

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181536

## 基于确定系数的失灵保护优化技术方案

申洪明<sup>1</sup>, 宋璇坤<sup>1</sup>, 李轶凡<sup>2</sup>, 邹格<sup>1</sup>, 刘颖<sup>1</sup>, 江璟<sup>1</sup>, 杜娜<sup>1</sup>, 李慧<sup>2</sup>

(1. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209; 2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

**摘要:** 失灵保护方案的优化对维持电网的安全稳定运行至关重要。详细地分析了电流互感器电流拖尾对失灵保护整定时间的影响, 提出了利用最小二乘拟合算法识别电流互感器二次电流特征的方案, 进而构建了基于确定系数的新失灵保护启动逻辑。最后分析了拟合数据的选取以及 CT 选型对新方案的影响。新的启动逻辑既能缩短失灵保护整定时间, 又能确保失灵保护不误动。基于 PSCAD 算例分析验证了新方法的有效性。

**关键词:** 电流拖尾; 失灵保护; 最小二乘法; 确定系数

### An optimization scheme for breaker failure protection using determination coefficient

SHEN Hongming<sup>1</sup>, SONG Xuankun<sup>1</sup>, LI Yifan<sup>2</sup>, ZOU Ge<sup>1</sup>, LIU Ying<sup>1</sup>, JIANG Jing<sup>1</sup>, DU Na<sup>1</sup>, LI Hui<sup>2</sup>

(1. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,  
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Optimization of failure protection plays a key role in maintaining the power system reliability. The effect of current transformer tailing on breaker failure protection is analyzed in detail. In addition, a novel method of current transformer second current feature identification is proposed based on recursive least square algorithm. Then, a new breaker failure protection with determination coefficient is presented. At last, the effect of fitting results and current type on the new scheme is analyzed. The novel scheme not only shortens the breaker failure protection setting time, but also ensures its malfunction. The simulation proves that the new logic is correct.

This work is supported by State Grid Guide Project of Research on New Protection Control Design Technology for AC Side in VSC-HVDC Environment (No. B3441518K002).

**Key words:** current transformer tailing; breaker failure protection; recursive least square algorithm; determination coefficient

## 0 引言

由于直流输电技术的快速发展, 我国已经逐步形成了交直流混联电网格局, 直流控制保护技术得到了前所未有的关注<sup>[1-5]</sup>。但目前我国电网处在“强直弱交”过渡时期, 直流功率的大范围波动会严重影响直流送、受端系统的安全稳定运行<sup>[6-9]</sup>, 如果故障长时间存在更会对系统的安全运行产生不利影响。

现阶段失灵保护整组动作时间一般为 0.45 s 左右, 当断路器失灵时, 可能诱发直流多次换相失败, 甚至直流闭锁, 极易造成严重的电网稳定问题, 电网发生连锁故障的风险也急剧增大。

**基金项目:** 2018 年国网公司科技指南项目资助 (B3441518K002)

“面向柔性直流接入的交流侧新型保护控制设计技术研究”

为此, 国网公司要求在直流近区或者开关拒动存在系统稳定问题的站点, 要求配置失灵保护装置, 并下达了 500 kV 开关失灵及死区保护过渡解决方案, 要求压缩失灵保护的整组时间, 避免故障长时间存在导致系统稳定性破坏<sup>[10]</sup>。为此, 开展优化失灵保护技术方案研究尤为迫切。文献[11]根据网络拓扑及本区域内正序电流相量信息, 提出了一种基于方向权重的广域保护跳闸策略, 该策略可以应用于失灵保护; 文献[12]提出了考虑断路器失灵保护的建模方案; 文献[13]利用拖尾电流单调衰减特性, 提出了一种识别拖尾电流与非拖尾电流的方案, 优化了失灵保护整定时间; 文献[14]从系统稳定角度出发, 研究了 500 kV 断路器失灵及死区保护优化技术。优化失灵保护的关键在于快速识别拖尾电流, 文献[15]基于拖尾电流不会过零的特征, 提出了一

种较为快捷的识别拖尾电流的方法。文献[15-20]研究了拖尾电流对失灵保护的影响, 并分别提出了相应的失灵保护配置方案及故障诊断方法。

本文首先分析了开关成功开断后 CT 电流拖尾特征, 然后基于 CT 正常或失灵情况下电流特征的差异, 提出了一种基于最小二乘曲线拟合识别 CT 二次电流特征的方法, 进而提出了基于确定系数的优化失灵保护的方案。新的方案无需依赖失灵保护电流启动元件的可靠返回, 保护动作时间得到了相应的提高, 最后基于 PSCAD/EMTDC 仿真结果验证了结论的正确性。

