

# 采用 PCB 平面型空心线圈的 电子式电流互感器性能分析

吴涛<sup>1</sup>, 周有庆<sup>2</sup>, 龚伟<sup>3</sup>

- (1. 中国水电顾问集团 中南勘测设计研究院, 湖南省 长沙市 410014;
2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082;
3. 武汉供电公司 变电检修公司, 湖北省 武汉市 430050)

## Performance Analysis on Electronic Current Transformer Based on PCB Planar-Type of Air Core Coil

WU Tao<sup>1</sup>, ZHOU You-qing<sup>2</sup>, GONG Wei<sup>3</sup>

- (1. HydroChina Zhongnan Engineering Corporation, Changsha 410014, Hunan Province, China;
2. College of Electricity and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China;
3. Substation Maintenance Branch of Wuhan Power Supply Company, Wuhan 430050, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** The structure and principle of printed circuit board (PCB) planar-type of air core coil are analyzed; simulation analysis and experimental investigation of frequency characteristic, steady-state characteristic and transient characteristic of PCB electronic current transformer are carried out; then the structure of digital current transformer is given. Simulation and experimental results show that PCB electronic current transformer possesses such features as wide measuring range, wide working frequency band, fast transient response, good steady-state performance and good linearity, so it is suitable for the measurement of small current lower than 100 A.

**KEY WORDS:** Rogowski coil; printed circuit board (PCB); planar-type of air core coil; electronic current transformer

**摘要:** 分析了印制电路板(printed circuit board, PCB)平面型空心线圈的结构与原理, 对 PCB 电子式电流互感器的频率特性、稳态特性及暂态特性进行了仿真分析与试验研究, 提出了数字式电流互感器的结构。结果表明: PCB 电子式电流互感器测量范围大、工作频带宽、暂态响应快、稳态性能好且具有良好的线性度, 适合小电流(100 A 以下)测量。

**关键词:** Rogowski 线圈; 印制电路板; 平面型空心线圈; 电子式电流互感器

## 0 引言

基于空心线圈的电子式电流互感器, 具有体积小、重量轻、造价低; 无铁芯、不存在磁饱和与铁磁振荡等问题; 动态响应范围大, 频率响应宽; 抗电磁干扰性能强等优点, 成为未来电流互感器发展

的方向<sup>[1-6]</sup>。传统的 Rogowski 线圈将二次导线密绕在环形非导磁材料骨架上, 形成空心螺线管, 主要适于大电流或脉冲电流的测量, 测量小电流(100 A 以下)时难度较大, 其原因在于: 线圈的互感系数难以提高, 感应的二次信号较弱, 容易受到干扰; 工业大批量生产时, 线圈分布参数的一致性难以得到保证, 从而影响到电流测量的性能<sup>[7]</sup>。

国内外的研究人员从空心线圈的设计方法和制造工艺等方面进行了深入的研究, 提出了多种结构的空心线圈, 其中, 采用印制电路板(printed circuit board, PCB)制作的空心线圈具有测量准确度高、稳定性和参数一致性好等优点, 适合于工业化生产与应用, 成为了当前电流互感器领域的研究热点<sup>[8-11]</sup>。本文对 PCB 电子式电流互感器的特性进行了仿真分析与试验研究, 得出 PCB 电子式电流互感器可用于小电流测量。

## 1 PCB 平面型空心线圈的结构原理

PCB 平面型空心线圈, 其载流导体与二次线圈基本处于同一平面, 电磁耦合较强烈。图 1 为 2 层板的空心线圈结构示意图(均为顶层视角图), 图中标号 1~4 为螺旋线圈, 标号 5~8 为 PCB 的过孔。

