

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210372

基于整形变换降容的电流差动保护原理与实现

李振兴^{1,2}, 望周丽², 刘颖彤³, 余双喜², 谭超⁴, 翁汉琍¹

(1. 智慧能源技术湖北省工程研究中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 国网湖北省电力公司检修公司, 湖北 武汉 430014; 4. 国网宜昌供电公司, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 电流差动保护因速动性好、灵敏度高成为广域继电保护的研究热点, 但广域电流差动保护的实施使得设备间纵联通信流量骤增, 严重影响了保护性能。基于此, 提出一种基于整形变换降容的电流差动保护原理。该原理将多字节浮点型电流模值和电流相位基于单字节整形变换, 交换变换信息可以大幅降低通信量; 无需解码直接进行差动电流和制动电流计算, 构建新的差动保护判据。另外, 提出了整形变换原则, 分析了改进差动保护的灵敏度, 计算变换后的降容率。通过 PSCAD 数字仿真和动态模拟实验对保护判据进行验证, 结果表明该原理能够可靠识别区内外故障, 并具有较高的灵敏度。

关键词: 电流差动保护; 整形变换; 通信降容; 降容率; 灵敏度

Principle and realization of current differential protection based on shaping transformation and capacity reduction

LI Zhenxing^{1,2}, WANG Zhouli², LIU Yingtong³, SHE Shuangxi², TAN Chao⁴, WENG Hanli¹

(1. Hubei Engineering Research Center for Smart Energy Technology, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

3. State Grid Hubei Electric Power Company Maintenance Company, Wuhan 430014, China;

4. State Grid Yichang Electric Power Supply Company, Yichang 443002, China)

Abstract: Current differential protection has become a research hotspot in wide-area relay protection because of its fast action and high sensitivity. However, the implementation of wide-area current differential protection has caused a sudden increase in the longitudinal communication traffic between devices. This seriously affects protection performance. This paper proposes a current differential protection principle based on shaping transformation and capacity reduction. This principle transforms the current modulus and current phase of the multi-byte floating point based on single-byte shaping, and the exchange of transformed information can greatly reduce the amount of communication. The differential and braking current are directly calculated without decoding, and a new differential protection criterion is constructed. In addition, the principle of shaping transformation is proposed, the sensitivity of the improved differential protection is analyzed, and the derating rate after transformation is calculated. The protection criterion is verified by PSCAD digital simulation and a dynamic simulation experiment. The results show that this principle can reliably identify the faults inside and outside the area, and has high sensitivity.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077120).

Key words: current differential protection; shaping transformation; communication derating; derating rate; sensitivity

0 引言

电流差动保护具有全线速动的特点, 在输电线路保护应用中优于过电流保护和距离保护, 是电力主设备的主保护必配保护之一^[1-2]。随着电网结构的

扩大化与复杂化, 电力系统与通信系统之间相互渗透, 广域电流差动保护得到了广泛应用^[3-4]。但其电流信息的多点采集、累积和远程通信, 造成了系统通信量大、实时性差等缺陷, 导致保护的灵敏性和可靠性降低^[5-6]。

目前, 广域电流差动保护主要集中在原理实现、信息交换、数据压缩等方面研究^[7-10]。广域纵联保

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077120)

护通过电流的幅值相位、方向、故障分量等信息^[11-14]能快速准确地判断出区内和区外故障。其中方向元件受高阻接地、线路非全相运行和故障转换等因素影响较大。文献[15]提出了广域差动保护的判据以及实现方式,将差动环动态扩展后的差动保护用于断路器失灵的后备保护,有效解决了现有的失灵保护易误动问题。基于 Agent 技术的自治性、交互性和适应性,文献[16]构建一种自适应多 Agent 系统的广域保护体系,结合多信息融合的故障识别算法,研究了主站和子站间的信息动态协作机制。文献[17]以通信总时延最短和流量均衡为最优目标,寻找广域通信迂回路径,并通过 OPNET 通信仿真软件进行了验证。数据压缩技术能在固定通信设施的基础上提高信息的传输效率,改善通信的实时性^[18-19],结合电流差动保护算法,探索数据压缩技术在广域差动保护中的应用具有重要的工程意义。文献[20]提出一种基于分相电流突变量相位比较原理的广域继电保护故障识别算法,对电流突变量进行“1、0、-1”标记,将电流相位差反映为标记信号在一个周期内的相同度。文献[21]基于广域继电保护对数据压缩的要求,根据电流信息的不均匀冗余特征,对其进行非均匀量化,构成新的广域电流差动保护。这类方法均大大减少了每采样点需传送的信息量,有利于广域继电保护通信带宽的合理利用。

本文根据电流差动保护的信息特征,对电流进行整形变换实现信息降容,提出了一种基于整形变换降容的电流差动保护原理。该方法既有利于实现保护实时通信,缓解带宽压力,又不降低差动保护的灵敏度特性。

1 传统电流差动保护原理与通信

对于一条单回线路,两侧装有纵联差动保护装置,如图 1 所示。装置分别获得 m、n 两侧各时刻的电流采样值,并与对侧进行电流信息交换。



图 1 双端线路图

Fig. 1 Double-ended circuit diagram

在电流差动保护中,电流的正方向如图 1 所示,由母线指向线路,根据式(1)计算差动电流与制动电流,然后根据动作方程进行保护判别。

$$\begin{cases} I_d = |\dot{i}_m + \dot{i}_n| \\ I_r = |\dot{i}_m - \dot{i}_n| \end{cases} \quad (1)$$