## 1 拖尾电流对失灵保护的影响分析

### 1.1 拖尾电流形成机理及特征研究

电流互感器(CT)等效电路图如图 1 所示, 其中  $R_1$ 、 $L_1$  分别表示电流互感器一次侧电阻和电感,  $R_2$ 、 $L_2$  分别表示电流互感器二次侧电阻和电感,  $R_m$ 、 $L_m$  分别表示电流互感器励磁电阻和励磁电感,  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_m$  分别表示 CT 一次电流、二次电流及励磁电流。当断路器 CF 开断后, 由于电感中存储了相应的能量, 能量会通过二次流路径进行流通, 即发生 CT 电流拖尾现象。该二次流路径为 R-L 回路, 衰减电流表达式为

$$i_2(t) = -i_{m(0)} e^{-t/T} \quad (1)$$

式中:  $i_{m(0)}$  表示励磁电流初始值;  $T = (L_2 + L_m) / (R_2 + R_m + R_L)$  表示衰减时间常数。

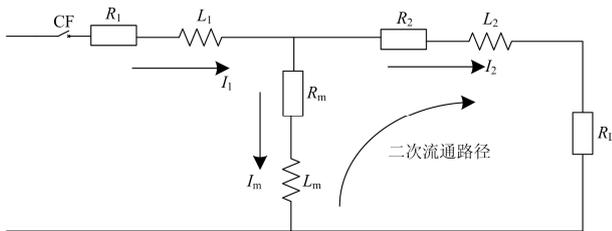


图 1 电流互感器等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit of current transformer

### 1.2 拖尾电流对失灵保护的影响分析

图 2 给出了一种常用的失灵保护动作逻辑, 由电流元件、远方跳闸信号开入作为启动必要条件, 为了防误判, 还加入了相应的辅助判据, 如复合电压启动判据, 然后经延时  $t$  启动失灵保护, 跳开相应断路器。 $t$  为失灵保护整定时间。

失灵保护延时时间的整定主要考虑断路器开断时间与电流元件可靠返回时间, 考虑到 CT 电流拖尾现象, 电流元件返回时间可能较长。为了防止失灵保护误启动扩大故障范围,  $t$  的整定时间较长,

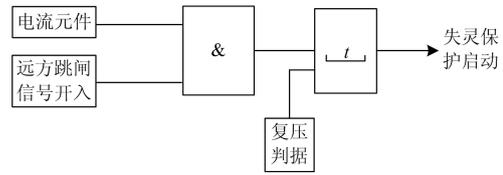


图 2 经典失灵保护逻辑框图

Fig. 2 Classic breaker failure protection

一般设置为 0.2~0.3 s。但如果电流拖尾现象严重时, 电流元件在规定的时间内并没返回, 失灵保护仍会误启动, 导致大面积开关跳开。虽然复压判据在一定程度上可以避免误启动, 但仍不能解决全部问题, 如变压器低压侧故障但高压侧开关失灵<sup>[8]</sup>, 线路末端故障母线电压波动小等情况<sup>[9]</sup>, 而且, 在 2/3 接线情况下, 复压判据不再设置。

因此, 优化现有失灵保护逻辑的关键在于快速、准确识别 CT 电流拖尾现象。快速识别 CT 拖尾电流能减少电流元件返回时间, 进而加快失灵保护动作出口。通过 2.1 节研究可以看出, 断路器一次开关跳开后, 拖尾电流呈现衰减指数特征, 而当断路器无法跳开时, CT 二次电流主要为正/余弦分量, 显然会呈现出近三角函数特性。为此, 为了快速识别 CT 二次电流特性, 本文提出了基于最小二乘曲线拟合的识别算法。

## 2 基于曲线拟合的优化失灵保护方案

### 2.1 最小二乘法拟合算法

曲线拟合问题的提法是, 已知一组(二维)数据, 即平面上的  $n$  个点  $(x_i, y_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ ,  $x_i$  互不相同, 寻求一个函数(曲线)  $y=f(x)$ , 使  $f(x)$  在某种准则下与所有数据点最为接近, 即曲线拟合得最好。

