

用灵敏度法确定变电站电容器组的在线投切

王克文, 张建芬, 杨海晶, 杨宛辉

(郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 鉴于变电站电容器分组投切的特点, 本文在一实际 110 kV 城市电网的基础上, 以网络有功损耗的降低为目标, 利用无功注入的灵敏度先对各补偿点的补偿效果进行排序; 进而通过准确计算确定电容器组的投切方案。同时也考虑了变压器分接头对中低压侧电压的调整。该方法可靠实用, 并已应用于为南阳市城市电网开发的在线安全经济分析软件包中。

关键词: 并联电容器; 无功补偿; 灵敏度

中图分类号: TM761.1; TM726.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)09-0015-05

1 引言

作为改善电压质量和降低网损的有效手段之一, 并联电容器补偿已广泛应用于电力系统的不同电压等级。110 kV 变电站内的并联电容器组, 其投切操作常与主变的分接头调节综合考虑。

通过调节无功补偿量来降低网络的有功损耗, 多年来已有大量的文献发表^[1-6], 其中一部分已成功地应用于实际工程^[1, 2]。对于使用经济性目标函数的无功优化问题, 由于所采用数值求解方法的不同, 计及的约束条件也不尽一致。将节点无功补偿量及主变分接头按连续变量处理, 可利用成熟的数学规划方法求解, 并对分接头和无功补偿量进行归整^[1-3], 如各种基于连续变量的线性和非线性规划法^[1, 2, 4, 5]和由此衍生的灵敏度分析法。为计及更多的实际因素, 也有各种新方法不断提出, 如启发式方法^[3, 6]。

本文在分析系统的实际网络结构和运行特点的基础上, 采用可靠实用的灵敏度分析方法, 确定 10 kV 母线并联电容器组的投切, 同时进行主变分接头的调整来检验中低压母线的电压情况。在线分析的结果将为运行人员提供指导。

2 系统分析

图 1 为所要处理的实际系统接线图。主要是由 110 kV 网络构成, 也包括 10 kV 和 35 kV 母线。该系统包含两个局部电厂, 并通过 220 kV 母线与上一级系统相联; 在 110 kV 降压变压器的高中压侧均有带负荷调整的分接头。每条 10 kV 母线 (除旁母)

配有整组投切的电容器组。

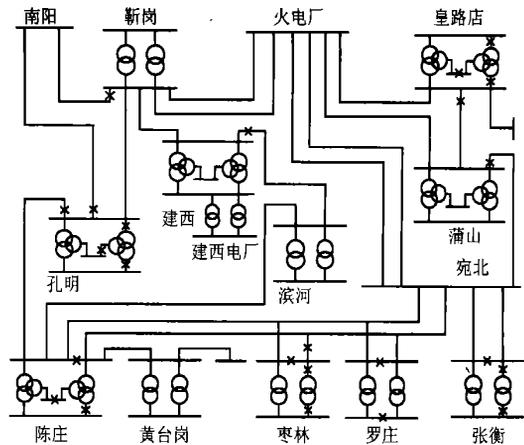


图 1 110 kV 系统

Fig. 1 110 kV power system

220 kV 的南阳、宛北两个变电站分别与两个外部系统相联, 但不允许在城网的 110 kV 电压等级互联。要求所开发的软件能适应多个子网络的处理。

因此, 10 kV 电容器组的投切影响该 110 kV 子网的整个潮流分布, 应该统一考虑。而 110 kV 变压器分接头的改变, 则主要影响的是本站的中、低压母线电压。可将电容器组的投切和分接头的调整分别进行, 采用多进行潮流迭代的方式计及其相互影响。

在线应用的要求是算法的快速和可靠。本文采用灵敏度系数法先对各点补偿量的调整效果进行排序, 然后依序进行准确计算。

3 灵敏度系数

3.1 优化问题

在已经具备 10 kV 母线并联电容器组的前提下, 优化目标为全网的有功损耗最小。当使用准确

基金项目: 河南省科技攻关项目 (0224330010)

的潮流计算表达时,也可将目标函数表达为平衡点的有功出力最小,即

$$\min F = P_s(X) \quad (1)$$

式(1)中,向量 X 由节点电压的实部和虚部构成。对于 N 个节点的系统, X 共有 $2N$ 个分量; $P_s(X)$ 为平衡点的有功表达式。

等式约束为节点功率平衡约束,即潮流计算中的节点功率平衡方程式:

$$\begin{cases} P_{i0} = P_i(X) \\ Q_{i0} = Q_i(X) \\ (V_{i0}^2 = X_{2i-1}^2 + X_{2i}^2) \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N-1 \quad (2)$$

