

DOI: 10.7667/PSPC170939

基于 ARM+DSP 结构的 PT 铁磁谐振智能消谐装置设计

杨秉义, 张立涛, 董博

(中国能源建设集团甘肃省电力设计院有限公司, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 电磁式电压互感器在电网监测系统中是相当重要的设备。由于 PT 铁磁电感的饱和引发铁磁谐振从而产生长时间的过电压是电力系统中较为常见的一类问题。为了解决该问题, 设计了一种新型的基于 ARM+DSP 结构的智能铁磁谐振抑制装置。利用 DSP 芯片通过快速傅里叶变换算法对配电网电压数据进行分析, 判断铁磁谐振是否产生, 并与 ARM 芯片通信。利用 ARM 控制阻尼电阻的投切来完成对铁磁谐振的抑制以及对相关谐振信息的显示、存储和上传。该装置充分利用 DSP 的运算能力和 ARM 的控制能力从而准确快速检测出铁磁谐振是否发生并对其进行快速抑制和存储。

关键词: 电磁式电压互感器; 铁磁谐振; DSP; ARM; 快速傅里叶变换算法

Design of intelligent suppression device for PT ferroresonance based on ARM+DSP

YANG Bingyi, ZHANG Litao, DONG Bo

(China Energy Engineering Group Gansu Electric Power Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730050, China)

Abstract: Potential Transformers (PT) are very important devices of monitoring the states of power system. The ferroresonance causes long-time over-voltage due to the saturation of the PT ferromagnetic inductors. To solve this problem, an intelligent suppression device of PT ferroresonance based on ARM and DSP is proposed. The DSP chip uses fast Fourier transform algorithm to analyze the distribution network voltage and judge the generation of ferroresonance, and then communicates with ARM chip. The ARM chip controls the switch of damping resistance to complete the suppression of ferroresonance and display / store / upload the relevant ferroresonance information. The device can accurately and quickly detect whether the ferroresonance occurs and rapidly suppresses it and records the information of it at the same time by making full use of the computing power of DSP and the control ability of ARM.

Key words: potential transformer; ferroresonance; DSP; ARM; fast Fourier transform algorithm

0 引言

在配电网系统中, 监测母线对地电压显得尤为重要, 在母线上通常装设电磁式电压互感器 (potential transformer) 以便测量母线电压。电磁式电压互感器是铁芯电感元件, 如果有某种大扰动或操作, PT 的非线性铁芯就可能饱和, 从而与线路和设备的对地电容形成特殊的单相或三相共振回路, 同时由于各相铁芯饱和程度的差异性导致在励磁涌流中产生零序分量^[1-3]。铁磁谐振分为基波谐振、分次谐波谐振和高次谐波谐振, 可能带来以下危害: 过电压、过电流、波形畸变和破坏电力绝缘^[4-7], 最终烧毁 PT, 对电力系统的稳定运行产生巨大的威胁。通过一段时间内在 PT 开口三角处接入阻尼电阻来增大谐振的阻尼从而能够有效地抑制铁磁谐振^[8-9]。

本文在针对某 500 kV GIS 变电站阻尼电阻抑制谐振方案的基础上, 提出了一种新型的基于 ARM+DSP 结构的自动控制铁磁谐振抑制器, 利用 DSP 内核高效的数学运算以及信号处理功能, 快速地判断铁磁谐振的产生, 将抑制铁磁谐振以及 LCD 显示、SD 卡存储、远程发送相关信息至 ARM 芯片中^[10], 采用将 DSP 强大的数学运算能力与 ARM 的集成、控制能力相结合的嵌入式解决方案, 成本低廉, 多功能, 实时性好。

1 系统结构

整个智能铁磁谐振消谐装置的系统结构图如图 1 所示。按功能分为以下四个部分: 采样调压模块、数据处理模块、控制系统模块和开关量输出模块。

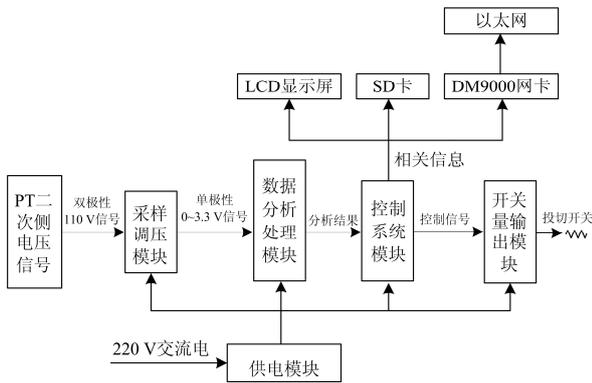


图1 铁磁谐振抑制装置系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of ferromagnetic resonance suppression device