通信技术的快速发展推动了广域保护的发展,信息采集、变换、传输过程数字化,在故障和非故障情况下都需要大量且可靠的通信。为实现故障的快速、可靠、精确切除,集中式广域保护需对区域内多点信息进行实时获取和传输,信息传输量倍增。设差动保护装置的采样率为 4 kHz,每周波有 80 点,间隔 5 ms 发送一次采样数据,则一次信息传送的数量为 987 byte。若采用降容技术使通信负载低于 256 byte,将时延控制在 15 ms 内,有利于差动保护的实现。

2 电流整形变换

2.1 整形变换原则

为保证保护灵敏度和可靠性,且有效减小通信流量,本文提出了基于整形变换的改进电流差动保护原理。在进行数据处理时直接使用四舍五入或者进 1 法,线路电流较小时,误差百分比较大,信号少量失真有可能导致保护误动;线路电流较大时,误差百分比很小,对保护影响极小。为了将误差整体控制在很小范围内,对电流进行整形变换时采用分段函数的处理方式,即电流模值较小时采用高精度变换区间,电流模值较大时采用低精度变换区间,以达到减小通信量的目的。

使用分段函数的形式对电流模值进行整形变换,以 $2I_N$ 和 $9.7I_N$ 为界限将其分段,具体变换规则如式(2)所示。

$$I' = \begin{cases} \left\lfloor \frac{I}{0.02I_N} \right\rfloor & 0 \leq I < 2I_N \\ \left\lfloor \frac{I}{0.05I_N} \right\rfloor + 60 & 2I_N \leq I < 9.7I_N \\ 254 & I \geq 9.7I_N \end{cases} \quad (2)$$

式中: I 和 I' 分别代表变换前后的电流值。第一段与第二段的最高绝对误差分别为 $0.02I_N$ 与 $0.05I_N$,当电流模值较小时使得相对误差很小,能够有效防止误差引起的保护误动或拒动。

对电流相位进行整形变换,如式(3)所示。

$$\varphi' = \left\lfloor \frac{\varphi}{1.5} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{120 \cdot \text{rad}}{\pi} \right\rfloor \quad (3)$$

式中: φ 、 φ' 分别代表变换前后的角度; rad 为弧度制表示的相角。

2.2 整形变换的降容率

电流整形变换的过程就是数据压缩降容的过程,本文使用降容率来衡量数据压缩程度,如式(4)所示。

$$R_{CR} = \frac{\text{源代码长度} - \text{压缩后代码长度}}{\text{源代码长度}} \times 100\% \quad (4)$$

估算的通信量按实际应用中允许的最小信息量计算, ABC 三相电流信息, 不考虑通信规约要求的附加信息(如校验信息等)。假设采样频率为每周波 80 个点, 每隔 5 ms 传送一次。

传统电流差动保护的每个采样点一般由 8 个字节编码, 通信数据报头为 67 个字节, 通信量为 $D_{Data} = 67 + 8 \times 20 \times 3 = 547$ 。

电流整形变换分别将幅值与相位压缩为单字节, 故通信量为 $D_{Data} = 67 + 2 \times 20 \times 3 = 187$ 。

因此, 由式(4)可得电流整形变换的降容率为

$$R_{CR} = \frac{Data - Data'}{Data} \times 100\% = 65.81\%。$$

根据上述分析可知, 对电流进行整形变换后, 理论上至少可以压缩掉 60% 的通信量, 可以明显降低通信堵塞的概率, 加快信息传输速度。

3 差动保护新原理

3.1 保护新原理

改进的电流差动保护将变换后的数据进行编码传输至对侧保护装置, 然后进行差动电流和制动电流的计算与保护判别。整形变换后的电流相量 i' 为

$$i' = I' \angle 1.5\varphi' \quad (5)$$

整形变换后的相量与电流相量具有相似的形式, 但并不具有实际物理意义, 仅用于差动电流和制动电流的计算, 可得其表达式为

$$\begin{cases} I'_d = |I'_m \angle 1.5\varphi'_m + I'_n \angle 1.5\varphi'_n| \\ I'_r = |I'_m \angle 1.5\varphi'_m - I'_n \angle 1.5\varphi'_n| \end{cases} \quad (6)$$

传统电流差动保护常采用二折线或三折线式的动作特性作为保护判据, 本文根据故障的实际情况来选择保护判据, 如式(7)所示。

$$\begin{cases} I'_d > I'_{op} \\ I'_d > K'_{res} \cdot I'_r \end{cases} \text{或} \begin{cases} I'_d > I'_{op1} \\ I'_d > K'_{res1} \cdot I'_r \\ I'_d > K'_{res2} \cdot I'_r + (1 - \frac{K'_{res2}}{K'_{res1}}) \cdot I'_{op2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: I'_{op} 、 K'_{res} 分别为二折线式判据的启动电流和比率制动系数, 一般取 $I'_{op} = 10$ 、 $K'_{res} = 0.5 \sim 0.6$;

K'_{res1} 、 K'_{res2} 为三折线式判据的比率制动系数, 直接按传统电流差动保护取值; I'_{op1} 和 I'_{op2} 分别为保护二段和三段的启动电流, 按电流整形变换规则进行转换, 整定时需考虑分布电容的影响。

