

编制配电网检修计划的辅助方法及仿真

钟俊毅, 吕飞鹏, 陈厚思

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:在制定检修计划时检修设备对电网所造成的影响分析目前停留在定性分析上,很大程度上依赖于检修专工的工作经验。因此需要一种辅助工具,以量化检修对电网造成的影响,并制定出更加合理的检修计划。提出的辅助工具的初步模型,先根据各种影响因素和约束条件,形成初始检修计划。考虑因设备检修造成的负荷转移的影响,对检修计划进一步优化,同时引入了一种新的分割网络的方法——注入电流分割法。通过该方法确定了满足电压约束条件的运行方式,同时为以后计算开关操作费用、系统网损值提供网络拓扑。

关键词:配电网;检修计划;配电网潮流;负荷转移;注入电流

Abstract: At present, the analysis on the impact of device maintenance on power grid largely rest on qualitative ones and, in most degree, depend upon the experiences of maintenance technicians while making maintenance schedule. Therefore, a supplementary tool is needed to carry out the quantitative analysis and make out the more practicable maintenance schedules. An initial model of the supplementary tool is presented. Firstly, based on all kinds of influencing factors and constraint conditions, an initial maintenance schedule is made. Then considering the affection of load transfer due to device maintenance, the maintenance schedule is further optimized. Meanwhile, a new method of partitioning the network, namely, a splitting method of injection current, is proposed. The operation modes are determined that can satisfy the voltage constraint conditions and be guaranteed to make assessment and optimization of the maintenance schedule for the further calculation of the switch operation expense and power network loss.

Key words: distribution network; maintenance schedule; distribution power flow; load transfer; injection current

中图分类号:TM755 文献标识码:A 文章编号:1003-6954(2008)03-0070-05

配电网检修是配电网运行中的重要工作,安排得当的检修计划可以提高供电可靠性、降低网损。目前,检修计划优化问题的研究,主要集中在发电机组和输电线路检修上。

在发电机组检修研究方面以设备状态为基础的智能发电检修计划研究^{[1]~[2]}和电力市场下发电机组检修^{[3]~[4]},主要是根据传统调度和电力市场下的不同,建立最小收益损失目标函数来权衡机组检修带来的损失。考虑到发电机组和输电网络之间密切的联系,建立了发输电联合检修^{[5]~[7]}。输电线路的检修优化有不少借用了发电机组检修优化的方法^[8],而对于配电网结构复杂、检修任务多和不能忽略电阻R的特点。因此在处理优化问题上很难借鉴机组检修优化的方法。在考虑检修计划优化问题时不仅要考虑不同检修任务之间的互斥性与协调性,还要考虑安全约束和检修公司的检修能力,还涉及优化负荷转移路径、减少开关动作次数等配电网重构问题^[9]。

1 配电网检修计划制定

配电网检修计划优化问题是以设备检修和负荷转移路径为控制变量的多目标多约束的优化问题。

在制定检修计划时,先考虑网络结构和检修规程本身确定的各种初始约束条件^[10]。

1) 检修规程约束

$$x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \quad (1)$$

式中: x_{\min} 和 x_{\max} 分别为规程规定的设备最早和迟检修时间。

2) 同时检修约束

对于会导致同一负荷区停电的两个设备,应将其安排在同时检修,以避免重复停电或负荷转移。数学描述为:

$$x_i \leq x_j \quad (2)$$

式中: x_i 和 x_j 分别为第*i*个和第*j*个设备的开始检修时间。

3) 互斥检修约束

对于会造成电气永久孤岛的设备,应错开其同时检修的时间。数学描述为:

$$x_j \geq x_i + D_i \quad (3)$$

式中: D_i 为第 i 个设备检修持续时间。

4) 检修资源约束

$$\sum_{i=1}^N u_i \leq M_k$$

式中: u_i 取值为 0 和 1, 其中 0 表示 i 设备在第 k 时段正常运行, 1 表示 i 设备在第 k 时段检修; N 为待检修设备总数; M_k 为在第 k 时段能同时检修的设备总数。

