

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220753

## 基于有源电子互感器的输电线路等传变差动保护

李宝伟<sup>1,2</sup>, 文明浩<sup>1</sup>, 石欣<sup>2</sup>, 戚宣威<sup>3</sup>, 张家琪<sup>4</sup>

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 3. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014; 4. 国家电网有限公司, 北京 100031)

**摘要:** 罗氏线圈电子式电流互感器的积分环节会放大传变误差, 可能造成电流传变严重失真, 导致保护误动。针对此问题, 提出了线路保护直接采用罗氏线圈微分电流信号输出的改进思路。并以差动保护为例, 提出了一种基于有源电子互感器的输电线路等传变差动保护方法。该方法直接采用罗氏线圈输出的电流微分信号进行计算, 将用于电容电流补偿计算的电压信号经虚拟罗氏线圈数字传变处理, 保证电压电流信号经过相同的传变环节。仿真和试验结果表明, 新方法在区内故障时可快速动作, 且消除了积分环节引入的传变误差对差动保护的影响, 降低了电压电流传变差异对保护精度的影响, 性能优于现有差动保护方法。

**关键词:** 罗氏线圈; 积分器; 电容电流补偿; 虚拟数字罗氏线圈; 差动保护

### Current differential relay of a transmission line based on an active electronic transformer using value after an equal transfer processes

LI Baowei<sup>1,2</sup>, WEN Minghao<sup>1</sup>, SHI Xin<sup>2</sup>, QI Xuanwei<sup>3</sup>, ZHANG Jiaqi<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 3. State Grid Zhejiang Electrical Power Research Institute, Hangzhou 310014, China; 4. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

**Abstract:** The integrator of a Rogowski coil current transformer will amplify the error of current transfer and probably cause serious distortion of the current transfer. This will lead to protection mal-operation. To this end, an improved idea for a line relay directly using the differential current output of Rogowski coil is put forward. Taking the differential relay as an example, a current differential relay of the transmission line based on an active electronic transformer using value after equal transfer processes is proposed. In the scheme, the differential current output from the Rogowski coil is directly used for protection calculation, and the voltage signal used for capacitance current compensation calculation is transformed by a virtual Rogowski coil to ensure that the voltage and current signals have the same transfer process. Simulation and experimental results demonstrate that the novel relay has high operational speed in the case of internal faults, the influence of the transmission error introduced by the integral link is eliminated, the impacts of voltage and current signal transmission difference on protection accuracy are mitigated and the performance is superior to the existing differential protection methods.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877090).

**Key words:** Rogowski coil; integrator; capacitance current compensation; virtual type of Rogowski coil; current differential protection

## 0 引言

罗氏线圈电子式电流互感器是一种特殊的电流互感器<sup>[1-4]</sup>, 具有测量频带宽、动态响应范围大、无

饱和效应、绝缘结构简单、体积小、重量轻等诸多优点, 在电力系统中得到了广泛的应用<sup>[5-10]</sup>。罗氏线圈输出信号与被测电流信号的微分成正比, 因此罗氏线圈电流互感器通常配置积分环节, 以恢复被测的电流信号<sup>[11]</sup>。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877090)

罗氏线圈电流互感器的积分环节会放大罗氏

线圈和采样环节产生的传变误差,可能造成电流传变严重失真,导致保护误动作。文献[12]给出了某变电站投运期间罗氏线圈电流互感器异常输出导致保护误动的案例。故障录波显示,异常电流峰值达5倍以上额定电流,持续时间长达70 ms。文献[13]分析了罗氏线圈电流互感器积分环节造成电流传变严重失真的原因。当模数变换环节采样频率低于被测信号中高频信号频率且两者频率满足一定关系时,数字量信号将近似为直流量。同时,由于罗氏线圈自身的传变特性,在高频暂态信号的激励下,罗氏线圈输出中将会叠加衰减直流分量。上述两部分直流分量经后续的积分环节处理后将被放大,可能会造成电流传变严重失真。

目前,上述可能造成罗氏线圈电流互感器异常输出的因素中,仅频率混叠问题存在有效的解决措施。通过采用适当的低通滤波措施,可抑制采样过程中的频率混叠效应[14]。但在高频信号激励下罗氏线圈产生的衰减直流分量无法被消除[15]。

针对罗氏线圈电流互感器异常输出可能导致继电保护误动的问题,很多学者和工程技术人员提出了对模拟积分器和数字积分算法进行优化的方法[16-19]。模拟积分器优化后尽管在原理上表现出良好的性能,但是在具体电路中,由于元器件自身的误差以及温漂等因素使其在实际应用中性能并不稳定[16]。数字积分器结构简单稳定,不受温漂影响,但是准确度受A/D转换准确度、采样点数及计算准确度的影响,也存在一定的局限[17]。文献[18]提出了采用积分器输出反馈调理环节来调节最终输出的直流分量,但该方法主要针对前端残余的直流分量和数据精度误差长时间累计产生的直流分量。且为了满足对谐波相位误差的要求,积分器一般较大的时间常数[20-21],导致衰减直流分量会长时间存在于积分器的输出中,从而加剧了附加分量对保护动作行为的影响。

本文提出了线路保护直接采用罗氏线圈微分信号输出的改进思路,并以差动保护为例,提出了一种基于罗氏线圈微分信号输出的等传变差动保护方法。对于长距离输电线路,差动保护性能会受到分布电容电流的影响,需进行电容电流补偿[22-24]。目前电子式电压互感器的电容分压器可分为输出电压和输入成正比的电容分压器型以及输出和输出的微分成比例的微分型电容分压器型[25]。本文以比例型分压器为例进行说明。

基于输电线路等传变理论[26-27],输电线路沿线电压和电流经过相同的线性电路传变后,其相互关系不会发生变化,仍满足原输电线路分布参数模型。

将电压量信号经与罗氏线圈传变特性一致的虚拟罗氏线圈数字传变处理,使得差动保护所使用的电压量和电流量经过相同的传变环节。

本文以输电线路两侧均采用罗氏线圈电流互感器为例,对提出的差动保护新方法进行说明,当一侧为常规互感器时,对常规互感器侧电流采用与电压量相同虚拟罗氏线圈等传变处理。

## 1 罗氏线圈电流互感器暂态传变特性

罗氏线圈等效电路如图1所示。 $M$ 为罗氏线圈的互感, $i(t)$ 为一次电流, $e(t)$ 为线圈的感应电动势, $R_s$ 为线圈内阻, $L$ 为线圈自感, $C_0$ 为线圈匝间电容, $R_a$ 为负载电阻, $u(t)$ 为输出电压信号。

