

罗氏线圈电子式电流互感器的宽频域传变特性研究

邢昊中¹, 吴杰², 贺子润¹

- (1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 智能变电站的大量投运,使得罗氏线圈电子式电流互感器的运用也愈发广泛。在阐述罗氏线圈传感单元原理基础上分析其传变特性影响因素,计算了传感单元以及外积分环节的传递函数,得到了其频率响应特性。在 Matlab 和 PSCAD 仿真平台上分别搭建了理想实验模型和实际电网模型,验证了理论推导正确性,为改进罗氏线圈电子式电流互感器传变性能提供了理论指导。

关键词: 罗氏线圈; 电流互感器; 传变特性; 频率响应特性; 空载合闸

中图分类号: TM451 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)03-0017-07

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.03.004

Research on Wide – frequency – domain Transfer Characteristics of Electronic Current Transformer with Rogowski Coil

Xing Haozhong¹, Wu Jie², He Zirun¹

- (1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The large – scale commissioning of intelligent substations has made electronic current transformer with Rogowski coil more widely used. Based on the principle of sensing unit of Rogowski coil, the influencing factors of its transfer characteristics are analyzed, the transfer function of sensing unit and external integration link is calculated, and its frequency response characteristics are obtained. The ideal experimental model and the actual power grid model are established respectively with Matlab and PSCAD simulation platform. The correctness of the theoretical derivation provides a theoretical guidance for improving the transfer characteristics of electronic current transformer with Rogowski coil.

Key words: Rogowski coil; current transformer; transfer characteristics; frequency response characteristics; unloaded switching

0 引言

随着电力技术的不断发展和进步,智能变电站的投运数目也越来越多^[1-2]。罗氏线圈电子式电流互感器有着测量线性度好、频率响应宽、绝缘性能佳、无磁饱和等一系列优点,在智能变电站的测量和保护方面有着广泛的应用^[3-5]。但是在实际运用中,罗氏线圈电流互感器依旧存在一些缺陷^[6-7]。近几年已发生多起由罗氏线圈电流互感器引起的电网事故。通过故障录波分析,发现部分罗氏线圈电流互感器存在动态响应的问题,即会产生动态附加

分量导致保护的误动作,而且这种情况在一次侧含有大量高次谐波时尤为明显。考虑到智能变电站的发展需求、电子式互感器在智能变电站的重要作用以及继电保护装置误动作带来的严重后果,研究罗氏线圈电流互感器的传变特性有着重要意义。

目前,国内外针对罗氏线圈电子式电流互感器在各方面都展开了较为深入的研究。文献[8-9]以罗氏线圈各种应用为主线展开了罗氏线圈传感原理和特性的研究。文献[10-13]对不同工作环境下的罗氏线圈电子式电流互感器进行了建模并分析了相对应的理论计算方法。文献[14-15]研究了积分环节对罗氏线圈电子式电流互感器的影响及改

