

# 牵引变电所无功动态并联综合补偿装置设计与实践

寇宗乾

(铁道第一勘察设计院电化处, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 以迎水桥牵引变电所补偿电容的改造为例, 提出了一种牵引变电所无功动态并联综合补偿装置, 讨论了装置的基本构成, 介绍了装置的调试、运行情况, 以及滤波器组、吸流电抗器组的过零投切波形以及补偿效果。现场运行表明, 本装置设计合理、补偿效果良好。

**关键词:** 牵引变电所; 无功动态补偿; 无功并联补偿; 无功综合补偿

**中图分类号:** TM922 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)09-0059-04

## 1 引言

《全国供用电规则》中规定: 无功电力应就地补偿。用户应在提高用电自然功率因数的基础上, 设计和装设无功补偿设备, 并做到随负荷和电压变动及时投入或切除, 防止无功电力倒送。高压供电的工业用户, 功率因数应为 0.90 以上。

我国电气化铁道电力牵引负荷对电力系统的影响, 主要表现在功率因数、负序及高次谐波上<sup>[1-5]</sup>。目前, 对高次谐波的影响进行了较深入的研究, 并提出了一些消除高次谐波影响的方法, 如有源滤波法和无源滤波法等<sup>[1-5]</sup>。电铁负序对电力系统的影响随着系统容量的增大以及各牵引变电所采用轮换接线的方式, 基本消除了。提高功率因数的一条有效途径是装设无功补偿装置。

目前大多牵引变电所均加装了静态并联电容补偿装置, 但由于其均由不可调的电容和电感组成, 发出的无功是一常量, 因此无法对牵引负荷进行动态补偿, 在无牵引负荷时易形成过补偿, 有牵引负荷时又欠补偿, 这样反而使得牵引变电所功率因数降低。由于电力部门为减小功率因数对系统的影响而实行“反转正计”, 因此电力部门对铁路的罚款反而增多。所以如何对牵引变电所无功进行有效补偿以提高功率因数, 是电气化铁道急需解决的技术难题。

本文以迎水桥牵引变电所补偿电容的改造为例, 提出了一种电气化铁道无功动态并联综合补偿装置, 讨论了装置的基本构成, 介绍了装置的调试、运行情况, 以及滤波器组、吸流电抗器组的过零投切波形以及补偿效果。

迎水桥牵引变电所担负着京包兰线沙坡头——镇罗堡间的电力牵引供电任务, 采用两台 40 MVA 变压器互为热备用的运行方式。变电所既有的高压

电容补偿装置, 在牵引负荷大时处于欠补偿状态, 牵引负荷小时又处于过补偿状态, 长期以来无法满足频繁变化的牵引负荷对无功的要求。包兰线从 1984 年开通到 1988 年之间牵引机车采用 SS1 型, 迎水桥牵引变电所功率因数每年都在 0.95 以上, 但自 1989 年采用 8K 牵引机车以后, 功率因数逐年下降(在 0.6~0.7 之间)。1992 年银川水电段对 A 相电容器进行了增容改造, 由原来的 3 200 kvar 增至 4 400 kvar, 使该所的补偿装置总容量提高到 6 640 kvar, 功率因数达到 0.83。1993 年初由于铁路运量增加, 该所功率因数由 1992 年的 0.83 降到 0.73, 为此银川水电段于 1993 年 2 月对 B 相电容器进行了增容改造, 由原来的 2 240 kvar 增至 3 200 kvar, 所内补偿总容量增加到 7 600 kvar, 但补偿效果却不甚理想。由此可以看出在原有的控制模式下, 只改变电容器的容量是很难解决电气化铁道的功率因数问题的。

## 2 牵引变电所可调补偿容量的确定

固定平均补偿比较适用于“反转反计”, 在“反转不计”时也可以使用。但是这种补偿方式的补偿容量选择偏小, 容易造成有行车时“欠补偿”、无行车时“过补偿”。所以如何正确确定可调补偿的容量是实现可调补偿的重要一步。固定平均补偿并联电容器容量用下式计算:

$$Q_X = P_L \left[ \frac{1}{N \cos^2 \theta_1} - 1 - \frac{1}{N \cos^2 \theta_2} - 1 \right] \frac{1}{1 - q_0} \quad (1)$$

式(1)中:  $Q_X$  为需补偿电容器容量;  $P_L$  为计算平均有功功率;  $\cos \theta_1$  为补偿前功率因数;  $\cos \theta_2$  为补偿后功率因数;  $q_0$  为变电所无电概率。

