

# 牵引变电所智能过零投切补偿 系统的研究与开发

温建民

(铁道部第四设计院 电气化设计研究处, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 提高牵引变电所(简称牵引变)功率因数以改善系统电压质量、减少系统损耗是改善电气化铁路电能质量的有效措施。分析了我国牵引变在无功补偿和谐波治理上采用的 6 种方案后, 采用带降压变压器的晶闸管投切电容器方案。牵引变可调并联电容补偿系统由补偿支路、采集支路和微机控制支路组成。论述了各支路的设计, 该系统具有根据无功量的大小自动补偿、结构简单、工作稳定、方便等特点。通过铁路牵引供电系统的现场试验结果表明, 所设计的补偿系统在正常运行时, 能保证所补偿的对象全天内的平均功率因数达到 0.9 以上, 满足电力系统要求。

**关键词:** 牵引变电所; 智能过零投切; 补偿方案; 晶闸管阀组

中图分类号: TM 721.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)05-0075-04

## 0 引言

通常, 交流电气化铁道的机车负荷是一种急剧变化、随机性的单相负荷, 电力牵引负荷具有波动范围大、功率因数低、谐波含量丰富等特点, 加之电力部门实行无功计量的“反送正计”, 使得传统的固定补偿模式下牵引变电所(简称牵引变)的功率因数大幅下降, 尤其是运量小、无负荷和轻负荷概率较大的区段, 过补偿十分突出。而目前我国电业部门电气化铁路用户的用电价格, 根据其功率因数的高低进行奖励与处罚, 当功率因数为 0.9 时, 不奖不惩按正常电价收费; 当功率因数低于 0.9 时, 增收电费; 当功率因数高于 0.9 时, 减收电费<sup>[1]</sup>。牵引变在无负荷和轻负荷概率较大的区段, 投入固定并联电容补偿后, 功率因数比不投时还低, 无法达到经济功率因数的要求。提高牵引变功率因数以改善系统电压质量、减少系统损耗是改善电气化铁路电能质量的有效措施, 采用动态跟踪可调补偿方式, 提高牵引变功率因数已是一个很迫切的问题<sup>[2]</sup>。在调研国内外主要无功补偿方案的技术特点和实用性的基础上, 提出一种智能过零投切并联电容器的补偿方法, 该方法既能提高电能质量, 投资又不至大幅上升。分析和试验结果表明, 该方法切实可行、装置易于实现和具有较好的应用前景。

## 1 无功补偿方案现状分析

近几年, 我国电气化铁道变电所无功补偿与谐波综合治理提出了多种方案, 无论哪种方案, 都是力求在基波下补偿牵引负荷的感性无功功率, 提高功

率因数, 并滤除(或抵消)指定谐波, 具体有如下 6 种方案。

**a. 真空断路器投切电容器。**该方案最大的优点是简单、投资省。缺点是合闸时, 投切滤波支路有一个暂态过程会产生过电流、过电压, 影响电容器及串联电抗器的可靠运行<sup>[3]</sup>; 切除滤波支路时, 触头上恢复电压较高, 有开关重燃的可能, 多次重复击穿时, 电容器上产生很高的过电压致使设备损坏。另外, 对电容器组的投切冲击, 国际电工技术委员会(IEC)规定每年不超过 1000 次, 加之开关寿命的限制, 不能频繁投切, 从而影响动态补偿效果。

**b. 无源补偿器+有源补偿器。**采用有源滤波器产生与负荷中谐波电流相位相反的谐波电流, 使其相互抵消满足电源的总谐波电流的要求<sup>[4]</sup>。比较理想的是无源、有源混合滤波器, 它能扬长避短, 充分利用无源补偿的大容量和有源补偿的灵活性、可控性, 但其结构复杂、造价高、运行费用高, 且这一技术正处于研究阶段, 技术尚未成熟。

**c. 固定滤波器(FIX) + 晶闸管调节电抗器(TCR)。**固定滤波器按谐波要求设计, 反并联晶闸管与电抗器串联, 通过改变晶闸管导通角调节流入回路的感性电流, 使其与并联滤波器中多余的容性无功功率得以平衡, 满足功率因数的要求。优点是固定并联滤波支路长期投入, 不需投切, 任何时候都能满足谐波设计要求, TCR 响应速度快、调节性能好, 缺点是 TCR 也产生谐波、有损耗、造价高<sup>[5]</sup>。

