

基于两层规划的电力系统 $N-K$ 故障分析方法

刘国静¹, 李娟², 谈健¹, 李琥¹, 史静¹, 胡晓燕¹

(1. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 江苏 南京 210008;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:传统的电力系统 $N-K$ 故障分析一般采用组合遍历的方式, 存在故障组合数量大、计算效率低的缺点。文中建立了此类问题的两层规划模型, 通过寻优方式确定造成电网损失最大的故障组合。上层问题在故障重数给定的条件下, 寻求能够引起电网切负荷量最大的故障组合。下层问题则针对上层问题决策的故障组合, 模拟电网事故后的运行情况, 在满足电网各类运行约束的条件下, 通过调整发电机组输出功率最小化电网切负荷量, 进一步给出了模型的遗传算法求解流程。最后, 通过 IEEE-14 节点和 IEEE-118 节点算例系统, 对模型有效性进行了验证。

关键词: $N-K$ 故障分析; 两层规划; 规划运行; 遗传算法

中图分类号: TM71

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)01-0040-05

0 引言

电力系统 $N-K$ 故障分析是电力系统规划和运行中的常用手段, 用以校验当系统中 K 个元件停运后系统运行状态是否在允许的安全范围内^[1]。 K 的取值一般为 1 或 2, 即常见的 $N-1$ 或 $N-2$ 校验。近年来发生的国内外大停电事故表明, 加强对电网中严重 $N-K$ 故障 ($K \geq 2$) 的分析、识别和预防连锁故障对于保证大电网安全可靠运行具有十分重要的意义^[2-7]。

目前电力系统 $N-K$ 故障分析一般是采用组合遍历的方式, 然而随着系统元件数量和分析故障重数的增加, 故障组合的数量将呈指数级增长, 日渐难以满足大电网分析计算的需要。为提高电力系统 $N-K$ 故障分析的计算效率, 近年来学者们开展了大量研究。文献[8]在计算中采用了因子表附加链技术和动态网络接线分析方法, 能够较好地保证计算精度和速度。文献[9]利用导纳矩阵的稀疏性, 并结合矩阵部分重新因子化法和快速前代等技术, 有效减少了不必要的计算, 节省了计算时间。为快速确定故障后发电机组输出功率再调整量和切负荷量, 文献[10]提出了一种基于交流灵敏度的反向等量配对调整法, 具有计算效率高、实用性强的优点。此外, 并行计算技术在该领域也得到了应用。文献[11]通过直流潮流进行开断故障的快速扫描, 并将多个时段的计算任务分配到不同的计算进程, 对于单时段内的分析计算采用多线程并行计算的方式, 有效提高了整体计算速度。文献[12]充分利用 $N-K$ 故障分析问题的时空弱耦合特征, 对于大规

模电网采用分区并行计算, 对于多时段的静态安全校核采用分时段并行计算, 具有较高的计算效率。

上述研究在提高电力系统 $N-K$ 故障分析的计算效率方面取得了一定的成效, 但是仍没有摆脱组合遍历的框架。文中尝试从另一个角度, 将求取 $N-K$ 故障分析中最严重故障的问题描述成两层规划模型, 借助最优化原理, 通过寻优方式确定故障组合, 以期减少传统组合遍历方式的计算量。

为减轻通过组合遍历方式进行电力系统 $N-K$ 故障分析带来的计算负担, 文中将该问题描述成两层规划模型, 通过优化求解的方式寻求造成电网切负荷量最大的故障组合, 对此电力系统 $N-K$ 故障分析的问题提供了一个新的研究思路。

1 计算流程

传统的电力系统 $N-K$ 故障分析需要对预想事故集中可能出现的事故进行组合遍历。对于每一种故障组合, 在分析中首先假设组合中的元件处于强迫停运状态, 在此基础上进行电网拓扑分析和潮流计算。若出现线路潮流约束或母线电压越限, 还需要通过调整发电机组输出功率、发电厂母线电压等手段进行安全校正操作^[13-15]。安全校正过程一般是以切负荷量最小、调整时间最短等为目标(图1以切负荷量为例进行说明)。若最终在某些故障组合下出现切负荷的情况, 则说明当前电网运行方式无法满足 $N-K$ 校验的要求, 一般需要对发电方式或网架结构进行适当的调整。传统的电力系统 $N-K$ 故障分析流程如图1所示。在电力系统 $N-K$ 故障分析中, 造成损失最严重的故障组合对于安全分析而言具有尤为重要的意义, 可以更为直接地反映电