1.1 采样调压模块

采样调压模块的主要功能是将 PT 二次侧的电压进行采样调理转换成 DSP 的 ADC 引脚能够接收的电平, 由于 PT 二次侧考虑余量是最大有效值为 110 V 的双极性电压, 而 DSP 的 ADC 引脚只能处理 0~3.3 V 的单极性电压, 因此必须首先将 PT 二次侧采样到的电压转换为 0~3.3 V, 再送到 DSP 进行处理。同时需要带有隔离功能确保现场信号与控制系统的互不干扰。

1.2 数据处理模块

数据处理模块主要完成对输入的 0~3.3 V 直流模拟信号进行 A/D 转换并对其进行数据处理, 在此基础上分析判断是否发生铁磁谐振。由于浮点 DSP 的谐波分析精度高于定点 DSP^[11], 因此本模块的核心部分选择浮点型 DSP 芯片 TMS320F28335。TMS320F28335 是美国 TI 公司推出的定点 32 位 DSP 芯片, 最高主频可达 150 MHz, 能很好地满足实时性需求。其内部集成了高度优化的数学函数库, 极大地提高了浮点运算的能力, 特别适用于复杂的算法, 因此本装置选择该芯片来对采样信号进行数学分析。

1.3 控制系统模块

控制系统模块的主要功能是获取数据处理模块的分析结果, 并根据分析结果对开关量输出模块发出相应的控制信号, 同时将分析结果通过 LCD 屏幕显示, SD 卡存储以及远程通信上传至上位机。本控制系统的核心部分选择 S3C2440 作为控制芯片。S3C2440 是基于 ARM920T 内核的 32 位低功耗处理器, 频率最高可达 400 MHz, 且集成了丰富的外围资源, 包括 LCD 接口、SD 卡接口、UART、SPI 和 GPIO 等, 并可以支持 WinCE 和 Linux 等多种主流操作系统, 足够本装置的应用需求。

由于 S3C2440 需要具备与上位机远程通信的功能, 因此还需要为其配置以太网控制芯片。本装置选择 DM9000 芯片为以太网的物理层接口芯片, 将 SD0—SD15 与 S3C2440 数据总线 DATA0—DATA15 相连, 用于两者之间的数据传输^[12]。

1.4 开关量输出模块

由于 PT 三角处电阻投入瞬间电流较大, 需要投切开关耐受 200 A 的瞬间大电流, 因此普通的继电器无法胜任。本装置采用 24 V 接触器作为投切开关来控制阻尼电阻在 PT 三角开口处的投入与切除。通过 S3C2440 对其进行控制, 由于 S3C2440 的 GPIO 口输出驱动能力较弱, 因此需要开关量输出模块对输出信号进行放大从而使其能够驱动接触器的动作, 以便有效地改变阻尼电阻的投切状态。

2 铁磁谐振抑制思路

本文选取 FFT 算法检测铁磁谐振的发生, 根据 DFT 算法中的旋转因子 W_N^{kn} 具有对称性和周期性, 通过短序列的 DFT 逐步合成长序列的 DFT, 即利用许多小的容易实现的变换来完成大规模的变换, 以降低运算次数, 从而提高其运算速度^[13-14]。将采样点数 N 为 2 的 M (M 为整数) 次幂的 DFT 运算不断分解成 $N/2$ 个两点的 DFT 运算经过 M 级 DFT 运算得出结果。FFT 算法的流程图如图 2 所示。