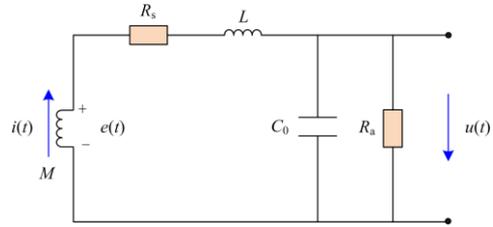


图1 罗氏线圈等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of Rogowski coil

由图1可知,罗氏线圈的传递函数为

$$H(s) = \frac{-M \cdot s}{LC_0 s^2 + \left(\frac{L}{R_a} + R_s C_0\right)s + \left(\frac{R_s}{R_a} + 1\right)} \quad (1)$$

式(1)可表示为

$$H(s) = \frac{M}{LC_0} \frac{-s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

式中: $\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC_0}} \sqrt{\frac{R_s}{R_a} + 1}$ 为无阻尼振荡频率;

$\zeta = \frac{1}{2\sqrt{LC_0}} \left(\frac{L}{R_a} + R_s C_0\right) \sqrt{\frac{R_a}{R_s + R_a}}$ 为阻尼比。

当系统运行操作时,高频暂态信号的时域形式可表示为

$$i_{\text{hf}}(t) = I_{\text{hf}} e^{-\alpha t} \sin(\beta t) \quad (3)$$

式中: $1/\alpha$ 为输入信号的衰减时间常数; $\beta$ 为角频率。

其对应的拉普拉斯变换后的表达式为

$$i_{\text{hf}}(s) = I_{\text{hf}} \frac{\beta}{(s + \alpha)^2 + \beta^2} \quad (4)$$

罗氏线圈的输出信号可以写成

$$U(s) = \frac{-M \beta I_{\text{hf}}}{LC_0} \frac{s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \frac{1}{(s + \alpha)^2 + \beta^2} \quad (5)$$

1)  $\zeta \neq 1$ , 式(5)的时域形式为

$$U(t) = \frac{-M\beta I_{\text{hf}}}{LC_0} (K_{i1}e^{s_1 t} + K_{i2}e^{s_2 t} + K_{i3}e^{s_3 t} + K_{i4}e^{s_4 t}) \quad (6)$$

式中:  $s_1 = -\zeta\omega_n + \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$ 、 $s_2 = -\zeta\omega_n - \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$ 、 $s_3 = -\alpha + j\beta$ 、 $s_4 = -\alpha - j\beta$  为分母多项式等于零的方程的根;  $K_{i1} = \frac{s_1}{(s_1 - s_2)(s_1 - s_3)(s_1 - s_4)}$ ;  $K_{i2} =$

$$\frac{s_2}{(s_2 - s_1)(s_2 - s_3)(s_2 - s_4)}; K_{i3} = \frac{s_3}{(s_3 - s_1)(s_3 - s_2)(s_3 - s_4)};$$

$$K_{i4} = \frac{s_4}{(s_4 - s_1)(s_4 - s_2)(s_4 - s_3)}。$$

若  $\zeta > 1$ ,  $s_1$  和  $s_2$  为实数, 式(6)整理后可得

$$U(t) = \frac{-M\beta I_{\text{hf}}}{LC_0} \left[ K_{i1}e^{s_1 t} + K_{i2}e^{s_2 t} + \sqrt{4K_{i3}K_{i4}} e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \varphi_{i1}) \right] \quad (7)$$

式中:

$$\varphi_{i1} =$$

$$\arctan \frac{-\beta[(\alpha + s_1)(\alpha + s_2) - \beta^2] + \alpha\beta(2\alpha + s_1 + s_2)}{\alpha[(\alpha + s_1)(\alpha + s_2) - \beta^2] + \beta^2(2\alpha + s_1 + s_2)}。$$

若  $0 < \zeta < 1$ , 令  $p = \zeta\omega_n$ ,  $q = \omega_n\sqrt{1 - \zeta^2}$ ,  $s_1 = -p + jq$ ,  $s_2 = -p - jq$ 。式(6)整理后可得

$$U(t) = \frac{-M\beta I_{\text{hf}}}{LC_0} \left[ \sqrt{4K_{i1}K_{i2}} e^{-pt} \sin(qt + \varphi_{i2}) + \sqrt{4K_{i3}K_{i4}} e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \varphi_{i3}) \right] \quad (8)$$

式中:

$$\varphi_{i2} =$$

$$\arctan \frac{-q[(p - \alpha)^2 - (q^2 - \beta^2)] + 2pq(p - \alpha)}{p[(p - \alpha)^2 - (q^2 - \beta^2)] + 2q^2(p - \alpha)}$$

$$\varphi_{i3} =$$

$$\arctan \frac{-\beta[(p - \alpha)^2 - (\beta^2 - q^2)] + 2\alpha\beta(\alpha - p)}{\alpha[(p - \alpha)^2 - (\beta^2 - q^2)] + 2\beta^2(\alpha - p)}$$

2)  $\zeta = 1$ , 罗氏线圈传递函数特征方程的根  $s_1 = s_2 = -\omega_n$ , 罗氏线圈的输出可表示为

$$U(t) = \frac{-M\beta I_{\text{hf}}}{LC_0} \left[ K'_{i1}te^{s_1 t} + K'_{i2}e^{s_1 t} + \sqrt{4K'_{i3}K'_{i4}} e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \varphi_{i4}) \right] \quad (9)$$

式中:  $K'_{i1} = \frac{s_1}{(s_1 - s_3)(s_1 - s_4)}$ ;  $K'_{i2} = -K'_{i3} - K'_{i4}$ ;

$$K'_{i3} = \frac{s_3}{(s_3 - s_1)(s_3 - s_4)}; K'_{i4} = \frac{s_4}{(s_4 - s_1)(s_4 - s_3)};$$

$$\varphi_{i4} = \arctan \frac{-\beta(\alpha + s_1) + \alpha\beta}{\alpha(\alpha + s_1) + \beta^2}。$$

