

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210995

基于电流故障分量时频矩阵相角差的换流变差动保护研究

邓祥力, 陈兴霖

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 传统换流变差动保护中易受直流偏磁和故障过渡电阻影响, 可能出现差动保护的拒动问题。为此, 提出一种基于电流故障分量(Current Fault Component, CFC)时频矩阵元素和相角判别的换流变差动保护判据。变压器发生区内故障时, 变压器两侧电流互感器(CT)检测到的 CFC 方向相同, 而区外故障时检测到的两侧 CFC 方向相反。通过 S 变换获得 CFC 时频矩阵, 根据故障时刻时频矩阵内所有元素求和所得相量的相角大小, 判别 CFC 的方向, 从而实现换流变区内故障的识别。仿真结果表明, 所提保护判据在各种故障情况下均可有效识别换流变的区内、区外故障, 在直流偏磁和故障过渡电阻的情况下仍具有较高的可靠性, 同时可有效降低差动保护误动风险。

关键词: 换流变压器; 差动保护; 时频矩阵; 电流故障分量; S 变换

Converter transformer differential protection based on the phase angle difference of the time-frequency matrix of a current fault component

DENG Xiangli, CHEN Xinglin

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Traditional converter transformer differential protection is easily affected by DC bias and fault transition resistance. These may cause the rejection of differential protection. Thus a criterion of converter transformer differential protection based on the time-frequency matrix elements and phase angle discrimination of a Current Fault Component (CFC) is proposed. In the case of an internal fault of the transformer, the CFC direction detected by Current Transformers (CT) on both sides of transformer is the same, while in case of an external fault, the CFC direction detected on both sides is opposite. The CFC time-frequency matrix is obtained by an S-transform. From the phase angle of the phasor obtained by summing all elements in the time-frequency matrix at the fault time, the direction of the CFC is distinguished, so as to realize the fault identification in the converter transformer region. The simulation results show that the proposed protection criterion can effectively identify the internal and external faults of the converter transformer under various fault conditions, and still has high reliability in the case of DC bias and fault transition resistance. At the same time, it can effectively reduce the misoperation risk of differential protection.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51777119).

Key words: converter transformer; differential protection; time-frequency matrix; current fault component; S-transform

0 引言

换流变压器^[1-2](简称换流变)是高压直流输电^[3-5]系统(HVDC)的重要组成部分,与换流器共同组成换流站,实现交流与直流电之间的相互转换,并将直流系统和交流系统相互隔离^[6]。差动保护^[7-8]作为换流变的主保护,其动作可靠性受到国内外学者的广泛关注。

近年来,国内外学者对传统交流变压器和换流变压器差动保护动作可靠性,如涌流下的误动作、区内故障的误闭锁问题以及差动保护的算法新思路等方面展开了广泛的研究。对于交流系统中的电力变压器,文献[9]通过识别相空间轨迹特征并融合多种判据来识别区外扰动和内部故障,该方案不受系统参数影响,但故障特征量的提取难度较大。文献[10]通过计算差动电流中的形态学骨架特征来区分外部和内部故障,但计算时间较长,可能会延长保护动作时间。而对于换流变,文献[11]从换相失败的

角度分析了换流变的动作性能, 提出了离散 Fréchet 距离的保护改进方案, 提高了差动保护的速动性和可靠性。文献[12]提出一种基于小波能量熵的差动保护方案, 在励磁涌流和电流互感器饱和下均能取得良好的性能。

随着输电技术的不断发展, HVDC 工程由于其输送容量大、损耗小、输送效率高等优点, 在我国得到了广泛的应用, 其中换流变的保护可靠性仍值得研究与改进。文献[13-15]指出直流偏磁的存在会使电流互感器(CT)严重饱和, 导致变压器差动保护中的不平衡电流增大, 同时差流中的二次谐波含量较低, 存在差动保护误动风险。当换流变发生接地故障, 且故障点处存在较大的过渡电阻时, 短路回路阻抗较大, 短路电流幅值相比较小, 使得基波幅值降低, 短路电流谐波含量增大, 差动保护会发生延时动作甚至拒动^[9]。因此, 目前亟需研究可靠性高、不受直流偏磁和故障过渡电阻影响的换流变差动保护。

与交流系统中的电力变压器类似, 二次谐波制动差动保护被广泛用作换流变的主保护方案, 其差动电流信号容易受到外界各种因素的干扰, 其中直流偏磁会影响差动保护中二次谐波含量的判断。而 S 变换是在连续小波变换(Continue Wavelet Transform, CWT)和傅里叶变换(Fourier Transform, FT)的基础上发展而来, 具有更好的时频分析特性, 近年来在电力系统特征提取、扰动识别和电力设备保护等方面得到广泛应用。文献[17]通过调节标准差的 S 变换实现电能质量特征提取, 将多参数优化问题转化为单调节参数优化问题, 提高自适应性的同时降低了计算难度, 避免了迭代计算。文献[18]利用 S 变换提取电能质量扰动信号的特征量, 根据提取的特征量构造具有分类规则的决策树进行分类识别, 提高了分类速度和抗噪能力。文献[19]利用 S 变换构造发电机定子接地故障下的零序电流矩阵, 提取能量特征和零序有功功率作为特征向量, 将特征向量输入到随机森林算法保护判别模型中, 辨识发电机的故障情况, 克服了单一故障特征保护的不足。文献[20]利用 S 变换提取暂态信号的故障信息, 构造时频矩阵并通过奇异值分解提取时频矩阵的时频特征, 与样本库矩阵进行匹配, 根据矩阵相似度辨识区内外故障, 提供了一种暂态保护新思路。通过分析发现, 换流变在各类故障及扰动的影响下, 故障后的差动保护与输电线路类似, 网侧和阀侧的电流故障分量呈现明显的相位差异性。

基于此, 针对换流变在直流偏磁和故障过渡电阻情况下仍然存在差动保护的误动和拒动现象, 本

文提出一种通过 S 变换构造换流变网侧和阀侧的 CFC(Current Fault Component)时频矩阵来反映信号的暂态特征, 并进一步提取 CFC 相角, 利用二者相角差识别换流变区内区外故障的差动保护判据, 最后, 利用在 PSCAD 中搭建的仿真模型, 对所提判据的有效性进行了仿真实验。

