

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.11.039

一种深度过流保护的新型Rogowski线圈研制

张璐¹, 孙蕾², 刘石³, 邓俊¹

(1. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 西安 710100; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065;
3. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 杭州 310014)

摘要: 气体放电包含大量 ns 级上升沿 mA 级幅值的预放电电流, 预放电完成后间隙击穿电流高达上 kA。为了能安全、准确测量预放电电流, 需研制一种新型 Rogowski 线圈。文中采用在自积分 Rogowski 线圈出口电阻两端并联贴片瞬态电压抑制二极管 (transient voltage suppressor, TVS) 的方案, 研制了一种带深度过电流保护功能的新 Rogowski 线圈。通过大量实验, 对自积分电阻和过压保护器参数进行了优化选择, 结果表明: 满足电流测量灵敏度时, 减小积分电阻值以拓宽线圈频带, 电阻最优值为 10~50 Ω ; 过压保护器响应时间必须短于待测电流上升时间; 确保线圈保护峰值电流大于回路最大击穿电流时, 须尽量降低 TVS 的杂散电容, 其值不超过 0.5~1 nF。测试表明: 新研制的 Rogowski 线圈既能准确测量上升沿小于 5 ns 的 mA 级小电流, 又能在通过 kA 级大电流时有效保护后级设备。

关键词: Rogowski 线圈; 纳秒脉冲; 小电流; 过流保护; 瞬态电压抑制二极管

Novel Rogowski Coil with the Function of Deep Overcurrent Protection

ZHANG Lu¹, SUN Lei², LIU Shi³, DENG Jun¹

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, China; 2. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Gas discharge includes many pre-discharge current pulses with nanosecond-level rise-time and milliampere-level amplitude, and the breakdown current after pre-discharge process can reach up to kiloampere level. To measure pre-discharge current safely and accurately, a novel Rogowski coil with the function of overcurrent protection was designed. In the design scheme, a transient voltage suppressor (TVS) was connected in parallel with the self-integral resistor of Rogowski coil. The parameters of the self-integral resistor and overvoltage protection device were optimized on the basis of many experiments, and the results show that the integral resistor must be decreased for broadening frequency band of Rogowski coil when the measuring sensitivity is satisfied, the optimal value of resistance is in the range of 10~50 Ω , the response time of the overvoltage protection device must be shorter than the rise time of the measured current, and the distributed capacitance of TVS must be reduced to 0.5~1 nF when the peak current of the Rogowski coil is larger than the circuit breakdown current. Test results show that the new Rogowski coil can accurately measure milliampere-level current with rise-time shorter than 5 ns, and can protect measuring device in the presence of kiloampere-level current.

Key words: Rogowski coil; nanosecond pulse; small current; overcurrent protection; transient voltage suppressor

0 引言

Rogowski 线圈由于具有测量电流频带范围宽、动态范围大、对测试回路无影响、结构简单、价格低廉等优点^[1-3], 自 20 世纪 30 年代问世以来在电力系统的局

部放电监测、电晕放电监测等领域得到广泛应用^[4-10]。

局部放电、电晕放电、介质阻挡放电等常以脉冲形式出现, 其中包含大量上升沿小于 10 ns, 幅值小于几十 mA 的预放电电流脉冲^[5]。预放电电流的准确测量成为判断放电类型, 进行故障诊断, 理解和掌握放电机理的关键。这要求测量装置有较宽的频带和高的灵敏度。此外, 预放电过程完成后可能发

生击穿,击穿电流可高达上 kA。因此,测量装置必须既能准确测量 mA 级纳秒脉冲电流,又能在出现大电流的击穿状态下不损坏后级设备。

现有技术中,单独测量大电流和小电流的 Rogowski 线圈已经比较成熟。但这些电流传感器只能较好地测量单一幅值范围的电流信号。若电流幅值变化范围较大,则很难在整个放电过程中实现完整测量,并有可能损坏后级测量仪器。

基于以上需求,文中采用在 Rogowski 线圈出口电阻端并联贴片瞬态电压抑制二极管(transient voltage suppressor,TVS)的方案,研制了一种带深度过流保护功能的新型 Rogowski 线圈。测试表明:该线圈既能准确测量 ns 级上升沿的 mA 级小电流,又能在通过 kA 级大电流时有效保护后级设备。

