

# 35 kV $\pm$ 200 Mvar STATCOM 系统总体设计

黄伟雄<sup>1</sup>, 刘锦宁<sup>1</sup>, 王永源<sup>1</sup>, 姜齐荣<sup>2</sup>, 袁志昌<sup>2</sup>, 杜威<sup>2</sup>

(1. 广东电网公司东莞供电局, 广东 东莞 523000; 2. 清华大学 电机系, 北京 100084)

**摘要:** 针对东莞站无功补偿及提高电压稳定性的需求, 给出了基于 IEGT 器件的 35 kV  $\pm$  200 Mvar STATCOM 装置的总体设计, 提出了双三角接链式结构的主电路, 避免了开关器件的并联与串联。同时, 针对存在 2 个积分环节的锁相环无法快速检测系统电压相位跳变的缺点, 提出了一种只有单个积分环节的新型锁相环; 根据电网对 STATCOM 的多目标要求, 设计了根据电网状态识别控制目标的多目标协调控制策略。以东莞站实际电网为背景对 STATCOM 的控制策略及效果进行了仿真, 结果表明 STATCOM 装置在短路后能够快速输出无功功率, 有效提高 220 kV 母线电压, 可满足稳态与暂态条件下系统运行的要求。

**关键词:** STATCOM; 链式结构; 三角形连接; 多目标控制; IEGT; 稳定性

**中图分类号:** TM 761

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.10.024

## 0 引言

根据对广东电网电压稳定性分析, 为了提高广东电网的暂态电压稳定性, 需要在广东电网多个关键节点安装大容量动态无功补偿装置<sup>[1-2]</sup>。在综合考虑动态无功补偿装置运行损耗及容量、技术可行性的基础上, STATCOM 装置以其响应速度快、运行损耗小、占地面积小等优点, 成为首选。作为广东电网推广应用 STATCOM 补偿装置的第一步, 在东莞站安装  $\pm$  200 Mvar STATCOM 装置对提高东莞地区电压稳定性具有最佳的效果。同时, 以该 STATCOM 装置为示范, 可以从响应速度、无功输出、运行损耗、占地面积及提高电网稳定性效果等方面对装置进行评估考核, 为系列 STATCOM 装置的应用奠定坚实的基础。

本文针对东莞变电站的要求, 对 STATCOM 的主电路及控制策略等进行了分析比较, 提出了可满足高电压与大容量需求的双三角连接链式结构的主电路; 在控制方面, 给出了一种新的锁相环技术并应用于该 STATCOM, 并提出了适合系统需求的多目标控制策略。本文分为 5 个部分, 第 1 部分介绍 STATCOM 主电路的选择, 第 2 部分提出了一种新的锁相环技术, 第 3 部分给出了相应的控制与保护策略, 第 4 部分进行仿真分析, 验证了所设计方案的可行性, 第 5 部分介绍了 STATCOM 现场运行情况, 尤其是系统发生故障时 STATCOM 装置的动作情况, 验证了 STATCOM 装置可在电网发生故障时提高系统的电压水平和电压稳定性。

## 1 STATCOM 装置主电路选择

根据对广东电网的仿真研究及现有技术条件,

东莞站 STATCOM 装置性能要求及技术指标如下: 额定容量为  $\pm$  200 Mvar, 电压等级为 35 kV 直挂, 响应速度不大于 20 ms, 额定容量时损耗不大于 0.6%。

在目前的电力电子技术水平及生产工艺条件下,  $\pm$  200 Mvar STATCOM 装置的主电路可以采取如下 5 种形式: 变压器串联多重化方案、功率单元并联变压器多重化方案、开关器件串联三电平方案、链式方案与模块化多电平(MMC)方案<sup>[3-4]</sup>。

早期的大容量 STATCOM 装置均采用变压器多重化方案, 如 1991 年日本三菱、关西电力 154 kV/80 Mvar STATCOM, 1993 年日本东芝、日立、东京电力 66 kV/100 Mvar STATCOM, 1996 年美国西屋电气、EPRI、TVA 161 kV/100 Mvar STATCOM 等均采用了变压器串联多重化方案; 而 2001 年日本三菱设计的美国 Essex 115 kV/86 Mvar STATCOM, 2003 年富士设计的日本 Numazu 77 kV/60 Mvar STATCOM, 2003 年日本三菱、美国 SDG&E 设计的 Talega 138 kV/100 Mvar STATCOM 装置均采用了功率单元并联的变压器多重化方案。虽然采用变压器可以较容易地实现变流器功率单元的串并联, 实现大容量, 但变压器的引入造成了磁路非线性, 存在变流器与变压器绝缘水平要求高、损耗严重、占地面积大、成本高昂等缺点, 因此目前应用越来越少。开关器件串联三电平方案是 ABB 公司采用的一种 STATCOM 主电路结构, 目前在世界上已有多台投入运行, 但是 IGBT 器件串联实现困难, 三电平结构的谐波较大且  $du/dt$  很高, 造成 STATCOM 连接电抗器设计非常困难, 目前只有 ABB 掌握了较成熟的技术。况且, 容量要达到  $\pm$  200 Mvar, 除 IGBT 串联外还需要引入 IGBT 并联, 更增加了技术难度。基于模块化多电平的方案尚不成熟, 目前只有柔性直流输电中有几个示范工程, 其应用还未在 STATCOM 中普及, 未得到充分的验证。

