

基于 IGBT 的 $\pm 10 \text{ kvar}$ STATCOM 装置设计

陶礼学,姚 钢,周荔丹,陈 陈

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 200030)

摘要: 静止同步补偿器(STATCOM)是目前用于电力系统无功补偿的装置。介绍了基于绝缘栅双极晶体管(IGBT)的 $\pm 10 \text{ kvar}$ STATCOM 装置的设计方案。论述了该装置的主电路方案、结构、功率、保护措施和启动方式。装置的控制器和脉冲发生器采用双数字信号处理器(DSP)加现场可编程门阵列(FPGA)的多 CPU 控制系统。动模实验结果表明,该装置电压、电流谐波畸变率 $\leq 5\%$;响应时间 $\leq 40 \text{ ms}$;装置的转换效率为 94.92% ,满足应用需要。

关键词: 静止同步补偿器; IGBT; 无功补偿

中图分类号: TM 761+1

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2006)05-0061-04

0 引言

随着各种电子装置和精密设备的广泛应用,用户对电能质量提出了越来越高的要求,快速有效的无功功率补偿对于工业生产尤为重要^[1]。

随着门极可关断晶闸管(GTO)和绝缘栅双极晶体管(IGBT)等新型大功率开关器件的出现,特别是相控技术、脉宽调制技术(PWM)、四象限变流技术的提出使得电力电子逆变技术得到快速发展,以此为基

础的无功补偿装置静止同步补偿器(STATCOM)能够快速平滑地吸收感性和容性无功功率,调节系统电压、校正功率因数、平衡负荷。STATCOM 正以其众多的优越性成为研究热点。为研究其在现实电力系统中的运行,设计制造了基于 IGBT 的 $\pm 10 \text{ kvar}$ 380 V STATCOM 装置,用以在实验室研究 STATCOM 在各种运行工况下的性能。本文介绍了该装置的主

1 STATCOM 的主电路结构

STATCOM 装置的整体结构如图 1 所示,主要包括逆变设备、并网线路和数字控制部分。

逆变设备是 STATCOM 装置的主要部件,通过等效电抗 L 与电网并联吸收和释放无功功率。数字控制部分包括主控制、数据采集、过零信号检测、显示输入控制、PWM 信号生成器和 IGBT 驱动等系统。主控制系统是数字控制部分的核心部件,通过处理各种信号产生 PWM 控制量,处理故障以及完成人机接口功能。

采用 IGBT 的 380 V $\pm 10 \text{ kvar}$ STATCOM 的主电路结构如图 2 所示,其核心是基于变压器多重化结构的三相电压型逆变器。12 个单相全桥逆变单元共

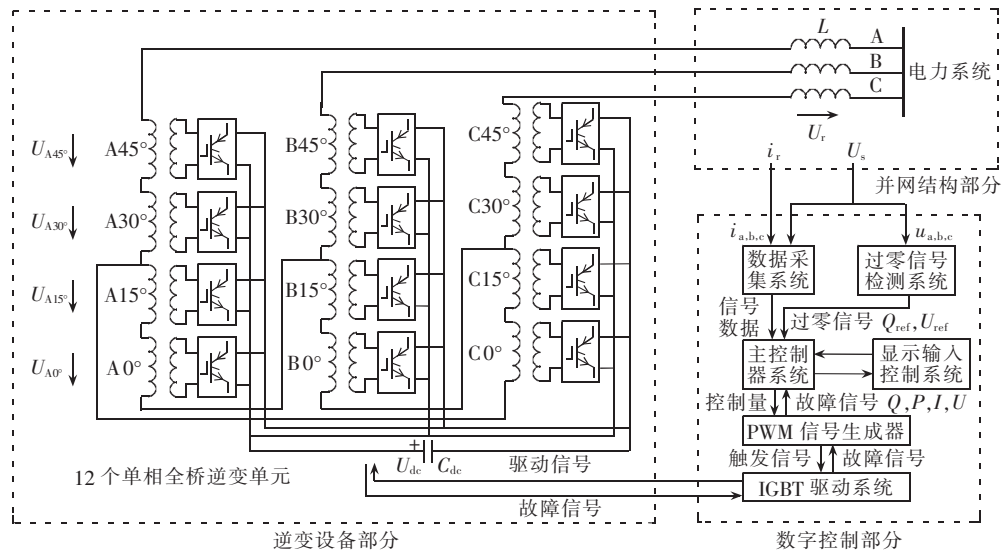


图 1 STATCOM 装置的整体结构
Fig.1 Overall structure of STATCOM

用一个由大容量电解电容 C_{dc} 构成的直流侧电源,输出侧采用 12 个单相中频隔离变压器曲折串联的方法与电网互联,通过 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 4 组逆变桥的多重化连接可消除 11 次以下谐波^[2-4]。STATCOM 逆变器的各相输出端分别由串联电抗与电网互联。曲折变压器多重串联连接结构采用三角形接法,有效地避免了系统不对称时 STATCOM 输出电压中含有零序分量的现象,简化了 STATCOM 的控制策略。该装置的额定电流为 16 A,额定电压为 380 V,直流侧电压最高为 410 V,正常工作电压为 320 V。

