

## 江西移动式 SVC 装置的现场调试试验

范瑞祥<sup>1</sup>, 孙 旻<sup>1</sup>, 赵 刚<sup>2</sup>

(1. 江西省电力科学研究所, 江西 南昌 330096; 2. 中国电力科学研究所, 北京 100085)

**摘要:** 结合国内首套移动式静止型动态无功补偿(SVC)装置在江西电网实施的工程经验,根据现场的实际情况,分别就设备及子系统试验和系统调试验收试验两方面,详述了现场调试方法,给出了试验结果,提出了试验中的一些关键点和注意事项。文中获取的一些经验和结论可为 SVC 装置在我国电网中的进一步推广应用提供有益的指导和借鉴作用。

**关键词:** 移动式静止型动态无功补偿; 现场试验; 系统调试

**中图分类号:** TM714.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1609(2009)04-0155-04

## Field Debugging of Relocatable Static Var Compensator in Jiangxi Province

FAN Rui-xiang<sup>1</sup>, SUN Min<sup>1</sup>, ZHAO Gang<sup>2</sup>

(1. Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China)

**Abstract:** According to the project experience of the first relocatable static var compensator application in Jiangxi China, a series of testing methods have been described. Field debugging test result data have been presented in detailed for subsystem testing and system commissioning. Some key principles and attentions are also drawn from it. The conclusions obtained in this paper will be benefit for the application of SVC in China power grid.

**Key words:** relocatable static var compensator(RSVC); field tests; system commissioning

## 0 引言

近年来国内静止型动态无功补偿(SVC)技术得到了飞速发展<sup>[1,2]</sup>,在钢厂等冲击性负荷中的应用屡见不鲜<sup>[3,4]</sup>。SVC 在我国电力系统中的应用才刚刚起步,虽有几个电力系统 SVC 工程投入运行,但公开发表可供参考的相关资料比较有限,且大多是以控制仿真和稳定分析为主<sup>[5-8]</sup>,涉及具体工程系统化完整的实施、系统调试等方面的资料极少。

作为国网公司的重点项目,江西省电力公司与中国电科院合作的国内首套移动式 SVC (RSVC)装置已在江西赣州 220 kV 金堂变电站成功投运,笔者通过总结该装置在江西电网实施的工程经验,提出较完整的现场调试试验方案,阐述了其中的一些重要原则和注意事项,其结论可为类似装置在我国电力系统中的推广提供一定的参考作用。

## 1 赣州移动式 SVC 的基本概况

在装置设计阶段,经论证近期在江西电网赣州金堂 220 kV 变电站安装 SVC 装置将具有比较好的效益,但为提高装置应用的灵活性,采用移动式设

计,除相控电抗器和滤波支路本体外,将晶闸管阀体、水冷系统和监控系统紧凑安装在一集装箱内,使之具备整体移动能力。

RSVC 设计输出的动态无功容量为-50 Mvar(感性)~+79Mvar(容性)。装置充分利用变电站原有 4 组电抗率为 6%的并联电容器组,另外新增一组容量为 50 Mvar 的相控电抗器(TCR),接在 10 kV II 段母线;新增 4 组单调谐滤波器,其中两组 3 次滤波器分别装设于 10 kV I、II 段母线,两组 5 次滤波器均装设于 10 kV II 段母线,系统主接线图见图 1。新增的两组 3 次滤波器和两组 5 次滤波器与原有的 4 组电容器构成 8 组采用断路器自动投切的容性补偿支路,与额定基波输出容量为 50 Mvar 的 TCR 共同构成 SVC 进行变电站的动态电压调节。电压调控方面在兼顾 10 kV 电压的基础上以 220 kV 系统电压为控制目标,通过协调控制 TCR 感性输出及投入的容性补偿支路数来调控系统电压。

