

UPFC 晶闸管旁路开关阻尼参数测量技术研究^{*}

柴卫强¹, 李勇², 郭有强², 杨青波¹, 张振兴¹, 蓝叶锋²

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 南京 210019)

摘要:晶闸管旁路开关 TBS 是 UPFC 系统中重要的保护设备,可以在电力系统故障时实现对 UPFC 的快速旁路和隔离保护。由于 TBS 只有在系统故障时投入运行,而在系统正常运行时一直处于热备用状态,这种工作特性导致其无法像其他设备一样实现利用在线检测手段来判断晶闸管回路元件状态。文章对常用的晶闸管阻尼回路参数测量方法进行了对比研究,结合 TBS 晶闸管级阻尼回路特点,提出了一种基于 AD5933 阻抗测量芯片的 TBS 晶闸管回路 RC 阻容参数测量方法,具有快速、准确、可靠等优点。

关键词:UPFC;TBS;AD5933;阻抗测量

DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2019.014.020

中图分类号:TM933

文献标识码:B

文章编号:1001-1390(2019)14-0124-06

Research on snubber parameter measurement technology of UPFC thyristor bypass switch

Chai Weiqiang¹, Li Yong², Guo Youqiang², Yang Qingbo¹, Zhang Zhenxing¹, Lan Yefeng²

(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, Henan, China. 2. Nanjing Power

Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: The thyristor bypass switch (TBS) is an important protective device in the UPFC system, which can realize fast bypass and isolation protection for the UPFC in the event of power system failure. Since the TBS is only put into operation when the system is faulty, and is always in the hot standby state during normal operation of the system, this working characteristic makes it impossible to use the online detection means to judge the state of the thyristor circuit component like other devices. In this paper, the commonly used thyristor-level snubber circuit parameter measurement methods are compared. Combined with the characteristics of TBS thyristor-level snubber circuit, a method for measuring the RC resistance capacitance parameter of TBS thyristor-level snubber circuit based on AD5933 impedance measurement chip is proposed, which has the advantages of fast, accurate and reliable.

Keywords: UPFC, TBS, AD5933, impedance measurement

0 引言

统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)是迄今为止功能最全面的柔性交流输电设备(FACTS)。UPFC 能快速、独立控制有功、无功功率,全方位实现潮流调节,提高电力线路输送能力,实现电网优化运行,提升系统的安全稳定性。目前,UPFC 已经在国内外多个工程中得到了成功应用,具有广泛的推广前景^[1-4]。

UPFC 通过其串联侧部分接入交流线路,由于 UP-

FC 过流能力远小于电力系统故障时的短路电流,在电力系统故障时必须迅速将 UPFC 旁路,因此 UPFC 需要配置旁路开关,在电力系统故障时实现对 UPFC 的快速隔离和保护。现有的快速机械旁路开关最快合闸时间约为 40 ms^[2],完全不能满足 UPFC 系统快速旁路的要求。晶闸管具有额定导通电流大和触发导通时间短的优点,已投运的 UPFC 工程除配置机械快速旁路开关外,还均配置了与之并联的由晶闸管组成的高速旁路开关(Thyristor Bypass Switch, TBS)。当电力系统故障时,晶闸管旁路开关可以在保护动作后几毫秒内导通以将 UPFC 进行隔离旁路,待机械旁路完全闭合后

^{*} 基金项目:国网江苏省电力公司重点科技项目(J2017073)

转移故障电流^[2]。

系统正常运行时, TBS 的晶闸管处于关断状态, 只有当系统故障时才会导通工作, 因此 TBS 不能像其他设备一样完全利用在线检测手段来判断晶闸管及其回路元器件的好坏状态, TBS 的例行检修测试就非常重要。晶闸管级阻尼回路具有减小晶闸管关断过程中的电压振荡和为晶闸管触发控制单元提供暂态电源等重要作用, 如果阻尼回路元器件故障会导致 TBS 在系统故障时无法正常触发导通, 不能实现对于 UPFC 的隔离保护。文章研究分析了 TBS 晶闸管阻尼回路的特点和阻尼参数的测量检测技术, 设计了基于阻抗测量芯片 AD5933 的 TBS 晶闸管阻尼参数测量装置, 并进行了试验验证。