收稿日期: 2012-10-29; 修回日期: 2013-09-04

基金项目: 国家科技支撑项目(2007BAA12B02)

Project supported by the National Science and Technology Support Program of China(2007BAA12B02)

因此,采用 35 kV 链式结构成为 ±200 Mvar STATCOM 装置的首选。

35 kV 链式 STATCOM 目前有 3 种主电路结构,分别为三角接结构、星接结构与三角星形混合式结构,如图 1 所示。三角接结构既可以补偿无功、谐波,也可以补偿较大的负序电流,功能较全,也容易实现大容量,但需要串联的 H 桥多,控制略显复杂;星接结构可以补偿无功、谐波,需要串联的 H 桥仅为三角接的  $1/\sqrt{3}$ ,但其无法补偿负序电流,否则会引起中点电位偏移,造成设备过压,星接结构的实

现容量较小;三角星形混合式结构可以综合三角接与星接的优点,但结构略显复杂,控制也更复杂。根据 STATCOM 容量要求,35 kV ±200 Mvar STATCOM 装置额定线电流为 3300 A。采用三角接、星接时 H 桥上电流分别为 1905 A、3300 A。由于目前 IGCT、IGBT 与 IEGT 最大单管电流限制,采用三角接结构需要至少 2 个以上器件的并联,而采用星接结构则需要 3 个以上器件的并联。综上所述,本文采用了图 1(a)所示的三角接结构,该结构具备耐受系统电压不对称故障后冲击的能力,因此更有优势。

根据前文的分析,虽然三角接结构可以将 H 桥输出的电流降至 1905 A,但仍需要采用器件并联才能实现。综合考虑 IGCT、IGBT 与 IEGT 器件的电压与电流,本文提出了一种如图 2 所示的双三角接(双 Δ)链式结构的 STATCOM 主电路,其中器件采用 4500 V/1500 A 的 IEGT<sup>[5-7]</sup>,这样每个 H 桥输出的交流电压有效值可达 1500 V、交流电流有效值可达 1500 A,从而每相 H 桥的总数可以降至 26 个(2 个冗余)。由于采用了双三角接结构,每个三角结构内部链接的额定电流仅为  $1905/2 \approx 953$  (A)。由此可见,采用基于 IEGT 的双三角接链式结构,35 kV ±200 Mvar STATCOM 装置 H 桥中的 IEGT 器件无需串并联,可极大简化 H 桥模块的设计。