二次线圈由 4 个尺寸相同、均匀分布的螺旋线圈顺次串接而成。螺旋线圈是在 PCB 上用导体布线而成, 每个螺旋线圈的顶层线匝与底层线匝通过过

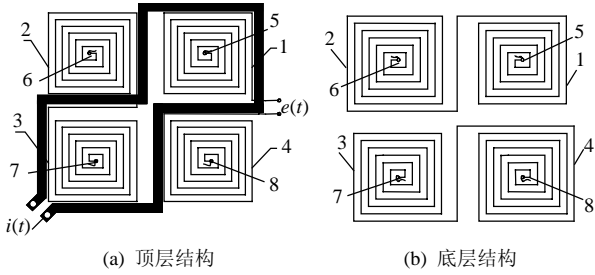


图1 PCB平面型空心线圈结构

Fig. 1 The structure sketch of the PCB air core coil

孔连接，因而螺旋线圈可以看成是平面的。载流导体紧贴在PCB顶层上方，围绕不相邻的螺旋线圈构一匝回路，并与PCB电气绝缘。此外，为了提高线圈的抗电磁干扰性能，可以在PCB上加铺铜层，起到滤除高频干扰的作用。

当载流导体通过图1所示交流电流*i(t)*时，由于空心线圈具有对称性，在螺旋线圈1、3上产生的磁链相同且方向垂直于PCB向外，在螺旋线圈2、4上产生的磁链相同且方向垂直于PCB向里。因此，在线圈1、3上感应的电动势方向为逆时针(顶层视角，后同)，在线圈2、4上感应的电动势方向为顺时针，螺旋线圈依次串接，使得整个二次线圈中产生的感应电动势方向相同，二次线圈感应的电动势为

$$e(t) = -M \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

式中：*M*为整个二次线圈的互感系数， $M = M_1 + M_2 + M_3 + M_4$ ， $M_1 \sim M_4$ 分别为载流导体与螺旋线圈的互感系数。*M*主要取决于：1)螺旋线圈的结构、尺寸、匝数以及与载流导体的位置关系；2)PCB的层数。这些因素一旦确定，*M*即为常数<sup>[12]</sup>。

PCB平面型空心线圈没有铁磁材料，不会因被测电流大而饱和，测量范围大；采用PCB制作，参数一致性好，便于批量生产；可以制成多层板，增加线圈的匝数，有效地提高互感系数，且温度稳定性好。

## 2 PCB电子式电流互感器

由式(1)可知，要想得到与被测电流*i(t)*成正比的信号，就要对感应电动势进行积分处理。因此，空心线圈输出信号需要外接积分器以构成电流互感器。另外，二次线圈存在自感、等值电阻以及寄生电容，二次线圈的输出信号并不是*e(t)*，为了得到电流互感器输出信号与*i(t)*的对应关系，在不计一次载流导体的寄生参数的条件下，可以得到如图2所示的电流互感器的等效电路<sup>[13]</sup>。

图2中：虚线框内是空心线圈的等效电路模型，

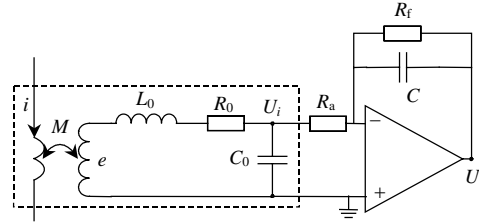


图2 PCB电流互感器等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of the PCB current transformer

其输出外接有源模拟积分器；*R<sub>f</sub>*为负反馈电阻，其功能为消除模拟积分器积分漂移，使积分器长期稳定工作；*L<sub>0</sub>*为二次线圈的自感；*R<sub>0</sub>*为二次线圈的等值电阻；*C<sub>0</sub>*为二次线圈寄生电容；*R<sub>a</sub>*为积分电阻，可视为积分电路的输入电阻；*C*为积分电容；*U*为输出电压。

由图2可以推导出*U*与*i*的传递函数*H(s)*

$$H(s) = \frac{U(s)}{i(s)} = \frac{R_f M}{R_a + R_0} \frac{\omega_n^2 s}{(R_f C s + 1)(s^2 + 2\sigma s + \omega_n^2)} \quad (2)$$

$$\text{式中：} \sigma = \frac{R_0}{2L_0} + \frac{1}{2R_a C_0}; \omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \sqrt{R_0 / R_a + 1}.$$