1 TBS 晶闸管级 RC 阻尼回路构成

TBS 晶闸管级 RC 阻尼回路示意图构成如图 1 所示。

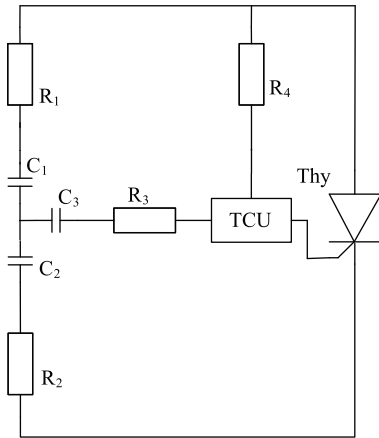


图 1 TBS 晶闸管级 RC 阻尼回路示意图

Fig. 1 Damping loop schematic diagram of TBS thyristor RC

图 1 换流阀晶闸管级电路中, $R_1 \sim R_3$ 和 $C_1 \sim C_3$ 构成晶闸管级 RC 阻尼回路, TCU 为晶闸管触发控制单元^[3]。

对上述晶闸管级 RC 阻尼回路进行参数测量检测时, 将 RC 阻尼回路等效为一个电阻 R 和一个电容 C 的串联, 只需测量出等效电阻 R 和电容 C 的数值即可判断阻尼回路元件是否故障^[5-7]。

2 传统 RC 参数测量方法

(1) 传统的阻抗测量方法大多采用万用表、电容桥等直接测量晶闸管级的电阻、电容参数。该方法全程需要手动操作, 耗时长, 效率低, 只适用于测量少量元器件;

(2) 第二种方法是使用 LCR 测试仪, 优点是测量精度高, 准确度能够达到 0.01%。缺点是仪器价格昂贵、功能单一, 测试时间长, 不适合工程现场应用;

(3) 工程中比较常用的阻抗测量方法是利用 MCU 微处理器或者 FPGA 控制 DAC 输出交流电压激励信号源施加于被测阻尼回路, 然后再通过 ADC 采样被测阻尼回路的电压和电流, 最终计算得到被测回路的电阻 R 和电容 C ^[7]。该方法电路构成如图 2 所示。

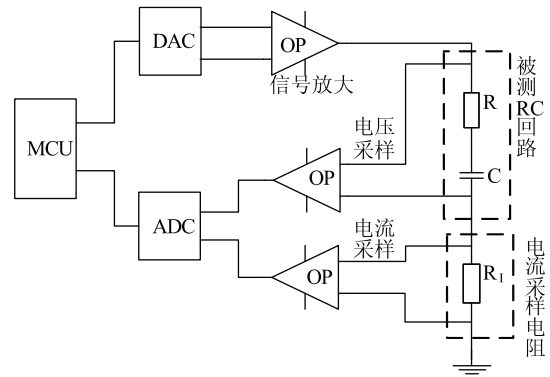


图 2 DAC 激励源阻抗测试电路

Fig. 2 Impedance test circuit of DAC excitation source

方法(3)的测试原理是, MCU 控制器控制 DAC 分别输出 f_1 和 f_2 两种频率的交流电压激励信号, 经运放放大电压后施加到被测 RC 回路, 同时在被测回路中串联一个已知电阻 R_1 用以电流采样, 通过 ADC 采样 RC 回路电压(有效值, 下同) U_1 和 R_1 两端电压 U_2 。电路电流(有效值, 下同) $I_1 = U_2/R_1$, RC 阻尼回路阻抗(模值, 下同)为式(1)中的 Z 。设定 f_1 和 f_2 两种频率激励信号条件下的阻抗分别为 Z_1 和 Z_2 , 根据公式(2)可得方程组(3), 根据复数模值等价原理可得方程组(4), 解方程组(4)可得到式(5)电阻 R 和式(6)电容 C 。