3.2 灵敏度分析

通过比较灵敏度来对比电流差动保护判据在故障状态下的动作性能。令电流整形变换前后的灵敏度分别为 K_{sen} 、 K'_{sen} 。

$$K_{sen} = \frac{I_d}{I_r} \quad (8)$$

$$K'_{sen} = \frac{I'_d}{I'_r} \quad (9)$$

区内故障时, 灵敏度应大于 1, 其值越高, 保护灵敏性越高; 区外故障时, 灵敏度应小于 1, 其值越低, 保护安全性越高。

假设线路 m 侧电流幅值 $I_m = k_1 I_N$, n 侧电流幅值 $I_n = k_2 I_N$, 且 $I_m < I_n$, 定义电流比例系数为

$$k = \frac{I_n}{I_m} = \frac{k_2}{k_1} \quad (10)$$

通过推导得到两侧整形变换后电流关系表达式, 如式(11)所示。

$$I'_n = kI'_m + \Delta I' \quad (11)$$

其中 $\Delta I' \leq 0$, 其值与两侧电流大小有关, 随电流比例系数 k 增大而减小。由灵敏度的定义可知, $\Delta I'$ 的存在是引起 K_{sen} 与 K'_{sen} 不同的关键因素。

假设 i'_m 与 i'_n 的夹角为 φ , 且 $\varphi \geq 0$ 。令

$$\begin{cases} i'_m = I_m \angle \varphi \\ i'_n = I_n \angle 0 \end{cases} \quad (12)$$

则整形变换后的电流相量为

$$\begin{cases} i'_m = I'_m \angle 1.5\varphi' \\ i'_n = I'_n \angle 0 \end{cases} \quad (13)$$

进一步代入式(8)、式(9), 可得传统差动保护灵敏度 K_{sen} 与改进差动保护灵敏度 K'_{sen} , 如式(14)所示。通过对两个灵敏度, 便于分析改进差动保护的灵敏度。

$$\begin{cases} K_{sen} = \frac{k + 1 \angle \varphi}{k - 1 \angle \varphi} \\ K'_{sen} = \frac{k + 1 \angle 1.5\varphi' + \frac{\Delta I'}{I'_m}}{k - 1 \angle 1.5\varphi' + \frac{\Delta I'}{I'_m}} \end{cases} \quad (14)$$

由电流相量的编码可知, φ 与 $1.5\varphi'$ 最大角差为 1.5° , 为便于分析, 将其忽略不计, 令

$$K'_{sen} = \frac{k + 1 \angle \varphi + \frac{\Delta I'}{I'_m}}{k - 1 \angle \varphi + \frac{\Delta I'}{I'_m}} \quad (15)$$

由推导结果可知,灵敏度大小受电流比例系数、相角差的影响。当 $\varphi \leq 90^\circ$ 时,一般为区内故障, $K'_{sen} \geq K_{sen} \geq 1$;当 $\varphi > 90^\circ$ 时,一般为区外故障,此时 $K'_{sen} \leq K_{sen} < 1$ 。图2分别给出了 $\varphi = 60^\circ$ 、 $\varphi = 120^\circ$ 时, I_m 从 I_N 到 $3I_N$, I_n 从0到 $10I_N$ 变化时两种原理的灵敏度。其中, k_1 和 k_2 分别为m侧、n侧电流与额定电流的比例系数,虚线表示传统电流差动保护的灵敏度变化曲线,实线表示改进的电流差动保护的灵敏度变化曲线。

由图2(a)可知,区内故障时,改进电流差动保护的灵敏度大于等于传统电流差动保护的灵敏度,且都始终大于1,易于保护快速动作。由图2(b)可知,区外故障时,改进电流差动保护的灵敏度小于等于传统电流差动保护的灵敏度,且都始终小于1,保护具有更好的制动特性。

同样地,假设m侧电流保持不变,图3给出了

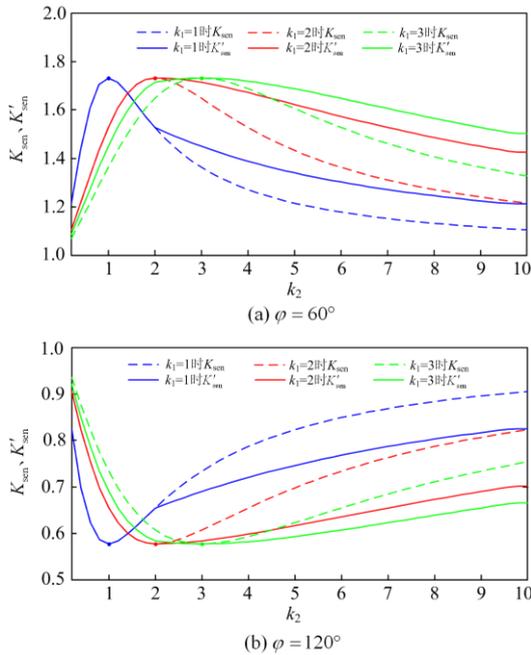


图2 灵敏度与电流比例系数的关系

Fig. 2 Relationship between sensitivity and current proportional coefficient

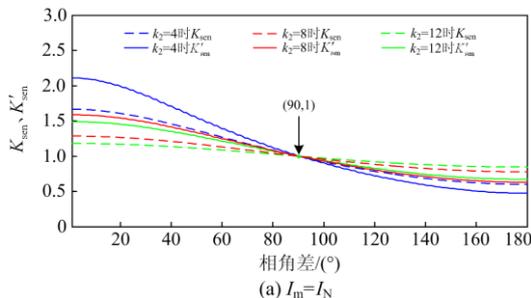


图3 灵敏度与相角差的关系

Fig. 3 Relationship between sensitivity and phase angle difference

灵敏度随相角差变化的曲线。由图可知,两种原理以 90° 相角差为分界点,小于 90° 时灵敏度均大于1,大于 90° 时灵敏度均小于1,这表明两侧电流幅值相差很大时,保护仍能准确地识别出区内或区外故障,对高接地电阻短路故障有很强的适应性。