1 S 变换与时频矩阵

1.1 S 变换

S 变换最早是由地球物理学家 Stockwell 提出的一种时频分析方法^[21-23]。S 变换不仅能够克服 FT 时频分辨率固定不变的不足, 保留时间和频率的特征信息, 而且不存在小波函数的选择问题。信号 $x(t)$ 的 CWT 为

$$W(\tau, d) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\omega(\tau - t, d)dt \quad (1)$$

式中: $\omega(\tau - t, d)$ 为小波变换的伸缩时移函数; τ 为时移参数; d 为伸缩参数。

S 变换定义为对连续小波变换函数 $W(\tau, d)$ 进行相位修正, 令 $W(\tau, d)$ 乘上一个修正因子。

$$S(\tau, f) = e^{j2\pi f\tau}W(\tau, d) \quad (2)$$

式中: j 为虚数单位; f 为频率。

将式(1)代入式(2)得到信号 $x(t)$ 的 S 变换公式。

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\omega(\tau - t, f)e^{-j2\pi f\tau}dt \quad (3)$$

$$\omega(\tau - t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2}} \quad (4)$$

式中, $\omega(\tau - t, f)$ 为高斯窗函数, 其高度和宽度随频率变化, 故 S 变换有更好的时频特性, 能准确提取信号的相位信息。

实际应用中, S 变换通常可以利用 FT 来实现, 将式(3)进行 FT, 再作傅里叶逆变换后, 可以将 S 变换化成傅里叶频谱 $X(f)$ 的函数形式。

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f + u)e^{-\frac{2\pi^2 u^2}{f^2}}e^{j2\pi\tau u}du \quad (5)$$

式中: $f \neq 0$, $X(f)$ 为信号 $x(t)$ 的 FT 函数; u 为平移频率。连续信号的 S 变换就可以根据式(5)通过 FT 计算得到。对于离散信号, 令式(5)中 $\tau \rightarrow kT$, $f \rightarrow n/NT$, $u \rightarrow m/NT$, 可以得到 S 变换的离散表达式。

$$\begin{cases} S[kT, \frac{n}{NT}] = \sum_{m=0}^{N-1} X[\frac{n+m}{NT}]e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}}e^{\frac{j2\pi mk}{N}}, n \neq 0 \\ S[kT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x[\frac{m}{NT}], n = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: T 为采样时间间隔; N 为信号采样点数;
 $k, m, n = 0, 1, \dots, N-1$ 。

1.2 时频矩阵

利用式(6)对采样信号 $x(t)$ ($t=0, 1, \dots, N-1$) 进行 S 变换, 可以得到一个 $(N/2)$ 行 N 列的二维时频矩阵 S 。

$$S = \begin{bmatrix} S(1,1) & \cdots & S(1,b) & \cdots & S(1,N) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ S(a,1) & \cdots & S(a,b) & \cdots & S(a,N) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ S(\frac{N}{2},1) & \cdots & S(\frac{N}{2},b) & \cdots & S(\frac{N}{2},N) \end{bmatrix} \quad (7)$$

对采样信号应用 S 变换计算时频矩阵的步骤总结如下:

- 1) 计算 $n=0$ 时, 矩阵的第 1 列 $S[kT, 1]$;
- 2) 计算高斯窗函数在频域的 FT;
- 3) 计算 $n=1, \dots, N-1$ 时, $x[kT]$ 的傅里叶变换 $X[n/(NT)]$;

4) 计算 $m=0, 1, \dots, N-1$ 时各扩维数组 $X[(m+n)/(NT)]$ 与高斯窗 FT 的乘积, 并对该乘积计算傅里叶逆变换, 即可得到时频矩阵。

时频矩阵中, 行元素与信号的频率相对应, 其行向量为某频率下信号幅值与时间的关系, 用于表征信号的时域特征; 矩阵的列元素对应于信号采样的时间点, 其列向量为某时刻下信号幅值与频域的关系, 表征信号的频域特征。相邻两行的频率差为

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (8)$$

式中, f_s 为信号采样频率。则第 a 行的频率为

$$f_a = \frac{f_s}{N} a \quad (9)$$

提取采样信号单一频率下的相角信息, 显然不具有足够的可靠性, 容易受干扰信号的影响。因此, 可对采样信号在每个时刻所有频率下的 S 变换值求和, 得到信号在该时刻下的 S 变换总和。

$$S_n = \sum_{m=1}^{N/2} S(m, n) \quad (10)$$

对式(10)的复数值求相角, 可得采样信号在该时刻的 S 变换相角。

$$S_{An} = \text{angle}(S_n) \quad (11)$$

由于换流变区内区外故障时网侧和阀侧电流变化量的方向不同, 可通过计算网侧和阀侧 CFC 信号的时频矩阵相角差均值的方法来提取两种故障信号的故障特征, 用以区分区内区外故障。

2 直流偏磁及高阻接地故障对换流变差动保护的影响分析

2.1 直流偏磁

变压器的励磁支路和其非线性变化是变压器差动电流不平衡的重要因素, 当直流偏磁电流流过变压器绕组时, 一部分直流电流变成变压器励磁电流的组成部分, 该电流分量改变了变压器的工作点, 如图 1 所示, 变压器铁芯偏磁, 使正常运行时铁芯线性工作区变化至磁饱和区, 从而恶化了变压器励磁支路的工作特性, 此时变压器励磁电流 i_1 的表达式^[24]为

$$i_1 = \left\{ \sqrt{1 + \frac{N_{IT} \cdot i_{DC}}{l \cdot x \cdot a_0} \sum_{n=0}^{\infty} a_{2n+1} \sin[(2n+1)\omega t]} + a_0 \text{sh}(\alpha) + \frac{N_{IT} \cdot i_{DC}}{l \cdot x \cdot a_0} \sum_{n=1}^{\infty} a_{2n} \cos(2n\omega t) \right\} \frac{lx}{N_{IT}} \quad (12)$$