## 2 赣州 RSVC 现场试验与应用

通过进行 SVC 现场调试,可确保安装就位的 SVC 装置达到设计的性能要求。SVC 现场调试总体上可分为设备及子系统试验和系统调试两大部分。

收稿日期:2008-10-29; 修回日期:2009-01-23

作者简介:范瑞祥(1977),男,博士,主要从事电力系统谐波抑制与无功补偿技术的研究和电能质量的管理工作。

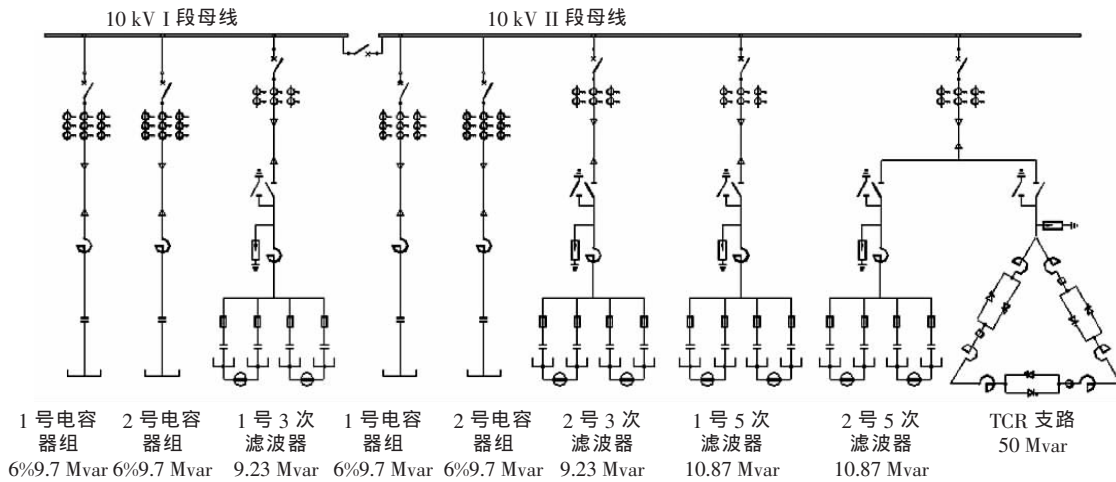


图1 赣州金堂变R SVC主接线图

设备及子系统试验是指在 SVC 主电路带电之前对设备及子系统所进行的试验；而系统调试是在 SVC 主电路带电情况下对 SVC 系统的规定性能进行检验和验证的试验。整个 SVC 系统调试对象包括 3 次和 5 次滤波器组、无功补偿电容器组、TCR 阀组、上位监控系统、微机保护、调节监控系统、故障录波、水冷系统、交直流馈电等。

2.1 设备及子系统试验

设备及子系统试验的项目主要包括设备及接线检查、模拟通道校验、开关量输入及开关传动试验、监控单元试验、水冷系统试验、阀及触发系统试验、低压自动投切逻辑试验、新增滤波支路调谐试验以及 TCR 阀体和新增滤波支路工频耐压试验。

移动式 SVC 由于其装置集成度比较高，在现场安装之前即可进行较为充分的单子系统调试，因此真正现场试验调试的工作量得以降低，将以系统联调和性能验证为主，设备及子系统试验的重点也主要放在阀及触发系统试验、低压自动投切逻辑试验和新增滤波支路调谐试验上，以下结合实际经验逐一进行介绍。

在进行阀及触发系统低压试验之前，必须先测量低压阀体均压系数  $U_k$ ，并确保其在 90% 以上，表 1 所示即为赣州 R SVC 的单相实测数据。其具体测试方法为对整个阀串施加 380 V 电压，测量每个阀的电压，以确保每个阀体都能均衡分压。测试中  $U_k$  表示为

$$U_k = \frac{\sum U_{AK}}{n_s U_{AKM}} \quad (1)$$

式(1)中， $\sum U_{AK}$  为所有串联晶闸管承受的电压总和， $U_{AKM}$  为所有串联晶闸管中分担最大电压的数值， $n_s$  为单相串联器件数。对应表 1 中， $\sum U_{AK}=408.1 V$ ，

表 1 低压阀体均压系数测试数据表

阀串	电压/V	阀串	电压/V
阀 1	54.6	阀 5	61.9
阀 2	59.6	阀 6	55.3
阀 3	59.9	阀 7	55
阀 4	61.8		

$U_{AKM}=61.9 V, n_s=7, U_k=94.18\%$

$U_k$  满足要求之后，须在手动触发模式下，由就地工作站 SVC 监控程序发送特定的触发角度，观察阀端的电压波形，确保该触发角度和测量得到的实际触发角度一致或基本一致。考虑到 TCR 触发角的实际调整范围为  $110^\circ \sim 165^\circ$ ，赣州 R SVC 的调试试验中，在 380 V 电压下由  $165^\circ$  降至  $110^\circ$  每隔  $5^\circ$  依次手动发出触发角度，测量获得的触发角对应的时间数据见表 2。

