一种确定无功源最佳配置地点的新方法

胡彩娥,杨仁刚

(中国农业大学信息与电气工程学院,北京 100083)

摘要: 将电力系统分区的思想应用于电力系统无功配置,给出了利用"电气距离"进行分区的方法,提出了结合电力系统分区与灵敏度分析来确定无功源最佳配置地点的一整套方法。该方法使无功源得到合理的配置,无功补偿分区平衡。经过仿真计算比较,表明该方法可找到电力系统无功源的最佳配置地点,并对提高电力系统的电压稳定性有很好的效果。

关键词: 电力系统分区; 电气距离; 无功配置; 电压稳定

中图分类号: TM714 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2004)21-0010-03

0 引言

电力系统的节点数比较大,它的数量级一般为10^2,如果把这些节点都作为无功补偿节点,则会使计算工作量大大增加,也不符合实际需要,因此有必要在进行无功优化规划前,确定出候选无功补偿节点,系统的经济性及电压稳定性与候选无功补偿节点的选择密切相关。

确定候选无功补偿地点的原则是:选择负荷中心、负荷较大的节点或电压较低、无功不足的节点作为无功补偿节点。

到目前为止,还没有一套有理论作指导的系统的、完整的确定候选无功补偿节点的方法。文献[1]中采用灵敏度分析法,但根据灵敏度分析法确定的无功补偿节点通常是相邻的节点,这样无功补偿节点可能都集中在一个或几个区域,这对电压控制不利。文献[2]提出了一种基于先导节点确定无功源最佳配置地点的方法。

针对灵敏度分析法的不足及电压/无功控制通常为分级/分区控制[3~6],本文提出了一种确定候选无功补偿节点的新方法,结合电力系统分区与灵敏度分析法来确定无功补偿节点。首先利用"电气距离"进行分区,分区个数等于需要配置无功源的数目;然后根据灵敏度的大小在每个区域内确定出无功补偿节点。把此方法应用于 IEEE30 节点系统中,可以看出电压质量及电压稳定性都有了提高。

1 电力系统分区

无功功率不能远距离传输,电气距离较小的各点间,无功功率供需的相互支援和调节几乎是不可能的。电力系统无功/电压问题是局部(区域性)问题,通常是某个薄弱区域由于缺少无功支持而发生电压不稳定,如果不及时采取恰当的措施,局部电压不稳定会很快发展为全局电压崩溃事故。所以把电力系统进行合理的分区,在每个分区内确定合适的无功补偿节点将会提高电力系统的电压稳定性。

最简单、直观的电力网络分区可以根据地域或电网所属的电力公司来划分,但这样的分区没有考虑系统的电气特性。研究人员提出了各种各样的电网分区方法:文献[3]在基于电气距离概念的向上分级归类的基础上,结合电力系统专家知识对自动分区进行调整和优化;文献[4]从数学优化的角度,提出了一种电网分区的优化模型,使用一种快速的现代启发式优化方法——Tabu 搜索法进行电压控制分区。本文在文献[3]的基础上提出了向上级归类的嵌套分解法。

1.1 电气距离

N 个节点潮流方程的极坐标形式为:

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j\in i} Y_j (G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j\in i} Y_j (G_{ij}\sin\theta_{ij} - B_{ij}\cos\theta_{ij}) \\ i = 1, \cdots, N \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_i、Q_i 分别为节点注入有功、无功功率; V_i 为节点 i 的电压幅值; θ_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的相角差; G_{ij}、B_{ij} 分别为导纳矩阵元素 Y_{ij} 的实、虚部; $j \in i$ 表示所有节点 j 与 i 直接相连。

采用某一节点处电压幅值变化 ΔV 对另一节点处注入无功功率变化 ΔQ 的灵敏度 S_{vq} 来表示两节点间的电气距离。

在平衡点处将系统潮流方程(1)线性化,得到:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{p\theta} & J_{pv} \\ J_{q\theta} & J_{qv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

因为电压和无功功率是强相关的,因此不考虑有功功率变化,即:$\Delta P \equiv 0$。则可以化简得到:

$$\begin{cases} \Delta Q = [J_{qv} - J_{q\theta} J_{p\theta}^{-1} J_{pv}] \Delta V = S_{qv}^{-1} \Delta V \\ \Delta V = (S_{qv})^{-1} \Delta Q = S_{vq} \Delta Q \end{cases} \tag{2}$$

