

考虑 N-1 安全性的输电网络启发式扩展规划方法

秦茹静¹, 王淳¹, 苏慧玲¹, 张忠诚²

(1. 南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 广东电网公司肇庆高要供电局, 广东 肇庆 521600)

摘要: 在输电网络规划中, 数学优化方法尽管能得到数学上优化的解, 但是不得不对各种约束进行简化构造出可计算的模型, 特别是 N-1 检验条件无法直接列入模型, 也不一定保证其最优解在实际工程中的实用价值。因此提出了一种考虑 N-1 安全性的输电网络启发式规划方法, 该方法将启发式方法和 N-1 检验相结合, 通过采用直流潮流模型对网络进行减线及加线分析, 自动地变换网络拓扑结构, 进行两步扩展后生成最终的规划网络。具有简单快速、直观的优点, 最后通过一个算例进行验证, 结果表明所提方法能够得到满足实际工程需要的电网规划方案。

关键词: 电网规划; 启发式方法; 有效性指标; N-1 检验

A heuristic method for transmission network expansion planning considering N-1 security

QIN Ru-jing¹, WANG Chun¹, SU Hui-ling¹, ZHANG Zhong-cheng²

(1. School of Information Engineering of Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. Zhaoqing Gaoyao Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Cooperation, Zhaoqing 521600, China)

Abstract: In the transmission network planning, even though the mathematic method can get the optimal result, it needs to construct calculable model considering all constraints, especially the N-1 safety analysis can't be included in the model and the optimal result cannot always ensure the practicability in the practical engineering. So in this paper, a heuristic method of transmission network planning which takes into account N-1 safety analysis is presented. It combines heuristic method and N-1 safety analysis, adopts DC Power Flow model to add and delete line to transform network configuration automatically and creates the final network through two-step expansion planning. It is simple and rapid. A sample system is used to testify this method and the result shows it can give a planning scheme that can meet practical engineering needs.

Key words: network planning; heuristic method; validity index; N-1 safety analysis

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)13-0030-03

0 引言

电网规划的任务是在保证电力安全可靠地输送到负荷中心的前提下, 使电网建设和运行的费用最小。电网优化规划的方法可分为两大类: 数学优化方法和启发式方法^[1]。前者完全按照某种数学优化模式构造电网规划的目标函数和约束条件, 然后求解。由于电网优化规划问题的复杂性, 采用数学优化时不得不对电网的某些约束进行简化^[2-4], 以构造出在计算上可行的模型, 特别是 N-1 检验条件无法直接列入模型^[5], 也不一定能保证其最优解在实际工程中的实用价值。启发式方法虽不能保证结果在数学上最优, 但能对电网做较准确的数学模拟, 可以得到符合工程实际的较优解。电网规划方案既要

满足正常运行时的技术条件要求^[6], 同时又要满足某些异常情况下网络安全运行要求。目前常见的网络安全运行要求是满足 N-1 检验。

本文基于启发式方法中的逐步倒推法, 并提出将 N-1 解列检验加入到减线分析中, 建立了满足正常运行的优化网络方案, 此方案不仅能满足正常运行下任何一条线路不过负荷, 而且还可保证任何一条线路停运时系统不解列。然后在此基础上依据灵敏度分析进行过负荷检验扩展网络, 直到满足 N-1 检验要求为止。进行两步规划后所得网络能保证任何一条线路停运时系统不解列, 且任何一条线路不过负荷。

1 电网规划的数学模型

本文提出的考虑 N-1 安全性的输电网络启发式扩展规划方法由两步构成。① 采用改进的逐步倒推

法形成一个同时满足 N 安全约束及 N-1 不解列的规划方案; ② 在①的基础上, 采用加线模型最终形成一个满足 N-1 安全约束的方案。其中减线分析是最基本的一个环节。

1.1 减线模型

设原输电线路网络的节点阻抗矩阵为 X , 状态向量为 θ , 支路 k 两端的节点为 i, j , 这里的支路是指两节点间的各线路的并联, 线路是支路中的一个元件。当支路 k 减少一条电抗为 x_k 的线路时, 形成新的网络, 设新网络的节点阻抗矩阵为 X' , 状态向量为 θ' , 则新、旧网络之间节点阻抗矩阵和状态向量有如下关系:

$$X' = X + \beta_k X e_k e_k^T X \quad (1)$$

$$\theta' = \theta + \Delta \theta = \theta + \beta_k X e_k \phi_k \quad (2)$$

$$\beta_k = \frac{-1}{-x_k + \chi_k} \quad (3)$$

$$\chi_k = e_k^T X e_k = X_{ii} + X_{jj} - 2X_{ij} \quad (4)$$

其中: $\phi_k = e_k^T \theta$ 为去除线路前支路 k 两端电压的相角差, 当 $-x_k + \chi_k$ 为零时系统解列, 应用减线模型可以方便地找出引起系统解列的线路。当进行加线分析时只要将 $-x_k$ 换为 x_k 即可, 以上公式同样适用。