线性最小二乘法是解决曲线拟合最常用的方法, 它是通过最小化误差的平方和寻找最佳函数  $f(x)$ 。

$$f(x) = a_1 r_1(x) + a_2 r_2(x) + \dots + a_m r_m(x) \quad (2)$$

式中:  $r_k(x)$  是事先选定的一组线性无关的函数;  $\alpha_k$  是待定系数;  $k=1, \dots, m$ 。

1) 系数  $\alpha_k$  的确定

令

$$J(a_1, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [f(x_i) - y_i]^2 \quad (3)$$

为求  $a_1, \dots, a_m$  使  $J$  达到最小, 只需利用极值的必要条件  $\frac{\partial J}{\partial a_k} = 0 (k=1, \dots, m)$ , 得到关于  $a_1, \dots, a_m$  的线性方程组为

$$\sum_{i=1}^n r_j(x_i) \left[ \sum_{k=1}^m a_k r_k(x_i) - y_i \right] = 0, (j=1, \dots, m) \quad (4)$$

即

$$\sum_{k=1}^m a_k \left[ \sum_{i=1}^n r_j(x_i) r_k(x_i) \right] = \sum_{i=1}^n r_j(x_i) y_i, (j=1, \dots, m) \quad (5)$$

记

$$R = \begin{bmatrix} r_1(x_1) & \dots & r_m(x_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_1(x_n) & \dots & r_m(x_n) \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (6)$$

$$A = [a_1, \dots, a_m]^T, Y = (y_1, \dots, y_n)^T \quad (7)$$

方程组(7)可表示为

$$R^T R A = R^T Y \quad (8)$$

当  $\{r_1(x), \dots, r_m(x)\}$  线性无关时,  $R$  满秩,  $R^T R$

可逆, 于是方程组(8)有唯一解。

$$A = (R^T R)^{-1} R^T Y \quad (9)$$

即得到  $a_1, \dots, a_m$  相关取值。

### 2) 函数 $r_k(x)$ 的选取

面对一组数据  $(x_i, y_i)$ , 用线性最小二乘法作曲线拟合, 首要的、也是关键的一步是恰当地选取  $r_1(x), \dots, r_m(x)$ 。如果通过机理分析, 能够知道  $y$  与  $x$  之间应该有什么样的函数关系, 则  $r_1(x), \dots, r_m(x)$  容易确定。若无法知道  $y$  与  $x$  之间的关系, 通常可以将数据  $(x_i, y_i)$  作图, 直观地判断应该用什么样的曲线去作拟合。常用的拟合曲线有直线、多项式、三角函数以及指数函数, 每个函数表达式如下所示:

- (1) 直线  $y = a_1 x + a_2$ ;
- (2) 多项式  $y = a_1 x^m + \dots + a_m x + a_{m+1}$ ;
- (3) 三角函数曲线  $y = a_1 \sin(\alpha_2 x + \alpha_3) + \alpha_4$ ;
- (4) 指数曲线  $y = \alpha_1 e^{\alpha_2 x}$ 。

对于指数曲线, 拟合前需作变量代换, 化为对  $\alpha_1, \alpha_2$  的线性函数。通过第 2 章节 CT 二次电流特征分析可知: 如果一次开关成功跳开, 拖尾电流呈现指数衰减特征; 如果开关失灵, CT 二次电流呈现三角函数特征。为此, 本文利用三角函数与指数函数对二次电流进行拟合以识别 CT 二次电流特征。

### 2.2 拟合精度参数

在拟合结束后, 需要对拟合的曲线进行拟合优度检验, 拟合优度(Goodness of Fit)是指回归直线对观测值的拟合程度。度量拟合优度的统计量是可决系数(亦称确定系数)  $R^2$ 。可决系数  $R^2$  (Coefficient of Determination) 的定义为回归平方和占总误差平方和的比例。

$R^2$  的计算公式如式(10)。

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (10)$$

式(10)中, SST 为总平方和(Total Sum of Squares), 反映因变量的  $n$  个观察值与其均值的总误差; SSR 为回归平方和(Sum of Squares of Regression), 反映自变量  $x$  的变化对因变量  $y$  取值变化的影响, 亦是由于  $x$  与  $y$  之间的线性关系引起的  $y$  的取值变化, 也称为可解释的平方和。

$R^2$  反映了回归直线的拟合程度, 其取值在  $[0, 1]$ 。  $R^2$  越趋近于 1, 说明回归方程拟合的越好;  $R^2$  越趋近于 0, 说明回归方程拟合的越差。

