

自贡电网无功补偿及其优化

刘代顺, 常建磊

(自贡供电局, 四川 自贡 643000)

摘要:近年来,随着电网容量的增加,对电网无功功率补偿的要求也日益明显。无功功率如同有功功率一样,是保证电力系统电能质量、降低电网损耗以及系统安全运行所不可缺少的重要组成部分。对四川自贡电网的无功补偿现状作简要分析,在分析电容器、调相机和各种静止补偿器的工作原理基础上比较其各自的优缺点。最后,针对当前无功补偿的薄弱环节——长线路补偿问题进行了定量分析。所做研究对无功功率平衡及补偿方式的优化对电力系统降损节能有一定的指导意义。

关键词:无功功率补偿;长线路;静止补偿器;优化

Abstract: With the rapid development of power grid recently, the needs for reactive power compensation also increase a lot. Like active power, the reactive power plays a key role in guaranteeing the power quality of power system, reducing the power loss in grid and ensuring the safety of whole power system. According to the brief analysis on reactive power compensation of Zigong Power Grid in Sichuan, the advantages and disadvantages of capacitors, rotary condensers and various static var compensators are given based on the analysis of their operating principles. Aiming at the weak points of reactive power compensation, namely compensation on long transmission line, a detailed analysis is given with pictures and tables. It is useful in reactive power equilibrium and compensation optimization, as well as in loss reduction and energy conservation.

Key words: reactive power compensation; long transmission line; static var compensator (SVC); optimization

中图分类号:TM451.2 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2012)01-0016-03

近年来,由于电网容量的增加,电网无功功率的要求也日益明显。无功功率如同有功功率电源一样,是保证电力系统电能质量、降低电网损耗以及保障系统安全运行的重要因素。系统中无功功率不平衡,轻则导致系统电压下降,重则会导致设备损坏、系统解列^[1-2]。此外,系统的功率因数和电压降低,会使电气设备得不到充分利用,促使网络传输能力下降,损耗增加。因此,无功功率平衡对电力系统降损节能有着极其重要的意义。

电力系统中无功功率主要体现在两类电力系统元件上,即电力变压器和输电线路。变压器中的无功功率损耗可分为两个部分,即励磁支路损耗和绕组漏抗损耗。对单级变压器的网络而言,满载时约为它额定容量的百分之几。但在多电压等级网络中,变压器的无功功率相当可观。某五级变压网络(10/220 kV 升压,220/110,110/35,35/10,10/0.4 kV 降压)中变压器的损耗统计如表1。输电线路上的无功功率也包含两个部分,即并联电纳和串联电抗中的无功功率损耗。并联电纳中的无功呈容性,即是充电功率,与线路上的电压成正比。而串联电抗中这种损耗与复合

电流的平方成正比,呈感性。

表1 某五级变压网络中变压器损耗统计^[2]

变压器损耗	①	②
励磁支路损耗	7%	7%
绕组漏抗损耗	50%	12.50%
总损耗	57%	19.50%
变压器损耗/变压器负荷	57/100	39/100

①所有变压器都满载;②所有变压器都半载。

线路作为电力系统的一个元件究竟是消耗容性或感性的无功是不能肯定的。若按自然功率的概念,当输电线路功率大于自然功率时,线路消耗的感性无功;当输电线路功率小于自然功率时,线路消耗的容性无功。

1 四川自贡电网的无功补偿情况

截至2010年年底,自贡电网现有变电容量1906.5 MVA,主变压器52台。其中220 kV主变压器7台,主变压器总容量930 MVA;并联电容器容量为56.112 Mvar;110 kV主变压器26台,主变压器总容量968.5 MVA;110 kV电网容性装置配置容量76.6 Mvar;35

kV 主变压器 19 台,主变压器总容量为 108 MVA ,
35kV 电网容性装置配置容量 6.504 Mvar。

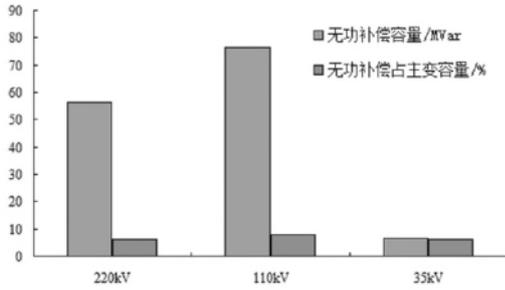


图 1 自贡电网主变压器无功补偿统计

随着负荷快速增长,部分变电站高峰负荷时主
变压器高压侧功率因数达不到 0.95,变电站无功补
偿容量不足。无功补偿容量不足同样也导致电网电
压控制困难,负荷中心无功平衡脆弱,特别是荣县地
区负荷增长较快,无功不足更突出。向家岭电网不能
实现无功分层就地平衡,电压降明显增大。