根据现场实际安装的情况, 对式(1)进行修正:  $P_L$  原为计算平均有功功率, 应改为测试有功功率最

大值的 90%~95%;无须考虑变电所无电概率  $q_0$  (电容器可以根据负荷的变化进行投切,故不需要考虑有无放倒);功率因数应取地方供电局计量点的月平均功率因数,而非机车和牵引变压器综合考虑的功率因数,同时应考虑线路影响。

对迎水桥牵引变电所半年的运行记录(原高压固定补偿投入)进行统计分析得出,最小功率因数为 0.65,平均功率因数为 0.78,最大功率因数为 0.85;对牵引负荷有功功率统计结果如图 1 所示。

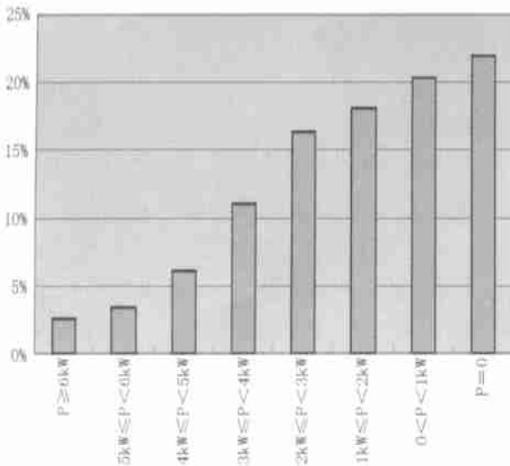


图 1 牵引负荷有功功率统计结果

Fig. 1 Statistical result of active power of traction load

补偿后地方供电局计量点的月平均功率因数应提高到 0.94~0.95,有功功率取测量有功功率最大值的 94% 为 5000 kW。计算结果需补偿 1881 kvar 容性无功。再根据电抗率、高次谐波、太阳辐射、系统电压的波动进行修正,现需增加安装电容器额定容量为 2400 kvar。

吸流电抗器的容量考虑为高压固定补偿装置实际补偿容量的 86%~97%,原固定补偿容量大则吸流电抗器的容量大。

对于既有变电所最好让技术人员到现场进行测试后,再确定电容器、吸流电抗器的容量。

### 3 电气化铁道无功动态并联综合补偿装置的基本构成

#### 3.1 电气化铁道无功动态并联综合补偿装置的原理框图

本文提出一种电气化铁道无功动态并联综合补偿方案,如图 2 所示。本装置分为主回路和控制两部分,主回路主要包括:协调变压器、真空断路器、隔离开关、电容器组、电抗器组、避雷器及 RC 吸收装置、电流互感器、电压互感器等;控制部分主要包括:晶闸管开关柜、继电器操作和保护屏、计算机测控系统屏、仪表变送屏等。

采用监测 110 kV 侧的无功功率、有功功率、接触网电压和馈线电流的方法,分级调整,回差开关控制。

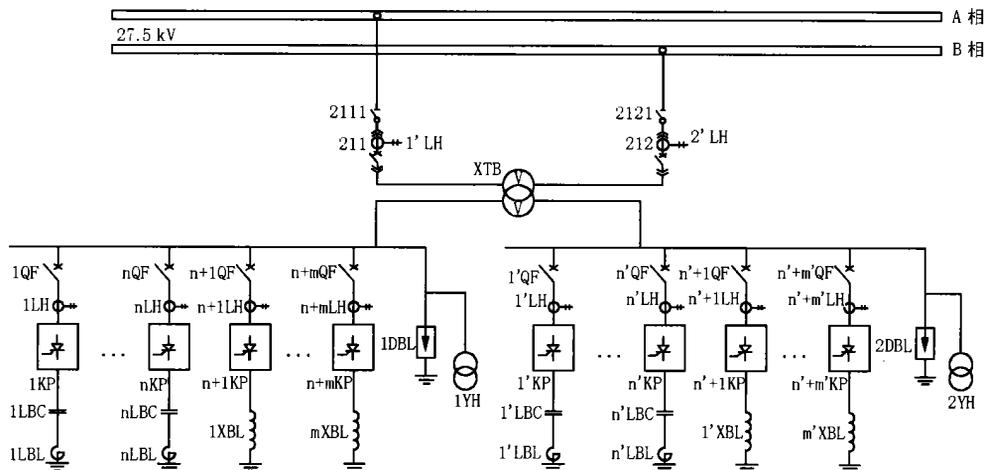


图 2 一种电气化铁道无功动态并联综合补偿方案

Fig. 2 A scheme of dynamic shunt reactive power compensation

#### 3.2 电气化铁道无功动态并联综合补偿装置工作原理

无行车时全部切除低压侧滤波支路,投入吸流电抗器吸收高压侧基波无功,本系统输出为 0;有行

车时:

- (1) 当接触网电压在 19~30 kV 且无功功率达到 700 kvar 以上时,控制系统在延时 100 ms 后,投入一组电容器,无功功率每增加 700 kvar,就顺序投

入下一组电容器,直到全部电容器投入;

(2) 当检测无功功率低于 500 kvar 延时 100 ms 后,顺序切除电容器组;

(3) 当检测无功功率突然低于 100 kvar 延时 100 ms 后,快速连续切除各级电容器组;

(4) 当检测网压高于 30 kV 或低于 19 kV 时,延时 500 ms 后,快速连续切除各级电容器组。

投入顺序为先投入高压侧电容器(即切除吸流电抗器),然后再分组投入各低压侧电容器;切除顺序为先切除各低压电容器,再投入吸流电抗器。要确保滤波支路和吸流支路不同时工作。

\* 固定高压电容器组(FC) + 可调低压电容滤波器分组投切(TSC)

$$\sum_{i=1}^n Q_i + Q_{dci} + Q_{gci} \cdot T_i \operatorname{tg} \varphi_R \cdot \sum_{i=1}^n P_i T_i \quad (2)$$

\* 固定高压电容器组(FC) + 可调低压吸流电抗器分组投切(TSR)

$$\sum_{i=1}^n Q_i + Q_{Ri} + Q_{gci} \cdot T_i \operatorname{tg} \varphi_R \cdot \sum_{i=1}^n P_i T_i \quad (3)$$

其中:  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为各时段内变电所总有功、总无功(滞后值取正);  $Q_{gci}$  为固定高压电容器组的各时段内的总补偿无功(超前值取负);  $Q_{dci}$  为可调低压电容滤波器分组投切时实际投入滤波器组的各时段内的总补偿无功(超前值取负);  $Q_{Ri}$  为可调低压吸流电抗器分组投切时实际投入的电抗器的各时段内的总无功(滞后值取正);  $n$  为统计时段数(自然数),  $T_i$  为时段时间。  $\varphi_R$  为某一统计时间内(一月或一日)功率因数要求值的角度。

公式(2)表明,应通过分组投切可调低压电容滤波器组,选择合理的  $Q_{dci}$ , 使各时段内牵引变电所与系统交换的无功保持最小。

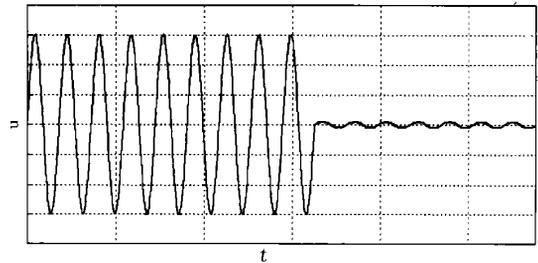
公式(3)表明应通过分组投切可调低压吸流电

抗器组选择合理的  $Q_{Ri}$  使各时段内牵引变电所与系统交换的无功保持最小。

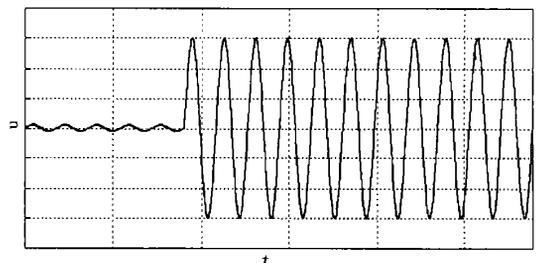
## 4 现场记录

### 4.1 滤波器组投切录波

图 3 给出了迎水桥牵引变电所实际记录的滤波器组投切的波形。从此波形可以看出,滤波器组投入时,不产生过电压。



(a) 投入电容时晶闸管端电压波形



(b) 切除电容时晶闸管端电压波形

图 3 滤波器组投切的录波波形

Fig. 3 Recorded waveforms of filter bank turn on/off

### 4.2 功率因数比较

迎水桥牵引变电所无功补偿装置经过改造,2001年4月投入运行,日平均功率因数达到了0.93~0.96,月平均功率因数提高到0.94~0.95。改造前后功率因数对照群图4所示。

