

Rogowski 线圈测量误差分析及改进措施

周文中, 赵国生, 李海洋

(郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: Rogowski 线圈是电子式电流互感器重要组成部分, 它的设计是互感器精确测量的基础。从数学角度对矩形截面骨架的 Rogowski 线圈在各种情况下产生的误差进行了分析, 提出了一些减小误差的措施。根据改进的措施绕制了新的线圈并对之进行了相关的实验, 其设计精度基本达到了 0.2 级标准, 因此对设计精密 Rogowski 线圈有一定的参考价值。

关键词: 电流互感器; Rogowski 线圈; 热膨胀; 误差系数

Error analysis and improved method of Rogowski coil

ZHOU Wen-zhong, ZHAO Guo-sheng, LI Hai-yang

(College of Electric Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: As a part of ECT, Rogowski coil is the base of precise measurement. This paper analyzes the mathematic model of the errors in many cases and brings forward some improved measures. A new coil is manufactured based on those measures and many experiments are made. The results are according to the standard of band 0.2. So, the improved measures have some value to design the precise Rogowski coil.

Key words: current transformer; Rogowski coil; heating bulge; error coefficient

中图分类号: TM45 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)20-0099-05

0 引言

随着电力系统的快速发展, 电子式电流互感器逐渐展现出了传统电磁式电流互感器无法比拟的优势: 输出功率低、结构简单、线性度好, 具有广阔的发展空间^[1,2]。其关键技术就是 Rogowski 线圈的设计。但由于杂散电磁干扰和环境温度等各种因素的影响, Rogowski 线圈的实际输出值与理论值通常不一致, 造成其测量误差。下文对矩形截面的 Rogowski 线圈产生误差的各种原因进行了数学分析并提出了一些减少其误差的方法, 对设计 Rogowski 线圈有一定的参考价值。

1 热膨胀效应对 Rogowski 线圈测量产生的误差分析

热膨胀效应使 Rogowski 线圈尺寸发生变化, 进而改变线圈互感大小, 是电子式电流互感器出现测量误差的原因之一。本文采取理论分析与推导方

法得出常见矩形截面 Rogowski 线圈的热误差系数的计算公式。

Rogowski 线圈的骨架与绕组的尺寸在温度变化时都会发生相应的改变, 从而影响线圈的互感 M , 使 Rogowski 线圈上感应输出的电压发生改变。本文分别用 ξ 、 ξ_F 、 ξ_w ^[3] 来表示温度变化 1℃ 时互感的热误差系数、骨架误差系数、绕组误差系数。

1.1 骨架误差系数 ξ_F

$$\xi_F = \frac{\Delta M}{M} \Big|_{\Delta t=1^\circ\text{C}} = \frac{\Delta U(t)}{U(t)} \Big|_{\Delta t=1^\circ\text{C}}$$

这里 ΔM 、 Δt 分别为互感、温度的变化量。矩形截面线圈的互感是:

$$M = \frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln \frac{b}{a}$$

式中: N 为线圈匝数; μ_0 为真空磁导率; h 为骨架的截面高度; b 为骨架的外半径; a 为骨架的内半径。如下图 1 示。

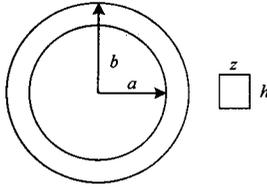


图1 Rogowski 线圈骨架剖面图

Fig.1 Skeleton section of Rogowski coil

c 为内圆周长, 则 $b = c/2\pi + z$ (z 为骨架厚度), $a = c/2\pi$, 则设骨架材料的热膨胀系数是 ε_1 , 则 $\Delta a = \varepsilon_1 a$, $\Delta b = \varepsilon_1 b$, $\Delta c = \varepsilon_1 c$, $\Delta h = \varepsilon_1 h$.