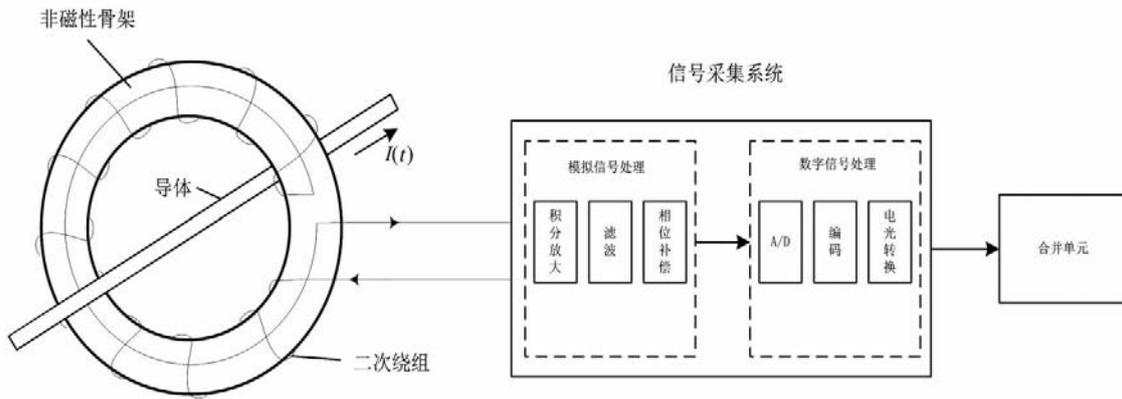


图1 罗氏线圈电流互感器结构

进方法。文献 [16 - 17] 研究了罗氏线圈电子式电流互感器的动态响应测试方法。在此基础上, 下面将全面阐述罗氏线圈的传感原理和传变特性以及采用模拟积分器的罗氏线圈电子式电流互感器的结构和其频率响应特性; 并仿真出了不同参数结构、不同输入信号的罗氏线圈电子式电流互感器宽频传变结果, 进一步验证通过改变参数来提升电子式电流互感器宽频域传变特性的有效性。

1 罗氏线圈电子式电流互感器结构

典型的罗氏线圈电子式电流互感器结构可大致分为传感单元(罗氏线圈)、信号采集系统、合并单元三大部分, 如图1所示。一次侧电流经过传感单元转变为模拟电压信号, 经过积分放大、滤波和移相还原成电流信号, 再依次进行 A/D 转换和光电转换后变为光信号, 通过光纤传输到合并单元, 最后经过协议转换后传输给保护、测控装置等。

罗氏线圈的积分环节对互感器的传变特性影响重大。目前, 积分方式一般分为两种: 模拟积分和数字积分。二者最大的区别在于前者是采样前积分, 后者是采样后积分。而由于高频信号会在采样环节发生频率混叠, 使采样后的积分异常, 导致传变异常。因此, 所研究的罗氏线圈电流互感器传变特性是基于模拟积分的方式。

2 传变特性影响因素

2.1 罗氏线圈传感原理

罗氏线圈是一种特殊结构的空心线圈电流检测工具。它将导线均匀地绕在非铁磁性环形骨架上,

一次侧导线置于线圈中央, 结构如图2所示。

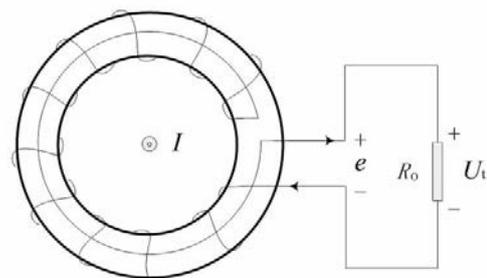


图2 罗氏线圈传感原理

根据图2所示的罗氏线圈传感原理, 可以得到相应的等效电路如图3所示, 其中: $i(t)$ 为被测电流; M 为罗氏线圈互感; r_T 、 L_T 和 C_T 分别是线圈内阻、自感和分布电容; R_0 为负载电阻。

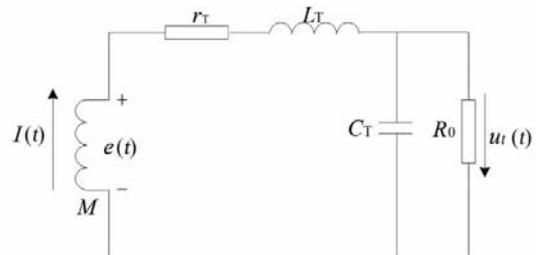


图3 罗氏线圈传感原理等效电路

当一次侧导线有电流流过时, 由电磁感应定律可得感应电动势:

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

式中: i 为一次侧流过的电流; M 为互感系数。

当罗氏线圈匝数、材料、尺寸等参数都确定时, 可以计算出互感系数 M 。

一般可以通过测量负载电阻两端的电压值, 并如式(2)所示进行积分还原, 得到与被测电流成线性关系的信号, 再通过数字化处理便可以计算出被测电流值。

$$i(t) = -\frac{1}{M} \int e(t) dt \quad (2)$$

2.2 线圈的传变特性影响因素

由图3所示的等效电路可知,罗氏线圈传感头的传递函数为

$$H_1(s) = \frac{U_1(s)}{I(s)} = \frac{M \cdot s}{L_T C_T s^2 + \left(\frac{L_T}{R_0} + r_T C_T\right) s + \left(\frac{r_T}{R_0} + 1\right)} \quad (3)$$

