

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.03.027

# 一种基于数字积分方法的板卡电流在线监测系统

邢超, 李胜男, 刘明群, 何鑫, 奚鑫泽

(云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650217)

**摘要:** 板卡运行电流的监测对评估板卡的运行状态有重要意义。文中提出了一种板卡电流在线监测方法, 设计了一种可以方便开合的开合式线圈作为电流传感器, 包含两个线圈。两个线圈骨架的结构和尺寸相同, 但匝数不一样, 匝数少的用于实现较大电流的测量; 匝数多的用于实现微弱电流的测量。通过两个线圈的配合, 实现较大动态范围内电流的准确测量。线圈输出需要积分, 为了提高精度, 文中提出了一种改进的数字积分算法, 有效提高了积分精度。结果表明, 该系统在0~1 A范围内误差最大不超过0.7%, 在1~100 A范围内误差最大不超过0.21%。

**关键词:** 板卡; 电流监测; 故障诊断; 数字积分

## Online Current Monitoring System Based on Digital Integration Method for Board Card

XING Chao, LI Shengnan, LIU Mingqun, HE Xin, XI Xinze

(Yunnan Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

**Abstract:** An on-line monitoring method of board card current is presented, and a conveniently retractable coil which comprises two coils is designed as the current sensor. The two coils have the same frame structure and size, but have different number of turns. The coil with less turns is used to measure large current, and the coil with more turns is used to measure weak current. By cooperation of the two coils, accurate measurement of the current can be achieved in large dynamic range. In order to improve the measurement accuracy, an improved digital integration algorithm is proposed. The results show that the error of this system is not more than 0.7% in the current range from 0 A to 1 A, and not more than 0.21% in the current range from 1 A to 100 A.

**Key words:** board card; current monitoring; fault diagnosis; digital integration

## 0 引言

作为整个直流工程的核心控制器, 控制保护主机系统的安全运行是电力系统安全运行的必要环节。控制保护主机板卡的故障会给电网的安全稳定运行带来较大风险。因此对板卡进行实时的监测意义重大。以基于HCM3000系列控制保护平台的直流控制保护板卡为例, 目前缺乏快速全面的检测分析手段, 不利于故障分析, 给直流系统安全运行带来了隐患<sup>[1-5]</sup>。

为了提高板卡的运行稳定性及可靠性, 有必要对板卡检测技术进行研究, 并研制检测平台, 提高现场事故抢修效率。板卡故障可能有多种原因, 其中大多伴随着故障电流信号的出现, 因此对故障电流信号的监测非常重要。然而目前缺乏适用于板卡故障电流监测的电流传感器及监测系统, 导致板卡发生故障时无法及时定位, 降低了其运行稳定性和可靠性。

文[1]提出了一种针对信号微机监测系统板卡故障定位仪, 采用ARM9作为上位机的核心处理器,

收稿日期: 2018-10-14; 修回日期: 2018-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51707026)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China(51707026).

找出故障芯片的位置,然而很多情况下芯片没有坏,但出现了异常电流,该系统不适合这种情况的监测;文[2]提出了一种板卡离线检测系统,可用于板卡的离线检测及故障定位,但无法实现运行中板卡的在线监测。

针对目前板卡电流监测中存在的缺乏体积小、准确度高、易安装等特点的电流传感器及高精度在线监测系统这一问题,文中提出了一种可对板卡电流进行实时监测的在线监测系统,该系统传感器安装方便、体积小,系统监测准确度高,可有效监测板卡的运行状态,提高其运行稳定性和可靠性。

## 1 板卡电流监测系统原理和结构

板卡电流监测系统整体结构示意图见图1。其包括高压端电路和低压端电路两个主要构成部分。电流传感器输出的信号直接传输给数据采集系统进行信号采集,将模拟信号转换为数字信号。由于电流传感器的输出为电压微分信号,为了消除频率波动等因素的影响,需要对其进行积分还原。采用基于分数延时方法的改进数字积分算法对其进行积分还原。数字积分在数字采集系统中利用软件编程实现。数字积分后的数据输出经过电光转换器件(E/O转换)转换为光信号,然后利用光纤传输至低压端电路中。低压端电路中的光电转换器件将光信号转换成电信号,然后传输给分析平台进行分析处理。分析平台用于对被监测电流进行参数计算、趋势预测、数据存储、波形显示等。

