

基于 apFFT 的双馈风电场送出变压器差动保护方法

金恩淑, 张宏鹏, 胡晓晨, 朱 宏

(现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 132012)

摘 要: 双馈风电场在低电压穿越策略下所输出的短路电流存在偏频特性, 导致送出变压器传统差动保护动作延时过长。针对上述问题, 首先, 研究了低电压穿越策略下的双馈风机短路电流特性及其偏频特性对风电场送出变压器傅里叶工频算法提取二次谐波分量的影响; 其次, 分析了传统差动保护在双馈风电场送出变压器中的适应性; 然后, 提出了基于全相位快速傅里叶变换(all-phase fast Fourier transform, apFFT)的双馈风电场送出变压器差动保护新方法; 最后, 通过 PSCAD/EMTDC 仿真对所提方法进行了验证, 结果表明, 新方法不仅能够正确识别励磁涌流, 而且提高了内部故障时差动保护的速动性。

关键词: 双馈风电场; 送出变压器; 全相位快速 Fourier 变换; 间谐波; 差动保护; 励磁涌流

Method of Differential Protection for Double-fed Wind Farm Outgoing Transformer Based on All-phase Fast Fourier Transform

JIN Enshu, ZHANG Hongpeng, HU Xiaochen, ZHU Hong

(State Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: The short-circuit current provided by a double-fed wind farm under the LVRT strategy has a bias frequency characteristic, which leads to a long delay in the action of the conventional differential protection of the sending transformer. To address these problems, firstly, the short-circuit current characteristics of double-fed wind turbines under LVRT strategy and its bias frequency characteristics are analyzed, and the influence of the Fourier frequency algorithm on the extraction of the second harmonic component of the wind farm send-out transformer is investigated; secondly, the adaptability of the traditional differential protection in the send-out transformer of double-fed wind farms is analyzed; and then, a new differential protection method for the send-out transformer of double-fed wind farms based on the full-phase fast Fourier transform is proposed. Finally, the proposed method is validated by PSCAD/EMTDC simulation, and the results show that the new method can be utilized to not only correctly recognize the excitation inrush current, but also improve the rapidity of the differential protection in case of internal faults.

Key words: double-fed wind farms; outgoing transformer; all-phase fast Fourier transform; interharmonic; differential protection; excitation inrush current

0 引言

风能作为可再生清洁能源, 是能源战略布局中重要的一部分^[1-4]。双馈感应发电机(doubly-fed induction generation, DFIG)具有可变速恒频发电、可靠性高等优点, 是目前应用最广泛的风电机组类型^[5]。当大规模风电接入以后, 为保证电网发生故障时风机能够持续并网运行一定时间, DFIG 应具有低电压穿越能力成为硬性要求。DFIG 通常配备撬棒(Crowbar)保护电路以实现低电压穿越。

双馈风电场送出变压器作为传输电能的枢纽具有十分重要的作用, 其保护能够正确区分变压器励磁涌流与内部故障并且可靠动作是双馈风电场送出系统安全稳定运行的基础。目前双馈风电场送出变压器通常采用基于二次谐波制动原理的差动保护^[6-7]。但双馈风电场与常规电源不同, 当双馈风电场送出变压器发生内部故障, DFIG 机端电压跌落, 转子侧电流超过 Crowbar 保护电路阈值时, Crowbar 保护电路投入使得风电场侧输出的短路电流出现偏频特性, 这将导致以傅里叶工频算法为基础的变压器差动保护无法准确提取差动电流中的二次谐波含量, 从而造成差动保护动作延时长甚至拒动^[8-9]。因

基金资助项目: 国家自然科学基金(52277170)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (52277170).

此, 基于二次谐波制动原理的差动保护已经不能适用于双馈风电场送出变压器, 有必要研究一种能够适用于双馈风电场送出变压器保护的新方法。

针对双馈风电场送出变压器传统差动保护动作延时长的问题, 国内外学者做了许多研究。文献[10]提出计算瞬时励磁电感值的保护新方法, 但电感的计算需用电压互感器对电压进行测量, 增大了投入成本同时还有 TV 断线带来保护不能正确动作的风险。文献[11]提出利用同步挤压小波变换(synchrosqueezed wavelet transform, SWT)对变压器差动电流提取基频分量, 拟合电流二维轨迹图斜率的方法区分区内故障与励磁涌流, 该方法需要故障后的数据较多, 存在保护延时问题。文献[12]提出通过希尔伯特黄变换计算变压器两侧电流瞬时频率差的保护方法, 而希尔伯特黄变换计算需要经过复杂的迭代, 对保护设备要求较高。文献[13]提出通过去趋势分析得到去趋势残差函数, 再结合电流波形斜率特征实现对励磁涌流与内部故障识别的方法, 但在分析算法中子序列长度的选择会受采样频率等因素的影响, 如果选择不当可能会降低保护动作的正确率。

本文针对低电压穿越策略下, 双馈风电场短路电流特性以及短路电流偏频特性对风电场送出变压器傅里叶工频算法提取二次谐波分量的影响, 进行理论分析, 在此基础上, 提出一种基于 apFFT 检测非整数倍谐波即间谐波的差动保护方法。此方法利用双馈风电场低电压穿越策略下变压器差动电流中存在较多间谐波, 而励磁涌流时差动电流中几乎无间歇波的特征, 应用 apFFT 对差动电流进行间谐波幅值计算, 提取其最大值作为保护判据, 以正确判别变压器内部的故障与励磁涌流。最后, 通过 PSCAD/EMTDC 平台仿真验证了所提方法在各种运行工况下的可靠性、速动性与灵敏性。

1 低电压穿越策略下 DFIG 的短路电流特性及其影响

1.1 DFIG 短路电流特性分析

搭建的双馈风电场送出系统仿真模型如图 1 所示。风电场由 60 台 DFIG 组成, 单台双馈风电机组基本参数如表 1 所示。表中参数的标幺值以额定容量与额定电压为基准值。35 kV 母线处配备 Z 型接地变, 风电场送出系统参数如表 2 所示。

