

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230184

基于采样序列整形的配电网线路保护防励磁涌流误动策略

李振兴¹, 胡聪¹, 朱益¹, 陈艳霞², 魏业文¹, 皮志勇³

(1. 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2. 国网北京市电力公司
电力科学研究院, 北京 100075; 3. 国网湖北省电力公司荆门供电公司, 湖北 荆门 448001)

摘要: 针对配电网线路中配变空载合闸导致励磁涌流从而引起上游线路保护误动的问题, 提出了一种基于采样序列整形的配电网线路保护防励磁涌流误动策略。当线路电流同时满足快速启动和二次谐波含量低判据时, 进入电流序列整形程序。首先, 根据二次谐波有效值的稳定区段将电流信号分割为正弦区段和畸变区段, 并利用稳定区段的长度设置结束判据。然后, 通过确定自适应窗长和标准正弦曲线对正弦区段进行相似度计算, 得到原始正弦区段的幅值和相位参数, 从而对畸变区段完成整形。最后, 将修复后不带励磁涌流的电流信号送至线路保护进行判断。所提策略能够有效应对混叠在负荷电流和故障电流中的励磁涌流, 并通过仿真分析验证了所提策略的有效性和可靠性。

关键词: 配电网; 励磁涌流; 二次谐波; 皮尔逊相关系数; 序列整形

An anti-excitation inrush current maloperation strategy of line protection for a distribution network based on sampling sequence shaping

LI Zhenxing¹, HU Cong¹, ZHU Yi¹, CHEN Yanxia², WEI Yewen¹, PI Zhiyong³

(1. Hubei Province Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station (China Three Gorges University), Yichang 443002, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100075, China; 3. Jingmen Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Company, Jingmen 448001, China)

Abstract: There is a problem of protection maloperation of an upstream line caused by excitation inrush due to no-load closing of a distribution transformer in distribution network lines. Thus this paper proposes an anti-excitation inrush current maloperation strategy of line protection for a distribution network based on sampling sequence shaping. When the line current meets the criteria of fast start and low second harmonic content at the same time, it will enter the current sequence shaping procedure. First, the current signal is divided into sinusoidal and distortion sections according to the stable section of the second harmonic effective value, and the auxiliary criterion is set by the length of the stable section. Subsequently, the similarity of the sine segments is calculated by determining the adaptive window length and the standard sine curve. The amplitude and phase parameters of the original sinusoidal region are obtained to complete the reshaping of the distortion region. Finally, the current signal without excitation inrush current after repair is sent to line protection for judgment. The proposed strategy can effectively cope with the excitation inrush current overlapping in the load and fault currents, and the validity and reliability of the proposed strategy are verified by simulation.

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

Key words: distribution network; excitation inrush current; second harmonic; Pearson correlation coefficient; sequence shaping

0 引言

配电网在电力系统中占据着重要的地位, 沿线

配置有大量配电变压器向各类负荷供电。随着我国社会经济不断发展, 用电需求持续提高, 导致配电变压器的数量及总容量不断增加^[1-4]。然而, 配电线路在空载合闸或故障切除后恢复送电时, 各配电变压器可能因为铁芯饱和而产生很大的励磁涌流^[5-8]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077120)

通过与负荷电流相互混叠, 容易导致上游线路保护误动, 从而引起瞬时性故障重合闸失败, 或造成配电自动化系统的故障恢复功能失效, 严重影响配电网的供电可靠性与供电质量^[9-13]。

与单台变压器励磁涌流相比, 配电变压器产生的励磁涌流在线路上与负荷电流相混叠, 导致线路电流中的波形信号更为复杂。因此, 已有的单台变压器的励磁涌流辨识技术难以直接应用于配电网线路保护中^[14-19]。目前, 针对配电网的励磁涌流辨识及应对措施的研究成果相对较少。在配电网实际运行中, 因励磁涌流导致合闸失败后, 运维人员通常采用提高电流保护定值或延长保护动作时间的方法“躲过”励磁涌流, 以期避免励磁涌流导致线路保护误动^[20-21]。然而, 这些方法将会牺牲线路保护的灵敏度、速动性和可靠性。文献[22]针对各个场景下流经线路开关的励磁涌流进行分析, 揭示了配电线路上励磁涌流的概率分布规律, 该研究成果可以用于优化瞬时速断保护的电流整定值, 但是保护的灵敏度需要进一步校验。文献[23]通过比较励磁涌流和故障电流之间波形特征的差异, 提出了一种基于动态四边形分析的配电网励磁涌流识别方法, 通过仿真与试验结果证明其可靠性与有效性, 但当励磁涌流与线路负荷电流并存时其识别效果不佳。文献[24]提出了一种配电网励磁涌流自适应闭锁方案, 利用小波变换对电流信号中的各个区段进行区分, 以各区段内的信号特征识别励磁涌流。文献[25]针对配电网励磁涌流容易导致线路保护误动的问题, 提出了一种基于波形特征辨识的线路电流畸变剔除与波形重构方法, 该方案能够有效剔除线路电流信号中励磁涌流或 CT 饱和产生的畸变信号, 但存在严重噪声和高次谐波时需要进一步研究该方法的性能。

针对以上问题, 本文提出了一种基于采样序列整形的配电网线路保护防励磁涌流误动策略。当线路电流同时满足快速启动和二次谐波含量低判据时, 立刻进入电流序列整形程序。根据二次谐波有效值的稳定区段将电流信号分割为正弦区段和畸变区段, 并利用稳定区段的长度设置整形结束判据。再通过确定自适应窗长和标准正弦曲线对正弦区段进行相似度计算, 得到原始正弦区段的幅值和相位参数, 从而对畸变区段完成整形。最后将整形后不带励磁涌流的电流信号送至线路保护进行判断, 以此避免线路保护因励磁涌流而发生误动。

1 配变励磁涌流对线路保护的影响

由于变压器的铁心磁化曲线是非线性的, 存在

饱和区与非饱和区。当变压器运行于非饱和区时, 由于等效励磁阻抗很大, 励磁电流将呈现数值很小的正弦波形态; 而当变压器运行于饱和区时, 由于等效励磁阻抗很小, 将产生数值很大的尖顶波形态的励磁电流^[26]。