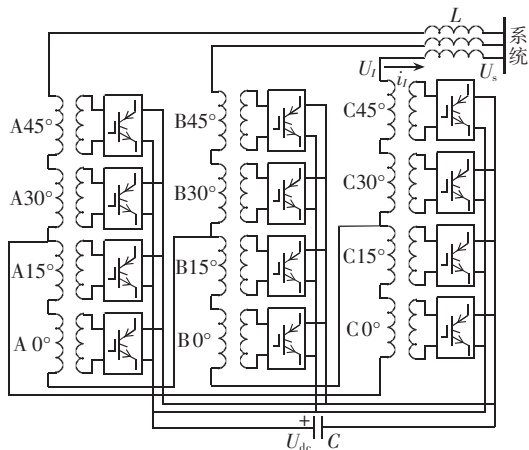


图 2 STATCOM 装置主电路结构图

Fig.2 Main circuit of STATCOM

本设计采用基于变压器多重化结构的 STATCOM,该拓扑结构可以改造成适用于开关频率高于 1 kHz 的特定谐波消除(SHE)的 PWM 控制型 STATCOM;也可以通过改造曲折变压器并网侧串联方案,实现链式 STATCOM 的新型拓扑结构和控制策略。

2 控制方案

控制器和脉冲发生器是 STATCOM 的重要组成部分,前者根据用户参考设定值和系统运行状态确定 STATCOM 应输出的无功电流;后者则执行前者的指令,向逆变器发送触发信号^[5]。通过对控制系统软、硬件进行分析,结合 STATCOM 的特点,使用 DSP 和 FPGA 设计了精度高、相位抖动小、稳定性好的 STATCOM 专用控制器和脉冲发生器。

2.1 脉冲发生器设计

脉冲发生器的原理框图如图 3 所示,其核心部分是采用 DSP 芯片的主控制系统,主要完成装置动态无功功率跟踪和控制,直流侧电压平衡和 PWM 脉冲角度数据的计算、系统状态过程的逻辑控制等功能。脉冲发生器能产生逆变单元所需的脉冲信号,完成 IGBT 导通过电流/系统过电压处理和装置启动过程分析。

2.2 控制系统设计

控制系统是 STATCOM 的核心,是实现各种功能的关键。它必须满足控制速度快、脉冲角度精确、便于实现多种功能的要求^[6-7]。依据上述要求设计的

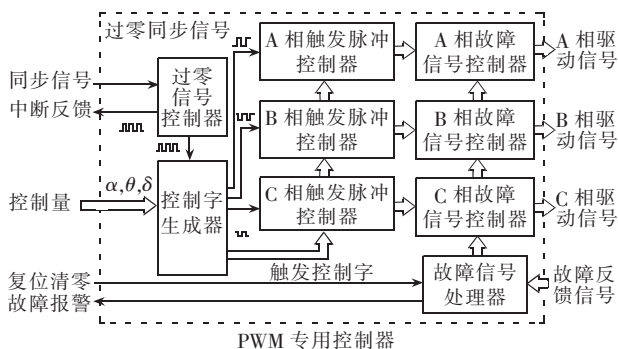


图 3 脉冲发生器原理框图

Fig.3 Block diagram of pulse generator

控制系统如图 4 所示。硬件采用 FPGA 加双 DSP 的多 CPU 结构,其中 FPGA 负责数据的采集和 PWM 信号的产生,一个 DSP 负责人机接口功能,另一个 DSP 负责数据的处理和计算,产生控制角 δ 。