式中: i_{DC} 为从变压器一次侧流入的直流电流大小; N_{IT} 为变压器一次侧的匝数; l 是磁路长度; $\alpha = y\Phi_{DC}K/A$, $\beta = y\Phi_m K/A$, x 、 y 分别为与铁芯磁化方向有关的常数, Φ_{DC} 为直流磁通, Φ_m 为交流磁通的幅值, A 为铁芯的横截面积, K 是漏磁系数; a_0 、 a_{2n} 、 a_{2n+1} 为与常数 β 相关的系数。

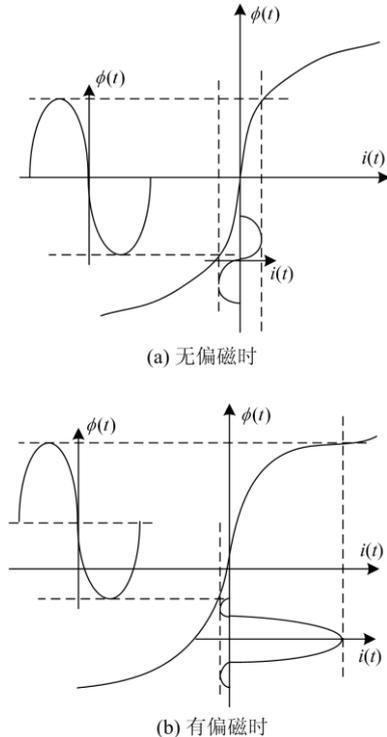


图 1 励磁电流与磁通的关系曲线

Fig. 1 Relation curve between excitation current and flux

$$\begin{cases} a_0(\beta) = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^T \text{ch}(\beta \sin(\omega t)) dt \\ a_{2n}(\beta) = \frac{\omega}{\pi} \int_0^T \text{ch}(\beta \sin(\omega t)) \cdot \cos(2n\omega t) dt \\ a_{2n+1}(\beta) = \frac{\omega}{\pi} \int_0^T \text{sh}(\beta \sin(\omega t)) \cdot \cos((2n+1)\omega t) dt \end{cases} \quad (13)$$

变压器铁芯的饱和伴随着大量的高次谐波产生。此外直流电流流经 CT 一次侧时, 考虑剩磁的影响, CT 的励磁磁通 ϕ ^[25]为

$$\phi = \phi_{dc} + \phi_r + \phi_m \left[\frac{\omega T_1 T_2}{T_1 - T_2} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) - \sin \omega t \right] \quad (14)$$

式中: ϕ_{dc} 为直流偏磁通; ϕ_r 为系统剩磁; ϕ_m 为稳态交流磁通幅值; ω 为系统角频率; T_1 、 T_2 分别为 CT 一次和二次时间常数。

直流偏磁产生的偏磁通 ϕ_{dc} 将成为励磁磁通的组成部分, 使 CT 铁芯更容易进入暂态饱和状态, 导致一次电流不能准确变到二次侧而产生一定的测量误差。

在直流偏磁严重的情况下会使差动电流超过最小动作电流, 影响换流变差动保护的正常运行, 而在这种情况下如果叠加故障, 情况会更加恶劣, 可能会导致保护的误动和拒动。例如在内部故障时, 由换流变饱和引起的励磁电流增量会伴随各种谐波分量, 可能会使得二次谐波分量超过 15% 的阈值而发生不正常闭锁, 导致变压器的差动保护未能正确有效动作来切除故障。

2.2 高阻接地故障

接地故障分析模型如图 2 所示, 图中 K 为短路故障点, I_m 为桥间电流, I_n 为直流中性线电流, X_T 为换流变的漏抗, 假设发生接地故障时 V_1 和 V_2 阀导通, I_f 为短路故障电流, 红色箭头虚线表示短路电流通路径。

实际发生的接地短路故障一般都不是金属性短路, 而是经过渡电阻的短路故障。当换流变发生区内单相高阻接地故障时, 由于换流阀的存在, 此时的短路电流仍然呈现半周不对称特征, 但是与金属性接地故障相比, 此时短路回路阻抗变大, 短路电流幅值相对较小。另外, 由于故障相的差动电流主要取决于故障电流, 过渡电阻越大, 故障对差动电流的影响越小, 当过渡电阻无穷大时, 相当于没有发生故障^[6]。过渡电阻过大时可能会使得差动电流过小未能达到最小动作电流而使差动保护拒动, 无法正确切除区内故障。

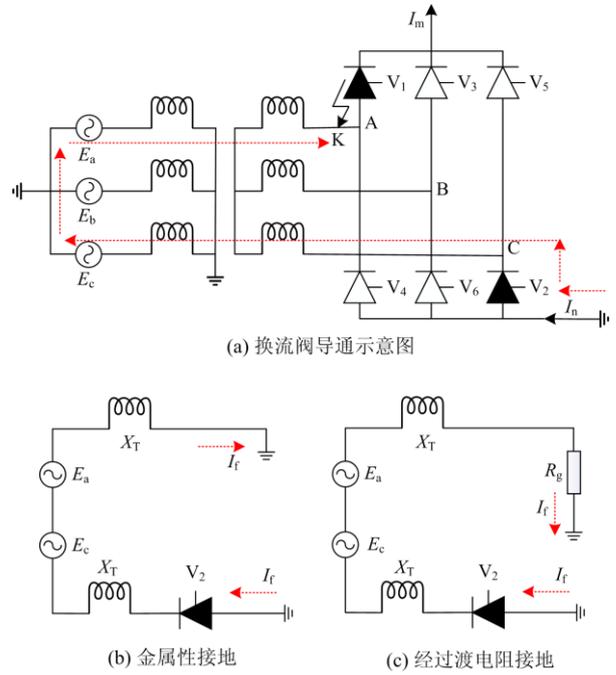


图 2 接地故障分析模型

Fig. 2 Ground fault analysis model

2.3 差动保护动作特性分析

为保证差动保护对区内故障的灵敏性和对区外故障的可靠性, 传统差动保护通常采用双斜率比率制动特性来描述, 差动保护的動作电流和制动电流分别由式(15)和式(16)计算, 式中 \vec{I}_1 、 \vec{I}_2 分别为 CT 在换流变网侧和阀侧测量的相电流矢量。

$$I_{op} = \left| \vec{I}_1 + \vec{I}_2 \right| \quad (15)$$

$$I_{re} = \frac{\left| \vec{I}_1 \right| + \left| \vec{I}_2 \right|}{2} \quad (16)$$