由式(7)和式(8)可见, 高频衰减信号经罗氏线圈的输出可分为两部分: 一部分与输入有相同的衰减时间常数和频率; 另一部分衰减时间常数与罗氏线圈参数有关,  $\zeta > 1$  时为衰减直流分量,  $0 < \zeta < 1$  时为衰减高频分量。由式(9)可见, 随着时间的变化, 其第一项将引入更大的瞬态分量。因此, 从罗氏线圈电流互感器的设计出发, 应避免出现  $\zeta = 1$  的情况。

罗氏线圈输出的信号经采集单元转换为数字信号后进行积分。因此, 积分器的输入信号可能为衰减高频信号或者非周期信号。数字积分器的传递函数可表示为

$$H(z) = \frac{k_1(z+1)}{z - e^{-cT}} \quad (10)$$

式中:  $k_1$  为积分器的比例系数;  $c$  为积分器的参数;  $T$  为采样间隔。

其时域表达式为

$$H(t) = -k_1 e^{cT} \delta(t) + k_1(1 + e^{cT})e^{-ct} \quad (11)$$

1) 输入为衰减高频信号

若积分器的输入为衰减高频信号  $i_{\text{hf}}(t) = I_m e^{-\alpha t} \sin \beta t$ , 则积分器的输出可表示为

$$i_{\text{out}}(t) = \frac{k_1 I_m}{\sqrt{A_1^2 + A_2^2}} e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \varphi_{i1}) + k_1 I_m \frac{\beta(1 + e^{cT})}{(-\alpha + c)^2 + \beta^2} e^{-ct} \quad (12)$$

式中:  $A_1 = -e^{cT} + \frac{(1 + e^{cT})(-\alpha + c)}{(-\alpha + c)^2 + \beta^2}$ ;  $A_2 =$

$$-\frac{(1 + e^{cT})\beta}{(-\alpha + c)^2 + \beta^2}; \varphi_{i1} = \arctan \frac{A_2}{A_1}。$$

2) 输入为非周期信号

若积分器的输入信号为非周期信号  $i_{\text{dc}}(t) = I_m e^{-\alpha t}$ , 则积分器的输出可表示为

$$i_{\text{out}}(t) = \left( -e^{cT} + \frac{1 + e^{cT}}{-\alpha + c} \right) k_1 I_m e^{-\alpha t} - \frac{k_1 I_m (1 + e^{cT})}{-\alpha + c} e^{-ct} \quad (13)$$

由式(12)和式(13)可见, 衰减高频信号或者非周期信号经积分器后的输出可分为两部分: 一部分与输入信号有相同的频率和衰减时间常数; 另一部分为非周期信号, 衰减时间常数与积分器参数有关。由文献[20-21]可知, 为满足谐波和空充情况下互感器的输出有良好的性能, 电子互感器设计时电子互感器配套的积分器需有较大时间常数。因此附加的

衰减直流分量会长时间存在于积分器的输出中，从而保护的性能。

## 2 基本原理

现有采用罗氏线圈电流互感器的差动保护数据传变环节如图 2 所示。

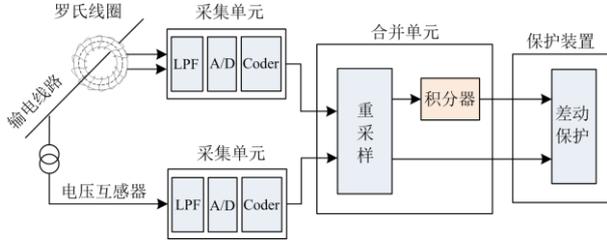


图 2 常规差动保护数据传变环节

Fig. 2 Data transfer in conventional differential relay

等传变差动保护数据传变环节如图 3 所示，取消合并单元中的积分环节，在保护装置中将电压信号经虚拟罗氏线圈进行传变环节补偿。

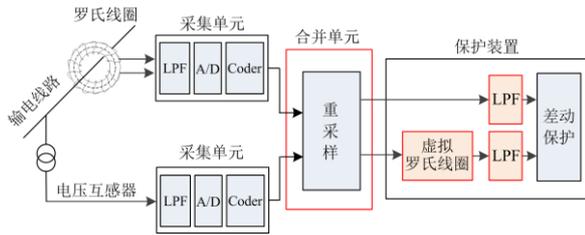


图 3 等传变差动保护数据传变环节

Fig. 3 Data transfer in equal transfer differential relay

### 2.1 虚拟数字罗氏线圈

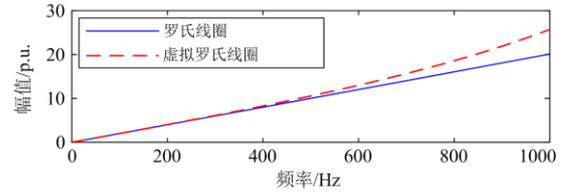
对式(1)所示罗氏线圈的传递函数用预修正双线性变换进行离散，可得虚拟罗氏线圈的传递函数为

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (14)$$

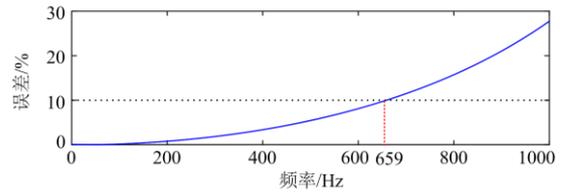
式中， $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_0$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  为式(1)离散后的系数，与罗氏线圈参数有关。以某公司生产的罗氏线圈为例，图 1 中线圈内阻  $R_s = 84.1 \Omega$ ，电感  $L = 5.7 \text{ mH}$ ，负载电阻  $R_a = 8.66 \text{ k}\Omega$ ，互感系数  $M = 2.571 \mu\text{H}$ ，杂散电容  $C_0 = 30 \text{ nF}$ ，则有虚拟罗氏线圈  $a_0 = 1$ 、 $a_1 = 1.9096$ 、 $a_2 = 0.9514$ 、 $b_0 = -0.0197$ 、 $b_1 = 0$ 、 $b_2 = 0.0197$ 。