$$Z = U_1/I_1 = (U_1 \times R_1)/U_2 \quad (1)$$

$$Z = R + \frac{1}{j\omega C} = R + \frac{1}{j2\pi f C} \quad (2)$$

$$\begin{cases} Z_1 = R + \frac{1}{j\omega_1 C} = R + \frac{1}{j2\pi f_1 C} \\ Z_2 = R + \frac{1}{j\omega_2 C} = R + \frac{1}{j2\pi f_2 C} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} Z_1^2 = R^2 + \frac{1}{4\pi^2 f_1^2 C^2} \\ Z_2^2 = R^2 + \frac{1}{4\pi^2 f_2^2 C^2} \end{cases} \quad (4)$$

$$R = \sqrt{\frac{f_2^2 Z_2^2 - f_1^2 Z_1^2}{f_2^2 - f_1^2}} \quad (5)$$

$$C = \sqrt{\frac{f_2^2 - f_1^2}{4\pi^2 f_1^2 f_2^2 \times (Z_1^2 - Z_2^2)}} \quad (6)$$

方法(3)测量原理具有通用性,但图2中使用分立元件搭建的测量电路具有以下缺点:①该电路要求DAC输出较高频率的交流激励信号源,对于DAC和运放的速度、精度等性能参数有较高要求;②受运放供电电压限制,激励电压信号幅值最高约为 $\pm 15V_{pp}$,而低频激励信号RC回路阻抗较大,电流信号微弱,小电流采样精度低,最终导致实际测量到的RC参数偏差

较大^[7];③电路复杂,成本较高。

基于方法(3)中的测量原理,同时针对图2分立电路缺点设计了一种基于AD5933阻抗测量芯片的TBS晶闸管回路RC阻容参数测量方案,具有集成度高、测量精度高、可输出高频激励信号、抗干扰性能好等优点,弥补了图2分立电路的不足。

3 基于AD5933的RC参数测量方案

3.1 AD5933 阻抗测量原理

AD5933是一款高精度阻抗测量芯片,其内部集成了DDS、DAC、I-V转换器、滤波器、ADC、DFT等模块,从而使阻抗测量能够在单片系统完成,具有结构简单、精度高、成本低等优点^[8]。图3为AD5933内部功能框图。

