

基于 Rogowski 线圈和数字信号处理的交流电流测量

陈鹏, 陆俭国, 杨彦杰, 李新

(河北工业大学, 天津 300130)

摘要: 在继电保护系统中常需测量一次侧大电流。电力系统中, 一次侧电流变化范围很大, 传统的方法难以满足要求。将 Rogowski 线圈和数字信号处理技术有机的结合, 实现了在大电流范围内进行高准确度的测量。Rogowski 线圈不饱和特性使之能够测量大范围的电流, 结合数字信号处理的无零漂积分器的测量方法, 消除了模拟信号调理电路的零点漂移, 并将其非线性因素影响降低到比较低的水平, 它测量大电流具有较高的准确度, 实现简单, 是一种测量宽范围变化的交流电流的较为理想的选择。

关键词: 继电保护; Rogowski 线圈; 零点漂移; 数字积分器

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)18-0023-04

0 引言

在继电保护系统中常需测量一次侧大电流。电力系统中, 一次侧电流变化范围很大, 如额定电流 400 A 的电网系统中, 空载电流会小到 10 A 以下, 而在发生短路故障时, 电流会达到 10 倍以上的额定值。通常的检测方法, 如使用安培表、电流互感器、分流器等, 由于热容量、电动力、磁路饱和或被测回路的影响等原因, 上述方法暴露出许多不足之处, 如何在大电流范围内准确的测量交流大电流, 一直困扰着电力系统科研工作者。Rogowski 线圈具有结构简单、安装方便、检测灵敏度高、频带宽等优点, 但其易受电磁干扰的影响, 为此本文提出以 Rogowski 线圈为传感器结合数字信号处理的无零漂积分器的测量方法, 它测量大电流具有较高的准确度, 实现简单, 是一种测量宽范围变化的交流电流的理想选择。

1 Rogowski 线圈的基本工作原理

Rogowski 线圈和传统的铁芯电流互感器的主要区别在于二者所用的材料和阻抗特性不同。Rogowski 线圈实质上是 will 一组导体线圈绕在一个非磁性骨架上, 线圈绕成偶数层 (一般为两层, 有时为一层, 回线采用单根导线)。测量时, 线圈围绕被测电流导体 (见图 1)。

测量线圈所交链的磁链与被测电流存在线性关系。

根据全电流定律, 可以推得 Rogowski 线圈中的感应电动势为:

$$e(t) = M \frac{di}{dt}$$

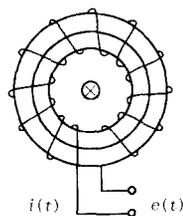


图 1 Rogowski 线圈的原理结构

Fig 1 Structure of Rogowski coil

其中: M 为互感系数, M 只与线圈结构有关。由此得到被测电流

$$i(t) = \frac{1}{M} \int_0^t e(t) dt$$

在 Rogowski 线圈两端接一个取样电阻 R_s , 等效电路图如图 2 所示, 其中 L_0 、 R_0 、 C_0 分别为线圈的自感、内阻和杂散电容, R_s 为取样电阻。

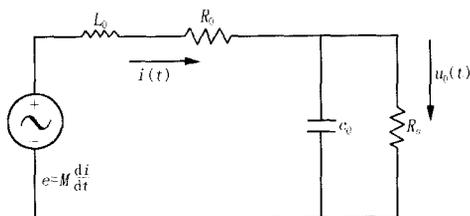


图 2 Rogowski 线圈等效电路

Fig 2 Equivalent circuit of Rogowski coil

由以上 Rogowski 线圈的等效电路, 可推得 Rogowski 线圈传递函数:

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{I(s)} = \frac{R_s M s}{L_0 C_0 R_s^2 s^2 + L_0 (1 + C_0 R_0 R_s) s + (R_s + R_0)}$$

$$\frac{Ms}{L_0 C_0 s^2 + (L_0/R_s + C_0 R_0) s + (1 + R_0/R_s)}$$

为简化分析,忽略线圈杂散电容 C_0 ,则传递函数变为:

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{I(s)} = \frac{R_s M s}{L_0 s + (R_s + R_0)} = \frac{R_s \frac{M}{L_0} s}{s + \frac{R_0 + R_s}{L_0}}$$