2 无功功率补偿的措施

电力系统中的有功功率主要集中在各类发电厂
中的发电机。无功功率电源除发电机外,还有电容
器、调相机和静止补偿器等,分散在各变电站(所)。
供应有功功率和电能必须消耗能源,但无功功率电源
一旦设置后,就可随时使用而不再有其他经常性费
用。此外,系统中的无功功率损耗远大于有功功率损
耗,且无功补偿措施需要是多种方法相结合。

2.1 发电机

正常运行状态下的发电机总受一定条件,如定子
绕组温升、励磁绕组温升、原动机功率等的约束。这
些约束条件决定了发电机组发出的有功功率和无功
功率有一定的限额。

定子绕组温升决定了定子绕组电流,也就决定了
发电机的视在功率。在发电机额定电压 U_N 下运行
时,约束条件体现在其运行点不得超出以 O 点为圆
心,以 OC 为半径的圆弧。励磁绕组温升决定了励磁
绕组的电流,决定发电机的空载电动势,即空载电势
不得大于 E_{qN} ,约束条件体现在其运行点不得超出以
O' 点为圆心,以 O'B 为半径的圆弧。原动机和定子
端部温升约束条件分别体现在线段 BC 和 AB。发电
机的运行范围即四边形 ABCD 内,产生的无功功率有
限,大部分时间需要外部进行补偿。

2.2 电容器和调相机

并联电容器是常用的无功补偿措施,它只能向系

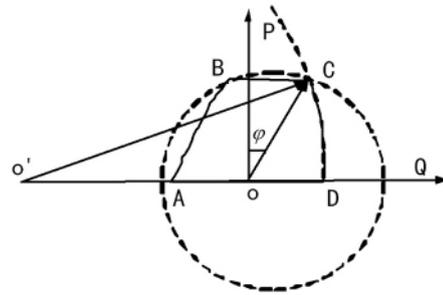


图 2 发电机运行极限图^[2]

统提供感性无功功率,功率的大小与其端电压的平方
成正比。调相机与发电机工作原理类似,但不同在于
其相当于只能发无功功率的发电机。调相机发出的
无功与励磁状态有关,过励磁运行时向系统供应感性
无功功率;欠励磁时吸取感性无功功率。

2.3 静止补偿器和静止调相机

静止补偿器全称是静止无功功率补偿器(SVC),
主要有 TCR 型、TSC 型和 SR 型。

TCR 型补偿器由多个不可控的电容器构成,如
图 3(a) 所示,图中与电容串联的电感则与其构成串
联谐振电路,兼作高次谐波的滤波器。TSC 型补偿器
如图 3(b) 所示,其工作原理相对简单,仅以晶闸管开
关取代了常规电容器的机械开关。图 3(c) 中 SR 型
补偿器的滤波回路与 TCR 型相似,与饱和电抗器相
串联的电容则用以校正饱和电抗器的伏安特性。

调相机、TCR 型和 SR 型补偿器可以发出感性和
容性无功功率,而电容器和 TSC 型补偿器只能发出
容性而不能发出感性无功。从控制方式和灵活性而
言,调相机和 TCR 型补偿器较优。从反应速度看,三
类静止补偿器则较优,其他方面详见表 2 所示。因
此,选择无功补偿装置应综合考虑各特性,做到既经
济又有效。

2.4 并联电抗器

对电力网络中的感性无功功率,并联电抗器显然
不是电源,而是负荷,但在一些电力系统中确实装有
这种设施,用以吸收系统轻载或空载时线路上过剩的
感性无功功率。

3 无功功率补偿的优化

由第一节对自贡电网无功补偿现状分析可知,无
功补偿主要集中在各变电站(所),对荣县某负荷增
长较快的长线路,无功功率补偿显著不足。现定量分
析其补偿方式^[4-5]如下。