4 仿真分析与验证

4.1 基于PSCAD的数字仿真实验

利用PSCAD软件搭建如图1所示的双端电源系统,其中,01G和02G为理想电压源,电压等级为1000kV,m、n两侧线路均为50km,mn线路为200km,线路单位阻抗为 $Z_l = 0.01950 + 0.27796j(\Omega)$,忽略电导。m侧电源相角超前n侧电源相角 25° ,故障设置在0.1s时发生,持续时间为0.1s,系统采样频率设置为5kHz。分别对区外(m侧外部出口 f_1)和区内(线路mn中点 f_2)进行各种短路故障实验,考察改进的差动保护动作性能。

4.1.1 故障仿真

当A相发生接地短路时,电流模值的整形变换结果如图4所示。图中 I_m 、 I'_m 表示m侧变换前后的电流值; I_n 、 I'_n 表示n侧变换前后的电流值。

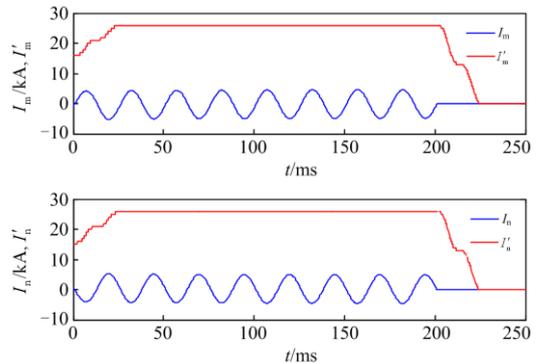


图4 电流整形变换

Fig. 4 Current shaping transformation

以线路 f_2 处发生AB相间短路为例,波形如图5所示。图中, I_m 、 I_n 分别是m、n两侧电流采样值;

I'_d 、 I'_r 是变换后的差动电流和制动电流; op' 和 K'_{sen} 分别表示保护的动作情况和灵敏度。显然, 保护的動作情况能正确反映故障情况。

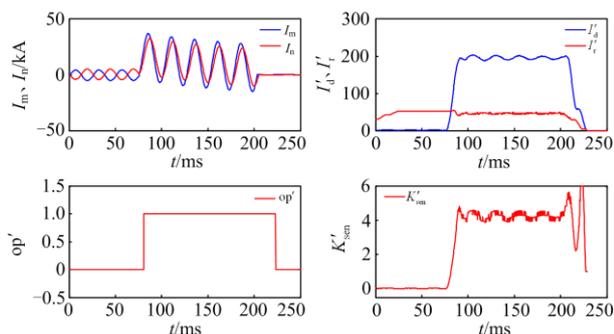


图5 AB相间短路

Fig. 5 AB phase short fault

4.1.2 差动保护灵敏度对比

图6对比了 f_1 和 f_2 处发生ABC三相短路故障时的灵敏度。由图6可知, 外部故障时保护能不误动作, 内部故障时能正确动作, 具有良好的选择性。

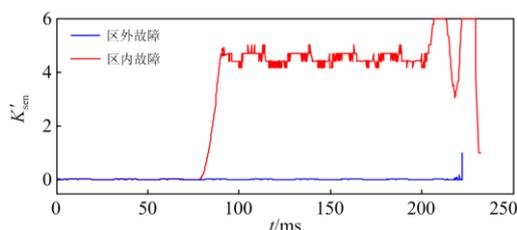


图6 灵敏度对比

Fig. 6 Comparison of sensitivity

表1列出了各类故障及其带过渡电阻条件下, 故障后30 ms时的灵敏度。表中AN表示单相接地短路故障, ABN表示两相接地短路故障, AB表示两相短路故障, ABC表示三相短路故障。

表1 灵敏度对比

Table 1 Comparison of sensitivity

| 故障类型 | 接地电阻 | f_1 | f_2 |
|------|------|---------|---------|
| AN | 0 | 0.013 1 | 2.805 9 |
| | 50 | 0.026 2 | 1.350 5 |
| | 100 | 0.039 3 | 1.124 0 |
| ABN | 0 | 0.026 2 | 4.662 8 |
| | 50 | 0.026 2 | 1.295 8 |
| | 100 | 0.026 2 | 1.044 8 |
| AB | — | 0.026 2 | 4.222 5 |
| ABC | — | 0.026 2 | 4.704 6 |

由表1可知, 发生区外故障(即 f_1 点)时, 灵敏度均接近零, 保护可靠不动作; 发生区内故障(即 f_2 点)时, 灵敏度均大于1, 保护能够可靠动作。

4.1.3 电源功角差的影响

下面对不同电源功角差在 f_2 处发生不同类型故障时的灵敏度进行了对比, 如表2所示。表中 K_{sen} 、 K'_{sen} 分别表示传统、改进电流差动保护的灵敏度, “√”表示改进方法优于传统方法, “×”表示改进方法劣于传统方法。

