

DOI: 10.7667/PSPC171642

变电站高压断路器新型选相控制器研究

曾凡兴¹, 赵谦^{2,3}, 余祥坤¹, 李帅^{2,3}, 张红伟¹, 史正阳¹

(1. 湖北省电力勘测设计院, 湖北 武汉 430000; 2. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210003;
3. 南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211153)

摘要: 跳合闸相位控制是抑制高压断路器操作对自身和系统冲击的重要手段。为了适应变电站采样方式变化和高压等级跳合闸相位控制准确度、可靠性要求提升, 改进了独立选相控制器方案。研究了基于微控制器、FPGA协同的 IGBT、继电器独立操作与混合出口, 据此设计新回路与板件。提出了基于复向量提取的频率相位测量算法, 用于目标点准确计算。改进方案提升了选相控制器控制准确度, 提高了耐受电磁干扰能力。经过仿真分析与试验验证, 所研究的选相控制器可以在目标点准确操作断路器, 验证了改进方法的有效性。

关键词: 高压断路器; 选相控制; 绝缘栅双极型晶体管; 频率相位计算; 抗干扰

Study of controlled switching device for high-voltage circuit breaker in substation

ZENG Fanxing¹, ZHAO Qian^{2,3}, YU Xiangkun¹, LI Shuai^{2,3}, ZHANG Hongwei¹, SHI Zhengyang¹

(1. Hubei Electric Engineering Corporation, Wuhan 430000, China; 2. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210003, China; 3. Nanjing Guodian Nanzi Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211153, China)

Abstract: The controlled switching is a significant method to restrain shock to the mechanism itself and power system when operating high-voltage circuit breakers. By the change of substation digital sampling and higher requirement of controlled switching on accuracy and reliability on high voltage level, this paper improves the independent controlled switching solution. It studies the technologies of independent operation and composite output of IGBT contact and relay contact based on microcontroller and FPGA coordination, and on this basis, designs new circuit and hardware. It proposes a frequency and phase calculation algorithm based on complex vector extraction for target point calculation. This solution can improve precision of controlled switching and prevent from electromagnetic interference. After simulation and system testing verification, the studied controlled switching device in the paper is able to accurately operate circuit breakers in target points, which proves the effectiveness of the solution.

This work is supported by Scientific and Technological Achievements Transformation Fund Project of Jiangsu Province (No. BA2016057).

Key words: high-voltage circuit breaker; phase-selection control; IGBT; frequency and phase calculation; anti-interference

0 引言

高压断路器是变电站最重要的一次设备。断路器非同期合闸对电力系统造成冲击; 随机相位跳闸对断路器本身造成冲击。跳合闸相位控制是抑制高压断路器操作对系统和自身冲击的重要手段^[1]。

实现断路器跳合闸相位控制的装置一般称为选

相控制器(Controlled Switching Device, CSD)。该装置首先由国外机构开展研究, 随后西门子、ABB 等企业开发产品并投入市场。

2000 年以后随着我国微机测控的发展, 同期合闸功能成为测控装置功能之一。其仅限于测控操作, 与断路器操作回路配合复杂, 且操作精度不高^[2]。2005 年以后, 我国电力自动化设备厂家开始研究并开发选相控制器产品, 并批量投入市场。

随着输电电压等级的升高, 变电站和电厂的电气设备投资更昂贵。选相控制器在超高压变电站、

基金项目: 江苏省科技成果转化专项资金项目资助 (BA2016057)

特高压变电站、换流变电站交流侧等场合应用越来越广泛。各地电力公司、设计院、设备厂家对选相控制器有使用、设计和开发经验。但因用户使用习惯、断路器类型和实际工程配置等原因，选相控制器一直未形成标准。直到 2015 年各标准化委员会开始研究并制定断路器选相控制器的国家标准和行业标准^[3]。