### 2.3 基于确定系数的失灵保护优化方案

综上所述, 可以利用最小二乘法对 CT 二次电流进行拟合, 以识别 CT 二次电流变化特性: 如果三角函数的拟合确定系数大于指数函数, 则表示开关失灵; 反之, 断路器成功开断。为此提出了如图 3 所示的新型失灵保护方案。新型失灵保护方案在原有方案的基础上, 添加了确定系数指标输入条件。其中  $R_s$  表示正余弦函数的确定系数,  $R_z$  表示指数函数的确定系数, 即拟合精度。当  $R_s > R_z$  时, 表示 CT 电流更接近正余弦函数, 表示一次开关尚未跳开, 可以启动失灵保护。

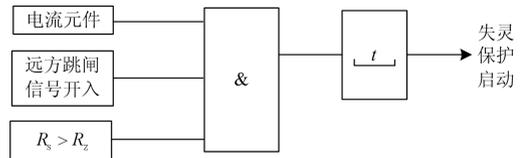


图 3 新型失灵保护方案动作逻辑

Fig. 3 Operation logic of the novel breaker failure protection

新的失灵保护动作逻辑中, 只需躲过断路器完全开断时间, 不需要考虑电流元件返回时间, 极大地优化了失灵保护动作时间。其中, 电流元件主要判断在断路器预想开断时间后电流是否小于电流元件启动值, 如小于启动值, 则保护可靠不动作, 防止失灵保护误动; 远方跳闸信号开入作为失灵保护的必备条件之一, 也是防止失灵保护误动的重要措施;  $R_s > R_z$  是指在断路器预想开断时间后分别用正余弦函数和指数函数对采样值进行拟合, 并对拟合精度进行判断, 虽然增加了拟合算法时间, 但不需要计及电流元件的返回时间, 因此加快了失灵保护出口时间, 也能有效防止失灵保护的误动。其具体流程如图 4 所示。

图 4 中  $T$  表示断路器完全开断的时间, 包括保

护出口与灭弧等时间, 一般为 90 ms 左右<sup>[4-5]</sup>;  $i_{set}$  表示 CT 无电流门槛值, 一般为 0.06 A<sup>[3]</sup>;  $t$  要大于  $T$ , 表示要躲过断路器预想开断时间, 确保不误动。故障后 90 ms 进行拟合, 一是如果此时断路器已经跳开, 则失灵保护可靠不动作, 省去了拟合算法的时间; 如果还有较大电流存在, 才开始进行拟合计算; 二是在一定程度上也减弱了当 CT 饱和对拟合精度的影响。

需要指出的是, 时间  $T$  的取值理应是确定值, 需要根据厂站开关的历史统计数据以及考虑到开关的运行年限设定。

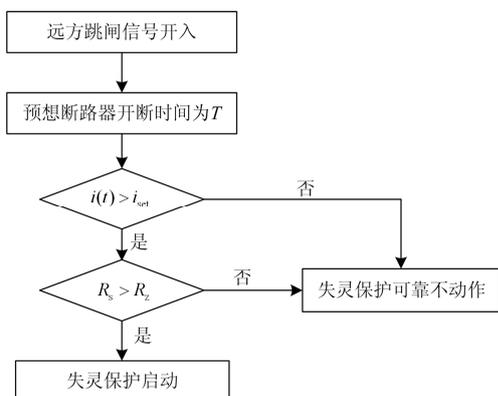


图 4 失灵保护逻辑流程图

Fig. 4 Logic flowchart of breaker failure protection

## 2.4 新失灵保护方案具体应用分析

### 1) 拟合数据的选取

图 5 给出了标准的正弦曲线, 显然 $[\pi/2, \pi]$ 与 $[\pi, 3\pi/2]$ 时, 正弦曲线与衰减的指数函数特征类似。为了解决此问题, 提出了 2 种解决方案如下。

方案 1: 拟合 1/4 周期的数据。考虑到衰减指数函数呈现单一的正负形, 不会跨越; 同时在各自区间内同时用指数函数和三角函数进行拟合时, 三角函数的拟合精度会更高, 所以可以选择只对 1/4 周期的数据进行拟合。