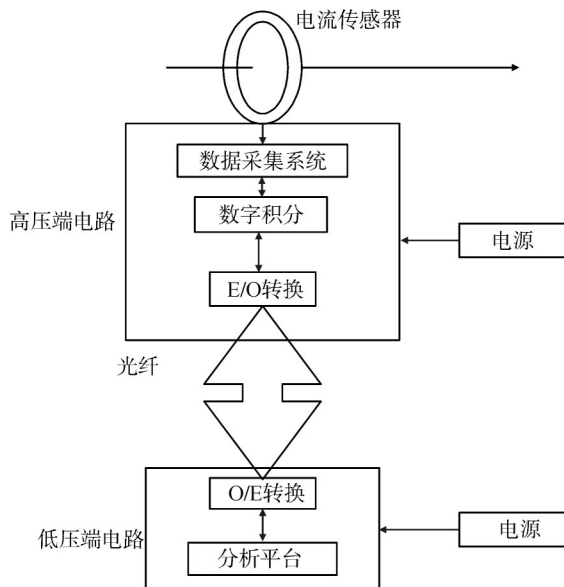


图1 板卡电流监测系统整体结构

Fig. 1 The whole structure of current monitoring system for board card

## 2 电流传感器设计

板卡电流监测的准确度和可靠性关系着板卡能否正常工作,监测传感器不准确,可能会影响到整个电力系统的正常运行。为了准确的监测板卡电流,文中设计了一种宽动态范围宽频态电流传感器,不仅可以准确的监测工频电流信号,还可以测量出故障时的高频电流信号,其具体设计方法如下。

### 2.1 电流传感器结构及数学模型

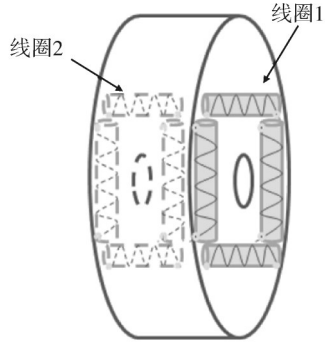
常用的电流测量方法一般采用铁磁式电流互感器,但由于铁心互感器在一次电流含有直流分量情况下容易饱和,而且频带窄,拾取信号容易失真,不适合本系统电流测量要求。

Rogowski线圈具有动态范围大、测量频带宽、无铁磁饱和等优点,适用于测量变化范围较大的电流<sup>[6-10]</sup>。因此,该系统选用Rogowski线圈作为传感头。为了便于对板卡进行测量,文中设计了一种可以方便开合的开合式线圈,采用方形结构。方形结构易于加工和绕制,在较小的空间里能绕制更多的线圈匝数,易于安装于较小的空间内,见图2。方形骨架Rogowski线圈的基本结构是4根缠绕线圈的直线型Rogowski线圈,4根直线型线圈首尾相接,固定在环氧树脂板上。图2(a)为设计的电流传感器示意图,正面和反面各有一个方形结构的Rogowski线圈,两个线圈骨架的结构和尺寸相同,不同点在于线圈匝数不一样,线圈1匝数少,用于实现较大电流的测量;线圈2匝数多,用于实现微弱电流的测量。通过两个线圈的配合,实现较大动态范围内电流的准确测量。图2(b)为一个方形结构Rogowski线圈的正面结构示意图,骨架为两个半环形式,4个线圈分成两组,分别位于两个半环上,通过导线实现线圈输出的相连。测量时,两个半环可以打开,形成开合式结构,从而可以方便的测量被测导线上的电流,无需导线断开,可对工作中的板卡实现测量。

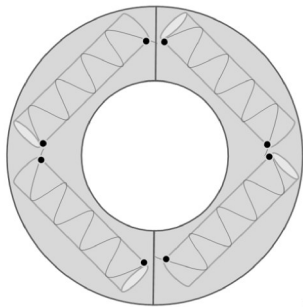
为了对方形结构输出进行分析,文中建立了见图3的模型。由于线圈1、2结构相同,只是匝数不同,所以只需建立一个模型即可。

图3中,第 $k$ 匝数线圈内边磁感应强度为

$$B_{kn} = \mu_r \mu_0 H_{kn} = \mu_r \mu_0 \times \frac{i(t)}{2\pi \times \sqrt{l^2 + d_k^2}} \quad (1)$$