虚拟数字罗氏线圈和实际罗氏线圈存在传变误差，因此需对虚拟数字罗氏线圈的传变误差进行分析。图 4(a)给出了罗氏线圈与虚拟罗氏线圈的幅频响应，图 4(b)为虚拟罗氏线圈的传变误差。

电压经虚拟罗氏线圈传变环节补偿后，相对传变误差仍随信号频率的升高逐渐增大，因此需滤除信号中的高频分量。考虑允许的幅频响应误差为 10%，对应的频率为 659 Hz，如图 4(b)所示。因此，图 3 中保护装置的数字低通滤波器可按截止频率不大于 659 Hz 设计。



(a) 幅频响应



(b) 传变误差

图 4 罗氏线圈与虚拟罗氏线圈的幅频响应差异

Fig. 4 Difference of amplitude frequency response between Rogowski coil and virtual Rogowski coil

### 2.2 线路电容电流

采用输电线路  $\Pi$  型等值电路计算线路电容电流，如图 5 所示，图中  $Z_{\text{line}}$  为线路全长阻抗， $C_{\text{line}}$  为线路全长电容。线路电容电流等于线路两侧对地分布电容支路电流之和。

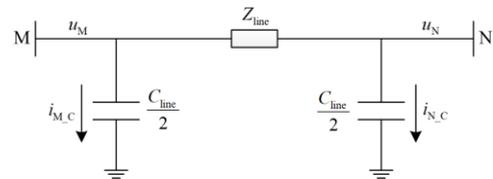


图 5 线路  $\Pi$  型等效电路

Fig. 5 Equivalent  $\Pi$  model circuit of line

以 M 侧电容电流为例，A 相电容电流可用式(15)计算。

$$i_{MA,c} = \frac{C_1}{2} \left( \frac{du_{MA}}{dt} + k_c \frac{d3u_{M0}}{dt} \right) \quad (15)$$

式中： $k_c = (C_0 - C_1)/3C_1$ ； $C_1$ 、 $C_0$  分别为全线正序、零序电容； $u_{MA}$  为 M 侧 A 相电压； $u_{M0}$  为 M 侧零序电压。

为使电容电流计算中采用的电压与电流信号传

变特性保持一致, 电容电流计算中的电压需经虚拟数字罗氏线圈进行传变环节补偿, 可用式(16)表示。

$$i'_{MA,c}(k) = \frac{C_1}{2} \left[ \frac{u'_{MA}(k+1) - u'_{MA}(k-1)}{2\Delta t} + k_C \frac{3u'_{M0}(k+1) - 3u'_{M0}(k-1)}{2\Delta t} \right] \quad (16)$$

式中:  $u'_{MA}$  和  $u'_{M0}$  分别为经虚拟数字罗氏线圈等传变处理的 M 侧 A 相电压和零序电压;  $\Delta t$  为采样间隔;  $k$  为采样序号。

### 2.3 并联电抗器电流

超高压长距离输电线路一般装设并联电抗器, 差动保护计算时需计及并联电抗器电流。并联电抗器等效电路如图 6 所示。

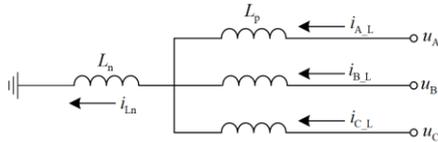


图 6 并联电抗器等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of shunt reactor

计算并联电抗器的电流, 以 A 相为例:

$$i_{A,L}(k) = i_{A,L}(k-1) + \frac{\Delta t}{2L_p} [u_A(k) - u_{Ln}(k) + u_A(k-1) - u_{Ln}(k-1)] \quad (17)$$

式中:  $u_A$ 、 $u_B$ 、 $u_C$  分别为保护安装处三相电压;  $u_{Ln} = (u_A + u_B + u_C)/(L_p/L_n + 3)$  为中性点小电抗器首端电压;  $L_p$  为并联电抗器电感电抗;  $L_n$  为中性点小电抗器电感。

等传变后的电抗器电流可用式(18)表示。

$$i'_{A,L}(k) = i'_{A,L}(k-1) + \frac{\Delta t}{2L_p} [u'_A(k) - u'_{Ln}(k) + u'_A(k-1) - u'_{Ln}(k-1)] \quad (18)$$

式中:  $u'_{Ln} = (u'_A + u'_B + u'_C)/(L_p/L_n + 3)$  为经虚拟数字罗氏线圈后的小电抗器首端电压;  $u'_A$ 、 $u'_B$ 、 $u'_C$  分别为经虚拟罗氏线圈后的保护安装处三相电压。

### 2.4 差动保护动作判据

差动保护动作判据为

$$[i'_{cd}(k) \geq H_{is} i_{set}] I [i'_{cd}(k) \geq K i'_{re}(k)] \quad (19)$$

其中

$$\begin{cases} i'_{cd}(k) = |i'_M(k) + i'_N(k)| \\ i'_{re}(k) = |i'_M(k) - i'_N(k)| \end{cases}$$

式中:  $H_{is}$  为罗氏线圈在工频下的幅值响应;  $i_{set}$  为差动定值;  $K$  为制动系数;  $i'_M$ 、 $i'_N$  分别为线路 M、N 侧电流, 该电流为经电容电流和电抗器电流补偿

后的值。

对于采样值差动保护, 每个采样点均进行式(9)所示判别, 连续  $R$  次采样点判别中如有  $S$  次满足式(19), 则差动保护动作。

## 3 仿真实验

### 3.1 仿真模型及参数

为了验证本文所提出的等传变差动保护性能, 采用 PSCAD 仿真软件建立如图 7 所示的 500 kV 输电线路模型。

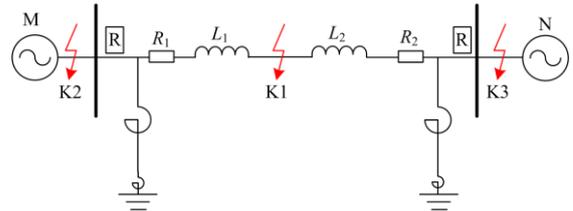


图 7 500 kV 输电线路系统模型

Fig. 7 System model of 500 kV transmission line

线路模型参数:  $R_1 = 0.0196 \Omega/\text{km}$ ,  $L_1 = 0.8913 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_1 = 0.0135 \mu\text{F}/\text{km}$ ,  $R_0 = 0.1828 \Omega/\text{km}$ ,  $L_0 = 2.7375 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_0 = 0.0092 \mu\text{F}/\text{km}$ , 输电线路全长 300 km, 两侧均安装并联电抗器, 并联电抗器参数为  $L_p = 8.3392 \text{ H}$ ,  $L_n = 3.1455 \text{ H}$ 。