5) 检修窗口约束

由于网络和负荷情况影响,有些设备只能在固定时间内安排检修。数学描述为:

$$x_i + D_i \in X_i \quad (5)$$

式中: X_i 为 i 设备不能检修的时间集合。

根据上面的各种约束制定出初始的检修计划,该计划不一定是最优的,同时也不是唯一的。

2 负荷转移路径优化问题

在确定初始检修计划以后,需要对该计划的运行可靠性和经济性进行分析优化。主要是由于停电区域负荷转移造成的网损和负荷均衡化以及电流电压约束和潮流约束。

2.1 优化目标函数的建立

用数学描述为:

$$F = \frac{w_s f_s + w_w f_w + w_j f_k}{w_c \times 100} \quad (6)$$

式中: F 为优化目标综合值; f_s 为售电损失; f_w 为网损; f_k 为开关操作费用; c 为负荷均衡化程度; w_s, w_w, w_k, w_j 为权重系数。

2.2 约束条件的判断

在优化负荷转移路径计算中,各节点满足电流电压约束和线路上潮流越限约束^[11]。

电压越限约束:

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (7)$$

式中: $V_i^{\min}, V_i^{\max}, V_i$ 分别为转移负荷后各节点的电压上下限和电压。

电流越限约束:

$$I_i^{\min} \leq I_i \leq I_i^{\max}$$

式中: $I_i^{\min}, I_i^{\max}, I_i$ 分别为转移负荷后各节点的

电流上下限和电流。

潮流越限约束:

$$|S_l| \leq S_l^{\max} \quad (9)$$

式中: S_l 为线路 l 的潮流; S_l^{\max} 为线路 l 允许通过的潮流限值。

3 算法的介绍

3.1 配电网潮流计算

文献[12]的方法,此方法根据牛顿法的基本原理,从复功率方程出发,对功率迭代方程中与电压相关控制项进行初值替代,得到只与节点功率和线路阻抗相关的常 Jacobian 矩阵。

具体计算公式如下:

修正方程:

$$\begin{bmatrix} Im[1] \\ Re[1] \\ \vdots \\ Im[n] \\ Re[n] \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} B_{11} - Q_{1s} & G_{11} - P_{1s} & \cdots & B_{1n} & G_{1n} \\ G_{11} + P_{1s} & -B_{11} - Q_{1s} & \cdots & G_{1n} & -B_{1n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ B_{n1} & G_{n1} & \cdots & B_{nn} - Q_{ns} & G_{nn} - P_{ns} \\ G_{n1} & -B_{n1} & \cdots & G_{nn} + P_{ns} & -B_{nn} - Q_{ns} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \Delta f_1 \\ \vdots \\ \Delta e_n \\ \Delta f_n \end{bmatrix}$$

$$\text{其中 } I_m[i] = \frac{\Delta Q_i e_i - \Delta P_i f_i}{V_i^2}$$

$$R_e[i] = -\frac{\Delta P_i e_i + \Delta Q_i f_i}{V_i^2}$$

收敛条件 $\max|\Delta P, \Delta Q| < \epsilon$ 取 $\epsilon = 10^{-5}$

3.2 注入电流分割法

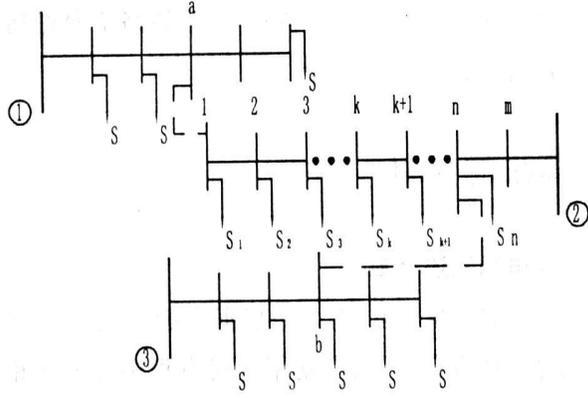
由于设备检修造成部分线路不得通过联络开关连接到其他供电区域。有些电气孤岛有两个或两个以上的联络开关可以动作,而合上任何一个开关其形成的网络都有电压越限的情况,因此可以考虑两个联络开关都合上,然后将此电气孤岛进行分割。不考虑合上两个以上的联络开关,如果合上三个联络开关,就要跳两个分段开关,因此增加了开关损耗费用。

公式推导:

由电压幅值降落公式^[13]

$$\Delta V = \frac{PR + QX}{V} \quad (11)$$

可知,电压幅值降与节点负荷、线路阻抗成正比与端电压成反比。



图中①②③表示电源点, Bus 编号用数字和字母表示。

图1 简单配电网接线图

在图1中当断开 $n-m$ 之间的分段开关后形成节点号为 $1, 2, 3, \dots, k, \dots, n$ 的孤岛。

设分割点编号为 f , 如分割点在 Bus-1 和 Bus-2 之间(以1到2为正方向), 则割点编号 $f=1$ 。因为既然要分割网络, 则孤岛不是由一个电源供电, 故 $1 \leq f < n$ 。

