

用于变电站电能质量调控的 D-STATCOM 及其系统调试

范瑞祥^{1,2}, 吴素农², 孙旻²

(1. 江西省电力公司博士后科研工作站 江西 南昌 330096; 2. 江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

摘要: 针对变电站动态电能质量调控的难点问题, 提出将链式结构的 D-STATCOM 与投切电容器配合使用的补偿方案, 实现变电站稳态调压与冲击性负荷谐波和无功的同时补偿。结合现场应用实例, 提出较为完整的 D-STATCOM 系统调试试验方案, 包括一般检查、绝缘与耐压试验、保护试验、无功调节范围与输出谐波测试、响应时间测试、稳态调压测试、损耗测试和负荷综合补偿测试等, 给出了较为详尽的试验数据。所得的一些经验和结论可为类似装置的设计与应用提供参考。

关键词: 配网; 电能质量; D-STATCOM; 系统调试

Distribution static synchronous compensator for power quality control in substation and its system test

FAN Rui-xiang^{1,2}, WU Su-nong², SUN Min²

(1. JXEP Post-Doctoral Research Station, Nanchang 330096, China;

2. Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China)

Abstract: For the difficulties of dynamic power quality control in substation, a compensation plan is presented in which cascade distribution static synchronous compensator (D-STATCOM) and switching capacitor work together. The method realizes the simultaneous compensation steady state for voltage regulation and impact load harmonics and reactive power. According to the application example, a complete D-STATCOM system testing and commissioning method is put forward, including the regular inspection, insulation test, protection test, reactive power regulating range and output harmonic test, responding time test, steady state voltage regulation test, loss test and load compensation test. The detailed test data are given as well. The experience and conclusion of the project provide reference for the design and application of similar equipment.

Key words: distribution network; power quality; D-STATCOM; system commissioning

中图分类号: TM76 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2011)04-0149-06

0 引言

随着电网的发展, 配网中非线性、冲击性负荷日渐增多, 其导致的电能质量问题也引起了广泛的关注。由于技术成熟、价格低廉, 目前变电站通常采用投切电容器或是无源滤波器组实施电能质量调节。由于无法实现动态调节且易出现谐波放大的问题, 在背景电能质量较差的变电站, 此类装置调控效果不佳, 且补偿电容的故障率居高不下。SVC (Static Var Compensator) 是近年来较为流行的动态补偿装置, 在变电站中也有较多的应用实例, 主要用于无功调控和变电站调压^[1-3]。由于响应速度问题, SVC 对冲击性负荷的补偿效果有限, 为治理谐波, 还需加设多组滤波支路, 不仅易出现谐振问题, 而且将导致装置的占地面积较大, 难以在配网变电

站中推广应用。基于有源补偿原理的 D-STATCOM (Distribution Static Synchronous Compensator) 在响应速度、运行范围、输出特性和占地面积等方面都具有一定的优势, 是实施配电网电能质量调控的理想设备^[4-7]。然而, 由于价格偏高, 同时技术上并不十分成熟, 在设计、评估、调试试验等方面缺乏指导性文件, 因此国内的应用实例极少。

本文针对冲击性负荷运行的时段性特点, 提出将 D-STATCOM 与投切电容支路配合用于变电站电能质量调控, 同时结合江西省配网的应用实例, 提出完整的 D-STATCOM 调试试验方案, 有助于类似装置的推广应用。

1 应用于变电站电能质量调控的移动式 D-STATCOM

配网电能质量问题通常是由于冲击性负荷的接入所引起的, 因此对补偿装置的响应速度要求较高。

基金项目: 国家电网公司科技项目 (200850602)

考虑到对补偿装置的空间与价格要求，可采用 D-STATCOM 与投切电容器组配合实施电能质量调控的方式，如图 1 所示。当冲击性负荷已配置有投切电容支路时，将电容器组和补偿负荷统一看作补偿对象，D-STATCOM 的动态控制和电容的投切控制均由 D-STATCOM 控制器统一完成。当冲击性负荷不工作时，D-STATCOM 也可通过控制电容器组投切来调控系统电压。此种方法能够充分利用有源装置响应速度快的特点，并有效弥补电容支路投切延时所带来的补偿间隙。此时 D-STATCOM 控制器并不需要增加新的控制硬件，非常适合于在原有补偿系统的基础上加以改造升级。