M 侧系统参数:  $R_{M1} = 1.3084 \Omega$ ,  $X_{M1} = 24.9658 \Omega$ ,  $R_{M0} = 5.6238 \Omega$ ,  $X_{M0} = 24.3592 \Omega$ 。N 侧系统参数:  $R_{N1} = 2.6168 \Omega$ ,  $X_{N1} = 49.9315 \Omega$ ,  $R_{N0} = 11.2476 \Omega$ ,  $X_{N0} = 48.7185 \Omega$ 。

罗氏线圈采用本文第 2.1 节给出的参数, 罗氏线圈电流互感器一次额定电流为 2500 A。

差动保护动作判据如式(19)所示, 其中差动定值为 0.1 倍额定电流, 比例制动系数  $K$  取 0.6, 差动判据  $R$  取 40,  $S$  取 21。

### 3.2 数字低通滤波器设计

根据 2.1 节的分析, 数字低通滤波器的阻带截止频率应不大于 659 Hz。图 3 中保护装置内低通滤波器采用 FIR 型滤波器, 具体为

$$y(n) = \sum_{k=0}^9 b_k x(n-k) \quad (20)$$

式中, 滤波器系数  $b_0$ — $b_9$  分别为 0.0213、0.0536、0.0986、0.1426、0.1700、0.1700、0.1426、0.0986、0.0536、0.0213。

图 8 为数字低通滤波器的幅频响应。图 9(a)为罗氏线圈和虚拟罗氏线圈的输出信号, 图 9(b)为增加低通滤波器后罗氏线圈和虚拟罗氏线圈输出信号。

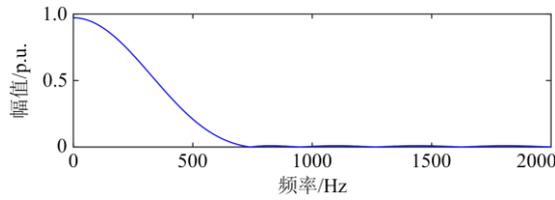
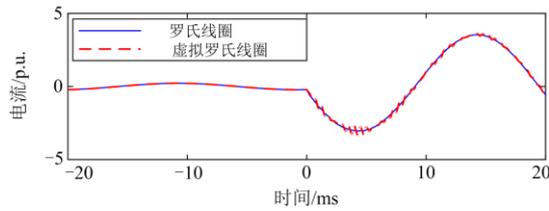
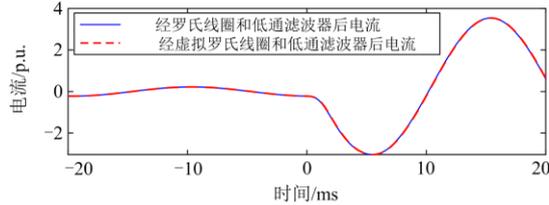


图 8 数字低通滤波器幅频响应

Fig. 8 Amplitude-frequency response of digital low-pass filter



(a) 电流经罗氏线圈和虚拟罗氏线圈输出



(b) 增加低通滤波器后罗氏线圈和虚拟罗氏线圈输出

图 9 Rogowski coil and virtual Rogowski coil output signals

由图 9 可知，电流经罗氏线圈和虚拟罗氏线圈后输出信号存在一定差异，虚拟罗氏线圈会导致高频分量增大，在滤除高频分量后，电流经罗氏线圈和虚拟罗氏线圈无明显差异。

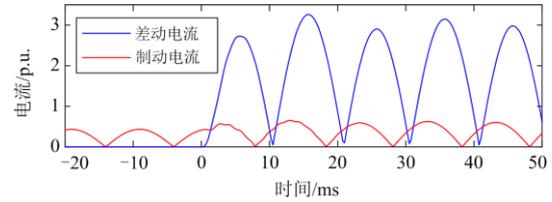
### 3.3 保护性能分析

在线路区内外发生单相接地故障的情况下，等传变差动保护计算的差动电流和制动电流如图 10 所示。横坐标为时间，单位为 ms，以故障发生时刻为零时刻。纵轴为电流微分信号幅值，是以罗氏线圈二次额定值为基准的标么值。

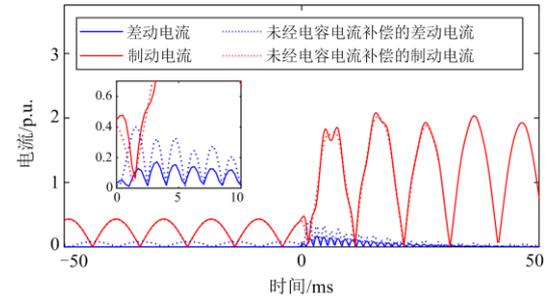
由图 10 可知，在区内故障的情况下差动电流远大于制动电流，等传变差动保护能够可靠动作；而区外故障的情况下差动电流远小于制动电流，等传变差动保护能够可靠不动作。对比图 10(b)中经电容电流补偿前后的电流，电容电流补偿可以显著减小区外故障情况下的差动电流。

为进一步验证等传变差动保护的可靠性，对系统不同位置发生各种类型故障的情况进行仿真，结果如表 1 所示。表 1 中，动作时间单位为 ms，“NF”表示保护不动作。仿真结果表明，区内故障包括高阻故障时均可在故障发生 7 ms 内快速动作，区外故

障时可靠不动作。



(a) 区内故障



(b) 区外故障

图 10 差动电流和制动电流

Fig. 10 Differential current and restraint current

表 1 仿真结果

Table 1 Simulation results

故障点位置	单相接地			两相短路	两相接地	三相短路	
	0 Ω	100 Ω	300 Ω				
内部故障	0%	5	5.75	7	6.25	5.5	5.5
	25%	5.25	6.25	6	5.5	6.25	6.5
	50%	5.5	6	6.25	5.75	5.75	6
	75%	5.25	6	6	6.25	5.75	6
	100%	5	5.75	5.25	5.5	6.25	6.25
外部故障	K2	NF	NF	NF	NF	NF	NF
	K3	NF	NF	NF	NF	NF	NF