1.2 改进的逐步倒推法

改进的逐步倒推法的方案形成策略为: 首先根据水平年的原始数据构成一个虚拟网络, 该网络包含系统现有网络、所有孤立节点和所有待选线路, 这样的虚拟网络是一个连通的、冗余度很高的但不经济的网络。然后对虚拟网络进行潮流分析, 比较各待选线路在系统中的作用和有效性, 逐步去除有效性低的线路, 在每去除一条线路时都进行 N-1 解列校验, 直到网络没有冗余线路为止。这样得到的是一个同时满足 N 安全约束及 N-1 不解列的规划方案。与文献[1]中的逐步倒推法不同, 改进的逐步倒推法将 N-1 解列校验纳入了网络的减线可行性分析中。文中采用的线路有效性指标^[1]为:

$$E_l = \frac{|P_l|}{C_l^2} \quad (5)$$

式中: P_l 为待选线路 l 上潮流, C_l 为待选线路 l 建设投资。

1.3 满足 N-1 安全的加线模型

在找到同时满足 N 安全约束及 N-1 不解列的规划方案后, 再通过下面迭代步骤形成满足 N-1 安全性要求的网络方案。

1) 对现有网络进行 N-1 分析, 得到所有 N-1 故障下的线路总过负荷值:

$$\phi = \sum_{i \in M} \sum_{l \in M_{oi}} |P_l - P_l| \quad (6)$$

式中: M 为所有支路集; M_{oi} 为支路 i 单线开断时过负荷线路集。若 ϕ 为 0, 则输出最终规划网络方案。

2) 在候选线路集中任取一线路加入网络后, 再进行 N-1 分析, 得到新线加上后的 N-1 故障总过负荷值 ϕ' 。

3) 按下面公式计算各待选线路的有效性指标:

$$E_l' = \frac{\phi - \phi'}{C_l} \quad (7)$$

4) 将 E_l' 最大的待选线路加入网络, 修正状态向量, 转向步骤 1)。

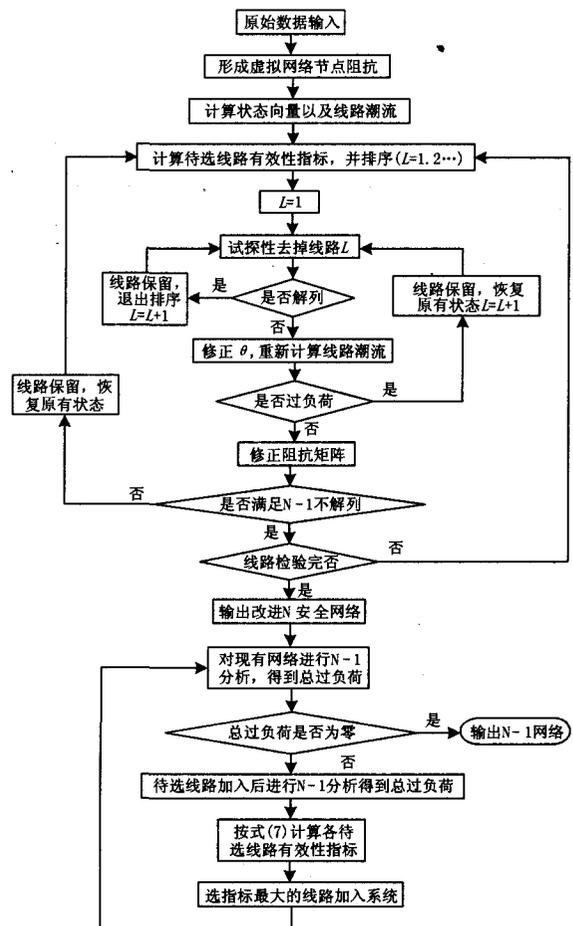


图 1 考虑 N-1 安全检验的电网扩展规划流程图
Fig.1 Flow chart of power network expansion planning considering N-1 security