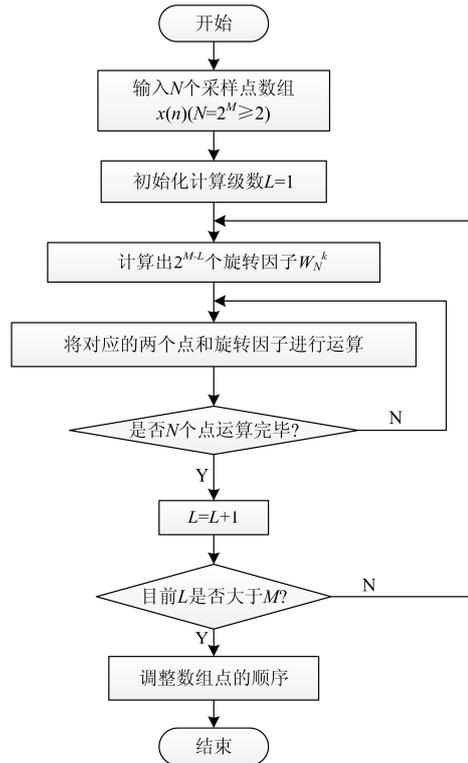


图2 FFT 算法程序流程图

Fig. 2 Programming flow chart of FFT algorithm

当铁磁谐振发生时, 采样得到的 PT 二次侧电压波形会发生严重的畸变, 可能会产生大量的分频以及高频谐波。本系统采取了运用 FFT 算法对采样获得的 PT 二次侧电压波形进行分析, 得到其信号频谱, 从而利用 DSP 计算出总谐波畸变率 THD 的值。如果 THD 高于设定的正常值则判定发生了铁磁谐振, 通过 ARM 的 GPIO 口输出控制信号将阻尼电阻短时间投入 PT 开口三角处以消除谐振。装置软件整体设计主要由主程序、FFT 算法程序和控制输出程序构成。软件的程序流程图如图 3 所示。

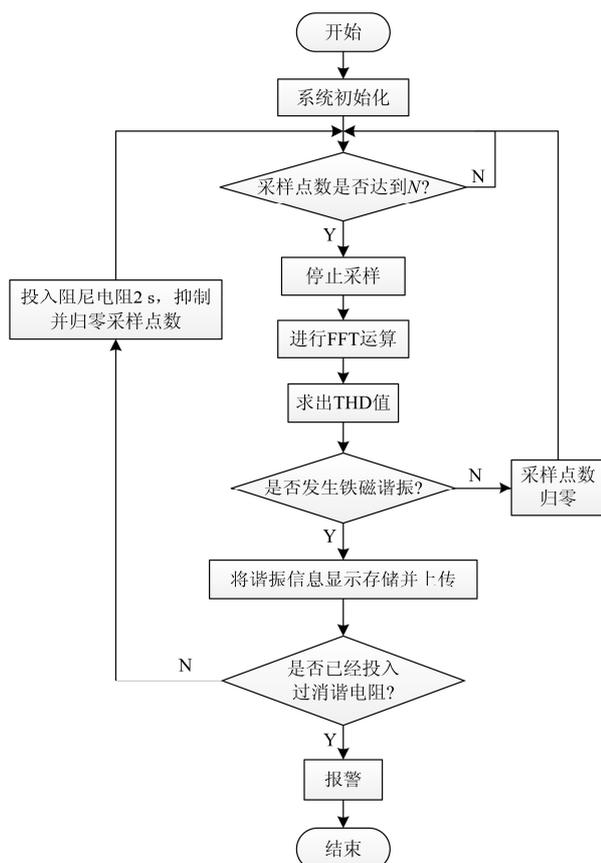


图 3 系统程序流程图

Fig. 3 Programming flow chart of system

以往运行经验表明, 发生分频铁磁谐振时谐波分量主要为 1/2 分频和 1/3 分频^[15], 为了能够检测到这两个低频率的分量并对其进行分辨, 选择 FFT 算法的频率分辨率为 5 Hz, 因此变化周期 $T=0.2$ s。选择采样频率与采样点数时要综合考虑精度与速度的问题, 因为这两者往往是矛盾的, 更多的采样点数意味着更高的精度以及更加巨大的运算量^[16-17], 综合考虑 DSP 芯片的运算能力以及该装置的精度要求, 选择每个周期采样点数 N 为 $2^{10}=1024$, $M=10$, 从而选取 DSP 的 A/D 采样频率 f 为 $1024 \times 5=5.12$ kHz。

3 装置具体实现

3.1 采样调压电路

采样调压电路如图 4 所示。第一级是分压模块, 主要功能是对 PT 二次侧进行电压采样并对其分压, 保证其输出电压为 $-1.5 \sim 1.5$ V。第二级是电压跟随器, 电压跟随器的主要作用是将电力系统现场信号和装置相隔离, 同时信号的幅值不发生改变。第三级是电压偏置环节, 主要功能是将电压跟随器输出的双极性电压 $-1.5 \sim 1.5$ V 转换成 $0 \sim 3$ V 单极性电压从而使其能被 DSP 接收。最后信号送往 DSP 的 ADC 输入引脚进行采样及运算。