将各个节点的负荷等效为注入电流流入各节点 Bus。则 Bus-a 和 Bus-1 之间的电压降为:

$$\Delta V_{a-1} = Z_{a-1} \cdot \sum_{j=1}^n I_j \quad (12)$$

同理可得到 $V_{1-2} \dots \Delta V_{(f-1)-f}$ 的电压降。累加得从 a 点到断开点 f 的电压降:

$$\Delta V_a = \sum_{i=1}^f Z_i \left(\sum_{j=1}^n I_j \right) \quad (13)$$

同样可以得到从 b 点到断开点 f 的电压降:

$$\Delta V_b = \sum_{i=f+1}^n Z_{i+1} \cdot \left[\left(I_t - \sum_{j=1}^f I_j \right) - \sum_{j=i+1}^n I_j \right] \quad (14)$$

其中: $I_t = \sum_{i=1}^n I_i, \dot{I}_t = \frac{S_i}{V_i}$

由于各点电压未知, 这里只是对于分割的估计值。考虑到电压降与端点电压成反比, V_i 两个端点电压分别带入公式(13)和(14)可得:

$$\Delta V_a = \sum_{i=1}^f Z_i \cdot \left[\sum_{j=1}^n \left(\frac{\dot{S}_j}{\dot{V}_a} \right) \right] \quad (15)$$

$$\Delta V_b = \sum_{i=f+1}^n I_{i+1} \cdot \left[\left[L - \sum_{j=1}^f \left(\frac{\dot{S}_j}{\dot{V}_b} \right) - \sum_{j=i+1}^n \left(\frac{\dot{S}_j}{\dot{V}_b} \right) \right] \right] \quad (16)$$

其中: $I_t = \sum_{i=1}^n I_i \left(\frac{\dot{S}_i}{\dot{V}_b} \right)$

因为公式中用端电压代替各 Bus 电压, 所以得到

的 ΔV_a 和 ΔV_b 并不准确。但在分割网络时可以用来确定 f 的大概值。

$$I_f = \frac{|V_a| - |\Delta V_a|}{|V_b| - |\Delta V_b|} \quad (17)$$

由公式(17)得出的不同分割点对应的 L 值, 取更接近于1的 L 值对应的 f 值, 即为可能的分割点。

3.3 优化具体流程

算法搜索采用禁忌搜索^[14]的方法。即先确定一个孤岛所有联络开关对侧的节点电压, 选取电压幅值最高的联络节点合上联络开关, 再计算各点的电压看是否满足电压约束条件。如果满足即退出, 不满足约束则合上下一个联络开关。当所有联络开关都不满足约束时, 采用上面3.2介绍的方法分割孤岛。当完成一个孤岛以后, 再进行第二个孤岛的计算, 同时每当合上一个联络开关都要验证上一个已完成的孤岛电压是否受超限, 如上一个已完成的孤岛电压超限, 即退回本一步合上的开关, 重新选择一个联络开关合上或重新分割孤岛。如果所有开关都不满足要求, 即退回到上一个孤岛的计算, 重新确定网络的运行方式。

具体流程如图2:

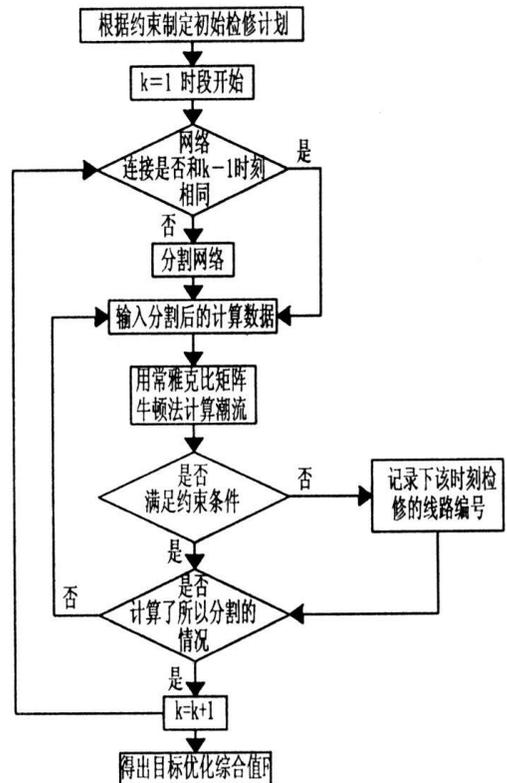


图2 检修计划优化流程图

4 算例仿真

对下面 IEEE94 节点^[15]的配电网进行仿真分析。

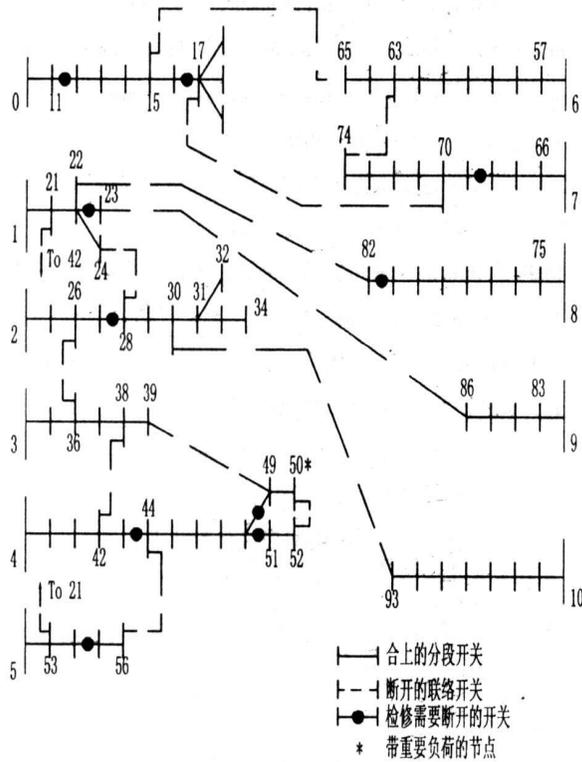


图3 IEEE 94 节点配电网接线图

由于在 IEEE94 节点文献本身是一个网络重构问题,因此 20, 81, 82, 93 节点电压已经越限, 所以修改部分节点的负荷数据。修改如下:

16 节点 $100+800j$ 改为 $100+50j$

17 节点 $400+320j$ 改为 $300+220j$

81 节点 $2000+1500j$ 改为 $1000+750j$

89 节点 $2000+1300j$ 改为 $1000+650j$

因检修需要断开的分段开关有 11-12、16-17、22-23、27-28、43-44、48-49、48-51、54-55、68-69、81-82。

4.1 编制检修计划

检修计划编制约束条件:

1) 检修规程约束

22-23、27-28、68-69 按定期检修的要求必须首先安排检修。

2) 同时检修约束

11-12、16-17 会同时 Bus-18、Bus-19、Bus-20 停电。

43-44、48-49 会同时 Bus-49、Bus-50 停电。

43-44、48-51 会同时 Bus-51、Bus-52 停电。

3) 互斥检修约束

对于 Bus-50 的重要负荷。53-54 和 43-44 互斥、48-49 和 48-51 互斥。

4) 检修资源约束 $M=2$

5) 检修窗口约束

81-82 由于检修设备的约束不能在 IV、III 时段安排检修。

11-12 由于检修设备的约束不能在 V、VI 安排时段。

按上述约束条件, 制定出检修计划如表 1。

表 1 编制的检修计划

时段	I	II	III	IV	V
所断开	22-23	68-69	11-12	43-44	48-51
的开关	27-28	81-82	16-17	48-49	54-55

4.2 对检修计划进行优化

表 2 I 时段检修情况

时段	$ V_x $	是否越限	L	分割点	是否越限
I	$ V_{24} =0.9828$	Y	$L1=1.0332$	29-30	Y
	$ V_{93} =0.9566$	Y	$L2=1.0159$		

注: $|V_x|$ 一与孤岛相连的节点电压幅值, 下标为节点号

由表 2 知, I 时段 27-28 断开时, 检修应改到负荷低时进行检修或停掉部分负荷。

表 3 调整后的检修计划

时段	I	II	III	IV	V
所断开	22-23	68-69	11-12	43-44	48-51
的开关	81-82	16-17	48-49	54-55	

表 4 调整后 I、II、III 时段检修情况

时段	$ V_x $	是否越限	L	分割点	是否越限	
I	$ V_{86} =0.9809$	N	—	—	—	
	$ V_{22} =0.9839$	N	—	—	—	
II	$ V_{17} =0.9533$	Y	$L1=0.9968$	$L3=1.0122$	70-71	Y
	$ V_{63} =0.9651$	Y	$L2=1.0090$	$L4=1.0099$	71-72	N
III	$ V_{65} =0.9640$	Y	—	—	—	
	$ V_{70} =0.9705$	Y	—	—	—	