1 现状和问题

目前国内变电站在运行的选相控制器数量较少。随着国内电力行业对断路器跳合闸相位控制认识的深入，超高压变电站和特高压变电站配备选相控制器比例逐步提高。选相控制器可应用于空载变压器、电抗器、滤波器、电容器、空载长线路等电力一次设备的相位投切控制^[4]。

同期合闸作为测控功能之一，在装置本地或后台操作断路器合闸时，进行相位控制。但目前同期合闸效果不理想，主要原因有：

- 1) 软件算法准确度不高，且算法抗干扰性能弱；
- 2) 硬件出口采用继电器节点，动作时间准确度低。

当前，数字化变电站和智能变电站技术发展迅猛，变电站自动化设备引入数字采样，对选相控制技术又带来了新的挑战^[5]。

为解决上述问题，充分发挥断路器操作相位控制的优势，本文针对新型混合式抗干扰选相控制器开展研究。

2 技术研究

2.1 选相分合闸控制时序分析

最佳合闸相位和电力设备的负载性质、中性点接地方式等因素相关，通常容性负载的最佳合闸相位在系统电压的过零点，而感性负载的最佳合闸相位在系统电压的峰值处。图 1 所示为选相合闸控制过程。

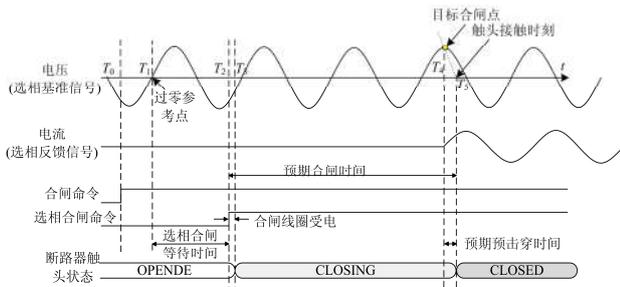


图 1 选相合闸控制时序分析

Fig. 1 Control sequence analysis of closing

T_0 时刻选相控制器接收到合闸命令，启动选相控制，已知操作负载性质及最佳目标合闸点位于峰值处 T_4 时刻，并已知断路器的预期合闸时间，选相控制器自动计算出合适的等待时间。从选相基准信号起始参考点 T_1 时刻开始计时，通常为电压过零点，到达选相合闸等待时间后，最终发出合闸命令。

选相分闸可以控制断路器各极触头分离时刻，避免过电压冲击，或提升断路器的开断能力。图 2 所示为选相分闸控制过程。

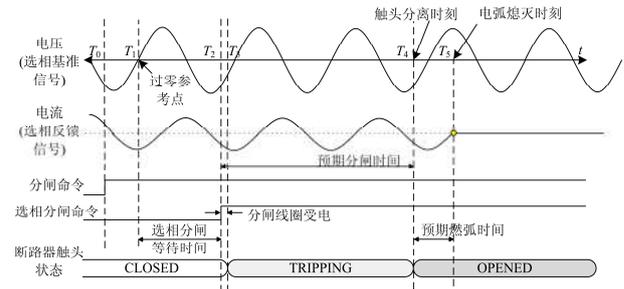


图 2 选相分闸控制时序分析

Fig. 2 Control sequence analysis of tripping

T_0 时刻选相控制器接收到分闸命令，启动选相控制，根据断路器的开断特性确定最安全的触头分离时刻 T_4 ，经过预期燃弧时间在紧随的电流过零点 T_5 时刻可靠开断。选相控制器根据断路器的预期分闸时间和预期燃弧时间，自动计算出合适的等待时间。从选相基准信号起始参考点 T_1 时刻(通常为电压过零点)开始计时，到达等待时间后，最终发出分闸命令。