由于感应电动势 $E = \omega M I_N$, 即罗氏线圈互感 M 的大小是根据电路所需而设计的, 所以匝数 N 是确定的。根据式(4)、式(5)可以知道, 罗氏线圈互感 M 与自感 L_T 是同时被确定的, 所以影响罗氏线圈传变特性的因素主要是线圈内阻 r_T 、分布电容 C_T 和负载电阻 R_0 。

$$M = \frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \quad (4)$$

$$L_T = \frac{\mu_0 N^2 h}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \quad (5)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; a 为线圈横截面的内径; b 为线圈横截面的外径; h 为线圈截面高度。

某罗氏线圈的等值集中参数如表1所示, 当只改变线圈的负载电阻 R_0 时, 罗氏线圈的幅频特性和相频特性如图4所示。

表1 罗氏线圈集中参数

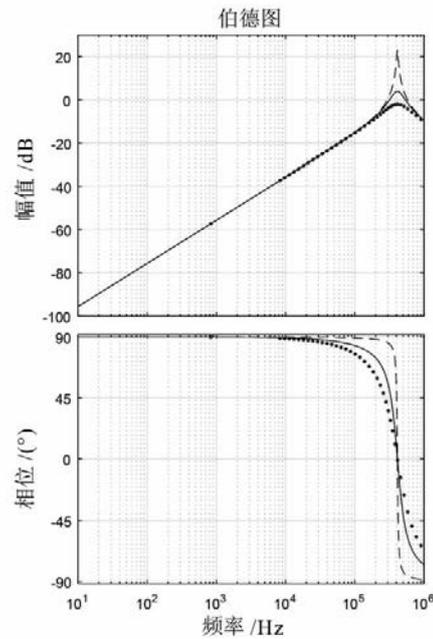
元件	r_T/Ω	$M/\mu\text{H}$	$L_T/\mu\text{H}$	C_T/pF	R_0/Ω
参数	2.31	0.264 5	165.3	896	500

由图4曲线可以看出, 负载电阻越小, 在特定频率点的上翘现象越明显, 会对输出的幅值产生较大影响, 且会产生很大的角位移, 降低截止频率。因此, 为了提高截止频率, 在罗氏线圈互感器的设计中应考虑使用较大的负载电阻。

当只有内阻变化时, 罗氏线圈的幅频特性和相频特性如图5所示。由图5可知, 随着罗氏线圈的内阻增加, 角位移也随之增加, 且在高频时这种现象愈发明显。总而言之, 罗氏线圈的内阻越大, 其频率响应特性越差。

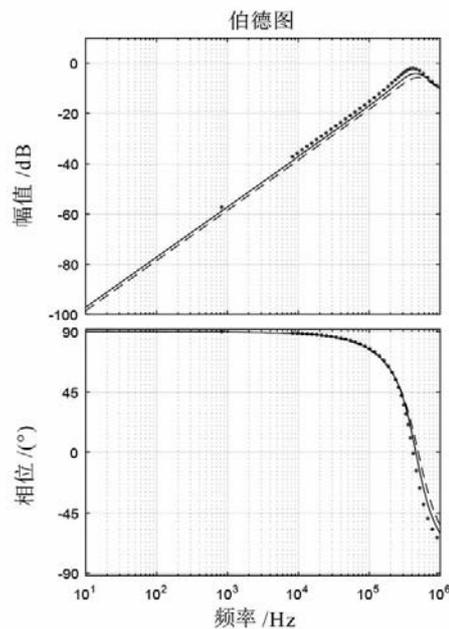
当只有分布电容变化时, 罗氏线圈的幅频特性和相频特性如图6所示。

由图6可知, 与内阻增加的情况类似, 即罗氏线圈的分布电容越大, 在相同的频率下传变的角偏移



..... $R_0 = 500 \Omega$ ——— $R_0 = 1000 \Omega$ - - - $R_0 = 10\,000 \Omega$

图4 负载电阻变化时幅频、相频特性



..... $r_T = 2.31 \Omega$ ——— $r_T = 100 \Omega$ - - - $r_T = 200 \Omega$

图5 内阻变化时幅频、相频特性

越大, 且在高频时影响更加严重。

综上所述, 为了提高罗氏线圈传感单元的上限截止频率获得更宽的频域特性, 可以通过设计负载、内阻、分布电容3个参数来实现, 即适当增加负载阻抗、选取合适的线圈线径使罗氏线圈内阻更小、尽量减小线圈的分布电容, 从而改善罗氏线圈传感单元的高频特性。

