到,对于配电负荷变化幅度可以选用下列指标负荷变幅 ρ_i 表示:

$$\rho_i = \lim_{t_1 \rightarrow t_2} \frac{P_{(t_2)} - P_{(t_1)}}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

其中: t_1 、 t_2 分别为当前时刻与之后的一个时刻, $P_{(t_1)}$ 、 $P_{(t_2)}$ 分别为对应这两个时刻的电网中的负荷。对表达式分析可知:在 t_1 时刻无法得知其后一个时刻 t_2 的负荷 $P_{(t_2)}$,如何能准确得到 $P_{(t_2)}$ 是问题的关键。负荷预测作为传统的安排发电和供电计划的依据是电力系统运行所必需的,从短期负荷预测曲线可以得到第二天任一时刻的负荷量并具有相当高的精度。根据负荷预测曲线提供的各时刻负荷值可以计算出任何时刻的负荷变化幅度以进行时间分段。

$P_{(t_1)}$ 为当前配电 SCADA 系统采集值(准确值), t_1 为当前时刻、 $t_2 = t_1 + \Delta t$ 这里的 Δt 可以按照需求确定(一般为几分钟),影响负荷变幅 ρ_i 准确程度的关键在于 $P_{(t_2)}$ 的精确程度。文献[8]提供了一种超短期负荷预测方法,文献[9]提出利用这种预测方法对配电网进行动态重构。但是超短期负荷预测是否比短期负荷预测更适用于重构时间分段?依据负荷预测理论,日负荷预测属于短期负荷预测,超短期负荷预测即为分钟级的负荷预测。取两者实际曲线相比较,前者是一条较为光滑的曲线,后者是

一条带有很多波动的曲线。配电网的负荷变化不确定,所以超短期负荷预测更反映配电网中实际的负荷变化。 Δt 在 t_1 中宜取在分钟级,否则求出的变化幅度往往会因为时间间距太大而不能客观反映负荷变化实际情况。如果使用超短期负荷预测得到的数据来求解 ρ_i , Δt 的大小一般不足以跨越小波动的的时间,所以有可能造成 ρ_i 的大小频繁变动,因而导致时间分段过小,重构频繁。短期负荷预测尽管在值的精确度上不如超短期负荷预测,但是它反映了相对较长一段时间的负荷变化趋势,这样就避免了 ρ_i 频繁发生波动。根据上述分析可见,在实际操作中 $P_{(t_2)}$ 值只能由短期负荷预测曲线(一般取日负荷预测曲线)得到,而不宜采用超短期负荷预测的结果。

负荷预测曲线不可能清楚地预测各个负荷点的负荷变化,如果对配电网进行分块分别预测,从负荷预测的观点来看不仅会造成预测结果的误差过大,而且也不经济。负荷预测只能用来计算配电网负荷变化幅度,以完成对重构时间的分段。计算配电网在特定负荷情况下的最优运行结构时所取用的数据仍依赖于配电 SCADA 采集的实时数据。

1.2 考虑时间段间相互配合后的分段修正

上节给出了配电网重构时间初步分段方法,而分段最优运行组合起来是否也是最优,这也是需要关注的问题。

两个相邻时间段之间的重构对系统造成的负面作用并不是每次都相等的,而是与系统运行结构的改变程度密切相关。显然配电网的结构改变越小,即开关动作越少带来的网络不利因素越小。如果一天内运行结构保持不变,则避免了重构带来的种种不利因素。一般来讲,调整状态的开关数目越多,调整开关的电压等级越高,重构带来的不利影响就越大。这里引入网络结构变化度 ∂ 这一概念,取第 n 、 $n+1$ 个时间段为例,对配电网中开关编号,计算得出第 n 个时间段的开关状态集合 $\{11101101111110\dots\}$,第 $n+1$ 个时间段的开关状态 $\{11001110111\dots\}$ (以1表示合,0表示开),定义网络结构变化度 ∂ :

$$\partial = \sum_{k=1}^{k=MAX_{change}} k \quad (2)$$

其中: MAX_{change} 为开关的变化值, k 为各个开关进行分合操作对系统的影响程度参数,其值可根据开关的电压等级以及在电网中所处位置确定(为简化考虑,可将一个电压等级线路中的开关的 k 固定为一