根据上述分析可以得到选相分合闸控制核心技术在于参考过零点准确判别、目标操作点准确计算、准确动作出口^[6]。

2.2 装置总体方案设计

1) 硬件总体方案

本文所研究断路器选相控制器采用独立装置方案。其配备有 CPU 模件、基准电压输入模件、反馈信号输入模件、混合出口模件、断路器特征参量输入模件、人机模件等。

如图 3 典型回路图所示，选相控制器的操作命令来自继电保护、测控等出口，可支持常规电缆输入或 IEC61850-8 方式输入。选相基准电压来自母线 PT，反馈信号来自于线路 PT 或 CT，也支持常规电缆或 IEC61850-9-2 方式输入。环境温度、控制电压、SF6 气压、储能水平等能反映断路器动作特征的参量以 4~20 mA 小电流信号输入。选相分合闸命令通过混合出口模件直接输出至断路器，也可以经操作箱跳合闸保持回路至断路器^[7]。

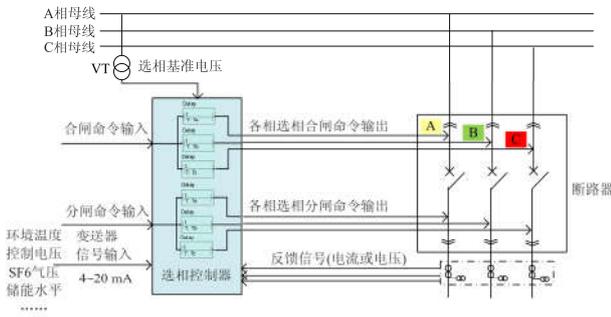


图3 选相控制器典型回路

Fig. 3 Typical circuit diagram of CSD

2) 软件总体方案

当选相控制器收到跳合闸命令, 并经基准电压无压判别后, 触发控制接点出口。当选相功能投入时, 装置通过一系列频率、相位和参数计算、在预定时刻触发 IGBT 与继电器混合出口; 当选相功能不投入时, 如保护跳合闸, 只触发继电器出口, 以满足实时出口要求^[8]。出口逻辑如图 4 所示。

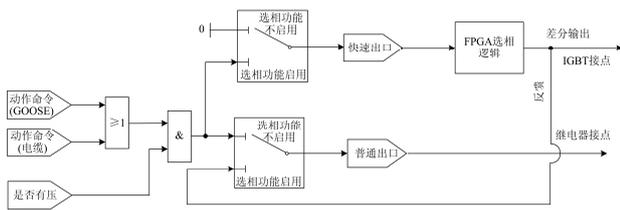


图4 选相控制器出口逻辑

Fig. 4 Output logic of CSD

2.3 基于 IGBT 与继电器混合出口设计

IGBT 与继电器混合出口用于保证动作时间准确。装置内部 CPU 模块发出的分合闸指令, 经由微控制器和 FPGA 两个芯片通过不同的通道发给混合出口模块。混合出口回路包括继电器回路和 IGBT 回路, 分别由 CPLD 芯片和差分芯片驱动。如图 5 所示。

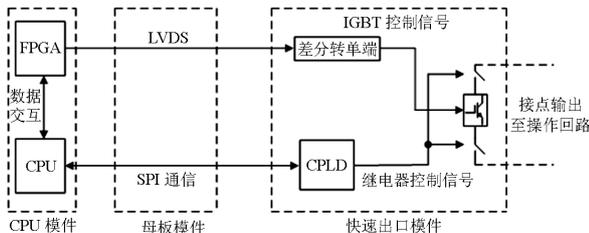


图5 混合出口原理图

Fig. 5 Principle of composite output

CPU 模块通过软件报文驱动混合出口模块的 CPLD 芯片, 控制出口继电器开放, 相当于出口启动开放; 同时通过差分导线直连控制 IGBT 芯片准

时开放动作, 其抗操作现场共模干扰效果好, 最终完成出口回路的快速准确动作^[9]。

继电器回路特点在于节点抗冲击能力强, 但动作时间离散度大。IGBT 回路特征在于动作时间精准, 设计指标的动作时间离散性小于 20 μs。具体见表 1 所示(常温、额定工况)。两者结合, 整体回路既有很可靠的耐受电压性能, 动作时间又完全确定, 结合抗干扰通信回路, 适合电力系统准确过零点操作断路器的需求^[10]。