**d. 固定滤波器+可控饱和电抗器。**自动调节饱和电抗器磁饱和程度改变流入回路的感性电流, 使其与并联滤波器中多余的容性无功功率得以平衡。优点是固定并联滤波支路长期投入, 不需投切, 实现光滑可调; 但同 TCR 一样要产生谐波, 损耗较大, 噪声大<sup>[6]</sup>。

**e. 晶闸管投切电容器(TSC)。**按照一定的寻优模式,设计多组某次或某几次滤波器,基波下各支路呈容性,分级改变补偿装置的无功出力<sup>[7]</sup>;滤波器某次谐波下偏调谐,兼滤除该次谐波。优点是损耗小、结构简单、速度响应快、不产生谐波,可以实现过零投切,不会产生像真空开关那样严重的过电压,缺点是每级都配相应的晶闸管,滤波效果受系统特性和投入组数的影响<sup>[8]</sup>。

**f. 固定滤波器+电容器(TC)、电抗器(TL)调压。**按照负荷平均无功功率和滤波要求设计固定多次单谐滤波器容量,适当在电压调节支路分别配置一定容量的电抗器和电容器组。当欠补偿时,通过分级调节并联电容器组的端电压,输出适量感性无功;过补偿时,同样分级调节并联电抗器的端电压,使其输出容性无功。在整个过程中,实现无功平衡,同时有效滤波。调节时,用晶闸管通断,分接开关无载调节,利用分接开关的机械寿命和晶闸管的电气寿命。该方案结构复杂、一次性投资大<sup>[9]</sup>。

针对我国电气化铁路的特点,技术经济较适合的方案是晶闸管投切电容器补偿方案,带降压变压器及分接开关的晶闸管投切电容器方案投资最少,而且其损耗小、结构简单、速度响应快、不产生谐波和适合电气化铁路的要求。

## 2 并联电容补偿系统设计

电气化铁路牵引变电所采用带降压变压器的晶闸管分级投切电容器方案,开发利用晶闸管作为无触点开关投切电容器的快速动态无功补偿系统。该系统基于对牵引网无功功率等电气量的实时监测,动态地补偿功率因数及谐波滤波。补偿方式为自动跟踪投切式,将总补偿容量分为若干组,根据负荷的变化快速自动投入必要的补偿量。

可调并联电容补偿系统由补偿支路、采集支路和微机控制支路3部分组成。其中,补偿支路由真空断路器、晶闸管阀组、电抗器和电容器组组成。采集支路由电压互感器(TV)、电流互感器(TA)、模/数转换芯片组成。微机控制支路由测控屏控制器、报警电路、触摸屏等组成。整个系统原理框图如图1所示。

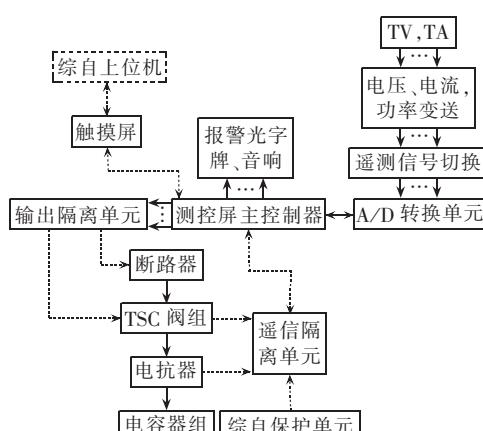
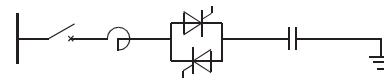


图 1 系统原理框图

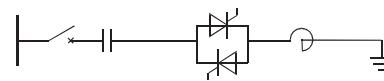
Fig.1 Block diagram of system

### 2.1 补偿支路设计

补偿支路由断路器、TSC 阀组、电抗器、电容器组组成。TSC 阀组依据测控屏控制器的控制信号决定打开后应关闭哪组补偿电路。每组中基本的补偿电路由电容器、电抗器组成,基本的接线方式如图 2 所示。



