

200 Mvar链式静止同步补偿器在电网的应用

基于水乡站STATCOM的工程实践，介绍了集装箱型链式STATCOM的电气结构。对STATCOM的基本组成单元H桥功率单元的电路结构进行解析，阐述了STATCOM的分层分级控制结构。选取STATCOM运行中最常用到的稳态调节控制和暂态电压控制模式，结合现场运行数据，验证了水乡站STATCOM的应用效果满足设计要求。

刘 洋/广东电网有限责任公司东莞供电局



刘 洋/工程师

以电力电子技术为开端的无功补偿技术研究自20世纪80年代开始，经历了近30年的发展历程，形成了以静止无功补偿器（Static Var Compensator, SVC）和静止同步补偿器（Static Synchronous Compensator, STATCOM）为主流的动态无功补偿装置^[1-2]。相对于以装配大量电容电感元件作为无功源的SVC，STATCOM则是利用大功率电力电子器件的高频开关实现无功能量交换，其无功输出受电压跌落影响小，响应速度更快，具有全面适应高压电网动态无功调控的技术优势^[2]。作为新型实用技术，在2011年前国外最大容量的工程应用为美国Glenbrook变电站的 ± 150 Mvar的STATCOM，国内最大容量的为上海西郊变电站的 ± 50 Mvar的STATCOM^[3]。目前，国内仅在南方电网有百兆乏级的大容量STATCOM投入应用^[4-6]。

本文以2013年6月投运的南方电网STATCOM一期工程中的500 kV水乡站STATCOM装置为例，结合投运后一年的实际运行情况，介绍STATCOM的电路结构和实际应用中常用的稳态调压和暂态电压控制策略，并结合STATCOM的实际运行数据进行验证。可为今后相似工

程实践提供借鉴。

STATCOM电气结构

水乡变电站STATCOM装置直挂电压等级为35 kV，稳态容量为 $2 \times (\pm 100$ Mvar)，暂态容量为 $2 \times (\pm 150$ Mvar)。整套STATCOM装置分成两组等容量STATCOM，每组STATCOM采用三角形接线方式，分为AB相、BC相及CA相，每相单独装配在1个可移动式阀组集装箱内。两组STATCOM分别通过35 kV 381、382开关并联在主变压器低压侧35 kV母线，由一台500/35 kV专用变压器通过HGIS接至500 kV母线。STATCOM一次电气接线图如图1所示。

水乡站STATCOM采用链式结构，每相换流链由27个H桥功率单元串接而成，通过4、4、4、5、5和5的塔式结构安装，首尾相连放置在一个阀组集装箱内，如图2所示。

根据IEGT（4 500 V/1 500 A）的过电流能力和耐压能力，每相不少于24个H桥功率单元串联运行即可满足出口电压35 kV的系统运行需要，水乡站链式STATCOM采用10%的冗余设计，每相换流链由27个H桥功率单元串联，正常运行时27级功率单元全部投入运行，即各相均有3个功率单元的任意性冗余。

功率单元电路

H桥功率单元是链式STATCOM的基本单元，整套STATCOM共有162个完全一样的H桥功率单元。H桥功率单元由1[#]相模块、撬杠模块、2[#]相模块、旁路模块