图 1(a)给出了某条线路下游配电变压器所产生的励磁涌流与负荷电流在线路上混叠时的电流信号。由于线路上游电流信号中存在励磁涌流成分, 使得电流信号发生畸变, 导致畸变部分呈现尖顶波特征, 且数值较大。10 kV 配电线路的主保护多采用三段式电流保护, 在进行保护整定值计算时, 通常没有考虑下游配电变压器空载投入时产生的励磁涌流对三段式电流保护造成的影响。送电时产生的励磁涌流经过多次叠加后, 上游线路电流可能会接近或超过电流保护定值。

如图 1(a)所示, 下游配电变压器在 0.182 s 合闸时, 产生的励磁涌流是额定电流的 3 倍, 经过全波快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)实时计算的基波有效值在 0.193 s 大于过流保护定值 I_{set} 。如图 1(b)所示, 通过二次谐波含量可以看出, 故障初期二次谐波能够可靠闭锁, 但在故障后 0.197 s 二次谐波含量降至 15% 以下, 二次谐波制动将解除闭锁。由于基波有效值仍然大于过流保护定值, 在二次谐波闭锁失效的情况下, 将造成上游线路保护误动。

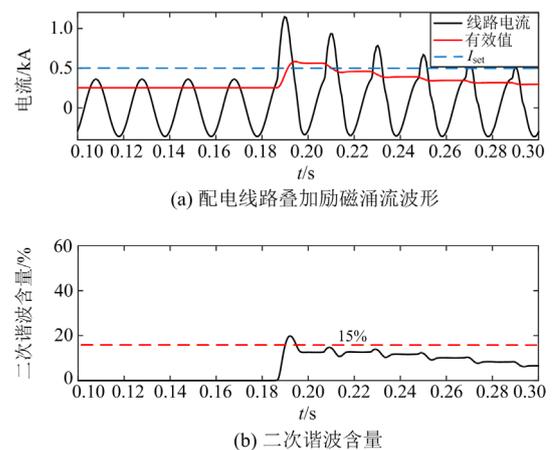


图 1 配变励磁涌流导致上游线路保护误动

Fig. 1 Maloperation of upstream line protection caused by excitation inrush current of distribution transformer

由上述分析可知, 由于电流信号中负荷电流的存在, 使得正弦成分的含量增加, 导致电流信号的二次谐波含量百分比降低, 造成波形间断角消失, 极大地削弱或掩盖了电流信号中的励磁涌流特征。因此, 常用的辨识方法对混叠在负荷电流中的励磁

涌流不再适用，增加了线路保护误动的风险。

2 基于采样序列整形的线路保护防励磁涌流误动策略

2.1 配电网励磁涌流的二次谐波特征

配电网励磁涌流在叠加负荷电流的情况下，由于励磁涌流尖顶波对线路电流有助增的作用，可能导致线路保护误动。由于励磁涌流中包含大量的二次谐波分量，因此在利用 FFT 计算二次谐波有效值时，会出现相应的波形特征，该特征反映了励磁涌流的变化趋势。

如图 2 所示，配变空载合闸时在 t_a 时刻开始出现励磁涌流，叠加到负荷电流上使得原始电流信号出现畸变。利用滑动数据窗对电流信号进行 FFT 计算，当数据窗中不存在励磁涌流(t_a 时刻之前)时，由于二次谐波含量极低，计算得到的二次谐波幅值接近于 0。随着数据窗的移动，由于励磁涌流的出现将导致二次谐波幅值开始增大，直到励磁涌流达到峰值之后，二次谐波幅值出现下降趋势，如图 2 中的 $t_a \sim t_b$ 时间段。由于励磁涌流具有间断角的特征，叠加到负荷电流信号中将不会引起波形发生畸变，如图 2 中的 $t_b \sim t_c$ 时间段，该区段经过滑动数据窗的计算使得二次谐波幅值维持在一个稳态值附

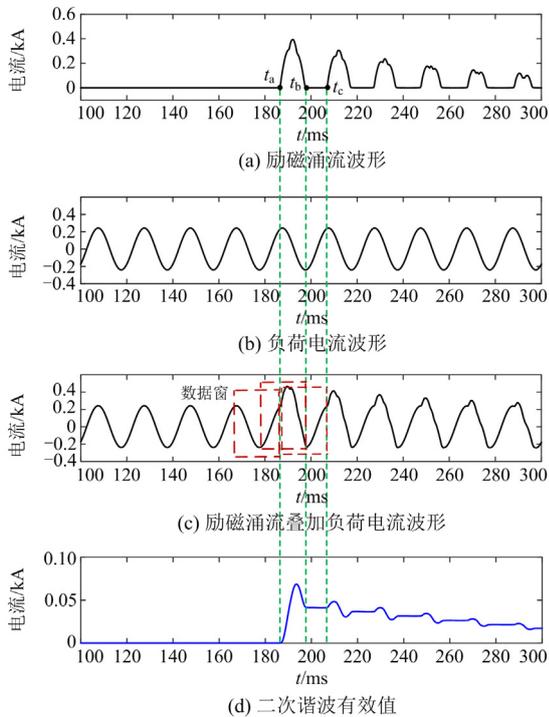


图 2 配电网励磁涌流的二次谐波特征

Fig. 2 Second harmonic characteristics of excitation inrush current of distribution network

近，出现一段平缓区。励磁涌流一旦发生，将会保持一个逐渐衰减的趋势，后续的二次谐波幅值也将继续维持第一个周波所表现出的特征，直到二次谐波幅值衰减至 0。

2.2 快速启动判据

选取当前时刻前一个周波长度的数据并应用 FFT 实时计算电流有效值 $i_{rms}(k)$ ，由于励磁涌流初期数据窗内包含较多的正常信号，随着数据窗的移动有效值开始出现爬坡效应。基于这一现象，同时考虑到短时扰动以及系统负荷变化的干扰，有效值爬坡趋势判别采用多点增量比较实现。多点增量比较是累计数据窗内相邻两点满足上升趋势的次数，且总次数达到设定阈值时，判断为整体递增。根据电流的采样频率设置判别阈值，如式(1)所示。

$$N_{st}(k) = \begin{cases} 1, & i_{rms}(k+1) > i_{rms}(k) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^m N_{st}(k) > n$$

式中： $N_{st}(k)$ 为趋势判别符号， $N_{st}(k)=1$ 代表相邻两个有效值呈现上升趋势， $N_{st}(k)=0$ 则代表下降趋势或保持不变； m 为有效值爬坡判别数据窗的采样点数，数据窗长度为 $N/8$ ， N 是一周波采样点数； n 为趋势判别防干扰阈值，建议取 $(0.5 \sim 0.7)m$ 。