方案 2: 拟合半周期的数据。用三角函数和指数函数对采集的半周波数据进行拟合, 这样两种拟合方法计算的精度差异性会更加明显。

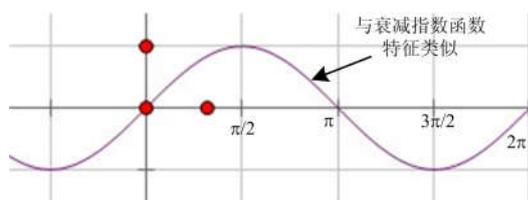


图 5 标准正弦曲线

Fig. 5 Standard sine curve

显然, 方案 1 所需时间少, 失灵保护整定时间小于方案 2; 方案 2 侧重不误动。考虑到电流元件及方案 1 本身也有防误动的功能, 从优化失灵保护整定时间角度出发, 本文选择方案 1。

### 2) CT 饱和影响

在高电压等级中, 为了防止 CT 饱和, 一般采用 TPY 型电流互感器。在原有失灵保护中, 由于 TPY 型电流互感器带有小气隙, 因此 CT 二次侧电流衰减更慢, 拖尾现象更加严重, 造成了电流元件返回时间过长, 因此在断路器失灵保护中一般采用 P 类电流互感器<sup>[10]</sup>。但新的失灵保护逻辑已经解决了 CT 电流拖尾问题, 同时考虑到如果 CT 饱和, 二次侧电流特性将会发生不规则变化, 会对拟合结果产生一定的影响。因此新的失灵保护方案建议采用 TPY 型电流互感器, 以消除 CT 饱和对新方案的影响。

需要指出的是, 新的失灵保护方案通过故障后延迟一段时间开始进行拟合, 以及可以采用 TPY 型电流互感器, 因此在一定程度上解决了电流互感器饱和对拟合精度的影响。考虑到拟合点数越多, 拟合精度越高的特征, 如果故障仍造成电流互感器饱和等不利情形, 拟合数据的选取可以考虑方案 2。

## 3 算例分析

基于 PSCAD 搭建如图 6 所示的 500 kV 仿真模型, 线路全长 100 km, 其中正序、负序参数为  $Z_1 = Z_2 = (0.686e-2 + j0.0951)p.u.$ , 零序参数为  $Z_0 = (0.0717 + j0.251)p.u.$ , 基准阻抗值  $Z_b = 450 \Omega$ 。为了拟合结果更加可靠。

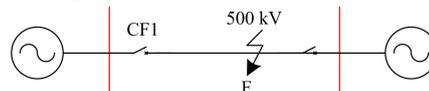


图 6 仿真模型

Fig. 6 Simulation model

考虑到电力系统短路故障暂态波形与故障时间、故障位置、过渡电阻、开断时间等多种因素相关, 拟合精度与采样点数也有关联, 本文设置两种不同故障场景进行验证, 故障类型均为 A 相接地故障, 电流采用了故障相电流。CT 参数如表 1 所示。

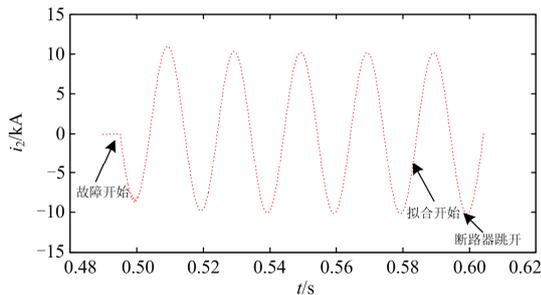
表 1 电流互感器参数

Table 1 Parameters of current transformer	
电流互感器模型	Lucas 模型
匝数比	20/200
二次电阻	0.05 $\Omega$
二次电抗	0.8e-5 H
剩磁	0.0 T

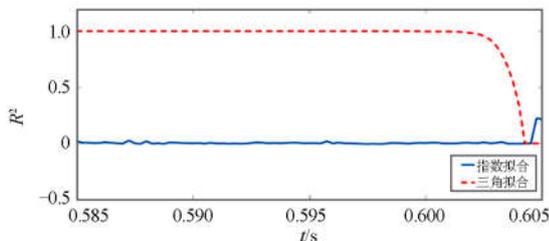
### 3.1 故障场景 1 仿真分析

本次仿真场景中，故障时刻为 0.495 s，故障开断时间为 0.6 s(分为成功开断和失灵两种情形)，故障拟合时间为 0.585 s，数据窗长为 1/4 周期，采样频率为 4 000 Hz，数据窗随采样频率逐点后移。图 7 给出了断路器 CF1 成功开断情况下的电流波形及确定系数变化曲线。通过图 7 可以看出，故障发生后，电流波形呈现正弦波特征，确定系数几乎为 1；0.6 s 故障清除后，指数函数的确定系数有所增长，三角函数确定系数急剧下降。本次仿真拖尾现象不明显，所以故障清除一段时间内电流迅速降为 0，指数函数确定系数只是略有提升，但数值已大于三角函数确定系数，且电流元件由于电流过小不会启动，所以新的失灵保护判据能可靠不动作。