2.3 外加积分电路后的传变特性影响因素

罗氏线圈对信号进行了微分, 所以为了还原信号, 必须外加积分电路。理想积分电路结构简单, 搭配罗氏线圈基本可以不产生畸变, 可以很好地传变一次电流。但在实际运用中, 理想积分电路会产生零漂、电压失调等问题, 所以常常在积分器的反馈电容上并联一个电阻来解决这些问题, 实际积分器如图7所示。

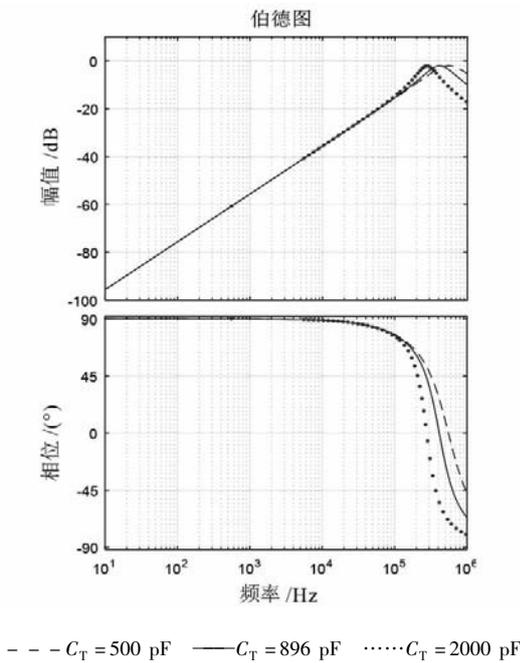


图6 分布电容变化时幅频、相频特性

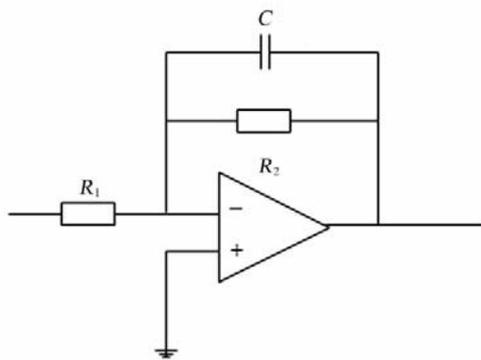


图7 实际积分器

由图7电路, 不难得出积分电路的传递函数为

$$H_2(s) = \frac{R_2}{R_1(1 + R_2Cs)} \quad (6)$$

结合式(3), 可以得出罗氏线圈加积分电路整体的传递函数为

$$H(s) = H_1(s) \cdot H_2(s) = \frac{M \cdot s}{L_T C_T s^2 + \left(\frac{L_T}{R_0} + r_T C_T\right) s + \left(\frac{r_T}{R_0} + 1\right)}$$

$$\frac{R_2}{R_1(1 + R_2Cs)} \quad (7)$$

取 $R_1 = 10^4 \Omega$ 、 $R_2 = 10^6 \Omega$ 、 $C = 0.1 \mu\text{F}$, 罗氏线圈参数继续采用表1数据, 从而得到加了模拟积分器前后的幅频、相频特性对比, 见图8所示。由图可知, 经过积分之后, 对于在 $10 \text{ Hz} \sim 40 \text{ kHz}$ 范围内的信号, 幅值增益大约稳定在 -71.7 dB 。在 $50 \text{ Hz} \sim 8.47 \text{ kHz}$ 频率范围内的信号, 相位偏移都小于 1° , 总体与积分前的相位相差约 90° 。这说明该罗氏线圈电流互感器在 $50 \text{ Hz} \sim 8.47 \text{ kHz}$ 范围内信号传变特性良好。