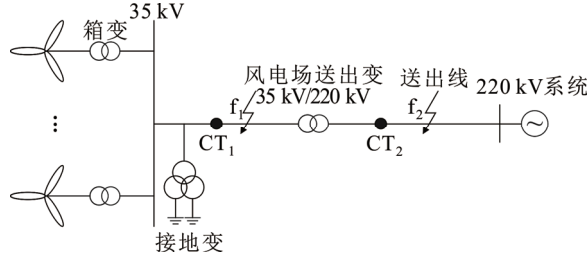


图 1 风电场送出系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the wind farm delivery system

表 1 单台双馈风电机组参数

Table 1 Single double-fed wind turbine parameters

参数	数值	参数	数值
额定容量/MW	1.5	额定电压/kV	0.69
定子电感/pu	0.168	转子电感/pu	0.152
定子电阻/pu	0.008	转子电阻/pu	0.006
定转子互感/pu	3.48	额定频率/Hz	50

表 2 风电场送出系统参数

Table 2 Wind farm delivery system parameters

名称	参数	数值
箱变	额定变比	0.69 kV/35 kV
	额定容量/MW	1.6
风电场送出变压器	额定变比/kV	35/220
	额定容量/MW	100
	接线方式	YNd11
	阻抗电压百分比/%	6
220 kV 系统	正序阻抗/ Ω	6
	零序阻抗/ Ω	11
	短路容量/(MV·A)	960

DFIG 定子侧直接与电网相连, 为实现变速恒频发电, 转子侧通过两个背靠背三相 PWM 变换器间接与电网相连^[14-15]。DFIG 转子侧配备了 Crowbar 保护电路, 以防止转子侧过电流而损坏变换器并实现低电压穿越。

电网故障的严重程度决定 Crowbar 保护电路是否投入。以电网发生对称故障为例。当电网发生轻微故障时, DFIG 的机端电压跌落幅度小, 转子电流未达到 Crowbar 保护阈值, Crowbar 保护电路不投入^[16]。定子暂态短路电流 I_s ^[17-19]为:

$$I_s = \frac{U_{s2}}{j\omega_s L_s} e^{j\omega_s t} + \frac{U_{s1} - U_{s2}}{j\omega_s L_s} e^{j\omega_s t_0} e^{-\frac{R_s t}{L_s}} - \frac{L_m I_r}{L_s} \quad (1)$$

式中: L_m 、 L_s 分别为励磁电感与定子电感; R_s 为定子电阻; ω_s 为同步角速度; U_{s1} 、 U_{s2} 分别为故障前、后 DFIG 机端电压; I_r 为转子电流; t_0 为故障时刻。

当电网发生严重故障时, DFIG 机端电压跌落幅度大, 转子电流超过 Crowbar 保护阈值, Crowbar

电路投入。此时转子侧变流器被闭锁, 转子回路电压降为零, 其等效电路如图 2 所示。

由图 2 可知, 投入 Crowbar 保护电路后, 空间矢量法下 DFIG 的暂态模型可表示为:

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + \frac{d\psi_s}{dt} \\ 0 = R_r^c I_r + \frac{d\psi_r}{dt} - j\omega_r \psi_r \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \psi_r = L_r I_r + L_m I_s \end{cases} \quad (3)$$

式中: $R_r^c = R_c + R_r$, 为 Crowbar 电路投入后的等效电阻; R_c 为 Crowbar 电阻; R_r 为转子电阻; ψ_s 、 ψ_r 分别为定、转子磁链; ω_r 为转子角速度。

定子暂态短路电流^[19]为:

$$I_s = A e^{j\omega_s t} + B e^{j\omega_s t_0} + C e^{j\omega_s t} e^{-\tau_s t} \quad (4)$$

其中:

$$A = -\frac{(U_{s1} - U_{s2})L_r}{j\omega_s \sigma} \left(1 - \frac{jR_c L_m^2 / \sigma}{L_r (s\omega_s + jR_c L_s / \sigma)} \right) \quad (5)$$

$$B = -\frac{(U_{s1} - U_{s2})L_r}{j\omega_s \sigma} \left(1 - \frac{jR_c L_m^2 / \sigma}{L_r (jR_c L_s / \sigma - \omega_r)} \right) \quad (6)$$

$$C = \frac{L_m}{\sigma} \left(\frac{L_r U_{s1} e^{j\omega_s t_0}}{j\omega_s L_m} - \frac{U_{s2} R_c L_m / \sigma e^{j\omega_s t_0}}{s\omega_s^2 + j\omega_s R_c L_s / \sigma} - \frac{(U_{s1} - U_{s2})R_c L_m / \sigma}{jR_c L_s / \sigma \omega_s - \omega_s \omega_r} \right) \quad (7)$$

式中: $\tau_s = R_s L_r / (L_s L_r - L_m^2)$, 是转子回路衰减时间常数; $\tau_r = R_c L_s / (L_s L_r - L_m^2)$, 为转子回路衰减时间常数; $s = 1 - \omega_r / \omega_s$, 为转差率; $\sigma = L_m^2 - L_s L_r$ 。

由式(4)可知, Crowbar 保护电路投入后, DFIG 定子暂态短路电流主要由 3 项构成: 第 1 项为强制基频分量, 即以同步速度旋转的交流分量; 第 2 项为暂态自由分量, 即衰减的直流分量; 第 3 项为衰减的转速频率分量, 是故障初期短路电流的主要成分。在故障初期, 转子电流的暂态分量在定子侧耦合出转速频率电动势, 从而产生转速频率电流, 其大小与机端电压跌落程度、转子转速、机组参数等因素有关。由于 DFIG 转子转速标幺值通常为 0.7~1.3, 转速频率分量频率在 35~65 Hz 之间^[20], 因此会以间谐波的形式存在于短路电流中, 并导致风电场送出短路电流产生频率偏移现象, 即存在偏频特性。

1.2 偏频特性对傅里叶工频算法提取二次谐波分量的影响

假设风电场侧短路电流信号 $i_s(t)$ 为:

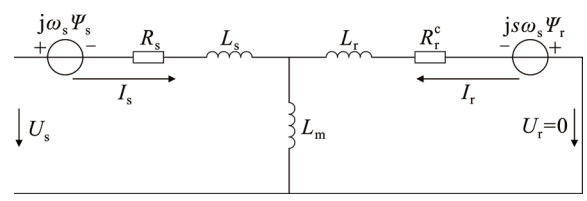


图 2 Crowbar 投入后 DFIG 等效电路

Fig.2 DFIG equivalent circuit after Crowbar input

$$i_s(t) = \sin(\lambda \omega_1 t + \varphi) \quad (8)$$

式中: $\lambda = \omega / \omega_1$, 为偏频系数; ω 为实际角频率; ω_1 为工频 50 Hz; φ 为当前时刻的相角。

基于全波傅里叶算法下的基频相量余弦、正弦系数为:

$$\begin{cases} I_{\cos} = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i_s(t) \cos(\omega_1 t) dt \\ I_{\sin} = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} i_s(t) \sin(\omega_1 t) dt \end{cases} \quad (9)$$

短路电流基频分量的幅值为:

$$|I_1| = \sqrt{I_{\sin}^2 + I_{\cos}^2} = \frac{\sin(\lambda \pi)}{\pi(1 - \lambda^2)} \sqrt{2(1 + \lambda^2) + 2(1 - \lambda^2) \cos\left(2(\varphi_0 + \frac{2\lambda n \pi}{N})\right)} \quad (10)$$

式中: φ_0 为采样信号的初始相角; n 为当前采样点; N 为采样点数。

由式(10)可知, 当频率发生偏移时, 短路电流基频分量的幅值将不再保持恒定, 其大小与偏频系数有关。同理, 可得短路电流二次谐波分量幅值为:

$$|I_2| = \frac{\sin(\lambda \pi / 2)}{\pi(1 - \lambda^2 / 4)} \sqrt{2 + \lambda^2 / 2 + (2 - \lambda^2 / 2) \cos\left(2(\varphi_0 + \frac{\lambda n \pi}{N})\right)} \quad (11)$$

由式(11)可知, 二次谐波分量幅值也不再保持恒定, 同样与偏频系数大小有关。

定义二次谐波占比 K_1 为短路电流中二次谐波与基波幅值之比, 即:

$$K_1 = |I_2| / |I_1| \quad (12)$$

图 3 为偏频系数 λ 不同情况下, 短路电流基波分量幅值、二次谐波分量幅值与二次谐波占比 K_1 。

由图 3 可知, 发生频率偏移时, 短路电流基波幅值与二次谐波幅值均产生明显波动, 导致二次谐波占比 K_1 计算不准确。

双馈风电场送出变压器差动电流由变压器两侧短路电流计算所得, 当短路电流频率发生偏移时,

由于短路电流基波与二次谐波分量幅值的波动同样会导致双馈风电场送出变压器差动电流中的二次谐波占比计算不准确, 从而会引起以傅里叶工频算法为基础的二次谐波判据不准确, 因此有必要对传统差动保护在双馈风电场送出变压器中的适应性进行分析。

2 基于二次谐波制动原理的差动保护适应性分析

2.1 二次谐波制动式差动保护原理

以 A 相为例, YNd11 接线的变压器差动电流 I_d 与制动电流 I_{res} 为:

$$\begin{cases} I_d = |I_{YA} - I_{YB} + I_{dA}| \\ I_{res} = \frac{1}{2} |I_{YA} - I_{YB} - I_{dA}| \end{cases} \quad (13)$$

式中: I_{YA} 、 I_{YB} 为流入变压器星侧 A、B 相电流相量值; I_{dA} 为流入变压器角侧 A 相电流相量值; 电流均已归算至高压侧。

比率制动式差动保护动作方程为:

$$\begin{cases} I_d > I_{d,0}, I_{res} \leq I_{res,0} \\ I_d > I_{d,0} + K(I_{res} - I_{res,0}), I_{res} > I_{res,0} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $I_{d,0}$ 为最小动作电流; $I_{res,0}$ 为最小制动电流; K 为比率制动特性斜率。

定义“87R”为比率制动式差动保护动作信号, 当差动电流与制动电流的条件满足式(14)时, 比率式差动保护动作, 即 87R=1, 保护启动; 否则 87R=0, 保护处于闭锁状态。

二次谐波制动采取或门制动方式, 有一相差流的二次谐波含量超过保护阈值即判为励磁涌流, 闭锁差动保护^[21], 其制动判据为:

$$I_{d2} > K_2 I_{d1} \quad (15)$$

式中: I_{d2} 为差动电流的二次谐波幅值; I_{d1} 为差动电流基波幅值; K_2 为二次谐波制动比, 通常取 0.12~0.15。

定义“87BL”为二次谐波制动信号, 当差动电流二次谐波幅值与基波幅值满足式(15)时, 二次谐波制动 87BL 发出制动信号, 即 87BL=1, 保护闭锁; 否则 87BL=0, 保护开放。

2.2 传统差动保护的适应性分析

本节分别对励磁涌流、不同故障类型工况下, 传统差动保护在双馈风电场送出变压器中的适应性进行分析。

2.2.1 励磁涌流

励磁涌流大小与变压器合闸角及剩磁有关^[22]。

图 4 为 $t=1$ s 时空载合闸, A 相剩磁为 70%、合闸角为 0° 时, A 相差动电流波形及比率制动式差动保护 87R、二次谐波制动 87BL 与 Trip 跳闸信号。图 5 为不同合闸角与不同剩磁下的二次谐波占比。

由图 4 可知, 变压器深度饱和, 产生很大的励磁涌流, 因此合闸 2 ms 后, 比率制动式差动保护

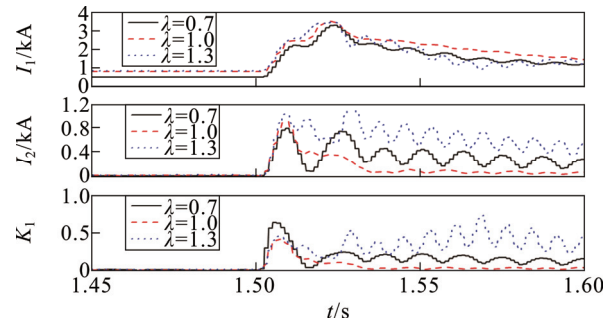


图 3 短路电流基波幅值、二次谐波幅值及 K_1

Fig.3 Short-circuit current fundamental amplitude, second harmonic amplitude and K_1