关键词/Keywords

STATCOM ·

功率单元 ·

控制系统 ·

稳态调压控制 ·

暂态电压控制 ·

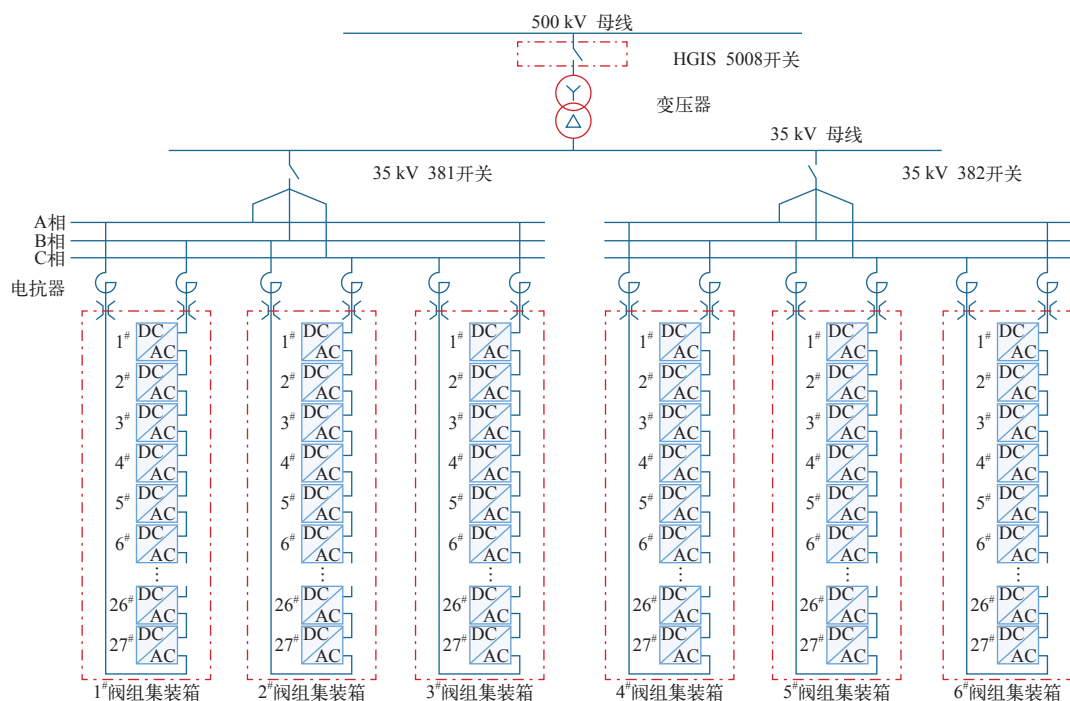


图1 水乡站STATCOM装置电气结构图

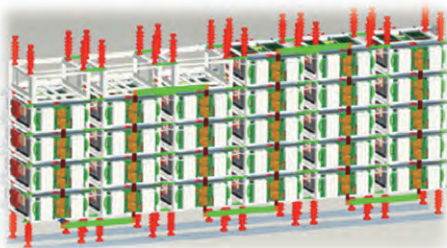


图2 换流链三维示意图

及电压传感器组成，如图3所示。

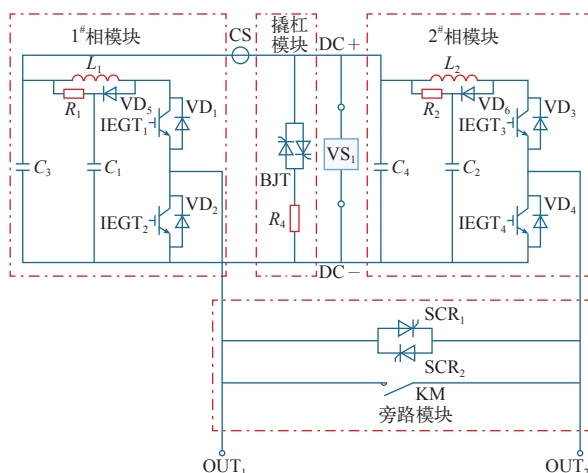


图3 H桥功率单元电路图

1#相模块包括两个全控型开关器件IEGT₁、

IEGT₂、直流支撑电容C₃、缓冲吸收电路以及IEGT并联续流二极管。缓冲吸收电路由电感L₁、电阻R₁、二极管VD₅及电容C₁构成。

2#相模块与1#相模块的电路结构完全一致，二者共同构成H桥电压源换流电路。

旁路模块由两个反并联的晶闸管SCR₁、SCR₂、旁路接触器KM并联组成，并联于两个相模块的输出端。其主要作用是当H桥功率单元发生故障时可以将本H桥功率单元从整个换流链中隔离出来，同时快速释放直流电容上的电能。