表 2 低压手动触发数据表

触发角/ $^\circ$	测量触发时间/ms	理论触发时间/ms	误差率/%
165	0.85	0.833	2
160	1.10	1.111	0.99
155	1.37	1.389	1.37
150	1.67	1.667	0.17
145	1.92	1.944	1.23
140	2.22	2.222	0.09
135	2.50	2.500	0
130	2.75	2.777	0.97
125	3.02	3.056	1.18
120	3.30	3.333	0.99
115	3.57	3.611	1.14
110	3.82	3.889	1.77

低压自动投切逻辑试验是根据所制定的控制策略，检查在各种不同状况下 SVC 容性补偿支路的自动投切逻辑是否正确，作为在接入高压之前对系统的自动投切和联跳逻辑所作的最后验证，需要模拟现场可能出现的各种意外情况。江西赣州 R SVC 调

试中就加入了各次滤波和 TCR 支路装置维护或故障退出时的各种自动投切和联跳逻辑验证。

正常情况下 SVC 必须保证先投低次滤波支路,后投高次滤波支路,最后投入电容器组,即依次为 II 母 3 次 2 号滤波支路、II 母 5 次 1 号滤波支路、I 母 3 次 1 号滤波支路、II 母并联 3 号电容器、I 母 1 号并联电容器、II 母 4 号并联电容器和 I 母 2 号并联电容器。切除顺序则正好相反。另外根据事先的谐波检测和核算,赣州 RSVC 还必须确保 TCR 支路投入时至少有一条 5 次滤波支路处于工作状态,否则为避免谐波放大必须自动切除 TCR 支路,基于同样原因,当 3 次滤波支路退出运行时,各条母线只允许分别投入一条固定电容支路。

对新增滤波支路进行调谐,确保支路调谐频率在谐振的基础上稍偏感性以避免和系统发生谐振,同时又保证较好的滤波效果。首先通过测量或根据铭牌确定各滤波支路 A、B、C 三相电容初值;而后测量滤波支路 A、B、C 三相电感初值;接下来根据式(2)计算各条滤波支路的实际谐振频率  $f_n$ ,确保各条支路  $f_n$  的在通过经验或系统谐波计算所得的表 3 所示的范围之内,否则对滤波支路的各相电感值进行微调。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_{\text{实}} C_{\text{实}}}} \quad (2)$$

表 3 谐振频率误差表

滤波支路	频率上限/Hz	频率下限/Hz
2 次支路	98	97.02
3 次支路	147	145.53
4 次支路	196	194.04
5 次支路	245	242.55
6 次支路	194	291.06
7 次支路	343	339.57
8 次支路	392	388.08
9 次支路	441	436.59
10 次支路	490	485.10
11 次支路	539	533.61
12 次支路	588	582.12
13 次支路	637	630.63
14 次支路	686	679.14
15 次支路	735	727.65

通过适当调整,江西赣州 RSVC 的 3 次和 5 次滤波支路实际谐振频率  $f_n$  都保证在频率范围 145~147 Hz 及 242~245 Hz 之间。

## 2.2 系统调试试验

系统调试试验主要包括合闸冲击试验、TCR 手动触发及温升试验、容性支路自动投切试验和调节性能验证试验。

在具体试验方案制定之前,为确保调试期间的系统稳定和电压质量,还需就调试方案进行详细的仿真核算。以江西赣州 RSVC 为例,事先采用 PSASP 程序对调试期间系统的运行方式进行了仿真计算,

力求获得以下一些数据和结论:不同运行方式下,容性支路投切导致主变三侧电压的大致变动范围,以便对实际调试结果进行验证;验证在不同调试工况下为保证电压质量必须采取的措施;仿真计算通过改变线路、主变状态来改变 220 kV 母线电压的各种方式,从中优选一种最利于展示 SVC 电压自动调节效果又能确保系统稳定性的方法。