表 1 继电器与 IGBT 回路特性对比

Table 1 Comparing relay with IGBT

	传输时间	动作时间	驱动电压	节点耐压
继电器回路	500±100 μs	3 500±500 μs	5~24 V	2 500 V
IGBT 回路	50±5 μs	50±5 μs	15 V	1 200 V

2.4 高精度抗干扰算法研究

基波的频率、相位等信息是电力系统交流采样的重要特征量, 其测量算法是选相控制最重要的算法, 直接关系到选相控制准确程度^[11]。选相控制的参考电压通常有两种获取方式: 正序电压或 A 相电压。相位计算时, 两种方式采用不同的算法。

1) 正序电压方式

正序电压的计算公式为

$$u_p = \frac{1}{3}(u_A + u_B \cdot e^{j2\pi/3} + u_C \cdot e^{-j2\pi/3}) \quad (1)$$

式中: u_A 、 u_B 、 u_C 为三相电压的瞬时值; u_p 为正序电压的复向量。

由复向量可以直接计算正序电压的相位, 由相位差可以计算频率。若每工频周波计算一次相角, 设两次的相角差为 $\Delta\alpha$ (需调整至 $-\pi \sim \pi$), 则有如下关系式:

$$f = 50 \cdot \left(1 + \frac{\Delta\alpha}{2\pi}\right) \quad (2)$$

为提高算法的抗干扰能力, 对 A、B、C 三相电压采用数字带通滤波器^[12-14]。

2) A 相电压方式

现有单相电压测量方法主要基于傅里叶分析、过零点检测等, 存在一定的局限性。傅里叶分析算法较为成熟, 但有频谱泄露等问题, 存在测量偏差; 过零点算法原理简单, 但当叠加谐波或直流分量时, 算法误差较大。此外, 电力设备的运行工况较为复杂, 采样数据极易受到干扰, 直接影响频率、相位的测量。本方案采用虚部、实部提取算法, 构造复向量, 实现高精度抗干扰的基波频率及相位测量方法, 如式(3)所示, 其中 BPF1 和 BPF2 为带通滤波器^[15-16]。

$$\vec{u} = \text{BPF1}(u_A) + j \cdot \text{BPF2}(u_A) \quad (3)$$

由复向量可以计算相角，并按式(2)计算频率。具体方法如图 6 所示。通过复向量提取算法直接获取基波的实部、虚部，避免了数据干扰、谐波、直流分量等因素的影响；并且参数设计时，实部、虚部具有相同的增益与延时，确保了计算结果与原始数据一致，因此计算精度高、抗干扰能力强^[17-18]。

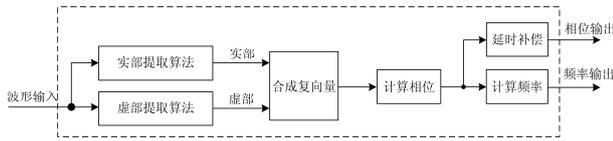


图 6 复向量算法框图

Fig. 6 Diagram of complex vector algorithm

3 仿真与试验

3.1 仿真计算

如图 7 所示，根据第 2 节所述复向量算法，用 Matlab/Simulink 搭建了频率、相位计算的仿真模型^[19-20]。

为了验证算法的抗干扰能力及精确性，输入波形采用基波叠加谐波的方式，如式(4)所示。其中，基波频率设为 55 Hz，幅值为 100 V；谐波频率设为 100 Hz 及 150 Hz，谐波幅值为 20 V，如式(4)所示。

$$y = 100\sin(2\pi t \cdot 55) + 20\sin(2\pi t \cdot 100 + \pi/3) + 20\sin(2\pi t \cdot 150 + \pi/2) \quad (4)$$