该功率单元包括电压传感器VS₁，电压传感器VS₁设置于整流模块输出侧，其两端分别连接在正、负直流母线上，用于检测功率单元的中间直流电压，该直流电压作为STATCOM并网判断必要条件之一，同时还相应配置有直流过电压保护和直流欠电压保护。

除上述元器件，在功率单元四侧还挂装有多种电路板卡，包括：单元主控板、IEGT驱动板、电源转接板、开关电源、充电板及漏水检测板等。功率单元的三维示意图如图4所示。

H桥功率单元中四个IEGT接收脉冲控制器分配的脉冲触发指令后进行开通和关断，实现换流

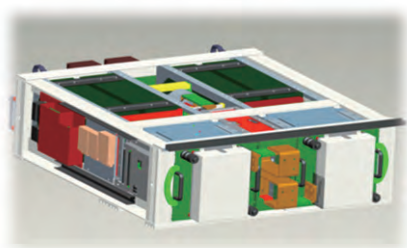


图4 功率单元三维示意图

(将直流电容电压变换为交流出口电压)。27个H桥功率单元所分配的脉冲指令不同,以便使串接的出口电压形成55级的阶梯波,经连接电抗器平波后即成为正弦交流电压波形。STATCOM的工作原理,即是通过调节其换流链的出口交流电压的幅值,来控制连接电抗器上的无功电流的大小和方向,最终实现动态无功补偿的效果。

控制系统设计

STATCOM控制系统内设监控电路的监控柜、内设控制电路的系统控制柜、装置控制柜和完成直流电压平衡算法的脉冲控制柜,如图5所示。装置控制柜内设有对STATCOM算法进行控制的控制电路,脉冲控制柜内设有直流电压平衡算法电路。脉冲控制柜内的直流电压平衡算法电路具有与单元主控板相通信的连接端。目的是保证脉冲控制柜内的直流电压平衡算法电路能顺利与单元主控板进行通信。

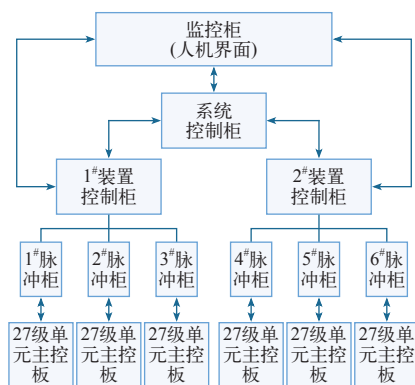


图5 STATCOM的控制系统原理框图

系统控制柜和装置控制柜内各有两个主板,一工一备、冗余配置,目的是使控制系统在出现异常的情况时不会影响整个控制系统的正常运行。

根据STATCOM控制系统的控制策略,

STATCOM装置共有四种可选的控制模式,包括:暂态电压控制模式、远方控制模式、稳态调压模式和恒无功输出模式,如图6所示。

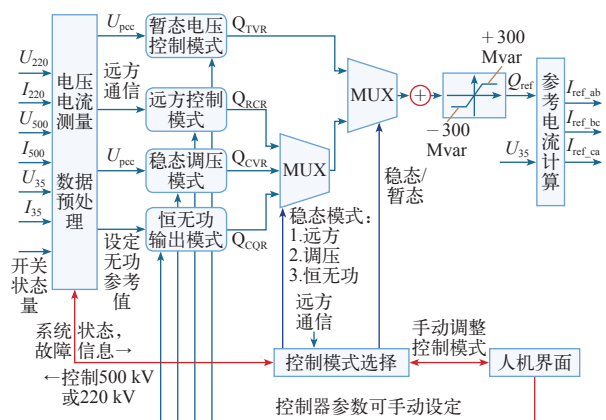


图6 STATCOM的控制系统系统控制策略

通过监控柜的人机界面,可以选择当前运行方式为远方控制模式、稳态调压模式或恒无功控制输出模式任意一种。平时运行时,调度部门还可通过自动化系统远程下令进入远方控制模式,使STATCOM按指定无功(或电压)曲线或定值运行。

