

文章编号: 1671-7848(2014)01-0009-05

## 基于 MVB 的协议一致性测试系统设计

许力, 章洁, 刘博

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)



**摘 要:** 针对不同生产厂家的多功能车辆总线 (Multifunction Vehicle Bus, MVB) 设备存在兼容性和互操作性适应度差的问题, 设计了基于 MVB 的协议一致性测试系统, 给出了系统的总体结构、软硬件设计与实现方案, 并构建测试集优化模型。测试系统的测试电路接口模块包括物理层接口模块和链路层接口模块两部分, 负责将采集的 MVB 总线上的数据传递给控制与测试模块进行分析和处理。控制与测试模块软件部分着重设计了测试用例集优化模型, 并采用高效的商业求解器 CPLEX 进行有效求解, 提高了测试效率。实际运行结果表明: 该测试系统是稳定并且高效的, 可应用于不同 MVB 设备的协议一致性测试。

**关键词:** 多功能车辆总线; 协议一致性测试; 测试集优化

**中图分类号:** TP 27

**文献标志码:** A

## Design of Protocol Conformance Testing System Based on MVB

XU Li, ZHANG Jie, LIU Bo

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** A MVB protocol conformance testing system is proposed, which includes overall structure of system, the method to design and implement hardware, software and model of the test set optimization, for solving problems of fitness on the compatibility and interoperability of the MVB devices developed by different manufacturers. The interface module of the test circuit includes the physical layer and the link layer, which can receive data from the MVB, and send it to the specific control and test module to analyze and handle it. A new set optimization model is presented to reduce the redundancy of test set in the software of control and test module, and a highly efficient commercial solver named CPLEX is employed to solve the problem. The developed testing system is proved not only stable but also efficient by practical operation, and can be applied to test different MVB devices effectively.

**Key words:** multiple vehicle bus; protocol conformance test; test set optimization

### 1 引言

列车通信网络协议 (Train Communication Network, TCN) 是国际电工委员会 (IEC) 制定的国际列车网络通信标准, 因其性能优良而被确定为国际列车网络通信标准之一。TCN 提出将多功能车辆总线 (MVB) 作为连接同一车厢内或车辆之间车载设备的总线。目前我国对 MVB 高速列车通信平台和 MVB 车载设备正在进行积极探索和研究。

为了使不同国家或不同厂商生产的列车设备能够较好地兼容并正常通信, 需要对这些设备进行符合 IEC61375 国际标准的一致性测试<sup>[1-2]</sup>。若采用国外开发的系统, 则存在成本高、兼容性差等问题。为此, 设计与开发我国列车 MVB 一致性测试系统就显得尤为重要。近几年, 我国对 MVB 的一致性测试研究尚处于起步阶段<sup>[3]</sup>, 文献 [4] 研究了 MVB 一致性测试的过程数据, 但未涉及消息数据、

设备状态数据等, 覆盖度不够理想。文献 [5] 对 MVB 测试平台进行构建分析, 但未从测试集优化、提高测试效率方面进行深入研究。

本文主要针对现有测试系统覆盖度单一、效率不高的问题, 设计了基于 MVB 的协议一致性测试系统, 对测试系统软硬件设计、测试用例集优化模型及求解方法进行了研究, 覆盖物理层、链路层、协议栈及应用层的数据测试并在满足列车可靠性的前提下提高测试效率、降低测试成本, 能有效提高国产列车设备的上车进程。

### 2 MVB 总线特点及一致性测试概述

多功能车辆总线是将位于同一车辆, 或固定重联的不同车辆中的标准设备连接到 TCN 上的车辆总线。在物理层使用 3 种不同的物理介质: 无电隔离的短距离电气介质、有隔离的中距离电气介质和长距离光纤介质。MVB 采用集中控制, 周期性预

收稿日期: 2012-09-12; 收修定稿日期: 2012-12-21

基金项目: 国家 863 计划“高速列车网络控制系统”(2009BAG12A06)

作者简介: 许力(1964-), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士生导师, 主要从事智能信息处理、机器人控制、工业自动化等方面的教学与科研工作。

分配的主从方式对总线进行访问<sup>[6-8]</sup>。MVB 的过程变量服务涉及物理层、链路层和应用层，消息服务则涉及对应于开放系统互联（Open System Interconnect, OSI）的七层模型。MVB 通过硬件对物理层和链路层进行数据采集和发送，编码后为 CPU 提供软件服务原语，实现链路层以上的服务功能。