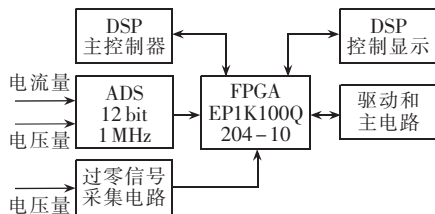


图 4 DSPs+FPGA 的控制图

Fig.4 Control diagram of DSPs and FPGA

3 装置的保护

3.1 过电流保护

在 STATCOM 并网处及直流侧大容量电解电容与逆变元件之间安装快速熔断器^[8-9],可以防止电流过大导致 STATCOM 装置和系统损失。当负荷过大或直流侧短路引起电流峰值大于 IGBT 额定电流时,如果直接关断 IGBT 易导致 IGBT 损坏,因此应保持出发脉冲信号通过跳闸来保护。

由于桥臂短路一般是因为 IGBT 误触发或因 IGBT 故障后不能正常关断引起的^[8],采用返回门极脉冲状态互锁和软关断技术能保证系统和换流元件的安全。具体操作流程如图 5 所示。

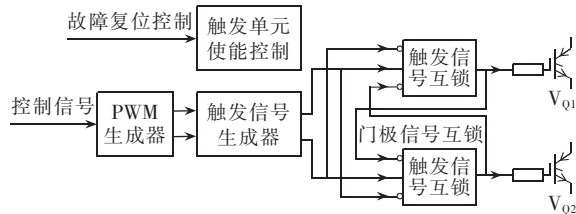


图 5 对桥臂短路引起过流的保护策略示意图

Fig.5 Overcurrent protection for bridge short circuit

3.2 过电压保护

STATCOM 装置过电压保护主要包括关断 IGBT 过电压保护、瞬态浪涌过电压保护及直流侧过电压保护。通过阻容吸收电路可以抑制 IGBT 的关断过电压峰值,同时还有效减小关断损耗,从而保证 IGBT 的

安全关断^[2];采用氧化锌避雷器释放回路可对 IGBT 瞬态浪涌过电压进行保护;由于装置的直流侧过电压主要由系统电压异常和控制失灵导致,采用快速跳闸和直流侧能量释放技术可保护系统的安全。直流侧过电压保护结构示意图如图 6 所示。

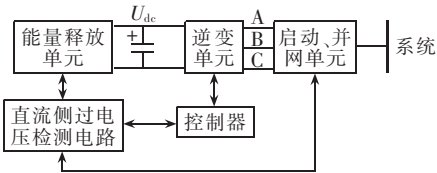


图 6 直流侧过电压保护示意图
Fig.6 Overvoltage protection at DC side

4 装置的效率

由于主电路采用多重曲折变压器串联迭加方案,STATCOM 的输出电压可在各个单相全桥逆变单元开关频率很低的情况下得到畸变率很小的正弦波。本设计中开关频率为 50 Hz,采用的 IGBT 的开关损耗分别为 5 mJ 和 7 mJ,因此主电路开关损耗为

$$P_{s-loss} = 48 \times 20 \times (5 \text{ mJ} + 7 \text{ mJ}) / s = 11.52 \text{ W} \quad (1)$$

STATCOM 的主逆变单元采用 SKM 75 GB 128 DN 型换流元件,导通压降为 2 V,逆变器的最大输出占空比为 50 %。STATCOM 满额输出电流为 16 A,通过单相隔离变压器与单相全桥逆变单元连接侧的电流为 5 A,则 STATCOM 装置的最大导通损耗为

$$P_{o-loss} = 48 \times 2 \times 5 \times 50 \% = 240 \text{ (W)} \quad (2)$$

整个连接线路电阻为 1 Ω,系统的连接损耗为

$$P_{sys} = I_e^2 R_{sys} = 16^2 \times 1 = 256 \text{ (W)} \quad (3)$$

由式(1)(3)可知系统的损耗为

$$P_{loss} = 11.52 + 240 + 256 = 507.52 \text{ (W)}$$

因而装置的转换效率为

$$\eta = 1 - \frac{P_{loss}}{S} = 1 - \frac{507.52}{10 \times 10^3} = 94.92 \%$$

5 装置启动与并网

STATCOM 的并网启动可采用自励启动、半自励启动和他励启动 3 种方式^[8],本设计中采用他励启动方式。他励启动是在装置并网前就投入驱动脉冲,经辅助整流器为直流电容器充电,使其直流侧电压达到一定值,调整逆变器输出交流电压幅值、频率及相位与系统电压幅值、频率及相位相等,因此,并网时几乎没有冲击电流^[8],基本结构如图 7 所示。