图 8 给出了断路器 CF1 失灵情况下的电流波形及确定系数变化曲线。通过图 8 可以看出，由于断路器失灵，电流波形一直呈现正弦波特征，三角函



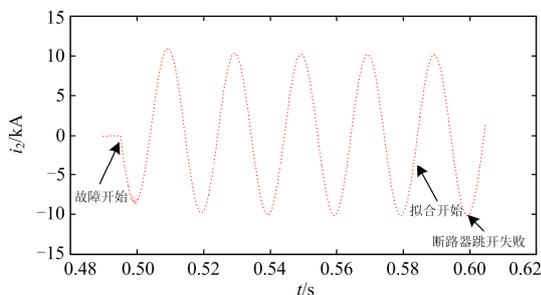
(a) 电流故障波形



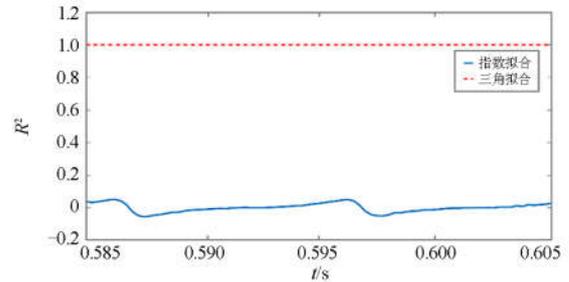
(b) 拟合精度曲线

图 7 断路器开断成功仿真示意图

Fig. 7 Simulation result of breaker cutoff



(a) 电流故障波形



(b) 拟合精度曲线

图 8 断路器失灵仿真示意图

Fig. 8 Simulation result of breaker failure

数的确定系数一直为 1；而指数函数的确定系数一直远小于三角函数确定系数，同时电流一直很大，所以新的失灵保护判据能可靠启动。

### 3.2 故障场景 2 仿真分析

本次仿真场景中，故障时刻为 0.5 s，故障开断时间为 0.59 s(分为成功开断和失灵两种情形)，故障拟合时间为 0.59 s，数据窗长为 1/4 周期，采样频率为 6 000 Hz。为了直观给出拟合过程，同时避免与故障场景 1 重复描述，本次给出数据窗拟合 1 次的仿真结果。图 9 给出了 CF1 失灵时 CT 二次电流采样值分布图，横坐标表示采样点数，纵坐标表示采样值。通过图 9 可以看出，波形特征接近正弦波。

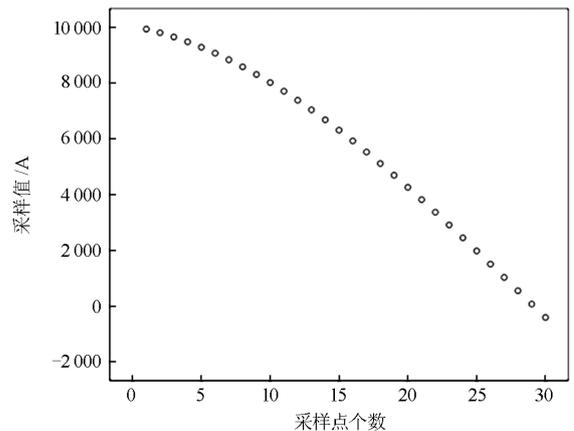


图 9 断路器失灵采样值分布图

Fig. 9 Sampling distribution of breaker failure

表 2 给出了用最小二乘法拟合结果。通过表 2 可以看出，三角函数的确定系数为 1，而指数函数的确定系数为 0.664，显然存在  $R_s > R_z$ ，新的失灵保护能可靠启动。

图 10 给出了成功开断后 CT 二次电流采样值分布图，横坐标表示采样点数，纵坐标表示采样值。通过图 10 可以看出，波形特征接近指数函数。事实上，通过图 10 可以看出，本次算例 CT 二次电流衰