1 技术要求与指标

局部放电、电晕放电等电流脉冲上升沿一般小于 10 ns,电流幅值小于几十到几百 mA,且易被周围干扰信号所淹没,对测量装置提出了很高要求。测量装置不仅要响应时间足够快,频带足够宽,能够准确还原 ns 级电流信号;而且要灵敏度足够高,能分辨 mA 级预放电电流信号。此外,预放电过程完成后可能发生击穿,击穿电流可高达几 kA,在后级线圈出口端感应出上 kV 的高压,对后级测量设备造成很大威胁,必须采取相应的保护措施。

基于以上测量要求,文中设计的 Rogowski 电流传感器技术指标为:①响应时间小于 5 ns;②能分辨 mA 级小电流;③通过 kA 级大电流时不损坏测量设备。

2 传感器基本原理

文中的 Rogowski 线圈采用在磁芯骨架上均匀绕制数匝线圈的方式制作,线圈出口两端并联自积分电阻和 TVS 管。整个线圈置于开槽的金属盒内^[1]。线圈基于电磁感应原理工作,见图 1^[12-18]。线圈等效电路见图 2。图 2 中: R_0 、 L_0 分别为绕线电阻和电感; C_0 为线圈对外壳杂散电容; C_t 为 TVS 管等效电容; R_t 为自积分电阻。

图 2 中电路传递函数 $H(s)$ 为^[19]

$$H(s) = \frac{U(s)}{I_1(s)} = \frac{U(s)}{I_2(s)} \cdot \frac{I_2(s)}{I_1(s)} = \frac{Ms}{s^2(C_0+C_t)L_0 + (L_0/R_t + R_0C_0 + R_0C_t)s + (R_0/R_t + 1)} \quad (1)$$

式(1)中: $s=j\omega$, ω 为角频率; M 为导线与线圈之间的互感。

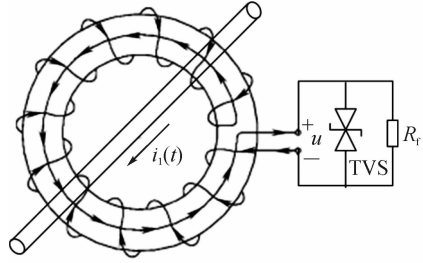


图 1 Rogowski 线圈原理图

Fig. 1 Schematic diagram of Rogowski coil

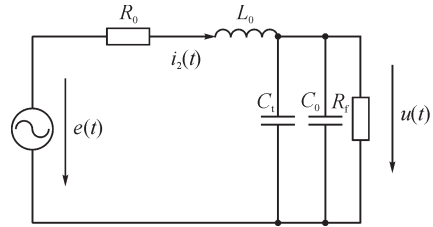


图 2 Rogowski 线圈等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of Rogowski coil

且有

$$L_0 = NM. \quad (2)$$

式(2)中, N 为线圈匝数。

当满足自积分条件 $\omega L_0 \gg R_0 + R_t$ 时,线圈幅频特性 $H(j\omega)$ 为

$$|H(j\omega)| = \frac{R_t}{N \sqrt{\left[\frac{R_0 + R_t}{\omega L_0} - (C_0 + C_t)R\omega \right]^2 + \left[1 + \frac{R_0(C_0 + C_t)R_t}{L_0} \right]^2}} \quad (3)$$

从而,线圈的上下限截止频率 f_h 和 f_l 分别为:

$$f_h = \frac{1}{2\pi R_t(C_0 + C_t)}; \quad (4)$$

$$f_l = \frac{R_0 + R_t}{2\pi L_0}. \quad (5)$$

线圈在频带平坦区的灵敏度 S 为

$$S \approx \frac{R_t}{N}. \quad (6)$$

由式(4)、(5)可见,要拓展自积分线圈的频带,应使线圈杂散电容 C_0 、TVS 管等效电容 C_t 和自积分电阻 R_t 尽可能小,而线圈自身电感 L_0 尽可能大。但是,线圈灵敏度大小与频带宽度之间是矛盾的。对于确定的骨架来讲,积分电阻和线圈匝数的选取实际存在一个最优搭配^[20]。

