

Rogowski 线圈典型外积分电路 暂态性能比较与仿真

刘艳峰, 尚秋峰, 周文昌

(华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 应用于电力系统的 Rogowski 线圈一般工作在微分状态, 采用外积分电路后, 可对暂态电流作出较好的反映, 便于分析故障信息。比较了 Rogowski 线圈在有源和无源外积分电路条件下直流分量、周期分量的响应, 以及综合分析其性能。并用 Matlab 软件仿真, 分析和仿真结果表明, 理论上无源外积分电路更适合对电力系统暂态电流的检测; 而无源外积分电路的输出信号对输入信号的跟随性是有条件的 (RC 取值较大), 且对电力系统暂态电流的检测误差比较大, 无源外积分电路只适合对灵敏度要求不高的场合。

关键词: 电力系统; Rogowski 线圈; 暂态电流; Matlab 仿真

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)07-0030-04

Rogowski 线圈 (简称罗氏线圈) 又叫磁位计^[1], 是一种密绕在非磁性骨架上的空心线圈。在电力系统中, 罗氏线圈具有很多优点^[2]: 无磁饱和、精确度高、频带宽、动态范围大和绝缘性能好等^[3-6]。通常在电力系统中罗氏线圈工作在微分状态, 因此需要增加外积分电路。

暂态电流包含了大量故障信息。工作在微分状态的罗氏线圈在采用外积分电路后, 对暂态电流作出较好的反映^[7]。文中详细分析并比较了罗氏线圈在 2 种典型积分条件下的暂态性能, 为罗氏线圈的实际应用提供了一些参考。

1 罗氏线圈等效电路模型

罗氏线圈有 2 种工作状态, 即自积分工作状态和微分工作状态。在测量电力系统暂态电流过程中, 适合选用微分工作状态。因为要采用外积分电路, 所以又叫外积分工作状态。比较典型的外积分罗氏线圈等效电路有 2 种: 有源型^[8]和无源型^[9], 如图 1 和图 2 所示。其中, M 是线圈的互感, L 、 r 、 C_0 分别是线圈的自感、内阻和寄生电容, R_a 是负载电阻。

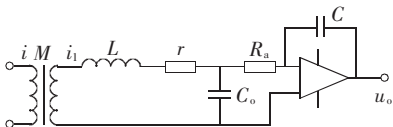


图 1 采用有源积分器的等效电路

Fig.1 Equivalent circuit with active integrator

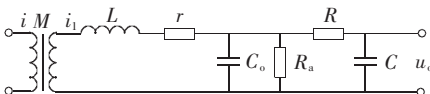


图 2 采用无源积分器的等效电路

Fig.2 Equivalent circuit with passive integrator

2 有源型外积分电路性能分析

通常, 在最坏情况下, 故障电流可用下式表达:

$$i(t) = I_m (\cos \omega t + e^{-\alpha t}) \quad (1)$$

拉氏变换为

$$I(s) = I_m \left(\frac{s}{s^2 + \omega^2} + \frac{1}{s + \alpha} \right) \quad (2)$$

由图 1 可以得到采用有源积分器等效电路 (简称有源电路) 的传递函数为

$$W(s) = \frac{M}{LC_0 CR_a} \frac{1}{s^2 + 2\delta s + \omega'^2} \quad (3)$$

$$\delta = \frac{1}{2LC_0} \left(\frac{L}{R_a} + rC_0 \right), \omega' = \frac{1}{\sqrt{LC_0}} \sqrt{\frac{R_a + r}{R_a}}$$

从文献^[1]中得到的各参数分别为 $L = 3.15 \times 10^{-5} \text{ H}$, $C_0 = 1.922 \times 10^{-10} \text{ F}$, $r = 6 \Omega$, $R_a = 285 \Omega$ 。为了简化分析过程, 假设 $M / (LC_0 CR_a) = 1$, I_m 取标么值 (以下分析均取标么值, 即纵坐标为标么值)。由式 (2) (3), 可以得到输出函数的拉氏变换形式:

$$U_o(s) = \frac{1}{s^2 + 2\delta s + \omega'^2} \left(\frac{s}{s^2 + \omega^2} + \frac{1}{s + \alpha} \right) \quad (4)$$