网安全水平。基于最优化原理,分析流程如图 2 所示。

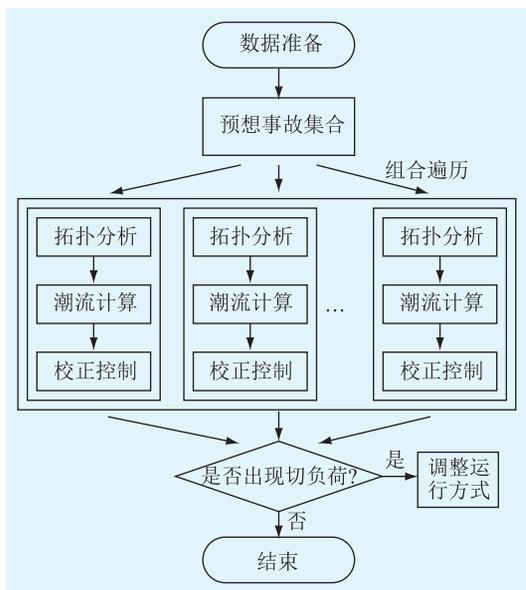


图 1 传统的电力系统 $N-K$ 故障分析流程

Fig. 1 The flowchart of traditional power system $N-K$ analysis

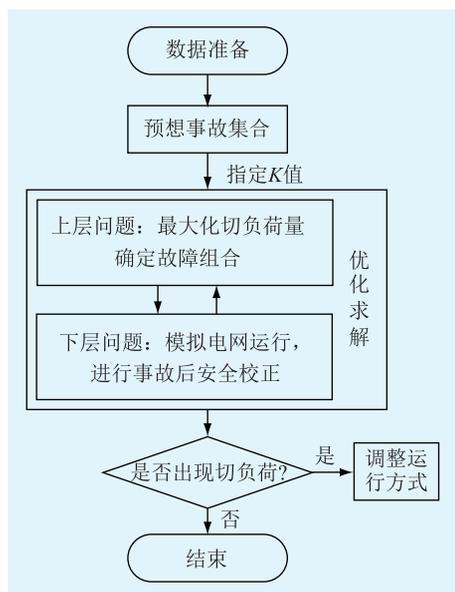


图 2 文中分析流程

Fig. 2 The flowchart of the analysis method in this paper

上述分析流程的特点在于通过两层规划模型的优化求解代替传统的组合遍历。模型将电网切负荷量作为故障引起电网损失的评价指标,上层问题在故障重数 K 给定的条件下,寻求能够引起电网切负荷量最大的故障组合,而下层问题则针对上层问题决策的故障组合,模拟电网事故后的运行情况,在满足电网各类运行约束的条件下,通过调整发电机组的输出功率最小化电网切负荷量。最终,

上层问题的目标函数值将等于各故障组合所引起的电网最小切负荷量中的最大值。通过对模型的求解,能够直接给出引起电网切负荷最大的故障组合。

2 数学模型

2.1 上层问题

文中模型暂不考虑无功电压的影响,建立直流潮流条件下的数学模型。上层问题目标函数可表示为:

$$\max_{v_l} \sum_{d \in D} \Delta P_d^* \quad (1)$$

式中: v_l 为线路 l 运行状态, 0 表示故障停运, 1 表示正常运行; D 为负荷节点集合; ΔP_d^* 为下层问题优化得到的负荷节点 d 对应的切负荷量。

$$\text{s.t.} \quad \sum_{l \in L} (1 - v_l) = K \quad (2)$$

式中: L 为线路集合; K 为所分析的故障重数。

2.2 下层问题

下层问题通过发电机组输出功率的再调整,最小化电网切负荷量,目标函数可表示为:

$$\Delta P_d^* \in \arg \left\{ \min_{P_l^f, \Delta P_g, \delta_n, \Delta P_d} \sum_{d \in D} \Delta P_d \right\} \quad (3)$$

式中: P_l^f 为线路 l 流过的有功功率; ΔP_g 为发电机组 g 在事故后的有功功率再调整量; δ_n 为节点 n 对应的电压相角; ΔP_d 为负荷节点 d 对应的切负荷量。

(1) 线路传输容量约束, 即:

$$P_l^f - \frac{1}{x_l} \sum_{n \in N} A_{nl} \delta_n + (1 - v_l) M \geq 0 \quad (4)$$

$$P_l^f - \frac{1}{x_l} \sum_{n \in N} A_{nl} \delta_n - (1 - v_l) M \leq 0 \quad (5)$$

$$-v_l P_l^{\max} \leq P_l^f \leq v_l P_l^{\max} \quad (6)$$

式中: x_l 为线路 l 电抗值; A_{nl} 为节点支路关联矩阵中 n 行 l 列的元素值; M 为某一较大的常数; P_l^{\max} 为线路 l 输电容量。