$$\xi_F = \frac{\frac{\mu_0 N(h + \Delta h)}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2\pi(z + \Delta z)}{c + \Delta c}\right) - \frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2\pi z}{c}\right)}{\frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2\pi z}{c}\right)}$$

$$\xi_F = \frac{\ln\left(1 + \frac{2\pi z(1 + \varepsilon_1)}{c(1 + \varepsilon_1)}\right) \Delta h \ln\left(1 + \frac{2\pi z(1 + \varepsilon_1)}{c(1 + \varepsilon_1)}\right)}{\ln\left(1 + \frac{2\pi z}{c}\right) + h \ln\left(1 + \frac{2\pi z}{c}\right)} - 1 =$$

$$1 + \frac{\Delta h}{h} - 1 = \frac{\Delta h}{h} = \varepsilon_1$$

由于在实际生产中, 骨架的材料直接影响到线圈的测量精确度, 因此本文列出了不同材料的热膨胀系数供设计时选择。如表 1。

表 1 部分骨架材料的热膨胀误差系数^[4]。

Tab.1 Heating bulge coefficient of material

$t/^\circ\text{C}$	$\Delta 1/(%)$	$\Delta 2/(%)$	$\Delta 3/(%)$	$\Delta 4/(%)$
-20	0.265 3	0.010 0	-0.379 1	-0.015 5
-10	0.184 9	0.057 3	-0.316 7	-0.018 0
0	0.104 7	0.135 6	-0.258 0	-0.036 1
10	0.085 0	0.127 4	-0.154 5	-0.043 9
20	0	0	0	0
30	-0.055 0	-0.081 5	-0.127 7	0.018 6
40	-0.164 0	-0.012 0	0.350 0	0.023 3
50	-0.450 0	-0.049 8	0.349 1	0.023 1
60	-0.718 0	-0.037 2	0.594 4	0.027 8
70	-1.044 0	-0.133 1	0.721 5	0.045 5

$\Delta 1 \sim \Delta 4$ 依次为胶林、塑料、尼龙、纤维材料骨架线圈温度系数

经过以上计算可以看出骨架误差系数等于骨架材料的热膨胀系数。在实际的设计和和生产中因陶瓷材料脆性大、易碎裂, 未予采用, 而纤维材料制作的骨架, 误差小于 0.5%, 能满足一般的设计要求。

1.2 线圈绕组误差系数 ξ_w

在温度变化时不但骨架会影响测量精度, 而且

线圈绕组也会影响测量精度。绕组一般采用漆包铜线进行缠绕, 铜的热膨胀系数是 $1.77 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。而漆包线自身就有弹性, 它可在一定范围内自动调节其绕组误差, 在设计时已将其考虑在内。因此绕组的误差系数影响有限^[3], 可以不考虑它的误差。由此可得:

$$\xi = \xi_F + \xi_W \approx \xi_F$$

2 外界磁场对 Rogowski 线圈造成的误差

当外界干扰磁场或相间干扰磁场通过线圈时, 也会对线圈测量产生影响。可将这种磁场分解为两个分量进行分析: 与骨架垂直的分量和与骨架平行的分量^[5]。

2.1 平行于骨架的磁场分量的影响

当骨架截面和线圈缠绕均匀时, 平行于骨架的磁场分量不会引起测量误差, 但当它们不均匀时就会产生误差。如下图 2。

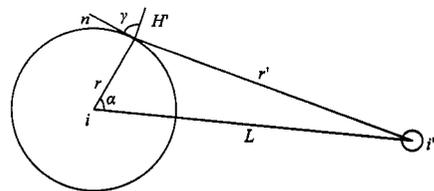


图 2 平行于骨架的磁场分布

Fig.2 Magnetic field distribution of parallel skeleton

当骨架截面和线圈缠绕均匀时, i 引起的线圈感应电势为

$$e = -\frac{d\phi'}{dt} = -\frac{d}{dt} \oint \mu_0 snH' dl = -\frac{d}{dt} \mu_0 sn \oint H' dl = 0$$