3 传感器设计

3.1 线圈器件选择

文中研制的深度过电流保护的新型 Rogowski 线圈采用电磁感应变幅值,磁环饱和限幅值,过压

保护器抑制幅值三级保护措施,实现预放电电流的安全准确测量。

线圈匝数一般可选为 20~50 匝,选取原则应遵循可将原边导体上流经的大电流经电磁感应原理变为小电流,减小过压保护器压力,形成一级保护。

磁芯应根据击穿电流大小选择,其尺寸应足够小,使其在大电流下饱和,限制线圈出口电压,形成二级过压保护。

过压保护器采用结电容较小的贴片 TVS,根据二级保护的残压选择 TVS 通流能量,根据测量装置出口电压选择 TVS 动作电压,形成三级过压保护。

1)磁芯选择。为减小流经过压保护元件上的电流,提高保护元件的寿命和可靠性,文中利用磁芯自身的饱和作用,选取尺寸很小(直径 3 cm,厚度 0.7 cm)的 Ni-Zn 铁氧体磁环作为线圈骨架,测试波形见图 3。其中,输入电流由 Pearson 110 A 线圈测得。图 3 表明:线圈原边流经 3 kA 的 8/20 μ s 雷电流时,输出电压出现饱和,正极性输出电压幅值减小,脉宽变窄,从而减小了流经后级过压保护元件的电流幅值和功率,提高了过压保护元件的可靠性。

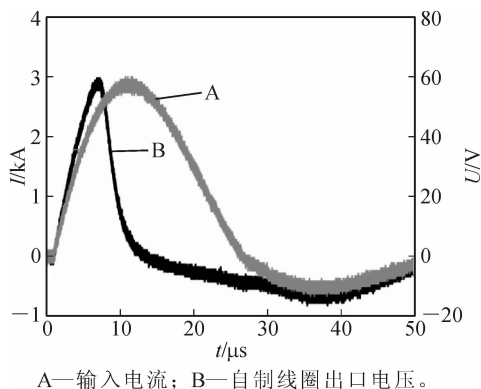


图 3 Rogowski 线圈大电流饱和特性($N=19, R_l=0.5 \Omega$)
Fig. 3 Saturation characteristic of Rogowski coil under large current ($N=19, R_l=0.5 \Omega$)

2)过压保护器选择。抑制瞬态过电压的元器件包括气体放电管和 TVS 管等。气体放电管电容较小,有利减小线圈响应时间。文中首先选择在积分电阻两端并联 UZ75B09 型气体放电管(静态放电电压 75 V),测试线圈对流经大电流时的保护作用,波形见图 4。由图 4 可见,线圈在流经 0.8 kA 大电流时,输出端电压仍高达 1 kV,放电管对快脉冲电流响应速度过慢,未起到相应的保护作用,可能损坏后级测量设备。

式(4)表明,要减小线圈响应时间,增大线圈上限截止频率,线圈出口两端并联杂散电容应越小越好。TVS 管尽管响应速度较快,可达到亚 ns 级,但传

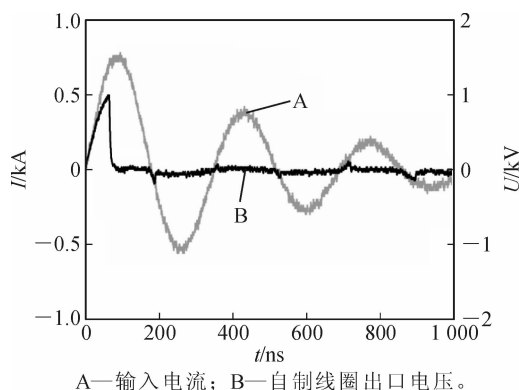


图 4 Rogowski 线圈大电流响应特性($N=19, R_l=50 \Omega$)
Fig. 4 Response characteristic of Rogowski coil under large current ($N=19, R_l=50 \Omega$)

统直插式 TVS 管杂散电容很大,并联到积分电阻两端导致线圈响应时间变长。因此,文中选取大功率贴片式 TVS 管抑制线圈出口电压。

3)TVS 和积分电阻参数选择。TVS 管选取应考虑最大流通电流和元件等效电容两个主要因素,这两者的选取是矛盾的,有一个配合的最优值。功率大、动作电压低的 TVS 管等效杂散电容较大,导致线圈高频响应特性变差;而功率过小、动作电压高的 TVS 管等效电容较小,但能够流通的最大过电流较小,过流保护能力较弱。

积分电阻 50Ω ,线圈出口并联 SMC20CA 和 SMC28CA 两种 TVS 时的方波响应见图 5,相应的脉冲响应见图 6。其中,输入脉冲由标准分流器测得。图 5、6 表明,TVS 接入导致线圈方波响应和脉冲响应特性变差,输出脉冲上升沿变缓。