由式(2)可知，互感系数只影响输出信号的幅值，而互感器的暂态响应、频率响应等性能由二次线圈的等值参数以及积分器参数决定。一次载流导体在二次线圈产生感应电动势是微分环节，二次线圈电路在实际工作状态下有 $\sigma < \omega_n$ ，实际上是振荡环节，积分器电路是惯性环节。因此，电流互感器的频率响应是上述3个环节的叠加，系统的频率特性曲线如图3所示。

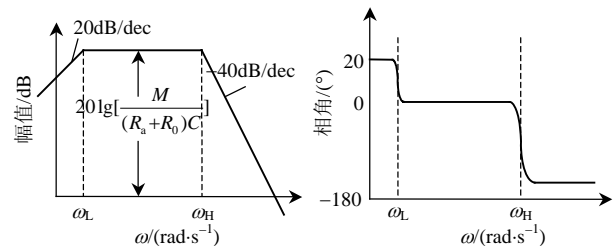


图3 PCB电流互感器频率特性曲线

Fig. 3 Frequency characteristic curve of the PCB current transformer

电流互感器的增益*G*为

$$G = 20\lg\left(\frac{R_f M}{R_a + R_0}\right) + 20\lg \omega_L = 20\lg\left[\frac{M}{(R_a + R_0)C}\right] \quad (3)$$

互感器的下限频率*f<sub>L</sub>*和上限频率*f<sub>H</sub>*分别为

$$f_L = 1/(2\pi R_f C) \quad (4)$$

$$f_H = \omega_n / (2\pi) = 1/(2\pi \sqrt{L_0 C_0}) \sqrt{R_0 / R_a + 1} \quad (5)$$

则理论上的工作频率范围 $\Delta f$ 为

$$\Delta f = f_H - f_L = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0 C_0}} \sqrt{\frac{R_0}{R_a} + 1} - \frac{1}{2\pi R_f C} \quad (6)$$

实际应用中，通过增大互感系数来提高互感器输出信号的信噪比，以提高测量准确度。这样往往导致二次线圈匝数的增加，使得  $L_0$ 、 $C_0$  等参数增大， $f_H$  下降。因此，在确定测量准确度和测量带宽这两个指标时，应根据需要折中考虑。

### 3 PCB 电流互感器的性能分析

#### 3.1 PCB 电流互感器仿真分析

仿真试验的等效电路如图 2 所示，其仿真参数为： $L_0=0.9\text{ mH}$ ， $R_0=8.6\ \Omega$ ， $C_0=0.19\text{ nF}$ ， $R_a=1.5\text{ k}\Omega$ ， $R_f=10\text{ M}\Omega$ 。因  $M$  只影响输出信号的幅值，为便于分析，设  $M=(R_a+R_0)\times C$ ，则电流互感器的增益为 0 dB。根据式(2)，用 Matlab 对电流互感器进行频率特性仿真，其结果如图 4 所示。

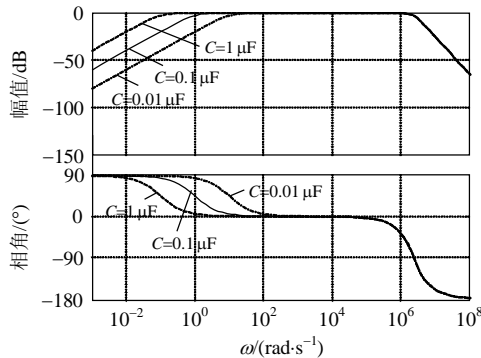


图 4 PCB 电流互感器频率响应的仿真曲线  
Fig. 4 Frequency response curves of the PCB current transformer

由图 4 可得： $C$  越大，互感器的频带越宽。当  $C=0.1\ \mu\text{F}$  时，互感器的工作频率范围约为  $10\sim 10^6\text{ rad/s}$  (即  $1.6\sim 1.6\times 10^5\text{ Hz}$ )，超过相关测量标准规定的最高 40 次谐波测量的要求。另外，在低频段(低于  $10\text{ rad/s}$ )，电流互感器的幅频特性以斜率  $20\text{ dB/dec}$  上升，而相频特性有  $90^\circ$  的相移，这是由于外接有源积分器添加了负反馈电阻  $R_f$ ，使得积分器成为惯性环节，在低频段没能抵消互感器中微分环节产生的影响。