式中:ΔP、ΔQ 分别为节点注入有功功率和无功功率的变化量;$\Delta\theta$、ΔV 分别为节点电压相角和幅值的变化量;J 为潮流方程的雅可比矩阵。

一般情况下当 $i \neq j$ 时,$(S_{vq})_{ij} \neq (S_{vq})_{ji}$,考虑到电气距离空间集合中两节点间电气距离的对称性,本文采用 $S_{ij} = S_{ji} = -\log_{10}((S_{vq})_{ij} \times (S_{vq})_{ji})$ 表示节点 i 与节点 j 的电气距离的大小。矩阵 S 即为电气距离矩阵,表示节点间的耦合强度。

$$S_{ij} = S_{ji} = \begin{cases} -\log_{10}((S_{vq})_{ij} \times (S_{vq})_{ji}) & i \neq j \\ 1 \end{cases} \tag{3}$$

1.2　向上级归类的嵌套分解法

电力系统分区的目标是使同一个区间内,节点间的电气距离较小;而不同区间的节点间的电气距离较大,也就是区内耦合大,而区间的耦合小。

下面是向上级归类的嵌套分解法的基本框图。

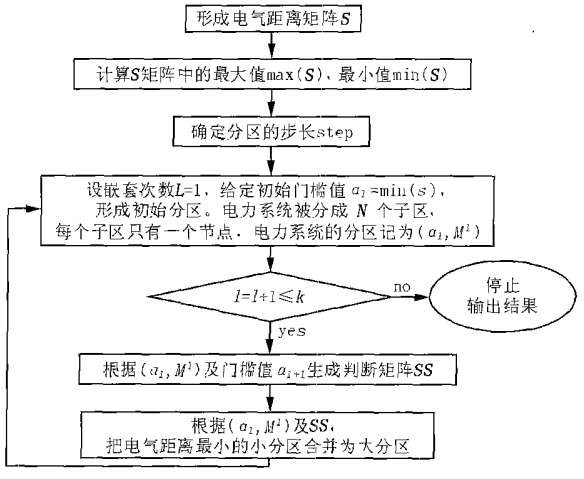

图 1　向上级归类的嵌套分解法的基本框图

Fig. 1　Block diagram of network partitioning of nest to former level

框图中:步长 $step = (\max(S) - \min(S)) / k$,$k$ 为常数;$\alpha_l = \min(S) + l * step$ 为门槛值,$l = 0, 1, \cdots, k$ 为嵌套次数;M^l 为 $(N_{pq} \times N_{pq})$ 维方阵,

$$(M^l)_{ij} = \begin{cases} order(p) & i、j \text{ 为同一个 } p \text{ 分区} \\ 0 & i、j \text{ 不在同一个分区} \end{cases}$$

$order(p)$ 为整数,用来标记分区,p 为分区个数;(α_l, M^l) 为门槛值等于 α_l 时的电力系统分区;SS 为根据 l 次分区 (α_l, M^l) 及门槛值 α_{l+1} 生成的判断矩阵。

$$SS_{ij} = \begin{cases} 0 & S_{ij} > \alpha_{l+1} \text{或} (M^l)_{ij} \neq 0 \\ S_{ij} \end{cases} \tag{4}$$

2　节点电压稳定的灵敏度排序[8]

在第 1 节中确定出电力系统分区,这一部分找出每个分区内电压稳定的灵敏度最大的节点,即为无功补偿节点。

在常规潮流方程(1)中引入负荷增长水平 λ,得到下面的扩展潮流方程:

$$\begin{cases} P_{Gi}(\lambda) - P_{Li}(\lambda) = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}) \\ Q_{Gi} - Q_{Li}(\lambda) = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij}\sin\theta_{ij} - B_{ij}\cos\theta_{ij}) \end{cases} \tag{5}$$

$$P_{Li}(\lambda) = (1 + \lambda) P_{li0}$$

$$Q_{Li}(\lambda) = (1 + \lambda) Q_{li0}$$

$$P_{Gi}(\lambda) = P_{Gi0} + \lambda\beta_i \sum_{j=1}^{N_{pq}} P_{li0}$$

$$\beta_i = \frac{P_{Gi0}}{\sum_{j=1}^{N_{pv}} P_{Gj0}}$$

$$0 \leq \lambda \leq \lambda_{cr}$$

式中:λ 为负荷增长水平;P_{li0}、Q_{li0}、P_{Gi0} 分别为 $\lambda = 0$ 时节点 i 的有功、无功负荷,发电机的出力;λ_{cr} 为电压崩溃点的负荷水平;$P_{Gi}(\lambda)$、Q_{Gi} 分别为节点 i 在负荷增长水平为 λ 时的发电机有功、无功出力;$P_{Li}(\lambda)$、$Q_{Li}(\lambda)$ 分别为节点在负荷水平为 λ 时的有功、无功负荷。