个定值)。网络结构变化度 δ 乘以一个经验参数可以近似表示本次网络结构调整带来的损失。

综合上述分析,对重构时间进行分段时判断一个时间段是否结束的标准应综合负荷变化幅度与网络结构变化带来损失 $\delta \times$ 两方面因素。一种可行的办法是,在利用负荷变化幅度初步划分重构时间后,使用实时数据计算出重构后的网络结构,对比前后结构得出网络结构变化度 δ ,结合经验参数得出结构调节损失 $\delta \times$,用其对时间分段进行进一步修正以达到时间分段最优。

2 多时间段配电网重构的数学模型

划分好了具体的时间段(在计算过程中仍可调整时间段),所要解决的问题就是:计算出一个最优的网络结构,使得在这个特定的时间段内达到系统的运行最优。这是当前集中研究的热点问题,并已提出了很多算法,以在尽量短时间内算出最优方案。

本文引言已对目前的主流重构算法的优缺点进行了分析。比较几种算法,遗传算法的主要缺点在于遗传操作中会产生大量不可行解而导致效率低下,但如果能够利用配电网中的运行特点来提高编码的效率,则可以扬长避短充分利用遗传算法寻优能力强的特点。基于上述考虑,对用于配电网重构的传统遗传算法的改进数学模型如下。

2.1 适应度函数的给出

这里目标函数是针对利用负荷变化幅度初步划分时间段的情况下,在前后时间根据当前系统中的实时数据计算出后一时间段时间分段下系统的最优运行结构。

取目标函数为: $F(x) = f(x) + F \cdot G(x)$

其中 $f(x)$ 以网损最小为目标有如下形式:

$$f(x) = \min \sum_{j=1}^{N_f} r_j \frac{P_j^2 + Q_j^2}{|V_j|^2} \quad (3)$$

式中: N_f 为线路与变电站总数, r_j , P_j , Q_j , V_j 分别为元件电阻、有功、无功以及功率注入节点的复电压。

配电网重构还应满足下列约束条件:

流量守恒的约束 $A(t) i(t) = I(t)$, 其中, $A(t)$ 为配电网的节点支路关联矩阵, $i(t)$ 为 t 时刻的各个支路的电流, $I(t)$ 为配电网各个节点的注入电流。

电压约束 $V_{\min} < V_k(t) < V_{\max}$, 其中, $V_k(t)$ 为 t 时刻 k 节点的电压值, V_{\max} , V_{\min} 分别为该节点的电压上、下限。

容量约束 $i_{\min} < i(t) < i_{\max}$, 其中, $i(t)$ 为 t 时刻 i 支路的电流值, i_{\max} , i_{\min} 分别为该支路的电流上、下限。

另外,还要满足配电网的放射状运行约束等。这些约束条件,在目标函数中使用罚函数 $G(x)$ 来表征。

由于进化规划以适应值函数指导搜索方向,搜索向着适应值增大的方向进行,须对上文中所取的目标函数进行转换,取适应度函数如下:

$$F = C_{\max} - f(x) \quad (4)$$

式中: F 为适应值函数; C_{\max} 为一给定值,可取进化的当前代中最大的目标函数值。

2.2 改进编码方式

遗传算法问题的解是用数字串(称作染色体)表示的,遗传算子也是直接对数字串进行操作的。在配电网重构问题中,要处理的对象是联络开关和分段开关,考虑到它们只有开、合两种状态,常规的方法是利用二进制数对所有开关进行编码,即 1001...0111。其中,染色体第 i 位表示配电网中第 i 条支路上开关状态,“1”表示开关闭合,“0”表示开关断开。该编码方案简单易于实现,但随着网络规模增大,开关数目增多,这种方法无疑会占用空间,降低求解速度。本文利用配电网运行时的特征来缩短染色体编码长度,从而使遗传操作时占用空间缩小。下面列出一些可以缩短染色体编码长度的运行特点:

(1)配电网中不在任何环路内的支路上的开关必须闭合。因为,在这样的支路上的用户只通过一条唯一的通路连接到电源,断开这个开关必然使其停电。

(2)在网架结构合理的情况下,若以网损最小为目标函数,则与电源点相连的开关一般也应闭合。

(3)当联络开关的两端的电压差不大时,对这样的开关进行操作对降低网损量作用不大,当然这必须依据实时采集的配电网运行参数进行判断。

利用这几个特征在编码时可以减少需编码的开关数目,即可大大缩短染色体的长度,这样可以在很大程度上减少遗传操作中的不可行解,提高算法的效率,节约计算时间。

3 整体流程与算例分析

采用算例系统为 IEEE-123 节点系统^[10],以图 1 所示的模拟预测负荷为数据源(功率单位 MW)。

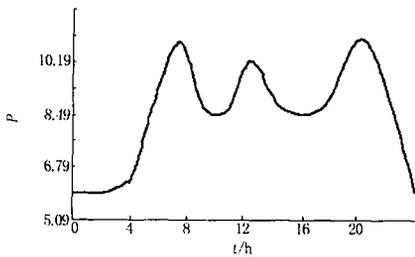


图 1 模拟负荷预测曲线

Fig 1 Simulation of load forecast curve

基于时间分段的配电网重构计算流程图如图 2 所示。

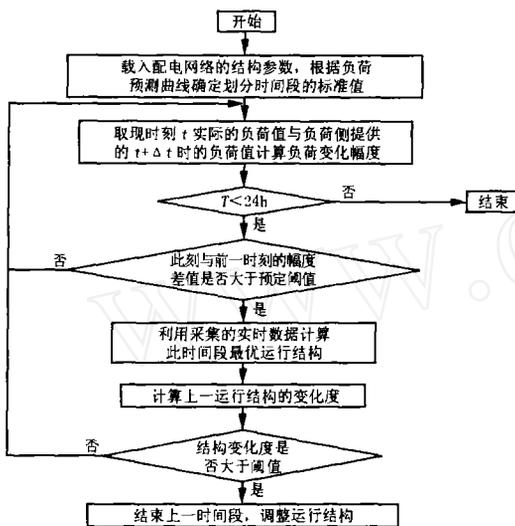


图 2 计算流程图

Fig 2 Computation flow chart

系统中同一电压等级 k 定为 1, ϵ 定为 0.001, 以当前变化幅度 ΔP_k 与其上一时刻所计算的变化幅度 ΔP_{k-1} 差值是否大于 0.05 为时间段划分标准。采用上述不等时间间隔分段重构法得出分段结果如表 1 所示。

表 1 不等时间间隔重构分段结果

Tab 1 Results of non-even division

段落	1	2	3	4	5	6	
分段时刻	4.7	5.5	6.5	7.5	8.8	10	
段落	7	8	9	10	11	12	13
分段时刻	11.5	13.5	14.8	18	20.1	22	23.5

若按照等时间间隔把一天分为 14 段,按每 110 分钟对系统重构一次,两种重构的起始时刻均为 0:0,对上述系统进行计算得出网损比较如表 2。

表 2 重构前后计算网损比较

Tab 2 Net loss of results of reconfiguration

系统重构前	等时间间隔重构后	不等时间间隔重构后
5 482.720 kW/h	4 231.636 kW/h	4 215.665 kW/h

分析数据可以看出在分段较细的情况下二者重

构后的网损差别不大,而且随着两种方式划分段数的增加,两者计算结果会趋近于相等。由于算例中的系统结构简单且重构段数一致,计算出的开关的操作次数亦近似相等。但不等时间间隔重构方式能够在负荷变化幅度较大处改变网络运行结构,仍具有比等时间间隔重构更优越的性能,且重构时间分段越少不等时间间隔重构较前者的性能越好。因此,不等时间间隔方式更适用于实际情况下需要限制开关操作次数的情况。

4 结论

现阶段配电网重构的研究重点在于针对某一个时间断面的负荷数据计算最优运行结构,这种情况下所寻求的实时最优结构在实际应用中必然造成系统开关频繁操作,从而带来一系列不良影响。本文提出了基于时间分段的配电网重构方法,考虑配电网的负荷连续变化的特征,将负荷预测理论用来指导配电网重构的不等时间分段,比较短期(日)负荷预测与超短期(分钟级)负荷预测在配电网重构时间分段中的优缺点,得出前者更适合工程实际运用的结论。利用负荷预测理论对时间段进行初步划分,并引进网络变化度的概念,在实时操作过程中对时间分段进行调整,以达到各个时间段的配合最优。最后,利用配电网运行特点对用于配电网重构的遗传算法进行改进,计算最优运行的网架结构,提高了计算效率,使其更贴近于实际的工程应用。仿真算例表明,提出的这种基于时间分段的配电网重构方法可以明显地减少重构后的网损又不致增加操作费用,证明了方法及算法的有效性。