以稳态电流  $i(t)=\sin 100\pi t$  作为互感器传递函数的输入信号， $C=0.1\ \mu\text{F}$  时，输出响应如图 5 所示。可见，互感器输出的二次电压能够很好地反映一次电流的波形。

电网发生故障时，故障电流通常含有稳态电流、衰减交流以及衰减直流分量。为了研究突发故障时电流互感器暂态响应过程，假设故障电流为

$$i(t) = \cos 100\pi t - 0.5\sin(200\pi t)e^{-10t} + e^{-20t} \quad (7)$$

模拟的故障电流  $i(t)$  中含有工频、倍频分量以及非周期分量，仿真结果如图 6 所示。由图 6 可得，

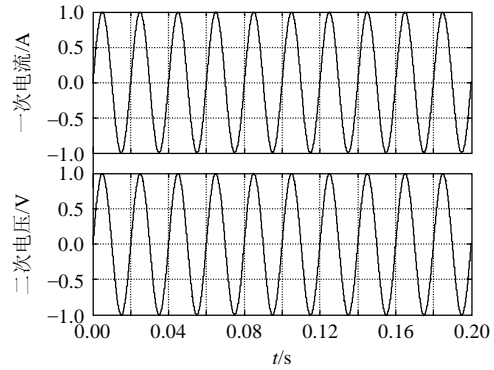


图 5 PCB 电流互感器稳态仿真曲线  
Fig. 5 Steady-state simulation curve of the PCB current transformer

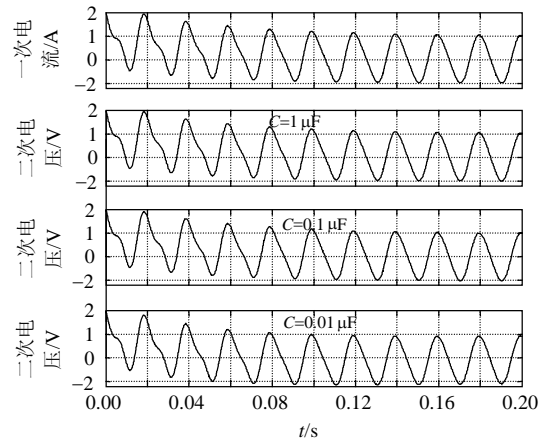


图 6 PCB 电流互感器暂态仿真曲线  
Fig. 6 Transient simulation curve of the PCB current transformer

互感器的输出电压信号，很好地跟随了故障电流的变化，具有实时性，且  $C$  越大，暂态跟随性越好。

#### 3.2 PCB 电流互感器试验研究

采用 6 块 2 层板的螺旋线圈串接组成二次线圈，其输出接低通滤波电路、仪表放大器和积分电路，试验原理图如图 7 所示。图中： $R_s$  为取样电阻，虚线框内是低通滤波器，仪表放大器选用 AD620，模拟积分电路的运算放大器选用 OP07。试验的目的是分析 PCB 电流互感器的一次输入电流和积分输出的二次信号之间的线性关系。由 Venus-330 信号源提供  $50\text{ Hz}$  工频的正弦电流，作为 PCB 电流互感器的一次输入。