差动保护比率制动曲线如图 3 所示, I_{op} 为动作电流, I_{re} 为制动电流, $I_{op.min}$ 为最小动作电流, K_1 、 K_2 分别为两个线段的斜率。

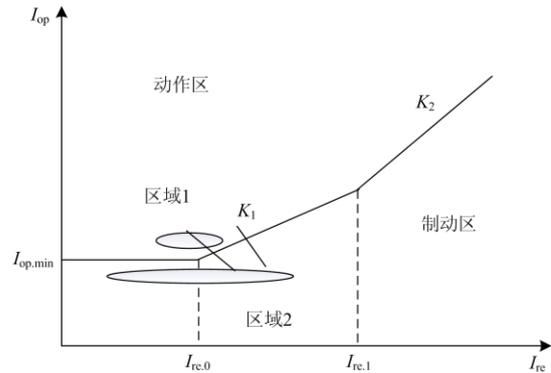


图 3 差动保护比率制动曲线

Fig. 3 Ratio braking curve of differential protection

1) 若只考虑直流偏磁对 CT 的影响, 当换流变接地侧的 CT 发生饱和时, 差动电流增加, 使保护的比率制动曲线落入图 3 的动作区域 1 内, 从而造成保护在稳态时误动。

2) 若只考虑直流偏磁对变压器的影响, 变压器铁心的饱和会产生大量谐波, 但差动电流不会显著增大, 比率制动曲线会落入制动区域 2 内, 不满足差动保护的启动条件, 保护不会动作。

3) 当考虑直流偏磁下, 变压器和 CT 同时饱和时, 差动电流增大并伴随大量谐波, 比率制动曲线会落入区域 1 内, 出现变压器区内故障时误闭锁现象, 而在区外故障时保护谐波闭锁不会误动。

4) 对于高阻接地故障, 由于此时差动电流过小, 其比率制动曲线会落入区域 2, 使得差动电流过小无法进入保护动作区域, 而无法切除区内故障。

3 基于时频矩阵相角差的差动保护方法

3.1 故障特征分析

当双绕组变压器发生区内故障时, 如匝地短路, 可以用三绕组变压器模型等效, 其故障分量等效电路如图 4 所示, 其中, Z_{1s} 、 Z_{2s} 为一、二次侧的等效系统阻抗, Z_1 、 Z_2 、 Z_3 为变压器的等效漏阻抗, Δi_1 、 Δi_2 、 $\Delta \dot{U}_1$ 、 $\Delta \dot{U}_2$ 分别为一次侧和二次侧测得的 CFC 和电压故障分量 (Voltage Fault Component, VFC), R_f 为过渡电阻、 i_f 为故障电流, 则 CFC 与 VFC 的关系式为

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_1 = -Z_{1s} \cdot \Delta i_1 \\ \Delta \dot{U}_2 = -\Delta i_2 \cdot Z_{2s} \end{cases} \quad (17)$$

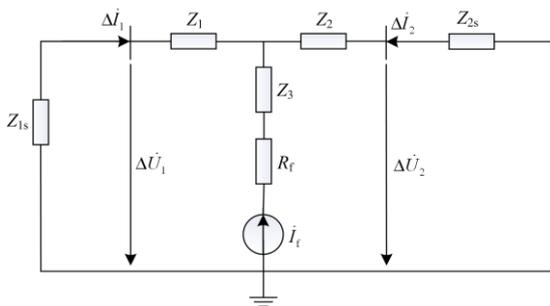


图 4 区内故障时的 T 型等效电路

Fig. 4 T-type equivalent circuit with internal fault

变压器发生区外故障时故障分量的等效电路如图 5 所示, Z_{1s} 、 Z_{12s} 为一次侧等效系统阻抗, 则此时 CFC 与 VFC 的关系式为

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_1 = \Delta i_1 \cdot [Z_1 + (Z_m \parallel (Z_2 + Z_{2s}))] \\ \Delta \dot{U}_2 = -\Delta i_2 \cdot Z_{2s} \end{cases} \quad (18)$$

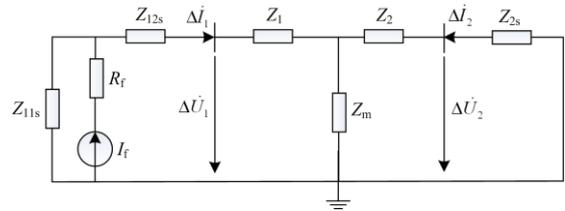


图 5 区外故障时的 T 型等效电路

Fig. 5 T-type equivalent circuit with external fault

通过比较式(17)、式(18)可以发现, 当变压器在过渡电阻下发生区内故障时, 变压器两侧的 CFC 方向相同; 而对于外部故障, 其 CFC 方向相反。在换流变短路后很短的时间内, 系统中各种参数不会发生变化, 即使功率的平衡暂时被打破, 但系统频率偏移并不严重^[26], 因此可以利用 CFC 的方向变化反映系统的暂态故障状态。

3.2 过渡电阻与 CT 传变误差对 CFC 的影响

根据叠加原理, 换流变发生故障后, 其网侧和阀侧的端口电流可视为正常分量、故障分量两个电流分量的叠加^[27], CFC 可定义为

$$\Delta i_k = i_k - i_{k-pN} \quad (19)$$

式中: k 为故障采样时刻; N 为一个周期的采样点数; p 为电流相减的间隔周期数。故障分量的计算通常取 $p=1$ 或 2 , 即当前故障采样数据减去 1 或 2 个周期前的采样数据。

由 3.1 节中的式(17)、式(18)可知, 变压器两侧 CFC 的大小主要由 VFC、等效系统阻抗和变压器等效漏抗决定, 与故障支路的过渡电阻关系不大, 过渡电阻的大小不会显著改变 CFC 的大小, 更不会改变其相位方向。