令:

$$U_{o1}(s) = \frac{1}{s^2 + 2\delta s + \omega'^2} \frac{1}{s + \alpha} \quad (5)$$

$$U_{o2}(s) = \frac{1}{s^2 + 2\delta s + \omega'^2} \frac{s}{s^2 + \omega^2} \quad (6)$$

其中式 (5) 是直流分量信号的响应输出, 式 (6) 是周期分量信号的响应输出。

2.1 有源电路直流分量响应分析

式 (5) 拉氏反变换后得到时域输出为

$$U_{o1}(t) = k_{11} [e^{-\alpha t} - e^{-\delta t} \cos \omega_0 t + k_{12} (\alpha - \delta) e^{-\delta t} \sin \omega_0 t] \quad (7)$$

其中, $k_{11} = 1 / (\alpha^2 - 2\delta\alpha + \omega'^2)$, k_{12} 与 α 有关。当

$\alpha = 0$ 时(这时直流分量相当于阶跃信号), k_{11} 的值为 $k^0 = 3.5766 \times 10^{-15}$ 。 k_{11} 与 k^0 的相对误差 $[(k_{11} - k^0)/k^0]$ 由图 3 可知(图中 ε 为相对误差; α 为衰减系数;下同)。由于 α 的取值通常在 0~100 之间,可以忽略 α 对 k_{11} 的影响。

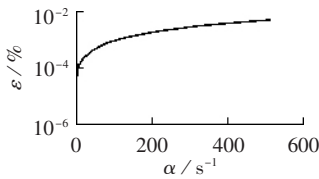


图 3 k_{11} 与 k^0 之间的相对误差
Fig.3 Error between k_{11} and k^0

当直流分量的衰减系数 α 取不同值时,有源电路的输出信号可很好地跟随输入信号,如图 4 所示(虚线是输入,实线是有源电路输出,为了显示清楚,人为将输入信号乘的系数选得稍微大了一些;图中 A_m 为幅值, t 为时间,下同)。所以有源电路可很好地反映直流分量信号。

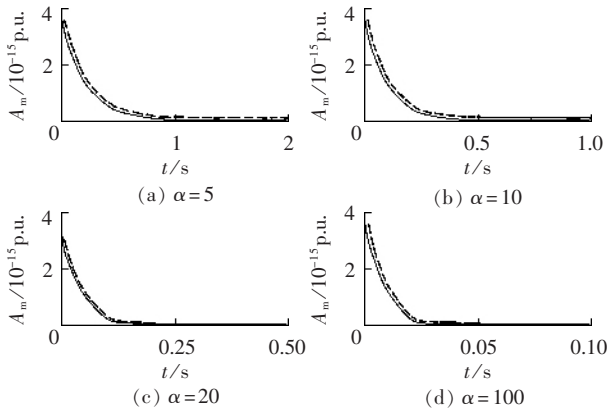


图 4 有源电路的直流分量跟随特性
Fig.4 The following characteristic of active circuit for direct current

2.2 有源电路周期分量响应分析

由式(6)可得到周期分量输出的时域表达式为 $U_{o2}(t) = k_{21}e^{-\delta t} \cos \omega_0 t + k_{22}e^{-\delta t} \sin \omega_0 t + k_{23} \cos \omega t + k_{24} \sin \omega t$ (8)

$$k_{23} = \frac{\omega'^2 - \omega^2}{(\omega^2 - \omega'^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}$$
$$k_{24} = \frac{2\delta\omega}{(\omega^2 - \omega'^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}$$

在式(8)中,由于 $\delta = 1.1871 \times 10^7$,所以括号内的前 2 项会衰减很快,可以不用考虑。在余下的 2 项中,正弦分量是干扰信号,会导致误差。实际上, k_{23} 比 k_{24} 平均大 3 个数量级以上,所以可忽略不计正弦分量的影响。

当 ω 是工频时,有源电路对周期分量信号的跟随如图 5 所示(“ Δ ”是输入信号,实线是有源电路输出信号)。可见,跟随状况良好。

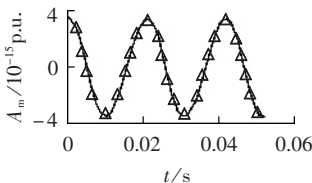


图 5 有源电路周期分量跟随性
Fig.5 The following characteristic of active circuit for periodic current