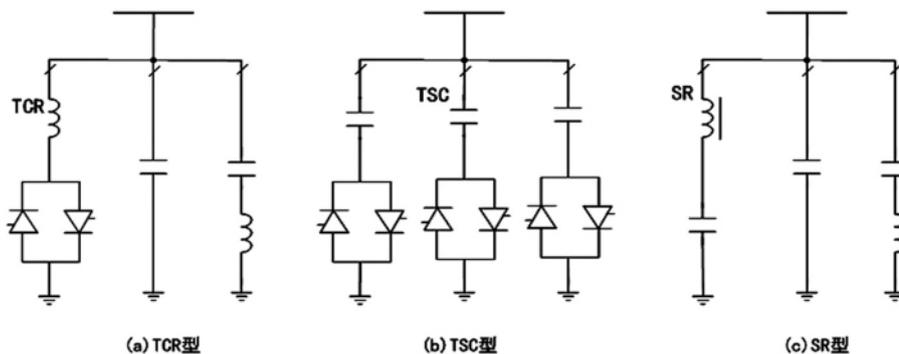


图3 静止补偿器原理图

表2 电容器、调相机和静止补偿器的特性比较

特性	电容器	调相机	SVC		
			TCR型	TSC型	SR型
调节方式	超前	超前/滞后	超前/滞后	超前	超前/滞后
控制方式	不连续	连续	连续	不连续	连续
灵活性	差	好	很好	好	差
反应速度	快	慢	很快	快	快
调节精度	差	好	很好	差	好
单位容量投资	低	高	中等	中等	中等
维护检修	方便	不方便	方便	方便	不常维修

3.1 单点补偿方式

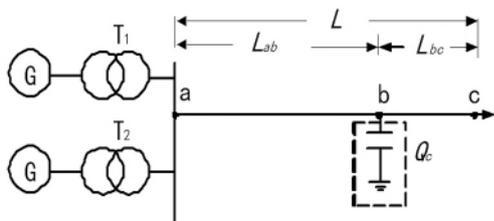


图4 长线路单点补偿示意图

假定线路全长 L ，单位长度的无功负荷密度 Q_0 ，若在距线路起点距离为 L_{ab} 补偿容量为 Q_c 的无功功率补偿点，由补偿点至线路末端，即 L_{bc} 无功潮流为

$$Q_{L_{bc}} = (L - L_{ab}) Q_0 \quad (1)$$

由起始点至补偿点，即前段 L_{ab} 无功潮流为

$$Q_{L_{ab}} = (L - L_{ab}) Q_0 - Q_c \quad (2)$$

补偿后，电力网络中损耗减小的数值可表示为

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_1 - \Delta P_2 = \int_0^{L_c} r \frac{Q_{L_{bc}}^2}{U^2} dL_{ab} - \int_0^{L_c} r \frac{Q_{L_{ab}}^2}{U^2} dL_{ab} \\ &= \frac{r}{U^2} \left\{ \int_0^{L_c} Q_0 (L - L_{ab})^2 dL_{ab} - \int_0^{L_c} [(L - L_{ab}) \right. \\ &\quad \left. Q_0 - Q_c]^2 dL_{ab} \right\} = \frac{r}{U^2} \int_0^{L_c} [2(L - L_{ab}) Q_0 Q_c - \\ &\quad Q_c^2] dL_{ab} = \frac{r Q_c L_c}{U^2} [2L Q_0 - Q_0 L_c - Q_c] \quad (3) \end{aligned}$$

对 ΔP 求极值，可令在偏导数 $\partial \Delta P / \partial Q_c = 0$ ，且 $\Delta P / \partial L_c = 0$ ，可得

$$\begin{cases} 2L Q_0 - Q_0 L_c - 2Q_c = 0 \\ 2L Q_0 - 2Q_0 L_c - Q_c = 0 \end{cases} \quad (4)$$

由上式可解出， $Q_c = 2L Q_0 / 3 = 2Q_R / 3$ ， $L_c = 2L / 3$ ， Q_R 为全网线路所需补偿无功功率，即当 Q_c 和 L_c 满足上述条件时，补偿效果最好，线损下降最大。在此情况下

$$\text{补偿度: } K_c = \frac{Q_c}{L Q_0} = \frac{2}{3} = 66.7\%$$

线损下降率:

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_1} = \frac{\Delta P}{\int_0^{L_c} \frac{(L - L_{ab})^2 Q_0^2}{U^2} r dL_{ab}} = \frac{8}{9} = 88.9\%$$

3.2 多点补偿方式

为优化线路无功功率补偿，下面讨论多点补偿方式下的补偿情况。由图5(c)及单点补偿推导方法可得无功功率多点补偿的计算式。

第 i 组补偿器安装位置为

$$L_{ci} = \frac{2i}{2n+1} L \quad (5)$$

每一组补偿器的最佳补偿容量和总补偿容量分别为

$$Q_{ci} = \frac{2L Q_0}{2n+1} = \frac{2Q_R}{2n+1} \quad (6)$$

$$Q_c = \sum_{i=1}^n Q_{ci} = \frac{2n Q_R}{2n+1} \quad (7)$$

其中 Q_R 为线路所需无功补偿总容量。此补偿情况 (下转第42页)