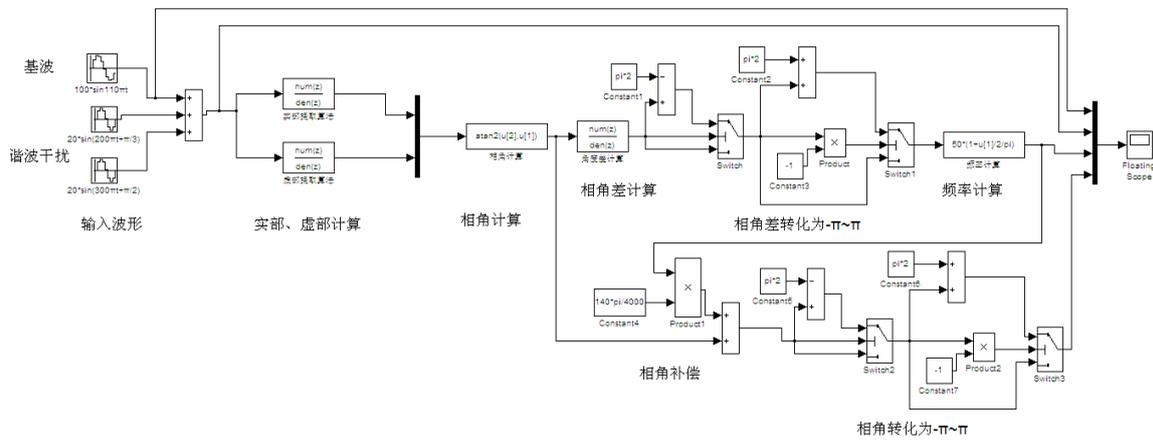


图 7 频率与相角仿真模型

Fig. 7 Model of frequency and phase simulation

图 8 给出了仿真结果。计算出的频率为 55 Hz，与实际一致；相位计算结果亦与基波波形吻合。

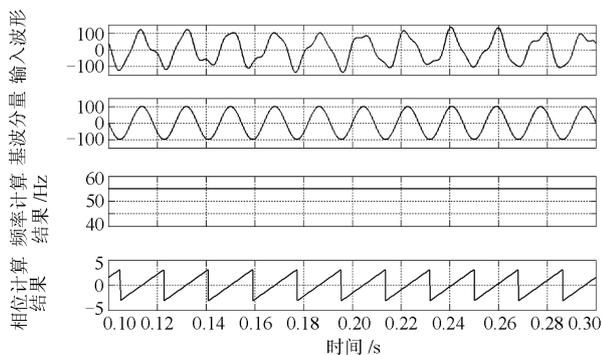


图 8 频率与相位仿真结果

Fig. 8 Result of frequency and phase simulation

3.2 装置试验验证

试验系统框图及实物如图 9 所示。

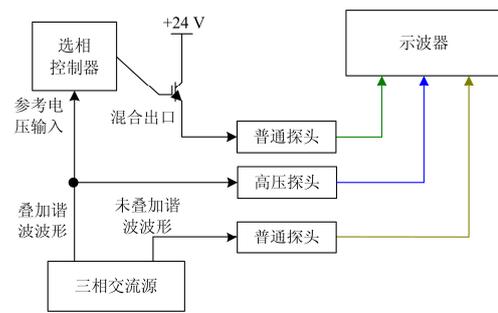


图 9 试验验证设计图

Fig. 9 Design of experiment

试验数据如图 10 示波器截图所示。其中，蓝线为加载在装置上的交流量波形，黄线为未叠加谐波、同相位的交流量波形，绿线为混合接点输出。

通过实际装置试验验证。测试条件为：交流基波频率 40 Hz、50 Hz、60 Hz，同时叠加 20%含量的 2~10 次谐波，预设角度 0°~270°，延时时间 0~10 ms。