式(2)中, P_{i0} , Q_{i0} , V_{i0} 分别为第 i 点的给定量。对于 PV 点(本系统中为电源母线),用式(2)中的电压方程代替无功约束。

不等式约束包括母线电压、支路功率、电源出力的上下限约束。

3.2 灵敏度系数

从潮流分布的观点出发,任一 10 kV 母线无功注入量的变化都将影响到所有的节点电压,进而影响到平衡点的有功注入。因此,可选节点电压作为中间变量来确定目标函数对第 k 个节点无功注入的灵敏度。假设由具有并联电容器组的 10 kV 母线构成的节点集合为 $\{T\}$,则有灵敏度表达式:

$$\frac{\partial F}{\partial Q_k} = \sum_{i=1}^{2N-2} \frac{\partial P_s}{\partial X_i} \frac{\partial X_i}{\partial Q_k} \quad (k \in T) \quad (3)$$

式(3)中, $\partial P_s / \partial X_i$ 为平衡点有功功率对节点电压的一阶导数,将潮流计算中的雅可比矩阵扩展到包含平衡节点后可以得到 $\partial P_s / \partial X_i$ 的值。平衡点电压为给定值,所以不含在式(3)右侧的计算之中。

为得到式(3)中的 $\partial X_i / \partial Q_k$,将式(2)两侧同时对 Q_k 求导可得,

$$S = J \cdot D_k \quad (k \in T) \quad (4)$$

式(4)中, S 为第 $2k$ 个元素为 1、其余元素为 0 的列向量; J 为潮流计算中的雅可比矩阵; D_k 为由 $\partial X_i / \partial Q_k$ ($i = 1, 2, \dots, 2N-2$) 构成的列向量。求解式(4)可得:

$$D_k = J^{-1} \cdot S \quad (k \in T) \quad (5)$$

显然,节点电压 X 对 Q_k 的一阶导数即 J^{-1} 的第 $2k$ 列。考虑到 $k \in T$ 仅代表具有并联电容器组的 10 kV 母线,即 $k \in T$,对于所有 $\{T\}$ 中母线,需要计算的也是 J^{-1} 中有限数量的相应列。因此,可对现有的牛顿法潮流计算程序稍加修改,保存在对修正方程式进行高斯消去过程中的某些元素值,形成相应的类似于快速分解潮流计算中的因子表;利用因子表技术的快速前回代计算 J^{-1} 中的相应列,即相应的

$D_k(k \in T)$ 。

将所得的 D_k 值代入式(3)可计算出当前运行方式下的灵敏度系数值。确定 $\{T\}$ 中所有点灵敏度值的总计算量相当于一次完整潮流计算的量。

4 电容组在线投切方案的确定

4.1 灵敏度系数应用

目标函数对某节点无功注入的灵敏度系数值直接提供了对调整该点无功注入量的效果评估。正的灵敏度值说明宜减少该点现有无功补偿量,而负的灵敏度值则说明宜投入并联电容器组。灵敏度系数值的大小反映了投切单位补偿量的效果。因此,可按灵敏度值对各点的补偿效果进行排序,并可分为如下两类:

(a) 先对正的灵敏度值按从大到小排序。考虑可否减少相应母线上的无功补偿量。

(b) 对负的灵敏度值按从小到大排序。考虑在这些节点上增加无功补偿量。

也可按某点灵敏度值乘以该点单组电容器的补偿量进行排序。显然,这是对电能损耗降低量的线性估计。由于潮流方程的非线性,以及某些单组容量较大的电容器组的影响,使得线性估计的结果可能偏差稍大。对实际系统的试算结果表明,按线性估计排序并不比直接按灵敏度排序改善多少。

另外,由于采用直角坐标形式的电压表达式,潮流方程为节点电压的二次函数;比较准确的排序方法当然是按二次函数估计整组电容器投切对电能损耗的影响。然而,确定节点电压对节点注入功率的二阶灵敏度,将需要较大的计算量。因此,本文中仍直接按灵敏度值排序。

4.2 准确计算

按 4.1 节中排序结果对每一方案进行准确的潮流计算。先逐一处理 4.1 节中(a)的单电容器组退出方案,再处理(b)的单组投入方案。

假设对某方案进行潮流计算收敛后得到节点电压列向量 X_1 ,由 X_1 按 4.3 节中所述方式确定 110 kV 变压器高、中压侧分接头。按所选分接头修改节点导纳(也可重新生成),在 X_1 基础上继续潮流计算,得到收敛的节点电压列向量 X_2 。