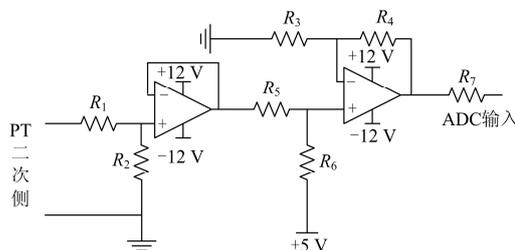


图 4 采样调压电路原理图

Fig. 4 Schematic diagram of voltage sampling and regulating circuit

分压模块考虑采用电阻分压, 二次侧电压 V_{PT} 与分压所得电压 V_{in} 有如下关系:

$$V_{in} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{PT} \quad (1)$$

该 GIS 变电站 PT 二次侧在考虑足够裕量情况下电压有效值为 110 V, 将 R_1 设为 110 k Ω , R_2 设为 1 k Ω 可确保输出电压在 $-1.5 \sim 1.5$ V 的范围之内。

由于电压跟随器具有高输入阻抗、低输出阻抗的特点, 因此能够很好地将现场信号与装置相隔离。

利用运放, 5 V 电源及电阻 R_3 、 R_4 、 R_5 、 R_6 组成直流偏置电路。 V_{in} 为电压跟随器输出电压, 通过运放的虚短虚断原理可求得偏置环节的输入和输出之间的关系为

$$V_o = \frac{(R_3 + R_4)R_6}{(R_6 + R_5)R_3} V_{in} + \frac{(R_3 + R_4)R_5}{(R_6 + R_5)R_3} \times 5 \text{ V} \quad (2)$$

令 $R_3=R_6=10$ k Ω , $R_4=R_5=3$ k Ω , 输入输出关系可以简化为

$$V_o = V_{in} + 1.5 \text{ V} \quad (3)$$

从而将 $-1.5 \sim 1.5$ V 电压转换为 $0 \sim 3$ V 符合输出电压在 $0 \sim 3.3$ V 范围内的要求。

3.2 DSP 和 ARM 通信电路

DSP 通过快速傅里叶算法得出发生铁磁谐振的相关信息, 需要将这些信息发送至 ARM 处理器。

本装置采用 SPI 串行外围设备接口在两者之间进行通信。SPI 总线是 Motorola 公司提出的一种同步串行外设接口协议总线，它有着传输协议标准、传输效率高和占用接口线少的特点^[18]，而且被 S3C2440 和 TMS320F28335 支持。因此对本设计来说是一种较为合适的方案。

在本装置中 ARM 被设置为主机，DSP 被设置为从机，SPI 的硬件连接在芯片管脚上占用了 4 根线。分别包括同步时钟信号、从机使能信号、MISO(主输入从输出)信号和 MOSI(主输出从输入)信号。通信时，SPI 根据由主机确定的同步时钟信号通过 MISO 和 MOSI 接口对可编程长度的串行比特流进行接收和发送。传输速度快，满足本装置实时性要求高的特点。DSP 与 ARM 的 SPI 通信接口设置如图 5 所示。

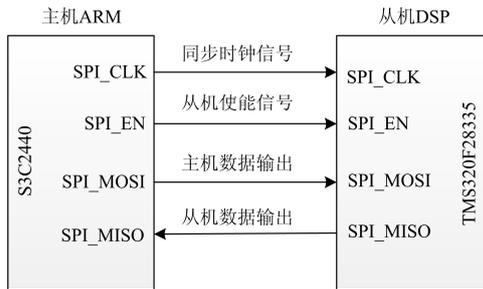


图 5 ARM 与 DSP 的通信接口电路

Fig. 5 Communication circuit between ARM and DSP

3.3 开关量输出电路

开关量输出电路接收从 ARM 输出的高电平为 3.3 V 的弱信号，由于 24 V 接触器所需线圈电流较大，因此利用 8050 三极管对电流进行放大，同时为确保驱动能力以及安全性，通过 5 V 继电器中继控制接触器，其中电阻 R 选择 560 Ω。正常情况下 GPIO 口为低电平，继电器、接触器触点均断开。当铁磁谐振发生时，GPIO 口输出 3.3 V 高电平，继电器触点闭合导致接触器动作将阻尼电阻接入 PT 开口三角处。电路原理图如图 6 所示。