当骨架截面和线圈缠绕不均匀时, i 引起的线圈感应电势为:

$$e = -\frac{d\phi'}{dt} = -\frac{d}{dt} \oint \mu_0 snH' \cos \gamma dl = -\frac{\mu_0 snr}{2\pi} \frac{di}{dt} \int_0^{\alpha'} (L^2 + r^2 - 2Lr \cos \alpha)^{-1/2} \cos(\alpha + \arctan \frac{r \sin \alpha}{L - r \cos \alpha}) d\alpha$$

$$n = \begin{cases} n & 0 < \alpha < \alpha' & (0 < \alpha' \leq 2\pi) \\ 0 & \alpha' < \alpha \leq 2\pi \end{cases}$$

n 为匝数密度。

2.2 与骨架垂直的磁场分量的影响

干扰磁场的垂直分量与线圈骨架垂直, 它与每匝线圈平行, 穿过每匝线圈的磁通为零, 不会产生感应电势。但其穿过空心线圈围成的闭合回路时, 会在线圈上产生感应电动势, 从而影响线圈输出电

压。这个闭合回路相当于一个半径为 r 的线圈, 其产生的电压为:

$$e' = -\frac{d\phi'}{dt} = -\frac{d}{dt} \iint \mu_0 H' dA = -\frac{\mu_0}{\pi} \frac{di}{dt} \int_{-r}^r \frac{1}{L-x} \sqrt{r^2-x^2} dx$$

在这种情况下线圈对垂直于骨架方向的磁场较灵敏。为了消除这部分磁场分量的影响可以在骨架内侧排一圈与线圈循行方向相反的线圈, 这样相当于两个方向相反线圈串联起来从而当有磁通通过时会产生两个方向相反的电压, 使之相互抵消。在实际制作时要严格保证回线半径是 $r' = \sqrt{(a^2+b^2)/2}$ [6], 才能最大地减小干扰。如下图 3。

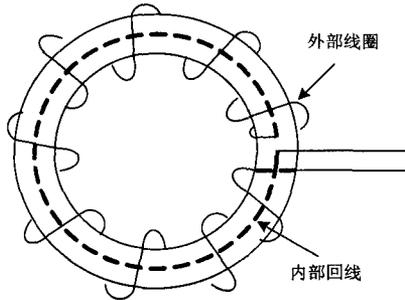


图 3 Rogowski 线圈模型

Fig.3 Rogowski coil model

也可以制作成双层线圈来消除外界磁场的干扰, 其两层线圈循行方向相反。但这样做无疑会增加线圈缠绕工艺的难度, 不利于测量精度的提高。

3 绕线倾角引起的误差分析

在公式 $\xi_F = \frac{\Delta M}{M} \Big|_{\Delta t=1^\circ c} = \frac{\Delta U(t)}{U(t)} \Big|_{\Delta t=1^\circ c}$ 中,

计算互感 M 时其绕线与骨架成 90° 关系, 即每匝线圈的导线延长线会与圆心相交。而实际制作线圈时绕线往往与骨架有一定的角度误差, 当匝数较多时这个误差会被放大, 从而引起较大的误差。当绕线有一定倾斜角时, 其绕线不会改变 Rogowski 线圈的高, 只会改变绕线的长度, 计算其误差时只需考虑单匝线圈的长即可。如下图 4 所示。

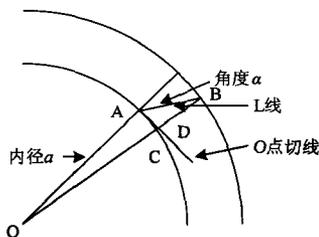


图 4 绕线倾角示意图

Fig.4 Coiling wire obliquity model

L 线是实际的绕线, 它与理想状态的绕线相差 α 度, 当 α 较小时可以认为磁通的方向不变, 因此只需考虑绕线有 α 度倾角时的误差。如图所示, AD 为 A 的切线, 与 CB 相交于 D 点, 则 BD 为实际绕线 AB 与磁通垂直的分量, 由余弦定理可知:

$$b^2 = L^2 + a^2 - 2La \cos(\pi - \alpha) \Rightarrow L^2 - 2La \cos(\pi - \alpha) - (b^2 - a^2) = 0$$