其中暂态电压控制模式优先级别最高,当且仅当电网电压突变时STATCOM自动进入该模式。根据设计要求,水乡站STATCOM应在电网故障引起的电网电压突变迅速进入暂态,并在20 ms内发出300 Mvar无功功率。

STATCOM装置的主要作用是跟踪电网电压变化实现动态无功补偿,正式运行时STATCOM采用的是稳态调压和暂态电压控制两种定电压控制模式。恒无功控制模式和远方控制模式一般仅在试验阶段使用。本文介绍其应用效果时,仅以稳态调压控制和暂态电压控制为例。

工程应用效果

1. 稳态调压控制

电网电压在正常范围内时,STATCOM处于稳态调节模式。选择500 kV 1#母线电压为控制电压,目标电压值设为304.8 kV(相电压有效值),限幅为 $2 \times (\pm 20 \text{ Mvar})$ 。整套STATCOM限幅设定为40 Mvar,这是由于站内的电容器组和电抗器组

均为80 Mvar一组，STATCOM在 $-40 \sim 40$ Mvar内自动调节无功输出，正好可以实现微调的功能。

图7为2013年7月10日全天24 h的系统电压曲线和STATCOM无功功率曲线。



图7 2013年7月10日STATCOM无功功率曲线

从图7中可以看出当电网电压高于横线2（目标电压304.8 kV）时，STATCOM发出感性无功功率（负值）；当系统电压低于横线2时，STATCOM发出感性无功功率（正值）。

而当系统电压高于横线1时，STATCOM输出无功功率达到感性限幅，两组STATCOM均发出 -20 Mvar无功功率；当系统电压低于横线3时，STATCOM输出无功功率达到容性限幅，两组STATCOM均发出20 Mvar无功功率。

从图7全天24 h的电网电压曲线和STATCOM的无功曲线可以看出，电网电压根据用电负荷而上下波动，STATCOM则跟踪电网电压进行反向调节，有利于实现电网电压的准确控制，提升电网电能质量。

2. 暂态调压控制

当电网电压满足如下条件之一时，将自动切换至暂态电压控制模式。

1) 电压突变量越限。 $du/dt > 1.4$ kV/ms, $t = 5$ ms。

2) 电压幅值越限。 $u > 323.9$ kV或 $u < 282.3$ kV，

$t = 5$ ms。其中， u 为500 kV 1M母线任意一相电压有效值。

当500 kV 1M母线三相电压的有效值全部回到 288.1 kV $<u<318.1$ kV，并持续1 s时，将退出暂态电压控制模式，恢复至稳态调压模式。

下面以2013年7月14日500 kV蓄增甲线蓄能B厂侧开关A相短路引起水乡站STATCOM暂态响应录波数据为例，如图8所示。

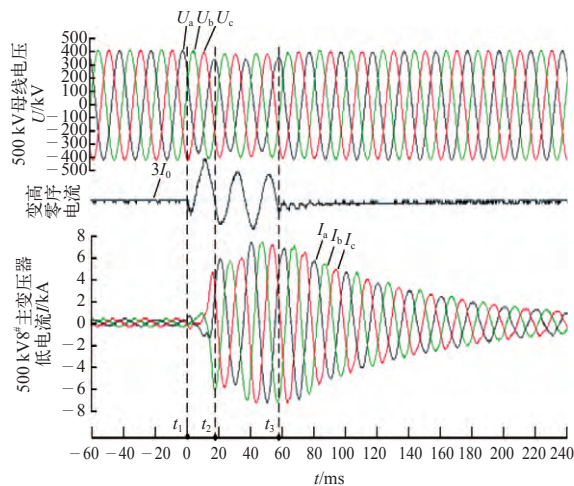


图8 2013年7月14日水乡站STATCOM暂态录波图

2013年7月14日20时06分12秒885毫秒, 500 kV 蓄增甲线蓄能B厂侧开关A相短路, 500 kV电网A相电压降低。从图8的录波数据可知, t_1 (0时刻) 之前, 电网电压为527.6 kV, 水乡STATCOM在稳态调压模式下发出8 Mvar容性无功功率。由500 kV 专用变压器的高压侧零序电流 $3I_0$ 可知, t_1 时刻电网发生接地故障, $t_3 = 59$ ms继电保护动作切除电网故障, 电网电压迅速恢复正常。