2.3 综合分析

观察式(7)(8)知,直流分量输出和周期分量输出中的系数 k_{11} 和 k_{23} 是不相同的。 k_{11} 与 α 有关,

k_{23} 与 ω 有关,这对瞬时值保护带来一定影响。现对 k_{11} 和 k_{23} 之间的关系作如下分析。图 6 所示为分别取 ω 为 $20\pi, 100\pi, 200\pi, 400\pi, 1000\pi, 2000\pi$ 时, k_{11} 与 k_{23} 的相对误差随衰减系数 α 的变化为 $[(k_{11} - k_{23})/k_{23} \times 100]$ 。 ω 取不同值时的几条曲线几乎重合;并且 α 在从 0~100 的范围内时($\alpha=0$ 时直流分量即为阶跃信号),这 2 个系数的相对误差非常小。所以系数 k_{11} 和 k_{23} 之间的差异非常微弱。

综合分析,对于暂态信号,有源电路的输出信号对输入信号可以很好地跟随,见图 7(“ Δ ”是输入信号,实线是有源电路输出信号,衰减系数 $\alpha=20$ 且在工频条件下)。总体而言,有源电路对暂态信号的反映是很好的。

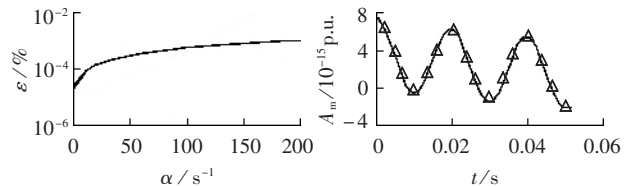


图 6 k_{11} 与 k_{23} 的相对误差
Fig.6 Error between k_{11} and k_{23}

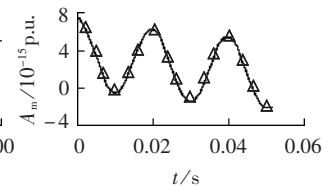


图 7 有源电路暂态信号跟随性
Fig.7 The following characteristic of active circuit for transient current

3 无源型外积分电路分析

由图 2 可得到采用无源积分器等效电路(简称无源电路)的传递函数为

$$W(s) = \frac{M}{LC_0} \frac{1}{s^2 + 2\delta s + \omega'^2} \frac{s}{RCs + 1} \quad (9)$$

同样,为简化分析,令 $M/(LC_0) = 1$, I_m 为标么值,则由式(2)(9)可以得到输出信号的拉氏变换形式为

$$U_o(s) = \frac{1}{s^2 + 2\delta s + \omega'^2} \frac{s}{RCs + 1} \times \left(\frac{s}{s^2 + \omega^2} + \frac{1}{s + \alpha} \right) \quad (10)$$

令

$$U_{o1}(s) = \frac{1}{s^2 + 2\delta s + \omega'^2} \frac{s}{RCs + 1} \frac{1}{s + \alpha} \quad (11)$$

$$U_{o2}(s) = \frac{1}{s^2 + 2\delta s + \omega'^2} \frac{s}{RCs + 1} \frac{s}{s^2 + \omega^2} \quad (12)$$

式(11)是直流分量输出;式(12)是周期分量输出。

3.1 直流分量信号分析

由式(11)得到直流分量输出的时域表达式为 $U_{o1}(t) = k'e^{-\alpha t} + k''e^{-\delta t} \cos \omega_0 t + k'''e^{-\delta t} \sin \omega_0 t + k''''e^{-t/(RC)}$ (13)

$$k' = L_1 - L_2 - L_3, k''' = L_2$$
$$L_1 = \left(\frac{1}{RC} - \frac{1/(RC) + 2\delta}{R^2 C^2 \omega'^2 - 2\delta RC + 1} \right) \frac{1}{\omega'^2 - 2\delta\alpha + \alpha^2}$$
$$L_2 = \frac{RC}{(R^2 C^2 \omega'^2 - 2\delta RC + 1)(1 - RC\alpha)}$$

$$L_3 = \frac{\alpha}{(R^2 C^2 \omega'^2 - 2\delta RC + 1)(\omega'^2 - 2\delta\alpha + \alpha^2)}$$

在式(13)中,由于 δ 非常大,所以括号内的第2项和第3项衰减很快,可以不计。第4项对信号造成一定的影响。这种影响当 RC 增大时会减弱。图8($\alpha=20$,虚线是输入信号,实线是无源电路输出信号)表明,当 RC 变大时,输入信号和无源电路输出信号会吻合得更好,但代价是灵敏度降低。