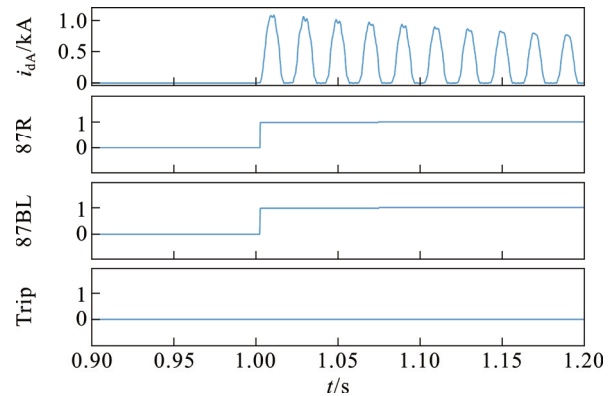


图 4 励磁涌流的差动电流波形及保护动作情况

Fig.4 Differential current waveform and protection action of excitation inrush current

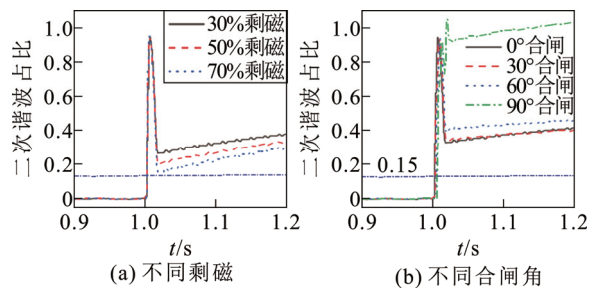


图 5 不同工况下的励磁涌流二次谐波占比

Fig.5 Excitation inrush current second harmonic percentage under different operating conditions

87R 动作,但由于 87BL 发出制动信号,判为励磁涌流,保护被闭锁可靠不动作。由图 5 可知,不同工况下的励磁涌流,二次谐波占比均高于阈值,传统差动保护均能够可靠不动作。

2.2.2 双馈风电场送出变压器内部故障

图 6 为双馈风电场送出变压器在 $t=1.5$ s 时角侧发生三相短路故障时的差动电流与制动电流比、差动电流二次谐波占比和差动保护动作情况。

由图 6 可知,故障发生后,三相差动电流与制动电流比迅速增大,故障后 1 ms 超过阈值 0.5,比率制动式差动保护 87R 动作。但在 1.5~1.52 s 这段时间内,三相差动电流二次谐波占比均高于阈值 0.15,87BL 发出制动信号,保护闭锁,直到故障后 20 ms,87BL 停止发出制动信号,判为内部故障,保护动作,如图 6(c)所示。

综上所述,双馈风电场送出变压器在励磁涌流时,传统差动保护均能够可靠闭锁;但在内部故障时,由于差动电流中二次谐波含量大且衰减较慢,导致传统差动保护动作延时过长,因此有必要研究一种适用于双馈风电场送出变压器的保护新方法。

3 基于 apFFT 间谐波检测的双馈风电场送出变压器差动保护方法

3.1 差动电流频谱分析

由上述分析可知,当双馈风电场送出变压器发生内部故障时,在低电压穿越策略下,风电场输出的短路电流存在偏频特性,使得基于傅里叶工频算法的变压器传统差动保护中,差动电流二次谐波含量提取不准确,导致保护延时过长。因此,为分析短路电流的偏频特性对差动电流中谐波的影响,本节对不同工况下的双馈风电场送出变压器差动电流进行快速傅里叶(fast fourier transform, FFT)频谱分析。

3.1.1 励磁涌流

图 7 为不同剩磁与不同合闸角情况下,双馈风电场送出变压器发生励磁涌流的 A 相差动电流与频谱分析结果。

由图 7(a)可知,合闸角为 0° ,变压器剩磁为 70% 时,变压器严重饱和,差动电流幅值较大;随着剩磁的减小,变压器饱和程度逐渐减弱,差动电流幅值随之逐渐减小;由频谱分析可知,不同剩磁情况下,差动电流均主要由直流、基波与二次谐波分量构成,几乎不含有间谐波。由图 7(b)中的频谱分析

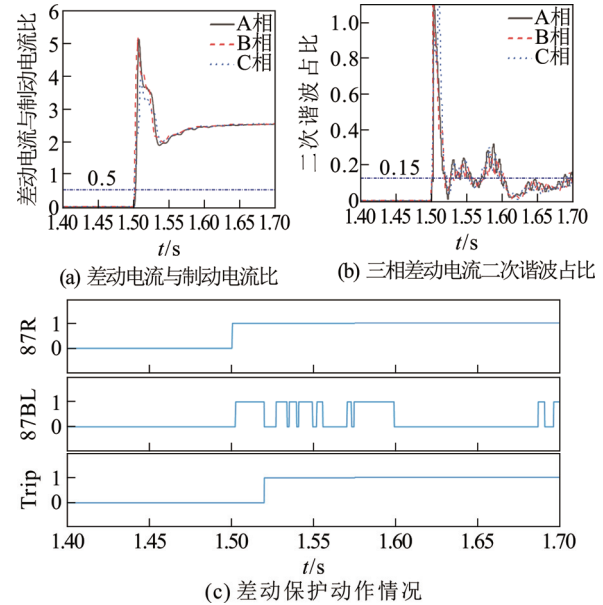


图 6 角侧三相短路的差动电流与制动电流比、差动电流二次谐波占比和差动保护动作情况

Fig.6 Second harmonic share of differential current of Angle-side three-phase short circuit