由上式可以看出,当时 $L_0 \gg R_0 + R_s$ 时(为信号变化频率), $H(s) \approx R_s \frac{M}{L_0}$,相当于一个比例环节,自感 L_0 起积分作用,无需外加积分电路,称为自积分型 Rogowski线圈,其机理与传统 CT相同。由于 Rogowski线圈为空心,自感 L_0 很小,要满足 $L_0 \gg R_0 + R_s$ 条件,取样电阻 R_s 必须较小,或电流变化率很大,因此自积分型 Rogowski线圈适合测量高频或脉冲陡电流。

当取样电阻 R_s 很大时(或电流变化率很小),即 $L_0 \ll R_0 + R_s$,考虑极限情况不妨取 R_s 时,传递函数变为 $H(s) \approx M$,基本上为一微分环节。输出电压大约超前于输入电流 90° ;需外加积分器补偿角差,称为外积分型 Rogowski线圈。因此外积分型 Rogowski线圈适合测量变化比较慢,脉宽适中的电流。外积分型 Rogowski线圈传递函数为:

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{I(s)} = \frac{Ms}{L_0 C_0 s^2 + (L_0/R_s + C_0 R_0) s + (1 + R_0/R_s)} \cdot \frac{1}{RCs + 1}$$

其中, RC 为积分时间常数。

由上式可以推算出外积分型 Rogowski线圈截止频率下限为 $f_l = 1/(2RC)$,上限频率为 $f_h = 1/(2\sqrt{L_0 C_0})$,由此可知, Rogowski线圈,测量电路的 f_l 决定于积分电路的时间常数 RC ,而 f_h 只取决于 Rogowski线圈的固有谐振频率。因此增大积分常数 RC 越大,测量系统频带越宽,但随着积分常数的增大,冲激响应超调量增大,系统稳定性变差,因此应选择合适的积分常数。

用 Matlab 对自积分型和外积分型 Rogowski线圈进行了仿真研究,得到图 3和图 4。仿真参数采用本文实验所用的 Rogowski线圈参数: $M = 2.7 \times 10^{-6}$ H, $L_0 = 32.4 \times 10^{-3}$ H, $C_0 = 100$ pF, $R_0 = 62.63$, $R_s = 285$, $RC = 1.0$ (外积分型)。

从上面的仿真结果可以看出,自积分型 Rogowski线圈截止频率比较大,频带比较窄,适合测量高频或

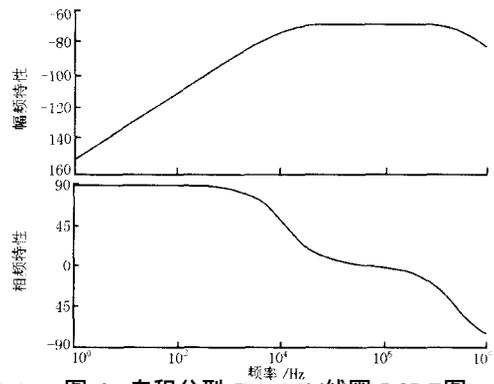


图 3 自积分型 Rogowski线圈 BODE图

Fig 3 BODE diagram of self-integration Rogowski coil

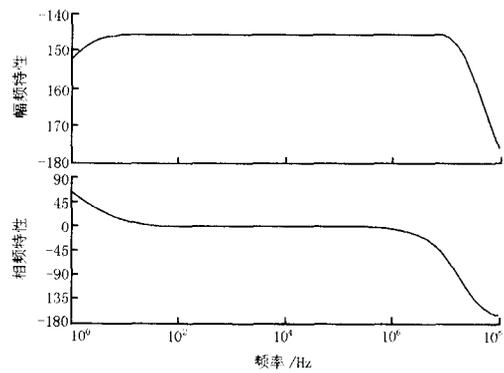


图 4 外积分型 Rogowski线圈 BODE图

Fig 4 BODE diagram of external integration Rogowski coil

脉冲陡电流。而采用外积分型则大大拓展了频带,适合测量变化比较慢,脉宽适中的电流。因此,采用外积分型 Rogowski线圈可以满足本文的测量要求。

2 基于 Rogowski线圈和数字信号处理的交流电流测量

电力系统中电流变化相对较慢,持续时间长,因此应使 Rogowski线圈工作在能获得较大时间常数的微分状态,选取取样电阻较大,使测量回路接近一纯阻性网络,适于采取外积分型 Rogowski线圈。实际应用中经常采用由运放构成的有源积分器,如图 5所示。