减很快, 拖尾现象不严重, 大约 1/8 周波电流即衰减为 0。

表 2 拟合结果对比表  
Table 2 Comparison of fitting results

	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$R$
三角函数	1.017	0.047	1.776	0.009	1
指数函数	1.983	-0.012	-	-	0.664

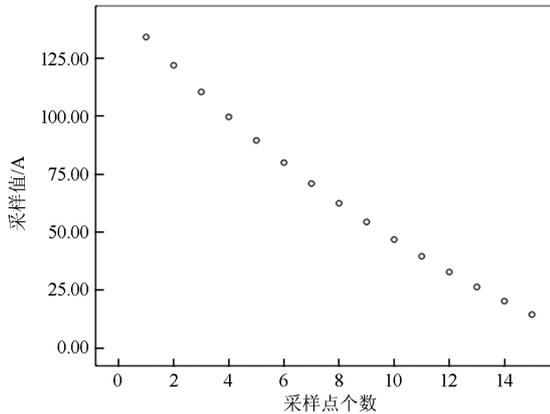


图 10 断路器开断后采样值分布图

Fig. 10 Sampling distribution after breaker cutoff

表 3 给出了用最小二乘法对图 10 数据进行拟合的结果, 通过表 3 可以看出, 三角函数的确定系数为 0.682, 而指数函数的确定系数为 0.984, 显然存在  $R_s < R_z$ , 新的失灵保护能可靠不启动。需要指出的是, 由于图 10 中 15 个采样点以后采样值已经接近为 0, 考虑拟合 1/4 周波 30 个数据, 此时指数函数拟合精度可能不高, 远小于表 3 中的拟合精度, 但此时电流已经为 0, 电流元件已经可靠返回, 仅依赖电流元件也能确保新的保护逻辑不误动。

表 3 拟合结果对比表  
Table 3 Comparison of fitting results

	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$R$
三角函数	180.013	0.054	3.087	134.001	0.682
指数函数	159.436	-0.125	-	-	0.984

## 4 结论

本文提出了一种基于确定系数的失灵保护优化方案, 新的方案利用了断路器失灵与否时 CT 二次电流波形特征差异, 新方案主要有如下特点:

1) 进一步防止失灵保护误动, 避免保护误动扩大故障范围。新的失灵保护优化方案增加了确定系数判据, 在电流元件、远方跳闸信号的基础上, 通过对 CT 二次电流进行拟合, 进一步识别断路器是否失灵, 确保了失灵保护不误动。

2) 失灵保护出口时间加快。新的失灵保护优化方案不需要考虑电流元件返回时间, 即使在 CT 电流拖尾情况下, 仍然能通过拟合判据防止失灵保护误动, 因此加快了失灵保护时间。

综上所述, 新的失灵保护判据既能保证保护不误动, 也能加速保护动作出口, 是一种性能较为优越的失灵保护方案。

## 参考文献

- [1] 陈国平, 李明节, 许涛. 特高压交直流电网系统保护及其关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 2-10. CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao. System protection and its key technologies of UHV AC and DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 2-10.
- [2] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z.
- [3] 郭敬梅, 曾德辉. 高压直流线路故障行波保护动作概率计算与分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 99-107. GUO Jingmei, ZENG Dehui. Action probability calculation and analysis method for travelling-wave protection caused by short-circuit faults on HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 99-107.
- [4] 张志强, 余超耘, 刘强, 等. 换流器保护在交流故障下的出口时序特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 85-90. ZHANG Zhiqiang, YU Chaoyun, LIU Qiang, et al. Research on the trip timing order characteristics of converter protections under AC faults[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 85-90.
- [5] 洪潮, 郭彦勋, 李海锋, 等. 直流电网快速后备保护方案[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3375-3382. HONG Chao, GUO Yanxun, LI Haifeng, et al. Fast operating backup protection scheme of DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3375-3382.
- [6] 雷霄, 孙栩, 李新年, 等. 适应大容量直流接入的弱受端的直流极控系统优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(9): 205-209. LEI Xiao, SUN Xu, LI Xinnian, et al. Optimization methods of pole control for large-capacity HVDC accessing to weak receiving system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 205-209.
- [7] 罗亚洲, 陈德治, 李轶群, 等. 华北多特高压交直流耦合大受端电网系统保护方案设计[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 11-20. LUO Yazhou, CHEN Dezhi, LI Yiqun, et al. Design of