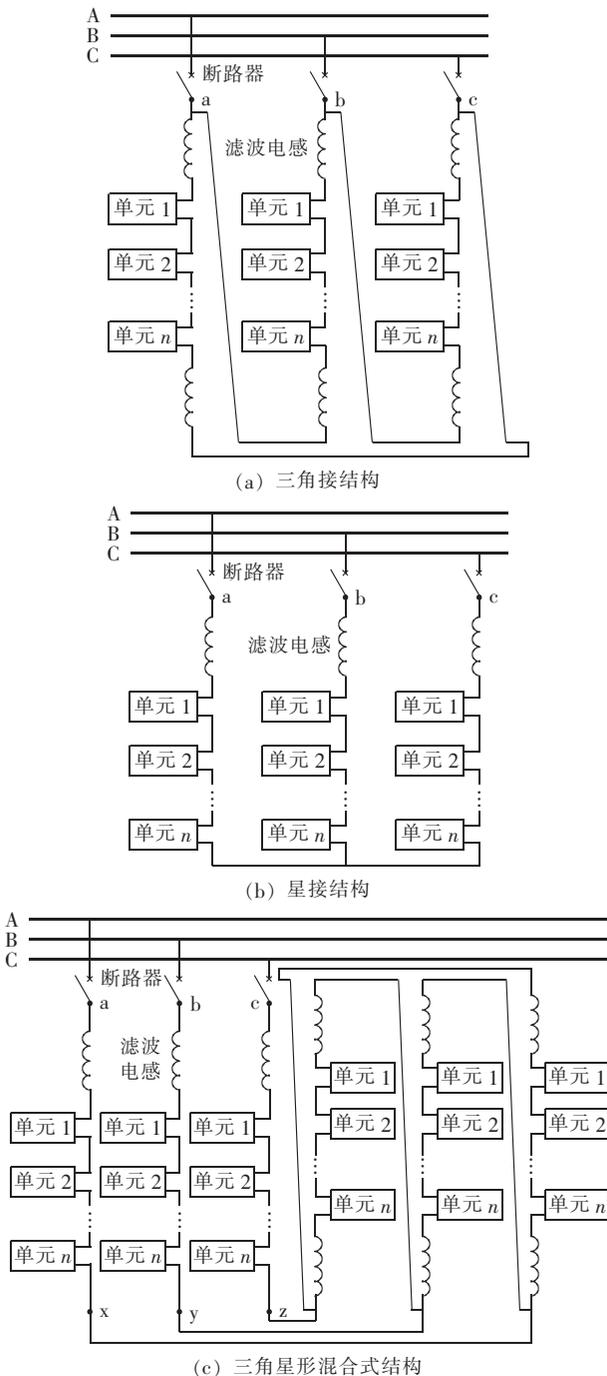


图 1 链式结构 STATCOM 装置主电路

Fig.1 Main circuit of STATCOM with cascaded structure

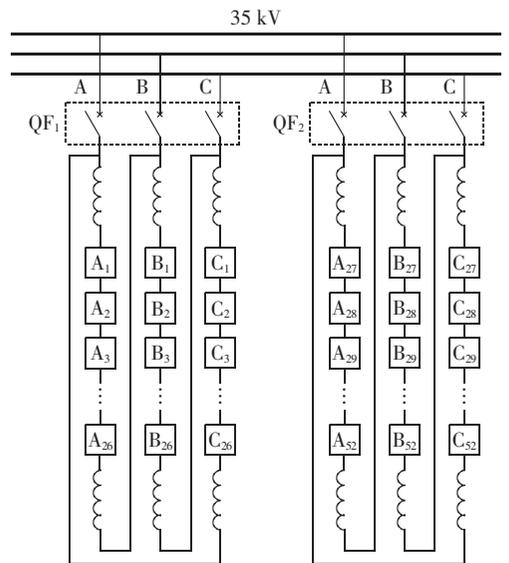


图 2 采用 4500 V/1500 A IEGT 的双三角接链式结构的 35 kV ±200 Mvar STATCOM 装置主电路

Fig.2 Main circuit of 35 kV ±200 Mvar STATCOM with cascaded structure based on 4500 V/1500 A IEGTs

## 2 新型锁相环

STATCOM 作为并网型变换器的一种,电网电压相位是其正常工作的重要参数,若不能准确及时地与电网同步,有可能导致 STATCOM 直流侧过电压或输出过流,进而导致装置闭锁,严重时损坏装置。

现运行的 STATCOM 一般使用锁相环来解决同步问题<sup>[8-9]</sup>。传统锁相环基本原理如图 3 所示。

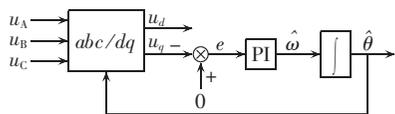


图 3 三相锁相环原理框图

Fig.3 Schematic diagram of three-phase PLL

在电网电压三相对称的情况下,有:

$$\mathbf{u}_{ABC} = U_1 \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{u}_{ABC} = [u_A \ u_B \ u_C]^T$ ;  $\theta = \omega t + \varphi$ ,  $\omega$  是电网的角频率,  $\varphi$  是初相角。

Park 变换之后,有:

$$\mathbf{u}_{dq} = U_1 \begin{bmatrix} \cos(\theta - \hat{\theta}) \\ -\sin(\theta - \hat{\theta}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,  $\hat{\theta} = \hat{\omega}t + \hat{\varphi}$  是 Park 变换的相角。

传统锁相环在电网电压稳定时,能够很好地实现同步,但从图 3 的框图可以看出,传统锁相环有 2 个积分环节,在电网电压发生相位跳变时,响应速度较慢。因此,本文中的 35 kV ±200 Mvar STATCOM 装置使用了一种新的锁相环,其基本原理如图 4 所示。

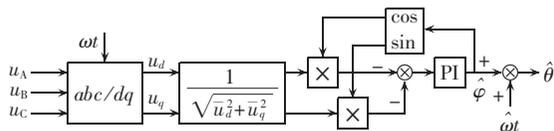


图 4 新三相锁相环原理框图

Fig.4 Schematic diagram of proposed PLL

与传统锁相环相比,新型锁相环省去了一个积分环节,大幅提高了锁相环对电网电压相角跳变的响应速度。

### 3 控制与保护策略

STATCOM 装置的控制可分为系统级控制、装置级控制及底层控制<sup>[10-12]</sup>。东莞站 35 kV ±200 Mvar STATCOM 装置的主要功能包括维持 220 kV 节点电压稳定、提高电网的电压稳定性及阻尼振荡<sup>[13]</sup>。针对广东电网的特点,可为 STATCOM 设置 5 种控制模式:暂态电压控制模式、远方控制模式、稳态调压模式、恒无功输出模式、阻尼附加控制模式,其中远方控制模式和阻尼控制模式根据应用需要选取。为了保证多种控制模式的合理协调,本文提出了装置的系统级多目标协调的控制策略,如图 5 所示。在正常稳态条件下,STATCOM 装置主要用于稳定节点电压并增强系统阻尼;一旦系统出现故障,STATCOM 则进入暂态控制模式用于提高系统的电压稳定性。