由表4知,Ⅲ时段16—17断开时,检修应安排在负荷低时或停掉18,19,20负荷。11—12断开时,检修应安排在负荷低时进行或停掉部分负荷。

表5 IV、V时段检修情况

时段	$ V_x $	是否越限	L	分割点	是否越限
IV	$ V_{56} =0.9934$	N	—	—	—
	$ V_{39} =0.9773$	N	—	—	—
V	$ V_{50} =0.9575$	N	—	—	—
	$ V_{44} =0.9675$	Y	—	—	—

由表5知,V时段54—55断开时,检修应安排在负荷低时段检修。

5 结论

通过上面的分析,可以逐步得到在满足可靠性前提下较优的检修计划及运行方式。再利用网络拓扑结构和2.1中的公式计算出优化目标综合值F。除了建立检修计划优化的模型外,还提出了具体优化方法,并针对网络检修时的具体网络情况进行综合分析,得出定量的分析结果,为人工制定检修计划提供了参考依据,降低了人工编制检修计划时的盲目性。通过用C++软件编程辅助得出了编制IEEE94节点检修计划仿真结果。存在的不足,是采取的搜索方法并不能保证全局最优。

参考文献

- [1] Ling Wang, Jian Chu, Weijie Mao and Yongfeng Fu. Advanced Maintenance Strategy for Power Plants Introducing Intelligent Maintenance System [C]. Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 21—23, 2006, Dalian, China, 7444~7448.
- [2] 陈竟成,李小彬,等.检修计划新模型与算法的研究[J].电网技术,1997,21(11):66~69.
- [3] 孟凡强,许克明,王亮,等.电力市场下的发电机组状态检修[J].电力系统自动化,2004,28(17):41~44.
- [4] 王健,文福栓,杨仁刚,等.电力市场环境下的发电机组的最优检修策略初探[J].电网技术,2004,28(10):22~27.
- [5] T. Sawa, T. Furukawa, M. Nomoto, et al. Automatic Scheduling Method Using Tabu Search for Maintenance Outage Tasks of Transmission and Substation System with Network Constraints [C]. Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, IEEE, Volume 2, 31 Jan—4 Feb 1999 Page(s): 895 ~ 900 vol. 2
- [6] M. K. C. Marwali, S. M. Shahidehpour, et al. Integrated generation and transmission maintenance scheduling with network constraints [J]. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, August 1998, 1063~1068.
- [7] 丁明,冯永青.发输电设备联合检修安排模型及算法研究[J].中国电机工程学报,2004,24(5):18~23.
- [8] 林海华,李卫东.输电线路检修计划的优化算法综述[J].继电器,2005,33(14):87~91.
- [9] 刘蔚,韩祯祥.基于最优流法和遗传算法的配电网重构[J].电网技术,2004,28(19):29~33.
- [10] 张粒子,黄弦超,等.配电网检修计划优化模型设计[J].电力系统自动化,2005,29(21):50~53.
- [11] 黄弦超,张粒子,等.配电网检修计划优化模型[J].电力系统自动化,2007,31(1):33~37.
- [12] 索南加乐,李怀强,等.一种新的配网潮流常 Jacobian 牛顿算法[J].西安交通大学学报,2002,36(12):1222~1226.
- [13] 何仰赞,温增银,等.电力系统分析[M].华中理工大学出版社.
- [14] Nara K, Hayashi Y, et al. A tabu search algorithm for determining distribution tie lines. Proceedings of 1996 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems (ISAP '96). Orlando, USA, 1996, 226~270.
- [15] Ching-Tzong Su, Chu-Sheng Lee. Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution [J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, Vol. 18, No. 3, July 2003, 1022~270.

作者简介

钟俊毅(1979—),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护研究。

吕飞鹏(1968—),男,博士,教授,从事电力系统继电保护和故障信息处理智能系统研究。

(收稿日期:2008—02—17)

深切哀悼“5.12”汶川大地震遇难同胞