为了描述方便,把式(5)简化为式(6):

$$0 = G(V, \theta, \lambda) \tag{6}$$

对式(6)求全导数:

$$0 = \frac{\partial G}{\partial\theta}\mathrm{d}\theta/\mathrm{d}\lambda + \frac{\partial G}{\partial V}\mathrm{d}V/\mathrm{d}\lambda + \frac{\partial G}{\partial\lambda}$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} \mathrm{d}\theta/\mathrm{d}\lambda \\ \mathrm{d}V/\mathrm{d}\lambda \end{bmatrix} = -\left[\frac{\partial G}{\partial\theta}, \frac{\partial G}{\partial V}\right]^{-1} \times \frac{\partial G}{\partial\lambda} \tag{7}$$

$\left[\frac{\partial G}{\partial\theta}, \frac{\partial G}{\partial V}\right]$ 为常规潮流方程雅可比矩阵。

根据式(7)求出 $\mathrm{d}V/\mathrm{d}\lambda$,并从大到小排序,即得到电压稳定的灵敏度排序,$\mathrm{d}V/\mathrm{d}\lambda$ 最大的节点即为电压稳定最差的点。

3 算例

为了验证用本文提出的方法所确定的无功源配置地点对提高电压稳定性的作用,本文用 Matlab 编程,对 IEEE30 节点进行了仿真计算,为了验证补偿的效果,做了如下修正,把 IEEE30 所有节点的无功负荷都增加一倍。

首先用向上级归类的嵌套分解法对 IEEE30 的负荷节点进行分区。当 $\alpha_l = 0.0509$ 时,分为 2 个区。区域 1:(21,22,23,24,25,26,27,28,29,30);区域 2:(3,4,6,7,9,10,12,14,15,16,17, 18,19,20)。

根据本文的第 2 部分计算出电压稳定的灵敏度排序:(26,30,29,24,25,19,23,20,18,21,22,27,17, 15, 10,14,16,12,9,4,3,28,7,6)。区域 1 中,$dV/d\lambda$ 最大的点为 26,区域 2 中 $dV/d\lambda$ 最大的点为 19。

为了比较本方法的有效性,设计了 3 个方案进行仿真计算。方案 1:不安装 SVC;方案 2:选择 26, 19 作为无功补偿节点,安装 SVC;方案 3:按照灵敏度排序,选择 26,30 作为无功补偿节点,安装同样参数的 SVC。表 1 为各种方案的比较结果。

表 1 3 种方案的比较结果

Tab. 1 Comparison of three cases

	网络损耗/MW	最大电压偏移	静态负荷裕度[9]
方案 1	25.9	0.265	0.13
方案 2	20.9	0.043	0.25
方案 3	21.4	0.047	0.23

从表 1 中可以看出,方案 1 不补偿,最大电压偏移为 0.265,系统已经不能正常运行。但采取何种方法进行补偿,使得在投资相同的情况下,补偿效果最好,用本文所提出的方案 2 确定的补偿节点,其补偿效果比方案 3 单纯按照灵敏度方法的补偿效果要好,其网络损耗及最大电压偏移比方案 3 小、静态负荷裕度方案 3 大。

4 结论

本文结合电力系统分区与灵敏度分析来确定无功源最佳配置地点的方法概念清晰,易于实现。经过在 IEEE30 节点系统中仿真计算,表明该方法对提高电力系统的电压稳定性有较好的效果。

参考文献:

[1] Huang Yanm-chang, et al. Solving the Capacitor Placement Problem in a Radial Distribution System Using Tabu Search Approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1868-1873.

[2] 姚小寅,孙元章,王志芳(YAO Xiao-yin, SUN Yuan-zhang, WANG Zhi-fang). 电力系统无功源最佳配置地点的研究(Studies on the Optimal Allocation of Reactive Power Source)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1999, 23(3): 12-15.

[3] 王耀喻,张伯明,孙宏斌,等(WANG Yao-yu, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin, et al). 一种基于专家知识的电力系统电压/无功分级分布式优化控制分区方法(An Expert Knowledge Based of Subarea Division Method for Hierarchical and Distributed Electric Power System Voltage/VAR Optimization and Control)[J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1998, 18(3): 221-224.

[4] 刘大鹏,唐国庆,陈珩(LIU Da-peng, TANG Guo-qing, CHEN Heng). 基于 Tabu 搜索的电压控制分区(Tabu Search Based Network Partitioning for Voltage Control)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(6): 18-22.

[5] Lagonotte P, Sabonnadiere J C, Leost J Y, et al. Structural Analysis of the Electrical System: Application to Secondary Voltage Control in France[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(2): 479-486.