直流偏磁会使得 CT 发生饱和, 产生一定的传变误差, 使得 CT 测量的二次电流波形发生畸变, 会较为明显地改变 CFC 的大小, 但是仍然不会改变其相位方向。

因此在过渡电阻和 CT 饱和的情况下, 变压器发生区内区外故障时两侧 CFC 相位仍呈现较为明显的差异性, 故可将换流变网侧和阀侧 CFC 的相对方向作为故障特征量, 通过变压器两侧 CFC 方向的相对变化来反映是否存在内部故障。

3.3 基于时频矩阵相角差的故障判别

本文选取换流变网侧和阀侧的 CFC 作为故障特征, 通过采集 CFC 信号进行 S 变换计算时频矩阵相角差, 利用相角差描述不同故障类型时的暂态过程, 通过 CFC 方向的变化来识别是否存在内部故障。

若信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的相角分别为 $\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$,

求取二者的相位差。为了降低扰动的影响并提高数据分析的可靠性和稳定性, 可对相角差求取均值。

$$S_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\alpha(t) - \beta(t)| \quad (20)$$

理论上, 当换流变网侧和阀侧 CFC 的方向相同时, 两个信号的时频矩阵相角差应该等于 0° ; 而当网侧和阀侧 CFC 相反时, 二者的相角差应为 180° 。可以用时频矩阵相角差对换流变区内外故障进行识别与保护, 具体的保护判据如下。

$$S_{xy} < S_{set} \quad (21)$$

式中, S_{set} 为保护整定值。考虑到过渡电阻和直流偏磁引起的相角误差, 以及电网参数等因素对保护可靠性和灵敏性的影响, 当相角差小于 30° 时可认为两侧 CFC 方向相同, 本文设定保护阈值为 30° , 即当相角差均值 $S_{xy} < 30^\circ$ 时, 则判断为换流变发生区内故障, 保护动作; 否则为区外故障, 保护闭锁。

3.4 差动保护的改进

若换流变处于空载合闸状态, 测得换流变阀侧 CFC 为零, 无法通过 S 变换计算时频矩阵相角差, 可以配合使用差动保护中涌流的辨识方法, 来防止差动保护的误动作, 如偏度系数法^[28]、波形分布特征系数法^[29]、经验模态分解奇异点检测法^[30]等。本文所提判据主要用于解决换流变在运行中直流偏磁与高阻接地故障引起的差动保护误动和拒动问题。而在工程实际中, 可通过换流变的阀侧电流是否为零, 判断系统换流变状态是否为空投操作, 若是, 则选用涌流识别方法进行判别; 若为运行中的换流变, 则采用本文所提方案进行故障判别。

具体差动保护方案: 当差动电流大于最小动作电流 I_{op} 时, 将启动差动保护。首先判断是否为空投操作状态, 当阀侧电流为零时, 判断为空投状态; 当阀侧电流不为零, 则为运行中的换流变, 启动本文所提方案。通过计算故障前后一个周期的瞬时值之差获得各相故障电流, 利用 S 变换算法对网侧和阀侧 CFC 进行计算, 得出 ABC 各相的时频矩阵相角差均值, 对相角差均值的大小进行判断, 当任一相满足区内故障判据时, 则认为发生区内故障, 具体的差动保护流程图如图 6 所示。

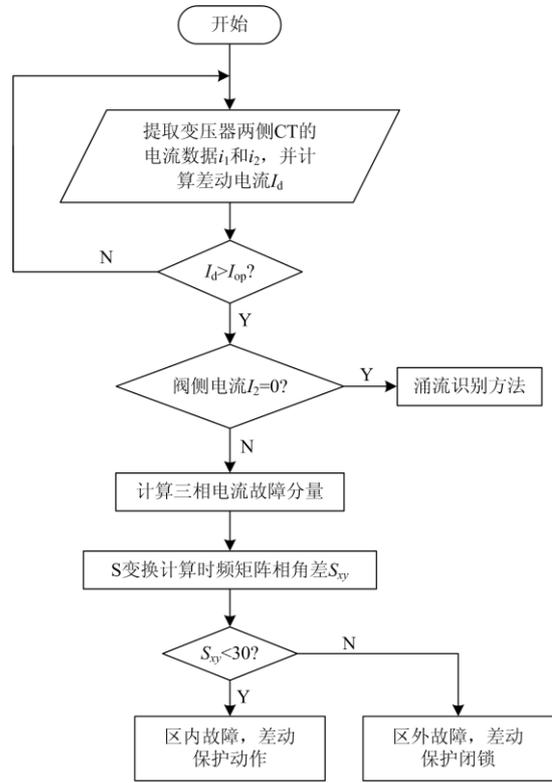


图 6 差动保护流程图

Fig. 6 Flow chart of differential protection

4 仿真实验

4.1 仿真模型介绍

本文采用 CIGRE 的标准 HVDC 输电仿真模型, 验证所提保护判据在区内区外故障的可靠性。以整流侧 Y-Y 换流变故障为例, 直流偏磁设置在换流变接地中性点处, 直流偏磁与具体换流变故障位置示意图如图 7 所示, 采样频率为 2 kHz。安装在换流变两侧的 CT 用以区分区内和区外故障, 虚线框内为换流变的保护区域。

换流变压器选取 UMEC 模型, 额定容量为 603.7 MVA, 变比为 345/213 kV, 漏抗和铜损分别为 0.18 p.u. 和 0.02 p.u.。CT 模型采用 JA model, 匝数比设置为 1 250/5(网侧)和 2 000/5(阀侧), 且均带有 0.5Ω 的标准负载电阻。