表 1 最终规划结果
Tab.1 Result of final planning

支路	原有线路	待选线路	规划网络结果	
			改进 N	N-1
1-2	1	1	0	1
1-11	0	2	1	0
2-3	1	1	0	0
3-4	1	1	0	0
3-7	1	1	0	0
4-7	0	1	0	0
4-16	0	3	1	0
5-6	1	1	0	0
5-11	0	2	1	0
5-12	0	2	1	1
6-7	1	1	0	0
6-13	0	2	0	0
6-14	0	2	2	0
7-8	1	2	1	0
7-9	0	2	0	0
7-13	0	2	1	0
7-15	0	2	0	1
8-9	1	3	1	1
9-10	1	3	2	0
9-16	0	2	0	0
10-18	0	2	1	0
11-12	0	2	0	0
11-13	0	2	0	0
12-13	0	2	1	0
14-15	0	2	2	0
16-17	0	2	1	1
17-18	0	3	2	1

2 电网扩展规划的计算流程

考虑 N-1 安全检验的输电网扩展规划流程如图 1 所示。图中按上述思路进行规划,依次输出改进的 N 安全网络和满足 N-1 检验的优化网络。在第一步形成改进的 N 安全网络流程中,对待选线路按其有效性指标从小到大排序是为了首先分析和去除有效性最低的线路,试探性地去除线路时,以 $-x_k + \chi_k$ 是否为零来判断去除此线路后系统是否解列,如果解列则此线路不能去除,且退出排序,如果不解列则根据式(2)直接修正状态向量 θ ,根据直流潮流模型计算各线路潮流以检验是否有过负荷,若无过负荷则此线路可以去除,此时因为新的状态向量和线路潮流已经求出,只需根据式(1)修正节点阻抗矩阵 X 即可,如果线路不能去除,则已修正的状态向量需恢复为开断前的值。与传统的逐步倒推法不同^[7],此时线路去除与否,还需要加入一个语句,判断是否满足 N-1 不解列的要求,如果

满足才能去除该线路,依次进行下一条线路的检验,否则,此线不能去除,阻抗矩阵、相角矩阵恢复原来状态。在得到改进 N 安全网络后,通过 N-1 过负荷的加线模型迭代形成满足安全性要求的网络方案。

3 算例与结果分析

采用文献[7]中的 18 节点系统作为规划算例,具体的网络结构和系统参数请参见文献[7]。该系统现有 10 个节点,9 条线路,在未来某水平年,系统将增加为 18 个节点,有 27 个走廊可扩建线路,共有 52 条线路待选。

表 1 中,第 4 列的数据表示考虑 N-1 解列的 N 安全下的扩展线路,第 5 列的数据表示满足 N-1 过负荷检验需增加的扩展线路,由现有网络加上改进 N 扩展线路以及 N-1 扩展线路就得到最终规划方案。与文献[1]中单纯采用逐步倒推法得出的 N 安全规划网络相比较,考虑了 N-1 解列的 N 安全网络,线路有所增加,系统联系更加紧密,安全性较之有很大提高,保证断开任意一条线路时系统不会解列。考虑 N-1 过负荷检验后的网架安全性得到进一步加强。

4 结论

数学优化方法尽管能得到数学上优化的解,但是在电网规划中不得不对各种约束进行简化构造出可计算的模型,特别是 N-1 检验条件无法直接列入模型,也不一定保证其最优解在实际工程中的实用价值。本文提出的改进逐步倒推法和 N-1 安全校验相结合的方法能得到满足实际工程需要的电网扩展规划方案,且具有简单快速、直观的优点。可以在实际电网规划中得到进一步的推广。

参考文献

- [1] 王锡凡. 电力系统规划基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
WANG Xi-fan. Foundation of Power System Planning[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1994.
- [2] 王秀丽. 遗传算法在输电系统规划中的应用[J]. 西安交通大学学报, 1995, (8): 12-16.
WANG Xiu-li. Transmission System Planning with Genetic Algorithm[J]. Journal of Xian Jiaotong University, 1995, (8): 12-16.
- [3] 陈根军, 王磊. 基于蚁群最优的输电网络扩展规划[J]. 电网技术, 2001, 25(6): 21-24.