可得出

$$L = 2a \cos(\pi - \alpha) + \sqrt{4a^2 \cos^2(\pi - \alpha) + 4(b^2 - a^2)}$$

可以看出当 $\alpha=0$ 时, $L=b-a$ 。

$$BD = \cos \alpha L = 2a \cos \alpha \cos(\pi - \alpha) + \cos \alpha \sqrt{4a^2 \cos^2(\pi - \alpha) + 4(b^2 - a^2)}$$

则引起的误差为

$$CD = b - a - 2a \cos \alpha \cos(\pi - \alpha) + \cos \alpha \sqrt{4a^2 \cos^2(\pi - \alpha) + 4(b^2 - a^2)}$$

则单匝线圈所产生 M 的误差系数为:

$$\xi = \ln \frac{b}{b - a - 2a \cos \alpha \cos(\pi - \alpha) + \cos \alpha \sqrt{4a^2 \cos^2(\pi - \alpha) + 4(b^2 - a^2)}} / \ln \frac{b}{a} - 1$$

当线圈为 N 匝时, M 的误差系数为:

$$\xi_n = N \ln \frac{b}{b - a - 2a \cos \alpha \cos(\pi - \alpha) + \cos \alpha \sqrt{4a^2 \cos^2(\pi - \alpha) + 4(b^2 - a^2)}} / \ln \frac{b}{a} - N =$$

$$N \ln \frac{1}{q - 1 - 2 \cos \alpha \cos(\pi - \alpha) + \cos \alpha \sqrt{4 \cos^2(\pi - \alpha) + 4(q^2 - 1^2)}} / \ln \frac{b}{a} - N$$

$$q = \frac{b}{a}$$

从这里可以看出, 线圈的误差既和结构因子 q 有关, 还与绕线的倾角 α 有关。

4 母线偏心放置时引起的误差

在理论上, Rogowski 线圈感应出的电动势与穿过线圈的电流位置没有任何关系, 但它的前提条件是线圈的截面积处处相等且线圈匝数均匀。当这些条件在实际中不能完全满足时, 母线位置的变化就会对测量结果产生影响。

若线圈的几何参数均匀, 即使母线不在线圈中心, 线圈输出电压也不会发生变化。但当几何参数不均匀时则输出电压就会发生变化 [7]。如下图 5 所

示。

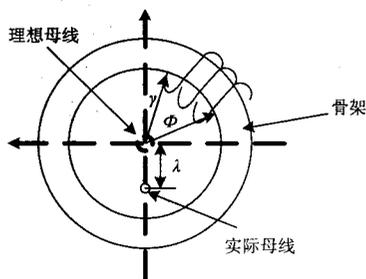


图 5 母线偏心示意图

Fig.5 Conductor off-centre model

被测导线未通过 Rogowski 线圈圆心时,其线圈产生的电压为

$$u(t) = \frac{d\psi}{dt} = -\left(\frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln \frac{b}{a}\right) \frac{di}{dt} - \frac{\mu_0 N h}{2\pi \theta} \frac{di}{dt} \int \frac{1}{R} \arctan\left(\frac{R-\lambda}{R+\lambda} \tan \frac{\theta+\gamma}{2}\right) dR + \frac{\mu_0 N h}{2\pi} \frac{di}{dt} \int \frac{1}{R} \arctan\left(\frac{R-\lambda}{R+\lambda} \tan \frac{\lambda}{2}\right) dR$$

式中: λ 为偏心度(导线距圆心的距离); γ 为非均匀绕线的初始角度; θ 为非均匀绕线所对应的圆心角。

若 $\theta=0, \gamma=0$, 即线圈绕线均匀分布, 则满足

$$M = \frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln \frac{b}{a}$$

可以看出, 当线圈缠绕均匀时, 输出电压与偏心度 λ 无关, 从而得出线圈绕线均匀可以降低对待测导线的同轴度的要求^[8]。

5 绕线重叠造成的误差

缠绕线圈时, 无论是用机器还是人工, 都有可能造成绕线的重叠。当发生这种情况时, 线圈相当于多绕了一圈, 这样不仅造成了实际输出电压比理论值偏大; 而且重叠后造成绕线截面高低不平, 使得外部干扰增大。