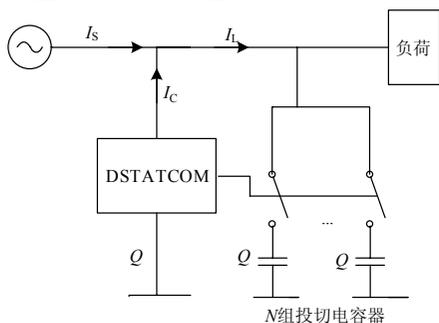


图 1 综合补偿系统构成框图

Fig.1 Diagram of comprehensive compensation system

由于钢厂等冲击性负荷用户通常会利用峰谷电价进行生产，为提高 D-STATCOM 补偿装置的性能比，必须使之同时具备应对冲击性负荷的谐波和无功的同时补偿及稳态调压功能。

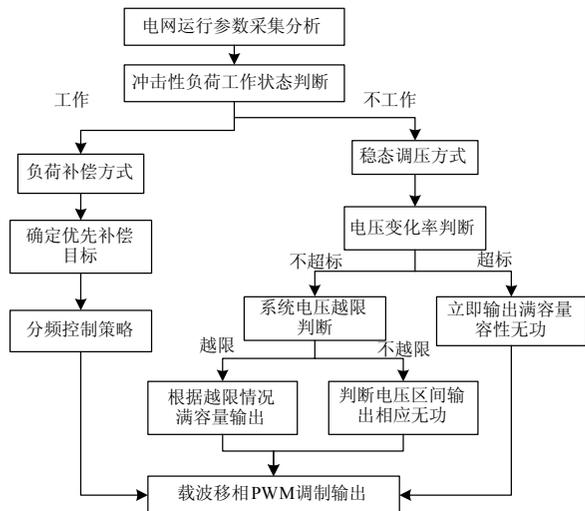


图 2 应用于变电站的 D-STATCOM 基本控制流程

Fig.2 Control flow of D-STATCOM in substation

应用于变电站的 D-STATCOM 基本控制流程如图 2 所示。通过电网运行数据采集分析，当控制系统判断主要冲击性负荷正常工作时，D-STATCOM

应用负荷补偿策略，主要用于消除负荷冲击，降低谐波及不平衡度；当电弧炉不处于工作状态时，D-STATCOM 配合变电站原有电容器作为动态电压调节装置用于稳定变电站 10 kV 母线电压，此时当系统电压突破设定的上下限或是其变化率超出设定限值时，D-STATCOM 将瞬时输出最值以稳定电压，否则将根据电压范围输出相应无功进行调整。当 D-STATCOM 进行负荷补偿时，为保证实时性和补偿效果，采用如图 3 所示的直接电流控制策略^[8]，对配网电能质量进行有重点的调控，最终通过载波移相 SPWM 方法实现补偿输出，以减小干扰谐波输出。

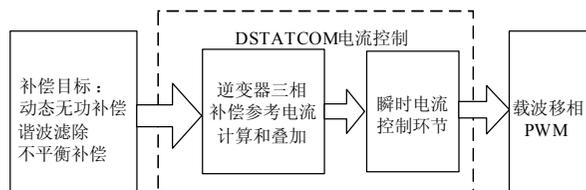


图 3 D-STATCOM 电流控制方法

Fig.3 Current control method of D-STATCOM

考虑到目前大多数变电站的面积有限，不可能有大片的空地安放补偿装置，尤其是在老站中升级补偿装置时对空间的要求更为严格，为此 D-STATCOM 采用链式主电路结构并实施了紧凑化设计。