有效值爬坡效应在系统受到扰动时也会出现，仅以此作为启动判据并不能达到可靠启动的要求。由于下游配变励磁涌流的叠加，电流采样值会快速上升到较大数值。通过设定启动阈值 I_{st} 与电流采样值 $i_m(k)$ 比较，并要求连续 3 个或以上采样值大于启动阈值，来限制其他干扰下保护的频繁启动。其采样值越限判据如式(2)所示。

$$|i_m(k)| > I_{st} \cap |i_m(k+1)| > I_{st} \cap |i_m(k+2)| > I_{st} \quad (2)$$

式中： $|i_m(k)|$ 表示第 k 个电流采样值的绝对值； I_{st} 为启动阈值，建议按 0.7~1.0 倍的过流保护定值整定。

在故障后 $T/4$ 内，根据实时采样监测与计算，首先利用 $T/8$ 数据窗内采样值判别有效值爬坡趋势，当满足式(1)后立即启动采样值越限判据，并持续监测有效值爬坡趋势，在越限采样点数满足式(2)后，达到快速启动判据的要求。同时，实时计算线路电流中的二次谐波含量，当二次谐波百分比低于 15% 时，立刻启动电流序列整形技术；否则，立刻闭锁线路保护。

2.3 基于二次谐波特征的区域辨识与分割

在获得每个新的采样数据后，根据最新的数据窗应用 FFT 计算出最新的二次谐波有效值 I_{2rms} 。若求得的连续多个二次谐波有效值的均方差均小于预

设的阈值, 则认为所计算的 $I_{2\text{rms}}$ 的波动很小, 可以判定此时的 $I_{2\text{rms}}$ 处于同一稳定区段。稳定区段的判定标准如下:

如果求出的二次谐波有效值序列 $(a, b) = (k_a, k_b)$ 满足式(3)和式(4), 并且 $(a, b) = (k_a - 1, k_b)$ 和 $(a, b) = (k_a, k_b + 1)$ 均不满足式(3)和式(4), 那么位于第 k_a 个计算点和第 k_b 个计算点之间的序列判定为稳定区段。其中, k_a 和 k_b 是该稳定区段的边界采样点。

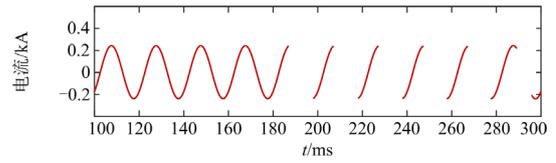
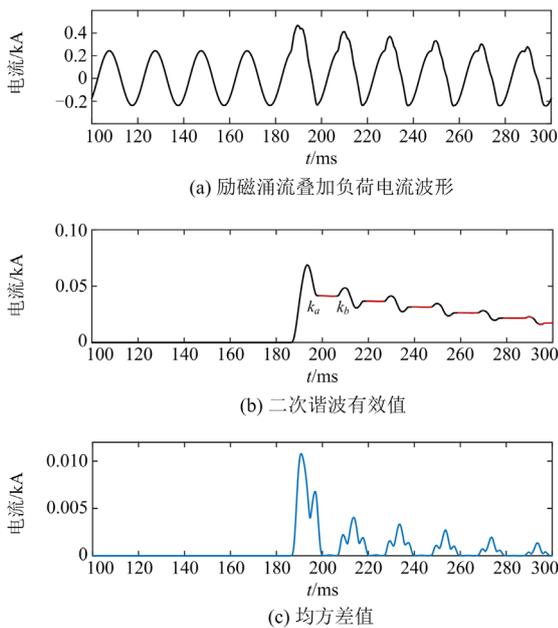
$$\begin{cases} b - a > \frac{1}{10}N \\ \sigma(a, b) < \sigma_{\text{set}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\sigma(a, b) = \sqrt{\sum_{k=a}^b (I_{2\text{rms}}(k) - \bar{I}_{2\text{rms}})^2 / (b - a + 1)} \quad (4)$$

式中: a 和 b 为二次谐波有效值的采样点序号; N 为一个周期的采样点数; 均方差 $\sigma(a, b)$ 反映的是区段的稳定性; $I_{2\text{rms}}(k)$ 为根据电流信号所求得的二次谐波有效值; $\bar{I}_{2\text{rms}}$ 为采样点区间内的二次谐波有效值平均值; σ_{set} 为预设的阈值。 σ_{set} 是一个较小的值, 以便于判断所求得的二次谐波有效值的波动是否处于较小的范围内。考虑到正常负荷电流的正常波动以及计算误差, 在本文中 σ_{set} 的取值为 $0.02\bar{I}_{2\text{rms}}$ 。

根据二次谐波有效值判断出的稳定区段, 其对应的是线路电流中不包含励磁涌流的部分(即正弦区段), 因此可以利用边界采样点 k_a 和 k_b 对电流信号进行分割, 将涌流区段与正弦区段区分开来, 从而为后续的电流量序列整形提供基础条件。

对图 2 中励磁涌流叠加负荷电流信号的区段进行分割, 结果如图 3 所示。



(d) 保留稳态区段的电流波形

图 3 励磁涌流叠加负荷电流的电流信号分割示例

Fig. 3 Current signal segmentation of load current superimposed with excitation inrush current

图 3(a)为原始电流信号波形, 其中畸变区段与正弦区段反复交替出现, 由于励磁涌流的衰减特性导致畸变区段的畸变程度逐渐减弱, 同时受到负荷电流的叠加作用, 波形中不再存在间断角。图 3(b)为实时计算的二次谐波有效值, 其均方差值 σ 如图 3(c)所示, 通过上述稳定区段的判断方法, 找到各个周波的稳定区段(图中红色实线标出)。再利用稳定区段的边界点对原始电流信号进行分割处理, 图 3(d)是保留正弦区段后的电流波形, 可以看出其二次谐波有效值稳定区段对应的就是原始电流信号中的正弦部分。

由于励磁涌流的衰减特性, 二次谐波有效值也随之降低, 当励磁涌流衰减至一定程度时将导致稳定区段变长, 此时不会对线路保护造成影响, 因此可以设置相应的阈值来结束整形操作, 即: 当稳定区段的长度 $(n = k_a - k_b + 1)$ 满足式(5)时结束整形。

$$n > n_{\text{set}} \quad (5)$$

式中, n_{set} 为整形结束阈值, 推荐取 $0.75N$ 。

2.4 基于 Pearson 相关系数的电流量序列整形

2.4.1 自适应数据窗长与标准正弦曲线的确定

首先, 通过正弦区段内电流量序列分析各离散点的分布规律, 以发生励磁涌流后的首个稳定区段为例, 根据稳定区段的长度 n 确定自适应数据窗。在该数据窗中, 判断第一个点的正负以及前三点的变化趋势, 结合这两个特征确定标准正弦曲线, 并要求其采样频率必须与原始电流信号的采样频率相同, 具体做法如下:

1) 自适应数据窗中第一个点数据 $i(k_1) \geq 0$, 同时前三点数据的变化趋势为递增, 则将标准正弦曲线确定为 $y = \sin(2\pi k/N)$, 其中 N 为一周波的采样点数;

2) 自适应数据窗中第一个点数据 $i(k_1) > 0$, 同时前三点数据的变化趋势为递减, 则将标准正弦曲线确定为 $y = \cos(2\pi k/N)$;

3) 自适应数据窗中第一个点数据 $i(k_1) \leq 0$, 同时前三点数据的变化趋势为递减, 则将标准正弦曲线确定为 $y = -\sin(2\pi k/N)$;

4) 自适应数据窗中第一个点数据 $i(k_1) < 0$ ，同时前三点数据的变化趋势为递增，则将标准正弦曲线确定为 $y = -\cos(2\pi k/N)$ 。

标准正弦曲线确定后，取自适应数据窗的数据长度为 n ，并保证标准正弦区段序列点数与原始正弦区段序列点数相同，再从标准正弦曲线的第一个数据窗开始，对原始正弦区段序列与标准正弦区段序列进行相似度计算。按照该方法确定标准正弦曲线后，可以快速找到与原始正弦区段序列相似的标准正弦区段，提高整形技术的计算效率。

2.4.2 相似度计算

为了表征原始正弦区段序列与标准正弦区段序列的相似度，本节引用 Pearson(皮尔逊)相关系数。Pearson 相关系数是用来度量两组信号数据的相似程度，比如对于两个不同的采样序列 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 和 $y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ ，定义两者之间的相关系数^[27]为

$$\rho(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j)(y_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j)^2}} \quad (6)$$

式中， $\rho(x, y)$ 表示信号 x 与 y 之间的 Pearson 相关系数。 $\rho(x, y)$ 介于 $[-1, +1]$ 之间，其中 $+1$ 表示两个信号之间是完全的线性正相关； -1 表示两个信号之间是完全的线性负相关， $\rho(x, y)$ 的值越接近于 1 ，表示两个信号之间的相关性越强，反之越弱。

由于 Pearson 相关系数是协方差与标准差乘积的商，或者是归一化后的协方差，因此该相关系数只衡量两组序列的相关性而不受序列大小的影响。通过滑动自适应数据窗进行相似度计算，只有在与原始正弦区段序列接近或重合时，两者之间的变化趋势才会极其相似，此时的 Pearson 相关系数 $\rho(x, y) \approx 1$ ；而在其他情况下，两者之间的 Pearson 相关系数 $\rho(x, y) < 1$ 。因此可以通过设定一个门槛值 ρ_{set} ，以超过门槛值 ρ_{set} 的第一个数据窗来确定与原始正弦区段序列变化趋势极其相似的标准正弦区段。考虑到精确性以及计算误差，本文将 ρ_{set} 设定为 0.995 。

$$\begin{cases} \rho \geq \rho_{\text{set}}, & \text{与正弦区段相似} \\ \rho < \rho_{\text{set}}, & \text{与正弦区段不相似} \end{cases} \quad (7)$$

通过 Pearson 相关系数进行相似度计算，确定与原始正弦区段相似的标准正弦区段后，记录此时标准正弦区段的自适应数据窗起始点 k_{st} 以及数据窗内各点的数值，为下一步的畸变区段整形提供基

础数据。

2.4.3 畸变区段的整形修复

首先，根据标准正弦区段各点数值与对应的原始正弦区段数值的倍数关系，求出原始正弦区段的幅值，由于两区段在变化趋势上极其相似，各点的数值倍数 $K(k)$ 在理想情况下都是相同的，考虑到计算误差等因素，将数据窗内各点的数值倍数进行均值计算，如式(8)所示，其倍数均值 K 即为原始正弦区段的幅值。

$$K = \frac{\sum_{k=1}^n K(k)}{n} \quad (8)$$

在每一个周波的数据窗中，以原始正弦区段的边界终点 k_b 作为数据窗的终点，由于原始正弦区段有 n 个采样点，则剩下的 $(N - n)$ 个采样点为需要修复的畸变区段。畸变区段的修复曲线序列按式(9)来确定。

$$i(k) = K \cdot \sin\left(\frac{2\pi k}{N} + \varphi\right), \quad k \in [1, N - n] \quad (9)$$

式中， φ 为修复曲线序列的初相位。根据标准正弦区段的自适应数据窗起始点 k_{st} 与原始正弦区段的边界起点 k_a ，令 $i(k_a) = K \cdot y(k_{\text{st}})$ ，求得

$$\varphi = \arcsin(y(k_{\text{st}})) - \frac{2\pi k_a}{N}, \quad \varphi \in [-\pi, \pi] \quad (10)$$

最后，根据式(9)和式(10)求出畸变区段的修复曲线序列，按照此流程对每个周波的电流序列完成整形修复，并将整形修复后的电流信号送至传统过流保护。

以图 4(a)中发生励磁涌流后的首个稳定区段为例，对应的正弦区段包含 35 个采样点，故取自适应数据窗的长度为 $n = 35$ 。

由于数据窗中第一个点数据 $i(k_a) < 0$ ，同时前三点数据的变化趋势为递增，因此将标准正弦曲线确定为 $y = -\cos(2\pi k/N)$ ，如图 4(b)所示。通过 Pearson 相关系数进行相似度计算的结果如图 4(c)所示，可知在 0 ms 时 $\rho = 0.9975 > 0.995$ ，满足相似的条件。记录下此时的 $k_{\text{st}} = 0$ ，以及自适应数据窗内的各点数值，根据式(8)计算得到数值倍数平均值 $K = 0.248$ 。在对畸变区段进行整形修复时，通过 $k_a = 45$ ， $y(k_{\text{st}}) = -1$ ，根据式(10)计算得到修复曲线序列的初相位 $\varphi = 3\pi/8$ ，最终畸变区段的修复曲线序列为 $i(k) = 0.248 \cdot \sin(2\pi k/N + 3\pi/8)$ ， $k \in [1, k_a]$ ，修复后的电流序列如图 4(d)所示。