表2 不同电源功角差下的灵敏度对比

Table 2 Sensitivity comparison under different power angle differences

| 电源电势角差/(°) | 故障类型 | K_{sen} | K'_{sen} | $K'_{sen} \geq K_{sen}$ |
|------------|------|-----------|------------|-------------------------|
| 15 | AN | 4.4155 | 4.6825 | √ |
| | AB | 6 | 6 | √ |
| | ABN | 6 | 6 | √ |
| | ABC | 6 | 6 | √ |
| 25 | AN | 2.6259 | 2.6997 | √ |
| | AB | 3.8628 | 3.9994 | √ |
| | ABN | 4.1634 | 4.3846 | √ |
| | ABC | 4.5564 | 4.7035 | √ |
| 35 | AN | 1.8430 | 1.8299 | × |
| | AB | 2.7241 | 2.9543 | √ |
| | ABN | 2.9370 | 3.2025 | √ |
| | ABC | 3.2120 | 3.2202 | √ |
| 45 | AN | 1.4011 | 1.3720 | × |
| | AB | 2.1034 | 2.1430 | √ |
| | ABN | 2.2302 | 2.2285 | × |
| | ABC | 2.3839 | 2.3274 | × |

由表2可知, 改进电流差动保护大部分优于传统保护, 即使低于传统保护, 其仍能保证保护正确动作。

4.2 基于动态模拟实验平台的验证

在动态模拟实验平台上搭建如图1所示的双端网络。其中, 01G为同步发电机, 02G为无穷大系统。系统主要设备参数: 发电机额定功率 $S_N = 15\ 000\ \text{MVA}$; 额定电压 $U_N = 800\ \text{V}$; 额定电流 $I_N = 10\ \text{kA}$; 电流互感器变比 $CT_1 = CT_2 = 20/5$; 线路单位长度阻抗为 $Z_1 = 0.00436 + 0.06586j(\Omega)$ 。本文对多种短路故障进行了实验, 并设定故障发生在40 ms。

为了更全面验证所提保护的性能, 实验中对不同长度线路进行了故障测试, 线路MN的长度分别为120 km、200 km、400 km。表3列出了不同长度线路上故障点 $f_1 - f_4$ 的位置。

4.2.1 不同故障类型

以线路 f_2 处发生AB两相接地短路为例, 电流差动保护的波形如图7所示, 包含电流采样值、电流变换后的差动电流和制动电流、保护动作情况和灵敏度对比。

表 3 故障位置
Table 3 Fault location

| 线路长度/km | 故障位置 | | | |
|---------|-------|------------|------------|------------|
| | f_1 | $f_2 / \%$ | $f_3 / \%$ | $f_4 / \%$ |
| 120 | 区外 | 0 | 33.3 | 66.7 |
| 200 | 区外 | 0 | 40 | 80 |
| 400 | 区外 | 0 | 40 | 75 |

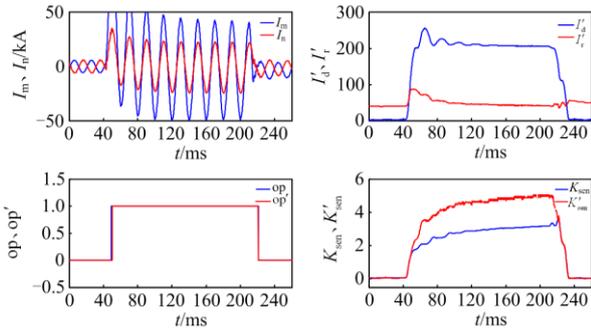
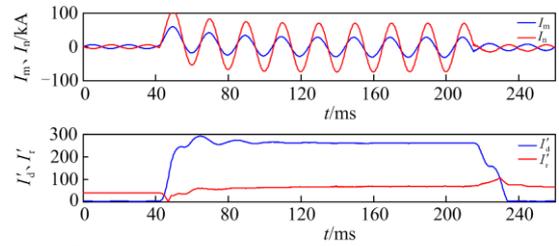


图 7 AB 两相接地短路(L=400 km)

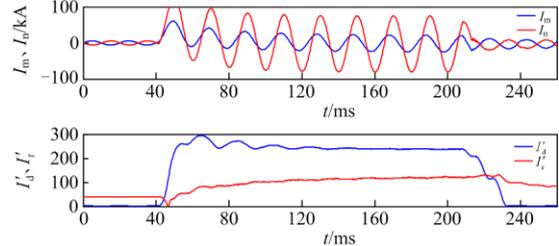
Fig. 7 AB phase short-to-ground fault (L=400 km)

以线路 200 km 为例, 图 8 为 f_3 处发生不同故障时的线路两侧采样电流、整形变换后差动电流和制动电流波形和保护动作情况。

表 4 列举了线路发生不同故障时保护的灵敏度, 其中灵敏度均取故障发生 30 ms 时的计算值。



(c) ABN



(d) ABC

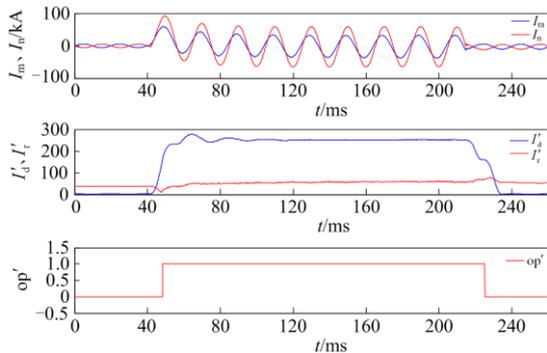
图 8 f_3 处不同短路故障 (L=200 km)