(a) 电流传感器示意图



(b) 方形结构Rogowski线圈的正面结构示意图

图2 电流传感器结构示意图

Fig. 2 The structural diagram of current sensor

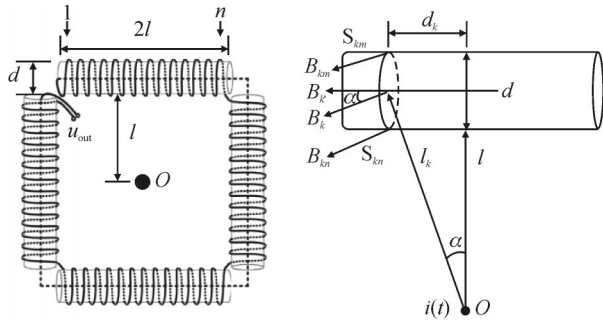


图3 方形 Rogowski 线圈结构框图

Fig. 3 The structure diagram of square Rogowski coil

外边磁感应强度为

$$B_{km} = \mu_r \mu_0 H_{km} = \mu_r \mu_0 \times \frac{i(t)}{2\pi \times \sqrt{(l+d)^2 + d_k^2}} \quad (2)$$

式(2)中:  $\mu_r, \mu_0$  为环境磁导率;  $i(t)$  为  $O$  点交流电流。若  $l > 8d$ , 则  $B_{km}/B_{km} < 1.008$ , 近似认为截面磁场处处相等, 垂直于 Rogowski 线圈方向磁感应强度为

$$B'_k = \mu_r \mu_0 \times \frac{i(t)}{2\pi \times l_k} \times \frac{l+d/2}{l_k} \quad (3)$$

磁通量为

$$\varphi_k = \oint B'_k dS = \mu_r \mu_0 \times \frac{(l+d/2)d^2}{8l_k^2} \times i(t) \quad (4)$$

其中

$$l_k^2 = l^2 + \left( \frac{2l \times (\frac{N}{2} - k)}{N} \right)^2 = 2l^2 \times \frac{N^2 - 2Nk + 2k^2}{N^2}$$

磁链为

$$\phi = \sum_{k=1}^N \varphi_k = \frac{\mu_r \mu_0 d^2 N^2 \times i(t)}{16(l + \frac{d}{2})} \frac{1}{N^2 - 2Nk + 2k^2} \times \sum_{k=1}^N \quad (5)$$

4个边加在一起, 电压输出为

$$u_{out} = -4 \times \frac{d\phi}{dt} = -\frac{\mu_r \mu_0 d^2 N^2}{4l} \times \sum_{k=1}^N \frac{1}{N^2 - 2Nk + 2k^2} \times \frac{di(t)}{dt} \quad (6)$$

一次额定电流为 100 A 时, 设计的 Rogowski 线圈取  $d=5$  mm,  $l=21$  mm, 线圈 1 匝数  $N_1=400$  匝, 线圈 2 匝数  $N_2=2000$  匝, 此时两个线圈的输出  $u_{out}$  分别为 5.04 mV 和 25.24 mV。

文中采用方形结构 Rogowski 线圈, 做到体积小, 易于紧密加工和制作。虽然安装位置偏差、临相干扰对方形结构 Rogowski 线圈测量误差有一定影响, 通过提高制作工艺, 固定安装等措施能改善测量误差, 使测量误差小于 0.5%, 达到较高的测量准确度和较大的动态范围等要求。

## 2.2 电流传感器数量分布仿真

按照 2.1 节中设计的电流传感器, 其 4 个直线型 Rogowski 线圈对称分布于骨架四周。传感器数量不同, 其测量的准确度也不同, 为了研究电流传感器分布数量对测量结果的影响, 利用 MATLAB 软件分别在电流传感器数量  $N$  为 1、2、3、4、8 的情况下进行仿真得出波形, 波形见图 4。

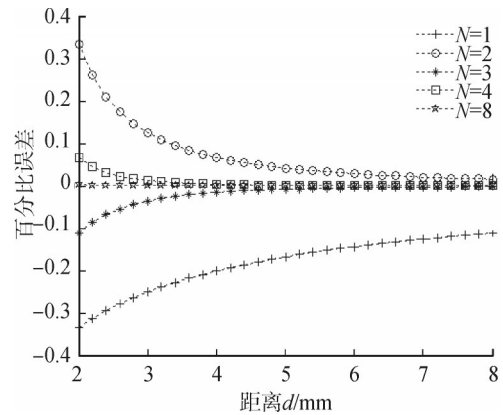


图4 传感器数量仿真分析

Fig. 4 The analysis of numerical sensors simulation

从图 4 中可以看出, 不同数量的电流传感器测量时, 测量结果的百分比误差不同。当采用 4 个直线型 Rogowski 线圈均匀放置在被测导线周围构成的电流传感器, 即电流传感器对应角度为  $90^\circ$  时所测得的百分比误差小于 0.2%, 满足测量精度的要求。当传感器数量  $N$  小于 4, 电流传感器对应被测导线的角度小于  $90^\circ$  时, 很明显百分比误差较大。因此, 综合考虑测量精度和成本, 选择 4 个直线型