最终潮流结果直接提供了目标函数的变化量及各种约束的满足情况。若某方案在满足约束的前提下,可使目标函数降低,则保留所选电容器组操作及相应分接头值,继续处理下一方案;反之,恢复节点导纳矩阵及电压列向量值,进行下一方案计算。

处理完 4.1 节中(a)、(b)所列方案后,最后处理

所有未处理过的变压器分接头;继续潮流计算,直到结束,得出最终方案。

上述处理方法中有几个问题需要说明。(1)每次计算均以上一次可接受方案所得的电压列向量为初值,以便减少迭代次数。(2)对每一方案选用最优潮流或多平衡节点的处理方式比选用常规潮流效果更好。但在图1所示的实际系统中,PV点(即电源点)无功出力的变化对目标函数的影响不大,同时考虑到最优潮流的计算量较大,不宜于在线大量地反复使用。(3)对图1所示系统,选与外部系统相联的两个220 kV变电站分别为两个子系统的平衡节点,故不需要对外部系统进行等值。(4)本文中对所有 $\{T\}$ 中母线的灵敏度计算和排序仅进行一次。更为准确的方法是,在得到一组灵敏度排序后,对4.1节的(a)、(b)所含点的所有(或前几个)电容器操作进行试算,从中选出最佳的一个并保留;然后重新计算灵敏度并排序;重复计算,直到结束。该方法曾有效地应用于10 kV线路无功补偿的定位及最佳容量的离线计算确定中^[7]。同样,考虑到在线计算量方面的原因,本文中采用了简化处理方式,对图1系统的试验表明仍可靠有效。

4.3 变压器分接头的确定

对图2所示的110 kV三绕组降压变压器,由潮流计算结果得出归算到高压侧的各点运行电压,按所用分接头档位考核中低压母线的实际电压。若不满足电压约束,则调整分接头档位。

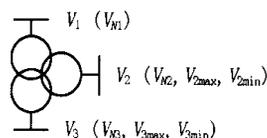


图2 三绕组变压器

Fig. 2 Three - winding transformer

图2中,下标1、2、3分别表示高、中和低压侧。为清楚起见,将各侧其它相关参数放在图上的括号中, V_N 表示额定或主抽头电压,下标max,min分别表示允许的上下界。用 R 和 T 分别表示每档百分数和总档数;用 V_2, V_3 表示归算到高压侧的中、低电压的运行电压;分接头档位编号从对应线圈数最多的开始,例如,对于具有 $(1 \pm 9 \times 0.125)$ 分接头的变压器,第1档为 $(1 + 9 \times 0.125)$ 分接头。于是,若低压母线电压不满足,则高压侧分接头 T_{ap1} 可近似确定为:

$$T_{ap1} = - \left[\frac{V_3}{V_{3limit}} \cdot \frac{V_{N1}}{V_{N3}} - 1 \right] / R_1 + \frac{(T_1 - 1)}{2} + 1 \quad (6)$$

式(6)中,当 $V_3 < V_{3min}$ 时, $V_{3limit} = V_{3min}$; $V_3 > V_{3max}$ 时, $V_{3limit} = V_{3max}$ 。取整

$$T_{ap1} = \begin{cases} \text{Int}(T_{ap1} - 0.5) & (V_3 > V_{3max}) \\ \text{Int}(T_{ap1} + 0.5) & (V_3 < V_{3min}) \end{cases} \quad (7)$$

并作如式(8)所示的边界调整后得高压侧所需档位 T_{ap1} 及相应档位电压。

$$T_{ap1} = \begin{cases} 1 & T_{ap1} < 1 \\ T_1 & T_{ap1} > T_1 \\ T_{ap1} & \end{cases} \quad (8)$$

中压侧分接头档位 T_{ap2} 按高、中压侧变比类似地确定。

4.4 计算过程

前面的整个计算过程简述如下。

- 初始潮流计算,保存有功损耗值 P_0 。
- 形成求解 J^{-1} 的前回代因子表。
- 计算 $\{T\}$ 中的母线灵敏度系数值并排序。
- 按所排次序试算每个方案。包括计算目标函数值,选取相应的变压器分接头和考核约束(如4.1、4.2和4.3节所述)。
- 确定其余变压器的分接头。
- 潮流计算输出结果。

5 算例

对图1所示的实际系统,所有遥测量和遥信量经过在线状态估计功能模块处理,去掉了互感器和避雷器支路等多余信息。

首先,按电源母线的联接关系划分子系统。在本文所用的当前系统运行方式下,共有6个子系统,但仅第2个子系统代表实际的主系统运行方式,参见图1,其它5个子系统因节点数太少而不予考虑。第2个子系统含有376个节点和622条支路;进一步消去由断路器和隔离开关构成的零阻抗支路和相应多余节点。剩余部分中包含将要进行调整的19个10 kV母线并联电容器组和36个变压器分接头。