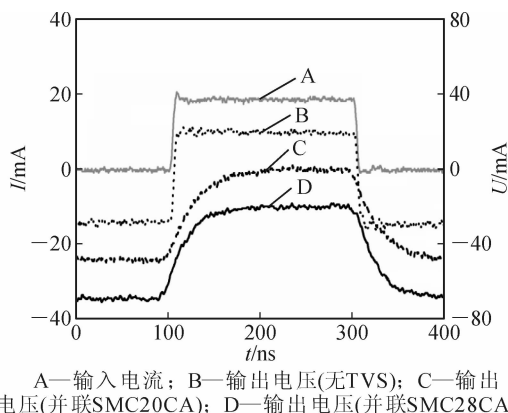
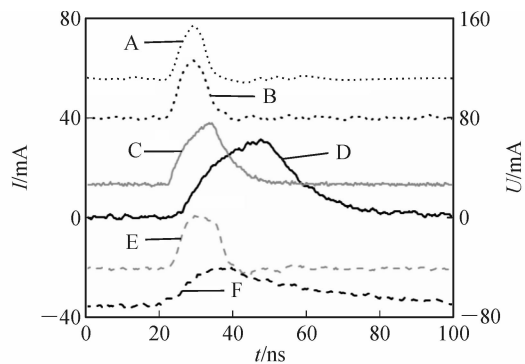


图 5 Rogowski 线圈方波响应特性($N=19, R_l=50 \Omega$)
Fig. 5 Response characteristic of Rogowski coil under square wave current ($N=19, R_l=50 \Omega$)

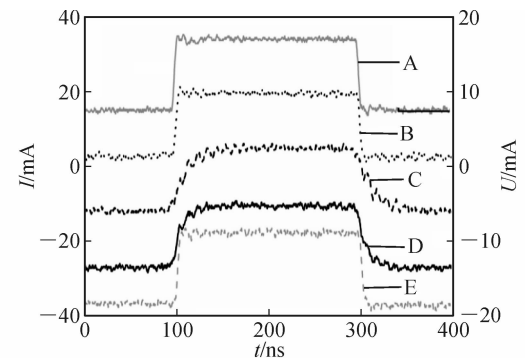
为拓宽线圈频带,减小脉冲响应时间,将线圈两端积分电阻减小至 10Ω ,同时尝试采用低电容系列 TVS 管。积分电阻 10Ω 时线圈出口并联 2 个 SMC36CA、2 个 SMB20CA 和 1 个 SMB20CA 3 种情



A—输入电流; B—输出电压(无TVS); C—输入电流(并联SMC28CA); D—输出电压(并联SMC28CA); E—输入电流(并联SMC20CA); F—输出电压(并联SMC20CA)。

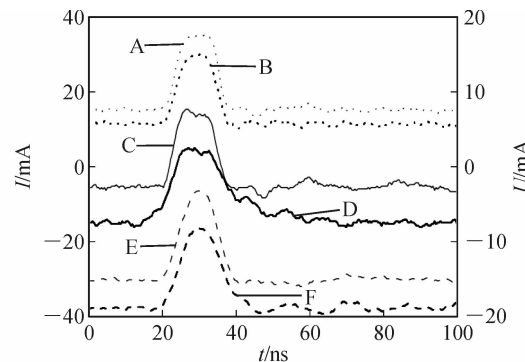
图 6 Rogowski 线圈脉冲响应特性($N=19, R_f=50 \Omega$)
Fig. 6 Response characteristic of Rogowski coil under impulse current ($N=19, R_f=50 \Omega$)

况 TVS 管时的方波响应特性见图 7, 脉冲响应特性见图 8。为方便对比, 不同贴片 TVS 管的标称参数见表 1。



A—输入电流; B—输出电压(无TVS); C—输出电压(并联2个SMC36CA); D—输出电压(并联2个SMB20CA); E—输出电压(并联SMB20CA)。

图 7 Rogowski 线圈方波响应特性($N=19, R_f=10 \Omega$)
Fig. 7 Response characteristic of Rogowski coil under square wave current ($N=19, R_f=10 \Omega$)



A—输入电流; B—输出电压(无TVS); C—输入电流(并联2个SMB20CA); D—输出电压(并联2个SMB20CA); E—输入电流(并联SMB20CA); F—输出电压(并联SMB20CA)。