Rogowski线圈构成电流传感器。

### 2.3 数据采集系统研究

数据采集系统主要构成部分见图5。电流传感器的输出传给信号调节电路,将其转换成合适的大小,然后信号传至A/D转换模块。A/D转换模块用于将模拟量信号转换成数字量信号,然后在微处理器中进行数字积分、组帧处理等。微处理器采用FPGA芯片,对数据进行处理后,通过电光转换模块转换成光信号,然后传至低压端电路。

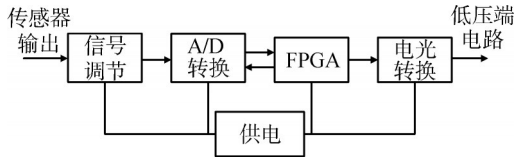


图5 数据采集系统主要构成

Fig. 5 The main composition of data acquisition system

### 2.4 高精度数字积分算法设计

Rogowski线圈输出的信号为微分信号,因此需要对Rogowski线圈输出的信号进行积分还原。模拟积分和数字积分是目前最常用的两种积分器。模拟积分器有无源积分器和有源积分器两种。无源积分器无需提供电源,它会使输入信号衰减,其阻抗又比较大,会产生较大的误差,所以一般使用有源型积分器<sup>[11-16]</sup>。理想有源积分器的电路原理见图6。

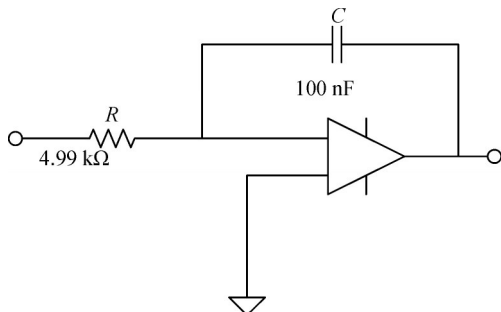


图6 理想有源模拟积分的原理图

Fig. 6 The schematic diagram of ideal active analog integration

它的传递函数为

$$H(s) = -\frac{1}{j\omega RC} \quad (7)$$

由图6、式(7)中可以看出,理想积分器的结构简单,理论上可以满足需求。然而,实际中,一旦积分器输入侧有直流电压混入时,放大器会迅速饱和,积分器就不能正常运作。因此需要在电容支路上并联一个电阻。当有直流电压时,可以通过,从而对放大器没有影响。即图7的带反馈电阻的积分电路。

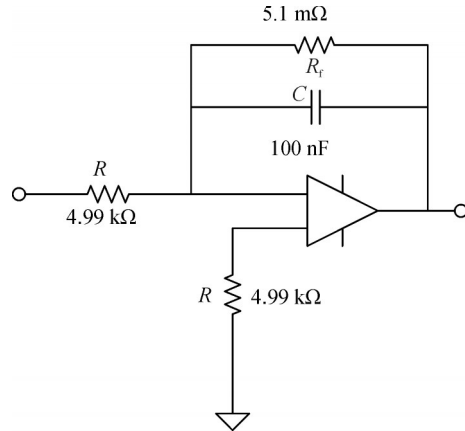


图7 带反馈电阻的积分原理图

Fig. 7 The schematic diagram of active analog integration with feedback resistance

它的传递函数为

$$H(s) = -\frac{R_f}{R} \frac{1}{1 + R_f C s} \quad (8)$$

要想使该积分器满足要求,则需取很大的值。然而当越大时,输入端有一些低频信号的干扰时,放大器会将干扰变的很大。这就会带来很大误差,并且它的稳定性不好,会造成很大的漂移。所以为了防止低频信号的干扰,对积分器进行了进一步的改进,得到改进低频增益特性的积分电路。原理见图8。它的传递函数为

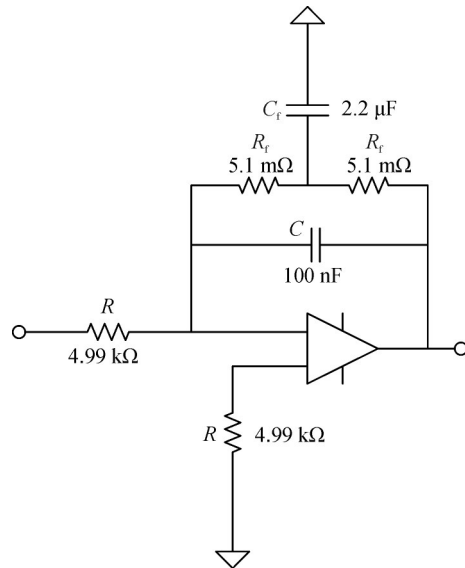


图8 改进低频增益的积分原理图

Fig. 8 The schematic diagram of active analog integration with improved low-frequency gain

$$H(s) = -\frac{4R_f + R_f^2 C_f s}{(4 + 4R_f C_f s + R_f^2 C_f C s^2 + 2R_f C_f C) \times R} \quad (9)$$