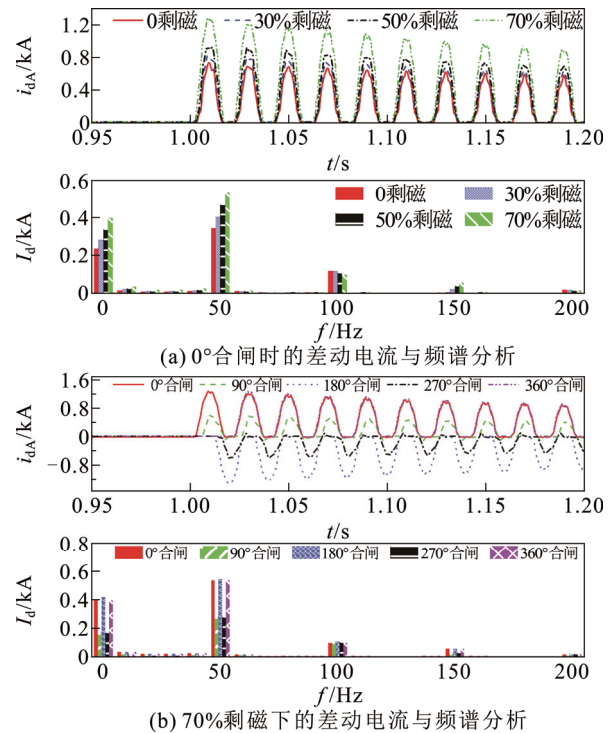


图 7 励磁涌流的差动电流与频谱分析

Fig.7 Differential current waveform and spectrum analysis of excitation inrush current

可知,与合闸角为 0° 改变剩磁情况相类似,差动电流也主要由直流、基波与二次谐波分量构成,其中几乎不含有间谐波。

3.1.2 内部故障

图 8 为双馈风电场送出变压器发生不同类型内部故障时, A 相差动电流及频谱分析结果。

由图 8 可知, 双馈风电场送出变压器发生内部故障时, 在低电压穿越策略下, 由于风电场输出短路电流存在偏频特性, 使得差动电流波形均产生明显畸变; 差动电流中不但含有较多的二次谐波分量, 还存在大量间谐波。

综上所述, 双馈风电场送出变压器在励磁涌流时差动电流中间谐波含量极少, 而内部故障时, 在低电压穿越策略下, 差动电流中存在大量间谐波。因此可利用上述特征对内部故障与励磁涌流进行判别。

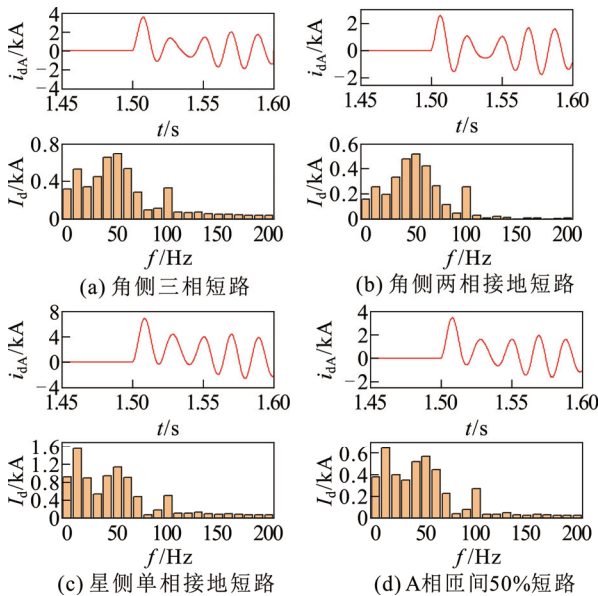


图 8 内部故障的差动电流与频谱分析

Fig.8 Differential current waveform and spectrum analysis of internal fault

3.2 apFFT 间谐波检测原理

传统 FFT 分析信号时是先将离散信号截断, 之后再对截断数据进行 FFT 计算, 这会导致分析结果出现频谱泄露。

apFFT 分析流程如图 9 所示。由图 9 可知, apFFT 在 FFT 算法之前对数据进行了预处理。首先将长度为 $(2N-1)$ 的卷积窗 W_c 与中心点 $x(0)$ 前后长度为 $(2N-1)$ 的数据分别相乘, 然后对前后间隔为 N 的加权数据进行相加得到 N 个数据, 对该数据进行 FFT 计算, 即可得到 apFFT 分析结果。apFFT 分析具体步骤如下所述。

1) 设原始谐波数据离散时间信号 $x(n)$ 为:

$$x(n) = A \sin(2\pi \frac{f_0}{f_s} n + \theta_0) \quad (16)$$

式中: $n=0, 1, 2, \dots, N-1$; f_0, f_s 分别为频率及采样频率; A 为幅值; θ_0 为初相角。

2) apFFT 将采样区间扩展为 $n=-N+1, \dots, 0, 1, 2, \dots, N-1$, 可以得到两两相加的加权数据 $y_w(n)$:

$$y_w(n) = \omega_c(n)x(n) + \omega_c(n-N)x(n-N) \quad (17)$$

式中: ω_c 为前窗 ω_1 与后窗 ω_2 的卷积。 ω_c 表达式为:

$$\omega_c(n) = \omega_1(n) * \omega_2(-n), n \in (-N+1, N-1) \quad (18)$$

3) 对以上 N 个数据进行 FFT 分析, 离散谱函数 $Y_w(k\Delta f)$ 可表示为:

$$Y_w(k\Delta f) = \frac{A}{2j} ((W \frac{2\pi(k-k_0)}{N})^2 e^{j\theta_0}) \quad (19)$$

式中: $k=0, 1, 2, \dots, N-1$; $\Delta f = f_s/N$; k_0 为峰值频点 f_0 对应的谱线号。

4) 根据离散谱函数 $Y_w(k\Delta f)$ 可得基波、各次谐波与间谐波分量幅值, 除去基波与整次谐波幅值外,

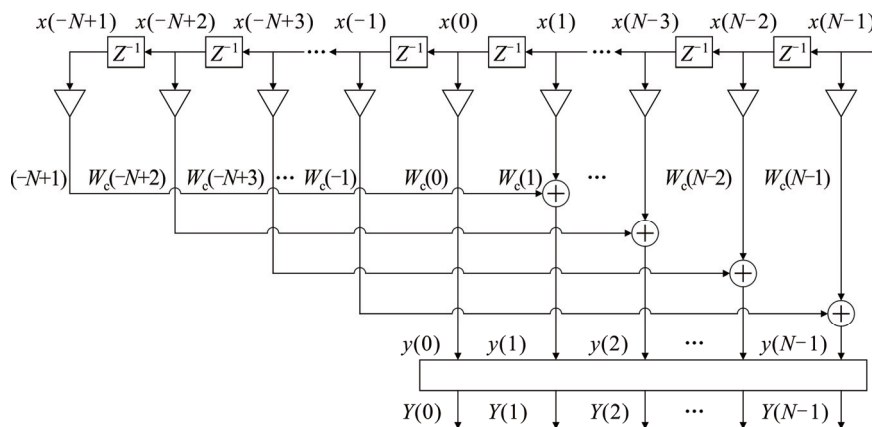


图 9 apFFT 分析流程图

Fig.9 Flow diagram of apFFT analysis

即可得到各间谐波幅值 Y 。

应用传统 FFT 分析式(16)所示的离散信号 $x(n)$ 时, 根据频域卷积定理可得其傅里叶变换结果为:

$$X(k\Delta f) = \frac{A}{2j} (W \frac{2\pi(k-k_0)}{N}) e^{j(\theta_0 - \frac{N-1}{N}(k-k_0)\pi)} \quad (20)$$

对比式(19)与式(20)可知, 传统 FFT 谱的相位值与频率偏移量 $(k-k_0)\pi$ 的大小密切相关, 而 apFFT 谱的相位值恒为 θ , 因此无论频率偏移量大小, 在谱线处所测得的相位始终是正确的, 即 apFFT 算法具有“相位不变性”的优点; apFFT 算法谱幅值为传统 FFT 谱幅值的平方, 即旁瓣谱线相对主谱线按照平方关系衰减, 使得主谱线相较于旁瓣谱线更加突出^[23-24], 因此 apFFT 具有很好的抑制频谱泄露的性能。

3.3 基于 apFFT 的双馈风电场送出变压器差动保护方法

将比率制动式差动保护作为双馈风电场送出变压器差动保护新方法的启动判据, 其动作方程如式(14)所示。当差动电流与制动电流的关系满足式(14)时保护启动, $87R=1$; 否则变压器状态为正常运行或区外故障, $87R=0$, 保护闭锁。

基于双馈风电场送出变压器差动电流在励磁涌流时, 间谐波含量极少, 而在内部故障时, 间谐波含量较大的特征, 利用 apFFT 计算得到的差动电流间谐波幅值最大值 $Y_{\max}$ 构造差动保护新方法的主判据, 即:

$$Y_{\max} > Y_{\text{set}} \quad (21)$$

定义“Trip1”为主判据的动作信号, $Y_{\max}$ 满足式(21)时, 判为内部故障, 令 $\text{Trip1}=1$, 差动保护动作; 否则 $\text{Trip1}=0$, 判为励磁涌流, 保护闭锁。

考虑其他因素引起的误差与灵敏度等问题, 令 $Y_{\text{set}}=0.132$ 。设系统采样频率为 4 kHz, 计算 $Y_{\max}$ 的数据窗长为 40 ms。具体保护算法流程如图 10 所示。

4 仿真分析

仿真模型如图 1 所示, 本章对文中所提出的双馈风电场送出变压器差动保护方法在不同工况下的有效性与可行性进行仿真分析。所有算例的电流波形均以 A 相电流为例。

4.1 励磁涌流

算例 1: 双馈风电场送出变压器在 $t=1.5$ s, 合闸角为 0° , 剩磁为 70%时空载合闸。

图 11 为算例 1 工况下差动电流、差动电流间谐波幅值最大值 $Y_{\max}$ 及差动保护新方法动作情况。由

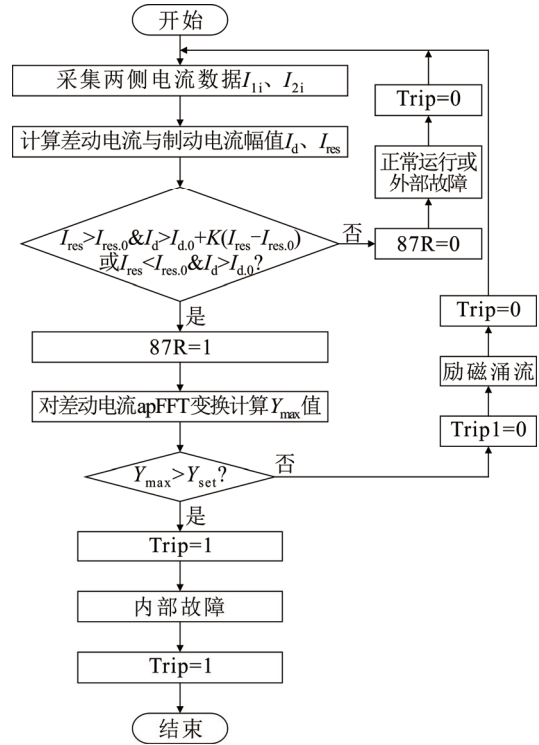


图 10 保护算法流程图

Fig.10 Flowchart of transformer protection algorithm

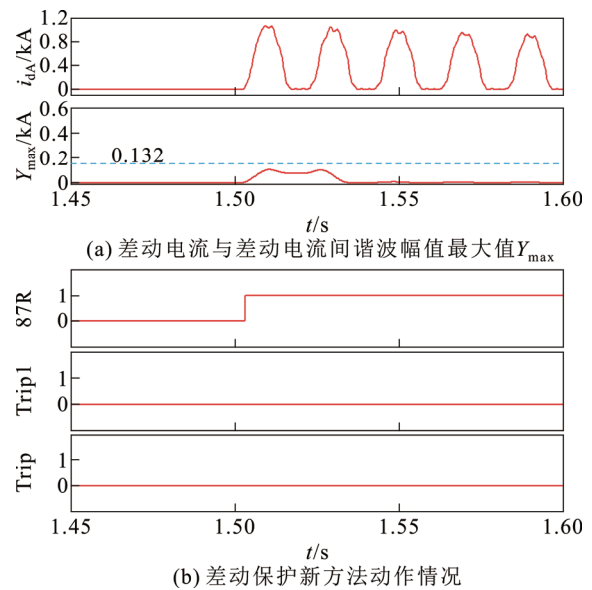


图 11 励磁涌流下的仿真波形与差动保护动作情况

Fig.11 Simulation waveform and differential protection operation of excitation surge