(a) 电抗器前置



(b) 电抗器后置

图 2 补偿支路的两种常用接线方式

Fig.2 Two common connect modes of compensation circuit

电抗器后置电路存在 2 个问题。

**a.** 在电抗器后置接线中,当串联电抗器与电容器连接线发生对地短路时,串联电抗器被旁路,使滤波器支路阻抗增大,造成短路电流小于滤波器正常工作电流,以致继电保护系统无法识别这种短路故障而形成保护死区。

**b.** 在电抗器后置接线中,一旦发生电容器组被全部击穿,串联电抗器同样将承受短路电流和电源电压。如果这种情况发生时,串联电抗器动、热稳定要求与断路器相同,其额定电压也应为电源额定电压,这样就使得对电抗器的要求提高、成本增加、给实现造成困难<sup>[10]</sup>。

考虑设备工作和继电保护的可靠性,本设计采用电抗器前置方案,而且将晶闸管开关置于电容器与电抗器之间。补偿支路的电气设备连接依次为电源母线、断路器、电抗器、晶闸管开关、电容器和接地线。

### 2.2 采集转换支路设计

牵引电网信号电压、电流经过一次互感器变成 0~100 V 和 0~5 A 的交流电压、电流,本系统将一次互感器变换的交流电压、电流通过系统二次互感器,变换成 0~2.5 mA 的交流电流,后经标准调节电路调成峰-峰值为 5 V 的电压。经过转换后的电压带有一次和二次回路的干扰,因此,再将此电量经 RC 滤波后送入 AD 转换器采样变换。其电路原理如图 3 所示。

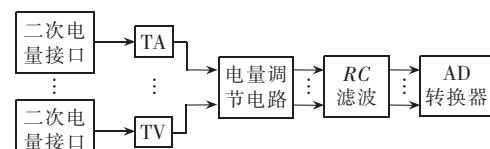


图 3 数据采集原理图

Fig.3 Schematic diagram of data acquisition

每路电量输入后,经放大、RC 滤波,放大整形成峰-峰值为 0~5 V 的交流电压,送入 2 片 AD 转换器

实现  $2 \times 8$  路模拟量采集。每片 AD 转换器完成  $2 \times 4$  路模拟输入电量的同时采样, 分时转换。

正常情况下, 控制器读取 AD 转换后的数据进行数据处理, 此数据 DSP 可计算出电流、电压的有效值、有功功率、无功功率及功率因数, 并通过显示屏实时显示计算的数据, 实现有功功率和无功功率的实时在线检测及显示, 过电压、过电流的检测及其报警等功能, 而且控制器也将根据这些信息作出是否投切电容器组进行补偿的决定。

### 2.3 微机控制支路设计

微机控制支路由测控屏控制器、报警电路、触摸屏等组成。该支路中触摸屏和测控屏主控制器主要完成对 AD 采集数据的分析, 计算此时的无功功率、有功功率, 并将分析计算结果显示在屏上, 基于计算分析的结果进行动态调整, 从而控制无功功率输出的大小, 使功率因数达到要求; 除此之外, 主控制器还能接收来自综自上位机的控制信息, 并对上位机控制信息作出响应。

微机采用昆仑通态生产的 TCP 105-TC 33 嵌入式-触摸式液晶屏系统, 是一套以嵌入式低功耗 CPU 为核心(主频 200~300 MHz)的高性能的嵌入式一体化液晶触摸屏控制系统, 判断是否投切电容器组的软件部分是基于该系统内部嵌入式芯片, 该芯片工作的主频是 200~300 MHz。设计使用 10.4 英寸高亮度薄膜晶体管(TFT)液晶显示屏, 4 线电阻式触摸屏, 具有电磁屏蔽性好、美观坚固的铝合金结构外壳, 同时, 预装嵌入式实时多任务操作系统 WINCE 和嵌入版组态软件。该系统应用软件使用通用监控系统(MCGS)嵌入版组态软件开发, MCGS 嵌入版包括组态环境和运行环境 2 部分, 它的组态环境能够在基于 Microsoft 的各种 32 位 Windows 平台上运行, 运行环境则是在实时多任务嵌入式操作系统 Windows CE 中运行, 适应于应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗等综合性能有严格要求的专用计算机系统。