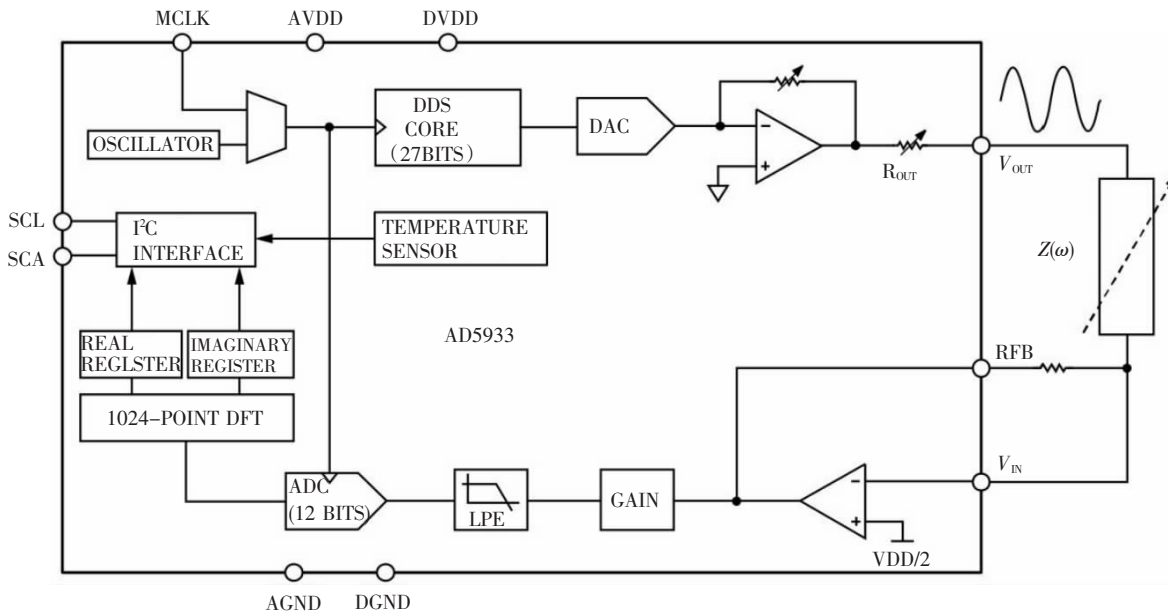


图3 AD5933 功能框图

Fig. 3 AD5933 function block diagram

使用AD5933进行阻抗测量的工作过程是^[8-9],首先通过I²C接口编程设定激励信号的频率和幅值,激励信号经放大后施加于已知的标定阻抗 R_C ,AD5933片内ADC对回路电压电流进行采样,采样数据输入DFT模块进行傅里叶变换计算,得到阻抗的实部值 R_1 和虚部值 I_1 ,根据式(7)计算阻抗幅度 A_1 。然后根据式(8)计算该条件下的增益系数 G_1 。

接着,在不改变激励信号频率和幅值的条件下,通过控制电子开关将激励信号施加至被测未知阻抗回路,得到被测未知阻抗回路的实部值 R_2 和虚部值 I_2 ,根据式(9)计算得到被测回路阻抗值 Z 。

$$A_1 = \sqrt{R_1^2 + I_1^2} \quad (7)$$

$$G_1 = \frac{\left(\frac{1}{\text{阻抗}}\right)}{\text{幅度}} = \frac{1}{R_C} = \frac{1}{R_C \times A_1} \quad (8)$$

$$Z = \frac{1}{\text{幅度} \times \text{增益系数}} = \frac{1}{\sqrt{R_2^2 + I_2^2} \times G_1} = \frac{R_C \times A}{\sqrt{R_2^2 + I_2^2}} \quad (9)$$

只需测量两个频率点的阻抗数据 Z_1 和 Z_2 ,便可根据式(5)和式(6)计算出电阻 R 和电容 C 的数值^[10-11]。

3.2 系统硬件设计

图4为系统硬件电路,该电路在AD5933典型电路基础上加入了 U_5/U_6 电子开关用以选择匹配不同的被

测阻尼参数。 V_{out} 引脚输出的激励信号经过高通滤波滤波器并叠加 $V_{cc}/2$ 直流偏置电压,使用一个低输出阻抗运放 U_3 进行跟随输出后施加于被测阻抗回路或标定电阻。该运放跟随电路能够消除 AD 5933 的高输出阻抗对被测回路的影响,同时提高输出驱动能力,提高测量精度。激励信号在被测阻抗回路产生的电流信

号经运放 U_4 完成 I-V 转换后输入 AD5933 的 V_{IN} 和 R_{FB} 输入引脚用以采样。MCU 控制器选用某公司的 TM4C129E,其通过 I^2C 接口实现对 AD5933 的控制和读取测量数据,完成被测回路 RC 阻尼参数的计算,MCU 通过以太网接口与上位机相通信,用以上传测量数据和下发测试控制指令。