图 8 Rogowski 线圈脉冲响应特性($N=19, R_f=10 \Omega$)
Fig. 8 Response characteristic of Rogowski coil under impulse current ($N=19, R_f=10 \Omega$)

图 7、8 表明, 随着 TVS 管杂散电容的减小, 线

表 1 不同型号贴片 TVS 管参数
Table 1 Parameters of different types of surface mount TVS

型号	反向关断电压/ V	最大箝位电压/ V	峰值电流 (10/1 000 μ s)/ A	峰值电流 (8/20 μ s)/ A	杂散电 容/nF
SMC20CA	20	32.4	46.3	262.4	1.22
SMC28CA	28	45.4	33.0	187.0	0.84
SMC36CA	36	58.1	25.8	146.2	0.73
SMB20CA	20	32.4	18.5	120.3	0.50

圈输出方波和脉冲上升沿变陡。当线圈两端并联 1 个 SMB20CA TVS 时, 线圈输出方波上升时间为 4.5 ns, 较好地还原了原始方波脉冲, 方波响应很好。

3.2 线圈响应特性测试

线圈两端并联 1 个 SMB20CA TVS 的幅频响应曲线见图 9。图 9 表明, 线圈频带为 42 kHz~88.3 MHz, 在频带平坦区内灵敏度为 0.596 V/A, 满足测量 mA 级小电流的要求。

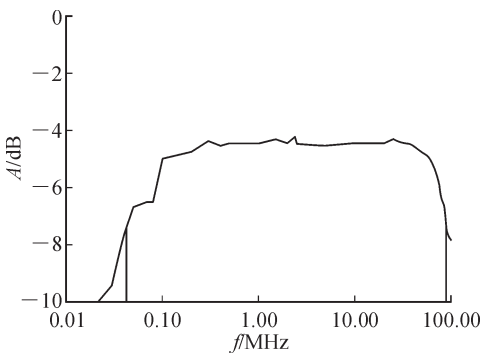
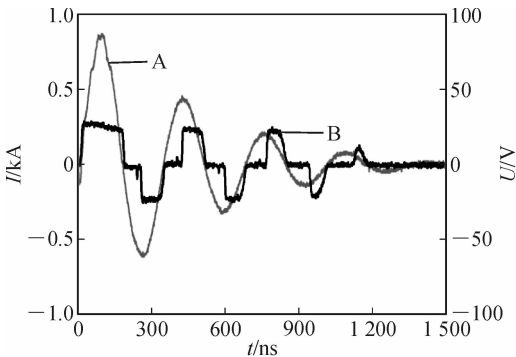


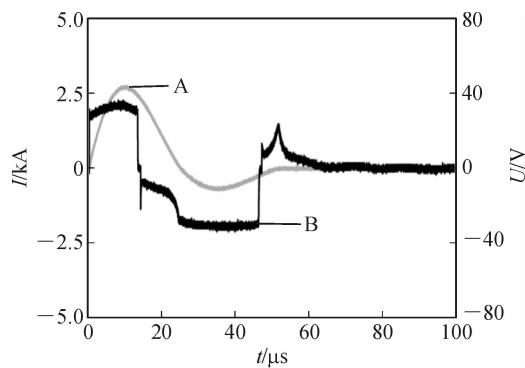
图 9 Rogowski 线圈幅频响应($N=19, R_f=10 \Omega$)
Fig. 9 Amplitude-frequency response of Rogowski coil ($N=19, R_f=10 \Omega$)

线圈高频电流响应特性和标准雷电流响应特性分别见图 10、11。结果表明, 线圈在通过快脉冲和大电流下均能起到抑制出口电压的保护作用。



A—输入电流; B—自制线圈出口电压。

图 10 高频电流响应特性($N=19, R_f=10 \Omega$)
Fig. 10 Response characteristic of Rogowski coil under high frequency current ($N=19, R_f=10 \Omega$)

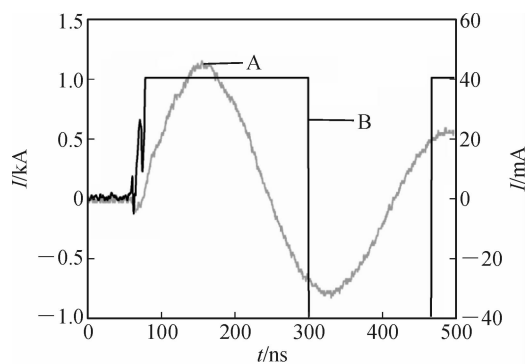


A—输入电流; B—自制线圈出口电压。

图 11 8/20 μs 雷电流响应特性($N=19, R_f=10 \Omega$)Fig. 11 Response characteristic of Rogowski coil under standard lightning current ($N=19, R_f=10 \Omega$)