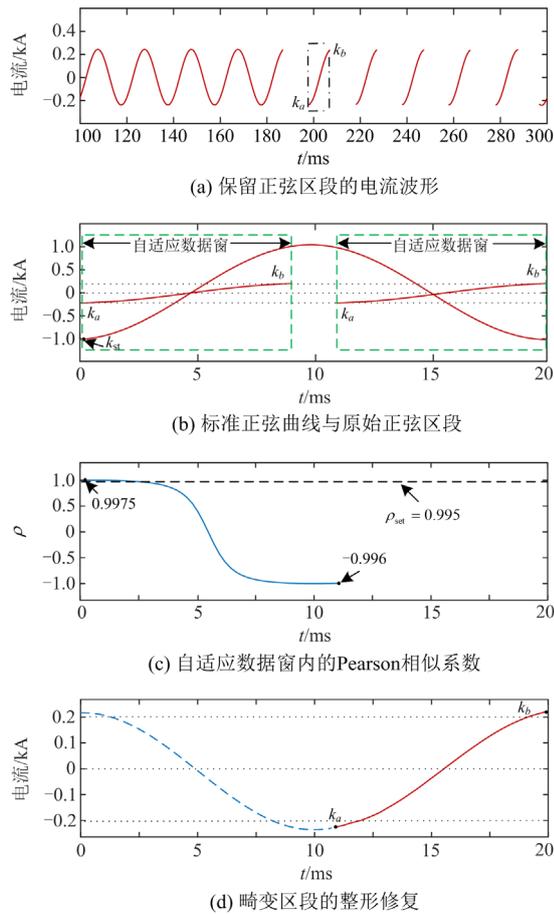


图4 电流序列整形示例

Fig. 4 Example of current sequence shaping

2.5 策略流程

本文所提策略的流程图如图5所示。当线路电流同时满足快速启动和二次谐波含量低判据时, 立刻进入电流序列整形程序。电流序列整形是根据二次谐波有效值的稳定区段将电流信号分割为正弦区段和畸变区段, 并根据稳定区段的长度设置整形结束判据。利用正弦区段的电流信号对畸变区段进行修复, 最后将修复后不带励磁涌流的电流信号送至线路保护进行判断, 从而避免线路保护的误动。

3 仿真测试

为验证本文所提策略的有效性, 在电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC中搭建如图6所示的10 kV配电网仿真系统。其中, 配电变压器连接组别均采用Dyn11, 变比为10 kV/0.4 kV, 变压器容量为6 MVA; 每相有功负载为1 MW, 每相无功负载为0.15 Mvar; 相邻两节点间线路长度设为3~10 km不等; 系统频率为50 Hz, 采样频率设为4 kHz, 即每周波80个采样点。

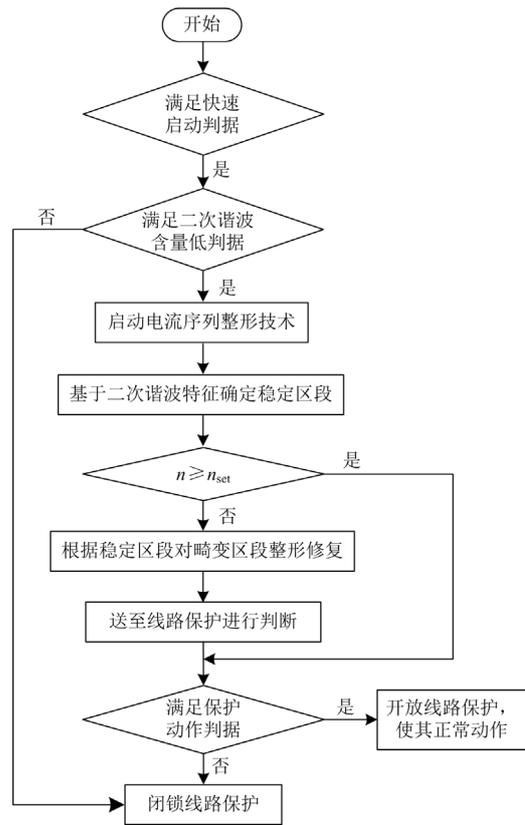


图5 基于采样序列整形的防励磁涌流误动策略流程图

Fig. 5 Flowchart of anti-excitation inrush current maloperation strategy based on sampling sequence shaping

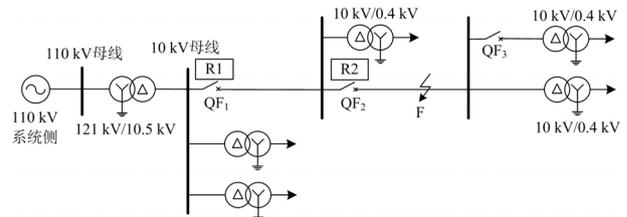


图6 10 kV 配电网仿真系统

Fig. 6 10 kV distribution network simulation system

设置不同类型的短路故障以及不同合闸时刻、不同系统参数等, 对故障电流和励磁涌流进行了大量仿真测试。测试结果验证了本文所提策略能够有效消除励磁涌流的波形畸变, 从而避免线路保护误动作。限于篇幅, 下文选取了部分典型仿真测试案例进行详细论述。

3.1 励磁涌流叠加负荷电流

使配网线路正常带负荷运行, 设置变压器铁芯处于饱和态, 然后闭合开关 QF_3 , 使变压器空载合闸产生励磁涌流。保护R2处测得的电流信号如图7(a)所示, 所产生的励磁涌流沿着线路侵入配电网, 在线路上与负荷电流混叠。由于励磁涌流的叠加,

导致线路电流的基波有效值满足爬坡趋势判据, 在满足采样值越限判据后, 将立刻启动电流序列整形技术。

根据线路电流的二次谐波有效值, 计算出各个周波的稳定区段(图 7(b)中的红色实线部分)。再通过稳定区段的边界采样点对原始电流信号进行分割处理, 只保留信号中正弦区段的电流波形, 如图 7(c)所示。利用电流序列整形技术对被保留下来的电流信号进行修复, 标准正弦曲线确定为 $y = -\sin(2\pi k/N)$, 在一个周波的数据窗中通过 Pearson 相关系数进行相似度计算的结果是在 4.8 ms 时 $\rho = 0.9964 > 0.995$, 此时的平均数值倍数 $K = 0.362$ 。在对畸变区段进行修复时, 通过 $k_a = 45$, $y(k_{st}) = -0.998$, 根据式(10)计算得到修复曲线序列的初相位 $\varphi = 0.3944\pi$, 最终得到修复曲线序列为 $i(k) = 0.362 \cdot \sin(2\pi k/N + 0.3944\pi)$, $k \in [1, 45]$ 。后续周波同样根据电流序列整形技术对畸变区段进行修复, 修复后的电流序列如图 7(d)所示, 最后将整形修复后的电流信号送至传统保护进行判断。