- system protection scheme for north china multi-UHV AC and DC strong coupling large receiving-end grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 11-20.
- [8] 贾俊川, 张健, 仲悟之, 等. 应对多回并列直流换相失败的送端系统安全稳定控制措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6320-6327.  
JIA Junchuan, ZHANG Jian, ZHONG Wuzhi, et al. Research on the security and stability control measures of the sending side system coping with multiple parallel-operation HVDCs simultaneous commutation failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6320-6327.
- [9] LI Baowei, WEN Minghao, LÜ Pengfei, et al. Research on sub-station-area breaker failure protection based on the principle of current differential[J]. The Journal of Engineering, 2019, 16(3): 1181-1184.
- [10] 陈庆, 闪鑫, 罗建裕, 等. 特高压直流故障下源网荷协调控制策略及应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 147-152.  
CHEN Qing, SHAN Xin, LUO Jianyu, et al. Source-grid-load coordinated control strategy and its application under UHVDC faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 147-152.
- [11] 马静, 裴迅, 马伟, 等. 基于方向权重的广域后备保护跳闸策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 107-114.  
MA Jing, PEI Xun, MA Wei, et al. Tripping strategy based on directional weight for wide-area backup protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 107-114.
- [12] 李生虎, 张维, 孙祺. 含断路器失灵保护的电力系统可靠性建模[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(9): 14-20.  
LI Shenghu, ZHANG Wei, SUN Qi. Reliability modeling of protection system considering circuit breaker failure[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(9): 14-20.
- [13] 于越, 郭雅蓉, 李岩军, 等. 基于 CT 拖尾电流屈算算法的失灵保护延时优化研究[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 285-290.  
YU Yue, GUO Yarong, LI Yanjun, et al. Research on delay optimization of breaker failure protection based on the CT current tail truncation algorithm[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 285-290.
- [14] 余江, 周红阳, 陈朝晖, 等. 计及系统稳定需求的 500 kV 断路器失灵及死区保护优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 142-146.  
YU Jiang, ZHOU Hongyang, CHEN Zhaohui, et al. Improvement of 500 kV breaker failure and dead-zone prevention based on requirement on stability of grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 142-146.
- [15] 万洛飞, 李志坚, 宋斌, 等. 一种基于拖尾电流识别的失灵保护实现[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 89-94.  
WAN Luofei, LI Zhijian, SONG Bin, et al. Implement method of breaker failure protection based on subsidence current blocking[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 89-94.
- [16] 李志勇, 傅润炜, 王峥夏, 等. 电流互感器拖尾对断路器失灵保护影响的仿真研究[J]. 河南科技, 2014(5): 119-121.  
LI Zhiyong, FU Runwei, WANG Zhengxia, et al. The simulation research on the impact of CT tailing to breaker failure protection[J]. Henan Science and Technology, 2014(5): 119-121.
- [17] 于游, 邱金辉, 吴颖超, 等. 基于电流量的断路器失灵保护闭锁新原理[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 114-118.  
YU You, QIU Jinhui, WU Yingchao, et al. A novel blocking method of circuit breaker failure protection based on current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 114-118.
- [18] 姜自强, 刘建勇. 南阳特高压断路器失灵保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 117-122.  
JIANG Ziqiang, LIU Jianyong. Study on Nanyang substation of UHV circuit breaker failure protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 117-122.
- [19] 赵建文, 张广骁, 童晓阳. 基于 Dijkstra 算法的广域自适应跳闸策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 127-134.  
ZHAO Jianwen, ZHANG Guangxiao, TONG Xiaoyang. Self-adaptive tripping strategy based on Dijkstra algorithm for wide-area protection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 127-134.
- [20] 杨雯, 刘元琦, 吴小忠, 等. 计及死区故障的 3/2 接线变电站的 Petri 网故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 28-37.  
YANG Wen, LIU Yuanqi, WU Xiaozhong, et al. A fault diagnosis method of 3/2 connection substation based on Petri nets with dead-zone fault taken into account[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 28-37.

收稿日期: 2018-12-09; 修回日期: 2019-03-12

作者简介:

申洪明(1988—), 男, 博士, 主要研究电力系统保护与控制; E-mail: shen198806@126.com

宋璇坤(1959—), 女, 教授级高工, 主要研究方向为电力系统保护与控制;

李轶凡(1992—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统保护与控制。

(编辑 魏小丽)