参考文献:

- [1] Baran M, Wu F F. Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing[J]. IEEE Trans on PWRD, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [2] Shimohammadi D, Waynehong H. Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction[J]. IEEE Trans on PWRD, 1989, 4(2): 1492-1498.
- [3] Kashem M A, et al. Artificial Neural Network Approach to Network Reconfiguration for Loss Minimization in Distribution Networks[J]. Electrical Power & Energy Systems, 1998, 20(4): 247-258.
- [4] Chiang H D, Jumean R J. Optimal Network Reconfigurations in Distribution System[J]. IEEE Trans on PWRD, 1990, 5(3): 1568-1574.

- [5] Nara K, et al Implementation of Genetic Algorithm for Distribution Systems Loss Minimum Reconfiguration[J]. IEEE Trans on PWRD, 1992, 7(3): 1044-1051.
- [6] Song Y H, et al Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction Using Fuzzy Controlled Evolutionary Programming[J]. IEEE Proc—Gener, Transm, and Distrib, 1997, 144(4): 345-350.
- [7] 余贻鑫,段刚. 基于最短路算法和遗传算法的配电网网络重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 44-49.
YU Yi-xin, DUAN Gang Shortest Path Algorithm and Genetic Algorithm Based Distribution System Reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 44-49.
- [8] 刘健,勾新鹏,徐精求,等. 基于区域负荷的配电网超短期负荷预测[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(19): 34-37.
L U Jian, GOU Xin-peng, XU Jing-qiu, et al Short Term Load Forecasting of Distribution Networks Based on Partial Loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 34-37.
- [9] 刘健,徐精求,党海锋. 考虑负荷变化的配电网动态优化[J]. 电力系统自动化, 2004, 32(13): 15-19.
L U Jian, XU Jing-qiu, DANG Hai-feng Distribution Networks Dynamic Optimization Considering Load Changes[J]. Relay, 2004, 32(13): 15-19.
- [10] IEEE Distribution Planning Working Group Report Radial Distribution Test Feeders [J]. IEEE Trans on PWRD, 1991, 6(3): 975-985.
- [11] 尹丽燕,于继来. 多时间分段的配电网动态重构[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 44-49.
Y N Li-yan, YU Ji-lai Dynamic Reconfiguration of Distribution Network with Multitime Periods[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 44-49.

收稿日期: 2005-09-20; 修回日期: 2005-10-13

作者简介:

王智宇(1981-),男,硕士研究生,主要研究方向为配电网自动化;E-mail:wzy5118@sina.com

涂光瑜(1941-),男,教授,博士生导师,长期从事电力系统运行与控制的研究;

罗毅(1966-),男,副教授,主要从事 EMS/DMS、电力系统安全监控的研究。

Distribution network reconfiguration based on time subsection

WANG Zhi-yu, TU Guang-yu, LUO Yi, LI Chen

(College of Electrical & Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The researches of distribution network reconfiguration algorithm which only aim at single-time-period may cause switch's excessive readjustment. In order to solve problems above, this paper presents an operate measure using time subsection. Extent of loads-change is used to detach time-period. Moreover, disadvantages which brought by changes of switch state is also considered to modify the time-period. Then the paper compares some kinds of algorithm and makes use of operation characters of distribution network to improve the genetic algorithm. Simulation result shows that this method can reduce line losses and operation expenses to fit for project use.

Key words: distribution network reconfiguration; time subsection; genetic algorithm

(上接第 19 页 continued from page 19)

收稿日期: 2005-10-11; 修回日期: 2005-10-23

作者简介:

邓妍(1980-),女,硕士研究生,主要研究方向为电力

系统继电保护及综合自动化;

邵能灵(1972-),男,博士,副教授,主要从事电力系统继电保护,电力系统安全稳定控制的研究工作。E-mail:nlai@sjtu.edu.cn

Study of the earth fault distance relay based on combined sequence components

DENG Yan, TA INeng-ling

(Department of Electrical Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: An earth fault distance relay based on the combined sequence components is presented. The new scheme uses zero sequence components as operation component and negative sequence components as restraint component to discriminate whether the fault is in the internal or external zone. As the sequence components are adaptive to the system operation conditions, it will obtain high sensitivity. Simulation results show the new distance relay has good performance in different conditions.

Key words: zero sequence component; negative sequence component; earth fault distance protection