该积分器基本比较适合实际应用。它能较好的减弱低频噪音,但不能完全避免低频噪音,依然会影响频率响应的精度。

为了进一步补充上述3种积分器的功能,现将其幅值特性曲线与相角特性曲线于二维坐标系中拟合,其具体曲线见图9、10。

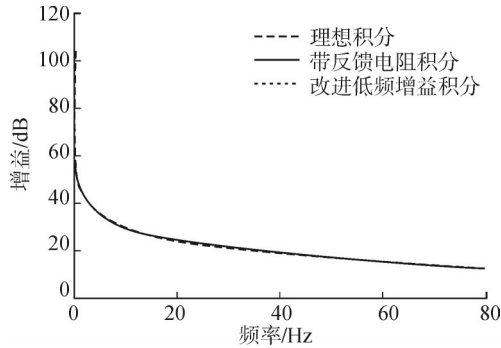


图9 3种积分器的幅值特性曲线

Fig. 9 The amplitude characteristic curve of three different integrators



图10 3种积分器的相角特性曲线

Fig. 10 The phase characteristic curve of three different integrators

从幅频响应曲线中可以看出带反馈电阻的积分器在整个频率范围内与理想积分器很接近,在频率较低时增益较大,都会带来比较严重的误差。而改进低频增益的积分器虽然在低频段相对于理想积分器和带反馈电阻的积分器有所改进,但是依然不能完全消除。从相角响应曲线中可以看出,理想积分器的相角满足条件。而带反馈电阻的积分器和改进低频增益的积分器在低频段的相角响应有误差,其中改进低频增益的积分器的误差更大一些。

为了使积分器的低频响应更满足要求,一些研究人员专门在积分电路中加入了低通滤波器,这样它的幅值响应的低频特性会优良很多,但是相角响应的误差会更大;又研究了相关的相位调节。尽管如此,它的性能依然很受模拟器件的影响。模拟器件的分散性、温漂、零漂等问题是无法避免的。在长时间的运行中,模拟积分器的精度很难一直维持很高,所以数字积分技术应运而生。

常用的数字积分有矩形积分、梯形积分、辛普森积分等,这些积分与理想积分之间要么幅值误差

较大,要么相位误差较大,为解决这种问题,文中对数字积分进行了改进,改进后的积分函数为

$$H(z) = \frac{T}{32} \frac{7 + 8z^{-1/4} + z^{-1/2}}{1 - z^{-1/2}} \quad (10)$$

其幅值特性曲线与相角特性曲线见图11、12。

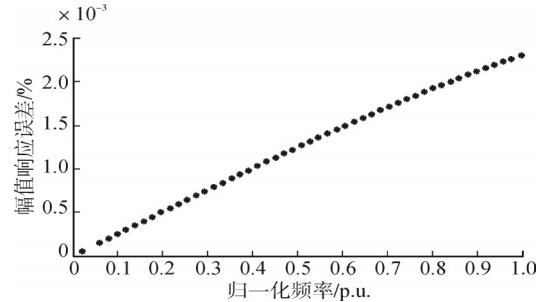


图11 改进数字积分幅值响应误差

Fig. 11 The amplitude response errors of improved digital integration

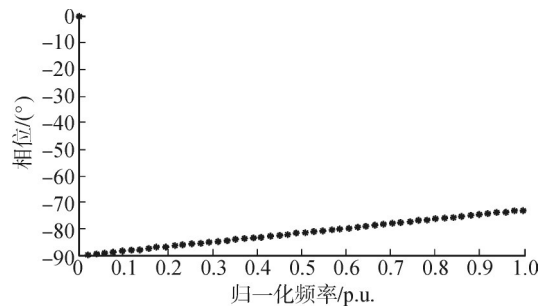


图12 改进数字积分相角特性曲线

Fig. 12 The phase characteristic curve of improved digital integration

比较图11、12可以看出,改进数字积分的幅值误差最大不超过0.0025,但相位误差较大。为降低相位误差,在传递函数中引入一个0.096的延迟因子,可得

$$H_g(z) = z^{-0.096} H_3(z) = \frac{T}{32} z^{-0.096} \frac{7 + 8z^{-1/4} + z^{-1/2}}{1 - z^{-1/2}} \quad (11)$$