表1 调度运行过程管理系统应用对比

	日志输入次数 (方式)	记录输入操作平均 时间/min	编辑交接 班平均时 间/min	查找记录 平均时间 /min
原来的工作方式	手写 后输入 电脑,共 计2次	3 × 15	3 × 10	3
使用调度运行过程管理系统	在业务办 理中自动 生成,共 计0次	3 × 5	3 × 5	0.5

计划书管理、继电保护管理、方式管理、检修申请管理等16项调度管理功能,优化了现有电网调度的管理模式,强化了电网调度的过程化管理,最大限度地减

少了在管理过程中的人为因素的随意性,实现了调度运行专业生产管理流程的集中和统一。

但是该系统的开发和应用仍处于初级阶段,下一步打算:①实现与调度EMS系统接口,共享信息资源;②进一步完善系统术语库,提高系统的智能化水平。

参考文献

- [1] 罗宏超,赵园,任建云. 基于工作流的设备批准书与启动方案及保护定值单在OMS系统中的应用[J]. 科技情报开发与经济, 2010, 20(18): 131-133.
- [2] 王毅. 面向事件的电网调度日志系统研究与开发[J]. 华东电力, 2009, 37(5): 783-785.

(收稿日期:2011-10-10)

(上接第18页)

下,补偿度和线路损耗下降率分别为

$$K_c = \frac{Q_c}{Q_R} = \frac{2n}{2n+1} \times 100\% \quad (8)$$

$$\Delta P\% = \left(1 - \frac{1}{(2n+1)^2}\right) \times 100\% \quad (9)$$

单点补偿和多点补偿方式下,网络中线路无功功率潮流分布与无补偿的情况如图5所示。 LQ_0 为长线路总的无功负荷。

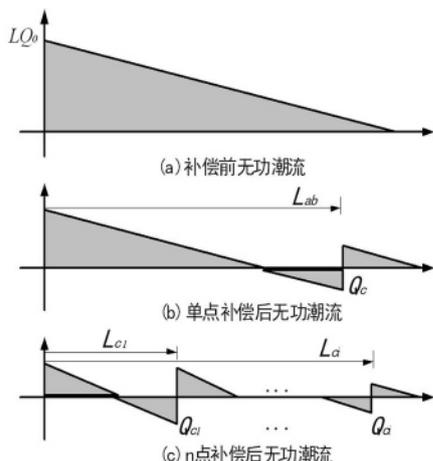


图5 补偿前后无功潮流分布图

计算了单点、两点、三点和五点补偿的补偿位置、容量、补偿度和线损下降率。单点补偿时,补偿度和线损下降率可分别达66.67%和88.89%;而两点补偿时,补偿度和线损下降率仅改变13.33%和6.11%。补偿点超过两点,补偿的经济性显著下降,详见表3。

4 结论

通过四川自贡电网运行经验和对无功补偿现状的

表3 线路无功功率补偿方案分析

补偿点	①	②	③	④
单点补偿	0.67	0.67	66.67	88.89
两点补偿	0.40	0.40	80.00	96.00
三点补偿	0.29	0.29	85.71	97.96
五点补偿	0.18	0.18	90.91	99.17

①补偿点距离线路始端位置/线路总长(多点给出 L_{ci}/L);②各补偿点的补偿容量/总补偿容量;③无功功率补偿度(%);④线路损耗下降率(%)。

简要分析,指出系统运行的薄弱环节——无功功率补偿,尤其是长线路的无功功率补偿。在分析各类无功功率补偿装置工作原理的基础上,对比其各自的优缺点,有利于无功补偿装置的合理配置。在传统电容器组补偿基础上,应合理引入各类可连续控制的静止补偿器。针对线路补偿问题,详细讨论了单点补偿和多点补偿的补偿效果,对线路无功功率补偿提供了量化参考依据,一般线路单点补偿可到线损下降80%左右,随着补偿点的增多,线损下降率降低速度显著放缓。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [2] 陈珩. 电力系统稳态分析(第三版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [3] 刘从洪,邓晓林. 10 kV 线路无功补偿技术在农网中的应用分析[J]. 四川电力技术, 2010, 33(6): 40-42.
- [4] 靳龙章,丁毓山. 电网无功补偿使用技术[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1997.
- [5] 杜兵. 智能配电网无功优化应用研究[J]. 四川电力技术, 2010, 33(6): 34-36.

(收稿日期:2011-11-30)