### 3.4 不同差动保护算法对比分析

在系统正常运行期间，通过在一次电流中叠加高频暂态信号，模拟产生类似文献[13]中给出的导致保护误动作的情况，对比等传变差动保护和常规差动保护算法的动作行为。

常规差动保护算法的数据传变环节如图 2 所示，合并单元中数字积分器的传递函数为

$$H(z) = \frac{-0.0416 \cdot (1 + z^{-1})}{1 - 0.9975z^{-1}} \quad (21)$$

文献[18]提出了一种数字积分器的设计方案，该方案通过输出反馈调理环节对输出的直流分量进行调节，以减少前端残余的直流分量和数据精度误差经长时间积累产生的直流分量。将本文提出的采用微分输出的差动保护新方法和常规差动保护方法进行比较。常规差动保护所用积分器分别采用传统的数字积分器以及文献[18]提出的改进型积分器。

在图 7 的 M 侧一次电流中叠加图 11(a)的短时高频暂态信号, 带积分器的罗氏线圈电流互感器输出电流如图 11(b)所示。图 11 中以叠加高频暂态信号的起始时刻为 0 时刻。由图 11 可见, 在一次叠加高频暂态信号后, 经传统积分器和改进型积分器输出的电流中均附加了一定的衰减直流分量。改进型积分器输出中附加的直流分量衰减的更快, 但暂态值可能大于传统积分器的输出。

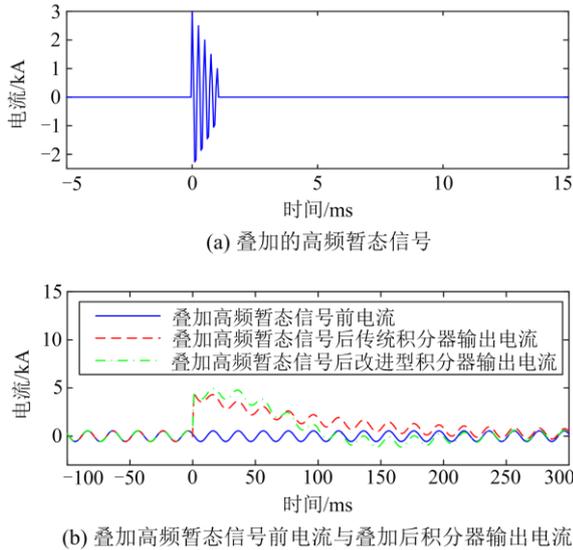


图 11 罗氏线圈电流互感器异常输出波形  
Fig. 11 Abnormal output waveform of Rogowski coil current transformer

等传变差动动作情况如图 12 所示, 传统和改进型积分器采样值差动动作情况如图 13 和图 14 所示。传统和改进型积分器的采样值差动保护的电容电流补偿方法与等传变差动保护相同, 动作定值均设置为 0.1 倍额定电流。

图 12—图 14 中, 横坐标为时间, 单位为 ms, 以叠加高频暂态信号的时刻为 0 时刻。1 表示保护动作, 0 表示保护不动作。图 12 中, 差动电流和制动电流曲线为电流微分瞬时值, 是以罗氏线圈二次额定值为基准的标么值。由图 12 可见, 在罗氏线圈电流互感器出现异常输出时, 等传变差动保护不会出现误动作。

图 13(a)和图 14(a)为经积分后的差动电流和制动电流瞬时值, 电流是以罗氏线圈电流互感器额定电流为基准的标么值。图 13 中的积分器为传统积分器, 图 14 中波形对应的积分器为增加了反馈环节的改进型积分器。

由图 13 和图 14 可见, 在罗氏线圈电流互感器出现异常输出时, 采样值差动保护均会出现误动作

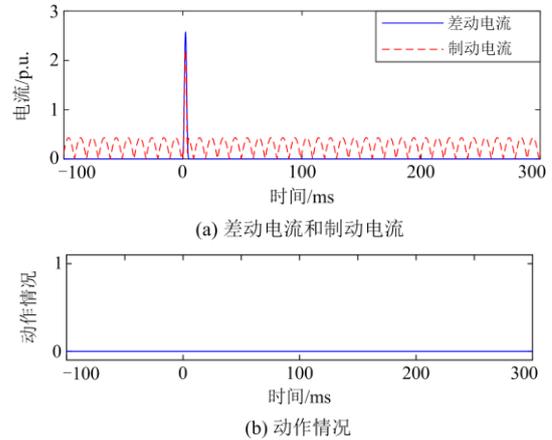


图 12 等传变差动保护算法动作情况  
Fig. 12 Calculation results of equal transfer differential relay algorithm

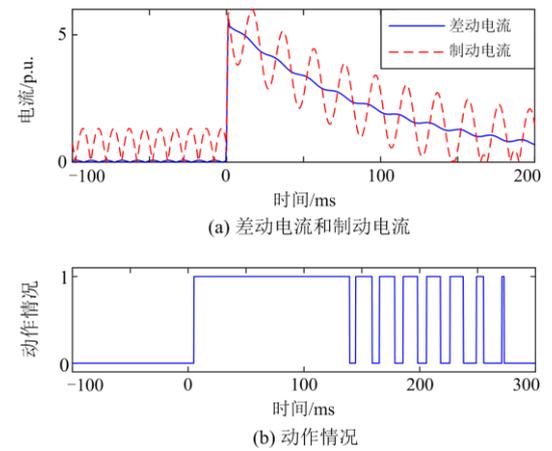


图 13 采用传统积分的采样值差动保护算法动作情况  
Fig. 13 Calculation results of sampled value differential protection algorithm using traditional integration