STATCOM 装置级控制目标是跟踪系统控制策略所给出的参考电流并保证直流侧电压稳定。因此,STATCOM 装置级控制主要包括电流跟踪控制与直流电压平衡控制。由于 STATCOM 装置直挂 35 kV 线路,每相有 26 个链节,因此直流电压平衡控制是 STATCOM 装置级控制的重点。研究发现,直流电压平衡控制的难易程度与 H 桥中开关器件的工作频率相关,即开关的工作频率越高,直流电压平衡控制越易实现。这是因为直流侧电压不平衡是每个 H 桥产生电压的差异导致的,若提高开关器件的工作频率就可以减小电压的差别。虽然提高开关频率可以使直

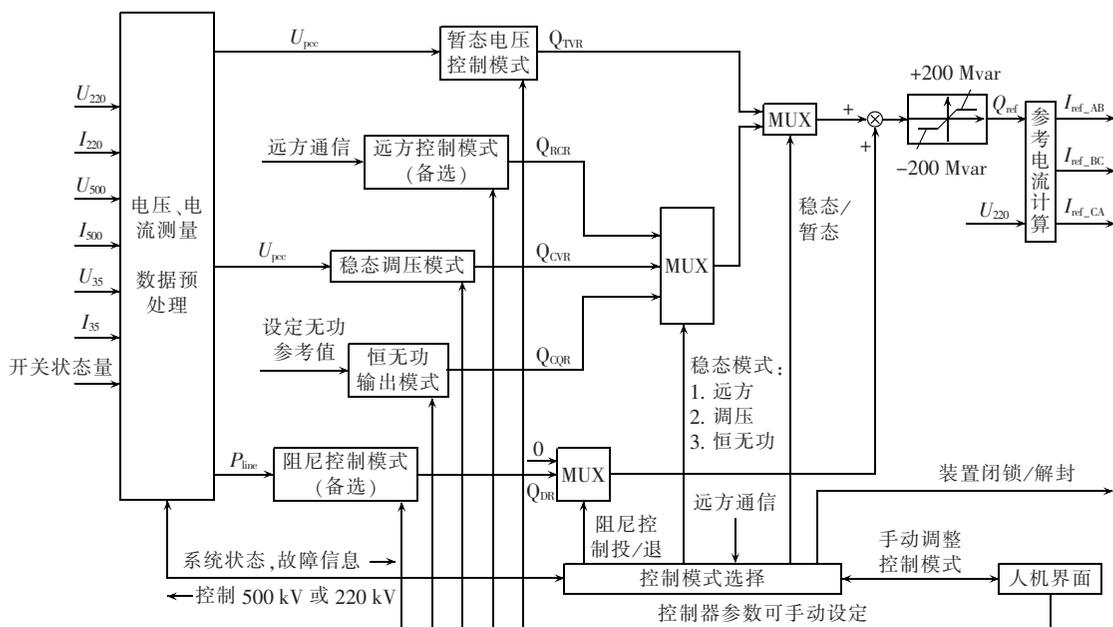


图 5 35 kV ±200 Mvar STATCOM 的系统级控制策略框图

Fig.5 System-level control strategy of 35 kV ±200 Mvar STATCOM

流电压平衡控制更容易,但将增加损耗,因此需要采用合适的控制方法对 H 桥直流电压平衡进行控制。文献[14]给出了一种直流电压平衡控制方法,仿真中发现该方法在电流小时难以实现直流电压平衡控制。研究表明采用该方法时,每个 H 桥的瞬时功率为:

$$p_i = k(u_{Cav} - u_{Ci})i_s^2 + u_{ri}i_s \quad (3)$$

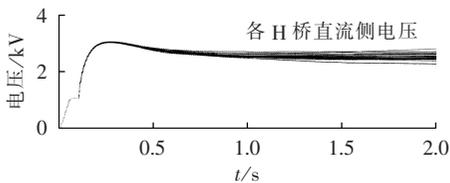
其中,  $u_{Cav}$ 、 $u_{Ci}$ 、 $u_{ri}$ 、 $i_s$  分别为直流侧平均电压、第  $i$  个 H 桥的直流电压及其输出电压与电流。可见该方法是通过控制 H 桥瞬时功率中与电流平方成正比的部分来控制其直流电容的电压的。实际控制中是以 STATCOM 输出额定电流作为电流基值的,因此额定电流时  $i_s$  对应为 1。因为当电流远小于额定电流值时(如在 10% 额定电流以内),电流平方更小,所以直流电压平衡控制容易失效。为此本文采用根据电流大小适当调整比例系数  $k$  的办法实现对直流电压平衡的有效控制,即:

$$k = k_0 i_{s1} / i_s \quad (4)$$

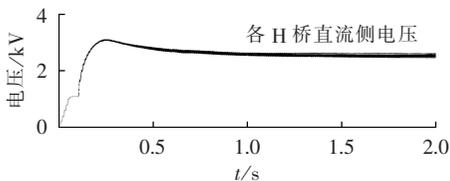
其中,  $k_0$  为常数,  $i_{s1}$  为通过对  $i_s$  基波电流快速锁相而得到的与其基波同相且幅值为 1 的信号。代入式(3)得到:

$$p_i = k_0(u_{Cav} - u_{Ci})i_{s1}i_s + u_{ri}i_s \quad (5)$$

由式(5)可见,采用该方法 H 桥的瞬时功率中控制直流电容电压的功率部分只与电流的大小成正比,因此小电流时直流电压平衡控制会更有效。图 6 为采用固定  $k$  值与式(4)的变  $k$  值方法在 STATCOM 装置并网充电然后发出 10% 额定无功功率时的直流电压的控制情况。由图可见,固定  $k$  值方法在小电流时,各 H 桥直流侧电压会发散,而变  $k$  值方法可更有效地维持直流侧电压的平衡。