在仿真核算基础上确定调试方案,随后进行合闸冲击试验,其目的是验证新增支路在额定运行条件下的运行能力。一般合闸冲击 3 次,每次间隔 5 min 左右。试验中必须确保装置避雷器没有动作、无异常合闸涌流和明显谐波放大,同时应记录投切时主变各侧的电压变化,此值应与理论计算或是类似装置的实际情况基本相符。新增 TCR 支路同样也需进行合闸冲击试验,但在此步骤中必须闭锁其触发脉冲,并使装置中的水冷系统开始正常工作,以验证 TCR 支路在额定电压、无电流情况下的耐压能力。表 4 为赣州 RSVC 3 次 2 号滤波支路合闸时的试验数据。

表 4 3 次 2 号滤波支路试验数据表

系统状态	1 号、3 号电容器已投	投入 2 号 3 次滤波器
基波/kV	10.29	10.63
3 次谐波/%	0.714	0.076
5 次谐波/%	0.557	0.440
7 次谐波/%	0.302	0.224
THD/%	1.072	0.611

TCR 支路合闸冲击试验完成之后,解除其触发脉冲闭锁,即可进入 TCR 手动触发及温升试验。主要方法为手动由大至小逐级调节晶闸管阀组触发角至 TCR 支路达到满载,持续运行一段时间,用以验证新增 TCR 支路在额定电压、额定电流运行条件下的耐压能力、通流能力、温升情况以及水冷却能力和各种触发状态下的谐波状况。赣州 RSVC 实际调试中典型触发角设置为 165°、150°、140°、130°、120°、115°、110°,每个角度维持 10 min,而后 TCR 维持 110°额定触发角运行至温升稳定,维持时间为 4 小时,以检查 TCR 支路长期大电流运行的能力。在此期间需进行电压、电流、水冷系统参数、阀体和相控电抗器温度等关键参数的记录,确保无异常情况出现。触发和温升试验数据见表 5。

由表 5 可知,随着 TCR 触发角的减小,流经支路的电流越来越大,电抗器和阀体的温度也将迅速上升,在维持大电流运行的情况下,冷却系统供、回水温均保持在 30℃ 左右,比较稳定,电抗器温度和阀的本体温度也变化不大。值得注意的是,受涡流影响相控电抗器温度最高点处于上下层的中心位置,必须重点测量,而对装置各连接点处的温度也需加以观察,以确保在各连接处的紧密性方面不会出现问题。

TCR 手动触发及温升试验完成之后即可进行容性支路自动投切试验,其目的是验证 SVC 装置通

表 5 RSVC 触发和温升试验数据表

触发角度	触发试验							温升试验			
	165°	150°	140°	130°	120°	115°	110°	1 h	2 h	3 h	4 h
母线电压/kV	10.46	10.2	10.4	10.6	10.0	10.2	10.3	10.25	10.24	10.15	10.3
角内电流/A	29.20	179.0	390.0	664.0	1 016.0	1 247.0	1 479.0	1 480.00	1 493.00	1 476.00	1 499.0
供水温度/°C	27.20	28.0	30.8	30.5	25.8	28.0	28.0	28.70	29.10	28.90	28.6
回水温度/°C	28.30	31.1	31.6	31.7	29.4	31.6	32.1	32.60	33.00	32.80	32.5
L 最高温/°C	8.00	9.1	15.9	37.2	71.0	80.0	90.0	107.00	109.00	109.00	109.0
阀最高温/°C	19.20	22.0	20.0	22.0	24.0	31.0	31.0	31.00	31.00	32.00	31.0

过自动投切 10 kV 容性支路以稳定 220 kV 母线电压的功能。具体试验方法为将系统设置为自动调节方式,且令 TCR 支路退出运行或不参与自动控制,而后根据 220 kV 母线电压高低,设置 220 kV 电压控制曲线、电压控制死区、电压控制时间间隔,使当前 220 kV 母线电压位于电压控制曲线允许范围(死区)内,以验证在限值范围内系统保持原有投切状态;接着重新设置 220 kV 电压控制曲线,使 220 kV 电压参考值大于当前 220 kV 母线电压允许运行区间,监视容性补偿支路的投切状态以及投切前后主变三侧电压,直到在设置的时间间隔上投入 2 组容性支路为止,从而验证支路根据电压限值自动投入的性能;最后再次重新设置 220 kV 电压控制曲线,使 220 kV 电压参考值小于当前 220 kV 母线电压允许运行区间,监视容性支路的投切状态以及投切前后主变三侧电压,直至容性支路在设置的时间间隔上切除已投入的 2 组为止,从而达到验证 SVC 系统根据电压限值自动切除容性补偿支路的能力。