4 线圈性能实测

为检验新研制的 Rogowski 线圈实际应用性能,测试了球—球和尖—板气体间隙放电电流波形分别见图 12、13。测试了标准雷电波下 GIS 绝缘子沿面预放电电流特性见图 14。图 12、13 中的预放电电流采用自制 Rogowski 线圈测量,击穿电流用 Pearson110A 线圈测量。结果表明:自制 Rogowski 线圈可测量上升沿小于 5 ns 的 mA 级小电流;同时,在流经 kA 级大电流时,具有限制线圈出口电压的保护作用。



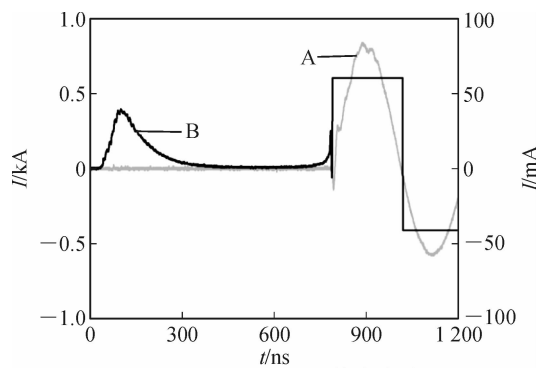
A—击穿电流; B—预放电电流。

图 12 球—球间隙放电电流测量

Fig. 12 Measurement of discharge current under sphere-sphere gap

5 结论

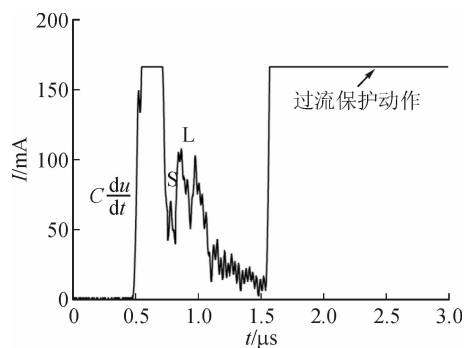
1)文中采用在自积分 Rogowski 线圈出口电阻两端并联贴片 TVS 管的方案,研制了一种带深度过流保护功能的新型 Rogowski 线圈。测试表明:该线圈既能准确测量上升沿小于 5 ns 的 mA 级小电流,又能在流过 kA 级大电流时限制线圈出口电压,保护后级设备。



A—击穿电流; B—预放电电流。

图 13 尖—板间隙放电电流测量

Fig. 13 Measurement of discharge current under needle-plane gap



C du/dr—位移电流; S—流注; L—先导。

图 14 标准雷电波下 GIS 绝缘子沿面预放电电流

Fig. 14 Pre-discharge current of GIS insulator under standard lightning impulse

2)要减小线圈响应时间,增大上限截止频率,并联 TVS 管的杂散电容应越小越好,但 TVS 的杂散电容和峰值保护电流的选取相矛盾。线圈峰值保护电流大于回路最大击穿电流时,TVS 的杂散电容应尽可能小,一般不超过 0.5~1 nF。

3)减小积分电阻有利提高线圈上限截止频率,但降低了线圈灵敏度;增大线圈匝数,可减小流经线圈的击穿电流,减小保护元件的压力,但降低了线圈上限截止频率和灵敏度。

参考文献:

- [1] 廖京生,郭晓华,朱明均,等. 用于小电流测量的 Rogowski 线圈电流互感器[J]. 电力系统自动化,2003,27(2):56-59. LIAO Jingsheng, GUO Xiaohua, ZHU Mingjun, et al. Rogowski coil current transducer for low amplitude current measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(2):56-59.
- [2] METWALLY I A. Self-Integrating rogowski coil for High-Impulse current measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(2):353-360.
- [3] 吴涛,周有庆,龚伟. 采用 PCB 平面型空心线圈的