多绕一匝线圈产生的电压误差与导线的直径有直接关系。由公式 $e = \frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \frac{dI}{dt}$, 可以推导出, 单匝线圈产生的电压为 $e_1 = \frac{\mu_0 h}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \frac{dI}{dt}$, 则单匝重叠线圈产生的电压是

$$e' = \frac{\mu_0 (h+2d)}{2\pi} \ln \frac{b+d}{a-d} \frac{dI}{dt}$$

式中: d 为导线的直径。

当线圈有 N' 匝重叠时, 则电压误差为

$$\xi = N' \frac{\frac{\mu_0 (h+2d)}{2\pi} \ln \frac{b+d}{a-d} \frac{dI}{dt}}{\frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \frac{dI}{dt}} = N' \frac{(h+2d) \ln \frac{b+d}{a-d}}{N h \ln \frac{b}{a}} = \frac{N'}{N} \left(1 + 2 \frac{d}{h}\right) \log_e \frac{q + \frac{2\pi}{N}}{1 + \frac{2\pi}{N}}$$

$$\xi = \frac{b}{a}, \text{ 由 } N = 2\pi a/d \Rightarrow \frac{2\pi}{N} = \frac{d}{a}.$$

可见, 在线径一定的情况下, 这种误差与骨架的结构参数 q, h 及重叠匝数 N' 有关。对于这样造成的误差: 一方面要提高缠绕技术努力避免绕线重叠的情况发生; 另一方面在缠绕技术一定的水平下, 要合理设计好线圈的各种参数, 也可通过在线圈绕成后再调节匝数的办法来进行调整, 使误差限制在可接受的范围之内。

6 改进措施

经过以上分析, 可以得知不同干扰源对 Rogowski 线圈有不同的影响, 因此要有不同的措施来减小误差。

(a) 在设计线圈时, 选择热膨胀系数比较小、不易变形的材料。根据表 1 可以看出用纤维材料制作的骨架, 误差小于 0.5%, 能够满足设计的要求。

(b) 在线圈制作上, 要尽量做到骨架截面均匀、绕线均匀。

(c) 为防止外界磁场干扰和母线倾斜引起的误差, 绕制线圈时要在骨架内绕一圈与线圈循环方向相反的导线, 如图 3。

(d) 在安装时, 要做到将母线位于线圈圆心处且与骨架保持垂直。

(e) 对于由倾角引起的误差, 可以通过以下两种方法来弥补: (1) 提高缠绕线圈的工艺, 尽量采用线径较细的导线缠绕, 比如采用线径为 0.2 mm 的漆包线缠绕。(2) 通过缠绕两层倾角方向相反的线圈来消除其带来的误差。

由于外界干扰磁场方向、强度都是不确定的, 所以除了对线圈进行优化设计外, 还应提高其电磁屏蔽能力, 做好电磁兼容等工作。因此线圈的屏蔽层要进行设计, 将干扰误差降到最小。

7 实验验证

测试结果:

(a) 外界(相间)磁场干扰实验结果

将 Rogowski 线圈放置在电流为 400 A 的导线附近, 移动线圈, 观察其输出电压, 可以计算出线圈

受相间干扰时的误差大小。

表 2 本文设计的 Rogowski 线圈的参数

Tab.2 Parameter of the designed Rogowski coil

骨架材料	纤维
骨架内半径/cm	4
骨架外半径/cm	5.5
骨架厚度/cm	2
绕线直径/mm	0.2
绕线匝数/匝	1 256
额定一次电流/A	400
额定一次电流频率/Hz	50
额定二次输出电压/mV	200
回线半径/cm	4.8

表 3 外界(相间)磁场干扰实验结果

Tab.3 The test result of magnetic field interference

A	30	40	50	60	70	80	90	100
B	2.13	2.04	1.83	1.56	1.44	1.20	1.02	0.6
C	89.89	89.87	89.86	89.85	89.82	89.82	89.79	89.78
D	0.40	0.37	0.32	0.28	0.27	0.24	0.22	0.20
E	89.89	89.87	89.87	89.85	89.84	89.83	89.80	89.79