3.4 网络数据传输

该装置采用 TCP/IP 网络通信协议与上位机进行数据传输，数据传输采用的是 C/S 模式，ARM9 作为服务器，远端的上位机则作为客户端。ARM9 芯片采用源码资源丰富且拥有完备 TCP/IP 协议栈的 Linux 作为其操作系统。将 Linux 进行裁剪并移植到 S3C2440 芯片中，采用 Socket 接口作为网络通信的 API^[19-20]。首先调用 Socket()函数创建一个 Socket，接着用 Bind()函数将 Socket 与本机 ip 地

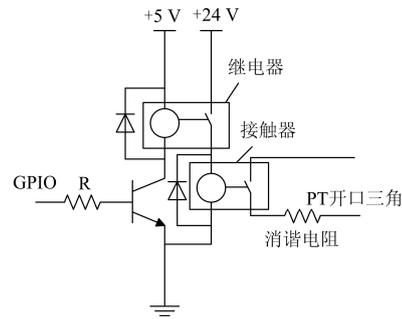


图 6 开关量输出电路原理图

Fig. 6 Schematic diagram of switch signal output circuit

址和端口号进行绑定，通过 Listen()函数对该端口号请求进行监听，当成功监听到并通过 accept()函数成功处理了远程客户端的连接请求之后，便可向客户端发送接收数据了。整个通信过程如图 7 所示。

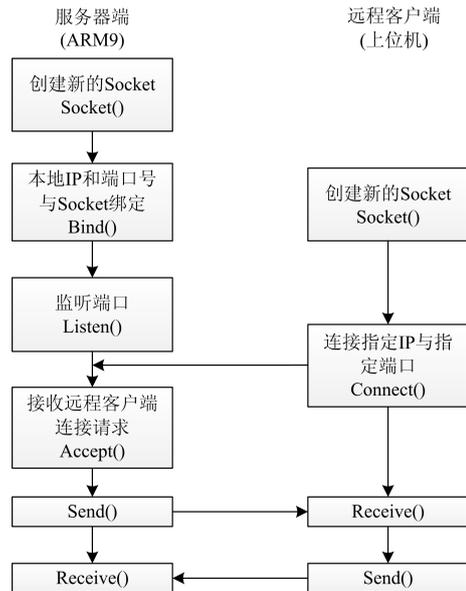


图 7 网络数据传输流程图

Fig. 7 Flow chart of network data transmission

4 仿真以及工程验证

针对该 GIS 变电站的主接线图以及运行工况，利用电磁暂态仿真软件 ATP-EMTP，建立铁磁谐振的数值仿真计算模型。假设在 0.4 s 时发生了分频铁磁谐振，1.0 s 时在 PT 二次侧开口三角处接入 1 Ω 的阻尼电阻，消谐结果如图 8 所示，阻尼电阻投切之后成功消耗了谐振能量，电压、电流中谐波分量得到了抑制，消谐效果较好。说明对于该 GIS 变电站，利用该装置智能控制阻尼电阻投切来消除铁磁谐振的思路基本正确。

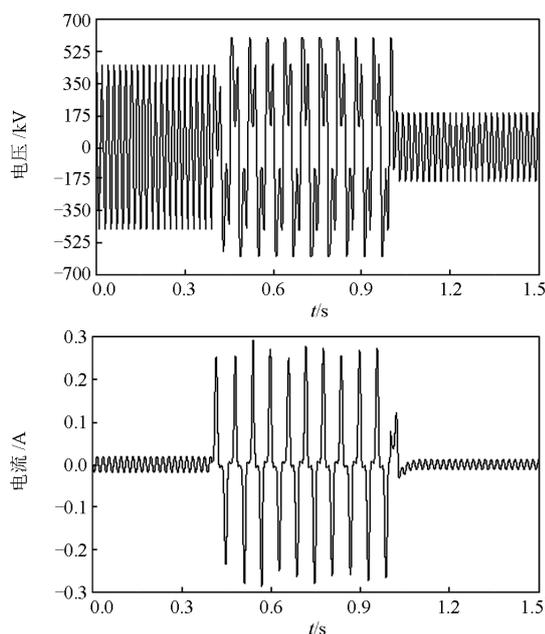


图 8 PT 一次侧电压、电流仿真波形

Fig. 8 Simulating voltage and current waveform of primary side of PT

将该装置投入现场进行工程试验, 通过人为控制使 PT 发生 1/3 分频铁磁谐振, 录波软件记录的该变电站 500 kV 母线电压谐振波形如图 9 所示, 波形中出现了大量的低频分量。发生铁磁谐振之后该装置工作并将 1Ω 阻尼电阻投入至 PT 三角开口处, 由图 9 可见, 成功抑制了 1/3 分频频率的谐振分量, 最终将波形还原至基频 50 Hz。