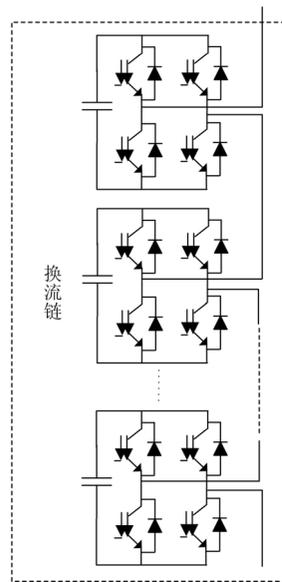


图 4 D-STATCOM 单相换流链

Fig.4 Single phase converter chain of D-STATCOM

图 4 所示为链式 D-STATCOM 的单相换流链，由多个单相桥变流单元（链节）串接构成。链节单元采用模块化设计，主要包括 IGBT 器件、IGBT 驱

动电路、直流电容、链节控制电路、链节电源等部分, 如图 5 所示。

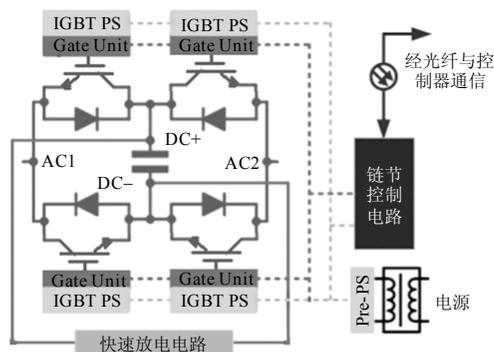


图 5 链节单元构成示意图

Fig.5 Construction graph of converter chain unit

链式 D-STATCOM 每相串接链节单元的个数与接入系统电压等级、自身连接方式和选用 IGBT 模块的额定参数有关, 可按式 (1) 计算 Y 型或是 Δ 型连接所需的链节个数。

$$\begin{cases} N_Y = \frac{\lambda \times U / \sqrt{3}}{U_d / \sqrt{2}} \\ N_\Delta = \frac{\lambda \times U}{U_d / \sqrt{2}} \end{cases} \quad (1)$$

式中 λ 为考虑连接电抗上的电压降落及过载能力时所乘的系数, 工程设计中可取为 1.3; U 为拟接入系统的电压; U_d 为链节的额定直流电压, 通常取值为 IGBT 额定电压的一半高一点。为确保有链节故障时装置仍能正常运行, 实际设计中通常在式 (1) 计算的基础在添加 1~2 个模块作为冗余链节。

目前, 应用上述方案的 D-STATCOM 已在江西 110 kV 樟树变成功投运。装置采用 Y 型连接的链式结构, 每相由 12 个基于单相逆变桥的链节模块构成, 连接电抗器额定电压 10 kV, 额定容量 240 kVA, 额定电流 115 A, 额定电感 24 mH。链式模块中的功率器件采用 EUPEC 公司 IGBT-FF200R17KE3, 额定电压 1 700 V, 额定电流 200 A。由 2 个 FF200R17KE3 与直流电容形成的两电平 H 桥逆变电路构成一个链节, 链节中的直流电容规格为 1 250 MF / 1 250 V / 100 A。

现场装置设计集成于一个移动式箱体, 如图 6 所示, 包含安装功率柜、启动柜、电抗器、进线开关柜和控制室, 分别放置于两个独立小室以实现电气隔离。功率柜内安装有 36 个链节模块, 采用分相分层的结构, 每一相各功率单元都在同一层中。