A-线圈导线距离(cm)、B-无回线圈输出电压(mV)、C-无回线圈输出移相角($^{\circ}$)、D-有回线圈输出电压(mV)、E-有回线圈移相角度($^{\circ}$)

(b) 导线偏心实验结果

将母线穿过线圈, 移动线圈位置时, 线圈的输出电压如表 4。

表 4 导线偏心放置实验结果

Tab.4 The test result of off-centre

A	1.5	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	0
D	198.76	198.91	199.05	199.24	199.44	200.53	200.37	200.21
E	89.85	89.86	89.86	89.87	89.88	89.88	89.89	89.90

A-线圈导线距离(cm)、D-有回线圈输出电压、E-有回线圈移相角度($^{\circ}$)

(c) 温度特性测试结果

将有回线圈等实验设备放入温度箱内, 用温度箱来模拟实际环境温度的变化。

表 5 温度特性测试结果

Tab.5 The test result of temperature features

温度	-10	-5	10	20	30	40	50	60
电压	197.87	198.66	199.54	200.02	200.83	201.25	202.36	203.60

由以上结果可以看出, 有回线的线圈抗干扰能力远远要比无回线圈的能力强; 当线圈偏心时, 偏心越大, 输出电压偏差就越大; 在温度变化时,

其输出电压在一定的范围内浮动。

其某些测量数据距 0.2 级标准还有一定的差距, 特别是温度测试结果偏差较大, 其原因是多方面的: ①由于工艺水平的限制, 线圈绕制时尺寸上会存在一定的偏差(如线圈缠绕的松紧度不一致极易造成温度变化时误差较大); ②试验仪器的精确度不够(如温度箱的精度较小)和测量时读数的误差; ③试验仪器产生的电磁干扰; ④外界因素的影响。

若采用高精度的设备(如在实际生产中完全可以将导线偏心距离控制在 0.4cm 之内)、线径标准的导线绕制线圈和标准测量仪器完全可以达到 0.2 级标准。

8 结论

电子式电流互感器的设计关键是处理好各个环节的误差和干扰, 而 Rogowski 线圈的设计是其精确测量的关键。在 Rogowski 线圈的实际生产和多位学者研究的基础之上, 本文进一步对 Rogowski 线圈的各种误差原因进行了分析, 提出了一些改进措施, 并通过实验进行了理论验证。

从实验的结果上看, 这种线圈能够对母线电流进行实时测量, 其测量精度和性能稳定性都优于传统的电流互感器, 能够满足计量和保护的要求。因此对 Rogowski 线圈在设计 and 生产上都有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 周有庆, 刘琨, 吴桂清, 等. 基于 Rogowski 线圈电子式电流互感器的研究[J]. 电气应用, 2006, 25 (6): 106-110.
ZHOU You-qing, LIU Kun, WU Gui-qing, et al. Research of Electronic Current Transducer Based on Rogowski Coils[J]. Electro Technical Application, 2006, 25 (6): 106-110.
- [2] 孟凡勇, 李志刚, 赵鹏, 等. 基于 Rogowski 和光电通信技术的新型电流互感器[J]. 电气应用, 2006, 25 (8): 18-20.
MENG Fan-yong, LI Zhi-gang, ZHAO Peng, et al. Novel Current Transformer Based on Rogowski and Electric optical Communication Technique[J]. Electro Technical Application, 2006, 25 (8): 18-20.
- [3] 王海明, 张红岭, 刘丰. Rogowski 线圈热膨胀效应产生测量误差的计算[J]. 高压电技术, 2006, 11: 15-17.
WANG Hai-ming, ZHANG Hong-ling, LIU Feng. Calculation of Measurement Error Caused by Thermal Expansion Effect on Rogowski Coil[J]. High Voltage Engineering, 2006, 11: 15-17.