然后,按第4节所述方法进行计算。当前运行方式下的全系统有功损耗为 $P_0 = 3.5923$ MW,平衡点有功出力为 $P_{S0} = 42.34$ MW;式(3)表达的目标函数对各10 kV并联电容器母线无功注入的灵敏度值列于表1,按统一编号,尚未按灵敏度值排序。由于篇幅所限,所有表中仅给出部分结果。

表 1 初始运行方式下的灵敏度

Tab. 1 Sensitivities under initial system mode

编号	名称	灵敏度值		状态
		/MW · (kvar) ⁻¹		
1	路一电容器	- 4.278418E-03		开
3	滨容二	- 7.356551E-03		开
6	枣 2 电容器	- 3.823658E-03		开
7	滨容一	- 7.356551E-03		开
9	陈 2 电容	- 7.845660E-03		合
12	陈 1 电容	- 7.845660E-03		开
13	蒲容一	- 3.005635E-03		开
15	罗 2 电容器	- 3.530927E-03		开
19	岗电容器一	- 1.705558E-03		合

表 2 试算过程记录(仅给出选中方案)

Tab. 2 Records of computation process
(only for selected schemes)

选中 次序	在表 1 中编号	名称	平衡点		有功损 耗 P	操作
			出力 P _S	/MW		
(初始)			42.34	3.5923		合
1	12	陈 1 电容	42.32	3.5737		合
2	3	滨容二	42.29	3.5422		合
3	7	滨容一	42.27	3.5210		合
4	1	路一电容器	42.25	3.5063		合
5	6	枣 2 电容器	42.24	3.4985		合
6	15	罗 2 电容器	42.23	3.4849		合
7	13	蒲容一	42.22	3.4780		合

表 3 分接头调整建议

Tab. 3 Suggestion for the adjustment of transformer taps

编号	名称	分接头 所在 电压侧	总档 位数	每档 百分数	原		建议 档位
					档 位	档 位	
1	张 1 主变	高	17	0.0125	12		4
2	枣 2 主变	高	17	0.0125	9		5
12	蒲 1 主变	高	5	0.0250	3		1
13	蒲 1 主变	中	5	0.0250	3		5
14	建 1 主变	高	5	0.0250	3		5
15	建 2 主变	高	5	0.0250	3		5
16	蒲 2 主变	高	5	0.0250	3		1
17	蒲 2 主变	中	5	0.0250	3		5
18	台 1 主变	高	17	0.0125	9		6
19	台 1 主变	中	5	0.0250	3		5

表 4 调整结束后的灵敏度值

Tab. 4 Sensitivities after adjustment

编号	名称	灵敏度值		状态
		(MW/ Kvar)		
1	路一电容器	- 1.620406E-03		合
3	滨容二	- 2.120260E-03		合
6	枣 2 电容器	- 8.190679E-04		合
7	滨容一	- 2.120260E-03		合
9	陈 2 电容	- 5.483757E-03		合
12	陈 1 电容	- 5.483757E-03		合
13	蒲容一	- 2.130971E-03		合
15	罗 2 电容器	- 1.233599E-03		合
19	岗电容器一	- 3.758328E-04		合

由于所有灵敏度值全为负,所以该运行方式下无电容器组退出问题。表 2 给出了试算过程记录;表 3 给出了最终的变压器分接头调整建议。

表 2 中同时列出了平衡点出力和总有功损耗的变化情况。经过电容器组和变压器分接头的调整,总有功损耗从初始的 3.5923 MW 降低到 3.4780 MW。以此作为平均数近似估计全年节约的电量为 $(3.5923 - 3.4780) * 8760 * 0.1 = 100.1268$ (万度)。

表 3 的结果中,有些变压器运行于边界分接头,例如并列运行的三绕组蒲 1 主变和蒲 2 主变。由于在 10 kV 侧投入了一组电容器,于是高压侧分接头往上调、中压侧分接头往下调,以便降低中、低压侧的运行电压到可接受的范围内。

表 4 给出了调整结束后的灵敏度值。与表 1 相比较,灵敏度的绝对值已普遍下降。事实上,任何一组电容器的投入,都已不能在满足约束的条件下降低损耗。

在 CPU 速度为 1.7 G 的微机上完成本节所述的全部计算,DOS 下记录的时间为 0.61 s,能够满足在线运行的需要。作为整个在线安全经济分析软件包的一部分,本功能模块已投入试运行。