2 D-STATCOM 系统调试试验

D-STATCOM 调试试验的目的是对其各项性能

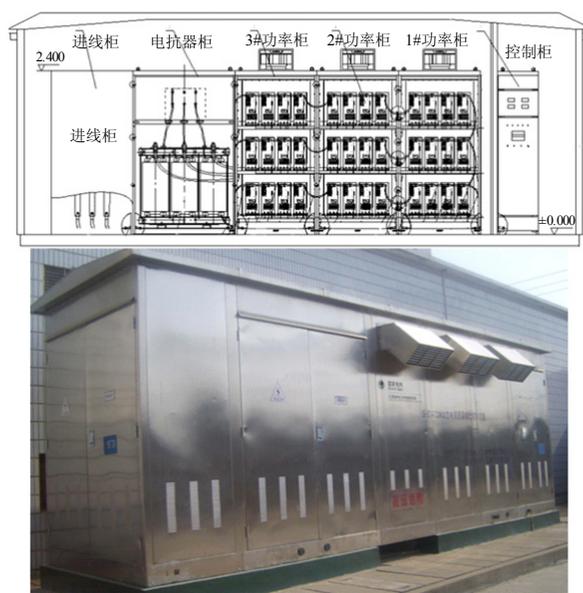


图 6 D-STATCOM 安装布置图

Fig.6 Layout of D-STATCOM

进行有针对性的验证。主要包含一般检查、绝缘与耐压试验、保护试验和各项性能试验, 以下结合江西电网樟树变的应用实例加以介绍。

一般检查的目的是检查装置内各仪器、仪表、各部件外观, 应确保无明显伤痕、变形, 仪表、按钮、指示灯可靠安装, 位置、方向正确, 柜体内无线头、碎屑, 母排及散热器间无遗落的螺栓、螺母等金属件, 各接地线及各活动门与地间的连接线应可靠连接, 对外接线端子的紧固件应齐全并上紧, 所有电镀件及油漆件外观完整无剥落。

绝缘与耐压试验需根据装置接入的电压等级确定试验参数。以樟树变为例, 试验前先将主电路各交流母排互相短接、启动柜内真空接触器 ABC 三相、避雷器中性点、功率模块的输入输出、电源线和模块外壳全部短接; 将电压传感器、电流传感器次边短接, 通向控制柜的电插头或者接线拔下。此时用 2 500 V 兆欧表测量主电路对外机壳的绝缘电阻, 要求不少于 50 MΩ, 25 kV/1 min 交流耐压应该通过。

各种保护功能试验之前先进行分合闸功能和紧急跳闸功能测试, 确保无异常现象。而后在二次回路上输入信号进行采样与显示测试, 确保采样与显示准确且无异常现象。对于保护功能测试, 可在主电路上模拟被保护设备的异常状态, 或在二次回路上设定等价故障信号。保护装置在整定范围内应能正常动作, 试验次数不少于 3 次。其中比较重要的保护试验包括直流侧过电压、欠电压和不平衡保护、系统过电压、欠电压和电压不平衡保护、输出过电

流保护、冷却系统异常保护、驱动板异常保护和同步信号异常保护试验等。

完成上述试验之后，将装置输出接入系统即可进行性能测试。首先是投切试验，以验证 D-STATCOM 在额定电压、空载电流情况下的耐压能力及直流侧充电电路是否正常。试验中各设备应无异常现象且装置直流侧电压比较稳定。以樟树变 D-STATCOM 为例，装置充电完成后直流稳定电压应在 760 V 左右，充电过程中的直流电压应约为稳定后的 80%左右，若电压不在 500~900 V 之间则视之为不正常。

投切试验完成之后即可进行无功调节范围与装置自身谐波测试试验，其目的是检查 D-STATCOM 装置无功输出范围、跳变过渡时间和自身输出的干扰谐波含量。图 7 所示为樟树变 D-STATCOM 无功调节范围试验测试曲线，表 1 所示为各种输出容量下的输出电流自身的谐波含量。显然，D-STATCOM 输出容量达±2 Mvar，输出电流畸变率低于 2%，额定容量输出时低于 1.5%。



图 7 D-STATCOM 输出无功曲线

Fig.7 Output reactive power curve of D-STATCOM

装置响应时间是另一个重要的性能指标，可通过输入阶跃控制信号，测试装置输出达到要求输出值的 90%所用的时间，同时要求这期间没有产生过冲。樟树变 D-STATCOM 采用的试验方法为设置装置运行模式为恒无功模式，使装置运行于空载，通过设置容量定值，实现装置从-1~+1 Mvar 和-2~+2 Mvar 之间的跳跃。图 8 所示为装置输出在-2~+2 Mvar 之间跳跃时输出电流的录波波形。由图 8 可知，装置的本体响应时间低于 10 ms。

为提高装置的性能比，当冲击性负荷不工作时，D-STATCOM 必须具备稳态电压调节功能。为验证这一性能，可通过设定电压合格范围高于和低于当前系统电压，观察 D-STATCOM 输出无功情况及系统电压变化情况。图 12 所示为樟树变 D-STATCOM