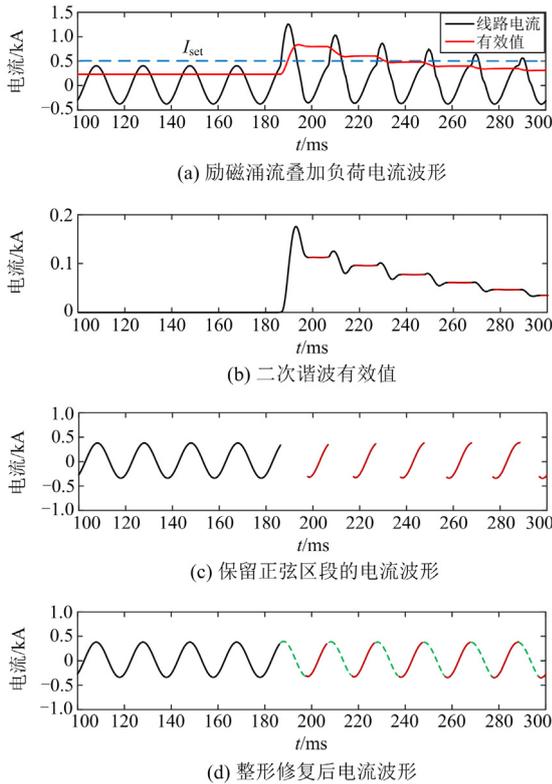


图 7 励磁涌流叠加负荷电流情况分析

Fig. 7 Analysis of excitation inrush current superimposed with load current

3.2 励磁涌流叠加短路电流

使配网线路处于正常带负荷运行状态, 在 F 点

设置 0.182 s 时发生相间短路故障, 同时设置变压器铁芯处于饱和态, 在相同时刻闭合开关 QF_3 , 使变压器空载合闸产生励磁涌流, 保护 R2 处测到的电流信号如图 8(a)所示, 由于短路电流数值远大于励磁涌流, 叠加后励磁涌流部分表现不明显, 没有对短路电流波形造成很大的畸变。发生故障后的线路电流突增, 导致基波有效值爬坡趋势判据和采样值越限判据同时满足, 启动电流序列整形程序。

根据线路电流的二次谐波有效值确定稳定区段, 如图 8(b)中的红色实线部分。由于得到的稳定区段长度均大于整形结束阈值 n_{set} , 因此将直接送至线路保护进行判断。

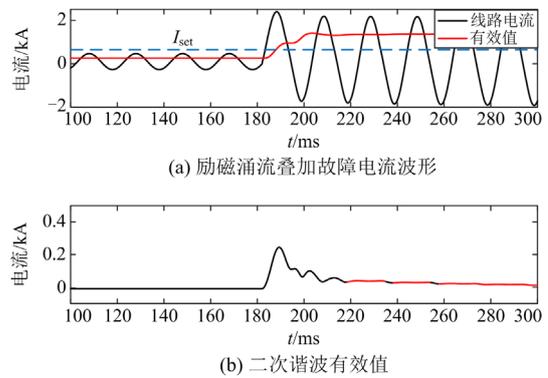


图 8 励磁涌流叠加短路电流情况分析

Fig. 8 Analysis of excitation inrush current with short-circuit fault

3.3 空载合闸后发生短路故障

使配网线路处于正常带负荷运行状态, 设置变压器铁芯处于饱和态, 在 0.182 s 时闭合开关 QF_3 , 使变压器空载合闸产生励磁涌流, 在 F 点设置 0.222 s 时发生相间短路故障, 保护 R2 处测到的电流信号如图 9(a)所示。由于励磁涌流的叠加, 导致线路电流的基波有效值满足爬坡趋势判据, 在满足采样值越限判据后, 将立刻启动电流序列整形技术。

根据线路电流的二次谐波有效值, 计算出各个周波的稳定区段(图 9(b)中的红色实线部分)。再通过稳定区段的边界采样点对原始电流信号进行分割处理, 只保留信号中正弦区段的电流波形, 如图 9(c)所示。由于该情况下设置的励磁涌流与 3.1 节中的相同, 整形修复过程在此处不再赘述, 最终畸变区段修复后的电流序列如图 9(d)所示。发生短路故障后, 由于稳定区段的长度大于整形结束阈值 n_{set} , 将直接送至线路保护进行判断, 在满足动作判据时正常出口。

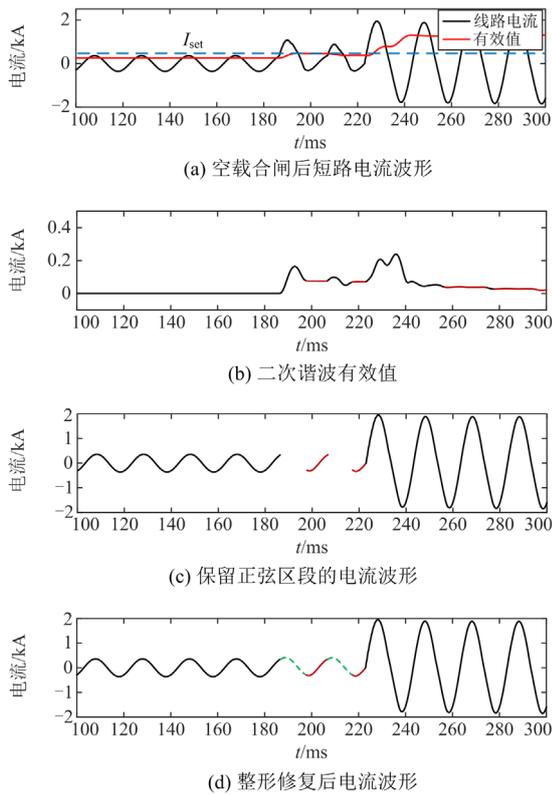


图9 空载合闸后发生短路故障情况分析

Fig. 9 Analysis of short-circuit fault after no-load switching

3.4 分布式电源接入下的适应性分析

为分析 DG 接入配电网后对所提策略的影响, 本文基于图 6 中的仿真系统增加了 DG 模型, 如图 10 所示。其中 DG 为逆变型 DG, 采用常规 PQ 控制, 暂不考虑其他控制特性的叠加。