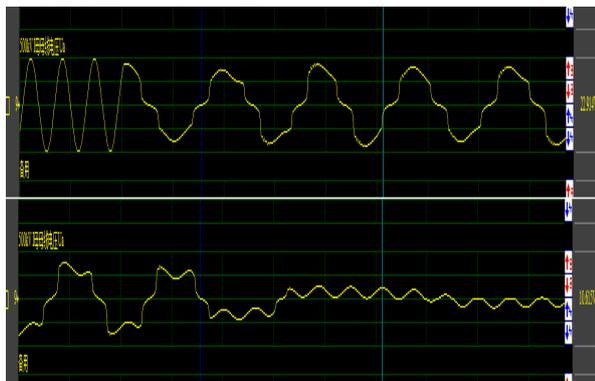


图 9 500 kV 母线 A 相一次侧电压波形

Fig. 9 Voltage waveform of primary side of A phase in 500 kV bus

5 结论

PT 铁磁谐振引起的过电压电流是电力系统中较为常见而且威胁较大的故障。本文通过对 PT 二次侧电压进行采样调理并利用 DSP 实现快速傅里叶算法判断是否发生谐振。若发生谐振则通过 ARM

输出控制信号驱动接触器的开关动作从而实现阻尼电阻的有效投切完成对铁磁谐振的抑制并将谐振信息显示至 LCD 屏幕, 保存至 SD 卡并将其上传至上位机。本装置具有响应速度快、低成本和低功耗等优势, 具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] 梁志瑞, 董维, 刘文轩, 等. 电磁式电压互感器的铁磁谐振仿真研究[J]. 高压电器, 2012, 48(11): 18-23.
LIANG Zhirui, DONG Wei, LIU Wenxuan, et al. Simulation analysis on ferroresonance of potential transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11): 18-23.
- [2] 李本瑜, 翟海燕, 赵明, 等. 电力系统零序网络最优控制技术[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 152-156.
LI Benyu, ZHAI Haiyan, ZHAO Ming, et al. Research on optimal control technology of zero sequence network power system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 152-156.
- [3] 王海荣, 窦春霞, 王宁, 等. 基于 ATP-EMTP 的 PT 铁磁谐振与消谐措施研究[J]. 变压器, 2008, 45(3): 24-28.
WANG Haitang, DOU Chunxia, WANG Ning, et al. Research on PT ferroresonance and resonance elimination measures based on ATP-EMTP[J]. Transformer, 2008, 45(3): 24-28.
- [4] 张雨潇, 戴珂, 陈新文, 等. 检测电流包含电容电流的 SAPF 谐波抑制和谐振阻尼新方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊 1): 58-67.
ZHANG Yuxiao, DAI Ke, CHEN Xinwen, et al. An improved method of SAPF for harmonic compensation and resonance damping with detected current including power capacitor and load current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 58-67.
- [5] 刘春玲, 耿卫星, 刘建武, 等. 一起电力系统谐振事故分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 108-110.
LIU Chunling, GENG Weixing, LIU Jianwu, et al. Analysis on accidents of syntony in power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 108-110.
- [6] 李旭洋, 董新洲, 薄志谦. 电力变压器铁磁谐振检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 102-107.
LI Xuyang, DONG Xinzhou, BO Zhiqian. Research on the power transformer ferroreanance detection algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 102-107.