将实验得到的数据进行线性拟合，结果如图 8 所示。由图 8 可知：输入、输出实验数据点的线性

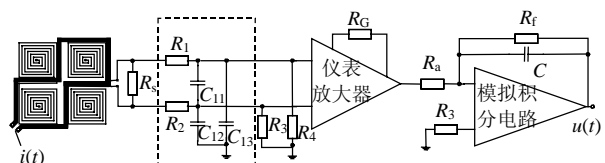


图 7 PCB 电流互感器实验原理图  
Fig. 7 Test diagram of the PCB current transformer

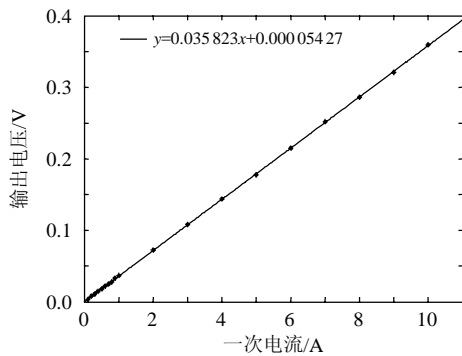


图8 试验数据拟合曲线

Fig. 8 The fitting curve of the test data

拟合度为 0.999 97, 说明该互感器有很好的线性度。拟合截距能表示出信号中叠加的固有噪声成分<sup>[14]</sup>, 理想值为 0, 线性拟合截距为 0.000 0542 7 (约为一次电流 0.1 A 时积分输出信号的 1.63%), 说明即使在输入小电流的情况下, 积分输出电压也没有叠加明显的噪声干扰, 即该互感器具有一定的抗干扰能力。

实际应用中, 由于 PCB 型空心线圈本身以及模拟积分器的相位误差, 使得被测电流和输出电压信号有微小相位偏差, 通常在电路中加入调相电路, 以保证电流互感器的相位精度。

#### 4 数字式电流互感器

电流互感器的模拟积分器实际所用的元器件不可能是理想器件, 例如积分电容存在漏电流和损耗, 运算放大器有失调电压、温漂等, 这些都会造成积分误差, 从而影响电流测量的精度。另一方面, 模拟积分器的反馈和补偿设计不够灵活, 并由此可能引入新的误差<sup>[15]</sup>。

与模拟积分器相比, 数字积分器具有很多显著优点: 结构简单、易于算法实现、可靠性高、可重复性高、设计灵活、性能稳定、受元器件温漂/时漂影响小、抗干扰能力强。数字积分器通常采用 A/D 转换器将空心线圈输出的模拟信号转换成数字信号, 再在 DSP 中设计数值积分算法。随着芯片集成技术的发展, 目前很多电能计量芯片内部都集成有高性能的数字积分器, 特别适合具有  $di/dt$  输出的电流互感器<sup>[16]</sup>。图 9 所示为一种采用电能计量芯片的数字式电流互感器。