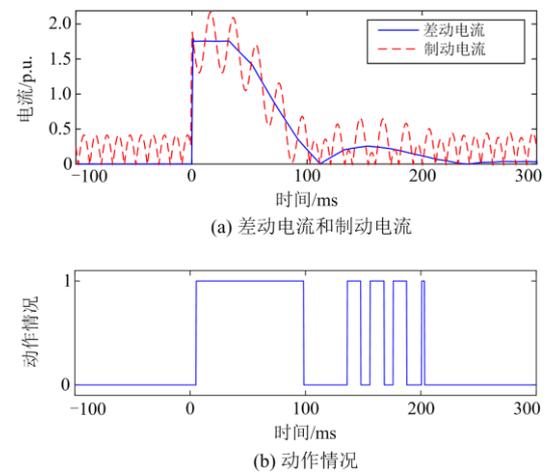


图 14 采用改进型积分的采样值差动保护算法动作情况  
Fig. 14 Calculation results of sampling value differential protection algorithm with improved integral

情况。传统积分器和改进型积分器均无法避免附加衰减直流分量导致的保护误动作情况。

仿真结果表明，等传变差动保护在区内故障时快速动作，区外故障时可靠不动作。在罗氏线圈电流互感器出现异常输出的情况下，等传变差动保护由于直接使用了罗氏线圈输出的电流微分信号，消除积分环节引入的传变误差，不会出现误动作。

#### 4 试验验证

为进一步验证本文所提等传变差动保护的性 能，研制了改进型罗氏线圈电流互感器和新型线路保护装置，如图 15 所示，并建立物理动态模拟仿真测试环境，对方案进行了试验验证。



(a) 罗氏线圈和电子采集单元



(b) 保护装置和合并单元

图 15 物理模型测试环境

Fig. 15 Physical model test environment

图 15 中，罗氏线圈参数：线圈内阻  $R_s = 564 \Omega$ ，电感  $L = 216 \text{ mH}$ ，负载电阻  $R_a = 75 \text{ k}\Omega$ ，互感系数  $M = 19.57 \mu\text{H}$ ，杂散电容  $C_0 = 30 \text{ nF}$ 。

试验模型和故障点情况设置如图 7 所示。线路模型参数： $R_1 = 0.018 \Omega/\text{km}$ ， $L_1 = 0.866 \text{ mH}/\text{km}$ ， $C_1 = 0.013 \mu\text{F}/\text{km}$ ， $R_0 = 0.246 \Omega/\text{km}$ ， $L_0 = 2.368 \text{ mH}/\text{km}$ ， $C_0 = 0.009 \mu\text{F}/\text{km}$ ，长线路为 200 km，短线路为 66 km。M 侧系统参数： $R_{M1} = 8.6813 \Omega$ ， $X_{M1} = 33.3279 \Omega$ ， $R_{M0} = 4.6144 \Omega$ ， $X_{M0} = 28.178 \Omega$ 。N 侧系统参数： $R_{N1} = 2.3284 \Omega$ ， $X_{N1} = 7.8103 \Omega$ ， $R_{N0} =$

$4.0844 \Omega$ ， $X_{N0} = 9.7164 \Omega$ 。

表 2 和表 3 给出了不同位置发生故障时，保护装置的动作情况。表 2 和表 3 中，动作时间单位为 ms，“NF”表示保护不动作。试验结果表明，保护装置在区内故障情况下可在 9 ms 内动作，区外故障时可靠不动作，保护性能不受线路长度、故障类型和故障位置的影响。

表 2 200 km 线路测试结果

Table 2 Test results of 200 km line

故障点位置	单相接地			两相短路	两相接地	三相短路	
	0 $\Omega$	50 $\Omega$	100 $\Omega$				
内部故障	0%	6	8	9	6	6.5	8
	50%	6	6	8	9	8.5	8
	100%	8.5	8	7.5	6.5	7.5	6.5
外部故障	K2	NF	NF	NF	NF	NF	NF
	K3	NF	NF	NF	NF	NF	NF

表 3 66 km 线路测试结果

Table 3 Test results of 66 km line

故障点位置	单相接地			两相短路	两相接地	三相短路	
	0 $\Omega$	50 $\Omega$	100 $\Omega$				
内部故障	0%	6	6.5	8	9	8	8.5
	100%	6	7.5	7.5	6	6	6
外部故障	K2	NF	NF	NF	NF	NF	NF
	K3	NF	NF	NF	NF	NF	NF

#### 5 结论

为消除罗氏线圈电流互感器积分环节对保护造成的不利影响，本文提出了一种直接采用罗氏线圈微分电流信号输出的线路等传变差动保护方法，得出以下结论：

1) 根据输电线路等传变理论，电流直接采用罗氏线圈输出的电流微分信号，电压也经过了传变特性相同的虚拟罗氏线圈，传变环节补偿后的电压电流相互关系，仍然满足原输电线路的分布参数模型。

2) 等传变差动保护的电流直接采用罗氏线圈输出的电流微分信号，消除了积分环节引入的传变误差对保护的影响，提高了保护的可靠性。

3) 仿真和试验结果表明，该方法不受系统故障位置和故障类型的影响，区内故障时可快速动作，区外故障时可靠不动作，应对罗氏线圈电子式互感器出现异常输出能力较强，性能优于现有方法。

#### 参考文献

[1] 王瑜, 杨忠州, 戴冬云, 等. 电子电流互感器与断路器触臂集成的绝缘结构设计[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 48-54.  
WANG Yu, YANG Zhongzhou, DAI Dongyun, et al.