上述各种条件组合情况下, 本文设计的选相控制器均能准确计算出口目标时刻, 并能通过混合出口回路准确动作。

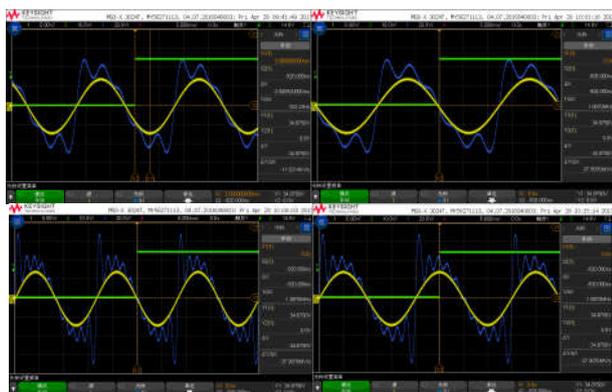


图 10 试验验证结果

Fig. 10 Result of experiment testing

4 结语

文章分析了跳合闸相位控制在变电站高压断路器操作中的重要作用和目前存在的问题。对跳合闸相位控制关键环节进行改进, 提出了动作时间准确和耐受电压性能兼顾的混合式出口回路; 研究了基于复向量的高精度抗干扰频率相位测量算法, 并把上述研究成果应用于选相控制器中。经过仿真分析和实际装置试验验证, 文章提出的方法可以在各种干扰工况下准确计算出口时刻, 并能准确执行出口动作, 选相控制效果明显。因断路器特征参量尚未引入, 后续还将开展断路器特征参量对跳合闸相位控制影响的相关研究工作。

参考文献

- [1] 须雷, 李海涛, 王万亭, 等. 智能变电站中断路器选相控制技术应用研究[J]. 高压电器, 2014, 50(11): 63-68.
XU Lei, LI Haitao, WANG Wanting, et al. Application research on the technology of CB phase-controlled in smart substation[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11): 63-68.
- [2] 刘涛, 王贵山, 黄健金, 等. 500 kV 断路器合闸回路故障引起的保护误动事故分析[J]. 陕西电力, 2014, 42(6): 77-80.
LIU Tao, WANG Guishan, HUANG Jianjin, et al. Fault analysis on an incorrect relay action caused by closing operation circuit malfunction of 500 kV power breaker[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(6): 77-80.
- [3] 朱韬析, 史志鸿. 断路器操作箱和就地操作机构内合闸回路的配合问题[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 42(8): 115-119.
ZHU Taoksi, SHI Zhihong. Coordination of the closing circuit in operating box and the local control panel[J]. Power System Protection and Control, 2010, 42(8): 115-119.
- [4] 徐丽青, 李帅, 陈庆旭, 等. 一种新型智能选相控制器设计及抗干扰措施[J]. 中国电力, 2016, 49(2): 176-179.
XU Liqing, LI Shuai, CHEN Qingxu, et al. A new type intelligent phase selection controller design and anti interference measures[J]. Electric Power, 2016, 49(2): 176-179.
- [5] 裘愉涛, 王德林, 胡晨, 等. 无防护安装就地化保护应用与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 1-5.
QIU Yutao, WANG Delin, HU Chen, et al. Application and practice of unprotected outdoor installation protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 1-5.
- [6] YANG J Z, LIU C W. A precise calculation of power system frequency[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(3): 361-366.
- [7] 翟瑞聪, 王红斌, 朱文俊. 电力设备在线监测谱图数据标准化研究[J]. 广东电力, 2015, 28(3): 39-44.
ZHAI Ruicong, WANG Hongbin, ZHU Wenjun. Research on standardization of online monitoring spectrogram data of electrical equipments[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(3): 39-44.
- [8] 周小波, 汪思满, 吴正学, 等. 环网分布式母线保护装置就地化实现探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 104-108.
ZHOU Xiaobo, WANG Siman, WU Zhengxue, et al. Local placing implementation research of distributed HSR busbar protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 104-108.
- [9] 吕东, 张弛, 康小宁, 等. 智能变电站异常数据识别及恢复方法[J]. 陕西电力, 2016, 44(7): 6-9, 14.
LÜ Dong, ZHANG Chi, KANG Xiaoning, et al. Identification and restoration of abnormal data in smart substations[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(7): 6-9, 14.
- [10] 卞星明, 文远芳, 雷琴, 等. 电力系统测频算法比较[J]. 高电压技术, 2006, 32(5): 111-114.
BIAN Xingming, WEN Yuanfang, LEI Qin, et al. Comparison on power system frequency measurement algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(5): 111-114.
- [11] ZHAO Jinqian, ZHANG Yujie, ZHANG Pan, et al. Development of a WAMS based test platform for power system real time transient stability detection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 37-47. DOI 10.1186/s41601-016-0013-1.
- [12] 李赞, 程洋. 多机并联光伏逆变器系统谐振抑制策略