### 3 并联电容补偿系统的特 点及功能

牵引变电所并联电容补偿系统通过控制电容器组的投切达到提高牵引电网功率因数的目的, 其功能特点如下:

- a. 具有根据无功量的大小自动补偿功能, 结构形式简单、维护方便;
- b. 利用可编程逻辑控制器(PLC)和工业控制计算机构成的投切测控系统, 保证了系统工作的可靠性和稳定性;
- c. 串联晶闸管阀组作为开关, 采用热管自冷散热及光电触发技术, 使用寿命长;
- d. 采用智能过零投切技术, 实现无功补偿量(电容器)的自动无冲击快速过零投入和切除, 提高功率因数并滤除谐波, 有利于电网的稳定工作。

该装置除实现提高牵引电网的功率因数之外, 还可实现对牵引电网的实时监测, 具体表现如下:

- a. 有功功率和无功功率实时在线检测及其显示;
- b. 过电压、过电流的检测及其报警;
- c. 故障的自诊断及其保护、报警。

### 4 试验结果

试验分析采用在现场作试验的方式, 对实际得到的数据分析, 验证本设计是否能满足功率因数提高的要求。试验线选定在石—怀线中的张家界—后坪段, 石—怀线为单线电气化铁路, 每天通过 25 对列车, 张家界变电所牵引变压器采用 V/V 接线。张家界—后坪供电臂牵引变压器容量为  $10 \text{ MV}\cdot\text{A}$ , 短路电压比为 10.5 %, 110 kV 侧系统短路容量暂定为  $500 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。供电示意图如图 4 所示, 其中张家界至后坪供电臂负荷参数见表 1, SS<sub>3B</sub> 机车功率因数为 0.78; 另一供电臂较短, 本次可调功率补偿试验暂不考虑。

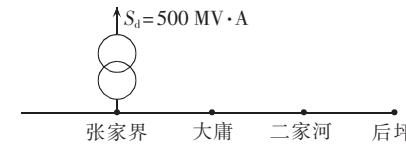


图 4 牵引变电所供电示意图

Fig.4 Power supply of a traction substation

表 1 牵引变电所牵引计算基本数据

Tab.1 Basic data of the traction substation

线路	$E_{UL}/(\text{kV}\cdot\text{A}\cdot\text{h})$	$t_{UR}/\text{min}$	$E_{DL}/(\text{kV}\cdot\text{A}\cdot\text{h})$	$t_{DR}/\text{min}$
张家界—大庸	391.25	2.62	416.76	4.75
大庸—二家河	228.27	1.64	657.02	6.66
二家河—后坪	392.39	3.71	767.18	8.53

注:  $E_{UL}, E_{DL}$  分别为上/下行能耗;  $t_{UR}, t_{DR}$  分别为上/下行带电运行时间。

本试验方案是在张家界至后坪供电臂上设置 2 组本文设计的补偿系统, 实施可调无功补偿。对应不同的补偿容量, 当张家界至后坪供电臂出现 1 列车、2 列车、3 列车时, 测得补偿后臂负荷功率因数以及张家界变电所全天平均功率因数如表 2 所示。

表 2 补偿后功率因数表

Tab.2 Tested power factors after compensation

补偿容量/kvar	1 列车	2 列车	3 列车	全天
2222	0.944	0.868	0.839	0.925
2422	0.958	0.876	0.844	0.936
2630	0.968	0.883	0.849	0.947
2845	0.978	0.892	0.855	0.957
3070	0.986	0.900	0.861	0.976

根据以上数据可知: 在系统无功最小补偿容量为 2222 kvar, 分成 2 组后, 每组并联电容无功补偿容量为 1111 kvar, 可将张家界牵引变电所日平均功率因数从补偿前的 0.78 提高到 0.92。经过实际测量和计算得出张家界牵引变电所在日平均功率因数达到 0.90 以上, 满足电力系统对于功率因数的要求。