(下转第 112 页 continued on page 112)

e) 数据单元标识和数据单元

确认/否认命令的有三种: b1全部确认; b2全部否认; b3按数据单元标识确认和否认。

对于复位命令的测试用例, 返回的确认/否认帧只可能是b1或者b2。并且无数据体。

全部确认: DA1=0; DA2=0。DT1=0x01; DT2=0。

全部否认: DA1=0; DA2=0。DT1=0x02; DT2=0。

a1、a2复位命令返回的确认/否认帧的DA、DT在以上两种情况下为正确; a3复位命令返回否认帧。

f) 附加信息域

若ACD=0, a1复位命令返回的确认/否认帧无此域; a2、a3情况下应测试收到TP与发送的TP, 若相同为正确。若ACD=1, a1复位命令返回的确认/否认帧中测试EC; a2、a3应测试收到TP与发送的TP, 若相同为正确, 还有测试是否有EC^[4]。

5 结论

本文主要论述了负控通信规约测试系统的设计, 包括测试方法、测试硬件电路和软件设计。设计的目的是测试负控终端的通信是否严格按照国家电网公司制订的负控终端通信规约的标准去运行。通过 13 种功能帧的测试, 较好地实现了对负控终端

对负控规约运行的测试, 此测试装置可作为测试系统计算机软件的通用架构, 具有一定的工程实用价值。

参考文献

[1] 国家电网公司生产运营部. 电力负荷管理系统数据传输规约-2004[M].2004.

[2] Lai R A. Survey of Communication Protocol Testing[J]. The Journal of Systems and Software, 2002, 62: 21-46.

[3] Uyar M U, Fecko M A. Experience in Developing and Testing Network Protocol Software Using FDTs [J]. Information and Software Technology, 2003, 45: 815-835.

[4] 谭刚. 电力负荷管理系统的设计, 分析与研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.

收稿日期: 2008-10-20; 修回日期: 2009-11-24

作者简介:

王丽丽 (1984-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统通信研究; E-mail:w_l_lking@163.com

郭传铁 (1969-), 男, 工程师, 主要从事电力系统通信管理工作;

祁兵 (1965-), 男, 副教授, 主要从事电力系统通信、无线通信、通信网络管理等方面的研究。

(上接第 103 页 continued from page 103)

[4] 郭晓华, 朱明钧. Rogowski 线圈工业化应用中若干问题的探讨[J]. 高电压技术, 2003, 29 (3) :16-17.
GUO Xiao-hua, ZHU Ming-jun. Discussion on Industrial Production of Rogowski Coil[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(3):16-17.

[5] 罗苏南, 田朝勃. 空心线圈电流互感器性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, (3) :108-113.
LUO Su-nan ,TIAN Zhao-bo. Performance Analysis of Air-core Current Transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004,(3):103-113.

[6] 程汉湘, 骆国铭. Rogowski 线圈电流传感器分析[J]. 科技交流, 2006, (6) :65-66.
CHEN Han-xiang, LUO Guo-ming. Analysis of Current transducer Based on Rogowski Coil[J]. Science and Technology Communication, 2006, (6): 65-66.

[7] 田朝勃, 索南加乐, 罗苏南, 等. 应用于 GIS 保护及监测的罗氏线圈电子式电流互感器[J]. 中国电力, 2003,

36(10): 53-56

TIAN Zhao-bo, SUONAN Jia-le, LUO Su-nan, et al. Rogowski Coil Electronic Current Transducer Applied to Protection and Monitoring of GIS[J]. Electric Power, 2005, 36(10): 53-56.

[8] 龙祖利. 小型大电流 Rogowski 线圈设计及性能[J]. 高电压技术, 2007, 33(7) :79-83.
LONG Zu-li. Design and Performance of Miniature Rogowski Coil for Heavy Current Measurement[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7):79-83.

收稿日期: 2008-10-30; 修回日期: 2009-03-06

作者简介:

周文中 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电子式电流互感器; E-mail:huaiyangzhou@126.com

赵国生 (1965-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力电子方面的教学和研究。