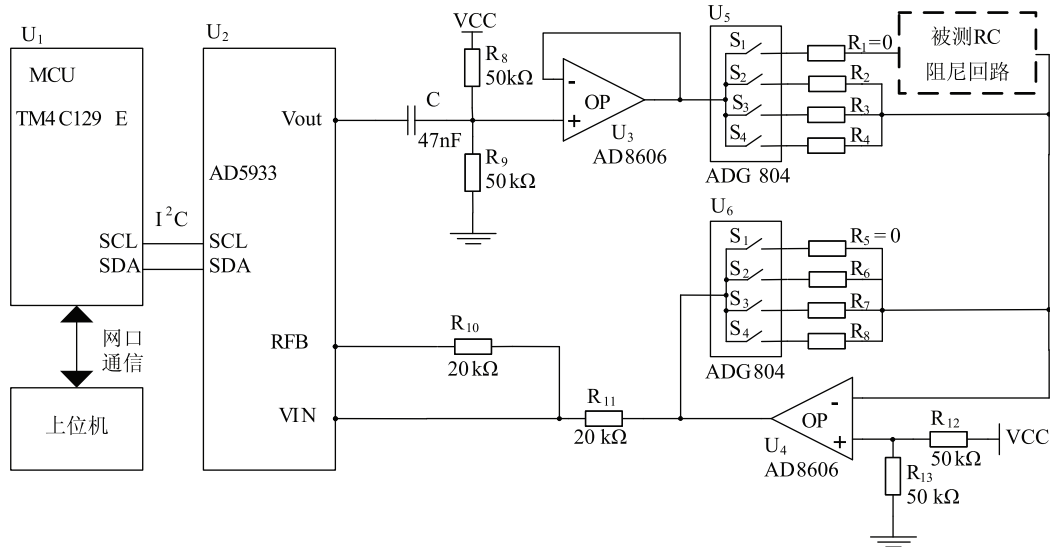


图 4 系统硬件电路

Fig. 4 System hardware circuit

图 4 硬件电路中,MCU 通过 GPIO 控制电子开关 U_5/U_6 中 $S_1 \sim S_4$ 通道的导通选择, $R_2 \sim R_4$ 为标定电阻,阻值的选择原则为与被测 RC 阻尼回路选定频率条件下等效阻抗接近, $R_6 \sim R_8$ 为测量回路反馈电阻^[8],要求阻值分别与 $R_2 \sim R_4$ 相等。当 MCU 控制 U_5/U_6 选用 $S_2 \sim S_3$ 通道时,通过模拟接入不同数值的被测阻抗计算对应回路增益系数 G ,当 U_5 均选用 S_1 通道时,接入外部被测 RC 阻尼回路测量其阻抗参数。

根据 AD 5933 的测量原理,标定电阻 $R_2 \sim R_4$ 阻值越接近选定频率条件下被测 RC 回路阻抗时,测量精度越高。实际工程中晶闸管级 RC 阻尼回路等效电阻 R 阻值范围约为 $26 \Omega \sim 36 \Omega$,电容 C 容值范围约为 $0.9 \mu F \sim 2.2 \mu F$ 。因电容在高频交流激励信号条件下的等效阻抗接近于 0,所以标定电阻阻值选择接近于 RC 阻尼回路中的等效电阻阻值即可。

3.3 软件设计

本设计中 MCU 控制器为 32 位 Cortex-M4 内核的 TM4C129E,其最高工作时钟可达 120 MHz,提供 150 DMIPS 运算性能,内置 1 024 kB Flash 和 256 kB SRAM,具有包括内置 PHY 的以太网接口、USB、UART

等多种通信接口,内置 6 kB EEPROM^[12]。

MCU 控制器的主要功能有两方面:(1)控制 AD 5933 完成阻抗测量;(2)通过以太网接口实现与上位机软件通信交互。程序流程图如图 5 所示。MCU 上电启动后首先进行系统时钟及外设初始化,包括与 AD 5933 交互的 I^2C 接口;读取片内 EEPROM 中存储的扫描频率、标定电阻等参数,初始化设置 AD 5933 和电子开关初始状态。然后 MCU 循环查询解析上位机参数设置指令和测试启动指令,当接收到上位机参数设置指令后,MCU 除了将接收到的参数用于阻抗测试外还需要将其写入 EEPROM 实现掉电保存。

当接收到测试启动指令后,MCU 首先根据预先设定的参数通过控制电子开关 U_5/U_6 选择标定电阻 R_c ,然后通过 I^2C 总线控制 AD 5933 启动 f_1 频率扫描,待扫描完成后从 AD 5933 读取 f_1 频率条件下的测量数据实部 R_1 和虚部 I_1 ,根据式(8)计算在 f_1 频率和 R_c 标定电阻条件下的增益系数 G_1 。接着 MCU 控制电子开关 U_5 选择 S_1 通道接入被测 RC 回路,控制 AD 5933 输出同样的频率和幅值的激励电压信号,待扫描完成后读取测量数据实部 R_2 和虚部 I_2 ,根据式(9)计算该激励

信号条件下的复阻抗 Z_1 。最后重复上述操作步骤启动 f_2 频率扫描,通过测量计算得到复阻抗 Z_2 ,根据式(5)和式(6)就可以计算出被测 RC 回路的电阻 R 和电容 C 的数值。