(a) 固定  $k$  值控制方法



(b) 变  $k$  值控制方法

图 6 10% 额定无功功率时,不同控制方法直流电压平衡的情况

Fig.6 DC voltages balancing for different control methods with 10% of rated reactive power

STATCOM 装置的保护系统主要包括电流保护与电压保护。其中电流保护是监测每个 H 桥链节的电流,一旦超过设定值则闭锁脉冲。电压保护包括

每个 H 桥直流电压的过压和欠压保护以及单相直流总电压过压保护,无论是出现过压还是欠压,保护系统都将闭锁脉冲,并根据过压值的大小决定是否跳开主开关。

#### 4 仿真结果

在完成 35 kV ±200 Mvar STATCOM 装置主电路及控制策略设计后,本文对 STATCOM 装置的各种工况进行仿真[15],图 7 为 35 kV ±200 Mvar STATCOM 装置接入东莞站后的等效系统图。设 STATCOM 以东莞站 220 kV 母线电压为控制目标,初始状态时 220 kV 母线电压为 227.7 kV,0.5 s 时投入站内 220 kV 母线上 80 Mvar 电抗器,考察 STATCOM 投入和未投入时母线电压的变化情况。

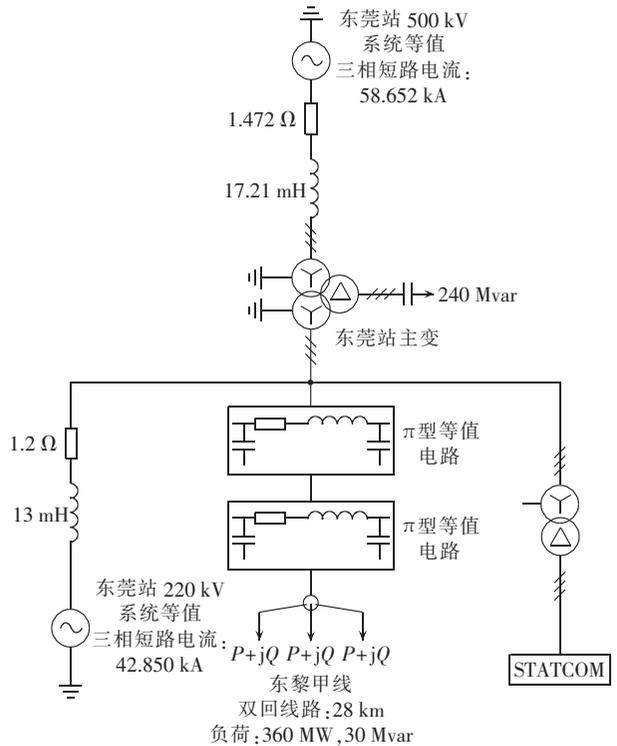


图 7 STATCOM 接入等效系统图

Fig.7 Equivalent circuit of system with STATCOM

由图 8 可见,STATCOM 未投入时,80 Mvar 电抗器的投入导致 220 kV 母线电压由 227.7 kV 跌落至 224.5 kV。当 STATCOM 投入运行时,STATCOM 迅速释放容性无功从而减少了电压跌落,220 kV 母线电压最终稳定在 226.5 kV,相比未投入 STATCOM 时,电压提升约 2 kV。STATCOM 输出无功功率如图 9 所示,在经过小幅的超调后迅速稳定在 42 Mvar,响应时间约 20 ms。图 10 给出了 STATCOM 装置输出相电流波形,幅值约为 600 A。仿真结果表明 STATCOM 装置在短路后能够快速输出无功功率,有效提高了东莞站 220 kV 的电压。仿真结果验证了 STATCOM 装置在稳态与暂态条件下能够满足系统运行的要求。