该式在理想情况下延迟得到的幅值响应与相角响应见图13、14。

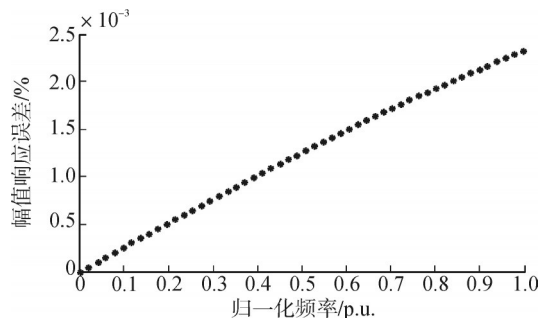


图13 带延时因子改进数字积分幅值响应误差

Fig. 13 The amplitude response errors of improved digital integration with delayed factor

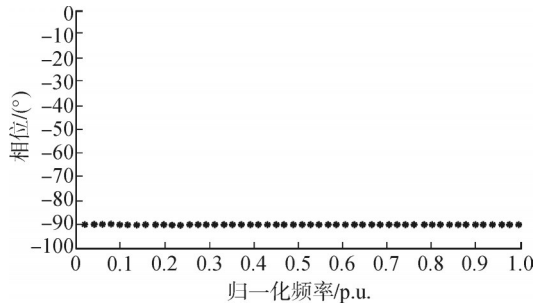


图 14 带延时因子改进数字积分幅值响应误差

Fig. 14 The phase characteristic curve of improved digital integration with delayed factor

图 13、14中可以看出,改进后的带延时因子的数字积分,幅值误差几乎不变,相位最大误差为 $0.16^\circ$ ,误差有效降低。

### 3 系统性能测试

为了验证系统的性能,对传感器和监测系统进行了测试。

#### 3.1 电流传感器误差测试

电流传感器误差测试结果见表 1。由表 1 中可以看出,线圈 1 在测量大电流时误差较小,线圈 2 则更适合测量小电流信号,因此当测量电流结果大于 1 A 时,以线圈 1 的结果作为最终输出结果;测量小于 1 A 的电流时,以线圈 2 的输出结果作为最终输出。

表 1 电流传感器误差测试结果

Table 1 The error test results of a current sensor

一次电流/ A	线圈 1		线圈 2	
	比差/%	角差/( $^\circ$ )	比差/%	角差/( $^\circ$ )
0.005	2.36	5.9	0.61	2.6
0.010	2.02	4.7	0.48	2.2
0.050	1.67	3.2	0.26	1.3
0.100	1.43	2.5	0.22	0.7
0.500	0.38	1.2	0.16	0.3
1.000	0.06	0.3	0.08	0.2
10.000	-0.04	0.6	-0.84	1.0
50.000	-0.12	0.8	-1.62	2.8
100.000	-0.28	1.1	-2.08	3.4

#### 3.2 电流传感器位置误差测试

理想的线圈位置是一次电流导线位于电流传感器中心位置,且垂直于传感器平面,但实际安装时,总有位置偏差。位置偏差主要分解为:角度倾斜、中心位置偏移、临相垂直干扰、临相平行干扰。图 15 为位置影响测试,结果见表 2。

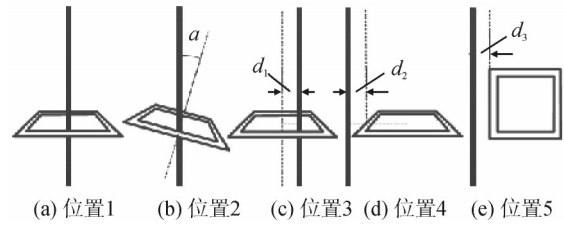


图 15 电流传感器位置影响示意图

Fig. 15 The diagrammatic sketch of the location effect of a current sensor

表 2 位置影响测试结果

Table 2 The test results of location effect

位置	线圈 1		线圈 2	
	比差/%	角差/( $^\circ$ )	比差/%	角差/( $^\circ$ )
中心	0.05	0.2	0.04	0.1
角度倾斜	0.10	0.4	0.06	0.4
中心偏移	0.08	0.2	0.09	0.2
邻相垂直	0.07	0.1	0.03	0.2
邻相平行	0.05	0.2	0.05	0.1