网的基础之上,建立了较为完备的规划模型,其中计及了规划工程中的通道因素影响。对于规划模型的求解,考虑到各种优化方法的优缺点和配电网及通道自身的实际特点,本文使用最短路径算法得到初始方案,并用遗传算法进行优化,得到了令人满意的效果。通过算例分析,本文采用 GIS 空间数据库开发的思路,将整个配电网和地理环境能够有效地结合起来,实用化更强,对配网电缆通道建设也有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 谢敏,敬东.遗传算法在配电网规划中的应用[J].电站系统工程,2002,18(1):30-32.
XIE Min, JING Dong. Genetic Algorithms Applied in Planning of Distribution Network[J]. Power System Engineering, 2002, 18(1): 30-32.
- [2] 王春生,赵凯,彭建春.基于地理信息系统和遗传算法的配电网优化规划[J].电力系统自动化,2000,24(14):48-51.
WANG Chun-sheng, ZHAO Kai, PENG Jian-chun. GIS Based Optimal Planning for Distribution System Using GA[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(14): 48-51.
- [3] 王成山,王赛一.基于空间 GIS 的城市中压配电网智能规划(一):辐射接线模式的自动布局[J].电力系统自动化,2004,28(5):45-50.
WANG Cheng-shan, WANG Sai-yi. The Intelligent Planning of Urban Mid-voltage Distribution Network Based on Spatial GIS: Part One Automatic Routing of Radial Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 45-50.
- [4] 史传卿.电力电缆讲座—第二讲 电缆线路设计与敷设施工[J].供用电,2001,18(4):53-56.
SHI Chuan-qing. Lecture on Power Cable: Part II Design and Laying of Cable Lines[J]. Distribution and Utilization, 2001, 18(4): 53-56.
- [5] 王成山,王赛一,葛少云等.中压配电网不同接线模式经济性和可靠性分析[J].电力系统自动化,2002,26(24):34-39.
WANG Cheng-shan, WANG Sai-yi, GE Shao-yun, etc. Economy and Reliability Analysis of Different Connection Modes in MV Distribution Networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 34-39.
- [6] 康庆平,卢锦玲,杨国旺.确定城市 10 kV 配电网线路最优分段数的一种方法[J].电力系统自动化,2000,24(13):57-59.
KANG Qing-ping, LU Jin-ling, YANG Guo-wang. A Method for Optimizing the Number of Sections of Feeder on 10kV Distribution Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(13): 57-59.
- 收稿日期:2006-12-28 修回日期:2007-03-09
作者简介:
朱涛(1981-),男,硕士研究生,主要从事城市配电网的评估、规划等方面的研究工作;E-mail: zhutao_tju@yahoo.com.cn
肖峻(1971-),男,博士,副教授,硕士生导师,从事城市电网规划、评估和配电自动化方面的研究与应用工作;
王成山(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统安全性分析、电网规划和配电系统自动化等方面的研究工作。
- (上接第 32 页 continued from page 32)
- CHEN Gen-jun, WANG Lei. An Ant Colony Potimization Method for Transmission Network Expansion Planning[J]. Power System Technology, 2001, 25(6): 21-24.
- [4] 黄良宝,单渊达.电力系统规划Hopfield优化模型的模拟退火算法[J].东南大学学报,1996,(2):31-37.
HUANG Liang-bao, SHAN Yuan-da. Incorporating Simulated Annealing Algorithm into Hopfield Models for Power System Expansion Planning[J]. Journal of Southeast China University, 1996 (02): 31-37.
- [5] 康庆平,庄丽晖.一个实用的启发式电网优化规划方[J].电网技术,1993,17(3):51-55.
KANG Qing-ping, ZHUANG Li-hui. Optimum Planning of Transmission Network: a Practical Heuristic Method[J]. Power System Technology, 1993, 17(3): 51-55.
- [6] 孙洪波.电力网络规划[M].重庆:重庆大学出版社,1996.
SUN Hong-bo. Power System Planning[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1996.
- [7] 程浩忠.电力网络规划的方法和应用[M].上海:上海科学技术出版社,2002.
CHENG Hao-zhong. The Method and Application of Power Network Planning[J]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2002.
- [8] 清华大学,浙江大学.电力系统计算[M].北京:水利电力出版社,1978.
Tsinghua University and Zhejiang University. Power System Calculation[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1978.
- 收稿日期:2007-01-07; 修回日期:2007-03-11
作者简介:
秦茹静(1981-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统规划;E-mail: vivian_qinruijing@163.com
王淳(1962-),男,博士,副教授,从事电力系统规划;
苏慧玲(1983-),女,硕士研究生,研究方向为发电系统可靠性。