MVB 一致性测试过程可分成 MVB 设备配置、测试需求选择、测试用例生成及优化、测试运行以及测试评估 5 个阶段。一致性测试方法可分为本地测试法、分布式测试法<sup>[9]</sup>、协同测试法和远程测试法<sup>[10]</sup>。本文所设计的一致性测试系统采用分布式测试法，在测设备（Implementation Under Test, IUT）上层接口处有控制和观察点（Point of Control and Observation, PCO），通过  $N$  层抽象服务原语与上层测试器通信。

### 3 测试系统的总体结构和硬件设计

#### 3.1 测试系统的总体结构

MVB 一致性测试系统依据 IEC61375 - 2 协议规定的内容进行开发。网络平台包括测试系统、一台主设备、两台 MVB 待测设备（从设备）、与待测设备相连的 I/O 设备以及相应的网关，测试系统整体拓扑如图 1 所示。

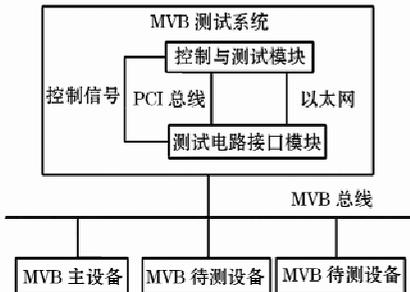


图 1 MVB 测试系统结构

Fig. 1 Structure of MVB testing system

测试系统由测试电路接口模块（硬件部分）和控制与测试模块（软件部分，包含计算机载体）组成。测试电路接口模块接收 MVB 总线上的数据并传递给控制与测试模块，也可向总线发送数据。控制与测试模块对接收的数据进行分析与处理，完成一致性测试工作，生成测试报告，将测试结果在人机界面实时显示，同时也可通过控制信号对接口电路进行配置，实现物理层测试或链路层以上的测试。

#### 3.2 测试电路接口模块硬件设计

测试电路接口模块分为物理层接口模块和链路层接口模块两部分，如图 2 所示。

物理层接口模块由一个高速信号采集卡与接口电路组成。由于 TCN 一致性测试对总线信号的采

集频率要求较高，故选用 M3i. 4142 和 M2i. 6021 作为信号采集卡，与上位机之间通过 ExpressCard34 接口进行通信。接口电路以 STM32 为核心，实现 MVB 总线与采集卡之间的接口转换，并控制一些外部电路的连通与转换。由上位机通过 RS - 232 串口与 STM32 通信实现实时控制。由于 MVB 总线上传输的是帧和报文，因此链路层接口在抓取 MVB 总线上数据帧后需进行解码。在向 MVB 总线发送数据之前，FPGA 模块进行数据读取、打包并以曼彻斯特码进行发送，这些均可在 FPGA 模块实现。CPU 模块控制 FPGA 与存储模块之间的数据传输以及与上位机的数据通信。

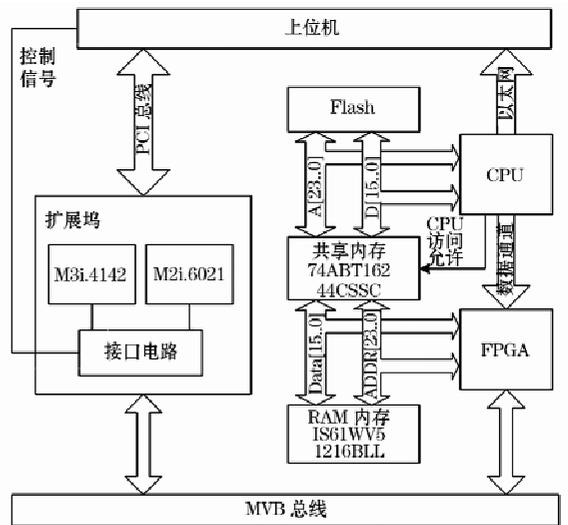


图 2 测试电路接口硬件结构图

Fig. 2 Hardware structure of the interface in the testing circuit

### 4 测试系统软件设计与测试集优化

#### 4.1 控制与测试模块软件设计

控制与测试模块软件流程图如图 3 所示。

系统上电后首先加载数据服务配置信息，决定设备参数设定，接着将 IEC61375 - 2 协议规定的一系列测试点作为测试需求，由用户选择测试需求规模并生成测试用例集。在保证测试可靠的前提下，可调用基于测试需求集的测试用例集优化模型并求解，然后执行包括物理层数据帧、过程数据、消息数据和设备状态等在内的测试，最后进行测试诊断，统计测试结果，生成测试报告。软件使用测试管理界面为用户提供友好的人机交互。