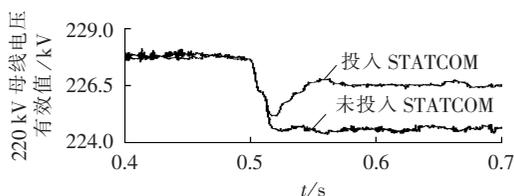


图 8 东莞站内 220 kV 母线电压有效值

Fig.8 RMS of 220 kV bus voltage in Dongguan Substation

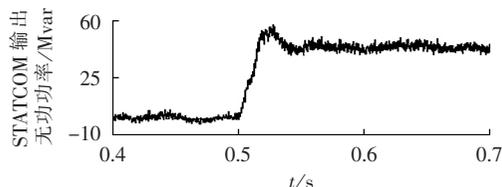


图 9 STATCOM 输出无功功率

Fig.9 Output reactive power of STATCOM

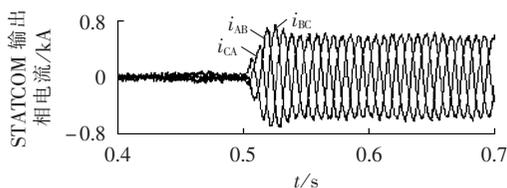


图 10 STATCOM 输出相电流

Fig.10 Output phase-current of STATCOM

## 5 STATCOM 现场运行

东莞变电站 35 kV  $\pm$ 200 Mvar STATCOM 装置于 2011 年 8 月 19 日并网试运行,为了验证 STATCOM 装置运行能否满足设计要求,进行了吸收、发出无功功率的阶跃实验<sup>[16-17]</sup>,图 11 为无功从 -40 Mvar 跳变到 40 Mvar 时的实验波形。图中,CH1 为无功功率参考值,CH2 为系统电压有效值,CH3 为装置输出无功功率,CH4、CH5 为系统电压,CH6、CH7、CH8 为装置输出电流。由图可见 STATCOM 装置无功阶跃响应时间小于 10 ms,满足设计要求。

为进一步测试 STATCOM 装置多目标控制的协调性,通过短路实验对 STATCOM 装置在系统故障情况下的运行进行了测试,考察 STATCOM 能否从稳态运行迅速切换到暂态运行。图 12 为短路实验时 STATCOM 装置电压及电流的变化曲线,A1—A3 为

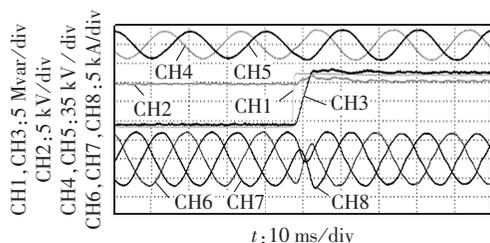


图 11 STATCOM 无功功率从 -40 Mvar 跳变至 40 Mvar 的阶跃曲线

Fig.11 Fast rising curve of reactive power from -40 Mvar to 40 Mvar generated by STATCOM

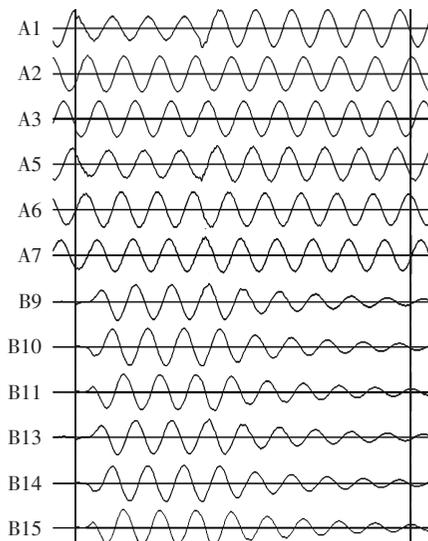


图 12 东元乙线单相短路后 STATCOM 动作曲线

Fig.12 Response curve of STATCOM to single-phase short circuit of Dong-Yuan Yi line

东莞站 220 kV 母线电压,A5—A7 为 35 kV 母线电压,B9—B11 为图 2 中左边第一组三相电流,B13—B15 为图 2 中右边第二组三相电流。可见故障后 220 kV 母线电压发生了暂降,STATCOM 装置快速进入暂态模式补偿无功功率,提高了系统的电压水平。故障清除后,系统电压恢复,STATCOM 装置迅速进入稳态及阻尼控制模式,装置对系统故障的响应速度小于 20 ms。因此装置可实现多目标的协调,满足设计要求。

## 6 结论

本文设计了 35 kV  $\pm$ 200 Mvar STATCOM 装置的主电路结构及控制保护策略,仿真结果与现场运行结果表明采用双三角接结构可以有效增加 STATCOM 装置的容量而避免了器件的串并联。多目标协调控制既可以保证 STATCOM 装置稳态发挥维持枢纽点电压稳定的能力,又能利用 STATCOM 装置在系统发生故障后,快速输出无功功率,提高系统的暂态电压稳定性。直接电流跟踪控制使 STATCOM 装置的响应时间小于 20 ms,同时保证 STATCOM 装置在受到系统冲击时不出现过电流。35 kV  $\pm$ 200 Mvar STATCOM 装置是目前国际上容量最大的 STATCOM 装置,其顺利投运为 STATCOM 装置的推广应用奠定了坚实的基础。

## 参考文献:

- [1] 陈辉祥,王仲鸿,崔文进,等. 广东电网电压稳定研究[J]. 电力系统自动化,2004,28(7):86-89.  
CHEN Huixiang,WANG Zhonghong,CUI Wenjin,et al. Research on voltage stability of Guangdong Power Grid [J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(7):86-89.