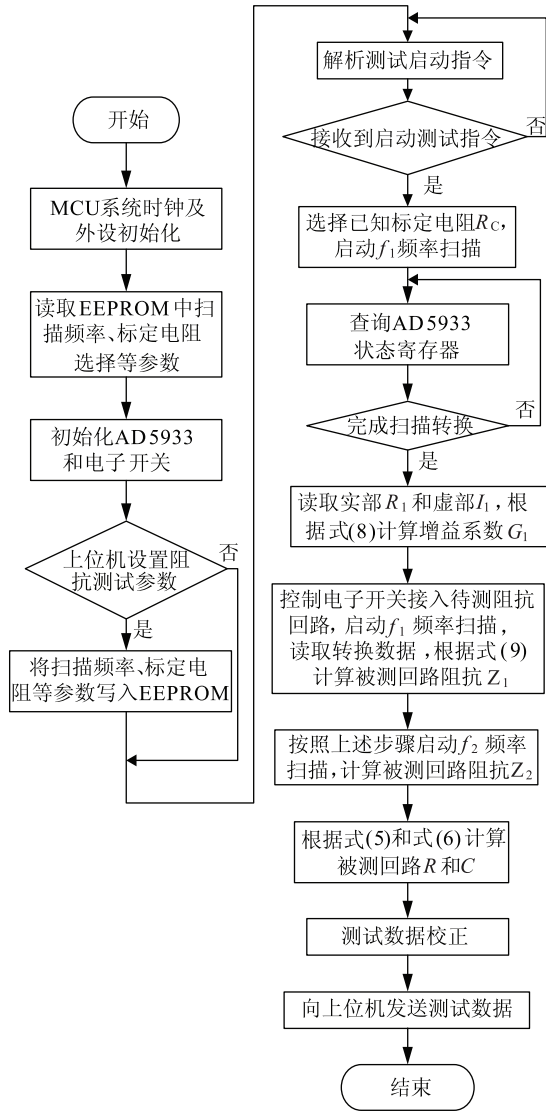


图 5 软件流程图

Fig.5 Software flow chart

3.4 测试数据

以国内某 UPFC 工程中晶闸管旁路开关 TBS 阻尼回路为测试对象,该 TBS 阻尼回路等效电阻 R 为 33 Ω ,等效电容 C 为 1.84 μF 。试验中经过对比 AD 5933 在多种不同频率和幅值激励信号条件下的测试数据精度和实测信号波形,最终选定 f_1 频率为 5 kHz, f_2 频率为 10 kHz,激励信号电压幅值为 2 V_{pp} 时精度最高。使用本文中设计方案实测 TBS 多级晶闸管回路阻容参数数据如表 1 所示。

得益于 AD 5933 内部高精度 DDS、DAC、LPF、ADC 和 DFT 集成设计,外围电路搭配高精度标定电阻和反馈电阻,该设计方案在多种复杂电磁环境中均取得了较高的测量精度。

表 1 实测 TBS 阻容参数数据及误差

Tab.1 Measured data and error of TBS resistance capacitance circuit

序号	实测电阻/ Ω	电阻误差/%	实测电容/ μF	电容误差/%
1	32.8	-0.606	1.824	-0.869
2	33.2	0.606	1.849	0.489
3	33.1	0.303	1.849	0.489
4	32.9	-0.303	1.858	0.978
5	33.3	0.909	1.841	0.054
6	33.2	0.606	1.841	0.054
7	32.9	-0.303	1.823	-0.923
8	33.1	0.303	1.841	0.054

4 结束语

基于阻抗测量芯片 AD 5933 的 TBS 晶闸管阻尼回路参数测量装置可以实现 1% 的测量精度,具有快速、准确、可靠等优点,满足 UPFC 系统离线检修时 TBS 晶闸管阻尼回路参数测量要求,可以大大提高 UPFC 工程的检修工作效率,保障 UPFC 工程安全稳定运行。

得益于 AD 5933 具有高度集成特性,极大地简化了外围电路设计,文中阻尼回路参数测量电路只占用很小的空间,可集成于 TBS 系统功能测试仪,作为测试仪的一个功能模块。TM4C129E 具有强大的计算处理能力和丰富的通信接口,可以满足系统功能测试性能要求。该测量电路具有通用性,可以拓展应用于特高压直流输电换流阀晶闸管阻尼回路和柔性直流输电换流阀子模块阻尼回路参数测量检测等领域,提高工程现场检修测试效率。