在一致性测试中，若要覆盖 IEC61375 - 2 协议规定的各项测试需求，则需设计的测试用例数量大、冗余度高且效率低。因此在对效率要求高的测试场合，保证系统可靠性的前提下，进行测试用例集优化就很有必要<sup>[11]</sup>。

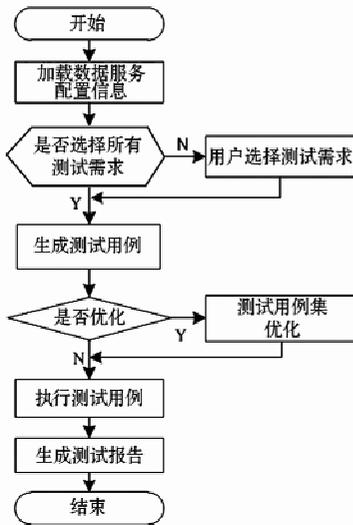


图 3 控制与测试模块软件流程图

Fig. 3 Software flow chart of the control and test module

## 4.2 测试集优化

### 4.2.1 优化模型

传统的顺序测试方法一般对各测试用例依次进行测试，直至满足所有的测试需求才停止。但是当测试用例数量庞大时，该测试方法的时间成本就可能很高，且完全依赖于原始测试用例的分布顺序，随机性强。

基于此，本文首先构建了测试用例优化模型 1，即在覆盖所有测试需求的前提下，以测试时间最小为目标进行优化，寻找最优的测试子集。数学上，该模型可表示为如式(1) - (3)所示的形式。

$$\min L = \sum_{i=1}^{N_1} c_i x_i \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^{N_1} a_{ij} x_i \geq 1 \quad \forall j \in [1, N_2] \quad (2)$$

$$x_i = 0 \text{ 或 } 1 \quad \forall i \in [1, N_1] \quad (3)$$

式中： $c_i$  表示测试用例  $i$  所需的测试时间成本； $x_i$  是 0-1 决策变量，表示是否采用测试用例  $i$  进行覆盖度测试； $N_1$  表示测试用例的数量； $N_2$  表示测试需求的数量； $a_{ij}$  表示测试用例  $i$  对测试需求  $j$  的覆盖情况， $a_{ij} = 1$  和  $a_{ij} = 0$  分别表示测试用例  $i$  覆盖测试需求  $j$  和测试用例  $i$  不覆盖测试需求  $j$ 。

上述 0-1 整数规划模型以测试时间最小为单一目标，没有考虑测试频度对于提高测试结果可信度的影响。在实际测试中，重要的测试需求要求多次测试以确保其可靠性。测试需求  $r_j$  的重要程度用  $k_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 20$ ) 表示，分 0.1, 0.2, ..., 0.9 共 9 个级别。 $r_j$  的覆盖频度用  $\sum_{i=1}^{N_1} a_{ij} x_i$  表示， $k_j$  越大，则希望测试需求的覆盖频度越高，反之亦然。因此我们建立另一种综合考虑时间成本和测试需求覆盖频度的优化模型 2，优化目标为表达式

(4)，表示用所有测试需求的覆盖频度对测试时间进行奖励。约束条件仍为式(2)、(3)。

$$\min L = \sum_{i=1}^{N_1} c_i x_i - \sum_{j=1}^{N_2} (k_j \sum_{i=1}^{N_1} a_{ij} x_i) \quad (4)$$