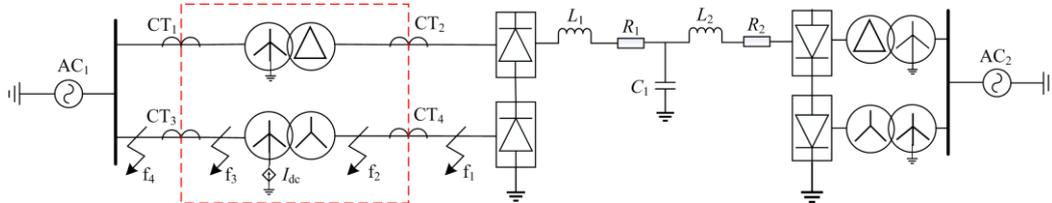


图 7 高压直流输电系统仿真模型与故障位置

Fig. 7 Simulation model and fault location of HVDC transmission system

对于直流偏磁电流的大小, 2016 年在我国溪洛渡-浙西 ±800 kV 特高压直流输电工程进行了直流偏磁的实测试验, 当系统以额定电流单极运行时, 有 3 座变电站的变压器出现超过 200 A 的直流电流, 有 5 座变电站出现超过 100 A 的直流电流^[31], 本次研究中假定直流偏磁信号的大小为 0~150 A。直流偏磁主要是通过换流变接地中性点间的电位差来产生的, 由于本文主要研究直流偏磁对换流变保护的影响, 因此不考虑直流电流的分布情况, 而是直接在换流变中性点处施加直流电源来模拟直流偏磁现象。

4.2 不同故障类型

为仿真分析不同故障类型情况下保护判据的有效性, 在换流变阀侧设置故障点, 在 f_1 和 f_2 处分别模拟区外和区内故障, 对换流变在发生单相短路接地(AG)、两相短路(AB)、两相短路接地(ABG)和三相短路(ABC)工况下进行仿真。将发生不同类型故障下的网侧和阀侧 CFC 进行 S 变换, 并计算时频矩阵相角差, 进而判定保护的動作情况。图 8 为换流变发生 A 相接地短路故障网侧和阀侧测得的 A 相 CFC 相角变化曲线。

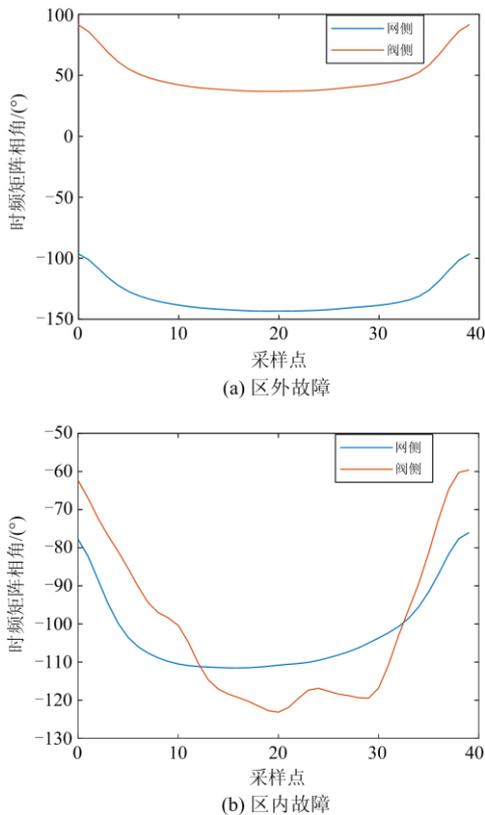


图 8 CFC 时频矩阵相角变化曲线

Fig. 8 Time-frequency matrix phase angle variation curve of current fault component

由图 8 可知, 对于区外故障, 无论换流变两侧检测到的时频矩阵相角如何变化, 相角差均在 180° 左右; 而区内故障时, 网侧和阀侧测得的相角变化曲线较为相似, 相角差较小, 表 1 为换流变各种故障下两侧 ABC 各相的相角差计算结果。

表 1 不同故障工况下保护动作情况

Table 1 Protection action under different fault conditions

故障类型	S _A	S _B	S _C	保护动作	
区内	AG	6.624 8	171.416 1	182.237 2	动作
	AB	7.569 9	5.141 7	177.017 5	动作
	ABG	9.699 7	9.708 2	179.968 6	动作
	ABC	11.249 3	13.462 5	7.479 2	动作
区外	AG	172.093 4	171.409 5	182.241 7	闭锁
	AB	180.152 4	179.974 3	168.584 6	闭锁
	ABG	180.881 8	179.588 9	179.972 5	闭锁
	ABC	179.812 2	179.870 6	180.103 5	闭锁

由表 1 可知, 换流变发生区内各类故障时, 故障相的相角差均小于 30°, 满足保护动作判据, 保护可靠动作不闭锁, 且具有较高的可靠性; 区外故障时, 各相时频矩阵相角差均在 180° 附近, 大于 30°, 保护闭锁不误动。

4.3 不同故障位置

为讨论不同故障位置下保护判据的有效性, 在换流变网侧设置短路故障点 f_3 和 f_4 , 模拟网侧的区内区外故障, 保护计算结果如表 2 所示。

表 2 网侧故障工况下保护动作情况

Table 2 Protection action under grid side fault positions

故障类型	S _A	S _B	S _C	保护动作		
网侧	AG	11.437 2	165.119 7	179.755 6	动作	
	AB	7.470 3	7.402 5	180.776 0	动作	
	区内	ABG	10.866 9	10.557 8	182.129 4	动作
		ABC	6.813 0	10.354 2	5.854 8	动作
网侧	AG	181.421 3	165.044 2	179.751 0	闭锁	
	AB	185.134 5	169.086 4	180.775 6	闭锁	
	区外	ABG	182.012 8	175.564 1	182.100 1	闭锁
		ABC	181.006 6	175.712 7	180.766 9	闭锁

由表 2 可知, 在换流变网侧发生区内故障和区外故障时, 保护判据能准确识别, 说明该保护方案不仅适用于换流变的阀侧故障, 还对网侧的区内区外故障有着良好的判别能力, 适用性较强。

4.4 不同直流偏磁大小

直流偏磁会引起 CT 饱和, 为讨论分析不同直流偏磁电流情况下保护判据的有效性, 改变直流偏磁电流大小, 分别设置为 0 A、50 A、100 A 和 150 A, 通过测量区内区外 A 相接地故障数据, 进行 S 变换计算时频矩阵相角差, 分析结果如表 3 所示。