由表 2 可得出结果,电流传感器误差受影响较小,比差影响小于 0.05%,角差影响小于 $0.3'$ 。

#### 3.3 电流监测系统整体准确度试验

为保证整个系统的精度,需要验证系统整体的准确度。验证实验如下,当电流变化在 5 mA~100 A 时,电流监测系统误差变化见图 16。

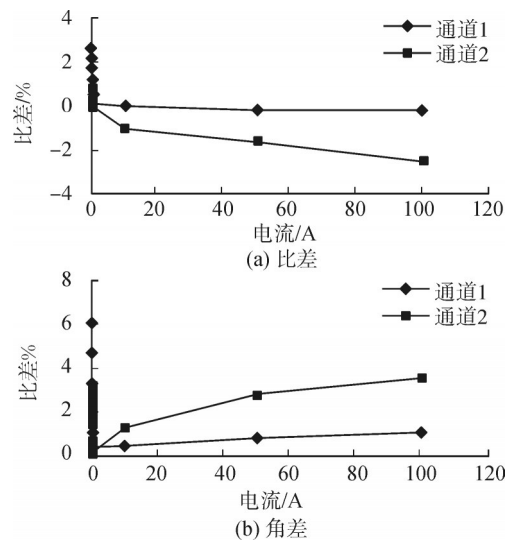


图 16 监测系统整体准确度试验结果

Fig. 16 The test results of the monitoring system overall accuracy

由图 16 中可以看出,在 0~1 A 内,通道 2 比差和角差均较小,在 1~100 A 内通道 1 角差较小,因此可

以确认,在测量微弱电流时利用通道2的输出作为最终输出,在测量较大电流时使用通道1的输出。

#### 4 结语

针对目前缺乏可对板卡电流进行准确监测的监测系统这一现状,文中提出了一种板卡电流在线监测方法,可以对运行中的板卡实现实时电流在线监测。利用两个结构相同、匝数不同的线圈实现较大动态范围内电流的准确测量,同时利用带延时因子的改进数字积分方法来提高积分精度。测试结果表明,该监测系统测量范围广,小电流时可测量毫安级,大电流时可测量百安级电流,精度高,应用广泛。

#### 参考文献:

- [1] 林勇奇,袁阳平,温海桂. 信号微机监测系统板卡故障定位仪的设计与实现[J]. 铁道运营技术,2012,18(1):14-17.  
LIN Yongqi, YUAN Yangping, WEN Haigui. Design and realization of board fault locator for signal microcomputer monitoring system[J]. Railway Operation Technology, 2012, 18(1):14-17.
- [2] 石晓伟,卢明贤,王宇,等. 秦山核电厂全范围模拟机DIO改进板卡及其离线检测系统设计[J]. 核动力工程,2014(s1):33-36.  
SHI Xiaowei, LU Mingxian, WANG Yu, et al. Design of DIO improved board and off-line detection system for full range simulator of qinshan nuclear power plant[J]. Nuclear Power Engineering, 2014(s1):33-36.
- [3] 陈玉,成永红,徐霄伟,等. 100 MHz采样速率局放在线监测智能单元的开发[J]. 高电压技术,2008,34(11):2368-2373.  
CHEN Yu, CHENG Yonghong, XU Xiaowei, et al. 100 MHz sampling rate PD on-line monitoring intelligent unit development[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11): 2368-2373.
- [4] 赵海增,季振山,朱崇铭,等. EAST装置电场数据采集与分析系统[J]. 微电子学与计算机,2014(12):75-78.  
ZHAO Haizeng, JI Zhenshan, ZHU Chongming, et al. EAST device electric field data acquisition and analysis system[J]. Microelectronics & Computer, 2014(12): 75-78.
- [5] 卫保国,蔡伟,郝志浪,等. 航电ARINC429总线监测系统的设计与实现[J]. 电子设计工程,2014,22(3):37-41.  
WEI Baoguo, CAI Wei, HAO Zhilang, et al. Design and realization of ARINC429 bus monitoring system[J]. Electronic Design Engineering, 2014, 22(3):37-41.
- [6] 胡明耀,王达达,王洪亮,等. 光纤电流传感器在智能电网中检测原理的研究[J]. 光通信研究,2014,40(6):62-65.  
HU Mingyao, WANG Dada, WANG Hongliang, et al. Research on detection principle of optical fiber current sensor in smart grid[J]. Study on Optical Communications, 2014, 40(6):62-65.
- [7] 代云洪,胡明耀,王振,等. Rogowski线圈的FBG电流传感器研究[J]. 压电与声光,2014(3):432-436.  
DAI Yunhong, HU Mingyao, WANG Zheng, et al. Research on FBG current sensor of Rogowski coil[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2014(3):432-436.
- [8] 金丹,徐春营,岳鑫桂,等. 输电线路雷电流测量用Rogowski线圈低频失真校正技术[J]. 电力系统自动化,2013,37(22):96-100.  
JIN Dan, XU Chunying, YUE Xingui, et al. Low-frequency distortion correction technology of Rogowski coil applied to lightning current measurement on transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22):96-100.
- [9] 张志东,宋建成. 干式变压器局部放电在线监测脉冲电流传感器的开发[J]. 电网技术,2011(2):149-153.  
ZHANG Zhidong, SONG Jiancheng. Development of pulse current sensor for on-line monitoring of partial discharge in dry-type transformer[J]. Power System Technology, 2011(2): 149-153.
- [10] 王宝诚,王德玉,邬伟扬. 罗氏线圈的频率特性分析与传感器的设计方法[J]. 电工技术学报,2009,24(9):21-27.  
WANG Baocheng, WANG Deyu, WU Weiyang. Frequency response analysis of a Rogowski coil transducer and its design method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9):21-27.
- [11] 宋涛. Rogowski线圈电流互感器中的高精度数字积分器技术研究[J]. 高电压技术,2015,41(1):237-244.  
SONG Tao. Technical research of accurate digital integrators for Rogowski coil current transformer[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1):237-244.
- [12] 韩小涛,黄澜涛,孙文文,等. 基于PCB空心线圈和数字积分器的脉冲强磁场装置放电电流测量[J]. 电工技术学报,2012,27(12):13-19.  
HAN Xiaotao, HUANG Lantao, SUN Wenwen, et al. Discharge current measurement of pulsed high magnetic field facility based on PCB air-core coil and digital integrator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12):13-19.
- [13] 姚东晓,吕利娟,倪传坤,等. 应用于空心线圈电子式互感器的双环数字积分器设计[J]. 电力系统自动化,2016,40(6):96-100.  
YAO Dongxiao, LYU Lijuan, NI Chuankun, et al. Dual loop digital intergrator design for Rogowski coil electronic transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6):96-100.
- [14] 李振华,胡蔚中,闫苏红,等. 电子式电流互感器中的高