## 5 结语

本文设计开发了适用于牵引变电所一种对牵引网电容器投切的快速动态无功补偿系统,该系统损耗小、采用智能过零投切技术,响应速度快,可以实现电容器的无冲击投切、体积小,而且具有良好的人机对话接口便于现场查看。同时,基于现场的试验结果,表明所设计的补偿系统在正常运行时,能保证所补偿的对象在全天内的平均功率因数达到0.9以上,满足电力系统对功率因数的要求。

## 参考文献:

- [1] 唐卓尧,任震. 并联型混合滤波器及其滤波特性分析[J]. 中国电机工程学报,2000,20(5):25-29.  
TANG Zhuo-yao, REN Zhen. Hybrid filter connected in series APF with PF and compensating characteristic analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2000, 20(5): 25-29.
- [2] 任震,余得伟,唐卓尧. 基于模糊优化设计的混合滤波器——治理电气化铁道谐波的一种新方法[J]. 中国电机工程学报,2001,21(2):66-68.  
REN Zhen, YU De-wei, TANG Zhuo-yao. A new method for eliminating harmonics of electrified railway with hybrid filter based on the fuzzy optimizing design [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(2): 66-68.
- [3] 李群湛,贺建闽. 无功补偿装置:中国,ZL01214571.8[P]. 2002-04-24.
- [4] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [5] 李群湛. 电气化铁道并联综合补偿及其应用[M]. 北京:中国铁道出版社,1993.
- [6] ZHANG Li, LI Qun-zhan. Application of TSC in reactive compensation in traction substation[C]// *Proceeding of IWADS2000*. Beijing: IEEE Computer Society Compress, 2000: 149-153.
- [7] 邱宇,陈学允. 用于静止无功补偿器的非线性PID控制器[J]. 中国电机工程学报,2002,22(11):41-44.  
QIU Yu, CHEN Xue-yun. The new nonlinear PID controller for SVC[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2002, 22(11): 41-44.
- [8] 宋玉秋,李林川,张海波,等. 考虑静止无功补偿器及故障运行方式的电力系统无功补偿优化[J]. 电网技术, 1999, 23(6): 44-46.  
SONG Yu-qiu, LI Lin-chuan, ZHANG Hai-bo, et al. Optimal planning of reactor power compensation in electrical power system considering SVC and fault condition [J]. *Power System Technology*, 1999, 23(6): 44-46.
- [9] 黄纯,彭建春,江辉,等. 谐波滤波、电压、无功综合控制装置的研制[J]. 电网技术, 2000, 24(3): 50-52.  
HUANG Chun, PENG Jian-chun, JIANG Hui, et al. Development of an integrated controller for harmonic filtering, voltage and reactive power control [J]. *Power System Technology*, 2000, 24(3): 50-52.
- [10] 陈柏超,陈维贤. 超高压可控电抗器限压特性及谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(2): 122-125.  
CHEN Bai-chao, CHEN Wei-xian. Voltage restraining characteristic and harmonic analysis of high-voltage controller reactor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 1997, 17(2): 122-125.

(责任编辑:汪仪珍)

## 作者简介:

温建民(1966-),男,江西瑞昌人,副总工程师,高级工程师,主要从事铁道电气化系统的设计和管理工作(E-mail: wjm708@126.com)。

## Intelligent zero-cross-switching shunt capacitor compensation system in electrified railway traction substation

WEN Jian-min

(Electrification Design & Research Department of the Fourth Survey & Design Institute of China Railways, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** Increasing power factor of traction substation is the effective measure to improve power quality of electrified railway for better voltage quality and less loss. Six schemes of reactive power compensation and harmonic suppression are analyzed, based on which, the cascaded thyristor-zero-cross-switching capacitor compensation with step-down transformer is adopted. The adjustable shunt capacitor compensation system consists of compensation circuit, acquisition circuit and microcomputer control circuit, and the design of each circuit is discussed. The system is simple, stable and convenient, which automatically compensates according to the reactive power variation. Field test in railway traction substation shows that, with the designed compensation system in operation, the daily mean power factor is over 0.9.

**Key words:** traction substation; intelligent zero-cross-switching; compensation scheme; IGBT group