参考文献

[1] 祁万春, 杨林, 宋鹏程, 等. 南京西环网 UPFC 示范工程系统级控制策略研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 92-96.
Qi Wanchun, Yang Lin, Song Pengcheng, et al. UPFC System Control Strategy Research in Nanjing Western Power Grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 92-96.
[2] 周强, 邓凯, 徐高, 等. 500kV 苏南 UPFC 晶闸管旁路开关分析及工程应用[J]. 电工电气, 2018, (5): 37-41.
Zhou Qiang, Deng Kai, Xu Gao, et al. Analysis and Engineering Application of Thyristor Bypass Switch in 500 kV Unified Power Flow Con-

- trol in Southern Suzhou [J]. Electrotechnics Electric, 2018, (5): 37-41.
- [3] 袁清云. HVDC 换流阀及其触发与在线监测系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [4] 徐政, 等. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [5] 姚为正, 张建, 常忠廷, 等. 基于5英寸晶闸管的 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电换流阀组件的研制[J]. 电力设备, 2007, (3): 12-14.
Yao Weizheng, Zhang Jian, Chang Zhongting, et al. Development of Thyristor Valve Module Based on 5-inch Thyristor for $\pm 800\text{kV}$ UHVDC Transmission[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(3): 12-14.
- [6] 罗汉武, 乐健, 王银鸽, 等. $\pm 1100\text{kV}$ 特高压直流输电工程辐射电磁干扰水平评估[J]. 电测与仪表, 2017, 54(15): 41-44.
- [7] 樊宏伟, 王红青, 孟学磊, 等. UHVDC 换流阀晶闸管级阻抗检测仪器设计与实现[J]. 信息技术, 2015, (11): 65-68.
- [8] Analog Device, Inc. AD5933 Data Sheet[Z]. 2016.
<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5933.pdf>.
- [9] Analog Device, Inc. CN0217 用12位阻抗转换器实现高精度阻抗测量[Z]. Rev. 0, 2011. 6.
http://www.analog.com/media/cn/reference-design-documentation/reference-designs/CN0217_cn.pdf.
- [10] 温新华, 颜小飞, 安冬. 基于AD5933的便携式阻抗仪研制[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(4): 1090-1092.
- [11] 刘亮, 朱璐闻, 艾颖梅, 等. 基于STM32和AD5933的多通道阻抗测量仪的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(5): 1661-1663.

- [12] Texas Instruments, Tiva TM4C129ENC PDT Microcontroller Data Sheet [Z]. June 18, 2014.

<http://www.ti.com/cn/lit/ds/symlink/tm4c129encpdt.pdf>.

作者简介:



柴卫强(1985—),男,工程师,从事特高压直流输电换流阀阀控设备、柔性直流输电阀控设备等方面的研究。Email: chaweiqiangxjgc@163.com

李勇(1982—),男,工程师,从事变电运检技术管理,高电压及线圈设备管理。

郭有强(1972—),男,高级工程师,从事差异化状态检修,经济型技改,柔性交流输电等方面研究。

杨青波(1982—),男,工程师,从事新能源并网变流器、柔性直流输电、SVG无功补偿等方面研究。

张振兴(1983—),男,工程师,从事新能源并网变流器、SVG无功补偿等方面研究。

蓝叶锋(1978—),男,高级工程师,主要从事变电运维,柔性交流输电等方面研究。

收稿日期:2018-07-03;修回日期:2018-08-30

(焦阳 编发)

(上接第88页)

- [11] 黄幼茹. 防止电力生产事故的二十五项重点要求[M]. 浙江人民出版社, 2014.
- [12] 陈庆旭, 余华武. 一种面向多对象的自动准同期装置[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(4): 105-108.
Chen Qingxu, Yu Huaming. Quasi-synchronization device with line-selection function[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(4): 105-108.

作者简介:



赵博(1989—),男,工程师,主要从事抽水蓄能机组调试技术研究。Email: 420607031@qq.com



张飞(1983—),男,注册电气工程师,主要从事水力发电机组测试技术研究与实践。



刘仁(1985—),男,工程师,主要从事抽水蓄能机组调试技术研究。

收稿日期:2018-06-01;修回日期:2018-08-22

(王艳丽 编发)