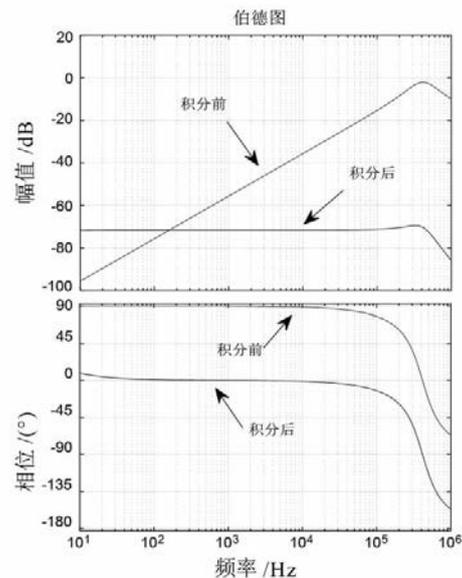


图8 积分前后幅频、相频特性对比

若分别改变积分器的 R_1 、 R_2 、 C 的大小, 可以得到3个幅频、相频特性对比图, 见图9—图11。

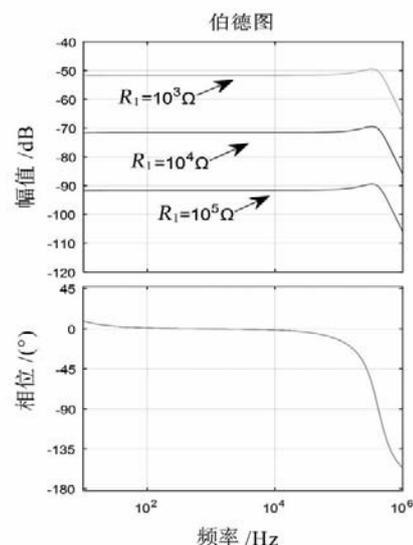
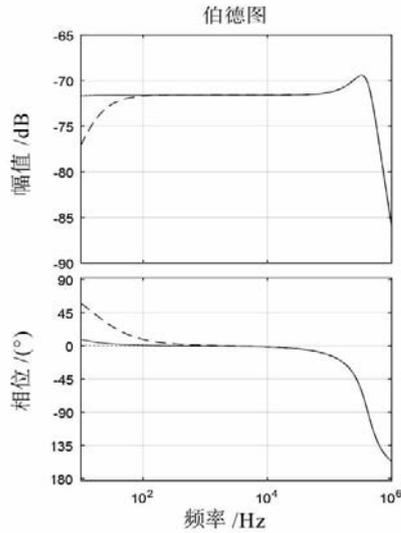


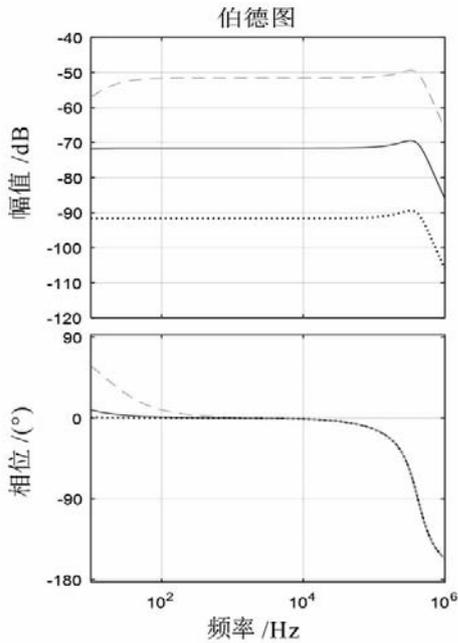
图9 不同 R_1 的幅频、相频特性

由积分电路的传递函数式(6)可以看出, R_1 的



--- $R_2 = 10^5 \Omega$ — $R_2 = 10^6 \Omega$ $R_2 = 10^7 \Omega$

图10 不同 R_2 的幅频、相频特性



--- $C = 0.01 \mu\text{F}$ — $C = 0.1 \mu\text{F}$ $C = 1 \mu\text{F}$

图11 不同 C 的幅频、相频特性

大小只会影响幅值的大小,而不会改变整体的相频特性,这与图9所显示的结果相吻合。由图10、图11可以看出,增加 R_2 的值,可以改善互感器在低频段的幅频特性,但对高频段影响不大。 C 的值越大,全频段的幅频特性都会更好。同时, R_2 与 C 对高频段的相频特性影响不大,但在低频段, R_2 或 C 的值越大,角位移越小,即整体的相频特性越好。虽然 R_2 和 C 的值越大,互感器的传变特性越好;但 R_2 的值越大,直流增益越大,从而导致元件温漂被放大,而且过大的电容会带来成本问题,也影响互感器的散