以上试验完成之后即可进行最后的调节性能验证试验,主要是通过改变系统的运行方式使得 220 kV 电压出现瞬间波动,此时验证 SVC 系统的电压调整能力,尤其是 TCR 支路的快速响应性能。

依据前期的系统仿真计算并结合现场的实际负荷情况,江西赣州 RSVC 调试过程中采用的是断开一条 220 kV 联络线虎金线,使得 220 kV 电压迅速产生向下波动,此时根据控制策略 TCR 输出电流立即由 1 000 A 下降为 800 A 左右以提升电压,响应波形见图 2。波形显示系统响应速度是令人满意的。由于 TCR 出力的改变使得系统 220 kV 电压很快恢复到定值设定的水平,从而未出现容性支路投切的现象,进一步验证了 SVC 用于动态无功调节和电压支撑的优越性。

### 2.3 RSVC 在赣州金堂变的应用

现场试验和调试项目基本完成之后,江西赣州金堂变 RSVC 进行了 72 h 的试运行,期间全程监测了系统运行状况和相关电能质量数据,未发现异常情况。

目前江西赣州金堂 220 kV 变电站移动式 SVC 已投入正常运行,表 6 所示为值班人员抄录的部分系统运行数据,显然装置性能是比较令人满意的。

## 3 结语

笔者结合江西省赣州金堂 220 kV 变电站移动式

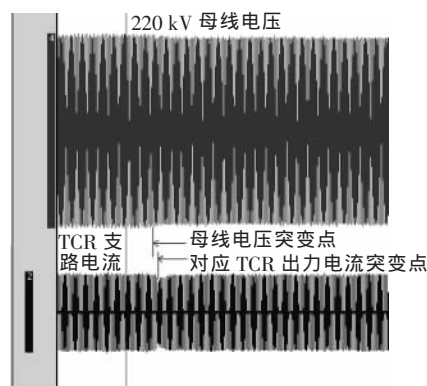


图 2 调节性能试验录波波形

表 6 SVC 装置运行情况表

时间	投入容性支路	TCR 感性无功/kVar	10 kV 电压/kV	220 kV 电压/kV	220 kV 控制目标/kV
10:00	6 条	35 110	10.50	228.59	230
11:00	6 条	35 010	10.56	227.30	230
12:00	4 条	35 270	10.26	230.53	230
13:00	4 条	25 210	10.40	225.16	228
14:00	4 条	20 320	10.55	225.37	228
15:00	4 条	18 020	10.20	225.59	228
16:00	5 条	25 600	10.64	229.24	228
17:00	5 条	23 240	10.55	226.02	228
18:00	5 条	24 870	10.54	228.20	227

SVC 的工程实例,针对项目特点,提出一套较为完整的调试试验方法,从设备及子系统试验和系统调试验收试验两方面详述了试验过程和试验结果,获取的经验和数据可作为类似装置在电网中应用的参考。

## 参考文献:

- [1] 罗安.电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M].北京:中国电力出版社,2006.
- [2] 王兆安,杨君,刘进军.谐波抑制与无功功率补偿[M].北京:机械工业出版社,1998.
- [3] 翁利民,张广祥,曾莉.武钢硅钢 SVC 的研制与实际效果的评价[J].电力系统自动化,2000,21(10):39-42.
- [4] 刘玉雷,解大,张延迟.静止无功补偿器用于抑制厂用电系统电压波动仿真[J].电力系统自动化,2006,30(16):97-101.
- [5] 苏建设,乔颖,陈陈.含 SVC 的组合电力系统动态建模及稳定性分析方法[J].电力系统自动化,2003,27(3):13-16.
- [6] 范瑞祥,周腊吾,肖红霞.基于瞬态值的 SVC 无功及负序补偿算法[J].高压电器,2004,40(4):9-11.
- [7] 柯宁,苏建设,陈陈.TCSC 与 SVC 用于提高输电系统暂态稳定性的仿真研究[J].电力系统自动化,2004,28(1):20-23.
- [8] 黄燕艳,高亚栋,杜宾.SVC 对限制超高压输电系统工频过电压的影响[J].高压电器,2004,39(5):1-3.