- 102-107.
- [7] 戴珂, 段科威, 刘聪, 等. 一种 SAPF 的谐波补偿和谐振阻尼复合控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 86-94.
- DAI Ke, DUAN Kewei, LIU Cong, et al. A hybrid control strategy of harmonic compensation and resonance damping based on SAPF[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 86-94.
- [8] 司马文霞, 陈莉珺, 杨庆, 等. GTO 控制阻尼电阻脉冲投入的铁磁谐振控制[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1520-1529.
- SIMA Wenxia, CHEN Lijun, YANG Qing, et al. Ferroresonance control through GTO controlling damping resistance pulsed access[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1520-1529.
- [9] 刘味果, 赵邈, 毛柳明, 等. 基于高漏抗式消弧线圈的配电网单相接地故障状态辨识[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 28-35.
- LIU Weiguo, ZHAO Miao, MAO Liuming, et al. Identification of distribution network's grounding status based on transformer-based arc suppression coil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 28-35.
- [10] 段雄英, 尹睿涵, 孟晗, 等. 基于 ARM 的 GOOSE 通信系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 130-135.
- DUAN Xiongying, YIN Ruihan, MENG Han, et al. GOOSE communication system based on ARM[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 130-135.
- [11] 李得民, 何怡刚. 基于 Nuttall 窗四谱线插值 FFT 的电力谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 64-71.
- LI Demin, HE Yigang. Harmonic analysis of power system based on Nuttall window four-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 64-71.
- [12] 李文新, 王广龙, 陈建辉. 基于 S3C2440 和 WinCE 的嵌入式传感测控系统[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(8): 1498-1500, 1504.
- LI Wenxin, WANG Guanglong, CHEN Jianhui. Embedded measurement and control system with microsensors based on S3C2440 and WinCE[J]. Computer Measurement & Control, 2009, 17(8): 1498-1500, 1504.
- [13] 刘美容. FFT 算法的 DSP 实现[J]. 微电子学与计算机, 2015(1): 76-79, 8.
- LIU Meirong. DSP implementation of FFT algorithm[J]. Microtronics & Computer, 2015(1): 76-79, 8.
- [14] 汪立, 刘翠琳. 一种高精度加窗插值 FFT 谐波分析方法[J]. 陕西电力, 2013, 41(5): 1-3.
- WANG Li, LIU Cuilin. An accurate method for interpolated FET harmonic analysis based on a new window[J]. Shaanxi Electric Power, 2013, 41(5): 1-3.
- [15] 惠萌, 刘盼芝, 李光. 电力系统分频铁磁谐振检测方法研究[J]. 电测与仪表, 2013, 50(6): 32-35, 103.
- HUI Meng, LIU Panzhi, LI Guang. Study on detection method of subharmonic ferroresonance in power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(6): 32-35, 103.
- [16] 陈堂贤. 基于嵌入式技术的微机保护装置[J]. 继电器, 2007, 35(6): 64-67.
- CHEN Tangxian. Microcomputer-based protection device based on ARM technique[J]. Relay, 2007, 35(6): 64-67.
- [17] 李东昆, 李亭, 刘俊, 等. 大规模复杂网络的电力通信可靠性评估算法研究[J]. 陕西电力, 2014, 42(7): 14-17.
- LI Dongkun, LI Ting, LIU Jun, et al. Study on reliability evaluation algorithm of electric power communication in large-scale complex networks[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(7): 14-17.
- [18] 张岩, 马旭东, 张云帆. ARM 与 DSP 的 SPI 通信设计实现[J]. 工业控制计算机, 2008, 21(9): 56-57, 66.
- ZHANG Yan, MA Xudong, ZHANG Yunfan. Communication between ARM and DSP through SPI bus[J]. Industrial Control Computer, 2008, 21(9): 56-57, 66.
- [19] 杨继赢. 基于 ARM9 的电力智能终端通信软件设计[J]. 微计算机信息, 2008, 24(21): 95-96.
- YANG Jiyong. Design of electric power intelligent terminal's communication software based on ARM9[J]. Microcomputer Information, 2008, 24(21): 95-96.
- [20] 周奇才, 刘志科, 熊肖磊. 基于 ARM 的嵌入式地铁隧道变形监测系统网络通信研究[J]. 机电一体化, 2011, 17(7): 17-19.
- ZHOU Qicai, LIU Zhike, XIONG Xiaolei. Research of network communications on ARM-based embedded tunnel deformation monitoring system[J]. Mechatronics, 2011, 17(7): 17-19.

收稿日期: 2017-06-22; 修回日期: 2017-09-02

作者简介:

杨秉义(1967—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统电能质量控制与新能源发电。E-mail: yangbingyi834675@163.com

(编辑 魏小丽)