热。所以,在改善罗氏线圈电流互感器的传变特性时,要综合考虑多方面因素。

3 仿真验证

3.1 理想信号源仿真验证

在 Matlab 中建立一个如图12所示结构的实验电路。

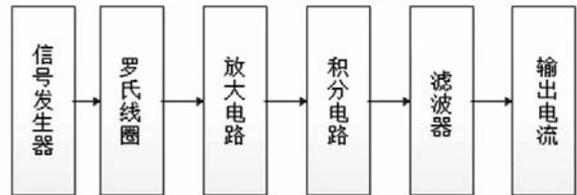
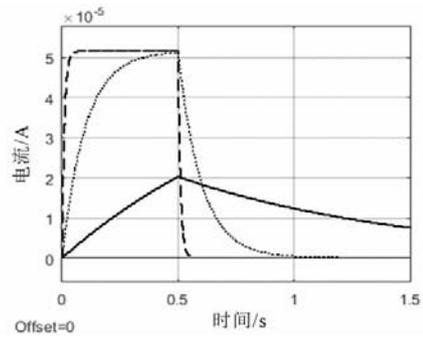


图12 实验电路结构

当输入一个幅值为1A的斜坡信号,经过不同反馈电容的罗氏线圈电子式电流互感器传变后,得



--- $C = 0.01 \mu\text{F}$ $C = 0.1 \mu\text{F}$ — $C = 1 \mu\text{F}$

图13 不同反馈电容下的输出电流

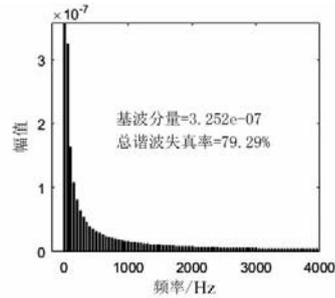


图14 $C = 1 \mu\text{F}$ 时 FFT 分析

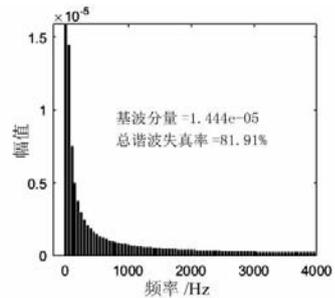


图15 $C = 0.01 \mu\text{F}$ 时 FFT 分析

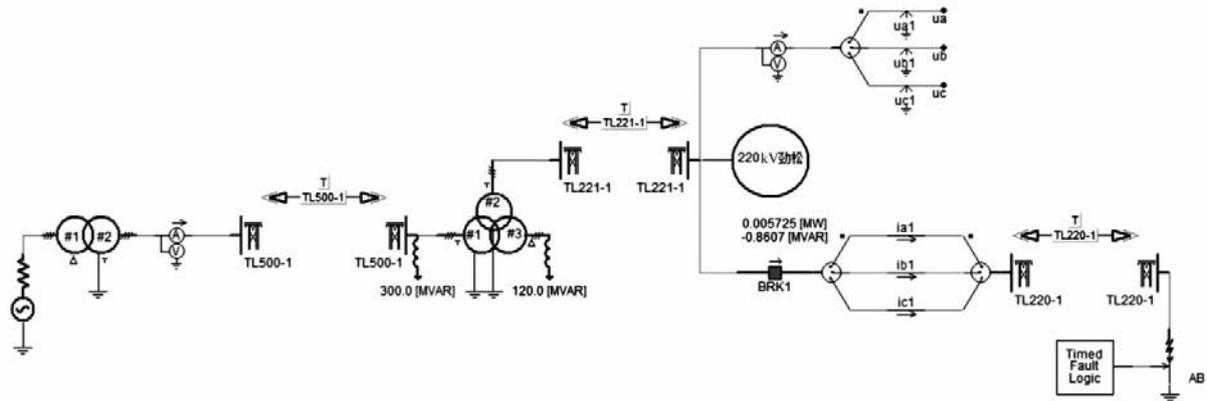


图 16 PSCAD 仿真模型

到的输出电流如图 13 所示,反馈电容 $C = 0.01 \mu\text{F}$ 和 $C = 1 \mu\text{F}$ 时相对应的 FFT 分析图如图 14、图 15 所示。由图可知,反馈电容越小,基波分量越大,总谐波失真率 THD 也略微增加即高次谐波含量变多。这与图 11 所显示的传变特性相符合,即反馈电容 C 越大,互感器的传变特性越好。同样,改变罗氏线圈内阻 r_T 、分布电容 R_1 、积分回路 R_2 和 R_1 的仿真结果都与前述结论相符合,在此不一一赘述。