当线路 l 正常运行时, $v_l = 1$, 由式(4)、式(5)可知, 线路 l 上的有功功率应满足:

$$P_l^f = \frac{1}{x_l} \sum_{n \in N} A_{nl} \delta_n \quad (7)$$

由式(6)可知, 此时 $v_l = 1$, 有:

$$-P_l^{\max} \leq P_l^f \leq P_l^{\max} \quad (8)$$

式(7)、式(8)构成传统的线路传输容量约束。而当线路 l 故障停运时, $v_l = 0$ 。由于 M 为较大常数, 显然式(4)、式(5)为松弛约束。而由式(6)可知, 此时线路 l 流过的有功功率 P_l^f 为 0, 与线路故障停运的状态相符。可见, 式(4—6)能够同时表示线路正常运行和故障停运的功率约束。

(2) 节点功率平衡约束。对于节点 n , 应满足注入功率与流出功率相等, 即:

$$\sum_{g \in n} (P_g^0 + \Delta P_g) = \sum_{l \in n} B_{nl} P_l^l + \sum_{d \in n} (P_d + \Delta P_d) \quad (9)$$

式中: $g \in n, l \in n, d \in n$ 分别表示发电机组 g 、线路 l 、负荷 d 与节点 n 相连; 线路 l 功率以流出为正, 流入为负, 在式中通过 B_{nl} 的正负表示线路 l 功率的方向; P_g^0 为初始状态下发电机组 g 对应的输出功率, 在模型中为给定常数; ΔP_g 为出现故障后发电机组 g 输出功率在限定时间内的再调整量; P_d 为负荷 d 对应的负荷功率。

(3) 发电机组最大调整量约束。发电机组 g 在故障后的再调整量 ΔP_g 应满足如下约束:

$$-r_g \Delta t \leq \Delta P_g \leq r_g \Delta t \quad (10)$$

式中: r_g 为发电机组 g 最大调节速率; Δt 为允许的调整时间, 一般为 5~10 min。

(4) 机组输出功率范围约束, 即:

$$P_g^{\min} \leq P_g^0 + \Delta P_g \leq P_g^{\max} \quad (11)$$

式中: P_g^{\max}, P_g^{\min} 分别为机组 g 最大、最小允许输出功率。

3 求解流程

文中模型属于两层规划模型, 其中下层问题为混合整数线性规划模型。两层优化模型常用的求解方法包括极点搜索法、分支定界法、互补旋转法、下降方向法、罚函数法、智能搜索方法等^[16], 采用智能搜索算法中常用的遗传算法^[17-18]进行求解, 求解流程如图 3 所示。

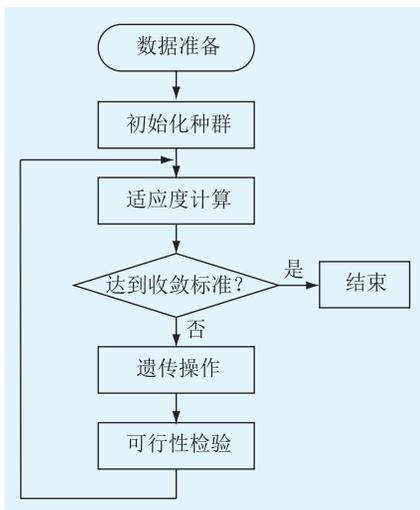


图 3 遗传算法求解流程

Fig. 3 The flowchart of GA solving process

(1) 初始化种群。采用二进制编码方式, 种群中每一个体均由 N 位组成 (N 为线路数量)。在初

始化阶段, 从 N 位中随机选择 K 位设置编码为 0 (K 为所研究的故障重数), 表示对应线路故障停运, 其他设置为 1。

(2) 适应度计算。将下层问题目标函数值, 即引起的电网最小切负荷量作为个体适应度。对于种群中的个体, 可求解通过下层问题的获得适应度, 下层问题采用 CPLEX 软件包求解^[16]。

(3) 收敛判据。根据最大迭代次数作为迭代过程的收敛判据。

(4) 遗传操作。遗传操作包括选择、交叉和变异运算。其中, 根据个体适应度, 采用轮盘赌的方式确定个体被选择到下一代的概率, 随机选择遗传到下一代的个体。个体间的交叉运算采用单点交叉方式。

(5) 可行性检查。经过遗传、交叉和变异运算, 个体所对应的故障停运线路条数可能不等于 K , 无法满足上层问题约束条件。对于不满足的个体, 可行性检查通过随机选择的方式改变部分编码, 将编码对应数值为 0 的位数重新调整为 K 。