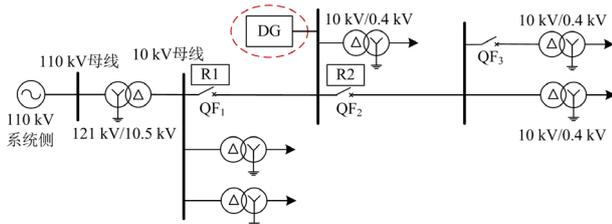


图 10 DG 接入下的配电网仿真系统

Fig. 10 Simulation system of distribution network connected with DG

配电网线路正常带负荷运行, 设置变压器铁芯处于饱和态, 2.4 s 时闭合开关 QF_3 使变压器空载合闸产生励磁涌流。保护 R2 处测得的电流信号如图 11(a) 所示, 所产生的励磁涌流沿着线路侵入配电网, 在线路上与负荷电流混叠。同时受到 DG 接入的影响, 电流信号发生了畸变, 偏移了正常正弦波形的范围。由于励磁涌流的叠加, 导致线路电流的基波有效值满足爬坡趋势判据, 在满足采样值越限

判据后, 将启动电流序列整形技术。

图 11(b) 为二次谐波有效值, DG 接入后的二次谐波有效值出现了一定的波动, 但稳定区段判据依然适用, 各个周波的稳定区段如图 11(b) 中的红色实线所示。再通过稳定区段的边界采样点对原始电流信号进行分割处理, 保留信号中的正弦区段电流波形如图 11(c) 所示。然后, 根据电流序列整形技术, 并利用被保留下来的电流信号对畸变区段进行修复, 修复后的电流序列如图 11(d) 所示。最后将整形修复后的电流信号送至传统保护进行判断, 由于整形技术基于标准正弦曲线进行设计, 因此修复后的畸变区段呈现光滑正弦波形, 有助于提高传统线路保护的电流有效值计算精度, 从而降低 DG 接入配电网下的线路保护误动风险。

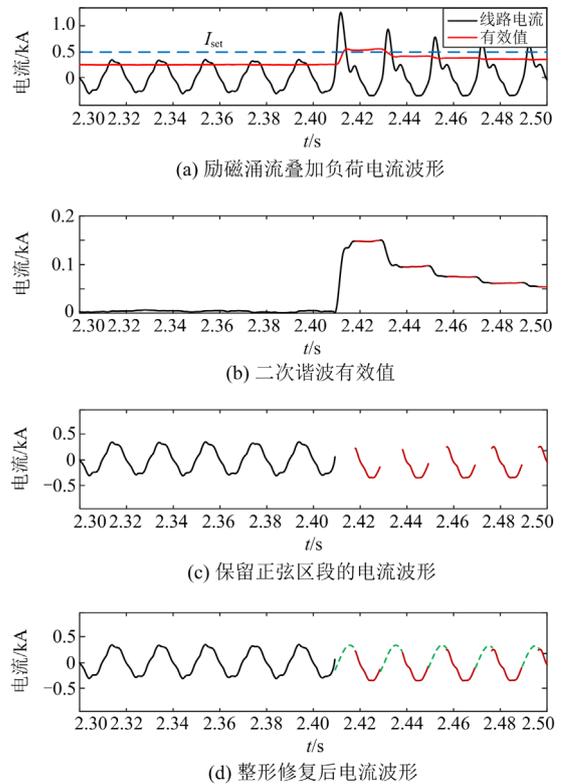


图 11 DG 接入下的策略适应性分析

Fig. 11 Strategy adaptability analysis connected with DG

4 结论

针对配电网线路中配变空载合闸导致励磁涌流引起上游线路保护误动的问题, 提出了一种线路保护防励磁涌流误动策略。通过分析配网励磁涌流的二次谐波特征, 利用 Pearson 相关系数确定畸变区段的修复序列, 提出了基于采样序列整形的配电网线路保护防励磁涌流误动策略。搭建配网仿真模型并设计采样序列整形算法进行仿真测试, 根据不同工况

的测试结果,均表明所提策略能够有效应对混叠在负荷电流和故障电流中的励磁涌流,并通过电流序列整形对畸变区段进行修复,以此避免线路保护因励磁涌流而发生误动,验证了所提策略的有效性和可靠性。