表 3 不同直流偏磁下保护动作情况

Table 3 Protection action under different DC bias

故障类型	偏磁大小/A	S_A	S_B	S_C	保护动作
区内	AG 0	5.554 2	174.868 2	178.919 5	动作
	AG 50	11.580 1	180.820 2	178.189 8	动作
	AG 100	11.241 7	179.219 9	179.179 8	动作
	AG 150	11.534 1	168.093 5	179.471 6	动作
区外	AG 0	181.069 7	174.804 3	178.916 2	闭锁
	AG 50	181.053 5	180.767 9	178.184 8	闭锁
	AG 100	181.418 2	171.578 0	179.215 8	闭锁
	AG 150	181.352 5	168.022 4	179.466 8	闭锁

由表 3 可知, 随着直流偏磁电流的增大, 时频矩阵相角差的大小发生轻微变化, 但是在较大直流偏磁下发生区内故障时仍满足保护动作判据, 可以准确区分区内区外故障, 说明该保护判据受直流偏磁影响较小。

4.5 不同过渡电阻

仿真讨论过渡电阻分别为 $0\ \Omega$ 、 $50\ \Omega$ 、 $100\ \Omega$ 和 $150\ \Omega$ 情况下保护策略的有效性, 测量区内区外 CFC 数据并计算时频矩阵相角差, 计算分析结果如表 4 所示。

表 4 不同过渡电阻下保护动作情况

Table 4 Protection action under different transition resistance

故障类型	过渡电阻/ Ω	S_A	S_B	S_C	保护动作
区内	AG 0	6.642 0	167.998 2	179.475 2	动作
	AG 50	11.183 5	198.063 4	179.692 4	动作
	AG 100	19.227 7	212.304 8	183.103 8	动作
	AG 150	24.182 3	217.804 8	188.353 9	动作
区外	AG 0	181.361 7	167.926 8	179.470 3	闭锁
	AG 50	178.784 0	198.053 1	179.691 9	闭锁
	AG 100	178.113 8	212.308 5	183.106 5	闭锁
	AG 150	178.267 5	217.814 5	188.358 4	闭锁

由表 4 可知, 在 $0\ \Omega$ 、 $50\ \Omega$ 、 $100\ \Omega$ 和 $150\ \Omega$ 的故障过渡电阻下发生区内故障时, 故障相的相角差有所增大, 但仍保持在保护判据允许的范围内, 保护策略可以准确识别, 因此该保护方案在较大过渡电阻的情况下仍然可以保证较高的可靠性。

5 与传统差动保护方案的对比

本文通过判断网侧和阀侧 CFC 的相对方向变化构造差动保护判据, 改善了传统二次谐波制动差动保护。相比于传统电流差动保护方案的优势在于:

1) 本文选取换流变网侧和阀侧的 CFC 作为故障特征, 通过计算时频矩阵相角差来描述不同故障

类型时的暂态变化过程, 本质上为相位差动保护, 能够避免直流偏磁下 CT 饱和产生的虚假差流, 而导致差动保护误动作的问题。

2) 传统差动保护通常采用二次谐波闭锁判据防止保护误动作, 有时会受到区内故障时的谐波影响而发生拒动。但本文保护方案依据换流变两侧 CFC 的相对方向变化构造保护判据, 相比之下, 受谐波的影响较小, 不会出现保护拒动的问题。

3) 本文保护方案具有较强的抗异常数据能力, 某个采样点的数据丢失, 对 CFC 相对方向的变化影响极其微小, 不会影响保护方案的判断。

4) 新保护判据简单易行, 仅采用网侧和阀侧 CFC 构造判据, 能够有效解决换流变直流偏磁和高阻故障引起的保护拒动问题, 具有较高的可靠性。

6 结论

通过对变压器区内区外故障时 CFC 方向的理论分析, 本文提出了一种基于 CFC 时频矩阵相角差的差动保护判据, 该判据通过 S 变换计算时频矩阵, 利用时频矩阵相角差来描述 CFC 方向的变化, 从而快速地识别换流变的区内区外故障。仿真结果表明, 本文所提保护判据可以在一个工频周期内快速准确地辨识换流变的区内和区外故障, 在直流偏磁和过渡电阻的情况下仍具有较高的可靠性, 可以有效降低差动保护误动风险。

参考文献

- [1] 翁汉琍, 郭伟达, 李昊威, 等. 涌流工况下换流变压器零序差动保护误动对策[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 143-149.
WENG Hanli, GUO Yida, LI Haowei, et al. Countermeasures for mal-operation of zero-sequence differential protection of converter transformer under inrush current condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 143-149.
- [2] 翁汉琍, 刘雷, 林湘宁, 等. 涌流引起换流变压器零序过电流保护误动的机理分析及对策[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 171-178.
WENG Hanli, LIU Lei, LIN Xiangning, et al. Mechanism and countermeasures of mal-operation of converter transformer zero-sequence overcurrent protection caused by inrush currents[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 171-178.
- [3] 韩伟, 孟沛戡, 刘超, 等. 高压直流输电系统接入下的交流系统不对称故障下序网等值及短路电流算法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(23): 38-46.
HAN Wei, MENG Peiyu, LIU Chao, et al. Sequence