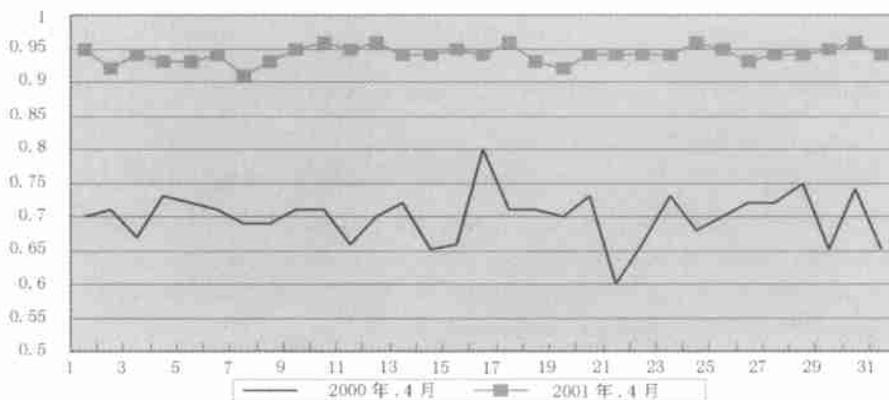


图 4 改造前后功率因数对照图

Fig. 4 Comparison of power factor before/ after reconstruction

## 5 效益分析

我国现行的两部电价制度,总支付电费包括基本电费、电量电费和按功率因数调整电费三部分。迎水桥牵引变电所对无功补偿装置进行改造后,月平均功率因数提高到 0.92 以上,每年使功率因数罚款由罚变为奖,年可节省 85 万元以上,投资回收期保守估计为两年半。

本文所述装置符合国家的产业政策和铁路的技术政策,能够综合解决电气化铁道牵引供电系统中普遍存在的技术问题,满足铁路建设发展的需要,对节能降耗,降低运营成本,扩大铁路的运输能力,提高铁路的技术装备水平,提高电力系统运行的经济性,优化电能质量,都有现实意义。

## 6 结束语

综上所述,本文提出的电气化铁道无功动态并联综合补偿装置(带有协调变压器的 TSC + TSR 可调无功补偿与谐波治理方案),技术先进、方案合理,经迎水桥牵引变电所现场运行表明:

1) 在考虑无功“返送正计”的情形下,采用带有协调变压器的 TSC + TSR 可调无功补偿(与谐波治理)方案,可有效地提高变电所的功率因数,使其达到 0.92 以上,从而可大大减少因功率因数偏低带来的罚款。

2) 在满足提高功率因数的基础上,也能够有效地提高滤波率,并大大改善无功负序的影响,降低母线压损,提高网压水平,降低牵引变压器功率损失和网损(节能),提高牵引变压器的容量利用率(增容),

满足铁路建设和发展需要。

3) 利用晶闸管过零、频繁、快速、分组投切电容器(滤波器)和吸流电抗器,可有效地避免投切时的过电压、过电流,并有效延长设备的使用寿命。

4) TSR 的提出大大地降低了一次性投资,同时也避免了晶闸管触发脉冲的问题。

5) 多种形式的协调变压器(单相变压器、单相三线圈变压器、V 接变压器),可满足不同安装场合。

6) 初步研究及现场的运行表明,造价较低的带有协调变压器的 TSC + TSR 可调无功补偿(与谐波治理)方案及装置,符合我国国情、路情,对综合治理牵引供电系统的问题有益且可行。

## 参考文献:

- [1] 李群湛. 电气化铁道并联补偿及应用[M]. 北京:中国铁道出版社, 1993.
- [2] 贺建闽. 多串多次滤波器投切的暂态过程仿真[J]. 铁道学报, 1991(增刊): 92 - 98.
- [3] Zhang Li, Li Qunzhan. Application of TSC in Reactive Compensation in Traction Substations[C]. Proceedings of IWADS2000, Beijing, 2000:149 - 153
- [4] 李群湛, 贺建闽. 牵引供电系统综合补偿技术及应用[J]. 电气化铁道, 1998, (3): 25 - 27.
- [5] Xie Shaofeng, Li Qunzhan, He Jianmin. Control Strategy of Symmetry Compensation System of Traction Power Supply

收稿日期: 2003-05-30

作者简介

寇宗乾(1963 - ),男,高工,工程硕士,长期从事电气化铁道牵引供电系统设计。

## Design and implementation of dynamic shunt reactive power compensator in traction substation

KOU Zong-qian

(Dept. of Electrification Design, First Survey & Design Institute, Ministry of Railway, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Taking the improvement of the compensation capacitor bank at YingShuiQiao traction substation for example, this paper proposes a new device used for dynamic shunt reactive power compensation in traction substation. The basic structure of the device is discussed. Its commissioning and operation are presented. The waveforms of filter bank and reactor bank and the compensation effect are given. The results show that the device has a good compensation effect.

**Key words:** traction substation; dynamic reactive power compensation; shunt reactive power compensation; synthesized reactive power compensation