参考文献

- [1] 吴琼,李荣琳,洪海生,等.基于混合重抽样和LightGBM算法的配变低压跳闸预测[J].电力系统保护与控制,2021,49(12):71-78.
WU Qiong, LI Ronglin, HONG Haisheng, et al. Low-voltage tripping prediction of a distribution transformer based on hybrid resampling and a LightGBM algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 71-78.
- [2] 牛勃,吴旭涛,刘光伟,等.配电变压器储能式短路冲击试验方法研究及应用[J].高压电器,2021,57(2):166-171.
NIU Bo, WU Xutao, LIU Guangwei, et al. Study and application of storage energy short circuit impulse test method of distribution transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 166-171.
- [3] 林志超,孙荣可,丘楨坤,等.配电变压器台区接地故障对低压系统暂态转移过电压分析[J].供用电,2022,39(6):33-39.
LIN Zhichao, SUN Rongke, QIU Zhenkun, et al. Analysis on transient transfer overvoltage of low voltage system caused by grounding fault in distribution transformer area[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(6): 33-39.
- [4] 周堃,柳轶彬,梁得亮,等.基于扩张状态观测器的混合式配电变压器直流母线电压控制[J].电力系统自动化,2021,45(16):200-207.
ZHOU Kun, LIU Yibin, LIANG Deliang, et al. DC-link voltage control of hybrid distribution transformer based on extended state observer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 200-207.
- [5] 吴昊天,赵阳,刘子卓,等.基于小波变换的配电变压器差动保护相位补偿方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(10):76-83.
WU Haotian, ZHAO Yang, LIU Zizhuo, et al. Phase compensation method of distribution transformer differential protection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 76-83.
- [6] 马云龙,李秀广,周秀,等.基于高压真空快速断路器的变压器励磁涌流抑制技术研究[J].高压电器,2022,58(10):136-142.
MA Yunlong, LI Xiuguang, ZHOU Xiu, et al. Research on excitation inrush current suppression technology of transformer based on high voltage vacuum fast circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 136-142.
- [7] 李海涛,刘北阳,滕文涛,等.基于可变合闸角的变压器励磁涌流抑制方法[J].中国电力,2022,55(9):70-78.
LI Haitao, LIU Beiyang, TENG Wentao, et al. Research on inrush current suppression of transformer based on changeable closing angle[J]. Electric Power, 2022, 55(9): 70-78.
- [8] 王彤彤,文俊,靳海强,等.换流站交流出线方式对换流变空投的影响[J].电力建设,2021,42(9):112-119.
WANG Tongtong, WEN Jun, JIN Haiqiang, et al. Influence of AC outlet mode of converter station on energizing no-load converter transformer[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(9): 112-119.
- [9] 任明辉.配网励磁涌流导致保护误动原因分析与抑制方法研究[J].高压电器,2013,49(12):59-63.
REN Minghui. Analysis and restraining method of protection malfunction caused by distribution network magnetizing in-rush current[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 59-63.
- [10] OZEKI T, NAITOH T, TOYAMA A, et al. An identification method of magnetizing inrush current phenomena in distribution system using with Aitken's Delta2-process[J]. IEEE Transactions on Power and Energy, 2011, 131: 263-270.
- [11] DOU N, TOYAMA A, SATOH K, et al. An identification method of magnetizing inrush current phenomena in distribution system[J]. IEEE Transactions on Power and Energy, 2010, 130: 430-436.
- [12] 印吉景,吴水兰,许云龙,等.中低压线路速断保护躲涌流的改进措施[J].电力系统保护与控制,2012,40(22):139-145.
YIN Jijing, WU Shuilan, XU Yunlong, et al. Improvement of the line quick-break protection of low and medium voltage system avoiding effect of magnetizing inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 139-145.
- [13] 翁汉珺,刘华,林湘宁,等.基于Hausdorff距离算法的变压器差动保护新判据[J].中国电机工程学报,2018,38(2):475-483.
WENG Hanli, LIU Hua, LIN Xiangning, et al. A novel criterion of the transformer differential protection based on the Hausdorff distance algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 475-483.
- [14] 张运驰,高厚磊,杜士昌.基于综合形态算法的变压器励磁涌流识别方法[J].电力系统自动化,2021,45(24):165-173.
ZHANG Yunchi, GAO Houlei, DU Shichang. Identification method of transformer magnetizing inrush current based on comprehensive morphological algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 165-173.

- [15] 宋九渊, 符玲, 熊思宇, 等. 基于二阶泰勒系数的励磁涌流识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 1020-1029.
SONG Jiuyuan, FU Ling, XIONG Siyu, et al. Magnetizing inrush current identification method based on second-order Taylor derivative[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 1020-1029.
- [16] 王雪, 王增平. 基于波形时域分布特征的变压器励磁涌流识别[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 148-154.
WANG Xue, WANG Zengping. Identification of transformer inrush currents based on waveform distribution characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 148-154.
- [17] 郑涛, 陆格野, 赵彦杰, 等. 基于虚拟等效电感的特高压调压变压器励磁涌流判别算法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 118-125.
ZHENG Tao, LU Geyue, ZHAO Yanjie, et al. A discriminating algorithm for identifying inrush of UHV voltage-regulating transformer based on virtual equivalent inductance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(7): 118-125.
- [18] 张培夫, 金能, 章建玲, 等. 一种面向线路零序过流保护的防励磁涌流所致误动闭锁策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7609-7621.
ZHANG Peifu, JIN Neng, ZHANG Jianling, et al. A line zero-sequence over current protection blocking strategy against maloperation caused by inrush[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7609-7621.
- [19] 李宗博, 焦在滨, 何安阳. 基于等效磁化曲线智能识别的变压器保护原理[J]. 电工技术学报, 2020, 35(7): 1464-1475.
LI Zongbo, JIAO Zaibin, HE Anyang. Equivalent magnetization curve intelligent recognition based transformer protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(7): 1464-1475.
- [20] 陈燕来, 郎永平, 王鸿伟, 等. 10 kV 配电线路励磁涌流问题的研究[J]. 煤矿机电, 2013, 3: 29-32.
CHEN Yanlai, LANG Yongping, WANG Hongwei, et al. Research on magnetization inrush current problem of 10 kV distribution line[J]. Colliery Mechanical and Electrical Technology, 2013, 3: 29-32.
- [21] WRIGHT L, AYERS L. Mitigation of undesired operation of recloser controls due to distribution line inrush[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53: 80-87.
- [22] 刘超, 刘健, 张志华, 等. 配电网励磁涌流及其概率分布的分析与探讨[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 170-175.
LIU Chao, LIU Jian, ZHANG Zhihua, et al. Analysis and discussion on inrush current and its probability distribution in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 170-175.
- [23] 闫富平, 段建东, 李笑, 等. 利用动态四边形分析的配电网励磁涌流识别方法[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 2017-2022.
YAN Fuping, DUAN Jiandong, LI Xiao, et al. Identification method of inrush current in distribution network based on analysis of dynamic quadrilateral[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 2017-2022.
- [24] 刘鹏辉, 黄纯, 石雁祥, 等. 配电线路励磁涌流自适应闭锁方案[J]. 电工技术学报, 2019, 34(11): 2395-2404.
LIU Penghui, HUANG Chun, SHI Yanxiang, et al. An adaptive blocking scheme for magnetizing inrush current in distribution lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(11): 2395-2404.
- [25] 刘鹏辉. 基于信号特征辨识的配电网馈线保护方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
LIU Penghui. Research on feeder protection method in distribution network based on signal characteristic identification[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [26] 张员宁, 黄景光, 张艳华, 等. 利用双重特征量鉴别变压器励磁涌流的高阶统计原理[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(24): 21-30.
ZHANG Yuaning, HUANG Jingguang, ZHANG Yanhua, et al. High order statistical theory for identifying transformer inrush current by using dual characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(24): 21-30.
- [27] 张华, 龙呈, 胡思洋, 等. 基于层次聚类法与皮尔逊相关系数的配电网拓扑校验方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 88-96.
ZHANG Hua, LONG Cheng, HU Siyang, et al. Topology verification method of a distribution network based on hierarchical clustering and the Pearson correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 88-96.

收稿日期: 2023-02-24; 修回日期: 2023-04-17

作者简介:

李振兴(1977—), 男, 博士, 教授, 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

胡聪(1994—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与安全稳定控制; E-mail: hucong1017@163.com

魏业文(1987—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电能质量分析、检测和评估。E-mail: weiyewen@126.com

(编辑 魏小丽)