进行电压调整的试验测试波形。首先将装置调整的目标电压略低于现有值，此时 D-STATCOM 的输出由容性转变为感性，促使系统电压下降；第二步将装置调整的目标电压设置为远高于实时值，此时 D-STATCOM 的输出迅速由感性转变为较大容量的容性，令系统电压显著上升；第三步是将装置调整的目标电压设置为远低于现有值，此时 D-STATCOM 的输出迅速由容性转变为较大容量的感性，令系统电压显著下降，而后再改变目标电压的合格值范围时，D-STATCOM 的输出也随之进行了一定程度的调整；第四步为改变电压控制中的电压变化率限值，模拟系统出现故障，此时 D-STATCOM 的输出迅速由感性转变为容性最大以支撑系统电压。

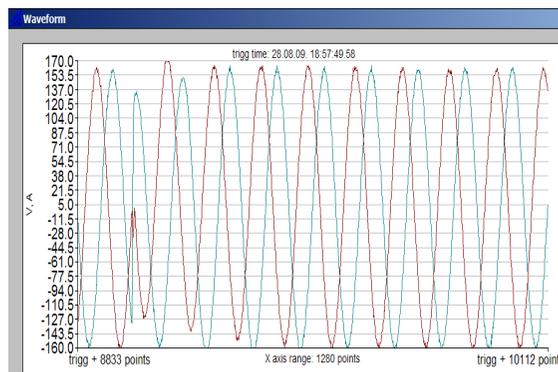


图 8 输出-2 Mvar~+2 Mvar 跳跃时电流跳变波形

Fig.8 Current waveform when output from - 2 to 2Mvar

表 1 D-STATCOM 装置谐波输出试验记录

Tab.1 Output harmonics data of D-STATCOM

谐波	D-STATCOM 输出电流各次谐波含量 (95%概率值)				
次数	0.25 Mvar	0.99 Mvar	2.0 Mvar	-0.99 Mvar	-1.99 Mvar
1	13.47	54.2	114.0	56.5	112.0
2	0.16	0.10	0.57	0.47	0.31
3	0.67	0.62	0.62	0.83	0.73
4	0.21	0.16	0.36	0.31	0.36
5	0.26	0.36	0.57	0.52	0.36
6	0.21	0.21	0.31	0.41	0.47
7	0.57	0.52	0.47	0.41	0.41
8	0.21	0.16	0.31	0.36	0.36
9	0.36	0.31	0.36	0.36	0.41
10	0.21	0.21	0.57	0.73	0.98
11	0.78	0.78	0.57	0.36	0.36
12	0.26	0.21	0.73	1.71	2.38
13	1.86	1.71	1.29	0.67	0.78

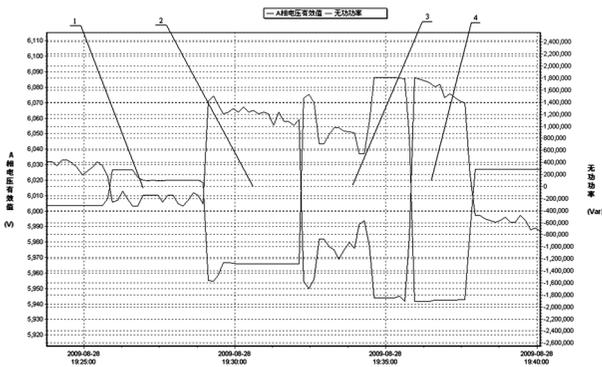


图 9 D-STATCOM 调压效果测试图

Fig.9 Test effect of D-STATCOM voltage regulation

D-STATCOM 的损耗也是其性能指标中的一个重要参数, 可通过计算分析法或是补偿测量法得到。计算分析法采用式 (2) 进行计算, 其中 P_{all} 为 D-STATCOM 总损耗; P_{trans} 为变压器损耗 (当装置中包含专用降压变压器时); P_{reac} 为电抗器损耗; P_{cool} 为包括泵、风机系统在内的辅助系统所消耗的功率; P_{valve} 为逆变电路损耗。

$$P_{all} = P_{valve} + P_{trans} + P_{reac} + P_{cool} \quad (2)$$

樟树变的 D-STATCOM 采用链式结构, 故其逆变电路总损耗 P_{valve} 可由单个链节模块的损耗 P_{unit} 累加计算获得。 P_{unit} 可采用如图 10 所示的两模块对冲试验测量计算获得。试验时两个被试验链节模块输出通过一个连接电抗相连, 其中一个链节的直流电容由外接直流电源供电, 另一个链节直流电容悬浮, 两个链节的损耗由直流电源提供, 通过控制两个链节输出电压相位角来控制链节间交换的无功功率方向和大小。此时使得一个链节发出额定无功, 另一个链节吸收额定无功, 每个链节发出和吸收额