高,如图 19 所示。

3.2 实际电网信号源仿真验证

某智能变电站断路器合 220 kV 空载线路时,由于罗氏线圈电子式电流互感器自身的传变问题,导致了保护的误动作。基于此次事件,在 PSCAD 平台搭建了一个实际电网,如图 16 所示,来模拟线路空载合闸过程,并将合闸线路的电流信号作为罗氏线圈的输入信号,来分析其传变性能。

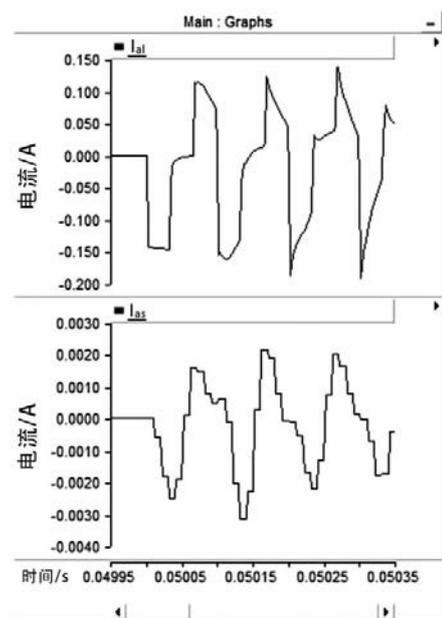


图 17 空载合闸线路的电流信号

在 0.5 s 空载合闸时,合闸线路所产生的电流原波形 I_{a1} 和合并单元输出电流 I_{as} 如图 17 所示。可以看出,空载合闸在线路中产生了行波,且在初始阶段行波波前很陡,但是 I_{as} 的波前没有 I_{a1} 那么陡峭,且每一个波谷到波峰之间有一段平坦的曲线也没有反映出来。即总体看来,该罗氏线圈互感器的传变特性良好,但依旧有改良的空间。

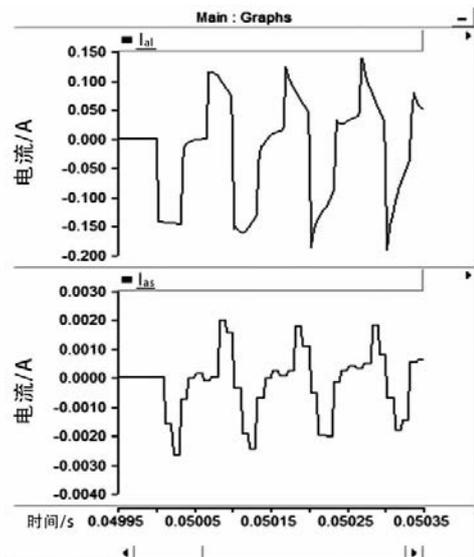


图 18 内阻和电容降低 30% 后电流信号

因此,根据前面所得出的罗氏线圈互感器传变特性结论,将该罗氏线圈模型中的内阻和分布电容降低 30% 得到图 18。可以看出,输出波形更加接近原波形,传变特性得到了改善。

同样,根据前面所得出的结论,在改进罗氏线圈参数后继续改进积分电路的参数,得到仿真结果波形与图 18 基本一致,没有太大的变化,这说明该积分回路对高频段的波形影响甚小。但是,对于低频段的影响结果,显而易见,改进后的波形还原度更