Fig. 8 Different short circuit faults at f_3 (L=200 km)

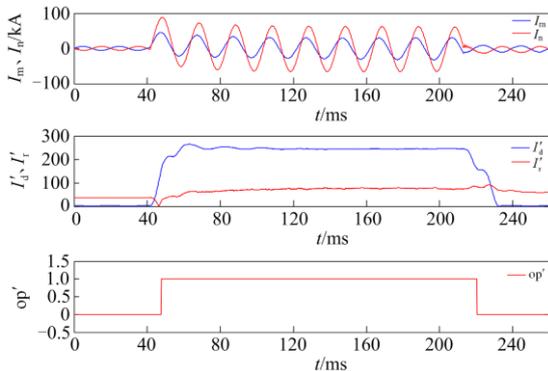
表 4 不同故障的灵敏度 (400 km)

Table 4 Sensitivity to different faults (400 km)

| 故障位置 | 故障类型 | K_{sen} | K'_{sen} |
|-------|------|-----------|------------|
| f_1 | AN | 0.007 4 | 0.014 4 |
| | AB | 0.013 9 | 0.015 1 |
| | ABN | 0.007 5 | 0.006 0 |
| | ABC | 0.006 5 | 0.028 3 |
| f_2 | AN | 1.922 3 | 2.820 9 |
| | AB | 2.214 3 | 2.660 9 |
| | ABN | 2.179 6 | 3.515 0 |
| f_3 | ABC | 3.192 1 | 4.630 1 |
| | AN | 4.602 1 | 5.276 5 |
| | AB | 4.897 9 | 5.488 6 |
| f_4 | ABN | 5.584 4 | 6 |
| | ABC | 3.442 4 | 4.893 7 |
| | AN | 1.643 1 | 2.239 7 |
| | AB | 1.703 3 | 2.376 6 |
| | ABN | 1.616 3 | 2.263 2 |
| | ABC | 1.502 8 | 2.044 5 |



(a) ANR0



(b) AB

4.2.2 噪声的影响

在实际工程中, 噪声干扰在保护系统中不可避免, 对新原理的抗干扰性能的分析也不能忽视^[22-24]。本文以 f_3 处发生 ABC 三相短路为例对采样电流加

入 5 dB 的噪声干扰来观察对改进差动保护的影响, 如图 9 所示。由图可知, 采样电流加入噪声干扰后即使有明显波动, 但保护灵敏度与传统保护灵敏度变化趋势相似, 且值更大。

为进一步对比分析, 表 5 列出了信噪比分别为

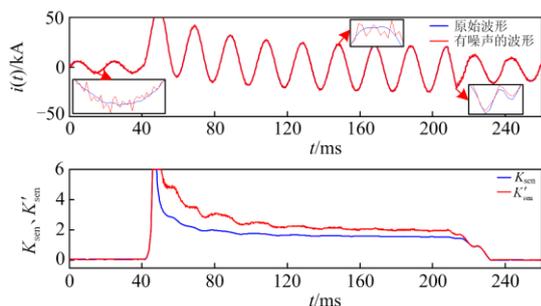


图 9 噪声干扰(200 km)

Fig. 9 Noise interference (200 km)

表 5 不同信噪比时在区内 f_3 处发生不同故障的灵敏度(200 km)

Table 5 Sensitivity of different faults at K3 at different signal-to-noise ratios (200 km)

| 信噪比/dB | 故障类型 | A 相 | B 相 | C 相 |
|--------|--------|---------|---------|---------|
| 5 | ANR0 | 5.527 3 | 0.039 3 | 0.031 4 |
| | ANR50 | 6 | 0.065 5 | 0.052 4 |
| | ANR100 | 6 | 0.065 5 | 0.052 4 |
| | ANR200 | 2.945 1 | 0.083 2 | 0.065 5 |
| | ANR300 | 1.313 3 | 0.078 7 | 0.039 3 |
| | AB | 3.936 8 | 2.983 7 | 0.045 1 |
| | ABN | 4.811 9 | 2.882 5 | 0.039 3 |
| | ABC | 3.534 7 | 3.150 0 | 3.330 7 |
| 10 | ANR0 | 5.527 3 | 0.039 3 | 0.031 4 |
| | ANR50 | 6 | 0.056 6 | 0.026 2 |
| | ANR100 | 6 | 0.065 5 | 0.052 4 |
| | ANR200 | 2.862 9 | 0.070 9 | 0.052 4 |
| | ANR300 | 1.249 0 | 0.065 5 | 0.052 4 |
| | AB | 3.936 8 | 2.983 7 | 0.045 1 |
| | ABN | 4.811 9 | 2.882 5 | 0.046 6 |
| | ABC | 3.471 5 | 3.150 0 | 3.305 9 |
| 20 | ANR0 | 5.527 3 | 0.039 3 | 0.031 4 |
| | ANR50 | 6 | 0.056 6 | 0.026 2 |
| | ANR100 | 6 | 0.065 5 | 0.052 4 |
| | ANR200 | 2.862 9 | 0.078 7 | 0.065 5 |
| | ANR300 | 1.254 0 | 0.065 5 | 0.039 3 |
| | AB | 3.936 8 | 2.983 7 | 0.045 1 |
| | ABN | 4.811 9 | 2.882 5 | 0.041 3 |
| | ABC | 3.471 5 | 3.150 0 | 3.330 7 |
| 30 | ANR0 | 5.527 3 | 0.039 3 | 0.031 4 |
| | ANR50 | 6 | 0.052 4 | 0.026 2 |
| | ANR100 | 6 | 0.065 5 | 0.052 4 |
| | ANR200 | 2.862 9 | 0.078 7 | 0.052 4 |
| | ANR300 | 1.251 6 | 0.078 7 | 0.052 4 |
| | AB | 3.936 8 | 2.983 7 | 0.045 1 |
| | ABN | 4.811 9 | 2.882 5 | 0.041 3 |
| | ABC | 3.471 5 | 3.150 0 | 3.330 7 |