图 11 可知, 此时变压器铁芯严重饱和, 励磁涌流达到额定电流的 5 倍, 合闸后 2 ms, 比率制动式差动保护 87R 动作, 但由于 $Y_{\max}$ 始终处于保护阈值以下, 因此 $\text{Trip1}=0$, 判为励磁涌流, 差动保护闭锁。

通过改变合闸角与剩磁进行大量仿真实验, 结

果表明, 变压器发生励磁涌流时, 所提差动保护新方法均能够可靠闭锁。

4.2 内部故障

算例 2: 双馈风电场送出变压器角侧在 $t=1.5\text{ s}$ 时发生三相短路故障。

图 12 为算例 2 工况下差动电流、差动电流间谐波幅值最大值 $Y_{\max}$ 及差动保护新方法与传统差动保护动作情况。由图 12 可知, 故障后 1 ms, 比率制动式差动保护 87R 迅速动作, 差动电流间谐波幅值最大值 $Y_{\max}$ 迅速上升, 故障后 5 ms, $Y_{\max}$ 超过保护阈值, Trip1=1, 差动保护动作。相较于传统差动保护, 本文所提方法动作时间提前 15 ms, 显著提升了保护的速动性。

其他不同工况下, 传统差动保护与本文所提方法动作结果与动作时间如表 3 所示。由表 3 可知, 本文所提方法在各种工况下均能可靠动作, 且内部故障时保护动作时间均小于传统差动保护, 大大提高了保护速动性。

5 结论

1) 双馈风电场送出变压器发生内部故障时, 在低电压穿越策略下 DFIG 短路电流会发生频率偏移现象, 从而引起差动电流二次谐波计算不准确, 进而导致二次谐波制动将保护闭锁, 保护动作延时过长。

2) 通过对双馈风电场送出变压器差动电流的频谱分析可知, 励磁涌流时差动电流中几乎不含有间谐波, 而内部故障时在低电压穿越策略下由于频率偏移导致差动电流中含有大量间谐波。

3) 根据上述差动电流间谐波特征, 提出基于 apFFT 间谐波检测的双馈风电场送出变压器差动保护方法, 以实现励磁涌流与内部故障的正确判别。

4) 与传统差动保护对比仿真结果表明: 所提新方法在不同工况下均有良好的可靠性、速动性与灵敏性。本方法原理简单、计算量小, 为双馈风电场送出变压器的保护新方法研究提供一定的思路与参考。

参考文献 References

[1] 李 岩, 冯俊杰, 卢毓欣, 等. 大容量远海风电柔性直流送出关键技术及展望[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3384-3393.
LI Yan, FENG Junjie, LU Yuxin, et al. Key technologies and prospects of VSC-HVDC for large-capacity and long-distance offshore wind power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3384-3393.

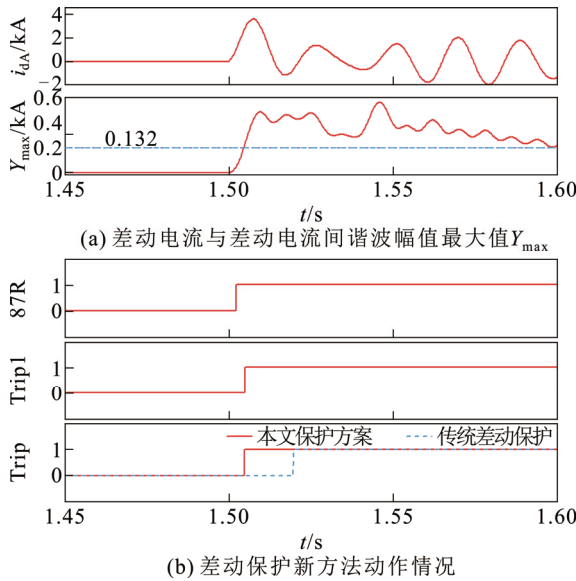


图 12 角侧三相短路的仿真波形与差动保护动作情况

Fig.12 Simulated waveforms of three-phase short circuit at corner side and differential protection action

表 3 不同运行工况下本文方法与传统方法比较
Table 3 Comparison between this paper and the traditional method under different operating conditions

故障类型	动作结果		动作时间/ms	
	传统差动保护	本文所提方法	传统差动保护	本文所提方法
正常运行	不动	不动	—	—
外部故障	不动	不动	—	—
空载合闸	不动	不动	—	—
角侧 A 相匝间短路 (匝比 50%)	动作	动作	23.5	6.0
角侧单相接地短路	动作	动作	20.0	7.3
角侧三相接地短路	动作	动作	22.0	4.5
角侧两相短路	动作	动作	21.0	5.0
星侧单相接地短路	动作	动作	17.3	5.0
星侧三相短路	动作	动作	18.0	4.2
星侧两相短路	动作	动作	17.5	3.7

[2] 郝治国, 谢 凡, 张雨宁, 等. 远海风电直流汇集送出系统直流线路继电保护技术现状与展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 1-18.
HAO Zhiguo, XIE Fan, ZHANG Yuning, et al. Status and prospects of relay protection technology for DC lines in distant offshore wind DC collection and transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 1-18.

[3] 叶 林, 裴 铭, 李 卓, 等. 风电和光伏发电功率联合预测与预调度框架[J]. 高电压技术, 2024, 50(9): 3823-3836.
YE Lin, PEI Ming, LI Zhuo, et al. Framework for joint wind and photovoltaic power forecasting and pre-dispatch[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(9): 3823-3836.

[4] 李海盼, 年 珩, 胡 彬, 等. 风电并网系统宽频振荡分析与抑制方法综述[J]. 新型电力系统, 2023, 1(3): 237-255.
LI Haipan, NIAN Heng, HU Bin, et al. Review of analysis and suppression methods for wide-band oscillation in wind power grid-connected systems[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(3): 237-255.