[6] 许文超,郭伟,李海峰,等(XU Wen-chao, GUO Wei, LI Hai-feng, et al). AVC 应用于江苏电网的初步研究(Preliminary Study on Automatic Voltage Control of the Electric Network in Jiangsu Province)[J]. 继电器(Relay), 2003, 31(5): 23-26.

[7] Zaborszky J, et al. A Clustered Dynamic Model for a Class of Linear Autonomous Systems Using Simple Enumerative Sorting[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1982, CAS-29(11): 747-757.

[8] Claudio C, et al. Voltage Stability Indices [EB/OL]. http://www.power.uwaterloo.ca/, 1998.

[9] 马世英,李永庄,李柏青(MA Shi-ying, LI Yong-zhuang, LI Bai-qing). 线性模拟法求解电力系统静态电压稳定裕度(An Algorithm of Linear Simulation to Calculate Static Voltage Stability Limit)[J]. 电网技术(Power System Technology) 1998, 22(9): 31-35.

收稿日期: 2004-03-05; **修回日期**: 2004-04-20

作者简介:

胡彩娥(1971-),女,博士研究生,研究领域为电力系统电压稳定、无功优化规划; E-mail: hucaie@cau.edu.cn

杨仁刚(1953-),男,博士生导师,研究领域为无功补偿装置、配电网络自动化等。

旋转备用辅助服务的需求与调度

曹 娜, 曾次玲, 张步涵

(华中科技大学电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 备用辅助服务关系到电力系统的安全运行和可靠性。旋转备用与能量市场有很强的耦合关系,其容量需求和调度分配受到了人们的广泛关注。该文采用和能量市场解耦的旋转备用辅助服务模式,提出了以系统旋转备用社会效益最大的最优备用容量确定原则和基于竞争的备用分配调度模型。文中采用启发式算法求解,算例的仿真结果说明了该方法的有效性。

关键词: 电力市场; 辅助服务; 旋转备用; 社会效益

中图分类号: TM73; F123.9 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2004)21-0013-04

0 引言

备用对电力系统的安全性和可靠性起着重要的作用。电力市场环境下,备用作为一种辅助服务,其交易方式与电力市场的运营模式密切相关,许多发达国家已将备用从电量交易市场中分离出来,建立独立竞价的备用市场,使其与电量交易市场并行[1~4]。

我国目前的发电侧电力市场中,市场竞争仅存在于能量市场,没有开辟独立的辅助服务市场。旋转备用是一项能迅速响应系统负荷变化需求的辅助服务内容,对维护系统的安全可靠有着重要的意义。在发电侧电力市场环境中,系统的旋转备用容量仍然按传统的确定性方法决定,其分配调度仍然是指令性的,即在确定运行方式条件下,向各厂商安排或指定一定的容量,在故障情况下,由运营部门调度下达回复命令,并在结算时给予一定的补偿。

然而,在电力市场条件下,发电厂为各自独立的经济实体,旋转备用服务本质上应看作是发电商提供的一种商品,因此需要引入市场机制,引导市场参与者积极提供旋转备用服务。从世界各国的电力市场范围来看,以竞标方式组织旋转备用辅助服务是一种趋势。本文针对我国的实际情况,提出了基于改进的 Pool 模式的旋转备用交易模型,对市场环境下旋转备用的容量及调度问题进行了初步的探讨。

1 旋转备用市场与能量市场的解耦

旋转备用包括水电旋转备用和火电旋转备用,分别指水电机组和火电机组投入运行后同步运行容量中剩余未发电的容量。在竞争的电力市场中,电量市场的竞争结果决定了机组出力,而机组出力、机组容量和机组的爬坡速率等因素又影响了机组可提供旋转备用容量的大小,因此旋转备用市场与能量市场有着很强的耦合关系。

现在的电力市场模式中,英国的 Pool 模式是应用最早而且比较成熟的一种模式。许多国家和地区参考 Pool 模式建立了自己的电力市场,如新西兰、澳大利亚、新英格兰等。我国目前的发电侧电力市场类似于英国初期的 Pool 模式。传统的 Pool 模式没有将备用市场和能量市场明确分开,造成备用容

A new method for optimal allocation of reactive power sources

HU Cai-e, YANG Ren-gang

(College of Information and Electrical Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

Abstract: The concept of network partitioning using "electrical distance" is applied to reactive power allocation. A new method of combining network partitioning and sensitivity to decide the optimal allocation of reactive power sources is presented. With this approach, the reactive power sources can be allocated reasonably and reactive compensation is balanced in every zone. The simulation results indicate that the method is able to search out the optimal allocation of reactive power sources and effective to improve the voltage stability of power systems.

Key words: network partitioning; electrical distance; reactive allocation; voltage stability