- [2] 周保荣,陈志刚,陈建福,等. 南方电网西电东送通道动态无功补偿应用研究[J]. 南方电网技术,2007,1(2):58-62.  
ZHOU Baorong, CHEN Zhigang, CHEN Jianfu, et al. Research on application of dynamic reactive power compensators in west-east electricity transmission systems of China Southern Power Grid [J]. Southern Power System Technology, 2007, 1(2): 58-62.
- [3] 刘文华,姜齐荣,梁旭,等.  $\pm$ 20 Mvar STATCOM 总体设计[J]. 电力系统自动化,2000,24(23):14-18.  
LIU Wenhua, JIANG Qirong, LIANG Xu, et al. Overall design of  $\pm$ 20 Mvar STATCOM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(23): 14-18.
- [4] 刘文华,宋强,滕乐天,等. 基于集成门级换向晶闸管与链式逆变器的  $\pm$ 50 Mvar 静止同步补偿器[J]. 中国电机工程学报,2008,28(15):55-60.  
LIU Wenhua, SONG Qiang, TENG Letian, et al.  $\pm$ 50 Mvar STATCOM based on chain circuit converter employing IGBT's[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(15): 55-60.
- [5] OGURA T, SUGIYAMA K, NINOMIYA H, et al. High turn-off current capability of parallel-connected 4.5 kV trench IEGT[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2003, 50(5): 1392-1396.
- [6] YAMAGUCHI M, OMURA I, URANO S, et al. IEGT design criterion for reducing EMI noise[C]//Proceedings of 2004 International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs. Kitakyushu, Japan; IEEE, 2004: 115-118.
- [7] 欧阳旭东,彭程,胡广振,等. 高压大容量静止同步补偿器功率开关器件选用分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(2):113-118.  
OUYANG Xudong, PENG Cheng, HU Guangzhen, et al. Power device characterization and selection of high voltage and high power STATCOM [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 113-118.
- [8] WANG Liang, JIANG Qirong, HONG Lucheng. A novel three-phase software phase-locked loop based on frequency-locked loop and initial phase angle detection phase-locked loop[C]//38th Annual IEEE Conference of Industrial Electronics (IECON), 2012. Montreal, Canada: IEEE, 2012: 150-155.
- [9] WANG Liang, JIANG Qirong, HONG Lucheng, et al. A novel phase-locked loop based on frequency detector and initial phase angle detector[J]. IEEE Transactions on Power Electronic, 2013, 28(5): 4538-4549.
- [10] 姜齐荣,刘文华,韩英铎,等.  $\pm$ 20 Mvar STATCOM 控制器设计[J]. 电力系统自动化,2000,24(23):24-28.  
JIANG Qirong, LIU Wenhua, HAN Yingduo, et al. Design of  $\pm$ 20 Mvar STATCOM controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(23): 24-28.
- [11] 栗春,马晓军,姜齐荣,等. STATCOM 提高系统暂态稳定及阻尼的动模实验研究[J]. 中国电机工程学报,1999,19(12):36-40.  
LI Chun, MA Xiaojun, JIANG Qirong, et al. Transient stability enhancement and damping improvement by STATCOM-physical experimental study[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(12): 36-40.
- [12] XIE Xiaorong, LI Jian, XIAO Jinyu, et al. Inter-area damping control of STATCOM using wide-area measurements[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, 2004. Hongkong, China: IEEE, 2004: 222-227.
- [13] 李春华,黄伟雄,袁志昌,等. 南方电网  $\pm$ 200 Mvar 链式 STATCOM 系统控制策略[J]. 电力系统自动化,2013,37(3):116-121.  
LI Chunhua, HUANG Weixiong, YUAN Zhichang, et al. Systematic control strategies for  $\pm$ 200 Mvar cascaded STATCOM in China Southern Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 116-121.
- [14] 刘钊,刘邦银,段善旭,等. 链式静止同步补偿器的直流电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报,2009,29(30):7-12.  
LIU Zhao, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. DC capacitor voltage balancing control for cascade multilevel STATCOM [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 7-12.
- [15] 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]. 电力系统保护与控制,2013,41(4):117-122.  
XIE Huaan, WANG Yongyuan, WAN Siwei, et al. Research on the control and protection system of Dongguan Substation cascade static synchronous compensator based on RTDS [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 117-122.
- [16] 刘文华,姜齐荣,梁旭,等.  $\pm$ 20 Mvar STATCOM 的工业现场测试与试运行[J]. 电力系统自动化,2000,24(23):43-46.  
LIU Wenhua, JIANG Qirong, LIANG Xu, et al. Field test and operation of  $\pm$ 20 Mvar STATCOM [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(23): 43-46.
- [17] 许树楷,陈名,傅闯,等. 南方电网  $\pm$ 20 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.  
XU Shukai, CHEN Ming, FU Chuang, et al. The system commissioning of  $\pm$ 20 Mvar STATCOM in China Southern Power Grid [J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(2): 21-25.
- [18] 高明振,何刚,胡广振,等. 100 MVA 级静止同步补偿器的可靠性分析[J]. 高电压技术,2013,39(7):1784-1791.  
GAO Mingzhen, HE Gang, HU Guangzhen, et al. Reliability evaluation of 100 MVA STATCOM [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(7): 1784-1791.
- [19] 刘文华,宋强,滕乐天,等. 基于链式逆变器的 50 MVA 静止同步补偿器的直流电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报,2004,24(4):145-150.  
LIU Wenhua, SONG Qiang, TENG Letian, et al. Balancing control of DC voltages of 50 MVA STATCOM based on cascade multilevel inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 145-150.
- [20] 袁志昌,刘文华,宋强. 基于暂态电压稳定指标的动态无功优化配置方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(14):17-21.  
YUAN Zhichang, LIU Wenhua, SONG Qiang. Optimal allocation

method of dynamic var compensation based on transient voltage stability index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14):17-21.