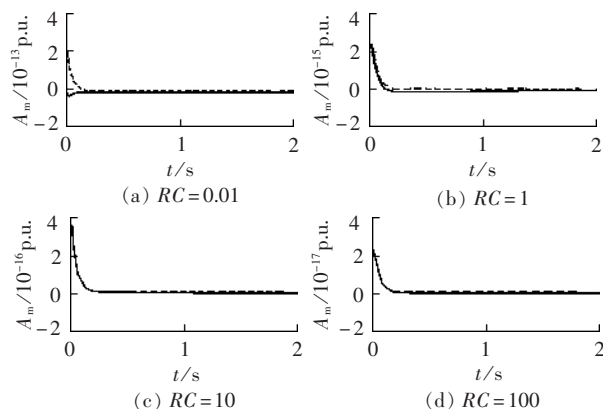


图8 无源电路的直流分量跟随特性

Fig.8 The following characteristic of passive circuit for direct current

当 $RC=1$ 时,衰减系数 α 为不同值时的跟随情况见图9。可见,无源电路对衰减系数 α 较大的直流分量信号跟随得较好。此时电路的灵敏度比较低,因此可以用在对灵敏度要求不高的场合。

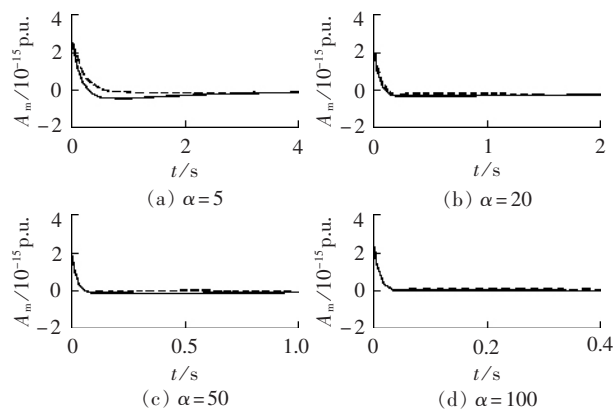


图9 无源电路的不同衰减系数直流分量跟随特性

Fig.9 The following characteristic of passive circuit for direct current on different attenuation coefficient

3.2 周期分量信号分析

由式(12)可以得到周期分量输出的时域解为

$$U_{o2}(t) = K_1 e^{-\delta t} \cos \omega_o t + K_2 e^{-\delta t} \sin \omega_o t + K_3 \cos \omega t + K_4 \sin \omega t + K_5 e^{-t/(RC)} \quad (14)$$

$$K_3 = \left(\frac{1}{RC} - \frac{1/(RC) - 2\delta}{h_4} \right) F - \frac{h_2}{h_4} - \frac{\omega F'}{h_4}$$

$$K_4 = \left(\frac{1}{RC} - \frac{1/(RC) - 2\delta}{h_4} \right) \frac{K}{\omega} - \frac{h_3}{h_4 \omega} - \frac{K'}{h_4}$$

$$K_5 = -h_1/h_4, \quad K = \frac{2\delta\omega^2}{(\omega^2 - \omega'^2)^2 + 4\delta^2\omega^2}$$

$$K' = \frac{-\omega(\omega^2 - \omega'^2)}{(\omega^2 - \omega'^2)^2 + 4\delta^2\omega^2}$$

$$h_1 = \frac{RC}{-R^2 C^2 \omega^2 - 1}, \quad h_2 = -h_1$$

$$h_3 = -h_1 RC \omega^2, \quad h_4 = R^2 C^2 \omega'^2 - 2\delta RC + 1$$

$$F = \frac{\omega'^2 - \omega^2}{(\omega^2 - \omega'^2)^2 + 4\delta^2\omega^2}, \quad F' = \frac{-2\delta\omega}{(\omega^2 - \omega'^2)^2 + 4\delta^2\omega^2}$$