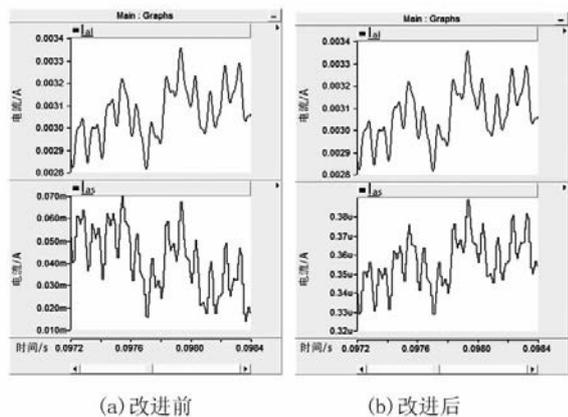


图19 低频段电流信号

4 结 语

前面利用罗氏线圈互感器的等效电路以及积分回路,计算出了互感器的传递函数,并以此得到了罗氏线圈互感器的传变特性。通过改变仿真模型中的参数,对比输入和输出电流波形,进一步验证了前面所得出的结论:罗氏线圈内阻和分布电容越小,传变特性越好;外积分电路反馈电容和并联电阻越大,传变特性越好,且相比高频段,其对低频段影响较为明显。这为提升罗氏线圈电子式电流互感器的宽频域传变特性提供了理论参考。

参考文献

[1] 张东霞,姚良忠,马文媛. 中外智能电网发展战略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(31):1-15.
 [2] 王勇. 电力工程技术在智能电网建设中的应用[J]. 通信电源技术,2019,36(10):164-165.
 [3] 谢秋明. 电子式互感器在数字化变电站中的应用研究[D]. 上海:上海交通大学,2014.
 [4] 邸志刚,孙腾飞. 电子式电流互感器发展现状与应用前景[J]. 仪表技术,2019(5):37-40.
 [5] 聂德宇,李晓敏,王卓远,等. 基于罗氏线圈的电子式互感器研究[J]. 通信电源技术,2017,34(3):73-74.
 [6] 克帕依吐·吐尔逊. 罗氏线圈电流互感器传递特性及对保护继电器的影响[J]. 电工电气,2019(11):21-24.
 [7] 徐子立,胡浩亮,刘琦,等. 罗氏线圈电流互感器电屏蔽结构缺陷误差机理研究[J]. 高压电器,2019,55(2):176-182.
 [8] 马坦. 罗氏线圈传感器及应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2015.

[9] 李维波. 基于 Rogowski 线圈的大电流测量传感理论研究与实践[D]. 武汉:华中科技大学,2005.
 [10] T. Orosz, Z. Á. Tamus, I. Vajda. Modeling the High Frequency Behavior of the Rogowski - coil Passive L/r Integrator Current Transducer with Analytical and Finite Element Method [C]. 2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Cluj - Napoca, 2014: 1 - 4.
 [11] 刘莉红. 电子式电流互感器建模及暂态特性研究[D]. 成都:电子科技大学,2014.
 [12] B. Hai, X. Weihua, Y. Yihan. A Research about A New Rogowski Coil Model Based on the Control Principle [C]. 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing, 2009: 1 - 6.
 [13] 张弛,康小宁,郑永康,等. 罗氏线圈电流互感器的暂态传变特性[J]. 高电压技术,2018,44(12):4105-4112.
 [14] F. Pang, Y. Liu, J. Ji, et al. Transforming Characteristics of the Rogowski Coil Current Transformer with A Digital Integrator for High - frequency Signals [J]. The Journal of Engineering, 2019, 16: 3337 - 3340.
 [15] Zhenhua Li, Xin Xiang, Tinghe Hu, et al. An Improved Digital Integral Algorithm to Enhance the Measurement Accuracy of Rogowski Coil - based Electronic Transformers [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020: 118.
 [16] S. Jing, Q. Huang, F. Tang, et al. Study on Additional Dynamic Component of Electronic Current Transducer Based on Rogowski Coil and Its Test Approach [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2):1258-1265.
 [17] 汤凡,甄威,梁晓斌,等. 罗氏线圈电子式电流互感器动态响应特性测试方法研究[J]. 电气应用,2014,33(19):76-80.

作者简介:

邢昊中(1995),硕士研究生,主要从事电力系统运行与控制方向研究工作;

吴杰(1986),高级工程师,主要从事变电站智能化研究工作;

贺子润(1995),硕士研究生,主要从事电力系统运行与控制方向研究工作。

(收稿日期:2020-03-30)