- 900-910.  
LYU Zhenyu, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. Distributed economic droop control strategy for autonomous DC microgrid[J]. Journal of Chinese Electrical Engineering Science, 2016, 36(4):900-910.
- [13] NUTKANI I U, PENG W, LOH P C, et al. Cost-based droop scheme for DC microgrid[C]//Energy Conversion Congress and Exposition. [S.l.]: IEEE, 2014:765-769.
- [14] DOMÍNGUEZ-GARCÍA A D, CADY S T, HADJICOSTIS C N. Decentralized optimal dispatch of distributed energy resources[C]//Decision and Control. [S.l.]: IEEE, 2012:3688-3693.
- [15] OLFATI-SABER R, FAX J A, MURRAY R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1):215-233.
- [16] LI C, SAVAGHEBI M, VASQUEZ J C, et al. Multiagent based distributed control for operation cost minimization of droop controlled AC microgrid using incremental cost consensus[C]//European Conference on Power Electronics and Applications. [S.l.]: IEEE, 2015:1-9.
- [17] XU Y, LI Z. Distributed optimal resource management based on the consensus algorithm in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4):2584-2592.
- [18] XIN H, ZHAO R, ZHANG L, et al. A decentralized hierarchical control structure and self-optimizing control strategy for F-P type DGs in islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1):3-5.
- [19] LU L Y, CHU C C. Consensus-based droop control of isolated micro-grids by ADMM implementations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, PP(99):1-1.
- [20] AZEVEDO R D, CINTUGLU M H, MA T, et al. Multi-agent based optimal microgrid control using fully distributed diffusion strategy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016 (99):1-1.
- 郑伟(1981—),女,工程师,主要从事电能质量治理装置、微电网系统开发相关工作。
- 胡长斌(1982—),男,副教授,博士,主要研究方向为分布式发电、微电网技术、配电网能量管理。

(上接第176页)

- 精度数字积分器技术[J]. 高压电器, 2016, 52(2):42-49.
- LI Zhenghua, HU Weizhong, YAN Suhong, et al. High accuracy digital integrator technology for electronic current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2):42-49.
- [15] 王小明, 周有庆, 彭红海, 等. 基于Rogowski线圈的数字积分器的研究与设计[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 155-159.
- WANG Xiaoming, ZHOU Youqing, PENG Honghai, et al. Research and design of digital integrator based on Rogowski coil[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2):155-159.
- [16] 朱超, 蒋煜, 梅军, 等. Rogowski线圈中积分环节的研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9):64-67.
- ZHU Chao, JIANG Yu, MEI Jun, et al. Integrator of Rogowski coil[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9):64-67.
- 邢超(1986—),男,高级工程师,研究方向为直流输电控制保护与试验技术。
- 李胜男(1971—),女,高级工程师,研究方向为继电保护技术。