5 dB、10 dB、20 dB、30 dB 时 f_3 处发生不同故障的灵敏度。

结果表明, 在不同信噪比下, 保护能正确识别出故障相, 抗干扰能力较强, 且信噪比低至 5 dB 时保护仍具有较高的灵敏度, 可以正确动作。

4.2.3 过渡电阻的影响

输电线路最常见的故障为单相接地故障, 所以必须检验经过渡电阻短路时保护的适应性^[25-26]。表 6 列出了 f_3 处发生 A 相接地故障的灵敏度系数, 过渡电阻分别设置为 50 Ω 、100 Ω 、200 Ω 、300 Ω 。

表 6 不同过渡电阻接地短路时的灵敏度 (200 km)

Table 6 Sensitivity of different resistances ground

| short circuit (200 km) | | | |
|------------------------|---------|---------|---------|
| 过渡电阻/ Ω | A 相 | B 相 | C 相 |
| 0 | 5.527 3 | 0.039 3 | 0.031 4 |
| 50 | 6 | 0.052 4 | 0.026 2 |
| 100 | 6 | 0.065 5 | 0.052 4 |
| 200 | 2.862 9 | 0.078 7 | 0.065 5 |
| 300 | 1.251 6 | 0.065 5 | 0.052 4 |

仿真结果表明, 在过渡电阻较小时, 保护可以达到很高的灵敏性, 即使在高阻接地的情况下, 保护能够正确判别故障与选相。

5 结论

以降低纵联电流差动通信容量, 且不降低保护灵敏度为目标, 本文提出一种基于整形变换的改进电流差动保护原理。该原理将多字节浮点型电流模值和电流相位整形为单字节, 降低通信量达 60%, 加快信息传输速度; 进一步提出基于变换信息构成差动保护判据, 并通过对比传统差动保护性能, 改进差动保护的灵敏度相对较高; 通过 PSCAD 数字仿真验证和动态模拟实验, 该保护能可靠识别区内、区外故障, 具有较好的抗噪声干扰和抗过渡电阻能力。

参考文献

- [1] 褚旭, 孙锦琛. 直流输电线路单极故障不平衡电流分析及差动保护改进方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 47-56.
CHU Xu, SUN Jinchen. Analysis of single-pole fault unbalanced current and improvement of a differential protection scheme for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 47-56.
- [2] 李海锋, 祝新驰, 梁远升, 等. 基于电流控制补偿的高压直流线路快速差动保护[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 111-119.