现根据协议列举部分过程数据和消息数据测试需求如表 1 所示，包括 F\_code 设置、端口设置、刷新时间、站服务和消息服务等。

表 1 测试需求集

Table 1 Testing requirement set

$r_i$	测试需求具体内容
$r_1$	测试设备各端口配置
$r_2$	IUT 各端口配置
$r_3$	测试设备与 IUT 配置匹配情况下，过程数据读请求主帧中 F_code 配置
$r_4$	测试设备与 IUT 配置匹配情况下，过程数据写请求主帧中 F_code 配置
$r_5$	过程数据读请求中 F_code 值与该逻辑端口所配置大小不匹配
$r_6$	过程数据写请求中 F_code 值与该逻辑端口所配置大小不匹配
$r_7$	过程数据读请求中 F_code 值与 IUT 宿端口配置大小不匹配
$r_8$	过程数据写请求中 F_code 值与 IUT 宿端口配置大小不匹配
$r_9$	使 IUT 宿端口过程数据无效的请求
$r_{10}$	宿端口刷新时间
$r_{11}$	消息服务的写功能索引服务
$r_{12}$	消息服务的读功能索引服务
$r_{13}$	消息服务的读站索引服务
$r_{14}$	消息服务的写站索引服务
$r_{15}$	消息服务的读组索引服务
$r_{16}$	消息服务的写组索引服务
$r_{17}$	消息数据的读站状态服务
$r_{18}$	消息数据的读站目录服务
$r_{19}$	消息数据的写站保留服务
$r_{20}$	消息数据的写站控制服务

本文从设计的测试用例集中选取了 12 个用例，限于篇幅，对测试用例 1 和 2 进行说明。

测试用例 1：测试设备发送 F\_code = 0 的过程数据读请求主帧，IUT 对应端口大小为 32，刷新时间为 1 ms，

测试 IUT 宿端口是否能正确接收到该过程数据并响应；在此基础上，测试设备发出 Call\_Write\_Station\_Control，设置 RST = 0，Station\_Id 和 Station\_Name 中包含字符串 MVB CONFORMANCE

MESSAGEDATA TEST, 测试 IUT 收到请求后能否在一定时间内响应 Reply\_Write\_Station\_Control。

测试用例 2: 测试设备发送 Call\_Read\_Function\_Directory, IUT 接收到请求后能否在一定时间内响应包含 “original function\_list” 的 Reply\_

Read\_Function\_Directory; 测试设备发出 Call\_Read\_Station\_Inventory, IUT 接收后, 能否在一定时间内响应 Reply\_Read\_Station\_Inventory 并将 Station\_id、IUT Station\_Status、Link\_set 中的至少一位置 1。根据选用的测试用例得到覆盖系数矩阵  $A$  见表 2。

表 2 测试用例覆盖系数矩阵

Table 2 Cover coefficient matrix of the test cases

$t_i$	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_5$	$r_6$	$r_7$	$r_8$	$r_9$	$r_{10}$	$r_{11}$	$r_{12}$	$r_{13}$	$r_{14}$	$r_{15}$	$r_{16}$	$r_{17}$	$r_{18}$	$r_{19}$	$r_{20}$
$t_1$	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
$t_2$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
$t_3$	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
$t_4$	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
$t_5$	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1
$t_6$	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
$t_7$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
$t_8$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
$t_9$	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
$t_{10}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1
$t_{11}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
$t_{12}$	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0

4.2.2 求解方法及算例分析

ILOG CPLEX 作为求解线性规划 (Linear Programming, LP)、二次规划 (Quadratic Programming, QP)、二次约束规划 (Quadratic Constrained Programming, QCP)、混合整数规划问题 (Mixed Integer Programming, MIP) 的商业求解器, 广泛应用于各种优化领域。本文所构建的测试用例的优化模型属于 0-1 整数规划问题, 可以考虑采用高效的商业求解器求解。本文采用基于 AMPL 平台的 CPLEX 12.2<sup>[12]</sup> 对所构建的优化问题进行求解, 表 3 给出了两种优化方法的性能对比。

由表 3 可知, 顺序测试法获得的测试子集为  $\{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8, t_9, t_{10}\}$ , 耗时 20.12 s, 模型 1 的最优测试子集为  $\{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_9, t_{10}\}$ , 耗时 12.53 s, 模型 2 的最优测试子集为  $\{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_9, t_{10}, t_{12}\}$ , 耗时 14.81 s。在时间性能上, 模型 1 与模型 2 均远优于顺序测试, 模型 1 略优于模型 2。

限于篇幅, 表 4 列出了  $k$  较大的 3 个测试需求  $r_3, r_7, r_{16}$  和  $k$  较小的测试需求  $r_9, r_{17}$ 。分析表 4 可知, 模型 1 只保证每个测试需求均被覆盖, 而模型 2 对于重要测试需求增加其覆盖频度以提高可靠性, 对于重要度小的测试需求并不增加其覆盖频度。模型 1 以时间最优为单一目标, 可应用于实时性要求特别高的测试场合; 模型 2 综合考虑了时间最优和测试需求覆盖频度, 在对效率和可靠性要求均高的测试系统中效果最好。本测试系统采用模型 2。