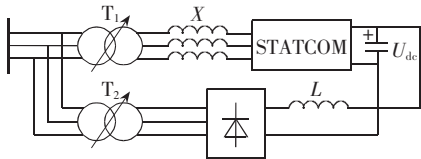


图 7 他励启动方式示意图
Fig.7 Schematic diagram of external excitation startup manner

6 动态模拟实验

将 STATCOM 按图 8 所示的方式接入系统,三相交流电源经 15 kV·A 自耦调压器 T 引入动态模拟实验系统,三相 STATCOM 装置通过并网电抗器 X 与动态模拟系统连接。图 9 为 STATCOM 并网前输出线电压波形,输出电压为 79 V,总畸变率≤5 %。

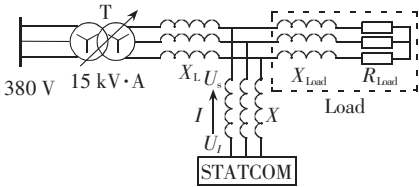


图 8 动模实验主接线图
Fig.8 Wiring diagram of physical experiment

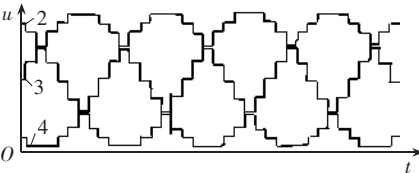


图 9 输出线电压波形
Fig.9 Output line voltage waveform

图 10 为 STATCOM 装置并网后空载运行的输出电压、电流波形,图中曲线 2,3,4 分别为 STATCOM 输出电压波形,曲线 5 为输出电流波形。电压为 380 V,总畸变率≤5 %;输出电流为 0 A。

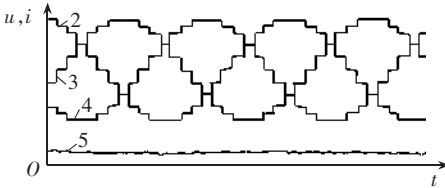


图 10 输出电压、电流波形
Fig.10 Output voltage and current waveforms

动态模拟实验系统电压由额定值 380 V 突降至 350 V 时,STATCOM 装置进行恒电压控制,暂态过程如图 11 所示。图中曲线 2,3,4 为系统电压波形,曲线 5 为 STATCOM 的 A 相输出电流波形,曲线

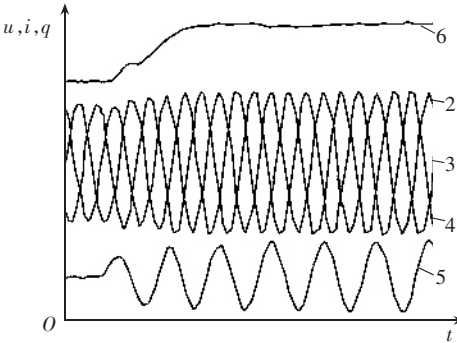


图 11 STATCOM 恒电压控制的暂态过程
Fig.11 Transient process of constant voltage control by STATCOM

6 为 STATCOM 装置输出的无功功率波形。

实验结果表明,STATCOM 实现了恒电压控制功能。当动态模拟试验系统电压由额定电压 380 V 迅速降至 350 V 时,STATCOM 检测到系统电压降落,迅速调节其输出无功功率的大小,由 0 kvar 向 +9 kvar 跳变,以弥补动态模拟系统的无功缺额,并最终控制动态模拟系统电压稳定在额定值。由图 11 可知 STATCOM 动态响应时间 ≤ 40 ms。

其他测试结果表明:整个启动过程平稳,没有突变或振荡过程;在测试时间内,装置在各种工况下都能稳定运行;额定功率时输出电流谐波畸变率 $\leq 5\%$;装置自身各种保护均能正常工作,装置在故障时能封锁脉冲进入待机状态,并能自动解除封锁进入正常运行;装置无功上升时间约 30 ms。

7 结语

本文介绍了基于 IGBT 的 ± 10 kvar STATCOM 装置的设计方案,并给出了动模实验结果。由于采用了多重变压器曲折串联的方法,STATCOM 具有良好的输出谐波特性,电压、电流谐波畸变率 $\leq 5\%$;在控制系统的设计中,采用了 DSP 加 FPGA 的多 CPU 硬件结构,STATCOM 具有响应速度快,响应时间 ≤ 40 ms;使用 IGBT 作为主换流器件,STATCOM 有很高的转换效率,装置的转换效率为 94.92%;完善的保护系统能够在保证装置安全前提下充分发挥 STATCOM 的功能;采用他励启动方式,STATCOM 在并网时不会产生冲击电流,对电网没有污染。试验结果证明本文提出的设计方法的正确性, ± 10 kvar STATCOM 样机的成功研制为其工业化提供了很好的技术支持。

参考文献:

- [1] 董云龙,吴杰,王念春,等. STATCOM 在改善电能质量中的应用[J]. 冶金动力,2004(1):23-25.
DONG Yun-long, WU Jie, WANG Nian-chun, et al. Application of STATCOM in improvement of power quality[J]. *Metallurgical Power*, 2004(1):23-25.
- [2] 刘文华,梁旭,姜齐荣,等. 采用 GTO 逆变器的 ± 20 Mvar STATCOM[J]. 电力系统自动化,2000,24(23):19-23.
LIU Wen-hua, LIANG Xu, JIANG Qi-rong, et al. Development of ± 20 Mvar STATCOM employing GTO inverters[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2000,24(23):19-23.
- [3] 栗春,姜齐荣,马晓军,等. ± 10 kvar 静止同步补偿器的动模实验研究[J]. 电力系统自动化,1999,23(6):50-53.
LI Chun, JIANG Qi-rong, MA Xiao-jun, et al. Research on dynamic response of ± 10 kvar static synchronous compensator[J]. *Automation of Electric Power Systems*,

1999,23(6):50-53.

- [4] 纪勇,李向荣,朱庆翔,等. 基于 GTO 的 ± 20 Mvar STATCOM 的现场运行及改进[J]. 电力系统自动化,2003,27(4):61-65.
JI Yong, LI Xiang-rong, ZHU Qing-xiang, et al. Field operation and improvement of GTO-based ± 20 Mvar STATCOM [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003,27(4):61-65.
- [5] 刘文华,卢军锋,郑征,等. 基于 SHE-PWM 的 D-STATCOM 的控制器脉冲发生器[J]. 清华大学学报:自然科学版,2002,42(9):1188-1191.
LIU Wen-hua, LU Jun-feng, ZHENG Zheng, et al. Controller and pulse generator based on SHE-PWM for DSTATCOM[J]. *Journal of Tsinghua University: Sci & Tech*, 2002,42(9):1188-1191.
- [6] 姜齐荣,刘文华,韩英铎,等. ± 20 Mvar STATCOM 控制器设计[J]. 电力系统自动化,2000,24(23):24-28.
JIANG Qi-rong, LIU Wen-hua, HAN Ying-duo, et al. Design of ± 20 Mvar STATCOM controller[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2000,24(23):24-28.
- [7] 刘文华,刘炳,王志泳,等. 基于 IGBT 三电平逆变器的 ± 100 kvar D-STATCOM[J]. 电力系统自动化,2002,26(1):70-73,77.
LIU Wen-hua, LIU Bing, WANG Zhi-yong, et al. ± 100 kvar D-STATCOM based on IGBT tri-level inverter[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2002,26(1):70-73,77.
- [8] 刘文华,姜齐荣,梁旭,等. ± 20 Mvar STATCOM 的工业现场测试及试运行[J]. 电力系统自动化,2000,24(23):43-46.
LIU Wen-hua, JIANG Qi-rong, LIANG Xu, et al. Field test and operation of ± 20 Mvar STATCOM[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2000,24(23):43-46.
- [9] 刘文华,陈建业,王仲鸿,等. 采用 GTO 的新型静止无功发生器[J]. 电力系统自动化,1997,21(3):24-28.
LIU Wen-hua, CHEN Jian-ye, WANG Zhong-hong, et al. GTO based advanced static var generator[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1997,21(3):24-28.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

陶礼学(1979-),男,湖北潜江人,硕士研究生,从事电力电子在电力系统中的应用研究(E-mail:taolixue@sjtu.edu.cn);

姚钢(1977-),男,江苏徐州人,博士研究生,从事电力电子在电力系统中的应用研究;

周荔丹(1974-),女,湖南韶山人,博士研究生,从事电力电子在电力系统中的应用研究;

陈陈(1938-),女,上海人,教授,博士研究生导师,从事电力电子在电力系统中的应用研究。

Design of ± 10 kvar STATCOM based on IGBT

TAO Li-xue, YAO Gang, ZHOU Li-dan, CHEN Chen

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: STATCOM (Static Synchronous Compensator) is the best selection for reactive power compensation in power system up to now. The design scheme of a IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor)-based ± 10 kvar STATCOM is introduced. Its main circuit, structure, power, protection and startup manner are discussed. Its controller and pulse generator are implemented with a multi-CPU system composed of two DSPs and an FPGA (Field Programmable Gate Array). The physical experimental results verify its satisfying performance with distortion ratio of voltage or current no more than 5 %, response time no more than 40 ms and conversion efficiency being 94.92%.

Key words: STATCOM; IGBT; reactive power compensation