- LI Haifeng, ZHU Xinchu, LIANG Yuansheng, et al. Fast differential protection for HVDC transmission line based on current control compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 111-119.
- [3] 金能, 于壮状, 林湘宁, 等. 兼具高灵敏性与良好相移制动能力的多端广域电流差动保护判据研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(21): 6314-6323, 6493.
- JIN Neng, YU Zhuangzhuang, LIN Xiangning, et al. Study of multi-terminal wide-area current differential protection criterion with high sensitivity and ability of tolerating additional phase-shift error[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(21): 6314-6323, 6493.
- [4] 胡晟, 房金彦. 广域测量系统故障定位新方法[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(2): 9-12.
- HU Sheng, FANG Jinyan. A novel fault location method in wide area measurement system[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(2): 9-12.
- [5] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 分区域广域继电保护的系统结构与故障识别[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 95-103.
- LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Study on system architecture and fault identification of zone-division wide area protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 95-103.
- [6] 尹项根, 汪咏, 张哲. 适应智能电网的有限广域继电保护分区与跳闸策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 1-7.
- YIN Xianggen, WANG Yang, ZHANG Zhe. Zone division and tripping strategy for limited wide area protection adapting to smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 1-7.
- [7] 童晓阳, 连文超, 滕予非. 有限 PMU 下采用差动有功功率抗过渡电阻的广域后备保护[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(8): 2335-2347, 2543.
- TONG Xiaoyang, LIAN Wenchao, TENG Yufei. The wide-area backup protection based on differential active power against transition resistance using limited PMUs[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(8): 2335-2347, 2543.
- [8] 李振兴, 包文亮, 陈艳霞, 等. 适用于含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.
- [9] 祁锋. 通信系统中断对电网广域保护控制系统的影响[J]. 通信电源技术, 2018, 35(2): 192-193.
- QI Feng. The influence of communication system interrupt on the power grid wide area protection control system[J]. Telecom Power Technology, 2018, 35(2): 192-193.
- [10] 陈雷, 郑德忠, 廖文喆. 基于压缩感知的含扰动电能质量信号压缩重构方法[J]. 电工技术学报, 2016, 41(8): 163-171.
- CHEN Lei, ZHENG Dezhong, LIAO Wenzhe. Method based on compressed sensing for compression and reconstruction of power quality signals with disturbances[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(8): 163-171.
- [11] ZHANG Linlin, CONG Wei, XUN Tangsheng, et al. A current differential protection criterion based on amplitude and phase difference of fault current[C] // 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP), October 16-20, 2011, Beijing, China.
- [12] 李振兴, 吴李群, 王欣, 等. 应用复合阻抗比较原理的广域方向保护算法[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 938-943.
- LI Zhenxing, WU Liqun, WANG Xin, et al. A novel WADP algorithm using composite impedance comparison[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 938-943.
- [13] 侯俊杰, 宋国兵, 常仲学, 等. 基于故障分量差动电流极性特征的直流线路故障全过程保护原理[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 11-19.
- HOU Junjie, SONG Guobing, CHANG Zhongxue, et al. DC line fault protection principle based on polarity characteristics of differential current of fault components for whole process of failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 11-19.
- [14] 赵凤贤, 孟镇, 李永勤, 等. 基于故障分量的主动配电网纵联保护原理[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3092-3100.
- ZHAO Fengxian, MENG Zhen, LI Yongqin, et al. Pilot protection based on fault component for active distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3092-3100.
- [15] SHENG S, LI K K, CHAN W L, et al. Adaptive agent-based wide-area current differential protection system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(5): 2111-2117.
- [16] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 广域保护多 Agent 系统动态协作机制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 36-40.
- LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Dynamic cooperation mechanism of wide area protection system

- based on multi-agent[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(3): 36-40.
- [17] 李振兴, 张腾飞, 王欣, 等. 考虑时延与流量均衡性的广域保护通信迂回路径重构算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(16): 130-136.
- LI Zhenxing, ZHANG Tengfei, WANG Xin, et al. Circuitous communication channel reconstruction of wide area protection considering delay and balance of flow[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(16): 130-136.
- [18] 刘毅, 周维维, 冯浩. 电能质量监测网录波数据压缩方法[J]. *电网技术*, 2010, 34(4): 199-203.
- LIU Yi, ZHOU Luwei, FENG Hao. Method for compressing recorded data from power quality monitoring network[J]. *Power System Technology*, 2010, 34(4): 199-203.
- [19] 龚戡, 赵峰, 李冬华, 等. 基于压缩感知的架空线路舞动波形重构方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(9): 97-104.
- GONG Yu, ZHAO Feng, LI Donghua, et al. Method for reconstructing galloping waveforms of overhead lines based on compressed sensing[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(9): 97-104.
- [20] 杨红, 尹项根, 陈卫, 等. 基于分相电流突变量相位比较的广域继电保护[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(23): 1-6.
- YANG Hong, YIN Xianggen, CHEN Wei, et al. Wide area protection based on phase comparison of segregated current fault component[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(23): 1-6.
- [21] 刘颖彤. 基于故障元件判别的广域继电保护算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- LIU Yingtong. Research on wide-area relaying protection algorithm based on fault element identification[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2013.
- [22] 赵小平, 韩涛, 李永增, 等. 配电网单相接地故障行波滤波方法研究[J]. *智慧电力*, 2018, 46(2): 45-53.
- ZHAO Xiaoping, HAN Tao, LI Yongzeng, et al. Filtering of traveling wave with single phase to ground fault in distribution networks[J]. *Smart Power*, 2018, 46(2): 45-53.
- [23] 何平, 何若冰, 陈佳, 等. 基于小波阈值的局部放电白噪声去噪方法综述[J]. *广东电力*, 2020, 33(11): 83-90.
- HE Ping, HE Ruobing, CHEN Jia, et al. Review on partial discharge denoising method of white noise based on wavelet thresholding[J]. *Guangdong Electric Power*, 2020, 33(11): 83-90.
- [24] 贾科, 郑黎明, 毕天姝, 等. 基于余弦相似度的风电场站送出线路纵联保护[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(21): 6263-6275.
- JIA Ke, ZHENG Liming, BI Tianshu, et al. Pilot protection of outgoing lines of wind farm station based on cosine similarity[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(21): 6263-6275.
- [25] 叶远波, 蔡翔, 谢民, 等. 配电网单相接地故障快速选相方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(3): 96-103.
- YE Yuanbo, CAI Xiang, XIE Min, et al. Fault phase fast detection of the single-phase-to-ground fault in a power distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(3): 96-103.
- [26] 董俊, 李一凡, 束洪春, 等. 配电网馈出线路单相永久性接地故障性质辨识方法[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(21): 4576-4585.
- DONG Jun, LI Yifan, SHU Hongchun, et al. Study on identification method of single phase permanent ground fault in distribution network feedout line[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(21): 4576-4585.

收稿日期: 2021-04-08; 修回日期: 2021-06-18

作者简介:

李振兴(1977—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制; E-mail: lzx2007001@163.com

望周丽(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制. E-mail: wzl2020222@163.com

(编辑 姜新丽)