表 3 顺序测试法与两种 0-1 整数规划法结果对比

Table 3 Comparison between the sequential testing method and two 0-1 integer programming methods

测试用例序号	测试时间/s	顺序测试法	0-1 整数规划法 (模型 1)	0-1 整数规划法 (模型 2)
$t_1$	2.07	1	1	1
$t_2$	1.42	1	1	1
$t_3$	1.52	1	1	1
$t_4$	1.36	1	1	1
$t_5$	2.63	1	1	1
$t_6$	1.16	1	0	1
$t_7$	2.57	1	0	0
$t_8$	1.38	1	0	0
$t_9$	1.22	1	1	1
$t_{10}$	2.31	1	1	1
$t_{11}$	1.36	0	0	0
$t_{12}$	1.12	0	0	1
总时间	-	20.12	12.53	14.81

表 4 模型 1、2 对测试需求的覆盖频度对比

Table 4 Comparison between Model 1 and Model 2 on the covering frequency of test requirement

模型种类	$r_3$ ( $k=0.8$ )	$r_7$ ( $k=0.9$ )	$r_9$ ( $k=0.1$ )	$r_{16}$ ( $k=0.8$ )	$r_{17}$ ( $k=0.2$ )
模型 1	1	1	1	1	1
模型 2	3	3	1	2	1

5 测试系统运行情况

MVB 一致性测试系统平台硬件部分的 MVB 网卡由德国 MEN 公司提供, 软件部分在 Linux ubuntu 下用 QT 设计编写。测试系统运行时, 上位机通过

接口模块接收数据并在界面上实时显示测试结果。现以物理层 ESD 测试中的信号波形测试为例进行说明，界面如图 4 所示。用户可选择该项功能并运行，上位机能实时显示测试要求与测试结果。各项测试均完成后，系统统计出错率，并生成测试报告。该测试系统包括了协议要求的物理层、链路层、协议栈和应用层测试，覆盖面广，且基于测试用例优化模型 2 精简测试用例，有效提高了测试效率。

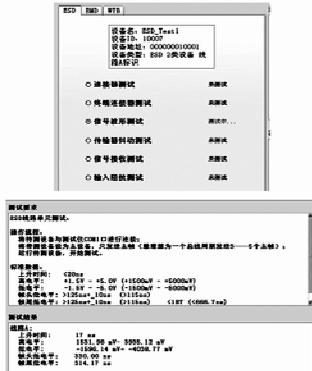


图 4 物理层测试结果

Fig. 4 Testing results of physical layer

## 6 结论

本文针对现有列车测试系统的局限性，设计了一种基于 MVB 的协议一致性测试系统，实现对物理层、链路层、协议栈和应用层上的各类数据进行高覆盖度测试，并提出了测试用例优化模型。实际运行表明本 MVB 测试系统在保证可靠性的前提下提高了测试效率，降低 MVB 一致性测试成本，有助于提高不同生产厂家设备的兼容性和互操作性、提高国产列车设备的上车进程，具有一定的应用价值。此外，本测试系统也能为绞线式列车总线

(Wire Train Bus, WTB) 一致性测试系统的设计提供一定借鉴。

## 参考文献 (References):

[1] IEC61375-1, Electric Railway Equipment - Train bus - Part 1: Train Communication Network[S]. Geneva: IEC, 1999.

[2] IEC61375-2, Electric Railway Equipment - Train bus - Part 2: Train Communication Network Conformance Testing[S]. Geneva: IEC, 2007.

[3] 何立强, 叶新铭. 协议一致性测试平台的设计和实现[J]. 计算机工程, 2001, 27(8): 27-35. (He Liqiang, Ye Xinming. Design and implementation of conformance testing environment [J]. Computer Engineering, 2001, 27(8): 27-35.)

[4] 朱琴跃, 谢维达, 谭喜堂. MVB 协议一致性测试研究与实现[J]. 铁道学报, 2007, 29(4): 115-120. (Zhu Qinyue, Xie Weida, Tan Xitang. Research on MVB protocol conformance testing [J]. Journal of the Railway Society, 2007, 29(4): 115-120.)

[5] 郑中亮. 多功能车辆总线的一致性测试[D]. 上海: 同济大学 2005. (Zheng Zhongliang. Conformance Test on Multifunction Vehicle Bus [D]. Shanghai: Tongji University, 2005.)