- network equivalence and short-circuit current algorithms for asymmetric faults of AC systems with HVDC connection[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(23): 38-46.
- [4] 辛恩承. 高压直流输电线下空间电荷与电场的关系研究[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(5): 38-42.
XIN Encheng. Research on the relationship between space charge and electric field under high voltage direct current transmission line[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(5): 38-42.
- [5] 宋伟, 张波, 黄军, 等. 直流输电地中回流对高速铁路系统影响的仿真研究[J]. *智慧电力*, 2020, 48(11): 9-15.
SONG Wei, ZHANG Bo, HUANG Jun, et al. Numerical analysis of influence of ground return current in HVDC ground electrode on high speed railway system[J]. *Smart Power*, 2020, 48(11): 9-15.
- [6] 蔡泽祥, 李晓华. 直流输电系统故障暂态和继电保护动态行为[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [7] 徐光福, 陈俊, 姜淼, 等. 基于 EPON 自同步的差动保护采样同步方法[J]. *供用电*, 2019, 36(2): 35-41.
XU Guangfu, CHEN Jun, JIANG Miao, et al. The sampling synchronization method for differential protection based on epon self-synchronization[J]. *Distribution & Utilization*, 2019, 36(2): 35-41.
- [8] 王廷凤, 余江, 许健, 等. 基于 5G 无线通信的配电网自适应差动保护技术探讨[J]. *供用电*, 2019, 36(9): 18-21, 27.
WANG Tinghuang, YU Jiang, XU Jian, et al. Discussion on adaptive differential protection technology of distribution network based on 5G wireless communication[J]. *Distribution & Utilization*, 2019, 36(9): 18-21, 27.
- [9] 戎子睿, 林湘宁, 金能, 等. 基于相空间轨迹识别和多判据融合的变压器保护新策略[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(6): 1924-1937.
RONG Zirui, LIN Xiangning, JIN Neng, et al. A new transformer protection scheme based on the recognition of phase space trajectory and multi-criteria fusion[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(6): 1924-1937.
- [10] 曾杰, 张禄亮, 吴青华. 基于形态学骨架的变压器差动保护[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(23): 68-76.
ZENG Jie, ZHANG Luliang, WU Qinghua. Morphological skeleton based differential protection for power transformers[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(23): 68-76.
- [11] 翁汉琰, 武文昊, 王胜, 等. 换相失败对换流变差动保护影响分析及对策研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(15): 19-29.
WENG Hanli, WU Wenhao, WANG Sheng, et al. Influence of commutation failure on differential protection of converter transformers and its countermeasures[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(15): 19-29.
- [12] DENG Yujia, LIN Sheng, FU Ling, et al. New criterion of converter transformer differential protection based on wavelet energy entropy[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(3): 980-990.
- [13] ZHAO Yucong, CROSSLEY P. Impact of DC bias on differential protection of converter transformers[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2020, 115.
- [14] 郑涛, 陈佩璐, 刘连光, 等. 计及直流偏磁的电流互感器传变特性对差动保护的影响[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(20): 89-93.
ZHENG Tao, CHEN Peilu, LIU Lianguang, et al. Transferring characteristics of current transformer affected by DC magnetic bias and its impact on differential protection[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(20): 89-93.
- [15] PAN Zhuohong, WANG Xiaomao, TAN Bo, et al. Potential compensation method for restraining the DC bias of transformers during HVDC monopolar operation[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(1): 103-111.
- [16] 林磊, 陈川, 胡鑫, 等. 不同故障下特高压换流变压器差动保护动作特性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(21): 123-133.
LIN Lei, CHEN Chuan, HU Xin, et al. Research on the characteristics of ultra-high voltage converter transformer differential protection under the internal and external faults[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(21): 123-133.
- [17] 李盼, 娄钊瑜, 马康, 等. 一种自适应 S 变换在电能质量特征提取中的应用[J/OL]. *中国电机工程学报*: 1-9[2021-07-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20210205.1126.001.html>.
LI Pan, LOU Zhaoyu, MA Kang, et al. Application of adaptive S-transform in power quality feature extraction[J]. *Proceedings of the CSEE*: 1-9[2021-07-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20210205.1126.001.html>.
- [18] ZHAO Wenjing, SHANG Liqun, SUN Jinfan. Power quality disturbance classification based on time-frequency domain multifeature and decision tree[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(4): 337-342. DOI: 10.1186/s41601-019-0139-z.
- [19] 王媛媛, 殷惠, 林成, 等. 基于 S 变换与 RF 算法的高压发电机定子单相接地保护[J]. *电力系统自动化*,

- 2018, 42(22): 194-199.
- WANG Yuanyuan, YIN Hui, LIN Cheng, et al. Stator single-phase-to-ground fault protection for powerformers based on s-transform and random forest algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 194-199.
- [20] 李泽文, 贺子凝, 郭田田, 等. 基于时频矩阵相似度的输电线路暂态保护方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 121-128.
- LI Zewen, HE Zining, GUO Tiantian, et al. Transient protection method for transmission lines based on similarity of time-frequency matrix[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 121-128.
- [21] STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R P. Localization of the complex spectrum: the S transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4): 998-1001.
- [22] LIANG Chengbin, TENG Zhaosheng, LI Jianmin, et al. A Kaiser window-based S-transform for time-frequency analysis of power quality signals[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17: 965-975.
- [23] 李钊, 邹贵彬, 许春华, 等. 基于S变换的HVDC输电线路纵联保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1228-1235.
- LI Zhao, ZOU Guibin, XU Chunhua, et al. S-transform based pilot protection method for HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1228-1235.
- [24] 蒋伟. 变压器直流偏磁及其治理[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2017.
- [25] 李长云, 李庆民, 李贞, 等. 直流偏磁条件下电流互感器的传变特性[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 127-132.
- LI Changyun, LI Qingmin, LI Zhen, et al. Transfer characteristics of current transformers with DC bias[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 127-132.
- [26] 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 Jinchun. 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.
- [27] 杨杰, 吴浩, 董星星, 等. 基于电流故障分量特征和随机森林的输电线路故障类型识别[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 53-63.
- YANG Jie, WU Hao, DONG Xingxing, et al. Transmission line fault type identification based on the characteristics of current fault components and random forest[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 53-63.
- [28] 胡松, 江亚群, 黄纯. 基于偏度系数的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1954-1959.
- HU Song, JIANG Yaqun, HUANG Chun. Identification method of transformer inrush current based on skewness coefficient[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1954-1959.
- [29] 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.
- [30] 徐岩, 周霏霏. 基于幅值特征的变压器励磁涌流和故障电流的识别[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 205-209.
- XU Yan, ZHOU Feifei. A method to distinguish inrush current of power transformer from fault current based on amplitude characteristics[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 205-209.
- [31] 邹国平, 姚晖, 何文林, 等. 溪洛渡—浙西±800 kV 特高压直流输电工程受端电网直流偏磁治理[J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 543-550.
- ZOU Guoping, YAO Hui, HE Wenlin, et al. DC bias suppression of receiving-end power grid in ±800 kV Xiluodu-Zhexi UHVDC Project[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2): 543-550.

收稿日期: 2021-08-01; 修回日期: 2021-09-04

作者简介:

邓祥力(1973—), 男, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 631236110@qq.com

陈兴霖(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 1160952512@qq.com

(编辑 许威)