6 结论

本文以实际系统的运行特点为依据,利用灵敏度法确定城市电网 110 kV 变电站内 10 kV 电容器组的投切方案。详细介绍和讨论了灵敏度系数的计算、在线应用和一些相关的问题。以在线试运行记录的数据为基础,进一步说明和考核该方法的实际应用。利用灵敏度法,可以在考虑电容器组分组投

切、变压器分接头不连续调节的实际特点下,快速、可靠地得到结果,为运行人员提供参考和指导。

参考文献:

- [1] 黄梅,龚强,何希芬,等.利用 SCADA 系统实时数据进行电网无功优化计算[J].电力系统自动化,1998,22(8):70-72.
- [2] 叶周,陆杏全.实时电压无功优化控制[J].电力系统自动化,1994,18(7):33-36.
- [3] Abdul-Rahman K H, Shahidepour S M, Daneshdoost M. AI approach to optimal var control with fuzzy reactive loads[J]. IEEE trans. on Power Systems, 1995, 10(1): 88-97.
- [4] Sabados B, Burgess EJ. Optimal shunt capacitor installation using inductive coordination principles[J]. IEEE T-PAS, 1977, 96(1):222-226.
- [5] 姚诸香,涂惠亚,徐国禹.基于灵敏度分析的无功优化

潮流[J].电力系统自动化,1997,21(11):19-21.

- [6] 王成山,唐晓莉,余贻鑫,等.基于启发式算法和 Bender's 分解的无功优化规划[J].电力系统自动化,1998,22(11):14-17.
- [7] 王克文,姜俊峰,刘宪林,等.灵敏度指标在 10kV 配电网无功补偿中的应用[J].郑州大学学报(工学版),2002,23(3):70-74.

收稿日期:2002-11-19 修回日期:2003-02-26

作者简介:

王克文(1964-),男,博士,从事电力系统分析和稳定方面的研究;

张建芬(1978-),女,硕士研究生,从事电力系统分析和稳定方面的研究;

杨海晶(1977-),男,硕士研究生,从事监视与控制方面的研究;

杨宛辉(1943-),女,教授,从事电力系统监视与控制方面的研究。

Sensitivity-based on-line adjustment of shunt capacitors in substation

WANG Ke-wen, ZHANG Jian-fen, YANG Hai-jing, YANG Wan-hui
(Zhengzhou University, Zhongzhou 450002, China)

Abstract: Considering practical characteristic that shunt capacities in power stations are adjusted in sets, the sensitivity technique is used in this paper for the on-line determination of capacitor operation schemes on a practical 110 kV city power system. Under the objective function of active power loss reduction and the reactive compensation effects of buses with shunt capacitors are ordered by using sensitivities, the adjustment scheme for capacities and transformer taps is obtained from repeated load flow computation. Voltage adjustment by transformer taps at medium-low voltage supply are also considered. The presented reliable and practical approach is much suitable for on-line employment, and has been used in the Nanyang power system.

Key words: shunt capacitor; reactive power compensation; sensitivity

《电厂运行与检修》征稿启事

针对广大电力系统从业人员的需求,在综合权衡、统筹安排之后,《继电器》杂志社以原班人马和电力相关专业青年大学生为团队,合力打造实用型科普期刊《电厂运行与检修》。

宗旨:本刊意在突破传统学术期刊的局限,旨在服务电厂一线从业人员,为其构建一片交流心得体会、品评经验技术、借鉴优势项目和推广节能环保之新品与技术的天地。

专业:本刊专业范围广泛,涉及电厂的安全生产管理、设备安装与调试、运行与维护的全过程。囊括火电厂中炉、机、电及其辅助生产系统和水电厂主设备及其辅助设备等的维护与检修,节能与环保等各方面的技术改进与经验交流;同时还包含新品推广与资讯速递等内容。

欢迎广大电力系统从业人员踊跃投稿,共同搭建一个涵盖全国电厂的经验交流与资源共享的平台。

投稿请寄: 1. 河南省许昌市延安路科技中心《继电器》杂志社《电厂运行与检修》编辑部 邮编:461000

2. E-mail: ppom@ceptc.com

传真:0374-3360297

3. 联系电话:0374-3212254, 3125278 联系人:张志强 石晋美 葛彦娜

投稿须知: 1. 稿件请用一般科技论文格式书写;来稿请注明作者简介(姓名、性别、学位、职称、职位及专业范围等);写清作者单位、详细通讯地址(含邮编)、电话及 E-mail,来信必复。作者请自留底稿,稿件一律不退,若三个月内未接到编辑部刊用通知,作者可自行处理稿件。

2. 欢迎采用 E-mail 投稿;邮寄请用打印稿。