- 电子式电流互感器性能分析[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 210-214.
- WU Tao, ZHOU Youqing, GONG Wei. Performance analysis on electronic current transformer based on PCB planar-type of air core coil[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 210-214.
- [4] 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, 35(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, 35(2): 149-153.
- [5] ZHU Jundong, ZHANG Qiaogen, JIA Jiangbo, et al. Design of a rogowski coil with a magnetic core used for measurements of nanosecond current pulses[J]. Plasma Science and Technology, 2006, 8(4): 457-460.
- [6] CHEN Qing, LI Hongbin, ZHANG Mingming, et al. Design and characteristics of two Rogowski coils based on printed circuit board[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006, 55(2): 939-943.
- [7] 彭鑫霞, 关永刚, 高凯, 等. 应用形态学滤波方法去除高压断路器线圈电流信号的噪声[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 1-7.
- PENG Xinxia, GUAN Yonggang, GAO Kai, et al. Noise removal from coil current signal of high voltage circuit breaker P with the morphological filter[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 1-7.
- [8] 赵承楠, 曾宪振, 孟会增, 等. 252 kV GIS 特快速暂态过电压和电流的影响因素分析[J]. 高压电器, 2015, 51(3): 93-98.
- ZHAO Chengnan, ZENG Xianzhen, MENG Huizeng, et al. Analysis of the factor influencing on the very fast transient overvoltage and current generated in 252 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3): 93-98.
- [9] 邱太洪, 王俊波, 李国伟, 等. 高频脉冲电流法在 XLPE 电缆终端带电测试中的应用[J]. 高压电器, 2015, 51(5): 99-103.
- QIU Taihong, WANG Junbo, LI Guowei, et al. Application of high frequency pulse current method in live detection of XLPE cable terminal[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5): 99-103.
- [10] 袁渊, 任稳柱, 王安, 等. 冲击电流测量系统校准方法的研究[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 102-106.
- YUAN Yuan, REN Wenzhu, WANG An, et al. Study on calibration of impulse current measuring system[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 102-106.
- [11] LI Zhou, ZHANG Qiaogen, ZHANG Lu, et al. Design of rogowskicoil with external integrator for measurement of lightning current up to 400 kA[J]. Electrical Review, 2011, 87(7): 188-192.
- [12] RAMBOZ J D. Machinable rogowski coil, design, and calibration[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1996, 45(2): 511-515.
- [13] KOJOVIC L. PCB rogowski coils benefit relay protection[J]. IEEE Computer Applications in Power, 2002, 15(3): 50-53.
- [14] ABDI-JALEBI E, MCMAHON R. High-performance low-cost Rogowski transducers and accompanying circuitry[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(3): 753-759.
- [15] LUKA F, DAMIR L, ROMAN M. Mutual inductance of a precise Rogowski coil in dependence of the position of primary conductor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(1): 122-128.
- [16] 何金良, 嵇士杰, 刘俊, 等. 基于巨磁电阻效应的电流传感器技术及在智能电网中的应用前景[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 8-14.
- HE Jinliang, JI Shijie, LIU Jun, et al. Review of current sensor technology based on giant magneto resistive effect and possible applications for smart grids[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 8-14.
- [17] 鲍海, 许韦华, 杨以涵. 一种基于磁动势平衡的 Rogowski 线圈控制模型[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 154-158.
- BAO Hai, XU Weihua, YANG Yihan. A kind of Rogowski coil model based on magneto-motive force balance[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 154-158.
- [18] 方志, 赵中原, 邱毓昌, 等. 用于混合式光电电流互感器的光电传输系统[J]. 电网技术, 2003, 27(4): 43-45.
- FANG Zhi, ZHAO Zhongyuan, QIU Yuchang, et al. An optoelectric transmission system for hybrid optical current transformer[J]. Power System Technology, 2003, 27(4): 43-45.
- [19] 张乔根, 张禹, 张璐. 基于混合式光电电流互感器技术的脉冲微小电流信号测量系统[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2337-2343.
- ZHANG Qiaogen, ZHANG Yu, ZHANG Lu. Measurement system using hybrid optical current transducer for small pulse current signal[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10): 2337-2343.
- [20] ZHANG Qiaogen, ZHU Jundong, JIA Jiangbo, et al. Design of a current transducer with a magnetic core for use in measurements of nanosecond current pulses[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(4): 895-900.
- 张璐(1987—), 男, 博士, 工程师, 主要从事变压器和 GIS 领域科研和试验工作。
- 孙蕾(1987—), 女, 硕士, 工程师, 从事电气一次设备研究工作。
- 刘石(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事 GIS 领域科研和试验工作。
- 邓俊(1985—), 男, 博士, 工程师, 从事电力系统计算研究工作。