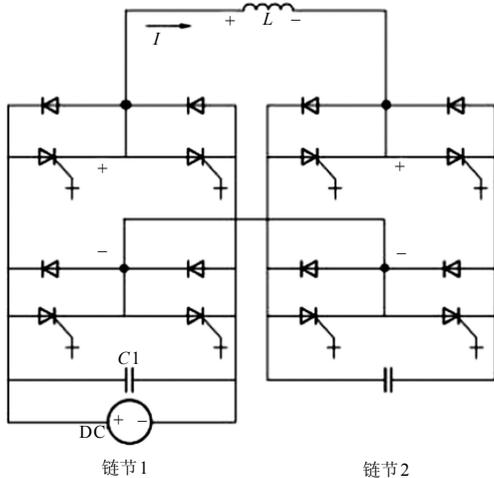


图 10 链节模块对冲试验原理图

Fig.10 Hedging test elementary diagram of chain unit

定无功各进行一遍。此项试验可以使各链节等效工作在额定工况之下, 从而检验各开关器件的关断能力, 以及在额定工况连续运行过程中, 链节各部件和功率器件的温升、局部过热、冷却系统情况和抗干扰能力。

除计算分析法外, 若现场具备条件, 也可采用补偿测量法测试装置的损耗, 其原理如图 11 所示。

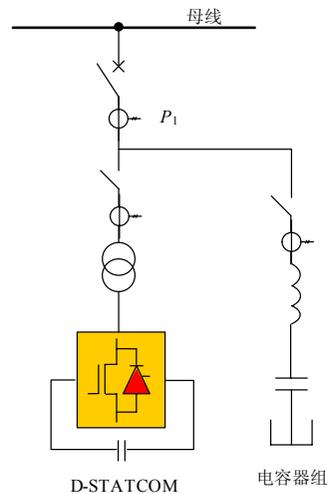


图 11 补偿测量法试验原理图

Fig.11 Test elementary diagram of compensation measurement

采用同容量的电容器组或者电抗器组补偿装置发出的无功, 由母线处测量得总损耗 P_1 , 减去并联电容器组或者并联电抗器组的损耗, 即可得到装置损耗 (不包括散热系统)。其中, 电容器组损耗主要由串联电抗器损耗 P_{reac} 和电容器损耗 P_c 组成, 可根据式 (3) 进行计算。

$$\begin{cases} P_{reac} = 3 \times R_{reac} \times I^2 \\ P_c = Q_{CN} \times \text{tg} \delta \end{cases} \quad (3)$$

式中: R_{reac} 为电抗器的直流电阻值; I 为电抗器电流有效值; Q_{CN} 为投运的电容器出力容量; $\text{tg} \delta$ 为电容器的介质损失角的正切值。

D-STATCOM 投运的主要目的是应对冲击性负荷的干扰, 此时需要对装置投运前后的系统数据进行对比分析以确认装置的补偿效果。以樟树变 D-STATCOM 为例, 据统计值分析, 装置投运前后系统最低电压从 5.761 kV 上升到 5.958 kV, 平均电压从 6.026 kV 升至 6.133 kV; 投运前系统无功波动从 -800 kvar 至 1 800 kvar, 投运后无功波动仅由 -280 kvar 至 600 kvar; 10 kV 母线电压畸变率由 3% 降至 2% 左右, 闪变改善率超过 50%, 功率因数由 0.79 提高到 0.92 以上。由图 12 所示的冲击性负荷工作时装置投运前后系统无功功率的测试数据也可