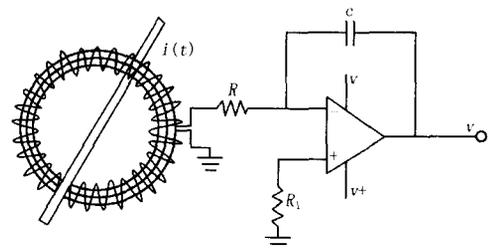


图 5 Rogowski线圈与电子计数器连接

Fig 5 Connection of Rogowski coil and electronic integrator

由于一次侧母线电流变化往往很大,如额定电流 400 A 的电网系统中,在发生短路故障时,电流会达到 10 倍以上的额定值,而空载电流会小到 10 A 以下。典型的 Rogowski 线圈灵敏度很小,测量输出的电压通常为 mV 级,甚至达到微伏级,故测量易受噪声电压影响。由上面的分析可知 Rogowski 线圈的灵敏度主要与 M 有关,提高 M 可以提高灵敏度。而 M 只与线圈结构有关,若要提高 M 则需要加大绕组密度,工艺复杂,降低测量的准确度。一种经常采用的方法是加入比例积分环节,可大幅度提高灵敏度。但是由于集成运放不是理想器件,其输入失调电压、失调电流、输入偏置电流及其温度漂移不为零,开环增益,输入电阻不为无穷大,及电容本身的泄漏电流,使得其输出信号与实际存在非线性误差。即使选用性能优良的精密运放、优质的电容,采用一些补偿办法在一定程度上起到了减小误差的作用,但运放的失调参数本身就存在温漂,这些方法在短时间内有效,长时间的积分误差仍然存在,再者,由于积分环节电容的存在,电容的非线性误差和泄漏电流都是不可避免的。因此,采用 Rogowski 线圈结合数字信号处理实现的数字积分器,对提高测量的准确度是十分有意义的。

实现消除零点漂移数字积分器的思路非常简单,只要以固定频率的信号对输入信号在 Rogowski 线圈的输出信号与地之间切换,再经过模拟信号调理电路处理。由于信号与地经过了同样的模拟通道,因此模拟器件对它们的影响是相同的,在经过模数转换后,通过 DSP 实现信号与地相减,消除了零点漂移及与地之间的共模噪声。

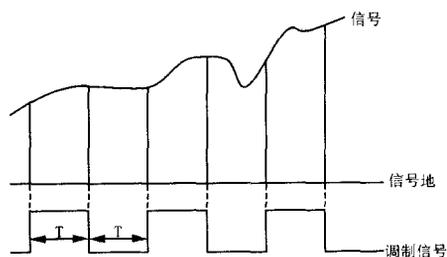


图 6 信号调制示意图

Fig 6 Sketch map of signal modulation

如图 5 由理想运放和理想电容器构成的积分器其函数表达式为 (设电容 C 初始电压为 0):

$$v_o = - \frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} v_i dt$$

式中: RC 为积分常数。

设 $v_i(t)$ 为输入信号, $v_i(t)$ 为输入失调的影

响, R_c 为非理想电容及开环增益引起的等效泄漏电阻,则实际积分函数为

$$v_o(t) = - \frac{1}{RC} \int_0^t [v_i(t) + v_i(t)] e^{-\frac{t-t'}{RC}} dt$$

根据上式及图 6 可得出调制方式下的展开式

$$v_o(t) = - \frac{1}{RC} \int_0^t [v_i(t) + v_i(t)] e^{-\frac{t-t'}{RC}} dt = - \frac{1}{RC} \left[\sum_{i=0}^{n-1} (-1)^i e^{-\frac{(i+1)T-t}{RC}} [v_i(t) + v_i(t)] e^{-\frac{t-t'}{RC}} dt + (-1)^n e^{-\frac{t-t'}{RC}} [v_i(t) + v_i(t)] e^{-\frac{t-t'}{RC}} dt \right]$$

式中: T 与调制频率的关系为 $f = \frac{1}{2T}$, n 为调制频率周期数的二倍。

由上式可以看出每次积分时间为 T , 为调制频率周期的 $1/2$, 输入信号经过每次积分后, 与后一次对地信号采样相减, 从而消除失调产生的积分漂移。失调部分经过一次模拟积分产生的漂移与后一次产生的漂移相减抵消, 故失调产生的积分漂移仅为漂移在 T 内的积分, 与积分时间长短无关。