式(14)中, δ 非常大,所以括号中的前2项衰减很快,可以不计。第4项和第5项对输出信号产生干扰。系数 K_3 、 K_4 和 K_5 都与 RC 和 ω 有关。工频条件下 K_3 比 K_4 的值(K_3/K_4)见图10。易知,除非 RC 值非常大,否则 K_3 并不是远远大于 K_4 ,也即正弦分量会对输出信号产生影响。 K_3 比 K_5 的值(K_3/K_5)见图11。因此,随着 RC 的增大,无源电路对周期分量的跟随会逐渐得到改善,见图12。

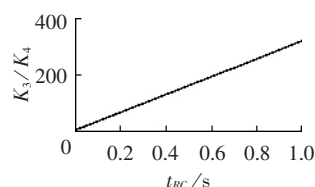


图10 K_3/K_4

Fig.10 K_3/K_4

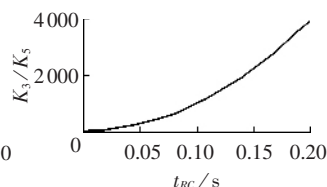


图11 K_3/K_5

Fig.11 K_3/K_5

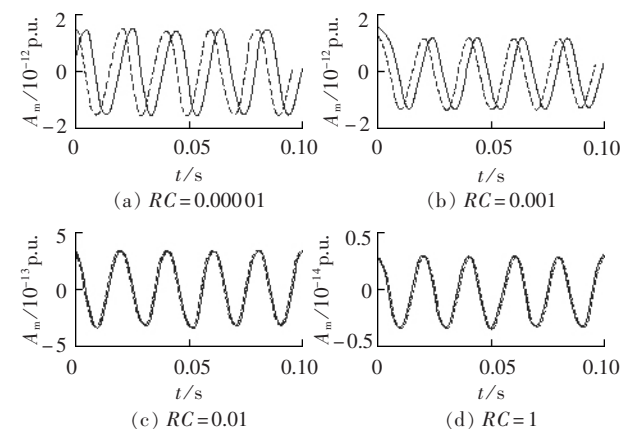


图12 无源电路的周期分量跟随特性

Fig.12 The following characteristic of passive circuit for periodic current

3.3 综合分析

观察式(13)(14),发现直流输出系数 k' 和周期输出系数 K_3 不同,会对信号的还原带来影响。这种影响可从图13观察到。图13

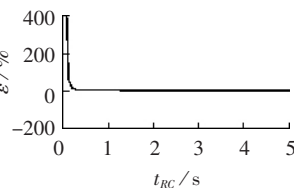


图13 k' 与 K_3 的相对误差

Fig.13 Error between k' and K_3

误差为2系数之间的相对误差 $[(k' - K_3)/K_3 \times 100]$ 。可见,这种差异是非常微弱的。图14是在工频条件下,衰减系数 $\alpha=20$ 时,在0.1s内, RC 对跟随特性的影响。可见,当 RC 比较小时,跟随性能很差;当 $RC > 10$ 时,跟随会很好,但是这时的灵敏度只有 2.6562×10^{-9} ,所以应该综合考虑 RC 的取值。

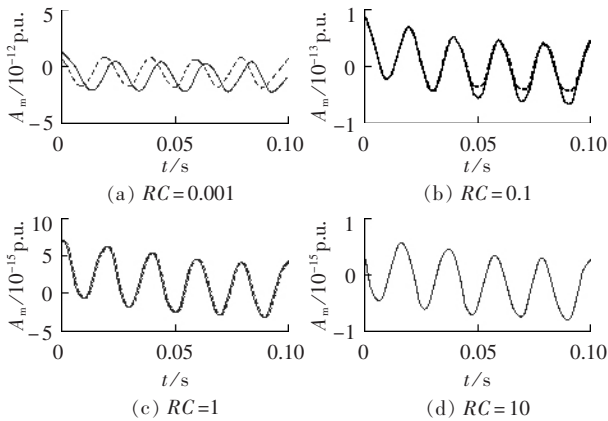


图 14 无源电路的暂态信号跟随特性

Fig.14 The following characteristic of passive circuit for transient current

4 结论

根据以上的分析和仿真,可得到 3 点结论。

a. 在理论上,有源积分电路模型的性能很好,可以比较好地反映暂态信号。只是有源器件存在“积分漂移现象”,并且对温度比较敏感,因此实际的测量将受限于有源器件的性能。

b. 无源积分电路模型的测量误差比较大。但由于其比较简单,且增大 RC 后性能有所改善,可以在某些对灵敏度要求不高的特殊情况下使用。

c. 对于衰减系数 α 比较大的直流分量,无论是有源型还是无源型电路模型,都有比较好的跟随。

参考文献:

- [1] 聂一雄,尹项根,张哲. 磁位计在电力系统继电保护中应用的可行性探讨[J]. 电力系统自动化,2000,24(16):35-38,50. NIE Yi-xiong,YIN Xiang-gen,ZHANG Zhe. The application possibility of magnetic potentiometer in power system protection relaying[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,24(16):35-38,50.
- [2] 乔峨,安作平,罗承沐. 应用在混合式光电电流互感器中的 Rogowski 线圈[J]. 变压器,2000,37(5):17-22. QIAO E,AN Zuo-ping,LUO Cheng-mu. Rogowski coil used in optical current transformer[J]. Transformer,2000,37(5):17-22.
- [3] 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):6-7,10,14. DAI Jian-hua,LI Kai-cheng. Heavy current measurement based

- on Rogowski coil [J]. High Voltage Engineering,2002,28(1):6-7,10,14.
- [4] 徐雁,朱明钧,郭晓华,等. 空心线圈作为保护用电流互感器的理论分析和试验[J]. 电力系统自动化,2002,26(16):52-55,78. XU Yan,ZHU Ming-jun,GUO Xiao-hua,et al. A study on the air-core coil current transformer for protective relay[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(16):52-55,78.
- [5] 廖京生,郭晓华,朱明钧. 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 Jing-sheng,GUO Xiao-hua,ZHU Ming-jun. Rogowski coil current transformer for low amplitude current measurement[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(2):56-59.
- [6] 申灿,王士敏,罗承沐. 一种电子式电流互感器的研制[J]. 电力系统自动化,2002,26(18):41-44. SHEN Zhu,WANG Shi-min,LUO Cheng-mu. Development of an electronic current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(18):41-44.
- [7] 聂一雄,尹项根,张哲. 磁位计暂态响应的仿真计算[J]. 电力系统自动化,2002,26(11):28-31. NIE Yi-xiong,YIN Xiang-gen,ZHANG Zhe. The transient response simulation calculation of the magnetic potentiometer[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(11):28-31.
- [8] 罗苏南,田朝勃,赵奇才. 空心线圈电流互感器性能分析[J]. 中国电机工程学报,2004,24(3):108-113. LUO Su-nan,TIAN Zhao-bo,ZHAO Xi-cai. Performance analysis of air-core current transformer[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(3):108-113.
- [9] 郭晓华,朱明钧,徐雁. 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):16-17,33. GUO Xiao-hua,ZHU Ming-jun,XU Yan. Discussion on industrial production of Rogowski coil[J]. High Voltage Engineering,2003,29(3):16-17,33.
- [10] 张涛,李澎,罗承沐,等. 罗果夫斯基线圈测量高电压及电力系统中的暂态电流[J]. 电工电能新技术,2002,21(3):53-56. ZHANG Tao,LI Peng,LUO Cheng-mu,et al. Measurement of transient current in high-voltage and power system using Rogowski coil[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2002,21(3):53-56.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

刘艳峰(1981-),男,河北永年人,硕士研究生,研究方向为现代传感与测量技术(E-mail:ncepuliyf@126.com);

尚秋峰(1968-),女,河南商水人,副教授,主要研究方向为电力系统自动化、智能信号与信息处理、微弱信号检测、光纤传感技术等;



刘艳峰

周文昌(1967-),男,河北保定人,副教授,研究方向为应用电子技术。

Comparison of Rogowski coil transient performance with typical outer integral circuits and its simulation

LIU Yan-feng,SHANG Qiu-feng,ZHOU Wen-chang

(North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

Abstract: The Rogowski coil in power systems usually works with a necessary outer integral circuit in the differential status,which reflects the transient current for the failure information analysis. Responses of the direct current and the periodic current on the Rogowski coil with active and passive integral circuits are compared,and their performance is synthetically investigated. The simulation with Matlab shows that,the active integrator is better than the passive one in the power system transient current measurement in theory,and the latter may be applied to special occasions of low sensitivity for its conditional following characteristic on the RC value and larger error in the transient current measurement.

This project is supported by the Ph. D. Teacher Research Foundation from North China Electric Power University(20050608).

Key words: power system; Rogowski coil; transient current; Matlab simulation