[6] Hubert D. Kirmann U C. IEC 列车通信网络[J]. 机车电传动, 1999, 40(3): 4-9. (Hubert D, Kirmann U C. IEC Train Communication Network [J]. Electric Drive for Locomotive, 1999, 40(3): 4-9.)

[7] 刘建伟. 轨道交通车辆 MVB 通信网络的研究与设计实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2006. (Liu Jianwei. Study and design of MVB communication network in railway vehicles [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006.)

[8] Chen J M, Wang Z, Sun Y X. A basic study on algorithm of real-time schedule table for fieldbus [C] // Proceeding of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation. Shanghai, 2002: 1760-1763.

[9] 龙勇, 张志利, 郭晓刚. 一类基于智能传感器的分布式测试体系研究[J]. 控制工程, 2007, 14(S1): 125-130. (Long Yong, Zhang Zhili, Guo Xiaogang. Research on distributed sensors network based on multi-sensor integration [J]. Control Engineering of China, 2007, 14(S1): 125-130.)

[10] 朱雪峰, 许建军, 邹彪, 等. 网络协议一致性测试研究综述[J]. 计算机科学, 2009, 36(12): 5-7. (Zhu Xuefeng, Xu Jianjun, Zhou Biao, et al. Network protocol conformance testing: An overview [J]. Computer Science, 2009, 36(12): 5-7.)

[11] 章晓芳, 徐宝文, 聂长海, 等. 一种基于测试需求约简的测试用例集优化方法[J]. 软件学报, 2007, 18(4): 821-831. (Zhang Xiaofang, Xu Baowen, Nie Changhai, et al. An approach for optimizing test suit based on testing requirement reduction [J]. Journal of Software, 2007, 18(4): 821-831.)

[12] Fourer R, Gay D M, Kernighan B W. A modeling language for mathematical programming [J]. Management Science, 1990, 36(5): 519-554.

(上接第 8 页)

[4] 单焘焱. 基于滑膜控制理论的 STATCOM 无功补偿控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 150-154. (SHAN Chonghao. Study of reactive compensation of STATCOM based on the sliding mode control theory [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 150-154.)

[5] Zhou X J. Modeling and simulation analysis of 3-level VSC-STATCOM based on SVPWM [C] // Power Engineering and Automation Conference (PEAM). Wuhan, 2011: 111-114.

[6] Li E X. The study on current detecting algorithm based on generalized instantaneous reactive power theory [C] // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). Chengdu, 2010: 1-4.

[7] 翁海霞. 基于瞬时无功理论的 STATCOM 电流检测方法与控制技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2011. (Weng Haixia. Study of current detection method and control technology of STATCOM based on Instantaneous reactive power theory [D]. Jinan: Shandong University, 2011.)

[8] 臧春艳, 裴振江. 链式 STATCOM 直流侧电容电压控制策略研究[J]. 高压电器, 2010, 46(1): 17-21. (Zhang Chunyan. Research on DC-link capacitor voltage control strategies of the cascaded STATCOM [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(1): 17-21.)

[9] 张晓华, 许传明. 基于反馈线性化的 STATCOM 控制研究[J].

控制工程, 2011, 18(3): 327-330. (Zhang Xiaohua, Xu Chuanming. Study on control of STATCOM via feedback linearization method [J]. Control Engineering of China, 2011, 18(3): 327-330.)

[10] 卢强. 电力系统非线性控制[M] 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2008: 123-138. (Lu Qiang. Power systems nonlinear control [M] 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 123-138.)

[11] Sun X J, Wei W. A new sliding mode control of STATCOM and its effects on wind farm [C] // Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT). Harbin, 2011: 2938-2941.

[12] Hou R. Design of sliding mode controller for STATCOM with LCL filter [C] // Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE). Changchun, 2010: 80-83.

[13] 罗映红. 基于电流间接控制的 STATCOM 系统仿真研究[J]. 现代电子技术, 2011, 34(12): 154-156. (Luo Yinghong. Simulation of STATCOM system based on indirect current control [J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(12): 154-156.)

[14] Vural A M, Bayindir K C. Optimization of parameter set for STATCOM control system [C] // Transmission and Distribution Conference and Exposition. New Orleans, 2010: 1-6.

[15] 王盛. 基于多模型 PI 控制器的静止同步补偿器的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011. (WANG S. Research on static synchronous compensator (STATCOM) based on multiple models PI controller [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.)