[5] 付元欢, 李银红, 何 璇, 等. 电网故障下计及撬棒保护的双馈感应发电机暂态解析修正模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16):

- 4591-4600.
FU Yuanhuan, LI Yinhong, HE Xuan, et al. Corrected transient analysis model of doubly fed induction generator with crowbar protection under grid fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4591-4600.
- [6] 孙志辉, 郝万君, 曹松青, 等. 基于自适应广义滑模观测器的风力发电系统故障重构[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 123-130.
SUN Zhihui, HAO Wanjuan, CAO Songqing, et al. Fault reconstruction of a wind power system based on an adaptive generalized sliding mode observer[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 123-130.
- [7] 甘俊文, 邵能灵. 基于机端电压跌落深度的双馈风机自适应短路电流计算方法[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(3): 3-9.
GAN Junwen, TAI Nengling. Research on adaptive short circuit current calculation of DFIG considering the terminal voltage dip[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 3-9.
- [8] ZHAO W J, SHANG L Q, SUN J F. Power quality disturbance classification based on time-frequency domain multi-feature and decision tree[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 27.
- [9] 张保会, 王进, 郝治国, 等. 风电接入对继电保护的影响(三)—风电场送出变压器保护性能分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 1-8.
ZHANG Baohui, WANG Jin, HAO Zhiguo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection(3): performance analysis for wind farm outgoing transformer protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 1-8.
- [10] 孙德娟, 孙士云, 范小红, 等. 基于励磁电感计算的双馈风电场送出变差动保护[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 395-407.
SUN Dejuan, SUN Shiyun, FAN Xiaohong, et al. Doubly-fed wind farm outgoing transformer differential protection based on excitation inductance calculation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 395-407.
- [11] 杨兴雄, 曲延滨, 宋慧慧, 等. 基于同步挤压小波变换的双馈风电场送出变保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 22-32.
YANG Xingxiong, QU Yanbin, SONG Huihui, et al. Wind farm transmission transformer protection based on synchrosqueezed wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 22-32.
- [12] 葛彤辉. 基于故障暂态差异的双馈风电场保护研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019: 24-30.
GE Tonghui. Research on protection of doubly-fed wind farm based on fault transient difference[D]. Qingdao, China: Shandong University of Science and Technology, 2019: 24-30.
- [13] 徐艳春, 范钟耀, 孙思涵, 等. 基于去趋势分析的大规模双馈风电场送出变压器差动保护[J]. 中国电力, 2023, 56(7): 186-197.
XU Yanchun, FAN Zhongyao, SUN Sihan, et al. Differential protection of transmission transformer for large-scale doubly-fed wind farms based on detrended analysis[J]. Electric Power, 2023, 56(7): 186-197.
- [14] 郑超, 李顺昕, 李惠玲, 等. 双馈风机机电暂态模型及规模化风光并网系统受扰特性[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 1023-1033.
ZHENG Chao, LI Shunxin, LI Huiling, et al. Electromechanical transient simulation model of double fed induction generator and disturbed characteristic of scale wind/photovoltaic hybrid system[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 1023-1033.
- [15] 姜惠兰, 王绍辉, 李希钰, 等. 考虑动态电压区间无功支撑的双馈风机连锁故障穿越控制策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 147-155.
JIANG Huilan, WANG Shaohui, LI Xiyu, et al. Cascading fault ride-through control strategy for doubly-fed wind turbines considering reactive power support in dynamic voltage range[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 147-155.
- [16] 毕天姝, 刘素梅, 薛安成, 等. 具有低电压穿越能力的双馈风电机组故障暂态特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 26-31.
BI Tianshu, LIU Sumei, XUE Ancheng, et al. Fault analysis of doubly fed induction generator wind turbines with low-voltage ride-through capability[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 26-31.
- [17] 欧阳金鑫, 熊小伏, 张涵轶. 电网短路时并网双馈风电机组的特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 17-25.
OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, ZHANG Hanyi. Characteristics of DFIG-based wind generation under grid short circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 17-25.
- [18] 杨国生, 王增平, 欧阳金鑫, 等. 考虑低电压穿越全过程的双馈风电机组短路电流计算方法[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2185-2192.
YANG Guosheng, WANG Zengping, OUYANG Jinxin, et al. Short-circuit current calculation method of DFIGWT considering entire LVRT process[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2185-2192.
- [19] 熊小伏, 欧阳金鑫. 电网短路时双馈感应发电机转子电流的分析与计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 114-121.
XIONG Xiaofu, OUYANG Jinxin. Analysis and calculation of rotor currents for doubly-fed induction generators under short circuits in power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 114-121.
- [20] 张保会, 李光辉, 王进, 等. 风电接入电力系统故障电流的影响因素分析及对继电保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 1-8.
ZHANG Baohui, LI Guanghui, WANG Jin, et al. Affecting factors of grid-connected wind power on fault current and impact on protection relay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 1-8.
- [21] 金恩淑, 刘丹阳, 夏国武. 特高压换流变压器差动保护适用性分析及改进方法[J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(1): 20-28.
JIN Enshu, LIU Danyang, XIA Guowu. Applicability analysis and improvement method of differential protection of converter transformer in UHVDC system[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2023, 43(1): 20-28.
- [22] 姚东晓, 张凯, 贺要锋, 等. 变压器多特征励磁涌流识别方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 149-154.
YAO Dongxiao, ZHANG Kai, HE Yaofeng, et al. Research on multi feature recognition scheme of transformer inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 149-154.
- [23] SINCHANA G S, PADAKI S, RAVI V, et al. Software implementation of FFT algorithms and analysis of their computational complexity[C]//Proceedings of 2018 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques. Mysuru, India: IEEE, 2018: 486-490.
- [24] 黄翔东, 王兆华. 基于全相位频谱分析的相位差频谱校正法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(2): 293-297.
HUANG Xiangdong, WANG Zhaohua. Phase difference correcting spectrum method based on all-phase spectrum analysis[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(2): 293-297.

金恩淑

1972—, 女, 博士, 教授

研究方向为电力系统继电保护

E-mail: jes222@yahoo.cn



JIN Enshu

Ph.D., Professor



ZHANG Hongpeng

Corresponding author

张宏鹏(通信作者)

1999—, 男, 硕士生

研究方向为电力系统继电保护

E-mail: 936870915@qq.com