- [J]. 广东电力, 2017, 30(10): 47-51.
LI Yun, CHENG Yang. Resonance suppression strategy for multi-parallel photovoltaic inverter system[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(10): 47-51.
- [13] 牛强, 钟加勇, 陶永健, 等. 智能变电站二次设备就地化防护技术[J]. 电力建设, 2014, 35(9): 76-81.
NIU Qiang, ZHONG Jiayong, TAO Yongjian, et al. In-situ secondary equipment protection of smart substation[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(9): 76-81.
- [14] 陆征军, 李超群, 李燕, 等. 就地安装的智能电子设备的电磁兼容问题[J]. 高压电器, 2013, 49(7): 92-95.
LU Zhengjun, LI Chaoqun, LI Yan, et al. EMC issues of IEDs installed locally[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(7): 92-95.
- [15] 李军, 王越超, 李锋, 等. 一种基于序列和反褶序列精密初相位计算的新型正弦频率测量方法[J]. 电子学报, 2016, 44(10): 2370-2376.
LI Jun, WANG Yuechao, LI Feng, et al. A novel sinusoidal frequency measurement method based on precise calculation of initial phase of sequence and deconvolution sequence[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(10): 2370-2376.
- [16] 杨建宁, 崔丰, 邱洪顺, 等. 信号幅值变化时的电力系统动态频率测量[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(2): 94-97.
YANG Jianning, CUI Feng, QIU Hongshun, et al. Measurement of power system dynamic frequency under signal amplitude variation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(2): 94-97.
- [17] 赵仁德, 马帅, 李海舰, 等. 基于强跟踪滤波器的电力系统频率测量算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 85-90.
ZHAO Rende, MA Shuai, LI Haijian, et al. Strong tracking filter based frequency-measuring algorithm for power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 85-90.
- [18] 林达斌, 江亚群, 黄娟. 基于一阶导数的电力系统频率测量新算法[J]. 电测与仪表, 2011, 48(4): 9-12.
LIN Dabin, JIANG Yaqun, HUANG Juan. The new algorithm for power system frequency measurement based on the first derivative[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 48(4): 9-12.
- [19] 黄荣雄, 吴杰康, 韦善革. 基于小波变换的电力系统谐波频率测量算法[J]. 电力科学与工程, 2010, 26(8): 14-18.
HUANG Rongxiong, WU Jiekang, WEI Shange. Wavelet transform based methods for harmonic frequency estimation of power systems[J]. Power Science and Engineering, 2010, 26(8): 14-18.
- [20] 张鸿博, 蔡晓峰, 鲁改凤. 基于全相位 FFT 改进相位差法的自动准同期并列参数测量[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 76-83.
ZHANG Hongbo, CAI Xiaofeng, LU Gaifeng. Generator quasi synchronization parameter measurement method based on improved phase difference method of all-phase fast Fourier transform[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 76-83.

收稿日期: 2017-11-06; 修回日期: 2018-01-09

作者简介:

曾凡兴(1980—), 男, 学士, 工程师, 从事电力系统设计工作;

赵谦(1985—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 从事智能变电站过程层设备的开发工作; E-mail: qian-zhao@sac-china.com

余祥坤(1982—), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统设计工作。

(编辑 周金梅)