电网故障导致水乡站500 kV母线电压A相瞬时跌落至254 kV (正常值的84%), 满足了STATCOM 进入暂态模式的条件2 ($u < 282.3$ kV, $t = 5$ ms), 水乡站STATCOM迅速切换至暂态电压控制模式, 并在电网故障后19 ms即达到大容量的无功输出。由图1知, STATCOM是专用变压器的唯一负荷, 可以通过监测变压器低压侧电流来观测STATCOM 的无功输出。本次STATCOM暂态电压控制期间专用变压器低电流有效值最大为4.65 kA, 对应时刻的专用变压器低电压线电压有效值为37.8 kV, 可计算最大无功输出为304 Mvar。

根据自动控制原理对响应时间定义, 计无功电流达到90%最大值的时间为STATCOM的暂态响应时间。从图8可知, 水乡站STATCOM的暂态响应时间约为19 ms, 低于设计要求的20 ms。而本次暂态启动期间水乡STATCOM的最大无功输出也达到了设计要求的300 Mvar。

STATCOM能够在电网故障发生后迅速进入暂态电压控制模式, 在继电保护动作前, 通过大容量无功功率的注入支撑电网电压, 有利于提高电网稳定性。

结束语

百兆乏级STATCOM在国内外的工程应用仅有少数例子, 本文结合水乡站 ± 200 Mvar STATCOM 投运半年的实际参数和运行数据, 详细介绍了其电路结构 and 应用效果, 可为后续其他STATCOM装置的系统设计、装置研发和工程实践提供借鉴。

参考文献

- [1] 赵晋泉, 孙晓明, 龚成明, 等. 含FACTS元件的电力系统电压稳定评估 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (16): 21-26.
- [2] 周建丰, 顾亚琴, 韦寿祺. SVC与STATCOM的综合比较分析 [J]. 电力自动化设备, 2007, 28 (12): 77-80.
- [3] 高凯, 黄华, 邹彬, 等. 上海西郊变电站STATCOM的性能测试及试运行情况 [J]. 电力设备, 2013, 8 (7): 27-30.
- [4] 谢化安, 王永源, 万四维, 等. 东莞变电站链式STATCOM控制保护的RTDS试验研究 [J]. 电力系统控制与保护, 2013, 41 (4): 117-122.
- [5] 刘锦宁, 李旷, 张海涛, 等. 高压大容量动态无功补偿装置STATCOM起动方式的研究 [J]. 电气技术, 2012 (2): 29-31.
- [6] 许树楷, 陈名, 傅闯, 等. 南方电网 ± 200 Mvar 静止同步补偿装置系统调试 [J]. 南方电网技术, 2012, 6 (2): 21-25.

(收稿日期: 2015-01-20) **EA**

(上接第23页)

- [21] 张建伟, 侯朝桢. 发电动态经济调度的有效响应能力调整量算法 [J]. 电力系统自动化, 2004 (22): 27-31.
- [22] 韩学山, 柳焯. 考虑机组爬坡速度和网络安全约束的经济调度解耦算法 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (13): 32-37.

- [23] 王粤, 肖进永, 栗然. 大规模风电场并网的经济调度建模和决策算法 [J]. 电气应用, 2009, 28 (12): 50-54.
- [24] 刘清泉, 刘文霞, 张建华. 基于DSM算法的风火联合系统旋转备用优化 [J]. 电气应用, 2013, 32 (5): 76-80.

(收稿日期: 2015-02-01) **EA**