明显看出装置的补偿效果。

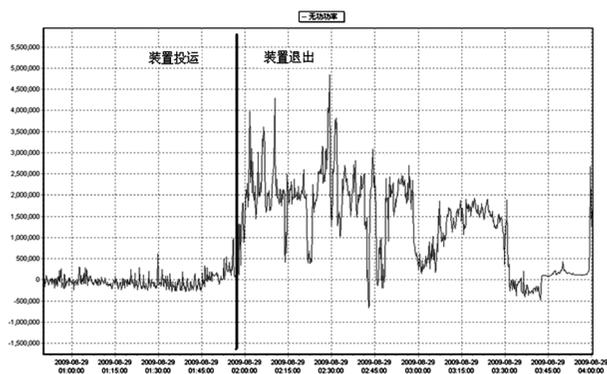


图 12 投运前后无功功率测试数据

Fig.12 Reactive power test data of D-STATCOM on operation or not

3 结论

本文提出一种适用于变电站应用的电能质量调控装置,将移动型链式 D-STATCOM 与并联电容器结合起来,实现对冲击性负荷的实时补偿和变电站稳态调压功能。针对链式 D-STATCOM 的特点,给出了完整的系统调试方案和重要的试验数据。测试与应用表明,樟树变 D-STATCOM 运行效果良好,达到了设计的目的。

参考文献

[1] 陈璇, 邵志兰, 徐勇. TCR型动态无功静止补偿装置用于电力拖动[J]. 高电压技术, 2002, 28(10): 52-53.
CHEN Xuan, SHAO Zhi-lan, XU Yong. Application of TCR static compensators (SVC) for reactive power in electric drag and speed regulation[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(10): 52-53.

[2] 卢志良, 张尧. 梧州SVC在电压控制下无功储备优化分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 137-139.
LU Zhi-liang, ZHANG Rao. Analysis on reactive reserve optimization of SVC under voltage control in Wuzhou power net[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8):137-139.

[3] 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.

LIU Yu-lei, XIE Da, ZHANG Yan-chi. Simulation of static var compensator to restrain the voltage fluctuation of electric auxiliary system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (16): 97-101.

[4] 徐琳, 韩杨, 云伟俊, 等. 工厂配电系统电能质量仿真与治理方案研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(17): 38-42.
XU Lin, HAN Yang, YUN Wei-jun, et al. Research on power quality simulation and enhancement scheme of the distribution system of factory[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (17): 38-42.

[5] 郑建, 陈劲操. 混合级联逆变器在STATCOM中的应用研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18):57-61,73.
ZHENG Jian, CHEN Jing-cao. Study of STATCOM based on hybrid cascaded multilevel inverter [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(18):57-61,73.

[6] 涂春鸣, 李慧, 唐杰. 基于直接电流控制的D-STATCOM装置研制[J]. 高电压技术, 2008, 34 (6): 58-62.
TU Chun-ming, LI Hui, TANG Jie. Development of D-STATCOM based on direct current controller[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34 (6): 58-62.

[7] 段大鹏, 孙玉坤. 基于三相VSI的PWM型SVG的系统仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(4): 29-34.
DUAN Da-peng, SUN Yu-kun. Simulation of three-phase PWM VSI-based SVG system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(4): 29-34.

[8] 范瑞祥, 孙旻, 沈斐, 等. 基于限值判断的DSTATCOM分频协调控制方法研究[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4): 67-71.
FAN Rui-xiang, SUN Min, SHEN Fei, et al. Research of frequency dividing coordinated control method in DSTATCOM based on limit values judgment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(4): 67-71.

收稿日期: 2010-02-08

作者简介:

范瑞祥 (1977-), 男, 博士, 主要从事电力电子技术方面的研究工作; E-mail: ricefan117@126.com

吴素农 (1964-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统运行控制方面的研究与管理工。

(上接第 148 页 continued from page 148)

[3] 郝延丽, 赵春刚, 屠黎明. 内蒙 300 MW-220 kV 发变组保护标准设计及应用[J]. 继电器, 2007, 35(22): 67-71.
HAO Yan-li, ZHAO Chun-gang, TU Li-ming. Standard design and application of protection for 300MW-220 kV generator-transformer unit in Inner Mongolia area[J]. Relay, 2007, 35(22): 67-71.

收稿日期: 2010-02-27; 修回日期: 2010-10-21

作者简介:

刘 麒 (1975-) 男, 工程师, 本科, 一直从事火电厂调度运行管理工作;

刘 麟 (1976-), 男, 工程师, 本科, 一直从事电网继电保护专业技术管理工作。E-mail: liulin761003@126.com