- Insulation structure design of the integration of electronic current transformer and circuit breaker contact arm[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 48-54.
- [2] 王传川, 白世军, 李毅, 等. 低温环境下电子式电流互感器激光供电情况的分析与研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 135-142.
- WANG Chuanchuan, BAI Shijun, LI Yi, et al. Analysis and research on laser power supply condition of electronic current transformer under low temperature environment[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 135-142.
- [3] 周红斌, 周万竣, 张小波. 变电站电流互感器二次侧极性检测方案设计的研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 83-89.
- ZHOU Hongbin, ZHOU Wanjun, ZHANG Xiaobo. Research on the design of secondary side polarity detection scheme for CT in substation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 83-89.
- [4] 陈海滨, 杨姝楠, 陈丽雯, 等. 基于现场信号仿真技术的电流互感器误差测试技术研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(2): 133-138.
- CHEN Haibin, YANG Shunan, CHEN Liwen, et al. Research on current transformer error testing technology based on field signal simulation technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(2): 133-138.
- [5] 王宇, 孟令雯, 汤汉松, 等. ECT 采集单元积分回路的暂态特性改进及其检测系统研发[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 98-104.
- WANG Yu, MENG Lingwen, TANG Hansong, et al. Improvement of transient characteristics and development of a testing system of an integration circuit in ECT acquisition unit[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 98-104.
- [6] 李振华, 沈聚慧, 李振兴, 等. 隔离开关电弧模型及对 Rogowski 线圈电流互感器的传导干扰研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 131-139.
- LI Zhenhua, SHEN Juhui, LI Zhenxing, et al. Research on an arc model of a disconnecter for conduction interference of a Rogowski coil electronic transformer[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 131-139.
- [7] 戴魏, 郑玉平, 白亮亮, 等. 保护用电流互感器传变特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 46-54.
- DAI Wei, ZHENG Yuping, BAI Liangliang, et al. Analysis of protective current transformer transient response[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 46-54.
- [8] WU Yahui, DONG Xinzhou, MIRSAEIDI S. Modeling and simulation of air-gapped current transformer based on Preisach Theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 111-121.
- [9] GANGOLU S, SARANGI S. A novel complex current ratio-based technique for transmission line protection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(3): 57-65.
- [10] 李敏, 靳绍平, 胡琛, 等. 高压电流互感器泄漏电流测量及消除方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 156-163.
- LI Min, JIN Shaoping, HU Chen, et al. Research on leakage current measurement and elimination method of high voltage current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 156-163.
- [11] 张杰恺, 李辉, 邓吉利, 等. 基于数字积分算法的电子式电流互感器传变特性[J]. 电测与仪表, 2017, 54(2): 61-67.
- ZHANG Jiekai, LI Hui, DENG Jili, et al. Transfer characteristics of electronic current transducer based on integration algorithms[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(2): 61-67.
- [12] 白世军, 郭乐, 曾林翠, 等. 变压器空载合闸对隔离断路器电子式 CT 干扰分析及防护[J]. 高压电器, 2018, 54(8): 87-96.
- BAI Shijun, GUO Le, ZENG Lincui, et al. Interference analysis and protection of electronic current transformer in DCB during no-load closing of transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 87-96.
- [13] JING Shi, HUANG Qi, TANG Fan, 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.
- [14] JI Jianfei, YUAN Yubo, PANG Fubin, et al. Investigation on anti-interference of Rogowski coil current transformers in smart substations[C] // 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, November 26-28, 2017, Beijing, China: 1-6.
- [15] PANG Fubin, LIU Yu, JI Jianfei, 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.
- [16] 谢完成, 戴瑜兴. 罗氏线圈电子式电流互感器的积分技术研究[J]. 电测与仪表, 2011, 48(5): 10-13.
- XIE Wancheng, DAI Yuxing. Technology research of integrator for Rogowski electronic current transducer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2011, 48(5): 10-13.

- [17] 郭乐, 申狄秋, 卢家力. 电子式互感器积分方案的比较研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 111-114.  
GUO Le, SHEN Didi, LU Jiali. A comparative study of integral methods in electronic instrument transform[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 111-114.
- [18] 姚东晓, 吕利娟, 倪传坤, 等. 应用于空心线圈电子式互感器的双环数字积分器设计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(6): 96-99.  
YAO Dongxiao, LÜ Lijuan, NI Chuankun, et al. Dual loop digital integrator design for Rogowski coil electronic transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(6): 96-99.
- [19] 黄友朋, 赵山, 潘峰, 等. 电子式互感器数字相位补偿技术研究[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 113-117.  
HUANG Youpeng, ZHAO Shan, PAN Feng, et al. Research of phase compensation technology in electronic instrument transformer[J]. Electric Power, 2014, 47(4): 113-117.
- [20] 郑玉平, 潘书燕, 夏雨, 等. 变压器空投时电子式电流互感器输出励磁涌流波形异常分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 188-193.  
ZHENG Yuping, PAN Shuyan, XIA Yu, et al. Analysis on abnormal magnetizing in rush current output from electronic current transformer when no-load transformer operates[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 188-193.
- [21] 申狄秋, 朱明东, 王旭峰, 等. 罗氏线圈电流互感器谐波计量特性研究[J]. 高压电器, 2018, 54(6): 170-176.  
SHEN Didi, ZHU Mingdong, WANG Xufeng, et al. Harmonic measurement characteristics of electronic current transformer with Rogowski coil[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 170-176.
- [22] 臧怀泉, 林飞飞, 荣雅君, 等. 带并联电抗器的时域电容电流补偿算法[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3964-3971.  
ZANG Huaquan, LIN Feifei, RONG Yajun, et al. Time-domain capacitance current compensation algorithm with shunt reactors[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3964-3971.
- [23] 李振兴, 包文亮, 陈艳霞, 等. 适用于串补设备的输电线路电流差动保护新判据[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 11-19.  
LI Zhenxing, BAO Wenliang, CHEN Yanxia, et al. New criterion for current differential protection used for a transmission line with series compensation equipment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 11-19.
- [24] 朱征, 黄冰飞, 邹晓峰, 等. 基于电压突变量的差动保护同步方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 156-162.  
ZHU Zheng, HUANG Bingfei, ZOU Xiaofeng, et al. A synchronization method of differential protection based on sudden change of voltage[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 156-162.
- [25] 马朝阳, 陈铭明, 朱明东, 等. 电子式电压互感器谐波计量特性研究[J]. 高压电器, 2017, 53(9): 160-164, 170.  
MA Chaoyang, CHEN Mingming, ZHU Mingdong, et al. Research on harmonic metrological performance of electronic voltage transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(9): 160-164, 170.
- [26] 文明浩, 陈德树, 尹项根. 超高压线路等传变快速距离保护[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 145-150.  
WEN Minghao, CHEN Deshu, YIN Xianggen. Fast distance protection of EHV transmission lines based on equal transfer processes[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 145-150.
- [27] WEN Minghao, CHEN Deshu, YIN Xianggen. Instantaneous value and equal transfer processes-based current differential protection for long transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 289-299.

收稿日期: 2021-03-31; 修回日期: 2021-08-25

作者简介:

李宝伟(1984—), 男, 通信作者, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: xjtc\_libaowei@126.com

文明浩(1973—), 男, 工学博士, 教授, 研究方向为电力系统继电保护与控制。E-mail: swenmh@hust.edu.cn

(编辑 许威)