#### 5 结论

由 PCB 型空心线圈构成的电流互感器测量范围大、工作频带宽、稳态性能好, 具有良好的线性度, 且暂态响应快, 适合小电流(100 A 以下)测量。

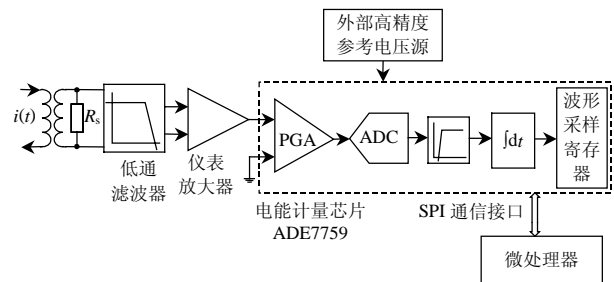


图9 数字式电流互感器结构

Fig. 9 The structure sketch of digital current transformer

另外, 基于电能计量芯片的数字式电流互感器与采用模拟积分器的电流互感器相比, 具有稳定性好等特点, 适用于测量精度要求高的计量系统。

#### 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 Youqing, Liu Kun, Wu Guiqing, et al. Research of electronic current transducer based on Rogowski coils[J]. Electro Technical Application, 2006, 25(6): 106-110(in Chinese).
- [2] 曾庆禹. 电力系统数字光电量测系统的原理及技术[J]. 电网技术, 2001, 25(4): 1-5.  
Zeng Qingyu. Principle and technology of digital optical electric measurement for power system[J]. Power System Technology, 2001, 25(4): 1-5(in Chinese).
- [3] 李芙英, 纪昆, 臧金奎. 基于 DSP 的光电式电流互感器的实用化设计[J]. 电网技术, 2002, 26(6): 46-48.  
Li Fuying, Ji Kun, Zang Jinkui. Design of a practical DSP based optoelectronic current transformer[J]. Power System Technology, 2002, 26(6): 46-48(in Chinese).
- [4] 李澄, 袁宇波, 罗强. 基于电子式互感器的数字保护接口技术研究[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 84-87.  
Li Cheng, Yuan Yubo, Luo Qiang. Research on interfacing technology for digital protection based on ECT/EVT[J]. Power System Technology, 2007, 31(9): 84-87(in Chinese).
- [5] 阳光, 刘欣荣. 有源电子式电流互感器高压侧电路设计的改进[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 81-84.  
Yang Guang, Liu Xinrong. Improvements on circuit design for high-voltage side of active power electronic current transducer[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 81-84(in Chinese).
- [6] 任晓东, 陈树勇, 姜涛. 电子式电流互感器高压侧取能装置的设计[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 67-72.  
Ren Xiaodong, Chen Shuyong, Jiang Tao. Design of a high side energy extracting device for active electronic current transformer[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 67-72(in Chinese).
- [7] 王程远, 陈幼平, 张冈, 等. PCB 空心线圈位置误差分析与控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(15): 103-107.  
Wang Chengyuan, Chen Youping, Zhang Gang, et al. Analysis and control on the position errors of PCB air-core coils[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(15): 103-107(in Chinese).
- [8] 陈庆, 李红斌, 张明明, 等. 采用主副印制电路板构造的 Rogowski 线圈性能分析及设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 79-82.  
Chen Qing, Li Hongbin, Zhang Mingming, et al. Analysis and design of Rogowski coils with main and assistant printed circuit boards[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 79-82(in Chinese).

- [9] Kojovic L A. Applications of Rogowski coils for advanced power system solutions[C]. Eighteenth International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Turin, Italy, 2005.
- [10] Wang Chengyuan, Chen Youping, Zhang Gang, et al. Design of printed-circuit board Rogowski coil for highly accurate current measurement[C]. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin, China, 2007.
- [11] 邱红辉, 段雄英, 邹积岩. 基于数据融合的组合结构电子式电流互感器设计[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 14-20.  
Qiu Honghui, Duan Xiongying, Zou Jiyan. Design of data fusion based electronic current transformer with combined structure[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 14-20(in Chinese).
- [12] 龚伟, 周有庆, 吴涛, 等. 基于 PCB 的平面型空心线圈电流互感器性能分析及设计[J]. 仪表技术与传感器, 2009(7): 4-6.  
Gong Wei, Zhou Youqing, Wu Tao, et al. Analysis and design of planar hollow coil current transformer based on PCB[J]. Instrument Technique and Sensor, 2009(7): 4-6(in Chinese).
- [13] 谢彬, 尹项根, 张哲, 等. 基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器的积分器技术[J]. 继电器, 2007, 35(3): 46-50.  
Xie Bin, Yin Xianggen, Zhang Zhe, et al. Technology in designing integrator of electronic current transducer based on Rogowski coil[J]. Relay, 2007, 35(3): 46-50(in Chinese).
- [14] 张少锋, 石山, 任成燕, 等. 高准确度微电流传感器的研制[J]. 传感器技术, 2004, 23(12): 55-58.  
Zhang Shaofeng, Shi Shan, Ren Chengyan, et al. Development of high accuracy microampere current sensor[J]. Journal of Transducer Technology, 2004, 23(12): 55-58(in Chinese).
- [15] 张可畏, 王宁, 段雄英, 等. 用于电子式电流互感器的数字积分器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 104-107.  
Zhang Kewei, Wang Ning, Duan Xiongying, et al. A digital integrator for electronic current transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 104-107(in Chinese).
- [16] 吴涛, 周有庆, 龚伟, 等. 基于新型电子式电流互感器的多功能电能表的设计[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(16): 56-60.  
Wu Tao, Zhou Youqing, Gong Wei, et al. Design of multi-function watt-hour meter based on the new electronic current transducer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(16): 56-60(in Chinese).



吴涛

收稿日期: 2009-12-26。

作者简介:

吴涛(1984—), 男, 硕士, 主要从事风电场工程的电气设计, E-mail: wtop\_2002@163.com;

周有庆(1944—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统微机保护与综合自动化研究;

龚伟(1984—), 男, 硕士, 主要从事电力二次继电保护维修工作。

(编辑 蒋毅恒)