4 算例分析

4.1 IEEE-14 节点算例系统

首先以 IEEE-14 节点系统为例进行说明。IEEE-14 节点系统网络参数取自文献^[19], 发电机组数据如表 1 所示, 负荷数据如表 2 所示。设置种群数量为 100, 交叉概率为 1.0, 变异概率为 0.001。

表 1 机组数据

Tab.1 Generator data

所在节点	最大功率/ MW	最小功率/ MW	调节速率/ (MW·min ⁻¹)	初始功率/ MW
1	200	50	3	90
2	100	0	2	70
3	100	0	2	45
6	100	0	3	45
8	100	0	2	20

表 2 负荷数据

Tab.2 Load data

所在节点	功率/MW	所在节点	功率/MW
4	45	11	18
5	54	12	18
9	54	13	25
10	36	14	20

为说明文中模型的有效性, 将模型计算结果与传统组合遍历方式计算结果进行对比。在 K 取不同值时, 计算结果如表 3 所示。

表 3 结果比较

Tab.3 Results comparison between two methods

K	文中方法最大切负荷量/MW	传统方法	
		最大切负荷量/MW	遍历个数
1	47.7	47.7	16
2	110	110	120
3	155	155	560
4	155	155	1820

可见,方法计算结果与传统组合遍历方式的计算结果一致,验证了通过求解两层优化模型进行寻优的有效性。

4.2 IEEE-118 节点算例系统

为说明文中方法在大系统电网安全分析中的优势,进一步以 IEEE-118 节点算例系统为例进行说明。该系统包含 186 条线路,54 台机组,91 个负荷节点。若不计预想事故集的预筛选, $K=3$ 时,组合遍历的故障数量将超过 100 万个, $K=4$ 时,组合遍历的故障数量将接近 5000 万。传统的方法显然难以直接适用,需要采取预想事故集缩减、故障排序等启发式简化措施。文中方法通过智能搜索,能有效减少计算时间。

以 $K=3$ 为例,计算机配置为 AMD A8-6410 处理器,主频 2.0 GHz,内存 4 G,传统方法耗时约 8.04 h,文中方法约 6.21 h,具有较为明显的计算速度优势。

5 结语

为减轻通过组合遍历方式进行电力系统 $N-K$ 故障分析带来的计算负担,将该问题描述成两层规划模型,通过优化求解的方式寻求造成电网失负荷量最大的故障组合,为电力系统 $N-K$ 故障分析问题提供了一个新的研究思路。

文中模型基于直流潮流,主要关注造成电网失负荷量最大的故障组合,在后续研究中有必要进一步考虑线路潮流越限量、母线电压越限量等指标,同时需要进一步研究如何给出寻优过程的次优解,以便分析所有可能对系统的安全稳定运行造成威胁的故障组合。

参考文献:

[1] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社, 2009.
WANG Xifan. Modern power system analysis [M]. Beijing: Science Press, 2009.

[2] 高翔, 庄侃沁, 孙勇. 西欧电网“11.4”大停电事故的启示[J]. 电网技术, 2007, 31(1):25-31.
GAO Xiang, ZHUANG Kanqin, SUN Yong. Lessons and enlightenment from blackout occurred in UCTE grid on November 4 [J]. Power System Technology, 2007, 31(1):25

-31.

[3] CHEN Q, MCCALLEY J D. Identifying high risk $N-K$ contingencies for online security assessment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2):823-834.

[4] KIRSCHEN D S, JAYAWEERA D, NEDIC D P, et al. A probabilistic indicator of system stress[J]. Power Systems IEEE Transactions on, 2004, 19(3):1650-1657.

[5] 易强, 万书鹏, 彭辉, 等. 调度与变电站一体化系统远程维护安全防护设计[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(1), 40-42, 46.
YI Qiang, WAN Shupeng, PENG Hui, et al. Design of security protection for remote maintenance in dispatch and substation integrated system [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(1), 40-42, 46.

[6] 张煦, 张向伍. 计及设备故障检修的电网可靠性与经济性分析[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(2), 60-64.
ZHANG Xu, ZHANG Xiangwu. Analysis for the reliability and economic of power system considering maintenance [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(2), 60-64.

[7] 丁平, 李亚楼, 徐得超, 等. 电力系统快速静态安全分析的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(31):77-82.
DING Ping, LI Yanlou, XU Dechao, et al. Improved algorithm of fast static state security analysis of power system [J]. Proceeding of the CSEE, 2010, 30(31):77-82.