当 T 很小时, 可以用采样值的累加和代替模拟积分, 得到数字积分形式如下:

$$v_o(t) = - \frac{T}{RC} \sum_{i=0}^{n-1} v_i(i)$$

由以上分析可以看出, 通过调制处理的数字积分器能够消除积分漂移和非线性误差。

采用 Rogowski 线圈结合基于数字信号处理的无零漂积分器交流电流测量部分系统设计框图如图 7 所示。

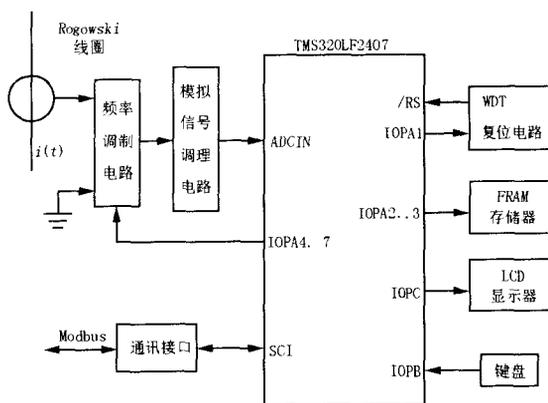


图 7 系统框图

Fig 7 System framework

该系统采用 TI 公司的 DSP 控制器 TMS320LF2407 作为核心处理器, 该处理器具有运算速度快, 工作范围宽, 可靠性高, 集成 A/D 转换

器,控制器局域网(CAN)2.0模块,串行通讯接口(SCI),看门狗定时器(WDT)于一体,内置32k字的FLASH程序存储器,1.5k字的数据RAM,544字双口RAM(DARAM),40个可单独编程或复用的I/O口等特点。频率调制电路是将DSP发出的调制信号作用于模拟开关,实现对输入信号的调制,频率调制电路由模拟开关CD4053构成,CD4053是一片三路单刀双掷模拟开关,这里使用其中的两路,一边与Rogowski线圈输出信号相连,另一边与地相连,由DSP控制的频率调制信号,用来控制开关的选通,在一定时序下输出信号为对输入信号和地的交替输出,模拟信号调理电路先用滤波电路滤除输入信号中的高频干扰信号,然后采用差分电路用于信号的放大及提高共模抑制比。

系统首先采用软件编程的办法进行去噪声处理,去漂移处理,完成积分累加,并求出数值送显示单元。具体做法为设置TMS320LF2407采样频率为40kHz,将此频率经过D触发器4分频,获得10kHz的调制频率。为保证信号的准确真实,选取稳定电平的相邻信号与地相减,消除漂移,运算结果作为一个采样点加以存储,准备以后处理。在积分处理中,根据选用合适的积分常数RC和采样信号周期T,用移位、累加和截取的办法实现积分运算,实现对信号的实时处理。

根据奈奎斯特采样定理,当采样频率大于或等于信号最高频率的两倍时,对信号采样可从样值信号中恢复出原始信号。因此采用上面的方法可以完整的无失真的恢复出原始信号。如果希望提高信号的频率响应特性,可选用更高的采样速率。

3 实验数据

实际应用中,运用Rogowski线圈结合数字积分器的方法可以实现在很大的范围内对电流高精度测量。在实验室中对本系统进行了实验,实验结果如表1所示。我们经过仿真分析和实验选择积分常数 $RC = 1.0$,实验所采用的Rogowski线圈参数为: $M = 2.7 \times 10^{-6}$ H, $L_0 = 32.4 \times 10^{-3}$ H, $C_0 = 100$ pF, $R_0 = 62.63$ Ω , $R_s = 285$ Ω 。

从实验结果中可以看出本系统在很大的电流范围内,都具有较高的精度,达到了预先设计要求。由于采用了以上描述的数字积分器基本消除了零点漂移,并把由于模拟通道器件非线性造成的误差减小到比较低的水平。

表1 实验数据及相对误差分析

实验电流 /A	系统测量值 /A	相对误差 / (%)
6	5.35	1.8
11	10.07	0.68
22	21.94	0.23
57	56.88	0.20
83	82.90	0.12
103	102.85	0.15
179	178.35	0.36
257	256.51	0.19
313	312.25	0.24
371	371.45	0.12
403	404.25	0.31
464	462.70	0.28
497	496.20	0.16

4 结论

本文提出了基于Rogowski线圈为传感器,结合数字信号处理的无零漂积分器的交流电流测量方法。Rogowski线圈不饱和特性使之能够测量大范围的电流,数字信号处理的无零漂积分器消除了模拟信号调理电路的零点漂移,并把其非线性因素影响降低到比较低的水平,它测量大电流具有较高的准确度,实现简单,是一种测量宽范围变化的交流电流的较为理想的选择。

参考文献:

- [1] Tumer G R, Hofsjajer IW. Rogowski Coils for Short Duration (<10 μ s) Pulsed Current (>10kA) Measurements [A]. Proceedings of the 5th IEEE AFRICON Conference 'Electrotechnical Services for Africa'. 1995.
- [2] 李英英,陈翔,葛荣尚. 基于Rogowski线圈和压频变换的电流测量方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(3): 28-35.
LI Fu-ying, CHEN Xiang, GE Rong-shang Accurate Current Measurement Method for Large Currents [J]. Journal of Tsinghua University, Sci & Tech, 2000, 40(3): 28-35.
- [3] 胡娟,吴桂清,周有庆. 不同电压等级下的Rogowski线圈电子式电流互感器的研究[J]. 变压器, 2002, 29(10): 11-13.
HU Juan, WU Gui-qing, ZHOU You-qing Research on Rogowski Coil Electronic Current Transformer at Different Voltage Level [J]. Transformer, 2002, 29(10): 11-13.
- [4] 戴建华,李开成. 基于Rogowski线圈的大电流测量[J]. 高电压技术, 2002, 28(1): 6-10.
DAI Jian-hua, LI Kai-cheng Heavy Current Measurement Based on Rogowski Coil [J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(1): 6-10.

(下转第35页 continued on page 35)

lutionary Algorithm for a Class of Combinatorial Optimization[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6 (6): 580-593.

[9] 李映,焦李成. 一种有效的基于并行量子进化算法的图像边缘检测方法 [J]. 信号处理, 2003, 19 (1): 69-73.

LI Ying, JIAO Li-cheng An Effective Method of Image Edge Detection Based on Parallel Quantum Evolutionary Algorithm[J]. Signal Processing, 2003, 19 (1): 69-73.

[10] 侯云鹤,鲁立娟,熊信银,等. 量子进化算法在输电网扩展规划中的应用 [J]. 电网技术, 2004, 28 (17): 19-23.

HOU Yun-he, LU Li-juan, X DNG Xin-yin, et al Application of Quantum-inspired Evolutionary Algorithm in Transmission Network Expansion Planning [J]. Power

System Technology, 2004, 28 (17): 19-23.

[11] Lee K Y, Park Y M, Ortiz J L. A United Approach to Optimal Real and Reactive Power Dispatch[J]. IEEE Trans on PAS, 1985, 104 (5): 1147-1153.

收稿日期: 2005-02-22; 修回日期: 2005-04-05

作者简介:

娄素华 (1974 -),女,博士研究生,讲师,研究方向为电力系统运行分析与规划,电力系统可靠性; E-mail: yusaier02@163.com

吴耀武 (1963 -),男,副教授,从事电力系统及其自动化方向科研和教学工作,研究方向为电力系统运行分析与规划。

Application of quantum-inspired evolutionary algorithm in reactive power optimization

LOU Su-hua, WU Yao-wu, PENG Lei, X DNG Xin-yin

(College of Electrical and Electronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Quantum-inspired evolutionary algorithm (QEA) is a kind of evolutionary strategy algorithms inspired by quantum computing. It uses quantum bit as the smallest unit of information-chromosome and quantum-gate as a primary variation operator to drive the individuals toward the better. QEA makes full use of superposition of states and whole interference to avoid premature, so it has rapid convergence and global search capacity. This paper presents a model of reactive power optimization based on QEA and studies its parameters. To demonstrate its effectiveness and applicability, the simulations are carried out on IEEE6 and IEEE30 bus system. The results show the validity of the proposed model and algorithm.

Key words: reactive power optimization; quantum-inspired evolutionary algorithm; unitary transformation; whole interference crossover; quantum measurement sink

(上接第 26 页 continued from page 26)

收稿日期: 2004-12-23; 修回日期: 2005-02-03

作者简介:

陈鹏 (1975 -),男,博士研究生,主要从事智能电器

与机电一体化研究; E-mail: chen peng@126.com

陆俭国 (1936 -),男,博士生导师,教授,长期从事电器可靠性检测及智能电器与机电一体化研究。

AC current measurement based on Rogowski coil and digital signal processing

CHEN Peng, LU Jian-guo, YANG Yan-jie, LIX in

(Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Usually, in relay protection system, measurement of large range AC current is inevitable. This paper analyzes the measuring principle of AC current based on Rogowski coil and digital signal processing. Rogowski coil is suitable for measuring large range AC current. With digital signal processing technology, this measurement principle can eliminate zero drift, nonlinear error and capacity leakage. This principle can measure large range AC current precisely.

Key words: relay protection; Rogowski coil; zero drift; digital integrator