[21] 雷烈波,李勇,胡广振,等. 高压大容量静止同步补偿器的优化节能运行[J]. 高电压工程, 2013, 39(2):488-496.

LEI Liebo, LI Yong, HU Guangzhen, et al. Optimized energy-saving operation of high-voltage high-capacity STATCOM [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2):488-496.

[22] 袁志昌,宋强,刘文华. 改善动态相位跟踪和不平衡电压检测性能的改进软锁相环算法[J]. 电网技术, 2010, 34(1):31-35.

YUAN Zhichang, SONG Qiang, LIU Wenhua. A modified soft phase lock loop algorithm improving the performance in dynamic phase tracking and detection of unbalanced voltage [J]. Power System Technology, 2010, 34(1):31-35.

#### 作者简介:



黄伟雄

王永源(1973-),男,广东东莞人,高级工程师,硕士,研究方向为电力设备运行维护分析,从事变电设备运行与维护工作;

姜齐荣(1969-),男,湖南浏阳人,教授,博士研究生导师,通讯作者,主要从事电力系统柔性输配电控制技术、新能源发电与微电网控制研究(E-mail: qjjiang@tsinghua.edu.cn)。

黄伟雄(1966-),男,广东东莞人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统及其自动化,从事电网系统运行管理工作(E-mail: power436@sina.com);

刘锦宁(1979-),男,广东东莞人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统自动化,从事变电设备运行与维护工作;

## Overall design of 35 kV $\pm$ 200 Mvar STATCOM system

HUANG Weixiong<sup>1</sup>, LIU Jinning<sup>1</sup>, WANG Yongyuan<sup>1</sup>, JIANG Qirong<sup>2</sup>, YUAN Zhichang<sup>2</sup>, DU Wei<sup>2</sup>

(1. Guangdong Power Grid Corporation Dongguan Power Supply Bureau, Dongguan 523000, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The overall design of a 35 kV  $\pm$ 200 Mvar STATCOM system based on IEGT(Injection Enhanced Gate Transistor) is proposed for Dongguan Substation to meet its requirements for reactive power compensation and voltage stability enhancement. A parallel delta topology is adopted to avoid the parallel or serial connection of switching devices. Instead of the conventional phase locked loop with two integration blocks, that with only one integration block is proposed for the fast detection of phase angle jump of bus voltage. A multi-objective coordinated control scheme is designed, which, according to grid state information, detects the objective to meet the requirements of grid for the multiple objectives of STATCOM operation. The control strategy and its effectiveness are simulated based on the network parameters of Dongguan grid, which proves that, the STATCOM system responses quickly to the short circuit fault by outputting reactive power to effectively raise the voltage of 220 kV bus, meeting the requirements of grid operation under both steady-state and transient conditions.

**Key words:** STATCOM; cascade structure; delta connection; multi-objective control; IEGT; stability

## 虹润公司数显电工表系列产品介绍

福建顺昌虹润精密仪器有限公司生产的数显电工表品种有:单相交流电压/电流/工频周波测量显示控制仪、单相有功功率/无功功率/功率因数/三相平衡功率测量显示控制仪、单相有功电能/单相无功电能/单相视在电能、三相交流电压/电流/工频周波测量显示控制仪、三相有功功率/无功功率/功率因数/总功率测量显示控制仪、三相有功电能/三相无功电能/三相视在电能、三相谐波分析测量显示控制仪、LED三相电量集中显示控制仪、LCD三相综合电量表。

产品特点如下。

- 全部采用工业级元器件,所有与外界的连接都做了充分的电气隔离,内置抗雷击保护电路和电源滤波器。专业的 EMC 设计,对装置输入电源、模拟和数字电源进行实时的监测,保证了其运行的可靠性。

- 整体外观流线形设计,体积小而重量轻,改变以往老式电量仪表长而笨重的缺点。设计面板采用 ABS+PC 材料的亚克力设计,按键为轻触开关按键,前盖防水等级为 IP54 等级,后盖信号端子采用德国菲尼克斯插拔式端子。

- 强大的输入、输出保护,根据测量过程中负载的变化,可及时对过载、欠载、断相、不平衡、阻塞、堵转、起动超时、外部故障现象做出保护响应。

- 灵活方便的接线方式;高精度的测量和计量,采样时间跟随系统的频率变化而变化,实时调整数据的采样时间间隔,保证在基频偏离工频 50 Hz 很大的情况下准确计算出当时系统的基频分量、谐波分量和时序分量。

- 针对测量和计量功能,配置电能脉冲输出和通信接口;采用标准 MODBUS RTU 通信协议,可组网实现数据的集中管理。

- 用途广泛,可对一些感性和容性负载实现高精度测量,适用于成套智能配电柜、智能箱变的数据采集。

(福建顺昌虹润精密仪器有限公司)