[8] 何洋, 洪潮, 陈昆薇. 稀疏向量技术在静态安全分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1):41-44.
HE Yang, HONG Chao, CHEN Kunwei. Study of sparse vector techniques applied to contingency analysis [J]. Proceeding of the CSEE, 2003, 23(1):41-44.

[9] 李海涛, 孙闻, 赵兵, 等. 基于交流灵敏度的在线安全控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(1):32-36.
LI Haitao, SUN Wen, ZHAO Bing, et al. Online security control analysis based on sensitivity method [J]. Proceeding of the CSU-EPSA, 2012, 24(1):32-36.

[10] 李峰, 李虎成, 於益军, 等. 基于并行计算和数据复用的快速静态安全校核技术[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(14):75-80.
LI Feng, LI Hucheng, YU Yijun, et al. Fast computing technologies for static security checking based on parallel computation and data reuse [J]. Automation of Electric Power System, 2013, 37(14):75-80.

[11] 王兴志, 严正, 沈沉, 等. 基于面向服务架构的调度计划安全校核网格计算[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24):90-95.
WANG Xingzhi, YAN Zheng, SHEN Chen, et al. Grid computing of operation scheduling with security constraint based on SOA [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24):90-95.

[12] 傅旭. 电力系统静态安全混合控制方法[J]. 电力自动化设备, 2017(1):124-130.
FU Xu. Hybrid control of power system static security [J].

- Electric Power Automation Equipment, 2017(1):124-130.
- [13] 傅旭, 王锡凡, 张钦, 等. 电力系统静态安全分析中的校正控制算法[J]. 中国电力, 2007, 40(11):33-37.
FU Xu, WANG Xifan, ZHANG Qin, et al. New approach of corrective for static security analysis in power systems [J]. Electric Power, 2007, 40(11):33-37.
- [14] 王孟夏, 韩学山. 基于电热协调的电网安全校正控制方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12):32-36.
WANG Mengxia, HAN Xueshan. Realization of security corrective control considering electro-thermal coordination[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12):32-36.
- [15] 王广民, 万仲平, 王先甲. 二(双)层规划综述[J]. 数学进展, 2007, 36(5):513-529.
WANG Guangmin, WANG Zhongping, WANG Xianjia. Bibliography on bilevel programming [J]. Advances in Mathematics, 2007, 36(5):513-529.
- [16] 聂明林, 汪枫, 陈春, 等. 考虑可靠性的配电网网架多目标规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(1):10-16.
NIE Minglin, WANG Feng, CHEN Chun, et al. Multi-objective distribution network planning considering reliability [J]. Proceeding of the CSU-EPSA, 2016, 28(1):10-16.
- [17] 刘东奇, 王耀南, 袁小芳. 电动汽车充放电与风力/火力发电系统的协同优化运行[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3):18-26.
LIU Dongqi, WANG Yaonan, YUAN Xiaofang. Cooperative dispatch of large scale electric vehicles with wind-thermal power considering generating system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3):18-26.
- [18] 王一哲, 汤涌, 董朝阳. 电力市场环境下输电网混合性规划模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13):35-40.
WANG Yizhe, TANG Yong, DONG Zhaoyang. Hybrid criterion planning model for transmission system planning under electricity market environment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13):35-40.
- [19] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京:清华大学出版社, 1996.
ZHANG Boming, CHEN Shunsun. Advanced power network analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.

作者简介:



刘国静

刘国静(1988—),男,博士,研究方向为电力系统调度运行(E-mail:liu.guojing@qq.com);

李娟(1987—),女,博士,研究方向为配电网自动化(E-mail:lijuandan@163.com);

谈健(1974—),男,硕士,高级工程师,从事电力系统综合规划研究工作。

***N-K* Fault Analysis Method for Power Systems Based on Two-level Programming**

LIU Guojing¹, LI Juan², TAN Jian¹, LI Hu¹, SHI Jing¹, HU Xiaoyan¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Economic Research Institute, Nanjing 210008, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: The traditional *N-K* fault analysis of power system generally adopts the method based on combination and traversal, which has the disadvantages of a large number of fault combinations and low computational efficiency. In this paper, the two-level programming model of this kind of problem is established, which can seek the fault combination causing the maximum amount of grid load through the way of optimization. Aiming at the fault combination determined by the upper-level problem, the lower-level problem simulates the operation of the grid after the accident, to meet the various types of power system operation constraints, by adjusting the generator output power to minimize the amount of grid load. Furtherly the flowchart of genetic algorithm to solve this problem is given. Finally, the validity of the model is verified through IEEE14 node and IEEE118 node example system.

Key words: *N-K* fault analysis; two-level programming; power system plan and operation; genetic algorithm

(编辑 钱悦)